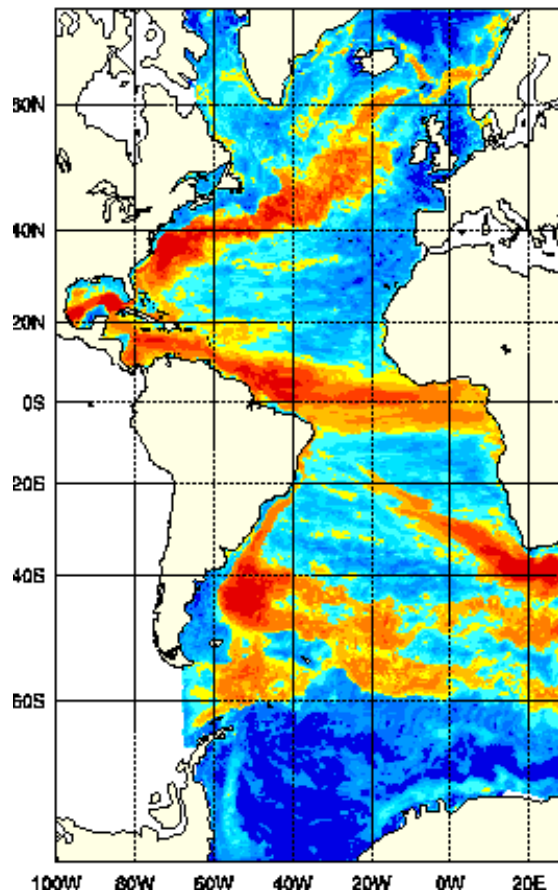




# PROJET CLIPPER

*Modélisation à haute résolution de la circulation dans l'océan Atlantique  
forcée et couplée océan-atmosphère*



Rapport Scientifique et Technique 1999  
N°CLIPPER-R3-2000

Mars 2000

*Laboratoires des  
Ecoulements  
Géophysiques et Industriels  
BP53, 38041, Grenoble*

*Laboratoire de Physique  
des Océans  
IFREMER, Centre de Brest  
BP70, 29263 Plouzané*

*Laboratoire  
d'Océanographie et de  
Dynamique du Climat  
75252 Paris Cédex 05*

*Laboratoire d'Etudes en  
Géophysique et  
Océanographie Spatiale  
31055, Toulouse*

Ce rapport présente les résultats scientifiques et techniques obtenus par le projet CLIPPER en 1999. Il constitue le rapport d'activité annuel fourni aux organismes qui soutiennent le projet; IFREMER, CNRS/INSU, SHOM, CNES et IDRIS.

*\*Page de couverture: Carte d'énergie cinétique turbulente ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) obtenue après huit ans de spin-up du modèle Clipper haute résolution à  $1/6^\circ$  ATL6.*

## Fiche technique

**Cadre des Travaux:** Le projet CLIPPER, modélisation à haute résolution de la circulation dans l'Océan Atlantique forcée et couplée océan-atmosphère.

**Période d'activité concernée par le rapport:** Année 1999.

### Composition de l'équipe projet CLIPPER en 1999

#### *Permanents:*

Scientifiques: B. Barnier, 60%, CNRS, LEGI, Grenoble.  
C. Le Provost, 10%, CNRS, LEGOS, Toulouse.  
G. Madec, 30%, CNRS, LODYC, Paris.  
T. Pichevin, 40%, SHOM, LPO, Brest.  
A. M. Tréguier, 80%, CNRS, LPO, Brest.

Ingénieurs : J. M. Molines, 70%, CNRS, LEGI, Grenoble.  
M. Imbard, 30%, Météo-France, LODYC Paris.

#### *Personnels temporaire ou sous contrat:*

Scientifiques: de Miranda, 100%, ADR, LEGI, Grenoble.  
Expérience haute résolution ATL6.  
Crosnier L., 50%, ADR, LEGI.  
Transport méridien de chaleur.

Ingénieurs : Grima N., 8 mois, CDD CNRS, LODYC, Paris.  
Forçages, expériences couplées.  
Messager C., 4 mois, CDD UBO, LPO Brest.  
Expérience moyenne résolution ATL3.  
Jouzeau A., 1 mois, CDD CNRS LODYC Paris.  
Michel S., 4 mois, CDD UBO, Brest Paris

Thésitifs: K. Béranger, MEN, 30%, LEGI Grenoble.  
Frontières ouvertes, Analyse MOCA.  
J. O. Beismann, DAAD, 50%, LEGI, Grenoble.  
Modèle basse résolution, coordonnées  $s$ , traceurs transitoires.  
C. E. Testut, BDI-CNRS, 50%, LEGI, Grenoble.  
Assimilation de données.

Secrétariat: J. Brasseur, 25%, ADR, LEGI, Grenoble.

Cette année encore, l'équipe projet CLIPPER a vu de deux de ses "matelots", Christophe Messenger et Nicolas Grima, partir vers d'autres horizons. Ils ont été remplacés par Sylvain Michel et Arnaud Jouzeau.

En 1999, la coordination scientifique du projet CLIPPER a été assurée par A. M. Tréguier (LPO-Brest), et la coordination avec MERCATOR et les organismes de recherche a été assurée par C. Le Provost (LEGOS-Toulouse). La coordination technique a été assurée par J.M. Molines (LEGI-Grenoble) et la coordination financière par B. Barnier (LEGI-Grenoble).

**Edition du rapport:** B. Barnier, avec l'aide de A. de Miranda, L. Crosnier, J-M. Molines, A-M. Tréguier, et A. Jouzeau.

**Site officiel CLIPPER:** <http://www.ifremer.fr/lpo/clipper>

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>RÉSUMÉ DES RÉALISATIONS CLIPPER EN 1999</b> .....	<b>6</b>
2.1	FINALISATION DES CONFIGURATIONS DES MODÈLES CLIPPER. ....	6
2.2	LE POINT SUR LES SIMULATIONS CLIPPER .....	7
2.3	AUTRES RÉALISATIONS.....	8
<b>3</b>	<b>RÉALISATIONS PRÉVUES EN 2000</b> .....	<b>9</b>
3.1	EXPLOITATIONS DES SIMULATIONS DÉJÀ RÉALISÉES .....	9
3.2	POURSUITE DE L'EXPÉRIENCE ATL6 JUSQU'EN 1999.....	9
3.3	RÉALISATION DES EXPÉRIENCES COUPLÉES OCÉAN-ATMOSPHÈRE .....	10
3.4	EXPÉRIENCES LONGUES AVEC FORÇAGE INTERANNUEL.....	10
<b>4</b>	<b>EXPÉRIENCES ATLANTIQUE 1/3° ATL3</b> .....	<b>11</b>
4.1	EXPÉRIENCE AVEC FORÇAGE CLIMATOLOGIQUE ATL3-03 .....	11
4.2	SIMULATION DE TRAJECTOIRES LAGRANGIENNES ATL3-04 .....	11
4.3	VARIABILITÉ INTERANNUELLE .....	12
<b>5</b>	<b>EXPÉRIENCE ATLANTIQUE 1/6° ATL6</b> .....	<b>14</b>
5.1	LA CONFIGURATION FINALE CLIPPER ATL6 .....	14
5.2	LA SIMULATION CLIPPER ATL6 .....	19
<b>6</b>	<b>EXPÉRIENCES COUPLÉES</b> .....	<b>25</b>
6.1	OBJECTIFS DES EXPÉRIENCES COUPLÉES .....	25
6.2	PHASES DE DÉVELOPPEMENT .....	26
6.3	ÉTAT D'AVANCEMENT .....	27
6.4	PLAN D'EXÉCUTION .....	27
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>29</b>
7.1	PHASE FINALE DU PROJET CLIPPER 2000-2001 .....	29
7.2	PROJET FUTUR DE MODÉLISATION HAUTE RÉOLUTION POUR CLIVAR .....	30
7.3	RELATIONS AVEC MERCATOR .....	31
<b>8</b>	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>PUBLICATIONS CLIPPER</b> .....	<b>34</b>
9.1	COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS QUI FONT RÉFÉRENCE AUX SIMULATIONS CLIPPER.....	34
9.2	RAPPORTS CLIPPER.....	35
<b>10</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>37</b>
10.1	ARTICLE DE PRÉSENTATION DE CLIPPER DANS LA WOCE NEWSLETTER N°36 DE SEPTEMBRE 1999 .....	38
10.2	ARTICLE SUR L'ÉVALUATION DES FRONTIÈRES OUVERTES DANS ATL3.....	42
10.3	NOTE SUR L'EFFET DE L'ALIASAGE DES OSCILLATIONS INERTIELLES SUR LE TRANSPORT MÉRIDIEN DE CHALEUR DANS ATL6 .....	75
10.4	MISE À DISPOSITION DES RÉSULTATS DE CLIPPER À L'IDRIS.....	85
10.5	DOCUMENTATION SUR L'OUTIL D'INTERPOLATION INTERPOLATION IDL .....	99

# 1 INTRODUCTION

CLIPPER est un programme défini sur 4 ans (1997-2000). Son objectif majeur est la réalisation, la validation et l'exploitation scientifique d'une expérience de modélisation numérique à haute résolution de la circulation océanique dans le bassin Atlantique, en mode forcé par l'atmosphère et en mode couplé océan-atmosphère.

Sur le plan scientifique, CLIPPER est défini autour de deux axes visant à:

- participer à la valorisation des observations réalisées en Atlantique dans le cadre du programme WOCE, et
- comprendre plus spécifiquement le rôle des processus locaux (turbulence de méso-échelle, dynamique de bord ouest, effets de la topographie) sur la circulation océanique à l'échelle d'un bassin, et sur les interactions avec l'atmosphère. Ces objectifs scientifiques ont été définis dans le document introductif du projet présenté au PNEDC à l'automne 1995 [1]. Ils concernent en priorité les questions suivantes :
- Quelle est l'influence de la méso-échelle sur la ventilation et les transports de propriétés ?
- Quelle est la dynamique des courants de bord et leur rôle dans le transport méridien de chaleur ?
- Quelle est l'importance de l'interaction turbulence topographie vis à vis de la circulation générale océanique ?
- Quelle est l'influence de la méso-échelle sur les interactions océan-atmosphère dans un modèle couplé ?

CLIPPER s'inscrit à l'intersection entre les recherches sur la circulation océanique et sur le système climatique, et rejoint ainsi certains objectifs du programme CLIVAR. Au plan national, les réalisations du projet CLIPPER contribuent largement à la recherche amont nécessaire à la mise en place du projet MERCATOR.

Pour atteindre ces objectifs, l'équipe projet CLIPPER met en place, teste et valide des configurations de modèle à basse ( $1^\circ$ ), moyenne ( $1/3^\circ$ ) et haute ( $1/6^\circ$ ) résolution, et réalise des simulations de la circulation dans l'Atlantique relatives à la période WOCE (années 1980 à 2000), qui sont mises à la disposition de la communauté océanographique française.

Ces configurations servent à des études de processus dynamiques et aux développements de méthodes d'assimilation menées au LEGOS, au LEGI et au LPO. Enfin, un nombre croissant de scientifiques utilisent les données des simulations CLIPPER pour leurs études scientifiques, comme cela a pu être remarqué alors de la première conférence internationale sur le système d'observation de l'océan pour le climat qui s'est tenue à Saint Raphaël [2].

L'objet du présent rapport est de décrire les réalisations scientifiques et techniques du projet CLIPPER en 1999, de présenter le programme de travail de l'année 2000 et de discuter les perspectives.

## 2 RESUME DES REALISATIONS CLIPPER EN 1999

Les travaux menés en 1999 par l'équipe projet ont permis de finaliser les choix des différentes configurations des modèles CLIPPER et de réaliser les expériences prévues. En particulier, au moment de l'édition du présent rapport, les expériences à très haute résolution ( $1/6^\circ$ ) ATL6 en mode forcé, c'est à dire les huit ans de *spin-up* et les 15 ans de simulation inter-annuelle sur la période de la ré-analyse (1979-1993), sont terminées. Le calendrier initial de CLIPPER a donc été tenu, et ce malgré de nombreuses difficultés techniques que l'équipe a dû surmonter, ce qui a été possible grâce à la compétence et aux efforts des ingénieurs et techniciens ayant travaillé sur le projet, et à la disponibilité des moyens de calcul parallèle de l'IDRIS dont nous avons très largement bénéficié.

### 2.1 Finalisation des configurations des modèles CLIPPER.

L'essentiel de la configuration ATL3 ( $1/3^\circ$ ) a été présentée dans le précédent rapport d'activité [3], et dans un rapport présentant le spin-up de l'expérience ATL3-03 [4]. Certains choix encore en suspens pour cette configuration ont été confirmés;

une grille raffinée au détroit de Gibraltar, afin d'avoir une simulation dynamique des échanges entre l'Atlantique et la Méditerranée;

- une stratégie de sauvegarde sur les quantités instantanées;
- une frontière fermée au nord du domaine;
- Le choix du modèle d'atmosphère LMD-Z pour les expériences couplées, à cause de sa physique délocalisée dans la couche limite planétaire.

Une hiérarchie de modèles est maintenant disponible et certains sont utilisés par la communauté (Tableau 1). Citons en exemple la configuration Atlantique basse résolution ATL1 ( $1^\circ$ ) utilisée au LEGI, en coopération avec une équipe du LODYC pour l'étude des CFC en relation avec la variabilité dans l'Atlantique sur la période 1958-1997, et la configuration Atlantique Nord à moyenne résolution NATL ( $1/3^\circ$ ) utilisée au LEGOS et au LEGI pour des études d'assimilation de données, et par l'équipe projet MERCATOR pour la préparation de la maquette MERCATOR.

Parmi les décisions importantes finalisées en 1999, on retiendra celles concernant la simulation ATL6 au  $1/6^\circ$ ;

- la résolution verticale, avec 42 niveaux;
- les conditions aux frontières ouvertes au passage de Drake et au Sud de l'Afrique. Il a été décidé dans la définition des conditions de flux entrant: d'utiliser des sections hydrographiques et non des données climatologiques pour calculer la partie barocline de l'écoulement, et de considérer l'hypothèse d'un écoulement équivalent barotrope (référence au fond pour l'intégration du vent thermique) pour déterminer la fonction de courant.
- Les conditions de frontières au détroit de Gibraltar, ou une frontière ouverte a été préférée à la grille raffinée dans le détroit (cette dernière configuration étant celle retenue pour ATL3). La mer d'Alboran n'est donc plus présente dans le modèle ATL6.
- Les forçages atmosphériques, pour lesquels le choix d'utiliser les flux de la ré-analyse ECMWF sans y apporter de correction autre que le terme de rétroaction calculé avec la SST hebdomadaire de Reynolds;
- les données d'initialisation, qui sont déduites de la climatologie de Reynaud et al. [5];

- les données dans les zones "buffer" au nord du domaine modélisé, où la climatologie de Reynaud a été préférée aux données du projet DYNAMO [6];
- une condition de frontière ouverte a été mise en œuvre à la limite nord du modèle à 70°N, pour prendre en compte le flux entrant dans l'Atlantique par le détroit de Bering;
- la stratégie de lâché de flotteurs lagrangiens, qui a été définie en relation avec les équipes expérimentales concernées, avec 8 régions et stratégies différentes, et une expérience dédiée de 3 ans dans la région équatoriale pour les besoins exprimés par une équipe du LEGOS;
- les sauvegardes. La stratégie de sauvegarde des variables du modèle a été modifiée pour s'affranchir sans ambiguïté de l'aliasing des signaux de haute fréquence (inertiels, voir Annexe). La fréquence de sauvegarde est de 5 jours, et les quantités sauvegardées ne sont pas des instantanés, mais sont les moyennes réalisées sur tous les pas de temps pour des périodes consécutives de 5 jours.

Tableau 1 : Les configurations de modèle CLIPPER

Configuration	Name	Boundaries	Number of points	Grid size
Low Resolution Atlantic	ATL1	lon: 98.5W to 30E lat: 75S to 70N	131x218 42 levels	min: 28 km max: 111 km
Mid-Resolution Atlantic	ATL3	lon: 98.5W to 30E lat: 75S to 70N	387x649	min: 9.6 km max: 37 km
North Atlantic	NATL	lon: 98.5W to 20E lat: 20S to 70N	358x361	min: 12.6 max: 37 km
High Resolution Atlantic	ATL6	lon: 98.5W to 30E lat: 75S to 70N	773x1296	min: 4.8 km max: 18.5 km
Mid-Resolution Atlantic coupled with	C-ATL3	as ATL3	387x649x42	0.33°x0.33°
Global Atmospheric		Global	96x72x19	3.75°x2.5°

## 2.2 Le point sur les simulations CLIPPER

En ce qui concerne les objectifs principaux du projet CLIPPER, à savoir les simulations de la circulation dans l'Atlantique à moyenne (1/3°, ATL3) et haute (1/6°, ATL6) résolution, et les simulations couplées océan atlantique-atmosphère globale, les choix qui ont été faits ont permis des avancées significatives en 1999. En particulier l'optimisation du découpage des configurations ATL3 sur 52 processeurs T3E et ATL6 sur 140 processeurs T3E ont été réalisées et validées, ce qui a exigé un gros travail informatique.

Ces avancées techniques nous ont permis de réaliser pendant le second semestre de 1999 les principales simulations en mode forcé prévues par le projet CLIPPER. Ainsi, au début de l'année 2000, l'équipe projet a réalisé les simulations suivantes:

- ATL3-03: Le spin-up de la simulation à 1/3° (15 ans d'intégration ATL3) est terminé, et les résultats de cette simulation sont présentés dans rapport disponible sur le site web de CLIPPER.
- ATL3-04: La simulation des années WOCE avec le modèle au 1/3°, c'est à dire 15 ans de simulations avec les flux des ré-analyses ECMWF (1979-1993) est également terminée.
- ATL6-V5: Le spin-up de la simulation à 1/6° est terminé, et les résultats de cette simulation sont présentés dans rapport disponible sur le site web de CLIPPER.

- ATL6-V6: La simulation des années WOCE avec le modèle haute résolution au 1/6°, c'est à dire 15 ans avec les flux des ré-analyses ECMWF (1979-1993) est également terminée.
- ATL1-NCEP: Une série de simulations sur les 40 ans de la ré-analyse NCEP ont été réalisées, avec des simulations de traceur CFC "on-line" (thèse de J.-O. Beismann [7]).

### 2.3 *Autres réalisations*

Ainsi, le projet CLIPPER a réalisé en 1999 la réalisation presque totale des simulations en mode forcé prévues et les premières analyses des expériences à moyenne et haute résolution ont débuté. Une des réalisations majeures du projet reste la mise en place des simulations en mode couplé avec un modèle d'atmosphère, même si un retard est à prévoir en raison du changement de calculateurs à l'IDRIS. Dans ce domaine, le choix des modèle ayant été finalisé (ATL3 pour l'océan et LMDz pour l'atmosphère), les actions importantes réalisées ou en cours de réalisation ont été:

- La validation de la configuration ATL3 sur le NEC
- La validation de LMDz avec une couche limite délocalisée limitée au secteur Atlantique
- Le couplage via OASIS2.2.

Citons également la mise en place d'une procédure d'accès aux données de simulation CLIPPER, et le développement d'un site Web CLIPPER (<http://www.ifremer.fr/lpo/clipper/>) sur le site d'IFREMER sur lequel les résultats des simulations et les rapports et résumés de communications relatifs au projet sont accessibles à la communauté internationale. Ce site est accessible par le site officiel de WOCE.

### **3 REALISATIONS PREVUES EN 2000**

Les travaux de l'équipe projet en 2000 prévoient trois grands axes d'activités; l'exploitation scientifique des simulations en mode forcé, la poursuite des expériences à haute résolution ATL6 jusqu'en fin 1999, et la réalisation des expériences couplées.

#### **3.1 Exploitations des simulations déjà réalisées**

Les simulations ATL1, ATL3 et ATL6 sont en cours de validation et d'analyse par l'équipe projet et par les équipes associées (voir liste des communications et publications). La base de données CLIPPER est extrêmement volumineuse, et rendre son exploitation possible par l'ensemble de la communauté exige une organisation particulière de l'équipe projet. Si une procédure d'accès aux données à travers l'IDRIS a été mise en place (voir annexe), l'équipe projet fournira cependant un soutien logistique aux équipes qui veulent accéder à l'archive. C'est Sylvain Michel, ingénieur CLIPPER au LPO qui assurera cette tâche, avec l'aide de Jean-Marc Molines au LEGI.

Un plan d'analyse est en cours de préparation, et devrait être publié pour la réunion CLIPPER avec les équipes associées. Ce document présentera de façon synthétique les objectifs scientifiques des actions de recherche qui utilisent les résultats de CLIPPER. Il traitera en particulier

- de la validation générale des simulations ATL6
- des questions scientifiques abordées avec les données des modèles
- des études utilisant les configurations développées par CLIPPER

Un axe important de l'exploitation des simulations CLIPPER est la coopération avec le projet allemand FLAME dirigé par C. Böning. Les deux projets se rencontreront au LPO à Brest les 8 et 9 Juin 2000, avec comme objectif de comparer leurs résultats et de mettre en commun leur simulations pour une meilleure réalisation de leurs objectifs scientifiques. Les similarités de certaines configurations des modèles (en particulier ATL1 et ATL3), devrait permettre de vérifier la robustesse de certains résultats, et les différences entre les expériences devrait permettre de mieux comprendre la dépendance des solutions aux paramétrisations.

#### **3.2 Poursuite de l'expérience ATL6 jusqu'en 1999**

Lors de la réunion CLIPPER de Juin 1999, la communauté avait manifesté sa forte préoccupation de voir les simulations ATL6 forcées par les ré-analyses ECMWF sur la période 1979 à 1993, se poursuivre jusque fin 1999. L'équipe projet a donc entrepris une étude concernant la continuité des estimés des flux ECMWF entre la ré-analyse et les analyses relatives aux années 1994-1999. Il ressort de ces études que de forts biais existent dans le flux net de chaleur et le flux E-P entre les deux jeux de forçage. En revanche la continuité des vents est remarquable. Une solution acceptable pour poursuivre ces simulations est à l'étude, mais il est déjà établi que la simulation ATL6 pourra être prolongée de six années, et couvrira donc la période 1979-1999. Les ressources de calcul sont disponibles à l'IDRIS sur l'attribution 2000 faites à CLIPPER. Le plan de réalisation comporte;

- La préparation des forçages journaliers sur la période 1994-1999 pour ATL1 (modèle atlantique à 1°) et ATL6 (modèle atlantique 1/6°).
- La simulation des années 1994 à 1999 en continuité des simulations faite avec la ré-analyse (8 ans de spin-up avec les forçages climatologiques 1979-1993, et 15 ans de simulation interannuelle avec les forçages journaliers 1979-1993) pour ATL1 et ATL6.

### **3.3 Réalisation des expériences couplées océan-atmosphère**

Ces expériences sont les premières couplant un modèle de bassin océanique ayant une haute résolution avec un modèle global d'atmosphère par l'intermédiaire d'une physique de couche limite atmosphérique délocalisée. Ces travaux sont donc particulièrement novateurs et exploratoires (voir le chapitre 6 du présent rapport). les réalisations majeures prévues en 2000 (et 2001) sont:

- Finaliser de la validation de la configuration ATL3 sur le NEC (expériences avec le modèle d'océan seul en mode forcé).
- Terminer la validation de LMDz avec une couche limite délocalisée limitée au secteur Atlantique (expériences avec le modèle d'atmosphère seul, forcé avec et sans couche limite délocalisée).
- Tester la méthode de couplage

La réalisation et l'exploitation d'expériences pluri-annuelles en mode couplé, avec et sans la physique de la couche limite délocalisée, devrait pouvoir débuter en 2000, et seront certainement la réalisation majeure du projet en 2001.

### **3.4 Expériences longues avec forçage interannuel**

L'équipe projet CLIPPER a exprimé le souhait de réaliser des expériences plus longues pour l'étude de la variabilité interannuelle, dans le cadre de la préparation de CLIVAR. Une stratégie provisoire a été définie à l'automne 99 pour dimensionner la demande d'heures de calcul à l'IDRIS. Toutefois, cette stratégie doit être adaptée sur la base des résultats et analyses récents. D'une part, l'analyse des expériences au  $1/3^\circ$  et  $1/6^\circ$  permettra de déterminer laquelle de ces deux configurations est la plus adaptée pour des expériences longues, en fonction des objectifs des équipes associées. D'autre part, la seule série de forçages longue actuellement disponible est celle de la ré-analyse du NCEP/NCAR (1958-1999). Une évaluation des résultats d'autres configurations de modèles forcés par cette série temporelle est nécessaire (configuration CLIPPER ATL1 et modèles du projet Allemand FLAME). Ces points seront discutés en détail lors de la réunion CLIPPER les 7 et 8 juin à Brest.

## 4 EXPERIENCES ATLANTIQUE 1/3° ATL3

### 4.1 *Expérience avec forçage climatologique ATL3-03*

Une première expérience de tout l'Atlantique à résolution moyenne (1/3°), ATL3-03, a été conduite en mars-avril 1999. Cette expérience a été forcée par la climatologie des vents et flux de la réanalyse du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme (CEPMT-ECMWF), c'est à dire la moyenne des années 79-93, pendant 22 ans. Cette expérience a été rendue possible par la mise au point de l'algorithme de frontières ouvertes. Celui-ci avait été implémenté par J.M. Molines et M. Imbard au printemps 1998, et avait été testé avec succès dans une configuration basse résolution fin 1998. Toutefois plusieurs tests et une modification des paramètres ont été nécessaires avant de pouvoir réaliser une expérience de longue durée à plus haute résolution.

La stratégie de cette expérience est présentée dans un article de International WOCE Newsletter (septembre 1999), annexe 1 du présent rapport. Une première série de graphiques et de diagnostics standards ont été immédiatement rassemblés sous forme d'un rapport [5] disponible sur le serveur WEB de CLIPPER. Les résultats ont été présentés lors de la réunion CLIPPER les 25 et 26 mai à BREST. La discussion a permis de finaliser la stratégie de l'expérience au 1/6° (voir chapitre 5).

Une étude détaillée du comportement des frontières ouvertes a été entreprise dans ATL3-03. Cette étude met en évidence le caractère actif de ces frontières dans le forçage de l'intérieur du domaine. A priori, on supposait que la frontière au sud de l'Afrique jouerait un rôle passif, car le courant Antarctique Circumpolaire tend à advecter les perturbations hors du domaine par cette frontière. Nous avons montré que ce n'est pas le cas. L'amélioration du modèle nécessitera donc une prescription plus réaliste de l'hydrologie et des courants à cette frontière, ce qui n'est pas possible actuellement vu la faible densité des observations. Cette étude a fait l'objet d'une publication soumise [8] (annexe 2).

### 4.2 *Simulation de trajectoires Lagrangiennes ATL3-04*

Une nouvelle expérience, ATL3-04 a été réalisée avec cette fois les forçages journaliers des années 1979 à 1993. Elle commence à la 7<sup>ème</sup> année de ATL3-03. Lors de cette expérience plus de 2000 trajectoires de flotteurs ont été simulées pendant 4 ans. Ces trajectoires ont été analysées par R. Lumpkin [9],[10], afin d'éclaircir la relation entre les échelles Eulériennes et Lagrangiennes en Atlantique Nord.

L'altimétrie satellitaire a permis récemment de mesurer les échelles spatiales Eulériennes à la surface de l'océan [11], ce qui a montré que ces échelles décroissent de l'Equateur vers les pôles de manière similaire à la décroissance du premier rayon de déformation (échelle caractéristique de l'instabilité barocline). R. Lumpkin [10], en analysant l'ensemble de la base de donnée des trajectoires observées en Atlantique Nord, a montré que les échelles spatiales Lagrangiennes mesurées sur une trajectoire ne présentent pas du tout la même distribution spatiale.

La simulation de trajectoires Lagrangiennes dans le modèle permet de disposer simultanément des données Eulériennes et Lagrangiennes et donc de résoudre cette contradiction apparente. Le modèle reproduit bien, comme les modèles CME de l'Atlantique Nord, la décroissance des échelles Eulériennes de l'équateur vers les pôles. Il reproduit aussi la distribution latitudinale des échelles Lagrangiennes, bien que l'énergie cinétique du modèle soit inférieure à celle observée. R. Lumpkin [10] a montré que la relation entre échelles Lagrangiennes et Eulérienne est bien décrite

par le formalisme introduit par Middleton [12]. Il semble que la plus grande partie de l'océan soit dans un régime de "variations temporelles rapides", c'est à dire une limite où les échelles spatiales Eulériennes sont grandes devant les échelles spatiales Lagrangiennes, tandis que les échelles *temporelles* Eulériennes et Lagrangiennes sont voisines. Les variations de régime entre les régions énergétiques et les régions plus calmes de l'océan rendent difficiles l'interprétation des échelles lagrangiennes observées en termes de dynamique océanique.

### 4.3 Variabilité interannuelle

L'expérience ATL3-04 a permis de tester la validité des forçages de la réanalyse. Une analyse préliminaire de la variabilité interannuelle a été réalisée dans la région de l'expérience POMME en Atlantique Nord-Est. La profondeur de la couche de mélange, l'extension spatiale de la convection profonde et la date de début de la convection varient fortement d'une année à l'autre. Des cartes de maximum de profondeur de la couche de mélange correspondant à des années extrêmes sont présentées Fig. 4.1.

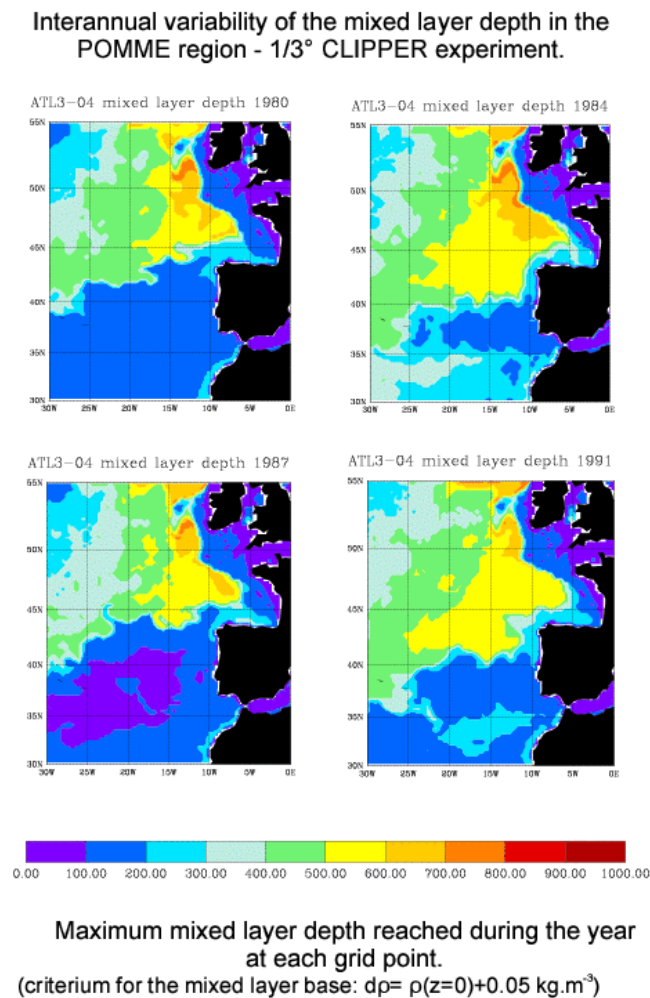


Figure 4.1 : Expérience interannuelle ATL3-04 (1/3°). Profondeur maximale simulée de la couche de mélange hivernale dans la région Pomme pour 4 années entre 1979-1993 ou elle est particulièrement profonde.

Les mêmes années de forte convection et de faible convection sont observées dans le modèle basse résolution de Knochel [13] forcé par la série de 40 ans de réanalyse du NCEP. Ceci suggère qu'il s'agit d'un signal physique, présent dans les forçages atmosphériques et qui est probablement lié à la NAO (North Atlantic Oscillation).

## 5 EXPERIENCE ATLANTIQUE 1/6° ATL6

### 5.1 La Configuration finale Clipper ATL6

La grille horizontale de la configuration ATL6 possède une maille de 1/6° de type Mercator, ce qui signifie qu'elle se raffine vers le pôle tout en restant isotrope. La maille ainsi définie est minimale aux plus hautes latitudes (4.8 km en mer de Weddell par exemple) et s'élargit en allant vers l'équateur pour atteindre une valeur de 18.5 km.

Couvrant une région allant de 98.5°O à 30°E et de 75°S à 70°N, la grille du modèle possède 773 x 1296 points sur l'horizontale. La résolution verticale qui est la même pour toutes les configurations de type Clipper, est de 43 niveaux. Les écarts entre deux niveaux, définis par une fonction tangente hyperbolique comme dans la version globale du modèle du LODYC [14], sont quasiment constants et égaux à une dizaine de mètres près de la surface, et augmentent ensuite rapidement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 200 m au fond.

Dans un premier temps, le projet Clipper devait explicitement résoudre la sortie d'eau Méditerranéenne à Gibraltar. La grille avait été déformée dans la région de Gibraltar pour augmenter la résolution localement. De nombreux essais, avec la configuration au 1/3°, ainsi qu'avec une version locale de la configuration au 1/6°, n'ont jamais permis de corriger la profondeur à laquelle se faisait la sortie de l'Eau Méditerranéenne (500m) en aval du détroit de Gibraltar. La décision a donc été prise d'ouvrir une frontière ouverte dans le Golfe de Cadix à 8°O.

Les problèmes de convection excessive dans le Gyre subpolaire Nord ont conduit à l'ouverture de la frontière Nord. A l'origine la frontière à 70°N était fermée et se situait au fond d'une zone de rappel vers la climatologie pour assurer les bonnes propriétés des eaux profondes qui passent aux dessus des seuils nordiques. La véritable raison pour laquelle la convection en Mer du Labrador et en Mer d'Irminger est excessive est probablement liée à une faible résolution horizontale comparée aux échelles des processus physiques liés à la convection, qui de toute façon ne sont pas correctement résolus par le modèle. La frontière Nord a été ouverte afin de tenter de limiter cette convection excessive par un apport net d'eau douce des mers Nordiques de 1Sv.

Ces deux frontières ouvertes constituent les principales différences entre les simulations CLIPPER au 1/3 et au 1/6 de degré.

La topographie a été définie à partir des données bathymétriques de Smith & Sandwell (1997) [15], qui utilisent des données issues de mesures altimétriques et in-situ complétées au Sud de 72°S par les données de la NOAA (Terrainbase 5). La topographie a été interpolée sur la grille du modèle à l'aide d'une interpolation bilinéaire utilisant les 4 points voisins, et un léger lissage. La profondeur d'un certain nombre de passages cruciaux assurant la communication profonde entre les bassins ont été vérifiés « à la main ».

Les données d'initialisation proviennent de la climatologie d'hiver de Reynaud & al. (1998) [5]. Il y a trois « buffer zones » dans lesquelles les champs de température et de salinité sont rappelés vers la climatologie, une en Mer de Weddell, et les deux autres au Nord du domaine, dans la Baie de Baffin et dans les mers nordiques.

Les forçages journaliers proviennent de la réanalyse ECMWF et ont été décrits en détail dans le précédent rapport d'activité [3].

Mise à part la résolution horizontale, les principales différences entre ATL6 et ATL3 viennent de la prescription des données aux frontières et en particulier de l'ouverture de la frontière Nord, et de la suppression de la Méditerranée, qui a été remplacée par l'ouverture d'une frontière dans le Golfe de Cadix à 8°O. Nous allons, dans ce qui suit, détailler les conditions aux frontières ouvertes d'ATL6 et en particulier les deux nouvelles frontières ouvertes.

### 5.1.1 Données climatologiques à la frontière ouest (Passage de Drake)

Les champs de température et de salinité le long de la frontière ouest (68°O) proviennent de la section synoptique de Roether & al. (1993) [16]. Les vitesses baroclines sont calculées à l'aide des équations du vent thermique. Comme dans le cas des simulations au 1/3°, plutôt que de définir arbitrairement une fonction de courant barotrope, nous avons choisi d'utiliser l'hypothèse selon laquelle l'écoulement est « équivalent barotrope » [17].

Les vitesses barotropes calculées de cette manière sont représentées sur la Figure 5.1. La Figure 5.2 représente la fonction de courant barotrope cumulée correspondant au profil de vitesses barotropes. Le transport total à travers le Passage de Drake est de 140Sv.

Les flux de chaleur et de sel associés à ces champs climatologiques sont de 1.36 PW et  $4.9 \cdot 10^9$ kg/s.

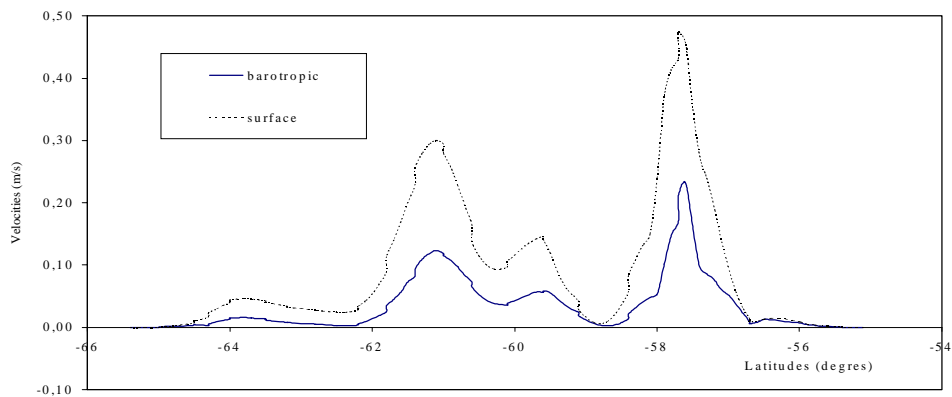


Figure 5.1 : vitesses climatologiques en surface et vitesses barotropes prescrites le long de la frontière Ouest (Passage de Drake) dans l'expérience au 1/6° (les vitesses vers l'est sont positives).

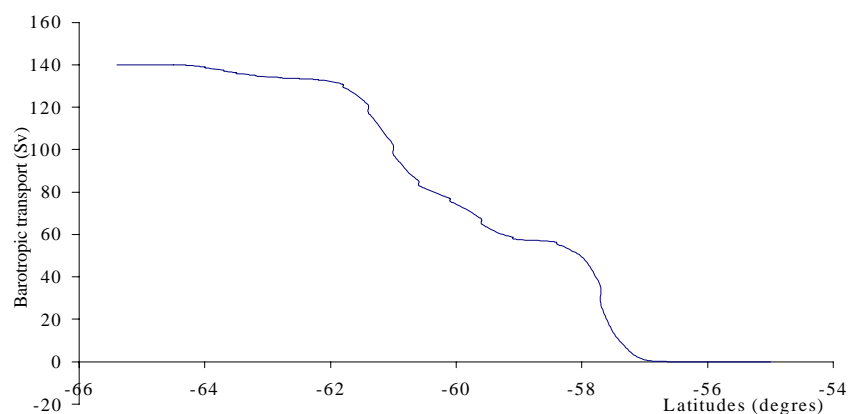


Figure 5.2 : profil de la fonction de courant barotrope climatologique utilisée le long de la frontière Ouest (passage de Drake) dans la simulation CLIPPER 1/6°.

### 5.1.2 Données climatologiques à la frontière Est (30°E)

Les champs de température et de salinité le long de la frontière Est proviennent de la section synoptique de Park & al. (1998) [18]. Les vitesses baroclines ont été calculées selon la même méthode qu'au Passage de Drake. Le transport barotrope total calculé avec l'hypothèse d'équivalent barotrope conduit à un transport total de 283 Sv. Cela signifie que l'hypothèse est moins justifiée à 30°E qu'elle ne l'était au passage de Drake, au moins sur une partie de la section. Nous avons donc choisi d'imposer le transport du Courant des Aiguilles à 70 Sv, et celui du Courant péri-Antarctique entre le continent et 65°S à 15Sv. Entre les deux, une correction linéaire est appliquée pour conduire à un transport total de 140 Sv.

La Figure 5.3 représente les vitesses climatologiques en surface et vitesses barotropes prescrites le long de la frontière Est, et la Figure 5.4 a fonction de courant barotrope associée.

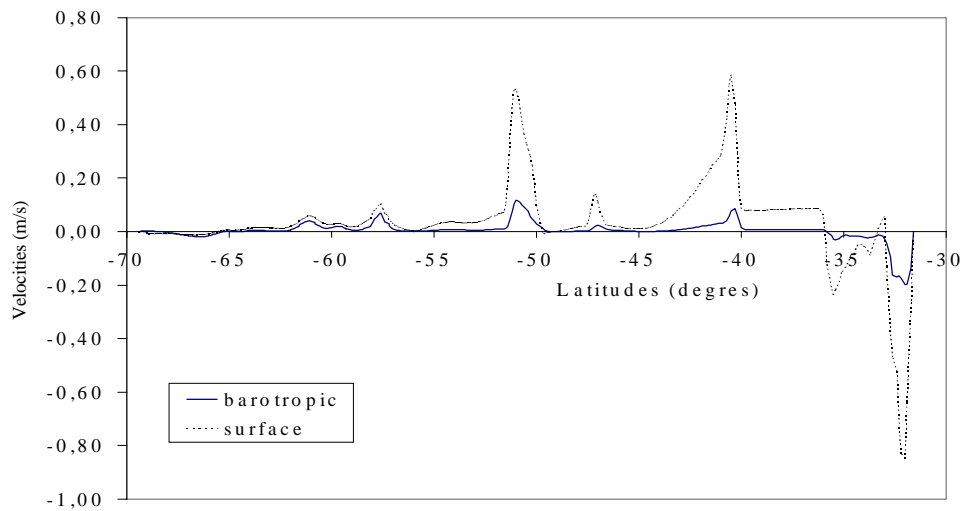


Figure 5.3 : vitesses climatologiques en surface et vitesses barotropes prescrites le long de la frontière Est (30°E) dans l'expérience au 1/6° (les vitesses vers l'ouest sont négatives).

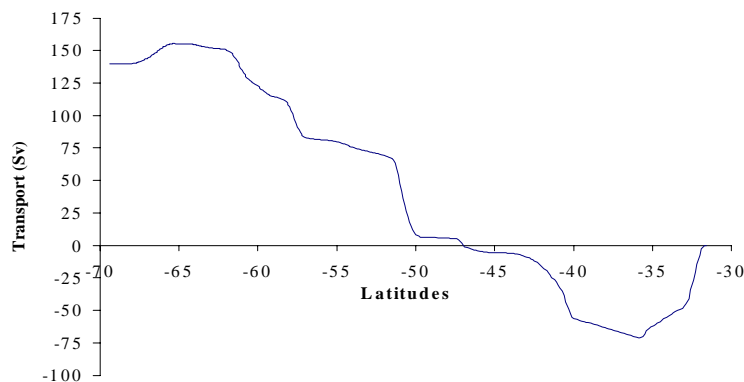


Figure 5.4 : profil de la fonction de courant barotrope climatologique utilisée le long de la frontière Est (30°E) dans la simulation CLIPPER 1/6°.

### 5.1.3 Données climatologiques à la frontière Nord.

Les données climatologiques imposées le long de la frontière Nord sont issues de la climatologie de Reynaud [5]. Les vitesses barotropes sont calculées en utilisant une formulation analytique qui prescrit un courant vers le Sud dont le transport est de 8 Sv le long du bord Ouest (Groenland), et un courant de Norvège vers le Nord dont le transport est de 7 Sv. Le profil de la fonction de courant barotrope est montré Figure 5.5, et les vitesses barotropes correspondantes ainsi que les vitesses en surface sont montrées Figure 5.6.

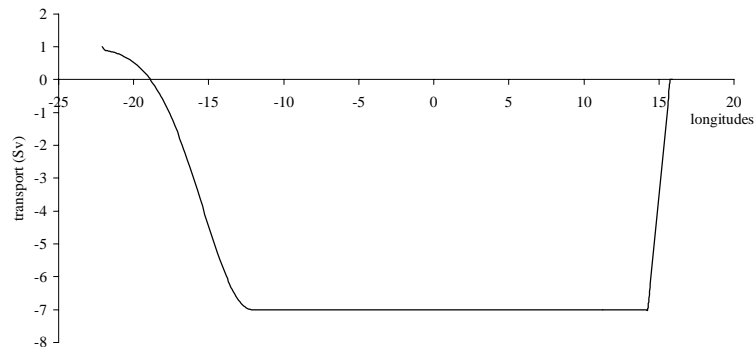


Figure 5.5 : Fonction de courant barotrope le long de la frontière Nord (les vitesses vers le sud sont négatives).

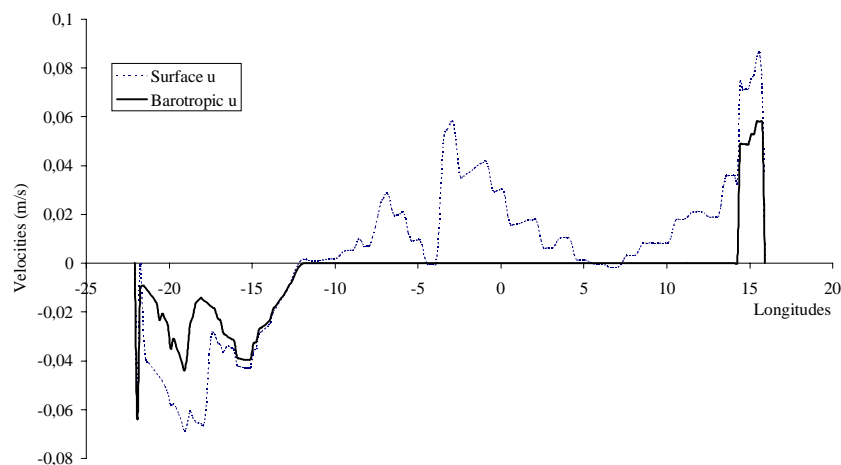


Figure 5.6 : Profil des vitesses en surface et barotropes imposées le long de la frontière Nord.

### 5.1.4 Données climatologiques à la frontière à 8°W dans le Golfe de Cadix.

Les données climatologiques imposées le long de la frontière à 8°O dans le Golfe de Cadix sont issues de la climatologie de Reynaud [5]. Comme après calcul géostrophique le cœur de la veine d'eau Méditerranéenne n'était pas assez prononcé, les données ont été légèrement modifiées pour refléter les observations [19]. Les vitesses barotropes ont été calculées en se basant sur le profil

annuel moyen des simulations au  $1/3^\circ$ . Un profil analytique prescrit un flot de 4 Sv vers l'Est entre l'Afrique et  $36^\circ\text{N}$ , et 4 Sv vers l'Ouest entre  $36^\circ\text{N}$  et la côte portugaise (Figure 5.7).

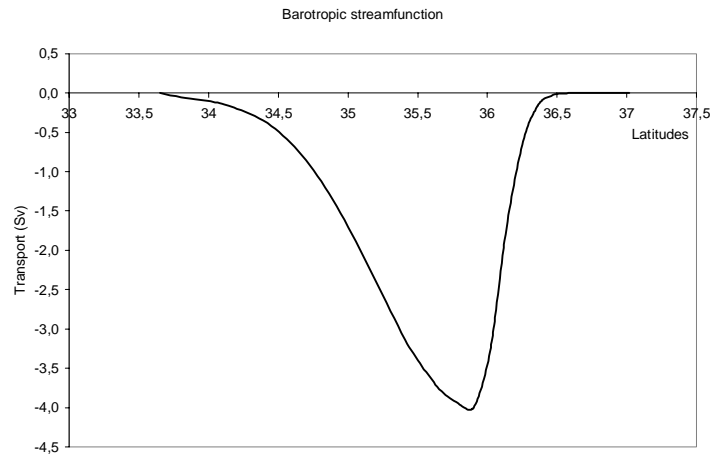


Figure 5.7 : Profil de la fonction de courant barotrope imposée le long de la frontière ouverte dans le Golfe de Cadix.

La Figure 5.8 représente les vitesses barotropes associées ainsi que les vitesses en surface et à 1045 m imposées le long de la frontière dans le Golfe de Cadix. On y remarque un courant vers l'Ouest au Nord de la section qui s'intensifie en profondeur, les vitesses vers l'Ouest à 1045 m atteignent 10 cm/s.

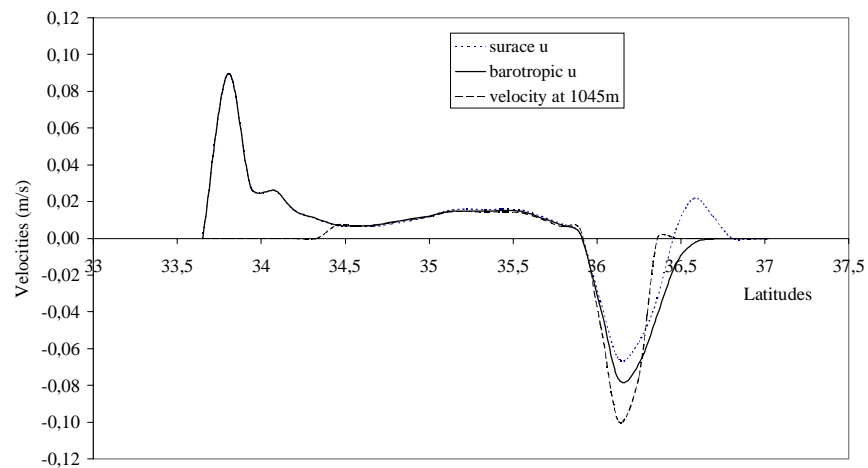


Figure 5.8 : Profil des vitesses en surface et à 1045m, ainsi que profil des vitesses barotropes le long de la frontière ouverte dans le Golfe de Cadix (les vitesses vers l'ouest sont négatives).

La Figure 5.9 représente les températures et salinités climatologiques utilisées dans les algorithmes de radiation le long de cette frontière.

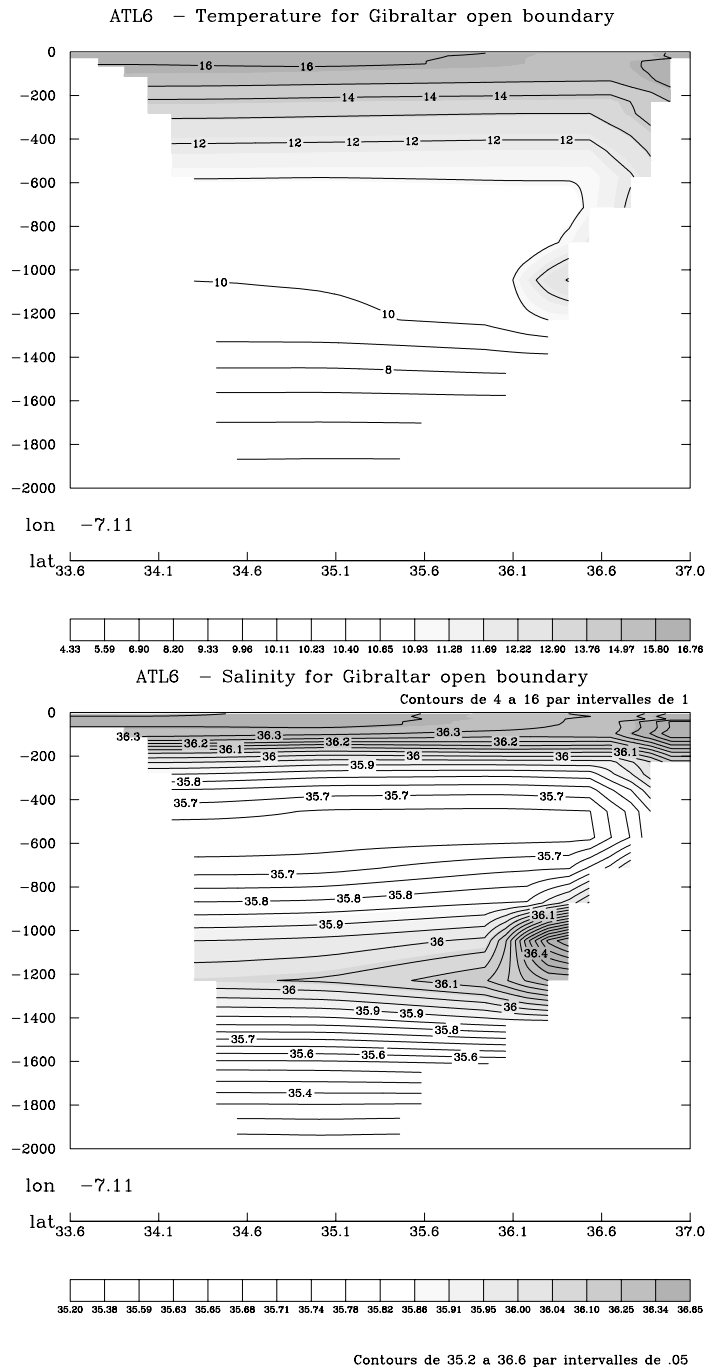


Figure 5.9 : Température (en haut) et salinité (en bas) le long de la frontière ouverte dans le Golfe de Cadix.

## 5.2 La simulation CLIPPER ATL6

### 5.2.1 Le spinup : ATL6-V5

Le spinup de la simulation ATL6-V5 a une durée de 8 ans (années 1950 à 1958). Les forçages sont des forçages journaliers climatologiques issus de la moyenne des années 1979 à 1993. Ce choix de 8 ans a été effectué en se basant sur les résultats des expériences au  $1/3^\circ$ .

Un rapport détaillé de ce spinup a été publié [20] et distribué aux équipes associées. Il est également disponible sur le site web du projet CLIPPER. Ce rapport détaille l'ensemble des paramètres utilisés pour cette simulation et présente une vision d'ensemble des résultats.

Nous rappelons ici que le pas de temps utilisé pendant le spin-up de la simulation au  $1/6^\circ$  (ATL6-V5) est de 1200 s, et que les opérateurs de diffusion et de dissipation horizontales sont des biharmoniques dont le coefficient est de  $-5.5 \cdot 10^{10} \text{ m}^4 \text{ s}^{-1}$ . Les coefficients de diffusion verticale sont calculés à l'aide d'un schéma de fermeture turbulente (TKE).

31 « mouillages » ont été placés à des positions répertoriées dans le rapport ATL6-V5. On entend par mouillage, un point où toutes les 3 itérations (i.e. ici toutes les heures) la température, la salinité et les deux composantes de la vitesse sont sauvegardées à chacune des profondeurs du modèle.

### 5.2.2 Un aperçu rapide de la dernière année du spinup.

La Figure 5.10 représente la moyenne sur la dernière année du spin-up (année 1957) de la fonction de courant barotrope.

ATL6-V5 Streamfunction (Sv)  
y1957

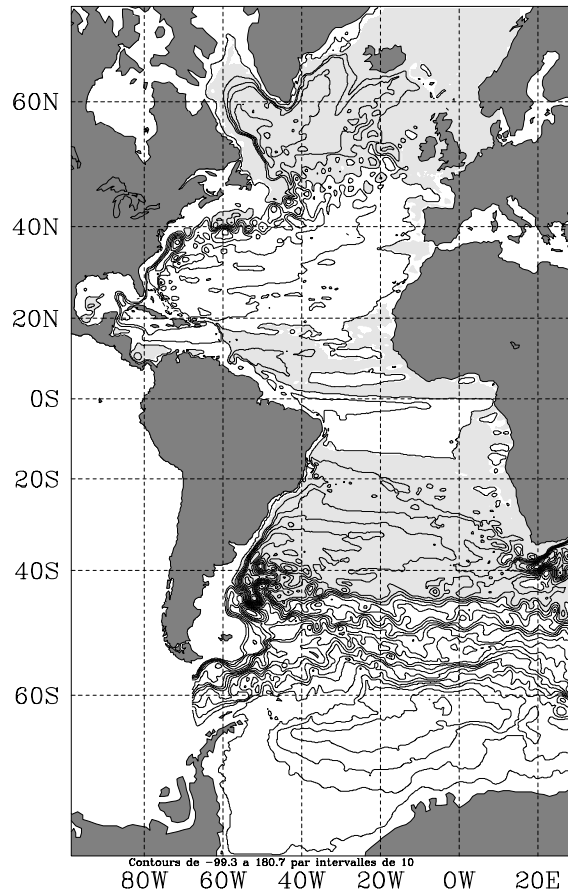


Figure 5.10 : Fonction de courant barotrope moyenne de la dernière année (1957) du spinup de l'expérience CLIPPER ATL6.

On observe la présence des gyres subtropicaux de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud, dont les courants de bord Ouest (le Gulf Stream au Nord et le Courant du Brésil au Sud) sont plus fins et ont des transports plus importants que dans la simulation au  $1/3^\circ$ . Le gyre subpolaire est lui aussi plus intense puisque le transport du courant du Labrador atteint 50 Sv. Le transport dans le détroit de Floride fluctue autour de 30 Sv. La région de Confluence est légèrement plus au Nord et moins zonale que dans la simulation au  $1/3^\circ$ , mais elle est encore trop au Sud. Le Courant des Aiguilles pénètre dans l'Atlantique Sud et réfléchit entre  $15$  et  $20^\circ\text{E}$  et lâche des tourbillons à une fréquence de 3.5 par an.

La Figure 5.11 représente les moyennes annuelles et saisonnières du flux méridien de chaleur en fonction de la latitude pour la dernière année du spin-up (y1957). La courbe possède une allure classique avec un maximum de flux méridien de chaleur d'environ 0.9 PW vers  $25^\circ\text{N}$ . La variabilité saisonnière est maximale au niveau du Contre Courant Equatorial Nord (NECC,  $5^\circ\text{N}$ ). En été le Courant du Nord Brésil réfléchit dans le NECC réduisant considérablement le transport de chaleur vers le Nord le long du bord ouest, le flux méridien de chaleur est alors minimal, un stockage important se produisant alors dans la bande équatoriale. Au contraire, en hiver, cette réflexion n'existe pas et la chaleur est transportée plus directement vers le Nord le long du bord Ouest, le flux méridien de chaleur est maximal et atteint une valeur de 1.4 PW à  $5^\circ\text{N}$ .

A  $30^\circ\text{S}$ , le transport de chaleur entrant dans l'Atlantique est de 0.2 PW, ce qui est un estimé faible dans la gamme de valeurs proposées par d'autres modèles, et par des modèles inverses. Cette valeur est compatible avec un fort flux d'AAIW vers le Nord à cette latitude.

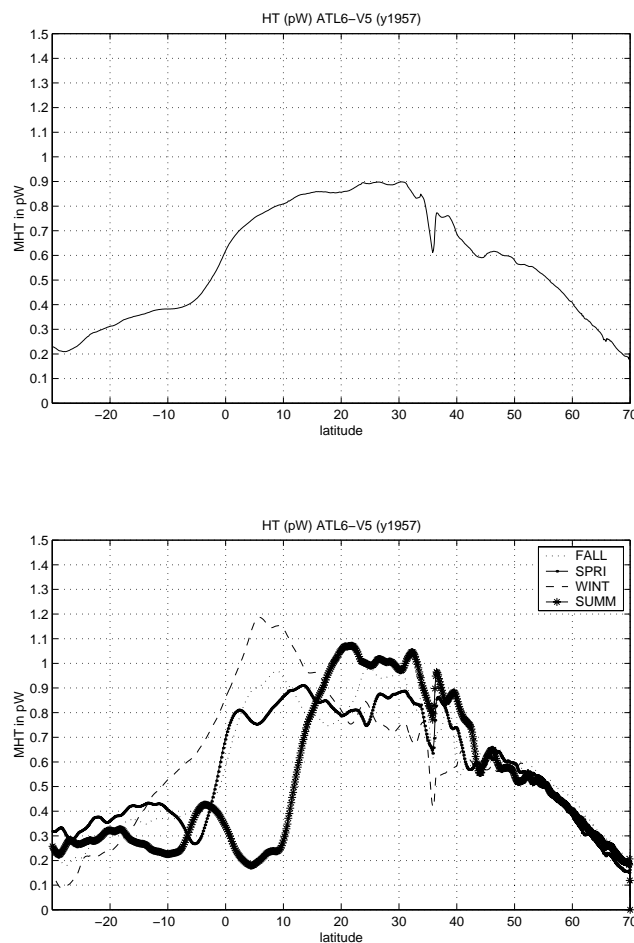


Figure 5.11 : Flux méridien de chaleur en fonction de la latitude pour la dernière année du spinup (y1957) : moyenne annuelle (en haut) et moyennes saisonnières (en bas).

La Figure 5.12 représente la cellule méridienne de retournement en fonction de la latitude et de la profondeur moyennée sur la dernière année du spinup. L'intervalle de contours est de 2 Sv. On y observe le transport vers le Nord des eaux de surface (0-1000m) qui se concentre très près de la surface au passage de l'équateur. Ces eaux sont ensuite transportées vers le Nord au niveau du gyre subtropical et sont refroidies dans le gyre subpolaire. Elles plongent alors, et s'écoulent vers le Sud à des profondeurs plus importantes (2000-3000m). Le transport maximal de cette cellule de retournement se situe vers 35°N et a une valeur d'environ 16 Sv légèrement supérieure aux 14 Sv du spinup de la simulation au 1/3° (ATL3-V3). La cellule profonde est, elle aussi, plus intense que dans la simulation au 1/3°.

Néanmoins, à 25°N cette cellule de retournement n'atteint pas 14 Sv. Or, à cette latitude, la répétition de nombreuses sections hydrographiques, de nombreuses mesures des courants de bord ouest combinés à une faible variabilité méso-échelle ont conduit des estimés remarquablement stables de l'amplitude de la cellule de retournement aux alentours de 17-18 Sv. Le modèle semble donc encore sous-estimer l'amplitude de cette cellule.

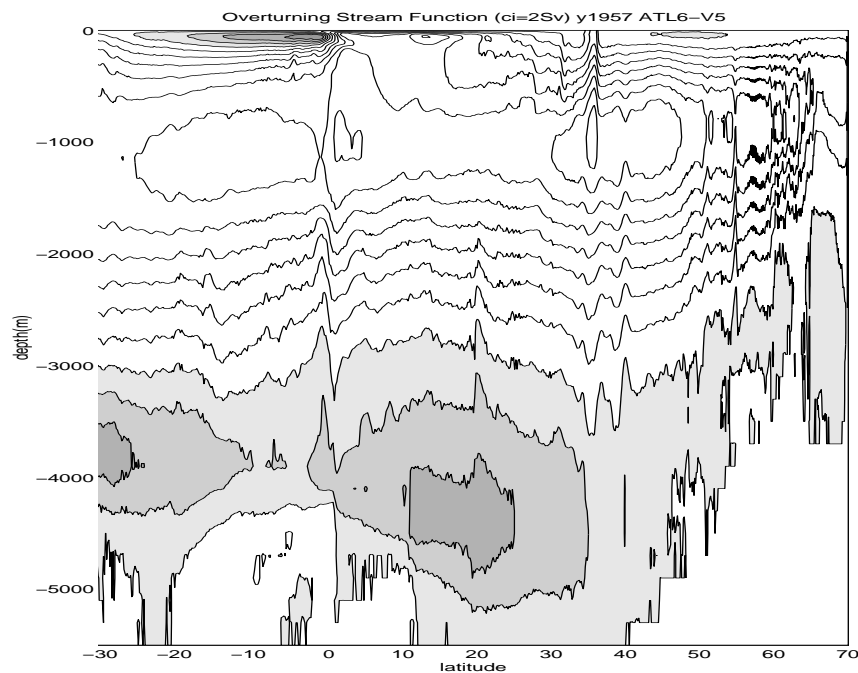


Figure 5.12 : Cellule méridienne de retournement moyennée sur la dernière année du spinup (y1957).

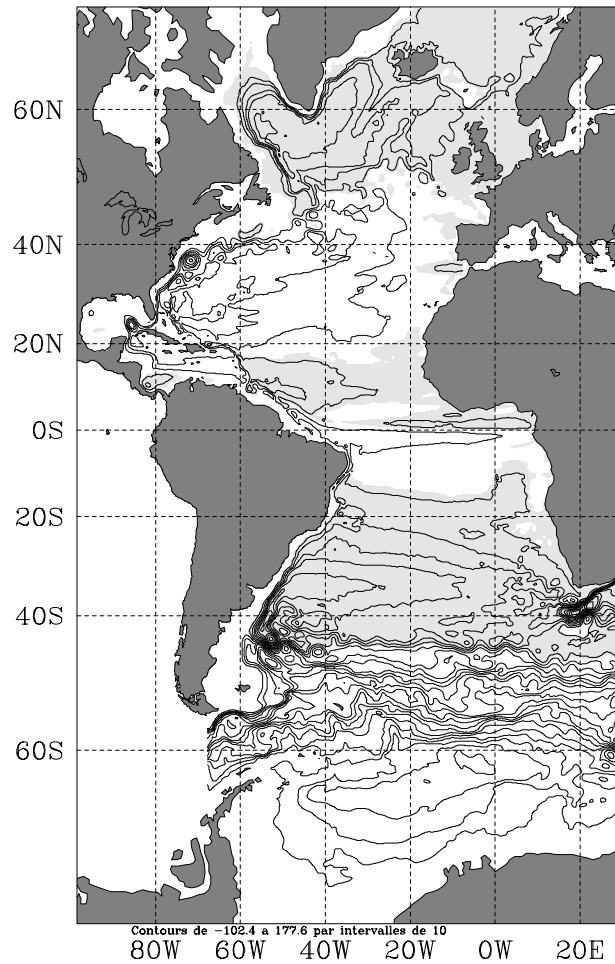
### 5.2.3 L'expérience interannuelle (ATL6-V6)

Une expérience avec des vents et flux journaliers issus de la réanalyse ECMWF sur la période 1979-1993 a été réalisée avec comme condition initiale la fin du spin-up. Cette expérience sera prolongée au delà de 1993 dès que les forçages seront disponibles. Les calculs sur le T3E relatifs à cette expérience ont débuté au mois de septembre 1999, les 15 premières années sont terminées et sont en cours d'analyse.

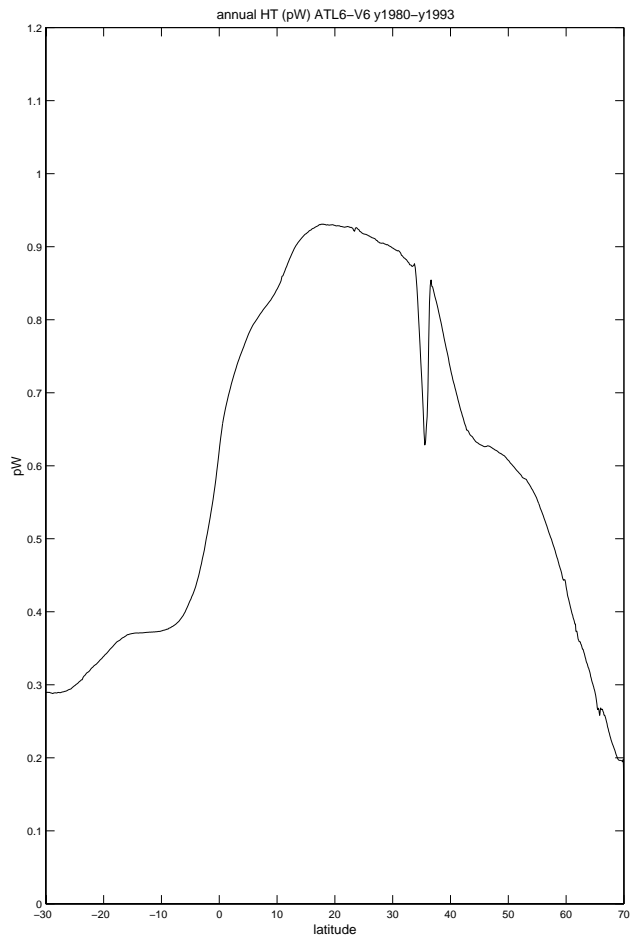
A titre indicatif la Figure 5.13 représente la fonction de courant barotrope moyennée sur la période 1980-1986. Et la Figure 5.14 représente la moyenne sur les 15 ans du flux méridien de chaleur en fonction de la latitude. Le maximum de flux de chaleur se situe vers 10°N avec une valeur de plus de 0.9 PW.

Les données de flux et de vent nécessaires à la poursuite de cette expérience interannuelle sur la période 1994-1999 sont en cours de préparation. Dès qu'ils seront prêts, l'expérience ATL6-V6 sera poursuivie.

### ATL6-V6 Streamfunction (Sv) y1980-1986



*Figure 5.13 : Fonction de courant barotrope de l'expérience inter annuelle moyennée sur la période 1980-1986.*



*Figure 5.14 : Flux méridien de chaleur en fonction de la latitude moyenné sur les 15 années 1979-1993 de l'expérience avec flux interannuels (ATL6-V6).*

## 6 EXPERIENCES COUPLEES

### 6.1 Objectifs des expériences couplées

La réalisation d'expériences couplées dans le cadre du projet Clipper se propose d'aborder trois questions:

- La mésoéchelle océanique est-elle nécessaire à l'étude du climat?
- Etude de l'interaction couche de mélange/thermocline à l'échelle saisonnière en mode couplé.
- Impact de la mésoéchelle océanique sur la réponse atmosphérique?

Les raisons d'aborder ces trois questions en mode couplé peuvent brièvement se résumer ainsi:

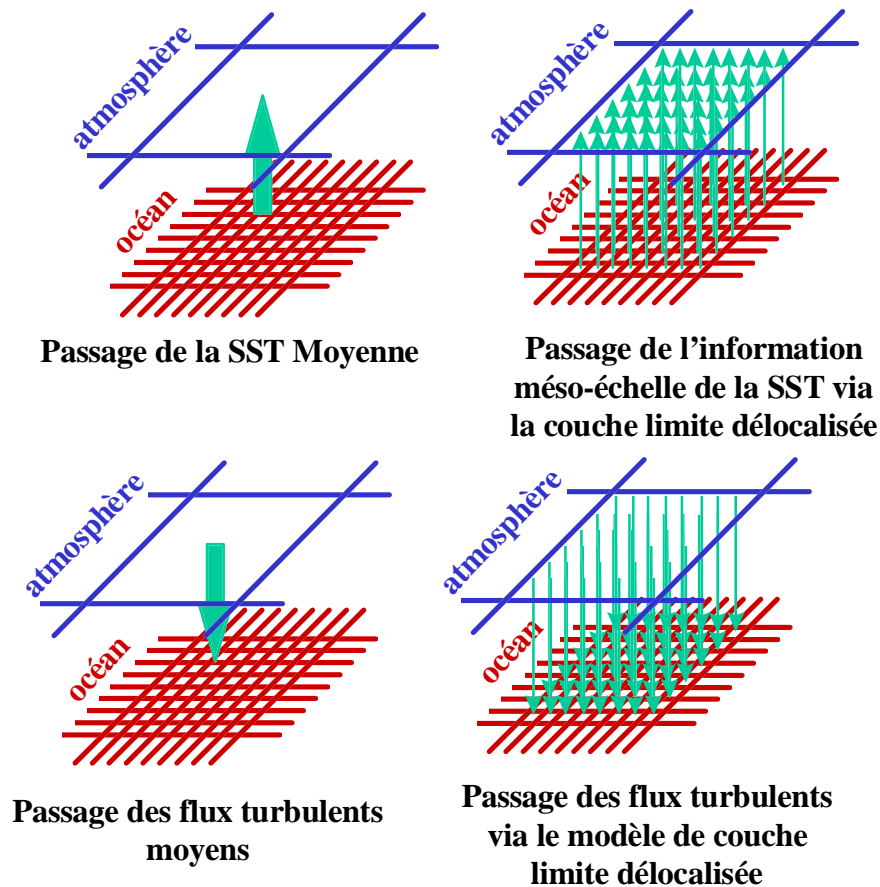
(1) En mode forcé, l'importance de la mésoéchelle sur le transport de chaleur est peu claire. En effet, la formulation de la condition aux limites en surface inclut un terme de rappel vers la température de surface (SST) observée. Ce terme contraint très fortement le transport méridien de chaleur océanique en imposant un gradient méridien de SST. La sensibilité d'un modèle d'océan à la résolution est alors faible: le transport total reste quasiment le même, seule la répartition transport moyen/transport par les tourbillons change.

Qu'en est-il du mode couplé? L'atmosphère (la composante rapide du système) n'est plus fixée mais interagit avec l'océan (la composante lente). Avec un océan haute résolution représentant explicitement les tourbillons assiste-t-on à une modification importante du système couplé, de l'état moyen, de la variabilité? Change-t-on significativement la répartition du transport de chaleur moyen et par tourbillons?

(2) L'étude de l'interaction couche de mélange/thermocline à l'échelle saisonnière dans les simulations forcées Clipper doit être complétée par une analyse des simulations en mode couplé. En effet, le terme de rappel contraint très fortement la position de surfacage (outcropping) des isopycnes biaisant les études de l'interaction couche de mélange/thermocline. Par exemple dans les régions frontales, un déplacement du front est associé à un intense flux de chaleur air/mer via le terme de rappel, au lieu que l'atmosphère s'ajuste à la position du front de SST que l'océan va créer. Ceci peut même aller jusqu'à créer des nouvelles masses d'eau (Gerdes et al., 1991)[21]. En mode couplé, les flux océan-atmosphère vont s'ajuster de manière non local. Comment évoluent les régions d'échanges couche de mélange/thermocline? En quoi les contributions à l'évolution de la couche de mélange du forçage océan-atmosphère, advection moyenne, advection tourbillonnaire, et physique verticale sont-elles modifiées entre le mode couplé et le mode forcé? Change-t-on la position des zones de ventilation et les raisons de leur existence?

(3) L'atmosphère telle qu'elle est représentée dans les modèles de climat (résolution spatiale de quelques degrés) est-elle sensible à la présence de la mésoéchelle océanique? Comment faire "passer" cette information de mésoéchelle à l'atmosphère? On veut dans le cadre de notre étude fournir à l'atmosphère plus que l'information contenue dans la moyenne de la SST (voir Schéma 1).

Pour aborder ces trois points, on se propose de réaliser des expériences couplées océan haute résolution/atmosphère. Un tel couplage n'a encore jamais été réalisé.



**Schéma 1: principe de passage des informations entre le modèle méso-échelle de circulation océanique et le modèle de circulation atmosphérique.**

## 6.2 Phases de développement

### 6.2.1 Choix des modèles et des calculateurs

En mode couplé, un modèle d'atmosphère doit être associé au modèle océanique. Toutefois, dans notre cas, le coût calcul d'un AGCM ne permet pas d'envisager une résolution atmosphérique équivalente à celle de l'océan.

A partir de cette remarque et des questions scientifiques présentées ci-dessus, mais également des contraintes techniques (en particulier celles de la machine sur laquelle le couplage doit être effectué), il nous a fallu choisir une version du modèle OPA-Clipper et un modèle atmosphérique (en version climatique).

La configuration océanique retenue est le 1/3 de degré Atlantique (ATL3) [3], de latitudes extrêmes 75°S et 70°N.

Pour modéliser l'atmosphère, LMDz (version haute résolution) a été choisi car il offre la possibilité d'utiliser une *couche limite délocalisée*, qui permet de mieux transférer l'information méso-échelle de l'atmosphère à l'océan et vice versa (Schéma 1), sans pour autant augmenter la résolution atmosphérique. Cette *couche limite délocalisée* ne concerne pas la physique associée au rayonnement et nuage contrairement à la *physique délocalisée* développée par Vintzileos et Sadourny (1997)[22] et utilisées pour étudier la réponse couplée de l'océan Pacifique équatorial

(Vintzileos et al., 1999)[23]. Cette *physique délocalisée* plus complète implique un coût prohibitif pour les simulations que nous envisageons de réaliser. C'est la raison pour laquelle nous nous restreignons à *une couche limite délocalisée*.

Le choix de la machine s'est porté sur le nouveau calculateur vectoriel de l'IDRIS, le NEC SX5 (LMDz n'étant pas disponible sur T3E).

### 6.2.2 Stratégie

La stratégie adoptée pour la mise au point du couplage est la suivante :

1. validation d'ATL3 forcé sur NEC avec sorties journalières NetCDF (surcouche IOIPSL)
2. validation de LMDz forcé avec *couche limite délocalisée* sur le secteur Atlantique, ce qui recouvre :
  - la validation de la *couche limite délocalisée*
  - la mise en place pour Clipper
  - le choix d'une transition entre la SST du modèle fournie sur le secteur Atlantique et la SST climatologique de Reynolds fournie sur le reste de la grille atmosphérique
3. couplage via OASIS2.2 (Terray et al., 1998) [24] dans le cadre du développement de la chaîne couplée LMDz-OASIS-ORCA de l'IPSL

### 6.3 Etat d'avancement

La version ATL3 basée sur OPA8 avec entrées/sorties au format DIMG a été portée et validée sur le NEC. L'actualisation du modèle sur la base de OPA8.1 a été faite avec entrées/sorties en DIMG. Des tests ont été effectués pour évaluer les performances des modèles et donnent les résultats suivants :

- la version ATL3 (387\*649\*43) nécessite environ 12h CPU à 3 Gflops par an de simulation pour une ressource mémoire de 3,5 Go (compter sur une augmentation du coût de 10 à 20% avec la surcouche IOIPSL qui permet d'avoir les sorties en NetCDF)
- la version LMDz haute résolution (96\*72\*19) sans couche limite délocalisée nécessite environ 5h CPU par an de simulation pour une ressource mémoire de l'ordre de 500 Mo (test effectués par le LMD) ; un doublement de la mémoire et du temps CPU est vraisemblable pour l'utilisation de ce modèle avec une *couche limite délocalisée* sur la grille 1/3 de degrés du projet Clipper (ATL3).

### 6.4 Plan d'exécution

Le couplage entre le modèle d'océan Clipper et le modèle atmosphérique LMDz constitue la suite logique des études menées en mode forcé, nous bénéficierons ainsi des développements et expertises acquis. Le portage du code sur la SX5 ayant été effectué au LMD, il restera à mettre en place la *couche limite délocalisée*. Pour cela, nous bénéficierons des compétences et de la proximité de Z-X Li du LMD qui collabore à cette étude. Le passage au système couplé sera facilité par la volonté de nombreuses équipes de voir une chaîne couplée LMDz-OASIS-ORCA opérationnelle sur NEC et portable sur d'autres machines. Ce projet est coordonné à l'IPSL par Marie-Alice Foujols, dont les compétences nous seront précieuses. De plus, la participation à ce projet de Nicolas Grima (ingénieur CLIPPER jusqu'en septembre 1999), maintenant à l'IDRIS et

détaché de l’IDRIS pour mettre au point une technique de communication performante entre modèles couplés, nous sera d’un grand secours.

Deux phases de 1 an chacune ont été envisagées pour mener à bien cette étude:

- Tests de la méthode de couplage. Cette phase comporte la mise en place informatique du couplage océan-atmosphère via le coupleur en incluant la physique de la *couche limite délocalisée*. Des tests spécifiques concerneront la redistribution des flux de rayonnement et des précipitations, et le passage de la quantité de mouvement de l’océan pour le calcul de la tension du vent par le modèle atmosphérique.
- Exploitation des expériences pluriannuelles couplées avec et sans la physique de la *couche limite délocalisée*.

L’organigramme qui suit donne une idée du calendrier retenu pour les phases de développement et d’analyse des couplage océan-atmosphère que nous nous sommes fixés.

1999	2000	2001
	Développements informatiques <ul style="list-style-type: none"> <li>• océan forcé</li> <li>• atmosphère forcée sans et avec couche limite délocalisée</li> <li>• couplage</li> </ul>	
		Exploitations des expériences en mode couplé, analyse des comparaisons entre les résultats avec et sans la <i>couche limite délocalisée</i> .

## 7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les simulations forcées par les flux de la ré-analyse ECMWF prévues par le projet CLIPPER ont été réalisées en 1999, en accord avec le calendrier initial. C'est dans le courant de l'an 2000 que les résultats scientifiques des simulations en mode forcé réalisées par CLIPPER seront pleinement exploités. Cette année verra par ailleurs une partie très originale du projet se réaliser : le couplage du modèle d'océan à  $1/3^\circ$  avec un modèle global d'atmosphère avec une méthode de couplage unique fondé sur la dynamique de la couche limite aérienne sur l'océan. Enfin, l'intégration du modèle ATL6 à haute résolution ( $1/6^\circ$ ) sera poursuivie jusqu'à la fin de l'année 1999, et nous disposerons ainsi d'une simulation de la circulation dans l'Atlantique sur la période 1979-1999, ce qui met les simulations CLIPPER en phase avec les programmes satellites des dernières années (Topex/Poséidon et ERS en particulier).

### 7.1 Phase finale du projet CLIPPER 2000-2001

Le projet CLIPPER a été initialement défini sur 4 ans. Les différents contrats passés avec les organismes qui soutiennent CLIPPER n'ayant pas été synchrones, et le projet ayant connu une fuite régulière de ses personnels temporaires vers des situations plus stables, un certain retard a été pris dans l'exécution d'une partie du programme, en l'occurrence les simulations couplées, la priorité ayant été de tenir le calendrier sur les simulations forcées à haute résolution. Il faut cependant remarquer que la réalisation technique du couplage n'est vraiment possible que depuis le fin 1999 avec l'arrivée des nouveaux calculateurs vectoriels NEC.

Dans le calendrier actuel, les contrats qui permettent le maintien des personnels temporaires travaillant sur le projet se termineront entre juillet 2000 décembre 2001. Cette absence de synchronisation est préoccupante pour la réalisation de la phase terminale du projet (la simulation à très haute résolution doit se poursuivre pour les années 1994 à 1999, et les simulations couplées débiteront en l'an 2000).

L'équipe projet a soumis aux organismes au mois de septembre 1999 une demande de moyens pour que le projet puisse aller à sa fin dans les meilleures conditions. Cette proposition prévoit ainsi un maintien de l'équipe actuelle jusqu'à décembre 2001, selon le calendrier présenté dans le tableau 7.1.

Les analyses des simulations CLIPPER par les équipes associées devraient bien entendu se poursuivre pendant cette période, mais aussi au delà de la durée du projet, dans le cadre des programmes de recherche sur l'océan et le climat pour lesquels elles ont été définies (WOCE et CLIVAR en particulier, mais également l'expérience POMME). En préparation à nos projets futurs, nos efforts porteront sur la variabilité des gyres subtropicaux et subpolaires de l'océan Atlantique. Nous utiliserons pour cela les expériences ATL6 qui simulent la circulation et l'évolution des propriétés des masses d'eau sur les 20 dernières années sous l'action des forçages journaliers déduits des ré-analyses et analyses ECMWF sur la période 1979-1999. L'analyse de la variabilité basse fréquence observée dans ces simulations et une comparaison détaillée avec les observations contribuera à l'étude des changements climatiques relatifs à cette période, et la haute résolution du modèle permettra une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, en particulier au niveau des mécanismes de la méso-échelle.

La phase de production des simulations forcées se termine actuellement et l'équipe projet CLIPPER va pouvoir entreprendre des actions avec les équipes associées pour lancer de façon effective la phase d'analyse et de valorisation. La phase de développement des simulations couplées est bien avancée, et le calendrier des simulations prévues sur les années 2000 et 2001 devrait être tenu.

Le volet modélisation de CLIPPER est maintenant "opérationnel", dans le sens où les différentes configurations du modèle pour l'Atlantique ont été testées, validées, et optimisées sur les

machines de l'IDRIS, et peuvent être utilisées pour des études dédiées (ceci a été fait en 1999 pour une simulation de 3 ans de flotteurs lagrangiens à l'équateur pour le LEGOS). Ces acquis scientifiques et techniques ont été très largement transférés à MERCATOR. Par ailleurs les équipes associées réalisant des études en assimilation de données sur les configurations CLIPPER ont largement progressé, et le moment n'est pas loin où une approche "intégrée" de l'océanographie pourra être utilisée pour l'étude de processus et de phénomènes océaniques climatiques à l'échelle de l'Atlantique. C'est dans cette perspective que nous envisageons la suite à donner au projet CLIPPER.

Tableau 7.1. Plan de mise en œuvre du projet CLIPPER sur la période 1997-2001

1997	1998	1999	2000	2001
Phase de développement des simulations forcées		Phase de développement des simulations couplées		
	Phase de production des simulations forcées			
		Phase d'analyse et de valorisation des simulations forcées		
			Phase de production des simulations couplées	
				Phase d'analyse des simulations couplées

## 7.2 *Projet futur de modélisation haute résolution pour CLIVAR*

Le projet CLIPPER a été bâti sur une problématique scientifique double, déclinée en de multiples objectifs. D'une part, une aide à l'analyse et à la synthèse des données WOCE pour mieux comprendre la circulation de l'Océan Atlantique. D'autre part, une étude des échanges océan-atmosphère, de la ventilation, et de l'effet de la méso-échelle sur ces processus en mode forcé et couplé. Cette deuxième problématique relève de CLIVAR et nous nous proposons de la poursuivre dans le cadre d'un nouveau projet (DRAKKAR) que nous avons présenté les grandes lignes dans une lettre envoyée aux organismes au printemps 1999. Celui-ci aura pour objectif scientifique l'étude des changements climatiques dans l'Atlantique Nord et le gyre subpolaire, en relation avec les campagnes qui se préparent dans cette région dans le cadre de CLIVAR (projet OVIDE).

Le projet CLIPPER a rassemblé des chercheurs et ingénieurs du CNRS dans différents laboratoires ayant des intérêts scientifiques communs et des expertises en modélisation complémentaires. Ce travail d'équipe s'est avéré extrêmement positif, et nous avons la volonté de poursuivre ces coopérations. Aussi, ce nouveau projet conservera à la base l'équipe CLIPPER actuelle (B. Barnier et J-M. Molines du LEGI, A-M. Tréguier du LPO, G. Madec du LODYC et C. Le Provost du LEGOS) mais dans une distribution des rôles différente. Il sera piloté par l'équipe de modélisation (MEOM) du LEGI (responsable B. Barnier). Nous souhaitons également que ce projet attire la collaboration de jeunes chercheurs intéressés par la modélisation.

### **7.3 Relations avec Mercator**

Le projet CLIPPER a été défini sur la problématique scientifique de WOCE, mais il constitue cependant un volet essentiel des activités de recherche utiles à MERCATOR. En effet, les travaux menés dans le cadre de CLIPPER ont eu des effets extrêmement positifs sur les développements et les orientations de MERCATOR, comme l'illustre l'excellente coopération avec l'équipe PAM (prototype Atlantique Méditerranée). De fait, ces actions sont maintenant considérées comme parties intégrantes de ce projet, comme le sont les actions de recherches soutenues par l'appel d'offre du GMM. La conséquence la plus immédiate est la participation des équipes de modélisation CLIPPER dans le réseau bleu de MERCATOR.

Dans le court terme, l'équipe projet CLIPPER poursuivra donc sa contribution au développement de MERCATOR dans le cadre du réseau bleu qui permettra de renforcer encore les coopérations avec les équipes les maquettes MERCATOR.

Dans le moyen terme, le projet que nous nous proposons de réaliser à la suite de CLIPPER a une motivation scientifique très précise, qui est l'étude des changements climatiques dans l'Atlantique, ce qui le place sans ambiguïté dans le programme CLIVAR. Les simulations climatiques que nous désirons réaliser n'ont pas un caractère opérationnel. Il s'agit en effet de réaliser des simulations forcées sur de longues périodes, l'assimilation de données étant ici utilisée pour une contrainte des simulations sur du long terme, et non dans l'objectif de produire des champs "analysés". Nos travaux ne doubleront donc pas les efforts du volet opérationnel de MERCATOR.

Cependant, nous considérons nos nouveaux projets comme une contribution majeure au volet recherche de MERCATOR. En effet, si le volet opérationnel de MERCATOR nécessite vraisemblablement une concentration de moyens, il n'en est pas de même pour le volet recherche qui doit servir les objectifs de la communauté scientifique, et doit en conséquence nécessairement s'appuyer sur les compétences des équipes de recherche sur le territoire national. Nous entendons bien au cours de la réalisation de nos projets, avoir largement recours à tous les moyens que MERCATOR pourra dédier à la recherche, en particulier au niveau des moyens de calcul, des bases de données, des technologies et de 'savoir-faire' qui seront de sa compétence. Cependant, il est pour nous essentiel de conserver la maîtrise des simulations climatiques que nous réaliserons, pour des raisons qui, au-delà de l'assurance de la réalisation de nos objectifs scientifiques, garantissent le maintien de la compétitivité de nos équipes sur le plan international, l'accroissement continu de nos compétences qui est nécessaire à l'évolution de nos recherches en phase avec les moyens technologiques existants, et bien entendu la formation de jeunes chercheurs et ingénieurs qui est de notre responsabilité dans le cadre universitaire. Cette maîtrise, au caractère décentralisé puisqu'elle se répartit sur des équipes scientifiques de différents laboratoires, est une composante essentielle de notre conception du volet recherche de MERCATOR, et exige que les moyens propres des équipes soient également développés. C'est tout à fait la tendance prise actuellement avec la mise en place du réseau MERCATOR.

## 8 REFERENCES

- [1] CLIPPER-95 (1995) : Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère: Projet Scientifique. *PNEDC-1995*, LEGI eds., BP53X, 38041, Grenoble.
- [2] OCEANOBS99 (1999). *Proceedings of the conference The Ocean Observing System for Climate*, Saint-Raphael, 18-22 October. CNES Editor.
- [3] CLIPPER-R3-99 (Mars 1999), Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère. *Rapport Scientifique et technique d'activité 1998*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.
- [4] CLIPPER-R4-99 (Juin 1999): 1/3° Atlantic circulation model forced by the ECMWF climatology: preliminary results. *Rapport interne*, LPO ed., BP 70, 29280, Plouzané.
- [5] Reynaud T., P. Legrand, H. Mercier and B. Barnier (1998) : A new analysis of hydrographic data in the Atlantic and its application to an inverse modelling study. *International WOCE Newsletter*, Number 32, 29-31.
- [6] Dynamo Group (S. Barnard, B. Barnier, A. Beckman, C. W. Boening, M. Coulibaly, D. DeCuevas, J. Dengg, C. Dieterich, U. Ernst, P. Herrmann, Y. Jia, P. D. Killworth, J. Kroeger, M.-M. Lee, C. Le Provost, J.-M. Molines, A. L. New, A. Oschlies, T Reynaud, L. J. West and J. Willebrand, (1997) : DYNAMO: Dynamics of North Atlantic Models: Simulation and assimilation with high resolution models. *Berichte aus dem Institut fuer Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universitat Kiel*, 294. 334 pp.
- [7] Beismann, J.-O. (1999): Etude des variations de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique par simulation de la circulation et de la distribution des chlorofluorométhane, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, 115 pp.
- [8] Tréguier A-M., B. Barnier, A. de Miranda, J.-M. Molines, N. Grima, M. Imbard, G. Madec, C. Messenger, and S. Michel (2000): An eddy permitting model of the Atlantic circulation: evaluating open boundary conditions. To be submitted to *J. Geophys. Res.*
- [9] Lumpkin R., K. Speer, and A-M. Tréguier (1999): Eddy Scales in the Atlantic Ocean. *Proceedings of OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.
- [10] Lumpkin R., K. Speer, and A.-M. Tréguier (2000): Eddy Scales in the Atlantic Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.
- [11] Stammer, D. and Böning, C. (1992). Mesoscale variability in the Atlantic Ocean from Geosat altimetry and WOCE high-resolution numerical modeling. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 732-752.
- [12] Middleton, J. (1985): Drifter spectra and diffusivities. *J. Marine Res.*, 43, 37-55.
- [13] Knochel H. (1998): Développement et validation d'un modèle numérique de circulation océanique à coordonnée  $\sigma$  pour l'étude climatique de l'Atlantique Nord. *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, 210 pp.
- [14] Madec, G., P. Delecluse, M. Imbard, C. Levy (1998): OPA 8.1 general circulation model reference manual, *Notes de l'IPSL*, Université P. et M. Curie, B102 T15-E5, 4 place Jussieu, Paris cedex 5, N°11, 91p.
- [15] Smith W. H. F. and D. T. Sandwell (1997): Global Seafloor topography from Satellite Altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277, 1956-1962.
- [16] Roether W., R. Schlitzer, A. Putzka, P. Beining, K. Bulsiewicz, G. Rohardt, and Delahoyde F. (1993) : A chlorofluoromethane and hydrographic section across Drake Passage: Deep water ventilation and meridional property transport. *J. Geophys. Research*, 98, 14423-14435.

- [17] Killworth P. D. (1992) : An Equivalent-barotropic mode in the fine Resolution Antarctic Model. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1379-1387.
- [18] Park Y. H. and E. Charriaud (1997) : Hydrography and baroclinic transport between Africa and Antarctica on WHP section I6. *International Woce Newsletter*, 29, 13-16.
- [19] Baringer M. O., and J. F. Price (1997): Mixing and spreading of the Mediterranean outflow. *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 1654-1677.
- [20] CLIPPER-R2-2000 (Février 2000): 1/6° Atlantic circulation model forced by the ECMWF climatology: preliminary results. *Rapport interne*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.
- [21] Gerdes, R., C. Koberle, and J. Willebrand, 1991: The influence of numerical advection schemes on the result of ocean general circulation models. *Climate Dyn.*, 5, 211-226.
- [22] Vintzileos A., Sadourny R., 1997: A general interface between an atmospheric general circulation model and underlying ocean and land surface models: delocalised physics scheme. *Mon. Weather Rev.*, 125, 926-941.
- [23] Vintzileos A., P. Delecluse, and R. Sadourny, 1999: On the mechanisms in a tropical ocean-global atmosphere coupled general circulation model. Part 1: mean state and the seasonal cycle. *Climate Dyn.*, 15, 43-62.
- [24] Terray L., S. Valcke, et A. Piacentini, 1998: OASIS2.2, User's guide and referene manual. Technical document CERFACS TR/CGMC/98-05, 42 avenue Coriolis, 31057 TOULOUSE cedex 1, France.

## 9 PUBLICATIONS CLIPPER

### 9.1 Communications et publications qui font référence aux simulations CLIPPER

Barnier B., Le Provost C., Madec G., Tréguier A-M., Molines J.M., and Imbard M., 1997: The CLIPPER project; high resolution modeling of the ocean circulation in the Atlantic forced by or coupled with the atmosphere. *Symposium International de Biarritz, Surveillance des océans à l'Horizon 2000: Une approche intégrée*, 15-17 Octobre.

Reynaud, T., Legrand P., Mercier H., and Barnier B., 1998: A new analysis of hydrographic data in the Atlantic and its application to an inverse modeling study. *WOCE International Conference on ocean and Climate*, Halifax, May 24-27.

Reynaud T., P. Legrand, H. Mercier and B. Barnier, 1998: A new analysis of hydrographic data in the Atlantic and its application to an inverse modelling study. *International WOCE Newsletter*, No 32, 29-31.

de Miranda A., J-M. Molines, B. Barnier, N Grima, M Imbard, G. Madec, C. Le Provost, and A-M. Treguier; 1999: Analysis of the mesoscale field in the Atlantic Ocean from the High resolution CLIPPER model. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Fleury L., L. Siefridt, I. Blanchet, Y. Drillet, T. De Prada, and B. Tranchant, 1999: The North Atlantic/Mediterranean MERCATOR prototype. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Guinehut S., G. Larnicol, and P-Y. le Traon, 1999: Design of an array of profiling floats in the North Atlantic from model simulations. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Lumpkin R., K. Speer, and A-M. Tréguier, 1999: Eddy Scales in the Atlantic Ocean. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Marchand P., 1999: The Coriolis Proposal. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Penduff T., K. Béranger, and B. Barnier, 1999: Comparison between two high resolution models of the south atlantic ocean. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Testut C-E., P. Brasseur, L. Parent, and J. Verron, 1999: Assimilation of sea surface temperature using the seek filter in a primitive equation model of the Atlantic ocean. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Treguier, A.M., C. Messenger, B. Barnier, L. Crosnier, J.M. Molines, G. Madec, S. Michel, 1999: The Atlantic Clipper model: analysis of mixed open boundary conditions in an eddy-permitting GCM. Proceedings of *OceanObs99, the first International Symposium on the Ocean Observing System for Climate*, St Raphael, 18-22 octobre.

Beismann, J.-O., 1999: Etude des variations de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique par simulation de la circulation et de la distribution des chlorofluorométhanes, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble, 115 pp.

Barnier B., de Miranda A., Molines J-M., Tréguier A-M., and Madec G., 2000: Analysis of the Mesoscale Field in the Atlantic Ocean From High Resolution Model Simulations, *2000 Ocean Sciences Meeting*, EOS, Trans, AGU, Vol 80, No 49.

Molines J. M., A. de Miranda, B. Barnier, A. M. Tréguier and C. Le Provost, 2000: Eddies in the North Brazil Current, *2000 Ocean Sciences Meeting*, EOS, Trans, AGU, Vol 80, No 49.

Garnier E., B. Barnier, L. Siefridt and K. Béranger, 2000: Investigating the 15-year air-sea flux climatology from the ECMWF re-analysis project as a surface boundary condition for ocean models. To appear in *International Journal of Climatology*.

Lumpkin R., K. Speer, and A.-M. Tréguier, 2000: Eddy Scales in the Atlantic Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.

Treguier A.-M., B. Barnier, A. de Miranda, J.-M. Molines, N. Grima, M. Imbard, G. Madec, C. Messenger, and S. Michel, 2000: An eddy permitting model of the Atlantic circulation: evaluating open boundary conditions. To be submitted.

Treguier A.-M., T. Reynaud, S. Michel, B. Barnier, J.-M. Molines, A. P. de Miranda, C. Messenger., J. O. Beismann, G. Madec, N. Grima and M. Imbard, and C. Le Provost, 1999: The CLIPPER project: high resolution modeling of the Atlantic. *International WOCE Newsletter*, No 36, 3-5.

Barnier B., A. de Miranda, J.-M. Molines, A.-M. Tréguier, N. Grima, G. Madec, and C. Leprovost, 2000, Interannual variability in meridional transports in an eddy resolving model of the Atlantic Ocean. *XXV EGS Assembly*, Nice, 25-29 April.

De Miranda A., J.-M. Molines, B. Barnier, A.-M. Tréguier, G. Madec, and C. le Provost, 2000: Analysis of the mesoscale field in the Atlantic ocean from high resolution model simulations carried out in the Clipper project. *XXV EGS Assembly*, Nice, 25-29 April.

Penduff T., B. Barnier, and J. Verron, 2000, May topographic roughness explain some differences between sigma- and z-level model results in the South Atlantic? *XXV EGS Assembly*, Nice, 25-29 April.

Tréguier A.-M., B. Barnier, J.-M. Molines, G. Madec and M. Imbard, 2000: Radiative open boundary conditions: An analysis in the CLIPPER eddy-permitting Atlantic model. *XXV EGS Assembly*, Nice, 25-29 April.

## **9.2 Rapports CLIPPER**

CLIPPER-95 (1995) : Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère: Projet Scientifique. *PNEDC-1995*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.

CLIPPER-R1-98 (Février 1998), Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère. *Rapport Final, Contrat Ifremer 96-1-430108*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.

CLIPPER-R2-98 (Mars 1998), Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère. *Rapport Scientifique et technique d'activité 1997*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.

Theret M.L., (Juin 1998) : Etude de l'influence des conditions aux limites au passage de Drake dans un modèle à basse résolution de l'Atlantique. *Rapport de stage de fin d'études, ENSTA*, LPO Ed., BP 70, 29280, Plouzané, 62 pp.

CLIPPER-R3B-98 (Juillet 1998), Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère. *Rapport Final, Contrat Ifremer 97-1-430109*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.

CLIPPER-R3-99 (Mars 1999), Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère. *Rapport Scientifique et technique d'activité 1998*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.

CLIPPER-R4-99 (Juin 1999): 1/3° Atlantic circulation model forced by the ECMWF climatology: preliminary results. *Rapport interne*, LPO ed., BP 70, 29280, Plouzané.

Michel S., (Juin 1999): Comparaison de résultats du modèle Atlantique CLIPPER à basse et moyenne résolutions. *Rapport de stage de DEA, UBO*, LPO Ed., BP 70, 29280, Plouzané, 35 pp.

BEISMANN, J.-O., (Décembre 1999): Etude des variations de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique par la simulation de la circulation et de la distribution des Chloro-fluorocarbones. *Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble I*, Grenoble, 115 pp.

CLIPPER-R1-2000 (Janvier 2000), Modélisation de l'Atlantique à haute résolution forcée et couplée océan-atmosphère. *Rapport Final, Contrat Ifremer 99-1-401004*, LEGI eds., BP53X, 38041, Grenoble.

CLIPPER-R2-2000 (Février 2000):  $1/6^\circ$  Atlantic circulation model forced by the ECMWF climatology: preliminary results. *Rapport interne*, LEGI ed., BP53X, 38041, Grenoble.

## **10 ANNEXES**

*10.1 Article de présentation de CLIPPER dans la WOCE Newsletter N°36 de Septembre 1999*

*10.2 Article sur l'évaluation des frontières ouvertes dans ATL3*

*10.3 Note sur l'effet de l'aliasage des oscillations inertielles sur le transport méridien de chaleur dans ATL6*

*10.4 Mise à disposition des résultats de CLIPPER à l'IDRIS*

*10.5 Documentation sur l'outil d'interpolation IDL*

*10.1 Article de présentation de CLIPPER dans la WOCE Newsletter N°36 de Septembre 1999*

*10.2 Article sur l'évaluation des frontières ouvertes dans ATL3*

***10.3 Note sur l'effet de l'aliasage des oscillations inertielles sur le transport méridien de chaleur dans ATL6***

#### ***10.4 Mise à disposition des résultats de CLIPPER à l'IDRIS***

## ***10.5 Documentation sur l'outil d'interpolation Interpolation IDL***