

PROGRAMME NATIONAL d'ETUDE DU CLIMAT

DEMANDE DE FINANCEMENT 2003
formulaire détaillé

THEME (S) CONCERNÉ(S) : 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 (coordinateurs) : Alain Colin de Verdière (professeur UBO), Fabio d'Andrea (CR CNRS), Claude Frankignoul (professeur UPMC), Thierry Huck (CR CNRS), Laurent Li (CR LMD), Laurent Terray (chercheur senior CERFACS)

LABORATOIRE DU PROPOSANT : UMR 6523 CNRS IFREMER UBO, directeur : Xavier Carton
Laboratoire de Physique des Océans, UFR Sciences F308, 6 av. Le Gorgeu
Université de Bretagne Occidentale, BP 809, 29285 Brest cedex
Tél. : 02 98 01 65 10 – Fax : 02 98 01 64 68 – Email : thuck@univ-brest.fr

Titre du projet : Variabilité décennale et prévisibilité 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 tourne autour des questions scientifiques suivantes :

- 1– Quelle est la réponse océanique 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) et ses mécanismes (linéaire, transitoire) ?
- 3– Existe-t'il des modes naturels de variabilité de l'océan ou du système couplé, quels sont leurs mécanismes conceptuels et leur signature dans des configurations réalistes ?
- 4– Quel est le potentiel de prévisibilité du climat sur la région Atlantique Nord-Europe aux échelles interannuelles à (pluri-)décennales, ses mécanismes, et sa sensibilité à la connaissance de l'état initial et des conditions aux limites ?

Liste des personnes collaborant au projet (avec indication de leur unité CNRS de rattachement) :

Laurent Terray, chercheur CERFACS	SUC	30%	prévisibilité
Delon, CR2	LA	40%	(pendant 6 mois) prévisibilité
Arnaud Jouzeau, doctorant	SUC	100%	prévisibilité
Maisonave, IR	SUC	30%	prévisibilité
Fabio D'Andrea, CR1 CNRS	LMD	30%	couplé simplifié (flux de chaleur)
Sébastien Conil, doctorant et ATER ENS	LMD	80%	couplé IPSL
Laurent Li, CR CNRS	LMD	40%	couplé IPSL
Gaëlle de Coëtlogon, postdoc	LODYC	100%	(jusqu'au printemps 2003)
Sabine Février, MC IPMC	LODYC	50%	variations Gulf Stream
Claude Frankignoul, professeur UPMC	LODYC	20%	rôle principal dans thème A1
Christophe Herbaut, CR1 CNRS	LODYC	30%	océan forcé
Marie-Noëlle Houssais, CR1 CNRS	LODYC	20%	océan forcé
Jérôme Sirven, MC UPMC	LODYC	50%	océan forcé
Olivier Arzel, doctorant MENRT	LPO	100%	couplé simplifié
Cécile Cabanes, postdoc IFREMER	LPO	100%	altimétrie
Alain Colin de Verdière, professeur UBO	LPO	40%	couplés simplifiés
Eduardo Costa, postdoc	LPO	20%	altimétrie et marégraphie
Thierry Huck, CR2 CNRS	LPO	60%	modes de bassin, stabilité
Guillaume Maze, doctorant MENRT	LPO	100%	couplé simplifié

Durée du contrat demandé : 1 an renouvelable

Montant demandé cette année : 32,2 keuro

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 décennale océan-atmosphère ont été mis en évidence dans les observations comme dans des intégrations avec des GCM couplés océan-atmosphère. Dans l'Atlantique Nord, ces modes font principalement intervenir la NAO, la couche superficielle océanique et l'ajustement des gyres subtropicale et subpolaire aux changements du vent et des flux de flottabilité. Ainsi, 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.

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

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 le GCM couplé ECHAM1/LSG du MPI Hamburg (Zorita et Frankignoul 1997; Frankignoul et al. 2000) et plus encore dans celui du GFDL (Delworth et Greatbatch 2000), tandis qu'il semble jouer un rôle actif dans le modèle HOPE (Latif et Barnett 1994, Grotzner et al. 1998) ou celui du Hadley Centre (Wu and Rodwell 2002). 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.

2. Inversement, quelle est la réponse atmosphérique à des anomalies de SST extra-tropicales (suivant leur localisation, la résolution du modèle atmosphérique de l'IPSL...) ? 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 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 seront à valider en fonction des résultats des 2 parties précédentes. Notre approche inverse 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 cherchés peut-être est-il plus aisé de déterminer lesquels s'expriment dans les observations ou les simulations.

4. La prévision du climat pour des échelles temporelles allant de la saison à la décennie est principalement fondée sur l'interaction océan-atmosphère. La mémoire lente issue de l'inertie thermique et de la dynamique de l'océan constitue le signal essentiel. Comprendre la réponse de l'atmosphère à une anomalie de la température de l'océan superficiel (SST) est une étape indispensable pour comprendre l'interaction entre l'océan et l'atmosphère et pour prévoir la variation du climat. Dans l'état actuel de la recherche, la réponse du climat à une anomalie de la SST tropicale est bien maîtrisée. Ce qui permet déjà de faire des prévisions opérationnelles saisonnières et inter-annuelles à travers le signal El Niño. En revanche, l'effet d'une anomalie de la température de l'océan superficiel dans les moyennes et hautes latitudes reste largement inconnu. Ceci est partiellement dû aux caractères transitoire et tourbillonnaire de la circulation atmosphérique dans les hautes latitudes où règne l'instabilité barocline. Le rôle de l'océan extra-tropical dans la variabilité du climat ainsi que la nature du couplage océan-atmosphère sont donc des sujets à étudier en priorité.

- Quelle est la prévisibilité des fluctuations climatiques sur la région Atlantique Nord Europe aux échelles de temps interannuelle à pluri-écennale (2–30 ans) ? Si une prévisibilité existe pour une échéance donnée, quelle est sa nature (première et/ou deuxième espèce) et quels sont les processus physiques responsables de cette prévisibilité (par exemple d'éventuels modes couplés océan-atmosphère, les téléconnexions tropiques-extratropiques, etc) ? Quels sont les champs physiques et les régions géographiques (océan et atmosphère) pour lesquels cette prévisibilité est la plus importante ? Quel est le rôle de l'océan profond et des modes de variabilité lente sur la variabilité climatique aux échelles décennales ? Une étude récente a suggéré une influence possible de la circulation thermohaline (THC) sur la NAO par l'intermédiaire des transports de chaleur associés et de leur signature en température de surface, en particulier dans l'Atlantique tropical nord (Sutton et al. 2001). Or nous avons montré le rôle potentiel important des anomalies de SST dans cette région sur la variabilité de la région Nord-Atlantique Europe et en particulier sur la NAO (Cassou et Terray 2001b, Terray et Cassou 2002). On sait aussi que la NAO a une influence sur la formation des eaux profondes Nord Atlantique et sur la circulation de ces masses d'eau. Cette chaîne d'interaction pourrait donc constituer une boucle de rétroaction climatique opérant à des échelles de temps multidécennales.
- Quelle est la sensibilité de cette prévisibilité, d'une part à l'état initial de l'océan et à la phase des modes de variabilité lente (prévisibilité de première espèce) et d'autre part, aux incertitudes sur le forçage radiatif pour les décennies futures (prévisibilité de deuxième espèce) ? Peut-on estimer la probabilité d'occurrence d'un changement abrupt, par exemple un fort ralentissement de la circulation thermohaline, et les impacts climatiques associés ?

Les études numériques qui ont été menées pour répondre ce type de questions sont peu nombreuses, probablement en raison de la quantité importante d'heures de calcul nécessaire pour avoir des statistiques robustes. On peut cependant citer quelques travaux récents (Griffies et Bryan, 1997a,b ; Grötzner et al., 1999 ; Boer, 2000 ; Collins, 2001) qui se sont surtout intéressés à la prévisibilité dite de première espèce. Ces travaux ont tous utilisés des modèles couplés de circulation générale et la méthodologie suivie par ces différents auteurs est reprise et détaillée dans les sections spécifiques.

II. Bilan – état des lieux

1. Réponse océanique à la variabilité du forçage atmosphérique (CF & co.)

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. Une première étude théorique (Frankignoul et al., 1997) a suggéré à l'aide d'un modèle très simplifié que la réponse barocline de l'océan à la variabilité naturelle du pompage d'Ekman explique une partie importante de la variabilité décennale de la gyre subtropicale. Ce modèle très simple ne prend en compte ni les variations géographiques de la position de la thermocline ni l'existence des courants moyens qui leur sont associés. Nous avons donc étudié (Sirven et Frankignoul, 2000) la réponse au forçage par le pompage d'Ekman d'un modèle simplifié plus réaliste de l'océan comprenant une zone de subduction et une zone d'ombre (modèle à deux couches et demi). De plus, le spectre des fluctuations baroclines de l'océan en réponse au vent a été analysé en portant une attention particulière à l'effet de la dissipation, des non-linéarités et des variations zonales du vent (Sirven et al., 2002).

Utilisant un OGCM forcé pendant 40 ans (1958–1997) par les champs atmosphériques NCEP, Eden et Willebrand (2001) ont montré que la variabilité océanique était principalement reliée à la NAO. Ainsi, des anomalies de SST seraient formées, sous l'action de structures de vent de type NAO, au large de la côte est des États-Unis (Krahman et al. 2001). Ces anomalies seraient ensuite advectées le long de la dérive Nord-Atlantique selon un scénario similaire à celui-ci observé par Sutton et Allen (1997). Dans le prolongement de l'étude de Krahman et al. (2001), nous avons analysé la réponse de l'océan à des anomalies stochastiques de forçage de types NAO (Herbaut et al., 2002). Une oscillation décennale a été mise en évidence. Son mécanisme mêle l'advection de température moyenne par les anomalies de courant, l'advection d'anomalies de température par les courants moyens et la circulation thermohaline.

2. Réponse atmosphérique aux modifications de la circulation océanique

Les perturbations de la circulation océanique, engendrées par la variabilité atmosphérique à l'échelle intrasaisonnière–interannuelle, sont intégrées par la lenteur et l'inertie thermique de l'océan. et on pense qu'elles peuvent avoir une rétroaction sur la variabilité atmosphérique aux échelles interdécennales. De nombreux auteurs ont essayé de mettre en évidence cette rétroaction par des études basées sur les données observées (Deser et Blackmon, 1993; Sutton et Allen, 1997; Czaja et Frankignoul 2000), et modélisées (Palmer et Sun, 1988; Bladé, 1998). Ces études, dans la plupart de cas, se focalisent sur l'effet des anomalies de SST, l'étude classique mise en oeuvre consistant à intégrer des modèles du système océan–atmosphère, en mode couplé ou en mode forcé par des SST prescrites, pour mettre en évidence la réponse transitoire ou stationnaire du milieu atmosphérique soumis au forçage. Malheureusement, ces études ont donné des réponses souvent contradictoires et incomplètes. En général, les réponses atmosphériques sont faibles par rapport à la variabilité naturelle, dépendent de la saison et, il faut ajouter, du modèle utilisé. Bien que cela reste un outil fondamental, les intégrations de GCMs forcés par des anomalies de SST ont des limitations théoriques importantes. En premier lieu, elles font l'hypothèse que la capacité thermique de l'océan est infinie et que l'océan ne répond pas au forçage atmosphérique, qui est pourtant le mécanisme principal de sa variabilité. Mais plus important, et comme l'ont montré Barsugli et Battisti (1998) à l'aide d'un modèle conceptuel de l'interaction SST–circulation atmosphérique, les études à SST prescrite présentent systématiquement des déséquilibres entre la température de l'air et de l'eau à l'échelle décennale. Il en résulte des flux de chaleur à l'interface qui agissent comme des termes de dissipation supplémentaire sur les champs atmosphériques : en d'autres termes on dissipe de manière artificielle la réponse que l'on cherche à observer. Il est donc nécessaire d'envisager une nouvelle approche.

Pour cela, on peut s'inspirer du travail de Bjerknes (1964), qui a analysé l'effet des anomalies de transport méridien de chaleur dans l'océan, dues à la variabilité des gyres et de la circulation thermohaline. Bjerknes (1964) a émis l'hypothèse que l'atmosphère pouvait compenser l'anomalie de transport de chaleur par un transport dans la direction opposée, ce qui entraîne une modification des structures du vent moyen d'ouest, et par contre coup des ondes transitoires. Relativement peu d'auteurs ont repris cette hypothèse, une exception étant Sutton et Mathieu (2001), qui ont montré qu'on peut observer une réponse atmosphérique à une anomalie de chaleur même en l'absence d'anomalies de SST.

3. Modes de variabilité naturels de l'océan et du système couplé (ACdV, TH & co.)

Plusieurs modes de variabilité, intrinsèques à l'océan ou couplés, ont été étudiés :

- ♦ mode interdécennal de la circulation thermohaline (sous condition de flux de densité de constant ou quasi-constant à la surface),
- ♦ un mode interdécennal de la circulation thermohaline sous conditions de surface dites mixtes (relaxation de température, flux d'eau douce constants),
- ♦ un mode couplé entre les grands tourbillons océaniques et les vents zonaux,
- ♦ un mode couplé océan-atmosphère via les flux de chaleur, applicable au courant antarctique.

Un certain nombre de développements sont encore nécessaires pour estimer le réalisme de ces modes et leur capacité à expliquer une partie de la variabilité observée dans certaines régions du globe : modulation décennale de l'oscillation Nord Atlantique, Oscillation Multidécennale Atlantique (~70ans), Onde Antarctique Circumpolaire, ...

a. Analyse des observations dans l'Atlantique Nord et interprétation (EC,ACdV)

Une nouvelle méthode d'analyse des données a été appliquée aux variables SST-SLP de l'ensemble des 136 ans de données KAPLAN sur l'Atlantique Nord. À l'aide de cette méthode les modes d'oscillation océan-atmosphère les plus corrélés ont été mis en évidence. Une période de 7,7 ans émerge au cours de laquelle les tourbillons atmosphériques oscillent de façon stationnaire alors que la SST se propage vers l'ouest aux basses latitudes (comme un front d'ondes de Rossby) et vers le nord le long des côtes américaines (advection par le Gulf Stream). Les observations sont grossièrement consistantes avec un forçage de l'océan par le rotationnel de vent aux basses latitudes et à un forçage de l'atmosphère par l'océan aux latitudes de bifurcation du Gulf Stream (Costa et Colin de Verdière 2002).

b. Modélisation de la circulation thermohaline et de sa stabilité (TH,GKV)

Une méthode numérique d'analyse de stabilité linéaire de modèles océaniques grande échelle a été développée et testée. Facile à mettre en oeuvre, elle a permis de montrer que l'émergence de variabilité inter-décennale dans les modèles forcés par des flux de chaleur constants est due à un mode linéaire instable de mêmes caractéristiques : période, taux de croissance, structure spatiale (Huck et Vallis 2001). La méthode a ainsi été validée, ses contraintes et limites ont été estimées, elle a été implémentée de manière optimale sur la machine vectorielle de l'IDRIS afin de pouvoir traiter des problèmes de dimensions plus importantes. Il ne reste plus qu'à la mettre en oeuvre pour une analyse de stabilité généralisée d'une configuration réaliste de l'Atlantique Nord dans le modèle aux équations primitives OPA en collaboration avec Jérôme Vialard (CR IRD, LODYC). Par ailleurs un certain nombre d'expériences préliminaires ont été lancées pour estimer le rôle de plusieurs facteurs nouveaux sur le mode thermique étudié jusqu'à présent : bassin bi-hémisphérique, avec et sans ouverture du courant antarctique circumpolaire, prise en compte de la salinité et de son forçage. Aucun n'a encore empêché l'émergence du mode instable, bien que la période soit fortement affectée et tende dans les configurations les plus réalistes vers 50 à 70 ans.

c. Modes de bassin océanique (TH, MBJ)

En parallèle, une approche théorique et analytique dans des modèles océaniques encore plus simplifiés, de type quasigéostrophique et shallow-water, permet de rationaliser la variabilité de la circulation océanique, thermohaline ou forcée par le vent, en terme de modes de bassin. Des méthodes analytiques de développements asymptotiques permettent de mettre en évidence l'origine des termes d'instabilité, alors que l'approche numérique de calcul de stabilité linéaire permet de déterminer la structure des modes et leur taux de croissance dans des cas plus réalistes (Ben Jelloul et Huck 2002).

d. Interactions océan-atmosphère en canal périodique (ACdV, MLB)

Parce qu'une géométrie de canal zonal permet une décomposition spectrale, les mécanismes d'interaction océan-atmosphère sont beaucoup plus faciles à extraire. Lorsque les anomalies dans le régime des vents d'ouest aux moyennes latitudes sont approximativement stationnaires, l'atmosphère fournit un feedback positif aux anomalies de SST et une instabilité émerge. Nous avons montré comment cette instabilité peut s'appliquer à l'onde Antarctique circumpolaire (Colin de Verdière et Blanc 2001).

e. Interactions instables entre tourbillons océaniques et vent zonal (TH, OA)

Un modèle couplé océan-atmosphère simplifié a été développé pour étudier les interactions instables entre les grands tourbillons océaniques et les vents zonaux. Il consiste en un océan bidimensionnel à une couche couplé via les flux de chaleur et de quantité de mouvement à une atmosphère unidimensionnelle en équilibre d'énergie incluant une paramétrisation des vents zonaux à la Green (1970). Dans un régime de paramètres limité, ce modèle produit des oscillations de période décennale à interdécennale, concentrées dans la région inter-gyre. Un mécanisme expliquant cette variabilité est proposé et décrit dans un article en préparation (Unstable interactions between ocean gyres and zonal winds, O. Arzel et T. Huck).

4. Prévisibilité aux échelles interannuelle à pluri-décennale sur la région Atlantique Nord – Europe : origines et mécanismes (LT & co.)

a. La simulation couplée de contrôle est terminée ; 300 ans d'intégration ont été réalisés. Les premières analyses sur la variabilité basse-fréquence se sont concentrées sur l'état moyen et les fluctuations de la cellule de retournement. L'intensité de la circulation thermohaline dans l'Atlantique nord varie entre 16 et 21 Sverdrups au cours de la période retenue pour l'analyse (200 ans). L'analyse spectrale de l'indice THC (pris comme étant le maximum de la fonction de retournement dans l'Atlantique Nord) montre deux pics aux échelles décennale (10–12 ans) et multi-décennale (40–50 ans) qui se superposent à un spectre rouge caractéristique de la réponse océanique aux fluctuations atmosphériques dans le cadre du modèle stochastique. Les analyses en composantes principales (EOF) faites sur la fonction de retournement dans l'Atlantique nord montrent une structure barotrope pour le mode décennal et une structure barocline pour le mode multidécennal. Le mode décennal semble associé aux fluctuations du rotationnel de la tension de vent alors que le mode lent semble plutôt lié à de fortes anomalies de salinité et température aux hautes latitudes et en particulier en mer du Labrador. Les analyses sur les mécanismes physiques à l'origine de ces modes seront poursuivies avec en particulier l'étude des liens avec la variabilité atmosphérique de type NAO.

b. Nous avons utilisé les analyses précédentes pour le choix des conditions initiales océaniques pour les expériences de prévisibilité. Les deux années choisies correspondent à deux extrema caractérisant des phases opposées du mode multidécennal. Le premier ensemble, qui a déjà été réalisé (août–septembre 2002), a été initialisé à partir d'un état caractérisé par une circulation thermohaline forte (correspondant donc à un maximum d'amplitude positive du mode lent). La taille des ensembles est de six membres et la durée des simulations est de 25 ans. Les analyses sur ces expériences de prévisibilité débiteront dès la fin du post-processing (mi-octobre 2002).

III. Plan de recherche

1. Réponse océanique à la variabilité du forçage atmosphérique

a. Variations du Gulf Stream (CF, SF)

L'analyse des observations altimétriques et de données XBT montre que le mode principal de variabilité du Gulf Stream est un déplacement latéral dont l'échelle de temps dominante est décennale. Les fluctuations semblent essentiellement liées au forçage atmosphérique et plus précisément à la NAO, le déplacement du Gulf Stream suivant les variations de celle-ci avec un retard allant de 1 à 7 ans (Frankignoul et al. 2001). Cependant, les observations sont limitées et les mécanismes qui commandent ces déplacements ne sont pas encore bien compris. En particulier, l'importance relative du forçage par la tension de vent et les flux de poussée n'a pas été établie, ni le rôle des ondes de Rossby, du courant du Labrador ou des gyres de recirculation. En fait, la dynamique de la réponse du Gulf Stream n'est pas élucidée, ni sa relation avec l'évolution du transport méridien de chaleur et de la circulation thermohaline. Nous proposons de poursuivre ces travaux selon deux volets:

(i) Dans le cadre du programme européen PREDICATE, des simulations de différents modèles océaniques européens forcés par les données NCEP sont en cours d'analyse (comparaison avec les déplacements observés ; relation entre déplacement latéral, courants géostrophiques et transport ; relation avec la variabilité de la gyre et la circulation thermohaline). La comparaison entre les modèles et les observations devrait se terminer vers la fin du programme PREDICATE (février 2003). Cependant, l'interprétation physique et le lien avec les mécanismes de forçage nécessiteront plus de temps (Année 1). Ces travaux seront ensuite étendus à plusieurs modèles de climat couplés (celui du Hadley centre, celui de Bergen, celui du MPI et, lorsqu'elle sera disponible, la version 2° du modèle IPSL). L'avantage de ces simulations est que le forçage atmosphérique n'est pas prescrit comme dans les simulations forcées, et donc les rétroactions océan – atmosphère peuvent agir librement. En outre, de plus longues séries temporelles sont disponibles. Par contre, il pourrait y avoir des biais dans la climatologie ou des distorsions dans les modes principaux de variabilité. L'analyse des simulations couplées permettra donc à la fois de mieux comprendre les mécanismes d'interaction et de valider les modèles couplés (Année 2).

(ii) Pour élucider la dynamique fondamentale des variations du Gulf Stream, le modèle de Parsons –Veronis sera étendu au cas non-stationnaire. Ce modèle (semi-analytique) comprend une couche supérieure légère et active au-dessus d'une couche plus lourde au repos qui peut atteindre la surface si le vent est suffisamment fort. La ligne de séparation en surface entre les deux couches définit la position du Gulf Stream. La mise au point d'un tel modèle devrait permettre d'étudier la réponse du Gulf Stream aux changements de vent et, en particulier, de mieux comprendre le délai entre ses déplacements et les variations de la NAO. (Années 1 et 2)

b. Mode océanique interdécennal : mécanisme et configuration plus réaliste (CH, JS, MNH)

Depuis trois ans, un ensemble d'études a été fait à l'aide de modèles très simplifiés de circulation générale de l'océan afin de mettre en évidence les mécanismes de variabilité de l'océan en réponse à des forçages imitant la NAO. Nous avons surtout porté notre attention sur les échanges de masse et de chaleur entre les gyres subtropicales et subpolaires. Ces travaux ont permis la mise en évidence d'une oscillation entretenue par le forçage aléatoire de l'atmosphère et présentant une période autour de 25 ans. Le mécanisme à l'origine de l'oscillation est le suivant : la tension de vent force des anomalies de courant entre 35 et 40°N, qui créent des anomalies de température le

long du bord ouest. Ces anomalies sont advectées par le courant moyen dans la zone de convection et modifient la circulation thermohaline. Ce changement de la circulation thermohaline produit de nouvelles anomalies de température dans la région 35–40° N. Nous avons montré que cette oscillation est un mode propre amorti de la circulation thermohaline et que le forçage mécanique est aussi efficace pour maintenir ce mode que le forçage thermique (Herbaut et al. 2001, 2002). Nous proposons de vérifier si cette oscillation est encore présente dans un modèle un peu plus réaliste qui s'étend vers le nord jusqu'à 75° N ; le rôle de la salinité est pris en compte et un modèle simple de glace de mer est inclus en mer du Groenland. Les mécanismes associés à l'évolution de ce nouveau modèle seront analysés et l'impact de la variabilité dans les mers nordiques sur celle de la gyre subpolaire ainsi que l'effet de l'advection d'anomalies de densité de la gyre subpolaire vers les zones de convection seront en particulier détaillés. Des études de sensibilité aux forçages externes du modèle seront aussi faites. Ce travail servira d'aide à la compréhension des mécanismes intervenant dans un modèle couplé océan – glace de mer plus complexe et plus proche de la réalité qui a été mis au point au LODYC en incluant à OPA un modèle de glace de mer (Houssais et Herbaut, 2002). Ce projet est présenté dans la partie « circulation thermohaline » du projet. (Années 1 et 2).

2. Réponse atmosphérique à la variabilité océanique

a. Influence de la circulation océanique sur la NAO via les anomalies de transport méridien de chaleur (FDA)

Dans ce travail nous proposons d'explorer l'hypothèse de compensation de Bjerknes par une approche de modélisation simplifiée, basée sur le modèle le plus simple contenant tous les ingrédients du problème, c'est à dire une couche de mélange océanique et une circulation atmosphérique extra-tropicale avec des ondes planétaires et transitoires réalistes. Le but est d'expérimenter cette idée dans un cadre idéalisé pour en vérifier l'intérêt. Dans la suite on pourra appliquer les résultats obtenus au GCM couplé de l'IPSL.

Le modèle utilisé aura une partie atmosphérique basée sur l'approximation quasi-géostrophique, avec trois niveaux verticaux et une résolution spectrale T21. La partie atmosphérique sera couplée avec un modèle de couche de mélange océanique basé sur les équations de l'évolution de la SST données par Frankignoul (1988). La partie atmosphérique du modèle est déjà disponible au LMD ; elle a été la base de nombreuses études. Pour la partie océanique on pourra bénéficier du contact avec l'équipe de Claude Frankignoul au LODYC qui est en train de développer un outil similaire. Le modèle ainsi conçu a l'avantage d'être économique, ce qui permet des très longues intégrations, jusqu'à plusieurs centaines d'années en hiver perpétuel.

Une fois le modèle construit et testé, nous envisageons deux expériences : une intégration forcée par des flux de chaleur prescrit (dorénavant FCP), et une intégration avec flux de chaleur paramétrisés empiriquement (FCE).

Dans l'intégration FCP l'atmosphère et l'océan sont couplés thermiquement par les flux de chaleur à l'interface, mais un forçage est ajouté comme flux de chaleur additionnel dans l'équation des SSTs. Ce forçage est censé représenter la variabilité des SSTs due aux anomalies de transport de chaleur dans la circulation océanique. Les anomalies de SSTs, en d'autres termes, sont créées principalement par l'atmosphère, mais la circulation océanique les transporte créant des convergences et divergences de chaleur. L'expérience forcée permettra de comprendre si l'anomalie de transport de chaleur peut avoir un impact sur la circulation atmosphérique.

Dans l'intégration FCE, les anomalies de transport de chaleur seront paramétrisées en fonction de la circulation atmosphérique. Cette expérience est plus réaliste que la précédente, car les anomalies de transport de chaleur sont ainsi liées aux anomalies de la circulation océanique poussée par le vent et de la circulation thermohaline, qui sont à leur tour créées par la variabilité atmosphérique. Une manière simple de paramétriser cette dépendance, suivant Czaja and Marshall

(2000), est d'utiliser une technique de "l'oscillateur retardé", l'océan étant influencé par la variabilité atmosphérique intégrée sur les dix ans précédents. Cette expérience permettra d'étudier l'hypothèse de l'existence d'une oscillation de période autour des dix ans qui a été émise par certains auteurs.

Dans la conception et la mise en place du terme de forçage à ajouter aux équations de l'intégration forcée et empirique, on pourra bénéficier de la collaboration de l'équipe de John Marshall au MIT, déjà intéressé à ce projet.

Le première application est de vérifier dans les données observées certaines des conclusions trouvées dans le modèle simplifié. Etant donné que les données existantes couvrent une durée relativement courte de nouvelles méthodes d'analyse devront être développées, suggérées par les conclusions du présent projet.

A plus long terme, les résultats obtenus nous permettront de préparer une expérience à conduire avec le modèle couplé de l'IPSL. On pourra par exemple forcer la circulation océanique par un rotationnel de vent prescrit, sans changer la partie thermique du couplage. Alternativement on pourra simplement prescrire un transport de chaleur méridien additionnel. Les mêmes méthodes de diagnostic développées pour les données et le modèle simplifié pourront être appliquées aux intégrations numériques des GCMs.

b. Rôle interactif de l'océan nord-atlantique dans les variations décennales du climat européen à l'aide du modèle couplé IPSL (SC, LL)

Il est proposé dans cette partie d'étudier le rôle interactif de l'océan nord-atlantique dans la variation décennale du climat européen. L'outil principal est le modèle couplé océan-atmosphère développé à l'IPSL. Autour d'une simulation complète de 1000 ans, plusieurs expériences supplémentaires sont réalisées pour comprendre le fonctionnement du système climatique régional. Les questions de la non-linéarité et de la transformation d'échelles seront particulièrement adressées.

(i) Le point de départ est le modèle de circulation générale couplé océan-atmosphère mis au point récemment à l'IPSL. La partie atmosphérique est le modèle LMDZ et la partie océanique est le modèle ORCA. Une simulation couplée de 1000 ans vient d'être réalisée et elle constitue la source d'information principale dans ce projet pour étudier la relation entre le climat européen et l'océan nord-atlantique. Nous allons utiliser les outils statistiques tels que EOF (fonction orthogonale empirique), SVD (décomposition en valeur singulière) pour analyser cette simulation afin d'identifier les différents régimes du climat. La structure océanique en profondeur sera également explorée pour identifier d'éventuelles relations entre le gyre sub-polaire, le système du courant nord-atlantique et la ventilation dans la mer de Labrador et la mer de Norvège. La production de l'eau froide et dense dans la partie nord de l'océan nord-atlantique est à l'origine de la circulation thermohaline. Cette dernière est susceptible d'influencer d'autres bassins océaniques et elle constitue la mémoire encore plus lente du système climatique.

(ii) L'étape suivante consiste à étudier séparément les influences de l'océan à l'atmosphère et de l'atmosphère à l'océan. Pour faire cela, nous utilisons le modèle atmosphérique en mode forcé, le forçage étant la sortie du modèle couplé. Parmi les 1000 ans de simulation couplée, nous avons choisi une période de cent ans couvrant les années de 151 à 250. Dix simulations ont été donc réalisées pour la même histoire de la SST, mais les conditions initiales sont légèrement différentes. Nous allons utiliser ce jeu de données pour étudier la prévisibilité. La comparaison avec la simulation couplée permet de sortir l'effet du couplage entre l'océan et l'atmosphère. Le schéma conceptuel de nos expériences est donc identique à celui des simulations d'ensemble recommandées par le programme international AMIP (programme d'inter-comparaison des modèles atmosphériques). Mais dans notre cas, nous pouvons considérer que nous utilisons un modèle "parfait" et nous pouvons donc mieux isoler le rôle de l'océan. Les résultats apporteront

des éléments de réponse sur l'architecture d'un système de prévision dans les moyennes et hautes latitudes. Il est très probable que la stratégie valable pour les régions tropicales n'est plus valide, et qu'un système couplé sera nécessaire pour les moyennes et hautes latitudes.

(iii) Dans le présent projet, nous proposons également d'analyser quatre autres expériences avec les conditions océaniques observées pour la période 1950–1994. La première utilise l'océan global comme conditions aux limites; la deuxième est comme la première, mais les conditions aux limites dans l'Atlantique du nord sont remplacées par des valeurs climatologiques; la troisième, qui est complémentaire à la deuxième, utilise les conditions aux limites observées dans l'Atlantique du nord, mais des valeurs climatologique dans les autres bassins du globe. Ces trois expériences ont toutes des réalisations multiples (dont la taille varie entre 9 et 17). Une quatrième expérience utilise les valeurs climatologiques pour l'ensemble du globe. L'analyse de ce jeu de données nous permet d'isoler le rôle de l'océan nord-atlantique dans les impacts sur le climat. La combinaison de ces simulations permet également d'accéder aux interactions non-linéaires entre les différents bassins.

(iv) Finalement, nous proposons aussi d'utiliser une version très haute résolution (60 km en Europe) du modèle LMDZ pour étudier les réponses atmosphériques à des structures idéalisées de l'anomalie de la SST. Des simulations pour une saison perpétuelle seront suffisantes, mais de nouvelles méthodes d'analyse seront mises en place et utilisées pour diagnostiquer les activités transitoires et leurs interactions avec la circulation moyenne à travers les flux de chaleur et de vorticité. La relation avec les modes intrinsèques sera également recherch e. Pour pouvoir séparer les effets linéaires d'une anomalie de la SST des effets non-linéaires à cause du changement de la circulation transitoire, nous proposons aussi de faire un nombre important (plusieurs centaines) de simulations (avec conditions initiales légèrement perturbées) pour seulement quelques jours. On peut espérer que la réponse linéaire se manifeste au début de chaque simulation et que la réponse non-linéaire se met progressivement en place au fur et à mesure.

A l'issue du présent projet, nous pouvons attendre les résultats suivants :

- Un schéma complet du fonctionnement de la NAO dans une simulation couplée de longue durée sera obtenu. Pour des périodes décennales, l'interaction océan – atmosphère joue certainement un rôle important.
- Nos résultats peuvent apporter des considérations théorique et pratique pour un futur système de prévision du climat en moyennes et hautes latitudes, y compris son architecture et ses éléments indispensables.
- La réponse atmosphérique à une anomalie de la SST extra-tropicale sera séparée en réponse linéaire directe et réponse non-linéaire due à la circulation transitoire.
- La relation entre la NAO, le système du courant nord-atlantique, le gyre subpolaire et la convection océanique dans les mers du Labrador et de Norvège sera explorée et comparée à l'observation.

3. Modes de variabilité naturels de l'océan et du système couplé (ACdV, TH)

a. Observations : exploitation des données altimétriques et marégraphiques (ACdV, CC, EC)

Afin de compléter les analyses de température et pression de surface dans l'Atlantique Nord par une variable plus représentative du contenu thermique des couches supérieures de l'océan, on cherchera la signature de la variabilité océanique interannuelle   interdécennale dans le niveau de la mer, à partir des données altimétriques (pour leur couverture spatiale globale) et marégraphiques (pour leur longues séries temporelles). Un financement IFREMER pour un postdoc (18 mois) sur ce thème a été obtenu en 2002 et attribué à Cécile Cabanes, qui termine actuellement sa thèse au LEGOS et devrait commencer fin 2002.

Une difficulté majeure de la reconstruction des séries historiques à partir des champs de niveau de la mer (satellitaires), spatialement bien définies mais insuffisamment longs temporellement, est de garantir que les EOFs seront les mêmes pendant toute la durée de la reconstruction. C'est cette incertitude sur leur constance qui a empêché la reconstruction du niveau de la mer par des méthodes utilisées précédemment pour reconstruire la SST (Costa et Colin de Verdière 2002). L'objectif est de construire une base de données de niveau de la mer en mélangeant les données altimétriques satellitaires et marégraphiques : nous pouvons espérer ainsi avoir une base longue de 100 ans de données du niveau de la mer pour l'océan Nord-Atlantique. Ceci n'a encore jamais été fait et serait très utile pour étudier la variabilité décennale en relation avec les anomalies thermiques déjà identifiées.

b. Théorie des modes de bassins océaniques (TH, MBJ)

L'existence de modes de bassin océanique de grande échelle, basés sur la propagation lente d'ondes planétaires résonant par un ajustement rapide des conditions aux bords, est une source potentielle de variabilité climatique sur les échelles de temps interannuelles à interdécennales. On cherchera à déterminer et à comprendre les caractéristiques de ces modes de bassin dans une hiérarchie de modèles océaniques de complexité croissante, par une approche analytique et numérique, afin d'identifier les processus responsables de leur période, de leur amortissement et éventuellement de leur croissance. L'intérêt des modèles simplifiés réside dans la possibilité du calcul analytique des termes d'interactions donnant lieu à des instabilités.

Une première partie du travail s'attachera à mieux comprendre l'émergence de modes instables ou faiblement amortis de la circulation océanique. Des modèles océaniques simplifiés seront utilisés afin de suivre les caractéristiques des modes dans une hiérarchie de complexité sur la structure verticale : quasigéostrophique barotrope puis barocline, puis shallow-water à 2.5 couches ; 2 couches actives semblent être nécessaires pour l'émergence de modes instables. Ce travail ne différencie pas a priori la circulation forcée par le vent d'une circulation de type thermohaline, forcée par des vitesses diapycnales entre les couches.

Ce travail se fait en collaboration étroite avec Mahdi Ben Jelloul (postdoc WHOI) et devrait bénéficier d'interactions avec le groupe de Claude Frankignoul, Christophe Herbaut et Jérôme Sirven (LODYC).

c. Modes de bassins océaniques en configuration réaliste (TH, JV)

On s'attachera à déterminer la structure de certains modes dans des configurations plus réalistes. Cette tâche avait été amorcée dans le projet précédent mais nécessite des développements nettement plus importants. Le mode interdécennal de la circulation thermohaline existe dans des configurations non seulement uni-hémisphérique, mais également bi-hémisphérique, même avec un courant antarctique circumpolaire. Néanmoins, la compréhension actuelle des modes de bassin fait intervenir la propagation lente d'onde planétaires baroclines, qui résonnent par un ajustement rapide par ondes de Kelvin (résolues ou paramétrisées).

Un certain nombre de problèmes se posent pour une configuration réaliste de l'Atlantique Nord, non seulement pour la région équatoriale où des ondes rapides se développent et synchronisent les 2 bassins, mais aussi pour la propagation le long du bord nord si le bassin est ouvert. Il reste donc quelques configurations idéalisées à étudier avant de passer à un modèle réaliste, OPA, et des outils plus versatiles développés par Jérôme Vialard (LODYC) et Antony Weaver (CERFACS) d'analyse de stabilité linéaire et généralisée (Moore et al. 2001). Ce travail se fera en collaboration avec eux (une ACI jeune chercheur a été proposée au ministère sur ce thème pour 2002, au nom de Jérôme Vialard, préselectionnée mais finalement refusée).

L'outil d'analyse de stabilité linéaire de la circulation océanique grande échelle nécessite

actuellement l'existence d'un état d'équilibre. Or dans le cadre d'un forçage avec cycle saisonnier ou d'un modèle imparfaitement ajusté, cette condition est beaucoup trop rigoureuse et il est nécessaire de trouver un moyen de la relaxer. Dans le cadre d'analyse de stabilité généralisée, ce problème ne se pose pas, du moins dans le cadre des travaux de Jérôme Vialard dans le Pacifique tropical (Moore et al. 2001). Un travail théorique est nécessaire pour adapter la méthode de calcul en l'absence d'un état d'équilibre, et les conséquences et limites qui en découlent.

Une fois la méthode clarifiée, la configuration réaliste qui pourrait être utilisée serait celle préparée dans le cadre du présent appel d'offre par C. Frankignoul, C. Herbaut, M. N. Houssais et J. Sirven. Des discussions sont prévues en cours d'année pour préparer ce projet.

d. Interactions humidité–salinité dans les oscillations décennales (ACdV, TH, OA)

Si les modes de variabilité décennaux associés aux fluctuations de température avec flux de chaleur imposés commencent à être bien explorés, on ne peut en dire autant des modes qui impliquent la salinité. Une première étape est, bien entendu, de voir si les oscillations mixtes TS sont de même nature dynamique que les oscillations en T dans un océan non couplé. Pour préparer l'étape suivante d'exploration des mécanismes en mode couplé, il faut disposer d'un modèle atmosphérique incluant les transports méridiens d'humidité dans l'atmosphère 1) qui puisse reproduire à peu près correctement la dynamique grande échelle et 2) qui soit suffisamment économique pour pouvoir explorer une large gamme de paramètres sous mailles dans l'esprit de ce qui a été fait précédemment pour les oscillations de la circulation thermique (Huck et al., 1999).

Dans ce contexte, un modèle axisymétrique avec paramétrisation à la Green (1970) des transports tourbillonnaires aux moyennes latitudes et capable de simuler une cellule de Hadley dans de bonnes conditions a donc été développé. Les schémas complexes d'ajustement convectif–radiatif présents dans les modèles atmosphériques ont été fournis par Laurent Li (LMD) et intégrés dans la géométrie axisymétrique choisie – ces modules restent une partie extrêmement couteuse numériquement. Ce modèle atmosphérique, maintenant validé, a été couplé au modèle océanique planétaire géostrophique (PG). Les simulations couplées sont analysées dans le cadre du travail de thèse d'Olivier Arzel, la question centrale étant de savoir si dans un régime de paramètres terrestre les oscillations étudiés en mode océan seul (sous flux et mixte) persistent après couplage ou au contraire font place à une variabilité nouvelle.

e. Interactions océan–atmosphère linéarisées (ACdV, TH)

Lors d'une précédente étude, Colin de Verdière et Blanc (2001) ont montré qu'à proximité d'une résonance d'ondes de Rossby dans l'atmosphère, le flux de chaleur était susceptible de fournir une large rétroaction positive à l'océan. Le mécanisme était décrit dans un cadre uni–dimensionnel et nous voulons maintenant le tester dans le cadre géographique plus réaliste d'un canal zonal atmosphérique couplé à un bassin océanique. Nous pensons que la répartition spatiale en longitude océan–continent va être cruciale pour l'excitation d'un mode de Rossby planétaire et nous voulons tester différentes configurations. C'est bien entendu l'application NAO qui est directement visée par ce projet. Le travail consiste à écrire le modèle atmosphérique linéarisé et à le coupler aux modèles océaniques existants. La recherche des sources de variabilité fera appel aux critères sur l'énergie potentielle des perturbations que nous avons précédemment introduits.

f. Interactions océan–atmosphère QG en canal périodique (ACdV, GM)

La variabilité décennale prend une forme particulière aux latitudes australes compte tenu de la faiblesse du forçage continent / océan qui prévaut dans l'hémisphère nord. Aux latitudes centrées autour de 50° Sud White et Peterson (1996) ont mis en évidence une structure couplée de grande échelle (un mode deux) qui se propage vers l'est autour du courant Antarctique avec une période d'environ 8 ans. De nombreuses études ont déjà été engagées pour expliquer cette structure mais l'absence d'accords sur son origine nous poussent dans le cadre de la thèse de Guillaume Maze à

réaliser un modèle couplé de complexité intermédiaire basé sur la dynamique quasigéostrophique (QG) pour l'atmosphère et pour l'océan. La dynamique des ondes planétaires couplées (Colin de Verdière et Blanc 2001) a déjà fourni un mécanisme potentiel qu'il est nécessaire de re-qualifier lorsque la turbulence quasigéostrophique omniprésente dans ces régions est incluse. Ce travail de thèse est co-encadré par Fabio d'Andrea (CR CNRS, LMD).

4. Prévisibilité aux échelles interannuelle à pluri-décennale sur la région Atlantique Nord – Europe : origines et mécanismes (LT)

Cette partie vise à cerner quel est le potentiel de prévisibilité des fluctuations climatiques sur la région Atlantique Nord Europe (NAE) aux échelles interannuelle à (pluri-)décennale (2–30 ans). Le climat est très sensible à des modifications et à des variations de ses conditions aux limites et de ses forçages externes. Celles-ci concernent l'océan, et en particulier la température de surface océanique (SST), avec lequel l'atmosphère échange masse et énergie, et qui évolue à des échelles de temps plus lentes. Elles concernent aussi la surface des continents, qui peut exhiber, par exemple, des anomalies de longue durée (à l'échelle du temps de prévisibilité météorologique) de son humidité, affectant en retour l'alimentation énergétique de l'atmosphère. Selon Lorenz (1975), la prévisibilité est alors dite "**de première espèce**" et repose sur la connaissance de l'**état initial** des composantes du système climatique à **évolution lente** (principalement océan et surfaces continentales) qui sont la "mémoire" du système climatique.

Si l'on considère le système climatique dans son ensemble, les fluctuations du forçage radiatif dues à des causes externes (augmentation de la concentration des gaz à effet de serre ou variation des paramètres orbitaux terrestres) peuvent donner lieu à une extension de prévisibilité qui repose alors sur la connaissance a priori de l'évolution des forçages externes et l'influence de ces derniers sur le système climatique. On parle alors, toujours selon Lorenz (1975), de prévisibilité "**de deuxième espèce**" qui est donc associée aux variations des **conditions aux limites** (en particulier radiatives) du système climatique.

Pour la région NAE et les échelles de temps qui nous intéressent (2–30 ans), le potentiel de prévision (s'il existe !) repose probablement sur une combinaison variable dans le temps des deux types de prévisibilité. L'objectif de ce projet est d'essayer de **quantifier** plus précisément cette affirmation à l'aide d'outils de modélisation et de déterminer quels sont les **processus physiques associés à une éventuelle prévisibilité**.

Le projet est scindé en deux parties, qui doivent être considérées comme deux projets consécutifs d'une durée de deux ans chacun. La présente demande détaille le contexte scientifique général, commun aux deux parties et le plan de recherche spécifique à la première partie du projet qui concerne essentiellement la prévisibilité de première espèce.

L'objectif de ce projet vise à quantifier les réponses aux deux questions citées dans la section précédente à l'aide de la modélisation complexe avec des modèles de circulation générale océanique et atmosphérique. Le cadre conceptuel que nous voulons adopter est celui introduit par Lorenz (1975) dans sa fameuse et lumineuse étude sur la prévisibilité. Comme il est rappelé dans le résumé, la prévisibilité climatique est à la fois un problème de **conditions initiales** (*prévisibilité de première espèce*) et un problème de **conditions aux limites** (*prévisibilité de deuxième espèce*). Un exemple classique de prévisibilité de première espèce est la prévision des événements El Niño Southern Oscillation (ENSO) où la connaissance la meilleure possible des états initiaux océanique et atmosphérique est nécessaire pour une bonne prévision. Le changement climatique dû à l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) est en revanche l'exemple typique de la prévisibilité de deuxième espèce. La question est alors de savoir si le climat futur va se

traduire par des modifications systématiques dues aux changements du bilan radiatif engendrés par l'activité humaine.

Dans la première partie de ce projet (2 ans), nous proposons d'étudier la prévisibilité de première espèce en nous intéressant en particulier aux échelles interannuelle à pluri-décennale et à la région Atlantique Nord Europe. Toute prévision climatique basée sur le problème des conditions initiales est sujette à des erreurs que l'on peut ranger dans trois catégories principales : les incertitudes sur l'état initial, les erreurs modèles et le chaos inhérent au système climatique. **Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement au dernier type d'erreur, en nous plaçant dans le cadre conceptuel du modèle parfait.** Nous supposons donc que nous disposons d'un modèle parfait et d'une connaissance parfaite des conditions initiales et en particulier de l'état océanique. Le facteur limitant la prévisibilité est dans ce cas la croissance d'erreurs qui fait diverger des trajectoires initialisées sur des états infiniment proches. En raison du rôle supposé important (à ces échelles de temps) de l'océan, l'outil de prévision utilisé sera donc un modèle couplé océan-atmosphère. Nous réaliserons plusieurs ensembles de simulations avec ce modèle « parfait » : pour chaque ensemble, les différents membres (simulations) ne diffèrent que par des perturbations infinitésimales de leurs conditions initiales atmosphériques. En revanche, les différents ensembles utiliseront des conditions initiales océaniques différentes. Ces différents états océaniques seront choisis de façon à étudier la sensibilité de la prévisibilité climatique aux différentes phases d'un (ou des) mode de variabilité lente, par exemple, la circulation thermohaline. La prévisibilité potentielle peut alors être estimée en mesurant la divergence des trajectoires des différents membres en fonction de l'échéance et en la comparant à une estimation moyenne de la variabilité interne du système modélisé. Plusieurs méthodes seront utilisées pour estimer cette divergence : le plus simple est d'utiliser des grandeurs statistiques communément employées pour la prévision du temps ou la prévision saisonnière (coefficient de corrélation d'anomalies, erreur quadratique moyenne, analyse en variance etc). Nous comptons également utiliser une méthodologie originale qui combine les méthodes d'agrégation et les méthodes de filtrage optimal pour analyser les modifications des distributions de probabilité d'occurrence des régimes les plus sensibles au forçage océanique (Hannachi 2001). Cette approche permet une prise en compte de la non-linéarité dans l'estimation de la réponse atmosphérique qui maximise le rapport signal sur bruit. Elle donne directement les structures spatiales de la réponse et le forçage océanique associé ainsi que leur évolution temporelle, ce qui facilite la mise en évidence des mécanismes physiques à l'oeuvre dans l'interaction océan-atmosphère.

Les résultats de cette étude constituent donc une estimation modèle de la limite supérieure de prévisibilité de première espèce basée sur l'hypothèse du modèle parfait et de la connaissance parfaite des conditions initiales. Il est bien évident que ces deux hypothèses ne seront jamais réalisées en pratique et ceci est une des limites de notre approche. Il faut également souligner que notre approche pronostique de l'estimation de la prévisibilité potentielle est plus générale que l'approche classique qui consiste à utiliser un ensemble de simulations atmosphériques forcées par l'évolution des SST observées sur une période donnée (qui est d'ailleurs un problème de prévisibilité de deuxième espèce). Il est aussi souhaitable de pouvoir comparer nos résultats à ceux produits par d'autres modèles : cette inter-comparaison sera conduite au sein du projet européen PREDICATE (comparaison avec les modèles HadCM3, du Hadley Center et ECHO, du MPI) et il serait intéressant de pouvoir inclure d'autres modèles de la communauté climatique française.

IV. Calendrier

1. Réponse océanique aux variations du forçage atmosphérique

- A1 :** Année 1 : Analyse des simulations en mode forcé
Année 2 : Analyse des simulations en mode couplé
- A2 :** Année 1 : Mise au point et analyse du modèle
- B :** Année 1 : Mise en place du modèle et analyse des résultats
Année 2 : Sensibilité de la période d'oscillation aux paramètres du modèle

4. Prévisibilité

Première année : 2003

- réalisation de la simulation couplée de référence (au moins 300 ans de simulation) à l'aide du modèle couplé ARPEGE–OASIS–ORCALIM. La version climat No3 du modèle ARPEGE, développé conjointement à Météo–France et au Centre Européen, est utilisée en troncature T63 et 31 niveaux sur la verticale. Le modèle d'océan–glace ORCALIM, développé pour sa partie océan au LODYC et pour sa partie glace à l'UCL, est utilisé dans sa version standard avec une résolution horizontale moyenne de 2 degrés (et une résolution plus fine, 0.5 degré, dans la bande équatoriale). Le couplage est réalisé par le logiciel OASIS développé au CERFACS. Cette simulation est en cours et devrait être finie au mois de juin 2002 (**Terminé en juillet 2002**).
- Suivi de la simulation et premiers diagnostics sur la variabilité simulée par le modèle (ENSO, PNA, NAO, EA, TAV, ...). Nous étudierons la présence éventuelle de modes couplés océan–atmosphère basse–fréquence et leur caractéristiques. Les méthodes d'analyse spectrale de signaux propagatifs comme l'analyse singulière multicanal (MSSA) seront utilisées pour caractériser les structures spatiales et les caractéristiques d'éventuels modes océan–atmosphère. Nous analyserons également les téléconnexions simulées entre les régions tropicales et le secteur Atlantique Nord Europe. Nous diagnostiquerons aussi la variabilité associée à la THC (transport de chaleur océanique, signature en température de surface et co–variabilité avec les régimes de circulation atmosphérique) (**en cours**).
- Estimation de la prévisibilité potentielle par des méthodes diagnostiques (par exemple, comparaison de la variabilité simulée et observée à celle déduite d'une hypothèse nulle représentée par le modèle stochastique de climat (Hasselmann 1976, Frankignoul et Hasselmann 1977), un processus auto–régressif d'ordre 1, AR(1)). Les régions où le climat modélisé et/ou observé ne peut pas être représenté par un processus AR(1) sont considérées a priori comme des régions où une certaine prévisibilité pourrait exister (Boer 2001). Cette première méthode n'est pas destinée à fournir une description quantitative de la prévisibilité, mais plutôt à valider à l'ordre zéro le modèle dans sa capacité à reproduire les caractéristiques statistiques de la variabilité observée. Elle permet aussi la mise en évidence des régions continentales et/ou océaniques où la prévisibilité potentielle pourrait être importante.
- Réalisation des expériences de prévisibilité. Deux ensembles de six membres (25 ans chacun) seront réalisés avec des conditions initiales océaniques différentes pour chacun des ensembles (mais identique pour tous les membres d'un ensemble). Le choix des conditions initiales se fera en contrastant des phases opposées des fluctuations océaniques basse–fréquence (par exemple les variations de la THC). Par exemple, on peut prendre un état avec une THC forte, un avec une THC faible (voir le bilan des actions 2002 ci–dessous

pour plus de précisions) (**en cours**).

Deuxième année : 2004

- Elaboration d'indices de prévisibilité et application à la région Atlantique Nord Europe puis au climat global. Les outils diagnostiques utilisés vont des méthodes spectrales (décomposition en EOF, analyse de covariance optimale) aux méthodes classiques d'analyse en variance (ANOVA), traditionnellement utilisées dans ce genre d'études, en passant par les méthodes de classification (méthodes des régimes climatiques etc) associées à celles de filtrage optimal.
- Recherche des mécanismes physiques responsables de la prévisibilité éventuelle déduite des analyses précédentes. Afin d'isoler le rôle d'un processus physique donné (par exemple le rôle de l'océan profond sur la variabilité basse fréquence de la NAO, voir Wu et Gordon 2002), il pourra être envisagé de dupliquer un ou plusieurs des ensembles de prévisibilité en bloquant la variabilité d'une région ou d'un processus physique donné (pour l'exemple ci-dessus, cela pourrait être fait en introduisant une relaxation vers la climatologie en dessous d'une certaine profondeur ou pour un certain type de masses d'eau).
- Réalisation de nouveaux ensembles de prévisibilité. Si le temps de calcul disponible pour le projet le permet, nous utiliserons aussi un état initial océanique issu d'une simulation forcée du modèle ORCALIM par les flux atmosphériques provenant de la réanalyse NCEP sur la période 1948–1998. De même, on pourra essayer d'estimer les impacts climatiques d'un changement abrupt de la THC. Pour ce faire, une expérience couplée (30 ans) avec une forte anomalie d'eau douce aux hautes latitudes sera réalisée et les SST de cette simulation seront utilisées pour forcer un ensemble de simulations atmosphériques afin d'identifier la signature de l'impact du changement de THC par rapport à la variabilité interne atmosphérique.

Références

- Barsugli, J. J. and D. S. Battisti, 1998: The Basic Effects of Atmosphere–Ocean Thermal Coupling on Midlatitude Variability. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 477–93.
- Bladé, I., 1999: The Influence of Midlatitude Ocean/Atmosphere Coupling on the Low–Frequency Variability of a General Circulation Model. Part II: Interannual Variability Induced by Tropical SST Forcing. *J. Climate*, **12**, 21–45.
- Boer, G., 2000 : A study of atmosphere–ocean predictability on long time scales. *Clim. Dyn.*, **16**, 429–472.
- Cessi, P., 2000: Thermal feedback on wind–stress as a contributing cause of climate variability. *J. Climate*, **13**, 232–244.
- Cessi, P., and F. Primeau, 2001: Dissipative selection of low frequency modes in a reduced–gravity basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 127–137.
- Collins, M., 2001 : Climate predictability on interannual to decadal time scales : the initial value problem. *Clim. Dyn.*, soumis.
- Corti, S., F. Molteni, and T.N. Palmer, 1999 : Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature*, **398**, 799–802.
- Czaja A. and C. Frankignoul, 2002: Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic Oscillation , *J. of Climate*, vol 15, No 6, 606–623.
- Czaja, A., and J. Marshall, 2000: Observations of atmosphere–ocean coupling in the North Atlantic. *J. Clim.*, submitted.
- Delworth, T. L., and R. J. Greatbatch, 2000: Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing, *J. Climate*, **13**, 1481–1495.
- Deser, C. & M.L. Blackmon, 1993: Surface climate variations of the North Atlantic ocean during winter: 1900–1989. *J. Clim.*, **6**, 1743–1753.
- Eden C. and J. Willebrand, 2001 : Mechanism of interannual to decadal variability of the North Atlantic circulation. *J. Climate*, **14**, 2266–2280.
- Frankignoul, C., et K. Hasselmann, 1977 : Stochastic climate models, Part II : application to sea surface temperature anomalies and thermocline variability. *Tellus*, **29**, 289–305.
- Frankignoul, C., 1985: Sea surface temperature anomalies, planetary waves, and air–sea feedback in the middle latitudes. *Review of Geophysics*, **23**(4): 357–390.
- 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., E. Kestenare, N. Sennéchaël, G. de Coetlogon, F. D’Andrea, 2000 : On decadal–scale ocean–atmosphere interactions in the extended ECHAM1/LSG climate simulation. *Clim. Dyn.*, **16**, 333–354.
- Frankignoul, C., P. Muller, and E. Zorita, 1997: A simple model of the decadal response of the ocean to stochastic wind stress forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1533–1546.
- 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.

- Griffies, S.M., and K. Bryan, 1997a: Predictability of North Atlantic multidecadal climate variability. *Science*, **275**, 181–184.
- Grotzner, A., M. Latif, and T. P. Barnett, 1998: A decadal climate cycle in the North Atlantic Ocean as simulated by the ECHO coupled GCM, *J. Climate*, **11**, 831–847.
- Grötzner, A., M. Latif, A. Timmermann, and R. Voss, 1999 : Interannual to decadal predictability in a coupled ocean–atmosphere general circulation model. *J. Clim.*, **12**, 2607–2624.
- Hakkinen, S., 1999: Variability of the simulated meridional heat transport in the North Atlantic for the period 1951–1993, *J. Geophys. Res.* **104**, 10,991–11,007.
- Hannachi, A., 2001: Toward a nonlinear identification of the atmospheric response to ENSO. *J. Clim.*, **14**, 2138–2149
- Hasselmann, K., 1976: Stochastic climate models. Part I: theory. *Tellus*, **28**, 473–485
- 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**, in press.
- 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.
- Hurrell, J.W., 1995: Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, **269**,676–679.
- Hurrell, J.W., and H. Van Loon, 1997: Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, **36**, 301–326.
- Krahmann, G., M. Visbeck, and G. Revedin, 2001: Formation and propagation of temperature anomalies along the North Atlantic Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 1287–1303.
- Latif, M., and T. P. Barnett, 1994: Causes of decadal climate variability in the North Pacific/ North American sector. *Science*, **266**, 96–99.
- Marshall, J., H. Johnson, and J. Goodman, 2001: A study of the interaction of the North Atlantic oscillation with ocean circulation. *J. Clim.*, **14**, 1399–1421.
- Marshall, J., Y. Kushnir, D. Battisti, P. Chang, A. Czaja, J. Hurrell, M. McCartney, R. Saravanan & M. Visbeck, 2000: Atlantic Climate Variability, *Int. J. Climate*. submitted.
- Mehta, V., M. Suarez, J. Manganello, and T. Delworth, 2000: Oceanic influence on the North Atlantic Oscillation and associated Northern Hemisphere climate variations: 1959–1993. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 121–124.
- Molteni, F., S. Tibaldi, and T. Palmer, 1990: Regimes in the wintertime circulation over northern extratropics. Part I: observational evidences. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 31–67.
- Moore, A. M., J. Vialard, A. T. Weaver, D. L. T. Anderson, R. Kleeman and J. R. Johnson, 2001: The role of air–sea interaction in controlling the optimal perturbations of low–frequency tropical coupled ocean–atmosphere modes. Technical memorandum No. 351, ECMWF, Reading, UK, 35pp. *J. Climate*, soumis.
- Palmer, T.N. and Z. Sun, 1985: A modelling and observational study of the relationship between seas surface temperature in the north–west Atlantic and the atmospheric general circulation. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **111**, 1244–1258.

- Rodwell, M.J., D.P. Rowell, and C.K. Folland: Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, **398**, 320–323.
- Sutton, R. T., and M. R. Allen, 1997: Decadal predictability of north atlantic sea surface temperature and climate. *Nature*, 388, 563–567.
- Sutton, R.T., B.W. Dong, D.L.R. Hodson, and M.J. Rodwell, 2001: Impacts of variations in the Atlantic thermohaline circulation on Twentieth century climate. *Nature*, submitted.
- Sutton R.T. and P–P. Mathieu, 2001: Response of the atmosphere – ocean mixed layer system to anomalous ocean heat flux convergence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Accepted.
- Thompson, D. W., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297–1300.
- Zorita, E. and C. Frankignoul, 1997: Modes of North Atlantic decadal variability in ECHAM1/LSG coupled ocean–atmosphere general circulation model. *J. Climate*, 10, 183–200.
- Van Loon, H., and J.C. Rogers, 1978: The seasaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part 1: general description. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 296–310.
- Wallace, J. M., 2000: North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms – one phenomenon, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 791–806.
- White, W. B., and R. G. Peterson, 1996: An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea–ice extent. *Nature*, **380**, 699–702.
- Wu, P. and M. Rodwell, 2002: Gulf Stream forcing of the winter North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, submitted.
- Wu, P., and C. Gordon, 2002: Oceanic influence on North Atlantic climate variability. *J. Clim.*, soumis.
- Wunsch, C., 1999 : The interpretation of short climate records, with comments on the North Atlantic and Southern Oscillations. *Bull. Am. Met. Soc.*, **80**, 245–255.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques des responsables et de l'équipe, en particulier sur le sujet de la demande (trois dernières années : 2000, 2001, 2002) :

- Ben Jelloul, M., and T. Huck, 2002: Basin modes interactions and selection by the mean flow in a reduced-gravity quasigeostrophic model. *Journal of Physical Oceanography*, submitted.
- Cassou, C. and L. Terray, 2001a: Oceanic forcing of the wintertime low frequency atmospheric variability in the North Atlantic European sector: a study with the ARPEGE model. *J. Climate*, **14**, 4266–4291.
- Cassou, C., and L. Terray, 2001b: Dual influence of Atlantic and Pacific SST anomalies on the North Atlantic/Europe winter climate. *Geophys. Res. Letters*, **28**, 3195–3198.
- 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., et T. Huck, 2000 : A 2 degree of freedom dynamical system for interdecadal oscillations of the ocean-atmosphere. *J. Climate*, **13**, 2801–2817.
- 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. to appear in: AGU monograph "The North Atlantic Oscillation".
- D'Andrea, F., R. Vautard, 2000 : Reducing systematic errors by empirically correcting model errors. *Tellus*, **52A**, 21–41.
- D'Andrea, F., R. Vautard, 2001 : Extratropical low-frequency variability as a low dimensional problem. Part I: a simplified model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **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. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **128**, 1059–1073.
- de Coëtlogon, G. and C. Frankignoul, 2002 : On the persistence of winter sea surface temperature in the North Atlantic. *J. Climate*, in revision.
- Drevillon, M., L. Terray, P. Rogel and C. Cassou, 2001: Mid latitude Atlantic SST influence on European winter climate variability in the NCEP reanalysis. *Clim. Dyn.*, **18**, 331–344.
- Drevillon, M., L. Terray and C. Cassou, 2002: Model study of the wintertime atmospheric response to fall tropical Atlantic sea surface temperature anomalies. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, en révision.
- Ferreira, D., C. Frankignoul and J. Marshall : Coupled ocean-atmosphere dynamics in a simple midlatitude climate model. *J. Climate*, 2001, **14**, 3704–3723.

- Février, S., C. Frankignoul, J. Sirven, M.K. Davey, P. Delecluse, S. Ineson, J. Macias, N. Sennéchaël, and D.B. Stephenson; A multivariate intercomparison between three oceanic GCMs using observed current and thermocline depth anomalies in the tropical Pacific during 1985–1992. *J. Marine Syst.*, 2000, 24, 249–275.
- Frankignoul, C., E. Kestenare, N. Sennechaël, G. de Coëtlogon, F. D’Andrea, 2000 : On decadal-scale ocean–atmosphere interactions in the extended ECHAM–LSG climate simulation. *Climate Dynamics*, **16**, 333–354.
- 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**, in press.
- 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.
- L’Héveder, B., and M–N. Houssais, 2001: Investigating the variability of the Arctic sea ice thickness in response to a stochastic forcing. *Clim. Dyn.*, **17**, 107–125.
- Li, Z. X., 2000: Influence of tropical Pacific El Niño on the SST of the Southern Ocean through atmospheric bridge. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3505–3508.
- Li, Z. X., and S. Conil, 2002: A 1000 year simulation with the IPSL ocean atmosphere coupled model. to appear in *Annali di Geofisica*, SINTEX journal special issue.
- Li, Z. X., and S. Conil, 2002: Transient response of an atmospheric GCM to North Atlantic SST anomalies, submitted to *J. of Climate*.
- Menendez, C.G., A.C. Saulo, and Z.X. Li, 2001: Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. *Climate Dynamics*, **17**, 219–231.
- Mignot, J. and C. Frankignoul, 2002 : On the interannual variability of surface salinity in the Atlantic. *Clim. Dyn.*, to appear.
- 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. and C. Frankignoul, 2000 : Variability of the thermocline due to a sudden change in the

Ekman pumping. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 1776–1789.

Terray, L., and C. Cassou, 2000: Modes of low-frequency climate variability and their relationships with land precipitation and surface temperature: application to the Northern Hemisphere winter climate. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **14**, 339–369.

Terray, L., and C. Cassou, 2002: Tropical Atlantic sea surface temperature forcing of quasi-decadal variability over the North Atlantic European region. *J. Climate*, **15**, 3170–3187.

Zhou, T.J., and Z.X. Li, 2002: Simulation of the East Asian Summer Monsoon using a variable resolution atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, **19**, 167–180.

MOYENS DONT DISPOSE LES PROPOSANTS ET QUI SERONT AFFECTÉS À LA RÉALISATION DU PROJET

1. Chercheurs et laboratoires impliqués

Laurent Terray, chercheur CERFACS	SUC	30%	prévisibilité
Delon, CR2	LA	40%	(pendant 6 mois) prévisibilité
Arnaud Jouzeau, doctorant	SUC	100%	prévisibilité
Maisonnave, IR	SUC	30%	prévisibilité
Fabio D'Andrea, CR1 CNRS	LMD	30%	couplé simplifié (flux de chaleur)
Sébastien Conil, doctorant et ATER ENS	LMD	80%	couplé IPSL
Laurent Li, CR CNRS	LMD	40%	couplé IPSL
Gaelle de Coëtlogon, postdoc	LODYC	100%	(jusqu'au printemps 2003)
Sabine Février, MC IPMC	LODYC	50%	variations Gulf Stream
Claude Frankignoul, professeur UPMC	LODYC	20%	rôle principal dans thème A1
Christophe Herbaut, CR1 CNRS	LODYC	30%	océan forcé
Marie-Noëlle Houssais, CR1 CNRS	LODYC	20%	océan forcé
Jérôme Sirven, MC UPMC	LODYC	50%	océan forcé
Olivier Arzel, doctorant	LPO	100%	couplé simplifié
Cécile Cabanes, postdoc IFREMER	LPO	100%	altimétrie
Alain Colin de Verdière, professeur UBO	LPO	40%	couplé simplifié
Eduardo Costa, postdoc	LPO	20%	altimétrie et marégraphie
Thierry Huck, CR2 CNRS	LPO	60%	modes de bassin, stabilité
Guillaume Maze, doctorant	LPO	100%	couplé simplifié

Collaborations :

CERFACS : Christophe Cassou (NCAR) et les groupes participant au projet européen PREDICATE (Univ. Reading, UKMO, MPI, LODYC, NERSC,...)

LMD : John Marshall et Arnaud Czaja, MIT, Boston.

LODYC : Petra Friederichs (Université de Bonn), Juliette Mignot (LODYC)

LPO : LODYC (C. Frankignoul, J. Sirven, C. Herbaut, J. Vialard), LMD (Fabio D'Andrea, co-encadrant thèse Guillaume Maze), Mahdi Ben Jelloul (WHOI), Geoffrey Vallis (GFDL, Princeton U.) et Paola Cessi (Scripps, UCSD), et le programme d'observation du gyre subpolaire Ovide (H. Mercier, T. Huck, J. C. Gascard et G. Reverdin).

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

CERFACS :

- stations de travail et calculateurs du CERFACS (O2000 et COMPAQ)
- 2000 heures de calcul sur le supercalculateur VPP 5000 de Météo-France (financement CERFACS)

LMD : moyens informatiques du LMD et de l'IDRIS

LODYC : moyens informatiques du LODYC et de l'IDRIS

LPO :

- stations de travail et PC linux sur le site LPO/UBO
- calculateur DEC ALPHA 36 processeurs du centre IFREMER de Brest

Autres financements attribués (en cours) ou **demandés dans le cadre des programmes INSU** (Equipements mi-lourds INSU, autre Programme National). **Bien préciser les financements obtenus dans le cadre européen.**

CERFACS : contrat européen PREDICATE jusqu'en mars 2003

LODYC : financement partiel jusqu'en février 2003 pour le thème A1 (PREDICATE)

BUDGET (*en keuro*)

1. FONCTIONNEMENT

2003

LODYC : 2 keuro (frais de publications)

LPO : 2 keuro (frais de publications)

2004

LMD (D'Andrea) : 1 keuro (frais de publications)

LODYC : 2 keuro (frais de publications)

LPO : 2 keuro (frais de publications)

2. MISSIONS

2003

CERFACS : 3 keuro (réunions de coordination PNEDC sur l'activité Nord Atlantique (2 à 3 participants pour 1 réunion par an, congrès ou workshop à l'étranger)

LMD (D'Andrea) : 1,7 keuro (1 mission Boston MIT 1,2 – 1mission Europe 0,5)

LMD (Li) : 3 keuro (missions pour EGS, AMS et "Climate Diagnostic Workshop")

LODYC : 2 keuro (2 missions EGS)

LPO : 5 keuro (3 missions EGS= 3, mission collaboration USA Scripps, WHOI = 2)

2004

LMD (D'Andrea) : 0,5 keuro (1mission Europe)

LODYC : 2 keuro (2 missions EGS + réunion PNEDC)

LPO : 5 keuro (missions EGS et Paris 3, mission collaboration USA 2)

3. ÉQUIPEMENT SPÉCIFIQUE

2003

CERFACS : 4 keuro (achat de disques de stockage informatique pour analyse des données simulées en local sur la machine multiprocesseur COMPAQ : la quantité de données simulées sera très importante et nos logiciels d'analyse l'utilisent de manière optimale en multiprocessing)

LMD : 3 keuro (contributions au réseau local informatique : poste de travail, imprimantes, disques)

LODYC : 3,5 keuro (poste de travail (PC linux)

LPO : 3 keuro (poste de travail PC linux pour G. Maze 2 k€, consommables imprimantes 1 k€)

2004

LPO : 3 keuro (PC linux 2 k€, consommables imprimantes 1 k€)

<i>Équipes :</i>	<i>CERFACS Terry</i>	<i>LMD D'Andrea</i>	<i>LMD Li</i>	<i>LODYC Frankignoul</i>	<i>LPO Huck</i>	<i>TOTAL</i>
<i>Chercheurs</i>	2,0	0,3	1,2	2,2	4,3	10,0
Fonctionne ^t				2,0	2,0	4,0
Missions	3,0	1,7	3,0	2,0	5,0	14,7
Équipement	4,0		3,0	3,5	3,0	13,5
TOTAL2003	7,0	1,7	6,0	7,5	10,0	32,2
Fonctionne ^t		1,0		2,0	2,0	5,0
Missions		0,5		2,0	5,0	7,5
Équipement					3	3,0
TOTAL2004		1,5		4,0	10,0	15,5

TOTAL GÉNÉRAL DES CRÉDITS DEMANDÉS POUR 2003 : 32,2 keuro HT