

# PROJET DE RECHERCHE 2007

## 1. Résumé

L'océan est de loin le plus gros des réservoirs de carbone impliqués sur des échelles de temps de l'ordre de la décennie ou du siècle. Les premières études couplées atmosphère/océan indiquent qu'aux perturbations atmosphériques (augmentations des températures, changements des régimes des vents et des précipitations) sont associés de profonds changements du milieu océanique. Pour établir l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique il importe donc de déterminer le rôle actuel et futur de l'océan.

- ➔ En particulier, il est fondamental de connaître les lieux de stockage du CO<sub>2</sub> anthropique dans l'océan et son devenir. Ceci nécessite de connaître, et de valider, les puits à l'échelle régionale et implique de bien représenter le rôle de la biomasse marine, notamment les co-limitations nutritives (Phosphates, Nitrates, Silicates, Carbonates, Fer), et les mécanismes d'export du carbone vers l'océan profond et de stockage dans le sédiment.
- ➔ De plus, dans un contexte de variabilité et de changement du climat il s'agira de quantifier l'impact de la dynamique de circulation océanique sur la biomasse marine et sur le carbone océanique.

D'autres composés biogéochimiques océaniques sont aussi potentiellement important pour le climat, parce que ce sont des gaz à effet de serre ou parce que ces composés interviennent dans la chimie atmosphérique. C'est le cas du sulfure de diméthyle (DMS) qui conduit à la formation de noyaux de condensation pour les nuages dans l'atmosphère, de l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et du monoxyde de carbone (CO) qui sont des gaz à effet de serre,...

Il est là aussi fondamental de mieux connaître et représenter les sources et puits océaniques de ces composés et d'estimer l'impact de la variabilité climatique (en particulier du changement climatique) sur ces composés.

Le LSCE développe depuis 1994 (cf rapport 2006 ci-dessous), en collaboration avec le LOCEAN (Paris), un modèle 3D de la biogéochimie océanique basé sur la circulation océanique du modèle OPA/ORCA.

L'année 2007 sera consacrée :

- ➔ 1- à l'**amélioration du modèle biologique utilisé**. Nous tenterons d'améliorer la représentation du cycle du fer dans le modèle PISCES. En parallèle, des expériences d'assimilation devraient permettre d'affiner certains des paramètres du modèle.
- ➔ 2- à l'estimation de l'impact des conditions du **Dernier Maximum Glaciaire** sur le cycle du carbone océanique. Ce projet fait l'objet d'un projet Jeune Chercheur accepté par l'ANR.
- ➔ 3- à la poursuite de notre travail concernant l'**impact du changement climatique** sur la biogéochimie marine.

## 2. Présentation générale

### Objectifs et contexte général

Les études sur le changement climatique induit par l'homme dans la décennie 1980 ont porté essentiellement sur la partie physique de l'atmosphère. Les modèles de circulation générale atmosphérique ont ainsi été utilisés par une expérience dite de "doublement du CO<sub>2</sub>", correspondant à une augmentation des gaz à effets de serre.

Dans les années 1990, les premières études couplées atmosphère/océan indiquent qu'aux perturbations atmosphériques (augmentation des températures, changements des régimes des vents et des précipitations) sont associés de profonds changements du milieu océanique, telle la stratification de l'océan de surface. La première conséquence d'une telle redistribution des paramètres physiques dans l'atmosphère, l'océan et à la surface des continents est une perturbation générale des équilibres naturels du cycle du carbone. Il faut noter que cette perturbation induite par les changements du climat s'ajoute à la perturbation directe des rejets anthropiques de CO<sub>2</sub>, et induit ainsi un boucle de rétroaction entre le climat et le cycle du carbone.

Ainsi, la décennie 2000 voit l'émergence de modèle intégré climat-carbone, afin d'estimer l'impact des différentes politiques énergétiques sur le climat. Ceci nécessite une compréhension globale du cycle du carbone dans un système physique hors d'équilibre (programme international PIGB, modélisation communautaire française, PNEDC). Cet effort est indispensable pour estimer à long terme les changements du climat.

Le cycle du CO<sub>2</sub> atmosphérique est lié aux échanges avec deux milieux extrêmement hétérogènes: l'océan et les terres émergées. Malgré la forte variabilité des sources et puits de ces composés, il est nécessaire d'en faire un bilan net et d'estimer leur évolution. Ainsi, un travail d'analyse des processus climatiques et géochimiques majeurs doit être mené sur de larges échelles d'espace et de temps (de la saison au siècle et plus). L'étude sur des longues échelles de temps est particulièrement importante dans un contexte de déstabilisation de la biomasse marine et du cycle du carbone océanique, par le changement du climat induit par les activités humaines (Bopp et al., 2001; Friedlingstein et al., 2001, Dufresne et al. 2002). La validation sur des échelles de temps longues, d'un tel couplage entre le climat et le cycle du carbone, est cruciale mais difficile en raison du peu de données disponibles. Les variations du CO<sub>2</sub> au cours des dernières décennies et siècles, ainsi qu'au cours du dernier cycle glaciaire, permet d'envisager un tel test.

### Positionnement du LSCE

Le LSCE développe, depuis 1994 un modèle 3D du cycle global du carbone basé sur la circulation océanique du modèle OPA du LODyC (Paris). Les rapports d'activité 2000-200- illustrent les derniers résultats obtenus sur la variabilité interannuelle, interdécennale, future et passée du cycle du carbone (voir les références ci-dessous). Il est à noter que le LSCE (IPSL) est à la pointe de la recherche internationale sur le couplage climat-carbone, et a été sollicité pour développer une telle action dans le cadre des projets IGBP/AIMES et WCRP/CLIVAR

(P. Friedlingstein, projet C4MIP). Le LSCE est également largement impliqué dans les projets européens (Integrated Project FP6-CARBOCEAN et Network of Excellence FP6-EurOcean), en particulier grâce à ses activités de modélisation des cycles biogéochimiques océaniques. Enfin, un projet Jeune Chercheur, financé par l'Agence Nationale de la Recherche, vient de débiter et porte sur les relations climat-cycle du carbone pendant la dernière déglaciation.

### Plan et objectifs pour l'année 2007

L'année sera consacrée :

→ 1-A l'amélioration du modèle biogéochimique utilisé.

(a) Cycle du Fer :

Nous tenterons d'améliorer la représentation du cycle du fer dans le modèle PISCES en intégrant une représentation simplifiée de la chimie complexe du fer dans l'océan et des interactions ligands organiques / fer soluble. Plusieurs simulations, utilisant le modèle PISCES en mode offline, seront nécessaires. La durée de ces simulations sera variable, de l'ordre de quelques centaines d'années probablement.

PISCES – 2° - Mode Offline

10 simulations de 100 ans

750 heures

(b) Expériences d'assimilation

En parallèle, des expériences d'assimilation utilisant les données collectés aux sites océaniques du programme JGOFS devraient permettre d'affiner certains des paramètres du modèle PISCES. Ces expériences seront réalisées dans un cadre 1-D, vraisemblablement sur des poste de travail en local, mais des expériences 3-D, utilisant PISCES en mode offline, devraient permettre de tester l'impact des nouveaux jeux de paramètres sur la distribution 3D des traceurs biogéochimiques dans l'océan et sur les flux air-mer de carbone.

PISCES – 2° - Mode Offline

2 simulations de 1000 ans

1500 heures

→ 2- A l'estimation de l'impact des conditions du Dernier Maximum Glaciaire sur le cycle du carbone océanique.

Cette thématique devait constituer le cœur du projet en 2006, un projet Jeune Chercheur venant d'être accepté à l'ANR. Compte tenu de l'arrivée tardive du post-doctorant prévu sur le projet, la majeure partie des simulations prévues en 2006, n'ont pu être lancées. Nous reportons en partie cette demande sur l'année 2007.

Plusieurs simulations devraient permettre de ré-évaluer les stocks de carbone océanique au LGM et de séparer les différents processus à l'origine des variations de ce stock. Nous prévoyons de réaliser :

- 4 simulations avec PISCES en offline pour tester la réponse de l'océan à une modifications des dépôts de poussières du LGM (ré-actualisation du travail de Bopp et al. Paleoceanography 2003).
- 4 simulations avec PISCES en offline pour tester la réponse de l'océan aux modifications de la dynamique, en utilisant les nouvelles simulations du DMG réalisées au LSCE.
- Plusieurs simulations avec ORCA2, permettant d'obtenir des conditions de stratification extrêmes dans l'océan austral ; puis utilisation de PISCES-offline pour tester l'effet de ces nouvelles circulations sur le cycle du carbone océanique.

PISCES – 2° - Mode Offline

10 simulations de 1000 ans 7500 heures

ORCA – 2°

3 simulations de 1000 ans 600 heures

- ➔ 3- A la poursuite de notre travail concernant l'impact du changement climatique sur la biogéochimie marine.

Dans le cadre du projet FP6-CARBOOCEAN, nous prévoyons de poursuivre les simulations couplés climat-carbone jusqu'en 2200. Il faudra donc réaliser les 100 ans de 2100 à 2200 au cours de l'année 2007 avec le couplé IPSLCM4-LOOP (chaîne couplée climat-carbone).

IPSLCM4-PISCES

3 simulations de 100 ans 1500 heures

*Nota: Le détail des simulations est présenté en Annexe A.*

### Intégration nationale et internationale

Ce projet LSCE représente le volet modélisation à l'échelle globale de la biogéochimie océanique dans le cadre actuel du projet LEFE-MISTERRE (Resp. P. Braconnot et S. Planton) et du projet ANR-GOBAC (Resp. L. Bopp). Il est complémentaire des projets effectués à l'échelle régionale dans le cadre de PROOF. Il est mené en coopération directe avec le LOCEAN (O.Aumont, G. Madec), le LMD (H. Le Treut, J.L. Dufresne) et l'IPSL (M. A. Foujols), dans le cadre du pôle de modélisation de l'IPSL.

Dans le cadre du plan européen en Environnement, nous avons proposé avec succès plusieurs programmes :

1. FP6 :Le projet intégré CARBOCEAN (2005-10) concerne le cycle du carbone océanique. Le LSCE est impliqué dans le volet modélisation globale, pour la variabilité interannuelle à décennale, pour des études de processus et pour les scénarios du changement climatique.
2. FP6 : Le réseau d'excellence EUROCEAN (2005-2010) s'intéresse à la biogéochimie marine. Le LSCE est également fortement impliqué dans ce projet, en particulier pour la modélisation des écosystèmes et de leur réponse au changement climatique.

*(Nota: Les soutiens LEFE, CEE ou ANR ci-dessus ne concernent pas les heures de calcul)*

## Liste de Publications

*Voir le rapport d'activité 2006*

### **3. Méthode(s)**

Algorithme utilisé, adaptation à la plate-forme visée. Le modèle résout l'équation d'advection-diffusion des traceurs dans l'océan. Il est basé sur le modèle de circulation générale (MCGO) du LOCEAN (modèle NEMO). Le MCGO résout les équations primitives des fluides géophysiques en milieu tournant : équations de Navier-Stokes simplifiées par l'hypothèse de Boussinesq, l'hypothèse d'incompressibilité et l'hypothèse hydrostatique. Dans les deux modèles, les équations sont écrites dans un système de coordonnées curvilignes dans les trois directions afin de pouvoir utiliser des grilles s'adaptant à la géométrie du problème traité. La version off-line utilise les sorties à l'équilibre du MCGO de LOCEAN (champs d'advection, coefficients de diffusion et fréquences de convection). Dans la version on-line, le transport des traceurs est assuré conjointement au transport du sel et de la chaleur.

Modalités d'optimisation (vectorisation, optimisation superscalaire, parallélisation). Le modèle est vectorisé selon la direction X, et parallélisé suivant la direction X ou Z, suivant le terme des équations traité. Le multitâche est mis en œuvre suivant une technique de partage de données. La méthode en différences finies permet de vectoriser ce code sans difficulté particulière. La version on-line (OPA8) a été parallélisé par le LODyC.

Structure du programme. Les équations sont discrétisées en différences finies, sur une grille C (Arakawa 1972). L'intégration temporelle est réalisée par un schéma saute-mouton pour les termes advectifs, un schéma Euler-avant pour les termes de diffusion horizontale, et un schéma Euler-arrière pour la diffusion verticale. Un filtre Asselin est utilisé pour éviter la divergence des pas de temps pairs et impairs due au schéma saute-mouton. Le code calcule la concentration en traceur à chaque pas de temps à partir d'un champ initial et de conditions aux limites. Dans les expériences réalisées jusqu'à maintenant, plus de 70 % du temps calcul est pris par les routines du modèle qui calculent le transport de traceur, les routines liées aux effets bio-géochimiques jouant un rôle moindre.

Logiciels prévus. TECPLOT, IDL, Ferret, NCO

Langages utilisés. Fortran 77, Fortran 90

- Bibliothèques prévues. IMSL, IDL, NetCDF

Systèmes de gestion des bases de données ou Systèmes documentaires utilisés: NETCDF et la sur-couche IOIPSL + CVS + Docview

### Annexe A: Justification des ressources demandées sur SX8

Simulations on-line	Durée (an sim.)	h CPU SX8/an sim.	No. de sim	Total CPU SX5
	Années	Heures par Année	Nmbre de simul.	
<b>Développement du modèle PISCES</b>				
1a- Chimie du fer	100	0.75	10	750
1b- Set de paramètres après assim.	1000	0.75	2	1500
<b>Simulations Paléo (Projet ANR)</b>				
ORCA2	1000	0.2	3	600
Offline PISCES	1000	0.75	10	7500
<b>Simulations Changement Climatique</b>				
IPSLCM4/ PISCES	100	5	3	1500
		TOTAL		11850

### Annexe B: évaluation des performances sur SX5

Pour un an de simulation utilisant PISCES en mode offline (lecture des sorties du modèle couple IPSLCM4).

```

***** Program Information *****
Real Time (sec) : 5787.243228
User Time (sec) : 5054.474016
Sys Time (sec) : 55.541667
Vector Time (sec) : 4584.872295
Inst. Count : 401592340772.
V. Inst. Count : 163174331034.
V. Element Count : 30053594323705.
FLOP Count : 12270724039465.
MOPS : 5993.108727
MFLOPS : 2427.695543
VLEN : 184.180895
V. Op. Ratio (%) : 99.212934
Memory Size (MB) : 2112.031250
MIPS : 79.452845
I-Cache (sec) : 4.348771
O-Cache (sec) : 27.483399
Bank (sec) : 2.994982

Start Time (date) : 2004/10/24 10:07:26
End Time (date) : 2004/10/24 11:43:53

```

Nous n'avons pu annexer l'évaluation des performances du modèle PISCES sur le SX8 compte tenu de l'arrêt de Brodie au moment de la rédaction du projet IDRIS. Le gain par rapport au SX5, pour le type d'application présenté ici, est de 2,2 en temps CPU.

