

**ANNEXE 1 : ANNEXE TECHNIQUE**  
ANR-05-CIGC-010

## **0 PLAN**

### 0 PLAN

1 ACRONYME ET TITRE DU PROJET

2 CONTEXTE ET MOTIVATION DU PROJET

3 DESCRIPTION DU PROJET

4 RETOMBÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

5 ORGANISATION ET PILOTAGE DU PROJET

6 PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

7 TABLEAU RECAPITULATIF DES DELIVRABLES

8 PRESENTATION DETAILLEE DES QUATRE ETUDES

ETUDE 1 : « POMPE VERTICALE » GÉNÉRÉE PAR LES TOURBILLONS OCÉANIQUES

ETUDE 2 : DYNAMIQUE DU MELANGE EQUATORIAL PROFOND

ETUDE 3 : DYNAMIQUE DE PETITE ECHELLE ET BIO-GEOCHIMIE APPLIQUEES A L'ATLANTIQUE NORD

ETUDE 4 : COUPLAGE OCEAN-ATMOSPHERE EN PRESENCE DE TRES FINES COUCHES DE MELANGE OCEANIQUES

## **1 ACRONYME ET TITRE DU PROJET**

**INLOES : ETUDE DES INTERACTIONS NON-LINÉAIRES DES ÉCHELLES OCÉANIQUES GRÂCE AU EARTH SIMULATOR**

## **2 CONTEXTE ET MOTIVATION DU PROJET**

Le projet proposé relève de la thématique « **Grands Défis Applicatifs** ». Son but est de mettre en évidence des **mécanismes dynamiques océaniques nouveaux, importants pour la circulation générale océanique, la biogéochimie marine et le couplage avec l'atmosphère, grâce à l'accès au Earth Simulator Japonais** qui nous permet d'étudier des **problèmes impossibles à aborder sur d'autres machines**.

Le contexte est le suivant: le fluide océanique est caractérisé par un grand nombre d'échelles très différentes (par exemple de 1km à 6000km sur l'horizontale) interagissant fortement entre elles. Or des simulations numériques de résolution très élevée de ces dernières années ont clairement fait apparaître l'impact très important des petites échelles sur les plus grandes. Par exemple Hulburt et Hogan (DAO, 2000) ont mis en évidence une **explosion** du nombre et de l'intensité des tourbillons mésoéchelles quand on passe d'une résolution de 15km à 2km. Toutefois, du fait de la limitation des ordinateurs utilisés, toutes ces simulations restent de taille limitée avec par exemple soit des dimensions horizontales réduites, soit une faible résolution sur la verticale.

Notre projet a l'ambition d'explorer les **régimes dynamiques de régions océaniques** jouant un rôle essentiel pour la circulation générale océanique en utilisant **une résolution numérique jamais atteinte jusqu'à présent**, ceci grâce à **l'accès au Earth Simulator (<http://www.es.jamstec.go.jp>)** dans le cadre d'un accord cadre (MOU) signé fin 2003 entre la France et le Japon pour une durée de cinq ans. De ce fait la **taille des problèmes** que nous étudions **est multipliée par un facteur allant de 100 à 1500** suivant les études par rapport aux problèmes adressés jusqu'à présent sur des machines telles que celles de l'IDRIS. **Dans ce cadre, les quatre études décrites dans ce projet ont été soumises au CS du Earth Simulator (ES), et acceptées dès 2004 pour une durée de 4 ans. L'aide exceptionnelle** accordée par le Ministère de la Recherche en 2004 a été déterminante pour le démarrage de ces études et a permis aux équipes concernées d'effectuer des séjours courts (2 semaines) à Yokohama (rappelons qu'il est nécessaire de se rendre sur le site de l'ES pour préparer et

lancer les simulations numériques, la machine n'étant pas accessible à distance). Après avoir passé avec succès les **tests de performances sur l'ES fin 2004, les premières simulations numériques de résolution élevée ont été effectuées. Depuis avril 2005 ces simulations ont consommé au total l'équivalent de 240.000 heures monoprocesseurs vectoriels NEC SX6.** Les résultats de ces simulations ont déjà mis en évidence des mécanismes nouveaux et sont l'objet de publications en cours.

Le Earth Simulator est une machine vectorielle massivement parallèle (40 Teraflops) particulièrement efficace et bien adaptée à nos codes d'hydrodynamique (basés sur les équations de Navier-Stokes): nos codes atteignent un rapport de performance de l'ordre de 40% sur ce type de machine au lieu de 4% sur des machines scalaires massivement parallèles. La puissance effective de certaines de nos simulations sur l'ES est actuellement de l'ordre de **1.5 Teraflops** et devrait doubler (**soit 3 Teraflops**) dans les prochains mois. L'ES nous offre donc une opportunité unique de faire des avancées très importantes dans le domaine de la dynamique océanique et de ses applications.

### **3 DESCRIPTION DU PROJET**

Le projet comporte quatre études dont le but est d'étudier **l'impact des interactions non-linéaires** (mettant en jeu une gamme très étendue d'échelles) **sur les régimes dynamiques de régions océaniques spécifiques.** Ces régions concernent le Courant Antarctique Circumpolaire de l'Hémisphère Sud pour la première étude, les régions équatoriales profondes pour la seconde, l'Atlantique Nord pour la troisième et les régions tropicales et leur couplage avec l'atmosphère pour la quatrième. Nos études utilisent une géométrie ou une configuration idéalisée. Ce choix nous permet d'utiliser au mieux les ressources du Earth Simulator et d'avoir des résultats rapides. **Les buts scientifiques, la description de chacune des quatre études et les résultats attendus sont présentés dans les pages qui suivent.** Les premières simulations indiquent très clairement l'impact de l'utilisation d'une résolution élevée (adaptée au régime dynamique étudié). **L'objectif du projet présenté à l'ANR est donc la poursuite de ces études (démarrées en 2004 grâce à l'aide exceptionnelle accordée par le Ministère de la Recherche, donc avant la création de l'ANR) sur le Earth Simulator pendant les trois prochaines années.** Les résultats attendus devraient nous permettre de faire des percées majeures dans les régimes dynamiques étudiés.

### **4 RETOMBÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES**

**Le grand challenge scientifique** des dix années à venir pour les sciences de géophysique externe (atmosphère, océan et climat) consiste à **adopter une approche multi-échelles qui ne peut se réaliser sans des outils puissants tels que le Earth Simulator. Notre projet se situe dans le contexte de ce grand challenge. Notre approche devrait permettre de beaucoup mieux représenter les régimes dynamiques de régions océaniques spécifiques** jouant un rôle essentiel que ce soit pour la circulation générale océanique, la biogéochimie marine et en fin de compte le couplage océan-atmosphère. **Les résultats** (à la fois scientifiques et algorithmiques) du présent projet devraient donc être particulièrement  **bénéfiques aux futurs modèles de climat.** De ce fait ce projet devrait être un point de contact privilégié et stimulant pour les projets climat (voir projet CICLE en particulier). Les résultats attendus seront l'objet de publications scientifiques dans des revues internationales à comités de lecture de rang A. Par ailleurs les développements algorithmiques mis en place et la résolution des problèmes rencontrés feront l'objet de contacts continus avec la communauté « climat ».

Soulignons que d'autres pays européens se sont déjà engagés dans la même direction que nous avec des moyens plus importants: par exemple un accord global entre scientifiques anglais et japonais autour du ES a été signé par le ministre des Affaires Etrangères, Jack Straw, en janvier 2005, aboutissant à l'embauche de six chercheurs et ingénieurs dont quatre détachés en permanence sur le site du ES pendant 3 ans et l'attribution d'une enveloppe budgétaire globale de 30 millions de livres

pour un seul projet.

## **5 ORGANISATION ET PILOTAGE DU PROJET**

**Chacun des deux partenaires** engagé dans les quatre études **a une compétence scientifique largement reconnue dans la communauté internationale, ce qui se traduit pour chacun des deux par plus de 70 publications dans des revues à comité de lecture de rang A.** Certaines publications sont d'ailleurs communes aux deux partenaires. La liste complète des publications n'est pas incluse dans cette demande pour ne pas alourdir le dossier. Mais cette liste ainsi que des exemplaires de ces publications sont à la disposition des rapporteurs sur leur demande.

L'expérience en modélisation numérique de chacun des deux partenaires s'appuie **sur une expertise de plus de 20 ans sur les machines du CCVR et de l'IDRIS.** Mentionnons que le modèle hydrodynamique OPA a été entièrement conçu par une équipe dont les éléments moteurs sont ceux du partenaire IPSL listés dans ce projet. L'équipe LPO de son côté a elle participé de manière très significative au développement du code hydrodynamique SPEM puis de son successeur ROMS dans un contexte international. **Cette forte expertise de modélisation numérique et algorithmique des deux partenaires s'est concrétisée ces derniers mois par les performances excellentes atteintes par nos quatre études sur le Earth Simulator.**

Les quatre études mentionnées précédemment, ont été acceptées par le conseil scientifique de l'ES en 2004 pour une durée de 4 ans. Dans le cadre du MOU, le Earth Simulator met à la disposition des équipes françaises concernées un nombre important d'heures de calcul sur la machine ainsi qu'un espace de travail et des stations UNIX. Les équipes françaises se doivent de trouver le financement de leur voyage et séjour au Japon ainsi que de subvenir aux besoins en support et équipement informatique en France pour le post-traitement des simulations. De ce fait, la dotation spéciale que nous a accordée le ministère de la Recherche en 2004 a été déterminante pour le démarrage de nos études sur le ES.

La période de démarrage nous a permis de mettre au point une organisation et une logistique commune entre l'IPSL et le LPO qui nous paraît actuellement efficace. Le ES n'étant pas accessible à distance, il est nécessaire que les équipes effectuent des séjours courts au Japon. Par ailleurs nous avons testé cette année avec succès une formule consistant à financer un séjour long (6 mois) pour une personne dont la tâche est le suivi des expériences en machine pour ces quatre études. L'avantage important est que cela nous permet de bénéficier totalement de l'allocation de ressources qui nous est attribuée sur le ES. Tout ceci explique l'importance du poste « missions » demandé. Un problème important à résoudre est le rapatriement des gros fichiers de données et leur stockage dans nos laboratoires auquel s'ajoute le post-traitement de ces données qui nécessite des stations de travail beaucoup plus puissantes que celles dont nous disposons. Ces rubriques constituent le budget investissement de la présente demande. Enfin il est bien sûr nécessaire de faire le post-traitement de ces gros fichiers qui demande un temps de personne. Ceci constitue la rubrique CDD.

La synergie importante développée depuis près d'un an entre nos équipes (IPSL et LPO), au niveau du développement algorithmique, de l'interprétation scientifique et de la logistique, est déterminante pour les résultats obtenus. Au niveau algorithmique, nos études utilisent deux codes d'hydrodynamique d'origines différentes. De ce fait les expériences réalisées sur chacun des codes ont permis d'améliorer substantiellement l'autre code et en fin de compte de résoudre rapidement un certain nombre de problèmes. Ceci concerne aussi bien les schémas numériques que le choix de la discrétisation spatiale des domaines et des sous-domaines pour la parallélisation. Au niveau scientifique, les quatre études concernent des applications océaniques considérées comme prioritaires dans notre communauté. Les mécanismes nouveaux mis en évidence pour chacune d'elle sont l'objet de discussions approfondies entre nos équipes à propos de leur interprétation scientifique. Ceci permet de replacer leur importance relative dans la circulation générale océanique. Enfin une mise en commun de certains moyens (cf

paragraphe précédent) permet une progression beaucoup plus rapide.

## 6 PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

Elle est celle de nos organismes de tutelle (CNRS, UNIVERSITES, IFREMER, CEA)

## 7 TABLEAU RECAPITULATIF DES DELIVRABLES

	Libellé	Nat.	Partenaires	Date	06 S1	06 S2	07 S1	07 S2	08 S1	08 S2
<b>T0</b>	<b>Coordination – Communication</b>									
T0a	Mise en place d'une page web pour le projet, tenue à jour de cette page		Tous	Annuel au minimum	X	X		X		X
T0b	Meetings de coordination	CR	Tous	Annuel		X		X		
T0c	Workshop "haute résolution océanique"	CRP	Tous							X
<b>T1</b>	<b>Simulation et post-traitement des données / Etude 1</b>									
T1a	Simulation haute résolution sur le Earth Simulator	CRM	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
T1b	Post-Traitement des données / publications	R	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
<b>T2</b>	<b>Simulation et post-traitement des données / Etude 2</b>									
T2a	Simulation haute résolution sur le Earth Simulator	CRM	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
T2b	Post-Traitement des données / publications	R	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
<b>T3</b>	<b>Simulation et post-traitement des données / Etude 3</b>									
T3a	Simulation haute résolution sur le Earth Simulator	CRM	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
T3b	Post-Traitement des données / publications	R	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
<b>T4</b>	<b>Simulation et post-traitement des données / Etude 4</b>									
T4a	Simulation haute résolution sur le Earth Simulator	CRM	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X
T4b	Post-Traitement des données / publications	R	Tous	2006, 2007, 2008		X		X		X

Nat. :

CR = Compte-rendu,

CRP = Compte-rendu et proceedings

CRM = Compte-rendu de mission

R = Rapport / Publication

## **8 PRESENTATION DETAILLEE DES QUATRE ETUDES**

**ETUDE 1 : « POMPE VERTICALE » GÉNÉRÉE PAR LES TOURBILLONS OCÉANIQUES**  
(Patrice Klein, Lien Hua, Sylvie Le Gentil, Eric Danioux, Jordi Isern)

**ETUDE 2 : DYNAMIQUE DU MELANGE EQUATORIAL PROFOND**  
(Lien Hua, Marc Fruman, Claire Menesguen, Sylvie Le Gentil & Richard Schopp)

**ETUDE 3 : DYNAMIQUE DE PETITE ECHELLE ET BIO-GEOCHIMIE APPLIQUEES A  
L'ATLANTIQUE NORD** (Marina Lévy, Anne-Sophie Kremer, Marie-Alice Foujols, Françoise Pinsard,  
C. Talandier, R. Benshila, C. Levy, C. Deltel)

**ETUDE 4 : COUPLAGE OCEAN-ATMOSPHERE EN PRESENCE DE TRES FINES COUCHES DE  
MELANGE OCEANIQUES**  
(G. Madec, S. Masson, F. Pinsard, C. Talandier, R. Benshila, A. Caubel  
M.-A. Foujols C. Levy, C. Deltel)

## **ETUDE 1 : « POMPE VERTICALE » GÉNÉRÉE PAR LES TOURBILLONS OCÉANIQUES** (Patrice Klein, Lien Hua, Sylvie Le Gentil, Eric Danioux, Jordi Isern)

### **Résumé de l'étude:**

Le régime dynamique considéré ici s'applique au **Courant Circumpolaire Antarctique**, l'une des régions océaniques où les tourbillons mésoéchelles (de 30 à 100km de diamètre) sont les plus nombreux et les plus énergétiques. De ce fait cette région a une influence déterminante sur la circulation générale océanique. Notre objectif est d'étudier l'impact de la « pompe verticale » générée par ces tourbillons mésoéchelles en utilisant une résolution spatiale 3-D, jamais atteinte jusqu'à présent. Des résultats préliminaires suggèrent une contribution majeure de cette « pompe verticale » capturée par les plus petites échelles sur la modification du contenu en chaleur des couches supérieures océaniques. Les résultats attendus devraient donc être particulièrement importants pour les études climatiques.

### **Objectifs scientifiques**

On sait depuis longtemps que ces tourbillons mésoéchelles représentent une très grande partie de l'énergie cinétique des océans. L'impact de la résolution spatiale sur cette turbulence géophysique suscite depuis quelques années un regain d'intérêts. Ainsi des simulations réalistes de très haute résolution horizontale (Hulburt et Hogan, DAO, 2000) ont révélées une **explosion** du nombre de ces tourbillons, qui se traduit par une augmentation d'un facteur 10 de l'énergie cinétique entre une résolution de 15km et 1,5km. Toutefois, du fait de la limitation des ordinateurs existants, ces simulations ont une faible résolution sur la verticale (10 à 30 niveaux au plus). En conséquence des effets majeurs sur la circulation générale océanique, comme la vitesse verticale générée par ces structures turbulentes, sont fortement sous-estimées. Une estimation correcte de cette "pompe verticale" nécessite en effet de respecter une discrétisation 3-D appropriée. La raison est que la dynamique non-linéaire des structures mésoéchelles et submésoéchelles est caractérisée par un nombre de Burger proche de un. Ce qui implique que des structures horizontalement fines ont une extension verticale petite.

La possibilité d'utiliser des machines telles que le Earth Simulator nous a conduit à définir un projet pour mieux estimer cette « pompe verticale » et son impact sur la circulation générale océanique en utilisant une résolution adéquate de 1km sur l'horizontale et de près de 350 niveaux sur la verticale. Ceci revient à considérer des tailles de problèmes 1500 fois plus grande que ce qui est fait jusqu'à présent.

### **Approche méthodologique**

Les simulations numériques utilisent une nouvelle version du modèle hydrodynamique océanique ROMS (<http://www.rutgers.edu/po>) basé sur les équations de Navier-Stokes et distribué librement à la communauté internationale. Ce modèle possède des schémas numériques d'advection du 3e ordre les plus récents parfaitement adaptés nos problèmes de turbulence.

#### Performances:

Nous avons pendant une année fortement optimisé et remanié de manière significative le code numérique pour nos configurations géométriques et physiques en utilisant les machines vectorielles de l'IDRIS et du Max Plank Institute à Hambourg (NEC SX5 et SX6). Cet effort d'optimisation nous a permis de passer avec succès en décembre 2004 les tests requis sur le Earth Simulator pour l'utilisation de plus de 512 processeurs vectoriels. Les performances atteintes pour une résolution intermédiaire de 3000\*2000\*200 sont les suivantes: taux de vectorisation: 98.7%; efficacité de parallélisation de 51.6%. **La puissance effective actuellement atteinte est de l'ordre de 1.6 Teraflops pour 512 processeurs**, soit un rapport de performance (par rapport à la puissance crête de 40%. Ces performances devraient être améliorées dans les prochains mois pour nous permettre d'utiliser 1024 processeurs vectoriels (soit **1/5e du Earth Simulator!**).

### **Premiers résultats**

Les premiers résultats indiquent une très forte présence des petites échelles à la fois horizontales et verticales. La figure 1 illustre l'apport d'une très fine résolution: par rapport à la simulation à 4km (fig.1a), celle à 1km (fig.1b) contient, outre des filaments de petite échelle, de nombreux petits vortex (de diamètre inférieure à 10km) dus à une instabilité qui n'est représentée que par une résolution verticale très fine (consistante avec la résolution horizontale). Par ailleurs il y a une augmentation d'un facteur 30 (!) de la variance de la vitesse verticale entre les deux simulations. La conséquence de ces petites échelles (simulation à 1km) est un réchauffement des premiers 200 mètres de près de 1 degré, compensé par un refroidissement des couches plus profondes. Ce type d'impact, qui a de très importantes conséquences pour les études climatiques, n'a jamais été mis en évidence jusqu'à

présent. Ces résultats, sur lesquels des publications sont en cours, n'auraient jamais pu être mis en évidence sans l'aide de machines telles que le Earth Simulator.

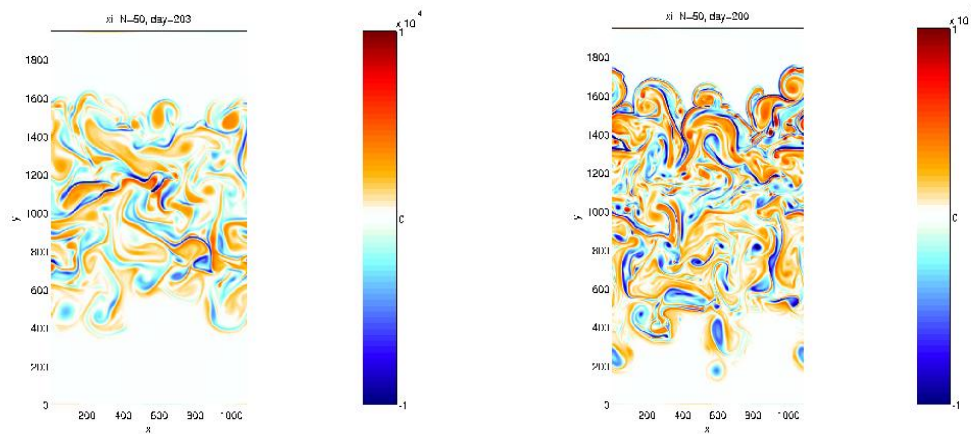


Figure 1: champ de vorticité relative obtenu avec une résolution de 4km (a) et une résolution de 1km (b).

### Projet pour la période 2006-2008

Les simulations réalisées jusqu'à présent concernent une turbulence océanique en décroissance libre. Il est prévu de faire des simulations bien plus longues en régime forcé (maintien d'un jet barocline grande échelle) dans des domaines plus grands pour avoir des résultats statistiquement représentatifs. Ceci devrait donc concerner des domaines de 6000\*4000\*300 sur des durées de l'ordre de 10 ans au lieu de 2 ans. Ce type de simulations pourra être réalisé avec 1024 processeurs vectoriels (soit 128 nœuds) et devrait demander un peu plus de 10000 heures\*nœuds. Un des buts recherchés est d'évaluer précisément l'impact des petites échelles sur le réchauffement des couches de surface en prenant en compte des flux atmosphériques réalistes.

## **ETUDE 2 : DYNAMIQUE DU MELANGE EQUATORIAL PROFOND**

(Lien Hua, Marc Fruman, Claire Menesguen, Sylvie Le Gentil & Richard Schopp)

### **Résumé de l'étude**

Le but du projet est de quantifier la contribution de la circulation équatoriale profonde à la cellule méridienne de la circulation océanique qui joue un rôle climatique essentiel. Les océans équatoriaux sont caractérisés par d'intenses jets zonaux de directions alternées assurant un transport important des traceurs au sein du rail équatorial d'un bord à l'autre des bassins océaniques et jouant le rôle des éléments d'un radiateur pour diffuser verticalement la chaleur. Les questions adressées concernent les mécanismes de formation des jets équatoriaux profonds et de mélange des traceurs à l'équateur et la contribution des régions équatoriales à la circulation générale de l'océan mondial.

### **Objectifs scientifiques**

L'objectif est de quantifier la contribution de la circulation équatoriale profonde à la cellule méridienne de la circulation océanique (popularisée par Broecker (1991) sous le nom de « great ocean conveyor »). Cette dernière véhicule une quantité importante de chaleur entre l'équateur et les pôles, et de ce fait, joue un rôle essentiel dans le système climatique terrestre. Sa structure tridimensionnelle et sa dynamique sont cependant loin d'être élucidées : malgré la bonne connaissance des transports horizontaux en surface et des lieux de convection aux hautes latitudes, la branche profonde de cette cellule ainsi que les mécanismes et lieux de remontée des eaux froides doivent être élucidés et quantifiés. Sachant qu'à l'équateur, la présence d'une dynamique très spécifique génère une circulation profonde beaucoup plus intense qu'aux moyennes et hautes latitudes, cette dynamique énergétique est susceptible de causer des mélanges verticaux importants (d'Orgeville et al., GRL 2005), la circulation équatoriale profonde est une candidate privilégiée pour permettre le retour vers la surface des eaux profondes par d'intenses 'jets' zonaux de directions alternées sur la verticale, dont le transport cumulé est du même ordre de grandeur que celui de la « conveyor belt ». Le rôle joué par ces jets profonds est analogue à celui des éléments d'un radiateur pour diffuser la chaleur, mais de plus la circulation équatoriale profonde assure un transport des champs de traceurs d'un bord à l'autre des bassins océaniques au sein du rail équatorial. Les échelles spatiales très fines (inférieures à  $0.75^\circ$  en latitude et à quelques centaines de mètres sur la verticale sur la majeure partie de la colonne d'eau) de ces jets expliquent pourquoi les modèles de circulation générale les plus récents parviennent encore mal à les reproduire.

Les questions spécifiques que nous voulons adresser sont les suivantes :

- Quels mécanismes peuvent créer des jets zonaux alternés et quel est leur rôle dans la circulation générale océanique?
- Quels mécanismes interviennent dans le mélange, les transformations de masses d'eau à l'équateur et leur transport méridien à travers l'équateur?
- Quelle proportion de la remontée des eaux profondes de l'océan mondial est assurée par les régions équatoriales ?

### **Approche méthodologique.**

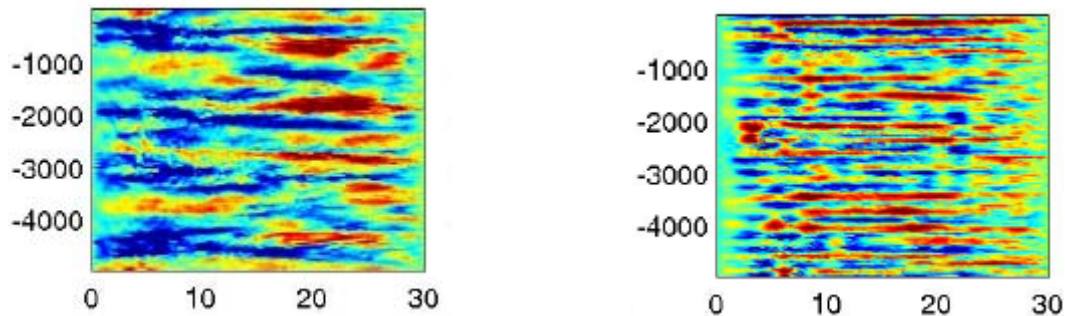
L'approche retenue est la simulation numérique directe à ultra-haute résolution afin de résoudre les interactions non-linéaires entre les échelles spatio-temporelles très disparates qui sont mises en jeu. L'approche numérique est complétée par une rationalisation analytique des instabilités et cascades turbulentes observées et aussi une confrontation de nos résultats avec toutes les observations disponibles à ce jour dans les régions équatoriales profondes.

Les simulations numériques utilisent une version « sur mesure » du modèle hydrodynamique ROMS distribué librement à la communauté internationale dans une configuration de bassin bi-hémisphérique de géométrie idéalisée, centré sur le rail équatorial et de tailles comparables aux bassins Atlantique et Pacifique.

Les efforts importants d'optimisation du code numérique ont été menés de manière conjointe avec le projet « pompe verticale générée par les tourbillons » (cf section Performances) afin de passer avec succès les tests de performance requis sur le Earth Simulator pour l'utilisation de plus de 512 processeurs vectoriels. Des développements spécifiques à notre projet concernent les raffinements de la représentation de la couche limite de bord Ouest qui ont été mis en place. Les résolutions actuelles sont de plus de 300 niveaux sur la verticale et une résolution horizontale de l'ordre du  $1/32^\circ$ .

## Résultats actuels

Les simulations réalisées en 2005 sur le Earth Simulator (ES) nous ont permis de bien cerner les principaux paramètres régissant la formation des jets équatoriaux alternés et nous avons pu reproduire les caractéristiques très différentes des jets observés dans l'Atlantique et le Pacifique équatorial. La résolution tridimensionnelle fortement accrue permise par l'ES (un facteur 300 en comparaison de celles que nous avons pu effectuer dans le passé à l'IDRIS) s'est révélée cruciale pour l'obtention de nos résultats, notamment pour passer du régime de la figure de gauche ci-dessous de jets de grande échelle verticale à celui de jets plus minces (figure de droite ci-dessous), régime que seule la résolution accrue permise par l'ES a permis d'atteindre. Les figures représentent une coupe profondeur-longitude du champ de vitesse zonale à l'équateur révélant des jets d'échelle verticale de 300m semblables à ceux observés dans le Pacifique.



Deux publications sont en cours de rédaction sur ces simulations, révélant que la variabilité temporelle de la couche limite de bord Ouest du bassin joue un rôle essentiel sur les caractéristiques spatiales des jets alternés générés au sein du rail équatorial.

## Projet pour la période 2006-2008

La phase d'identification des mécanismes de formation des jets équatoriaux étant achevée, nos objectifs pour 2006-2008 concernent:

- a/ la quantification des mélanges associés : nous allons poursuivre les simulations numériques dans un bassin de taille comparable à l'océan Atlantique, avec un zoom sur la circulation profonde dans le rail équatorial au  $1/32^\circ$  et 300 niveaux sur la verticale sur des durées pluri-décennales de simulation afin de fermer les budgets thermodynamiques et afin d'étudier le mélange de champs de traceurs artificiellement injectés.
- b/ l'étude de l'influence de l'extension zonale des bassins (Pacifique versus Atlantique) sur les caractéristiques spatio-temporelles très différentes des jets observés dans la réalité.
- c/ les rôles respectifs dans la remontée des eaux profondes des régions équatoriales et de la région du Courant Circumpolaire Antarctique (CCA) dans des simulations de bassin bi-hémisphérique incluant la région du CCA.

## **ETUDE 3 : DYNAMIQUE DE PETITE ECHELLE ET BIO-GEOCHIMIE APPLIQUEES A L'ATLANTIQUE NORD**

**(Marina Lévy, Anne-Sophie Kremer, Marie-Alice Foujols, Françoise Pinsard, C. Talandier, R. Benshila, C. Levy, C. Deltel)**

### **Résumé de l'étude:**

Ce projet a pour but de quantifier l'impact à grande échelle de la dynamique de petite échelle sur les flux biogéochimiques. Notre approche est basée sur la modélisation numérique. La résolution horizontale que nous souhaitons utiliser est 100 fois plus fine que celle des modèles actuels de climat.

### **Objectifs scientifiques**

L'efficacité du pompage de CO<sub>2</sub> par l'océan est fortement dépendante de la dynamique océanique, et en particulier des petites échelles. En particulier, les fronts dits de sub-mésoséchelle (< 10km), où la dynamique est la plus intense, ne sont pas représentés dans les modèles actuels de climat car les mailles de ces modèles sont beaucoup trop grandes (typiquement, 100km x 100km). À quelles erreurs dans les modèles climat-carbone conduit cet « oubli » de l'impact de la dynamique de sub-mésoséchelle sur la biogéochimie ? Pour répondre à cette question, nous proposons de mener une étude de modélisation couplée dynamique-biogéochimie très haute résolution (2km x 2km) à l'échelle d'un bassin qui sera conduit vers son état d'équilibre. La taille du problème abordé dans cette étude est une première. En effet, à l'échelle d'un bassin, les efforts les plus importants à ce jour ne dépassent pas 10km x 10km, ce qui est encore très insuffisant pour prendre en compte les transports verticaux à sub-mésoséchelle. À une résolution de 2km x 2km, seules des études sur de petits domaines (100km x 500km) et durant de courtes durées (1 mois) ont été menées. L'avancée concerne l'impact des petites échelles d'espace sur les grandes échelles spatio-temporelles.

### **Approche méthodologique**

Nous avons retenu pour cette étude une configuration idéalisée prenant en compte les différents régimes dynamiques existant dans l'Atlantique Nord (ou le rayon de déformation varie de 2km à 30km). La configuration retenue est une double gyre représentative de cet océan, de 2000km x 3000km. Le modèle hydrodynamique océanique OPA est utilisé, couplé au modèle biogéochimique LOBSTER (9 variables biogéochimiques). Sur le Earth Simulator, une collaboration active entre chercheurs et ingénieurs, mise en place depuis un an, a permis d'atteindre d'excellentes performances. Ces performances ont été obtenues pour une simulation avec une résolution horizontale au 1/54° et 30 niveaux verticaux, sans biogéochimie, qui a tourné 5 jours avec un pas de temps de 300s sur 47 processeurs. Nous avons estimé 6h de restitution pour 1an de simulation, une mémoire de 84Gb (compter 3 fois plus quand la biologie est activée) et 114 Gflops. Nous avons en particulier optimisé le découpage, et les communications entre processeurs. Une simulation avec une résolution horizontale de 1/27°, sans biogéochimie, a ensuite tourné sur un an et donne des structures de vitesse verticales très satisfaisantes (Fig. 3). Les meilleures performances atteintes concernent 380 Gflops sur 216 processeurs vectoriels. Nous sommes donc confiants quant à la suite des expériences envisagées.

### **Projet pour la période 2006-2008**

Actuellement, il est impossible de conduire ce type d'étude sur une machine autre que le Earth Simulator. Par exemple, sur les machines de l'IDRIS, seule des petites configurations peuvent passer en mémoire avec de la biogéochimie. Outre ce problème crucial de mémoire, les temps de restitutions pour des expériences longues est 100 fois plus long à l'IDRIS que sur le Earth Simulator. L'Earth Simulator nous offre donc une opportunité unique pour estimer l'impact de la résolution spatiale. La stratégie mise en place est d'augmenter progressivement la résolution du modèle, en gardant exactement les mêmes forçages. Les résolutions choisies sont 1° (R1), 1/3° (R3), 1/9° (R9), 1/27° (R27) et 1/54° (R54) à 30 niveaux verticaux, et 1/27° à 100 niveaux verticaux (R27v). Ceci correspond à des divisions entières (par 3 et par 2) des dimensions horizontales de la maille, et permettra des comparaisons exactes entre les différentes simulations. La comparaison entre les résultats des simulations à différentes résolutions permettra de mieux comprendre l'impact de la dynamique sub-mésoséchelle sur les bilans biogéochimiques. Nous regarderons en particulier les effets *directs* (apports verticaux de nitrate par les filaments et tourbillons), l'impact de ces structures sur les *transports horizontaux* dans les bilans biogéochimiques, et les effets *indirects*, en particulier les différents états d'équilibre des nutritifs qui vont résulter de la modification du transport, de la subduction et des flux de production et d'export. Pour cela, une mise à l'équilibre de 100 ans sera réalisée sur chaque résolution.

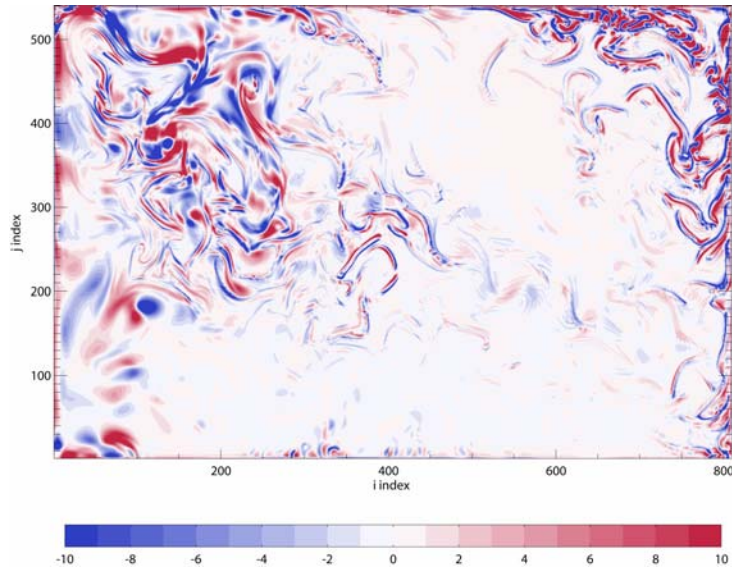


Figure 3: Structure horizontale des vitesses verticales à 100m dans l'expérience R27. Comme attendu, les vitesses verticales s'organisent en filaments de sub-mesoéchelle.

## **ETUDE 4 : COUPLAGE OCEAN-ATMOSPHERE EN PRESENCE DE TRES FINES COUCHES DE MELANGE OCEANIQUE**

**(G. Madec, S. Masson, F. Pinsard, C. Talandier, R. Benshila, A. Caubel  
M.-A. Foujols C. Levy, C. Deltel)**

### **Résumé de l'étude:**

Importance des très fines couches de mélange océaniques (de l'ordre du mètre) sur du couplage océan-atmosphère et ses conséquences sur la variabilité intra-saisonnière de l'océan Indo-Pacifique tropical.

### **Objectifs scientifiques**

Les régions tropicales sont celles où le couplage océan-atmosphère est le plus énergétique et conditionne la réponse de ces deux fluides géophysiques à grande échelle. C'est ainsi que ce couplage force des événements climatiques tels la Mousson Indienne ou El Niño dont la prévision reste un des challenges importants de ces prochaines années. Dans ce contexte, de récentes études ont souligné l'importance que joue la variabilité intra-saisonnière (20-60 jours) qui est elle-même sensible à des processus de petites échelles dans les couches de surface océaniques du fait des non-linéarités existantes et du couplage océan-atmosphère. Le rôle actif qu'y joue l'océan résulte de la capacité de la couche de mélange océanique à répondre à la variabilité haute fréquence de l'atmosphère. De nombreuses observations ont montré que l'existence de couches de mélanges extrêmement fines permettent une forte intensification du couplage océan-atmosphère dans des régions clés où est observée la convection atmosphérique profonde. Il est actuellement reconnu que ces mécanismes, qui constituent le moteur de la variabilité climatique dans les tropiques, doivent être présents dans les modèles numériques si l'on veut améliorer de manière significative l'efficacité des prévisions. Le problème est que ces mécanismes mettent en jeu des échelles très différentes, interagissant fortement entre elles, dont la prise en compte explicite dans les modèles numériques est hors de portée des ordinateurs disponibles. L'accès au Earth Simulator nous offre de ce point de vue une opportunité unique d'estimer de manière explicite l'impact de ces mécanismes en utilisant une résolution tri-dimensionnelle la plus élevée possible (appropriée au problème considéré). La prise en compte des échelles spatiales et temporelles qui sont importantes pour ce type de variabilité climatique est donc au cœur de la démarche de ce projet qui se situe en amont dans le processus de mise au point des futurs modèles de Climat.

### **Approche méthodologique**

Cette étude nécessite un modèle couplé océan-atmosphère (OPA - OASIS - ECHAM) dans une configuration globale avec des résolutions horizontales de 1/2 à 1 degré et une résolution verticale dans la partie supérieure de l'océan d'un mètre (soit 301 niveaux). Au final, la taille des domaines que nous comptons utiliser est de 320×160×31 pour l'atmosphère et de 722×511×301 pour l'océan. L'intégration de ce type de simulation n'a jamais pu être réalisé faute de moyens de calculs adaptés.

Une forte collaboration avec les équipes Japonaises travaillant sur le Earth Simulator a permis de repousser les limites scientifiques et techniques pour finalement rendre réalisable ce projet ambitieux. D'un point de vue scientifique, 4 ans d'étroite collaboration avec le Prof. Yamagata ont déjà abouti à de nombreuses publications (Luo et al. 2003, Yamagata et al. 2004, Luo et al. 2005a et b, Masson et al. 2005, Tozuka et al. 2005a et b, Behera et al. 2005). Ces résultats n'auraient pas été obtenus sans le soutien technique de l'équipe système OPA, des ingénieurs du pôle de modélisation de l'IPSL et des développeurs du système OASIS au CERFACS. La réécriture de certains algorithmes, des entrées-sorties et d'une partie des communications permettent aujourd'hui au modèle OPA d'utiliser 255 processeurs vectoriels (contre 128 en janvier 2004) avec une efficacité de parallélisation de 51,4 %. La vitesse de calcul atteinte est alors de 650 Gflops (30% de la vitesse théorique maximum) avec un taux de vectorisation de 99,5%. Les tests de performance avec le modèle couplé complet sont en cours et devraient nous permettre de dépasser les 300 cpus.

L'ensemble de ces développements permettent de maintenir le modèle OPA dans le peloton de tête sur la scène internationale et de préparer les futures configurations du modèle de climat de l'IPSL. Ces avancées techniques n'ont été possibles que par l'accès au Earth Simulator grâce auquel on peut dès aujourd'hui tester des configurations avant-gardistes.

### **Projet pour la période 2006-2008**

Une série de courtes simulations (15 ans) a déjà permis de valider et de calibrer la physique du modèle d'océan en confrontant les sorties du modèle aux observations disponibles (voir figure 4). L'objectif pour 2006 est de passer au plus vite à la configuration couplée qui vient récemment d'être mise en place. Ce travail sera à la fois

technique (parallélisation et performances) et scientifique (validation des résultats de cette nouvelle configuration). 2007 et 2008 seront consacrées aux simulations plus longues (200 ans) et à leur analyse qui constituent le cœur de ce projet.

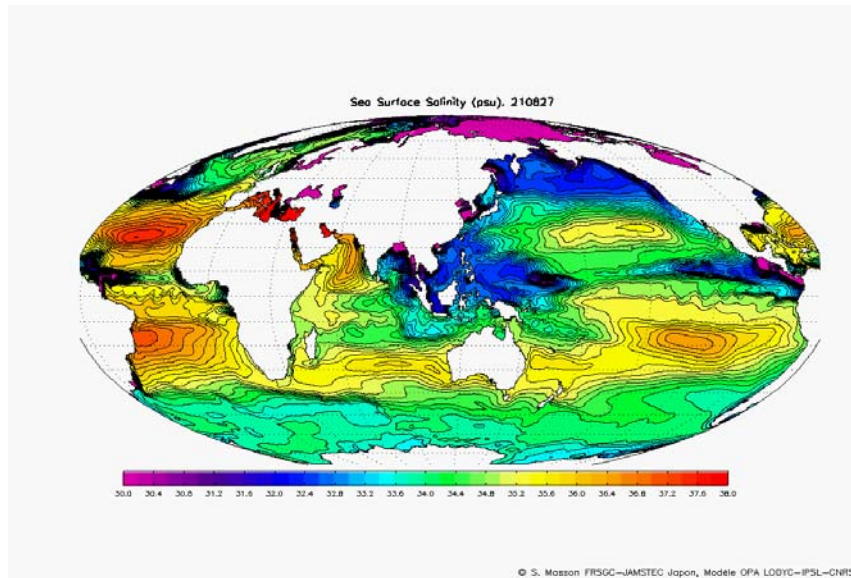


Figure 4 : salinité de surface extraite d'une simulation globale, soulignant la présence d'eaux peu salées depuis la baie du Bengale jusque dans l'ouest du Pacifique équatorial.