

Pôle de modélisation

Personnel ayant contribué au cœur de l'activité du pôle de modélisation pour les étapes de développement du modèle système climatique de l'IPSL, les principales applications et la contribution aux premières analyses.

IPSL:

Ingénieurs permanents : M.-A. Foujols, M.-A. Filiberti, P. Cadule
CDD : S. Denvil, R. Benshila, M.-E. Demory, A. Tallec, P. Bourcier

LMD:

Chercheurs permanents : S. Bony, J.-L. Dufresne, J.-P. Duvel, F. Lott, J.-Y. Grandpeix, F. Hourdin, L. Li, J. Polcher
Ingénieurs permanents : L. Fairhead, I. Musat
Thèses : J. Quaas, S. Conil, A. Idelkaddi

LODYC:

Chercheurs permanents : O. Aumont, A. Lazar, J.-P. Boulanger, G. Madec, P. Terray, S. Janicot, J. Vialard, M. Lévy, P. Bouruet-Aubertot
Ingénieurs permanents: C. Lévy, C. Talendier, E. Kestenare
Thèses: J. Leloup, M. Langaigue, A. Bozec

LSCE:

Chercheurs permanents: Y. Balkanski, L. Bopp, P. Braconnot, N. De Noblet, P. Friedlingstein, E. Guilyardi, D. Hauglustaine, O. Marti, M. Schulz, N. Viovy
Ingénieurs permanents: J. Bellier, P. Brockmann, A. Caubel
Thèses : M. Berthelot, D. Swingedouw, J. Lathière, S. Generoso, W. Guelle
Post doctorants : S. Bauer, G. Folberth, S. Generoso, S. Guibert, A. Klonecki, C. Textor

SA: S. Bekki, C. Clerbaux, L. Jourdain, K. Law

Laboratoires hors IPSL :

Support calcul CEA: Y. Meurdesoif
LGGE, Grenoble : G. Krinner, C. Genthon
Université Catholique de Louvain la Neuve, Belgique: T. Fichet, H. Goosse, O. Arzel
LOA, Lille : Olivier Boucher, I. Chiapello
LISA: L. Menut, B. Marticorena
ISPRA, Italie : F. Dentener

A. Bilan

1. Introduction

Le Pôle de Modélisation de l'IPSL s'est constitué autour d'un projet multidisciplinaire de modélisation du système climatique. C'est un centre fédérateur de recherche et d'expertise sur le climat. Il a pour missions de coordonner les études faisant intervenir les composantes du modèle de l'IPSL, d'identifier et de coordonner les simulations de référence, de fédérer et de rationaliser les moyens et les développements techniques, et d'assurer l'animation scientifique. Le pôle est structuré en groupes de travail : des groupes scientifiques, des groupes techniques et des groupes assurant le développement des modèles (couplés ou non). Son Conseil scientifique se réunit une fois par mois. L'organisation et le suivi des groupes de travail est disponible sur le serveur web de l'IPSL (<http://www.ipsl.jussieu.fr/>)

Les différentes actions entreprises concernent les études du changement climatique et de la variabilité climatique pour en comprendre les mécanismes et identifier les principales rétroactions. L'originalité et la force du pôle sont de pouvoir intégrer dans l'étude du climat les interactions entre le climat et les cycles biogéochimiques. L'enjeu pour les années à venir est de considérer le système climatique dans sa globalité (océan, atmosphère, surfaces continentales, glace de mer et de terre) et les différents cycles qui le gouvernent (cycle de l'énergie, cycle de l'eau, cycle du carbone, autres cycles biogéochimiques), ainsi que leurs interactions. L'activité du pôle de modélisation s'articule sur un ensemble d'études et de développements menés dans les différents laboratoires de l'IPSL. Au-delà des études du changement climatique, ces études couvrent :

- les études de processus pour améliorer leur représentation dans les modèles,
- les liens avec les campagnes de mesures, pour aider à l'interprétation ou évaluer les résultats des modèles,
- les études de la variabilité climatique inter-annuelle à décennale, permettant de comprendre les principaux modes de variabilité et étudier la prévisibilité climatique,
- les études régionales, dans la perspective d'estimer les impacts climatiques,
- les études paléoclimatiques, qui permettent d'identifier les éléments clefs du système et évaluer les modèles.

Au niveau du pôle de modélisation, la réalisation d'un tel projet intégré demande un effort de coordination entre les différentes thématiques et l'intégration dans une plate forme de modélisation communautaire des différents modèles de l'IPSL. Durant les quatre dernières années, les activités se sont centrées sur la mise au point de la nouvelle version du modèle couplé de l'IPSL et les études du changement climatique. Cet effort s'est accompagné de la mise en place d'un projet commun avec Météo-France, de l'investissement dans les projets nationaux (mc2, ACI-FNS) et dans le projet européen ENSEMBLES (FP6), ainsi que de la coordination des prospectives relatives aux besoins en calcul intensif. L'organisation actuelle met la priorité sur le projet changement climatique, mais aussi, en lien avec l'activité des différents laboratoires, cherche à identifier et à coordonner les simulations de référence à partir desquelles différentes thématiques peuvent se décliner. Le pôle a également eu un rôle d'animation scientifique et de formation aux travers de journées dédiées. Le bilan fait état successivement des développements de la nouvelle version du système climatique de l'IPSL (IPSL_CM4), des réalisations autour des modèles des cycles biogéochimiques, de l'avancée des projets scientifiques, et de l'effort de mise en place d'un cadre cohérent autour des modèles de l'IPSL et de la diffusion des résultats.

2 Développement du modèle couplé de l'IPSL

Il y a quatre ans, nous avons été amenés à abandonner l'ancien modèle de l'IPSL pour porter l'effort de développement sur un nouveau modèle. Cette époque a coïncidé avec la suppression des calculateurs de type Cray dans les centres de calcul de l'IDRIS et du CEA, et nous ne disposions pas de la force de travail suffisante pour à la fois porter l'ancien modèle sur les nouvelles plate-formes et développer le nouveau modèle. L'objectif pour ce nouveau modèle de climat était de faire un saut qualitatif par rapport aux versions précédentes. Une attention particulière a été portée sur les points suivants: stabilité du climat simulé, gradients équateur-pôle réalistes, climatologie moyenne permettant d'aborder les différents thèmes de recherche, conservations de bilans de chaleur et d'eau, représentation des principales caractéristiques de la variabilité interannuelle à décennale, facilité d'utilisation, possibilité de coupler facilement le modèle climatique aux modèles des différents cycles. Cela nous a amené à des évolutions conséquentes, tant de la physique des modèles, du couplage entre les modèles, du codage de nouvelles fonctionnalités et de l'environnement informatique permettant de réaliser et exploiter les simulations. Le bilan ci-dessous met l'accent sur le modèle couplé, sachant que ce modèle s'appuie sur le développement des modèles d'atmosphère et d'océan développés respectivement au LMD et au LODYC. Pour plus d'information sur ces composantes individuelles, des fiches sont disponibles sur le serveur web.

2.1 Evolution des composantes

Atmosphère (LMDZ)

L'évolution la plus significative de LMDZ, tant pour les expériences forcées par des températures de surface océaniques que pour le couplage avec l'océan, a été le remplacement du schéma de convection de Tiedke par celui de Kerry-Emanuel (Emanuel, JAS, 1991), et l'implémentation d'un nouveau schéma de nuage. Les nuages sont représentés par une fonction de distribution probabiliste (PDF) de l'eau totale (vapeur plus états condensés) à l'intérieur de la maille. L'ancienne formulation supposait une fonction de distribution de forme carrée à largeur

fixe. Le nouveau schéma utilise une distribution log-normale dont la largeur est une fonction interactive de l'intensité de la convection. Un soin particulier a été aussi apporté au calcul des coefficients de traînée sur l'océan. De plus un modèle d'interface a été implémenter pour gérer les couplages de façon différenciés selon quatre sous surface de base : océan libre, glace de mer, glace continentale, sol. Chaque surface est l'objet d'un couplage avec un modèle : ORCA pour l'océan libre, LIM pour la glace de mer et ORCHIDEE pour le sol. La glace continentale fait l'objet d'une paramétrisation interne à LMDZ. Le schéma de diffusion verticale est résolu dans la colonne pour chaque sous-surface présente, qui voit donc des flux de chaleur et d'eau calculés avec des propriétés de surface (rugosité, etc ..) spécifiques.

Orchidée

Une autre source d'amélioration majeure est l'évolution du modèle de sol. Le modèle en 'seau' très simple a été remplacé par le modèle SECHIBA, où la conduction de chaleur dans le sol est traitée au moyen d'une discrétisation en 11 couches. Ces modifications ont réduit les pluies excessives simulées dans l'hémisphère nord en été. La réduction est trop marquée sur l'Europe, mais les moyennes zonales des précipitations sont nettement améliorées. SECHIBA est une composante du modèle ORCHIDEE qui comprend aussi un modèle de carbone continental (STOMATE) et un modèle de végétation dynamique (LPJ). L'activation de ces composantes dans IPSLCM4 est en cours. Le modèle ORCHIDEE comprend également un modèle de ruissellement continental, permettant de calculer l'écoulement des rivières et des régions côtières vers les différents bassins océaniques.

Océan et glace de mer (Système OPA, configuration Orca-Lim)

Les versions précédentes du modèle de l'IPSL utilisaient soit des modèles très simplifiés de glace de mer (comparaison de la température de la mer avec le point de congélation, et éventuellement rappel à la climatologie de glace de mer), soit le modèle thermodynamique de glace de mer IGLOO développé au LODYC. Pour IPSLCM4, le modèle de dynamique et de thermodynamique de glace de mer LIM développé à l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve a été choisi. Ce modèle a été incorporé dans le système OPA, testé en mode forcé par des climatologies, puis l'ensemble a été couplé à LMDZ.

2.2. développements des couplages

La figure 2.2 représente le schéma de couplage entre les différentes composantes du modèle couplé. Le découpage de la colonne d'atmosphère en sous-surface permet une conservation exacte des flux entre les différentes composantes. L'interpolation des flux de chaleur est d'eau a

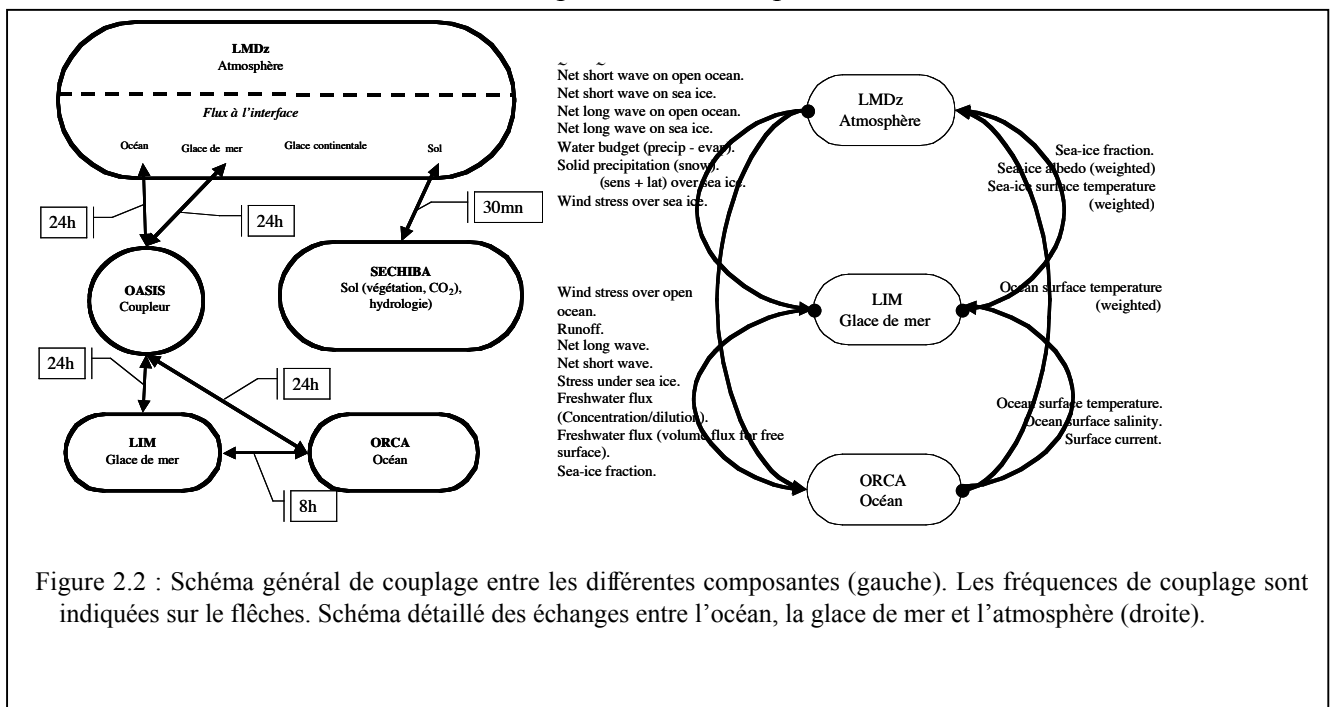


Figure 2.2 : Schéma général de couplage entre les différentes composantes (gauche). Les fréquences de couplage sont indiquées sur le flèches. Schéma détaillé des échanges entre l'océan, la glace de mer et l'atmosphère (droite).

été conçue pour respecter cette conservation. Entre LMDZ et Orchidée, l'interface est celle développée dans le projet PILPS, et correspond à un standard international. Pour le couplage entre la glace de mer, l'océan et l'atmosphère, il existe dans le monde une grande variété d'approches. Celle développée pour IPSLCM4 suit les développements faits dans la version précédente du modèle. Elle est très proche de l'interface standard conçue dans le cadre du projet européen PRISM.

2.3 Nouvel environnement

Depuis 4 ans, le pôle de modélisation a mis en place une infrastructure logicielle commune. La principale qualité de cette infrastructure est d'être utilisée aussi bien par le modèle couplé IPSL-CM4 que par les différentes composantes lorsqu'elles sont utilisées en mode forcé. Une configuration de référence inclut ainsi les sources des modèles utiles, les outils pour l'installer et la compiler sur les centres de calcul typiques, un ensemble de script permettant de lancer une expérience typique, de sauvegarder les fichiers et des utilitaires permettant de produire des atlas.

Modipsl

Modipsl est une boîte à outils composée des éléments suivants :

- une nomenclature des répertoires utilisés (*modipsl*) ;
- une description de configurations types de modèles regroupant toutes ou certaines composantes (*mod.def*) ;
- un *script* d'accès aux configurations type accédant à une famille de serveurs CVS (*model*) ;
- une famille de serveurs CVS (OPA, LMDZ, ORCHIDEE, INCA, IOIPSL, FAST et MODIPSL) ;
- un environnement de compilation (*ins_make*, *AA_make**)
- des *scripts* de lancement d'expériences de référence adaptables sur les machines les plus utilisées (*ins_script*, *AA_job*)
- une arborescence pour le rangement des fichiers de résultats sur les serveurs de fichiers des centres de calcul et sur les serveurs DODS (IDRIS et IPSL) pour accès à distance
- des scripts de post-traitement permettant la génération de fichiers réarrangés par exemple pour regrouper des moyennes mensuelles, sélectionner des zones géographiques, ... (*ins_post*, *mo2st*, *da4mo*, ...)
- des scripts de post-traitement permettant la génération d'atlas basés sur les outils ferret-FAST
- des scripts de post-traitement permettant la génération de pages WWW

Ioipsl

La librairie IOIPSL est un autre outil largement utilisé par le modèle couplé IPSL et ses composantes. Elle se compose d'un ensemble de sous-programmes organisés en modules, qui permettent :

- la lecture/écriture des fichiers de redémarrage (*restcom*) ;
- l'écriture de variables diagnostics après opérations de réduction comme une moyenne temporelle ou une sélection spatiale (*histcom*) ;
- la lecture de paramètres d'entrée (*getincom*) ;
- la lecture/écriture de champs physiques (*flincom*) ;
- le traitement du calendrier (*calendar*) et des opérations mathématiques élémentaires (*mathelp*).
- Lorsqu'il s'agit de fichiers binaires, le format NetCDF a été choisi et la convention CF retenue (dans sa version précédente à savoir GDT).

Configurations de modèles disponibles sous cette infrastructure

Comme le montre ce tableau ci-dessous, il existe actuellement une dizaine de configurations de modèles qui s'appuient sur MODIPSL.

Configuration	Atmosphère	Continent	Coupleur	IOIPSL	Océan	Glace	Traceur
IPSLCM4_v1	LMDZ.3.3	ORCHIDEE 1 3	OASIS 2.3	IOIPSL	OPA8	LIM	
IPSLCM4_loop	LMDZ.3.3	ORCHIDEE	OASIS 2.3	IOIPSL	OPA8	LIM	TRC PISCES
LMDZOR	LMDZ.3.3	ORCHIDEE		IOIPSL			
LMDZ4OR	LMDZ 4	ORCHIDEE		IOIPSL			
ORCA2 LIM				IOIPSL	OPA8	LIM	
ORCA2 LIM TRC				IOIPSL	OPA8	LIM	TRC AGE
ORCHIDEE_OL	ORCHIDEE_OL	ORCHIDEE 1 3		IOIPSL			
ORCHIDEE_OL2	ORCHIDEE_OL	ORCHIDEE 2		IOIPSL-f90			
EEL2_LOBSTER1				IOIPSL	OPA8		LOBSTER
...							

Le modèle couplé et les différentes configurations sont régulièrement testés sur les calculateurs utilisés par l'IPSL : NEC SX-5 de l'IDRIS et NEC SX-6 du CEA. Actuellement, récupérer le modèle couplé référencé ou une autre configuration pour lancer une étude type, produire les atlas et rendre accessible les fichiers résultats est réalisé en quelques commandes et quelques minutes. Obtenir le point de départ d'une nouvelle étude est ainsi devenu un jeu d'enfant. Néanmoins, aborder une nouvelle étude reste un défi !

En ce qui concerne la configuration IPSL_CM4, les outils fournis permettent de choisir facilement entre 2 résolutions (96x72 ou 72x45 points pour LMDZ et ORCA2° ou ORCA4° pour OPA), de paramétrer la physique de l'une ou l'autre des composantes, de partir d'un état initial standard ou des résultats d'une simulation précédente, de se repérer dans les étapes de mise en œuvre d'une autre résolution.

La principale limitation de cette infrastructure est qu'elle est issue d'un développement maison, que sa maintenance repose sur les seules forces IPSL et que son évolution, impérative pour garder les outils au niveau technique, doit être planifiée.

2.4 Climatologie

Le réglage de la climatologie du modèle s'est étalé sur plusieurs années. Dans l'atmosphère, la majeure partie du travail a concerné le schéma de convection, son interaction avec le schéma de nuage, et les coefficients de trainé sur l'océan. Une bonne partie des ajustements du système couplé ont été réalisés en parallèle. Le réglage d'un modèle couplé est une tâche difficile car les défauts de chaque composante ont tendance à s'amplifier lors du couplage et qu'il faut arriver à faire travailler ensemble les spécialistes des différents milieux. De nombreux problèmes ont petits à petits été identifiés dans les interfaces entre les modèles pour arriver à la version de référence utilisée pour les simulations IPCC.

La figure 2.4.a montre la différence entre la température de surface simulée par IPSL_CM4 et les observations (Reynolds, 1988) en été. Dans la zone tropicale, les différences sont faibles. On observe des valeurs élevées dans les moyennes latitudes. Elle correspondent à un tassement des structures vers l'équateur souvent observé dans des modèles à cette résolution. L'évolution saisonnière de la température de surface de l'océan moyennée entre 2°S et 2°N est reportée figure 2.4.b. Le modèle simule de façon très réaliste la phase du cycle saisonnier à l'équateur. L'amplitude dépend fortement des réglages du modèle. Elle est un peu faible dans la version finale du modèle, en raison de compromis avec la climatologie dans d'autres régions. Les premières analyses de la variabilité tropicale du modèle montrent une bonne variabilité de type ENSO. En particulier, plusieurs types d'ENSO sont présents, avec des phasages saisonniers différents, que l'ont fait correspondre à des événements ENSO observés. Néanmoins, le modèle manque de variabilité à basse fréquence, ce que l'on peut relier à la faible résolution employée. Les résultats du modèles peuvent être consultés directement via les pages web de l'IPSL (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr>). La documentation est disponible en ligne. Elle fait un état plus

complet des différentes améliorations, présente un comparaison entre la version disponibles à l'été 2003, qui a déjà fait l'objet d'analyses, et de la version IPSL_CM4.v1 utilisée pour les simulations IPCC

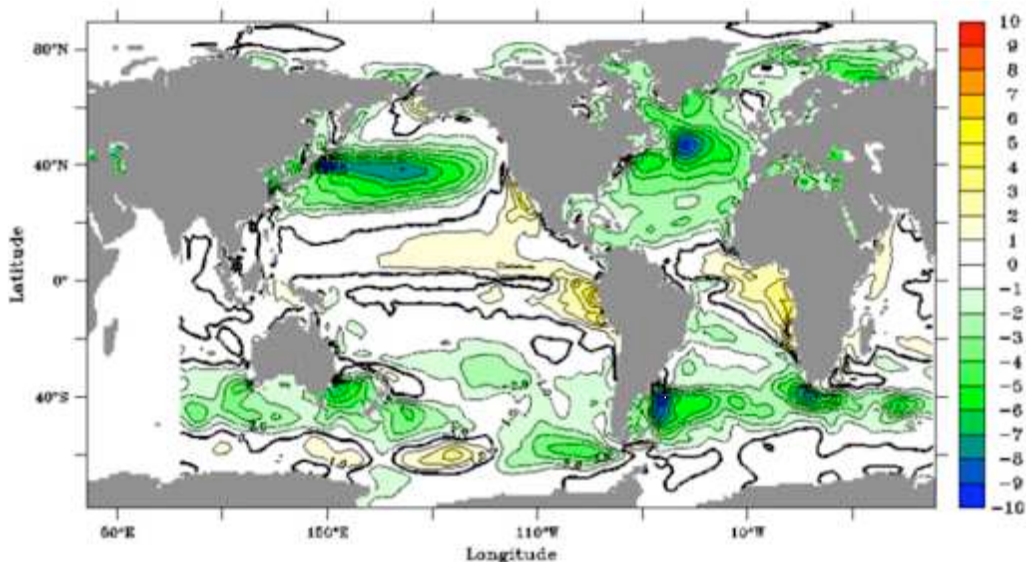


Figure 2.4 A: Différence entre la température de surface simulée par IPSLCM4 et les observations (Reynolds) ; Moyenne juin-juillet-août. Simulation 2L20.

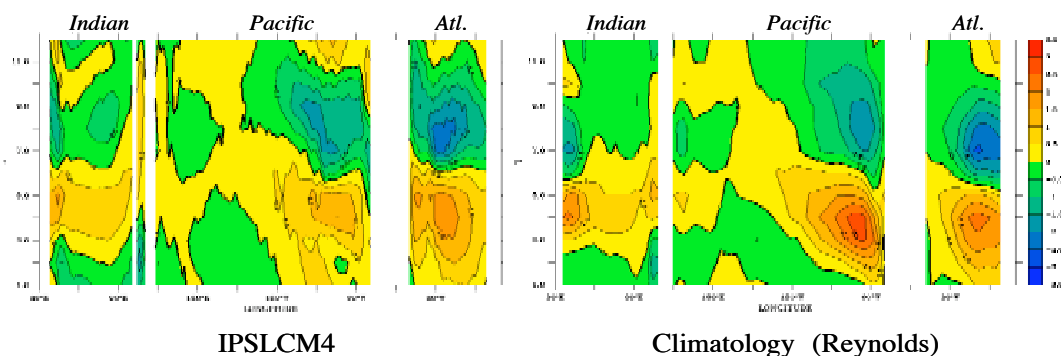


Figure 2.4.b : Evolution saisonnière (moyenne annuelle soustraite) de la température de surface de l'océan moyennée entre 2°N-2°S pour une simulation du climat actuel (gauche) et les observations(droite)

2.5 Scénarios climatiques

Plusieurs simulations de changement climat sont actuellement en cours avec la nouvelle version du modèle couplé. Elles concernent d'une part la réalisation des scénarios climatiques du GIEC (Groupement intergouvernemental de l'étude du changement climatique) et, d'autre part les simulations du climat de l'Holocène moyen et du dernier maximum glaciaire du projet international PMIP (paléoclimat modeling intercomparison projet)

Scénarios du GIEC

Un effort particulier doit être développé en 2004-2005 pour réaliser les simulations imposées pour le prochain rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, ou IPCC en anglais). Les simulations imposées par le GIEC ont comme objectif :

- De balayer (si possible en les encadrant) les évolutions futures des perturbations anthropiques en proposant plusieurs scénarii d'évolution des gaz à effet de serre et d'aérosols sulfatés, en fonction des pressions économiques ou démographiques.
- De fournir des ensembles de simulations climatiques, prenant en compte les incertitudes des modèles actuels, à partir desquels il est possible d'établir l'état le plus probable du système compte tenu de l'état de l'art en modélisation.

Ces ensembles de simulations représentent une source de données très intéressantes pour les communautés d'impact et différentes études du risque climatique. Elles constituent également des références pour toutes les études que nous effectuons pour comprendre le fonctionnement du système et étudier le rôle des différents éléments du système climatique et de leurs couplages. Les scénarios et les résultats du modèle sont présentés dans la section 4.1

Pour pouvoir réaliser ces scénarios, les effets direct et indirect des aérosols sulfatés ont été introduits dans le modèle d'atmosphère suivant Quaas et al. (2004). Un travail d'ajustement a été réalisé pour que l'introduction de la distribution de la taille des gouttes de pluie ne modifie pas les ajustements du modèle. Ce travail s'est fait en validant chaque étape par rapport aux données de propriétés radiatives issues des observations par satellite. Un dispositif de suivi des simulations a également été mis en place.

Simulations des climats passés

Les résultats obtenus ces dernières années à partir de simulations des climats passés poussent à considérer les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les surfaces englacées et la végétation dans les changements de climat. Un accent important est mis sur l'analyse du rôle de l'océan et des changements de végétation (cf. Braconnot et al 2003, pour une synthèse). Les simulations du climat de l'Holocène moyen et du dernier maximum glaciaire ont démarré avec la nouvelle version du modèle. Les simulations du dernier maximum glaciaire seront les premières réalisées en couplé à l'IPSL. Un accent particulier est porté sur l'ajustement du système en période froide. Il concerne principalement l'ajustement de l'océan et les modifications du cycle hydrologique, lié au ruissellement continental dans les régions arctiques et de l'atlantique nord. Cette thématique est principalement développée au LSCE, mais de nombreuses analyses se font au regard des projections climatiques futures.

3. Les autres développements

3.1 Le couplage chimie-climat

Pour pouvoir quantifier les rôles respectifs des émissions anthropiques des différents gaz à effet de serre et des aérosols, il était nécessaire d'adopter une démarche incrémentale permettant le développement et l'application d'un modèle couplé atmosphère-chimie-aérosols. L'approche choisie, qui a démarré en 1999 consiste à développer un modèle modulaire dans lequel les différents composés ont été intégrés pas à pas. Ce nouveau modèle interactif de chimie atmosphérique INCA (modèle d'Interactions avec la Chimie et les Aérosols) est couplé en ligne au modèle d'atmosphère LMDz. Le modèle INCA est appelé à chaque pas de temps physique du modèle d'atmosphère pour le calcul de la photochimie et le transport des espèces traces. Une part importante du développement du modèle LMDz-INCA a porté sur la validation du transport atmosphérique à l'aide de traceurs, la mise au point d'une version pouvant fonctionner en mode contraint par les réanalyses du centre européen (version nudgée) et en mode zoomé, ainsi que sur le démarrage du développement d'une version à haute résolution verticale.

La description de LMDz-INCA et une première évaluation globale du transport, des processus de dépôt et de l’ozone troposphérique ont donné lieu à la première publication de référence de ce modèle (*Hauglustaine et al., 2004*). La publication de la version incluant les aérosols est faite dans *Bauer et al. (2004)* et *Generoso et al. (2004)*. Nous avons maintenant mis au point une version de INCA incluant la chimie des NMHC, qui est également utilisée pour l’étude de l’impact des hydrocarbures biogéniques sur la chimie globale (*Folberth et al., 2004*). Les distributions des précurseurs de l’ozone troposphérique et d’ozone simulées ont été évaluées par comparaison avec les mesures disponibles. La figure 3.1.a compare par exemple la distribution calculée du monoxyde de carbone et mesurée par l’instrument MOPITT à bord de EOS/TERRA. Sur base des traceurs inertes introduits dans le modèle (CO_2 , SF_6 , CFC11 , ^{85}Kr) nous avons calculé un temps d’échange interhémisphérique de 1,13-1,39 ans. Le modèle simule un brassage trop vigoureux qui tend à sous-estimer le gradient méridien des traceurs. L’évaluation des distributions de ^{222}Rn calculées par comparaison avec des profils mesurés confirme ces résultats. Les nouveaux schémas de convection et de mélange dans la couche limite devraient améliorer cet aspect. Le temps de vie global du méthane dans l’atmosphère dans la version du modèle incluant la chimie des hydrocarbures non-méthanique est 9,15 ans, une valeur en bon accord avec les estimations récentes. Les incertitudes liées à la représentation des aérosols et de leurs propriétés optiques dans les modèles sont estimées au travers d’une intercomparaison internationale, AEROCOM, regroupant 14 modèles globaux d’aérosols. Cette initiative, en préparation de prochain rapport IPCC, a été initiée par le LSCE. La disponibilité de données de validation, telles que les observations spatiales, les observations photométriques (réseau Aeronet) ou par lidar (réseau EARLINET) permet de nombreux diagnostics des différents modèles. Les résultats de ces diagnostics sont directement accessibles via une interface web. Une synthèse des résultats sous forme de diagramme de Taylor montre qu’un ensemble des modèles globaux d’aérosol ont une qualité comparable. Une analyse plus complète des différences entre les champs générés par les différents modèles est en cours.

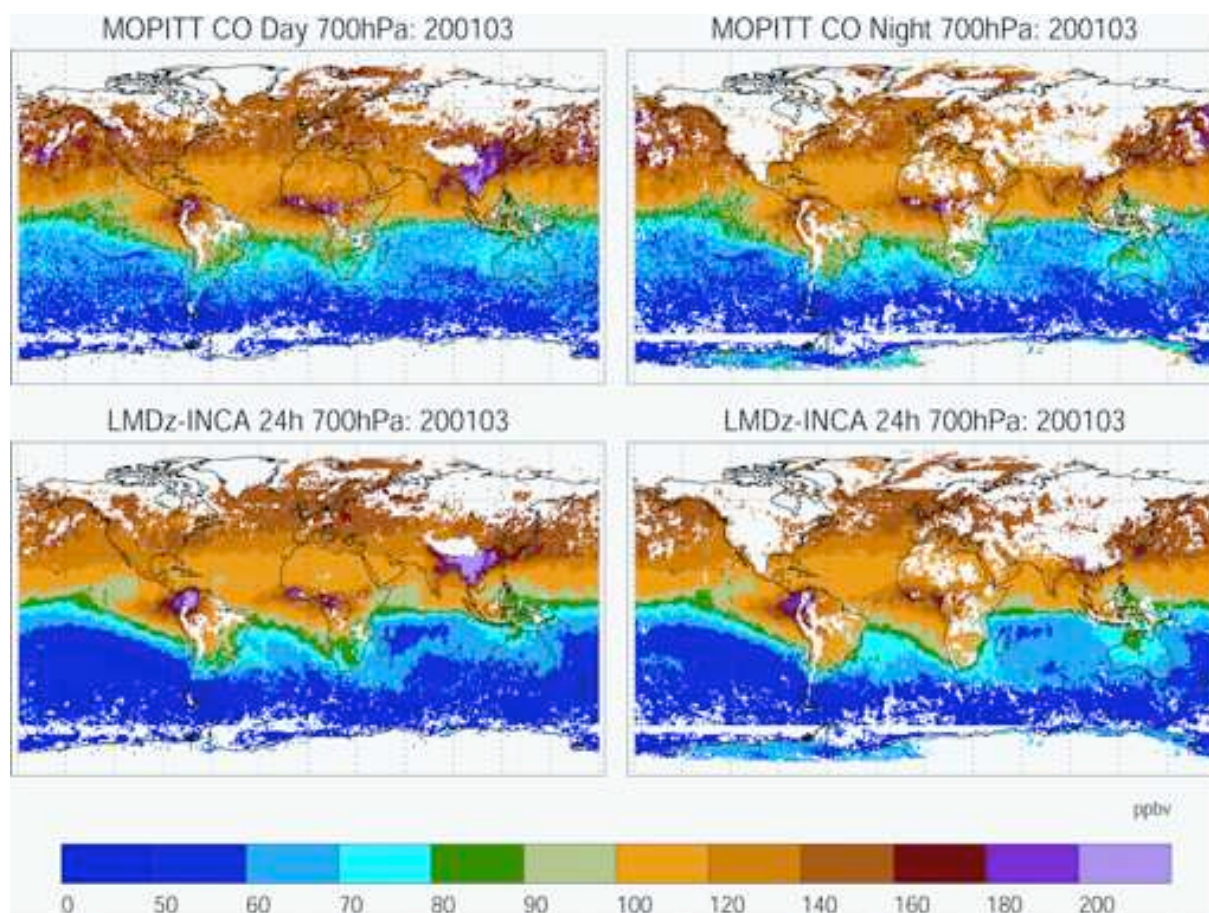


Figure 3.1.a: Comparaison de la distribution du rapport de mélange de CO (ppbv) mesurée par l'instrument MOPITT au niveau approximatif 700 hPa et calculée par LMDz-INCA pour la période de mars 2001.

Une version de INCA étendue à la stratosphère est actuellement en phase de développement et d'évaluation dans le cadre d'une collaboration entre le LSCE, le LMD et le SA. Dans le cadre du projet européen FP6/SCOUT-O3, et par la suite FP6/QUANTIFY, l'accent sera résolument mis au cours des prochaines années sur le développement et l'utilisation d'une version de LMDz-INCA à haute résolution verticale et possédant une bonne résolution au niveau de la tropopause. L'étude des interactions chimie-climat et la simulation de l'évolution future de la capacité oxydante passent en effet par la prise en compte simultanée de la troposphère et de la stratosphère. Les premiers travaux effectués en ce sens à l'aide de LMDz-INCA sont particulièrement encourageants et monteront en puissance au sein de l'IPSL (Figure 3.1.b).

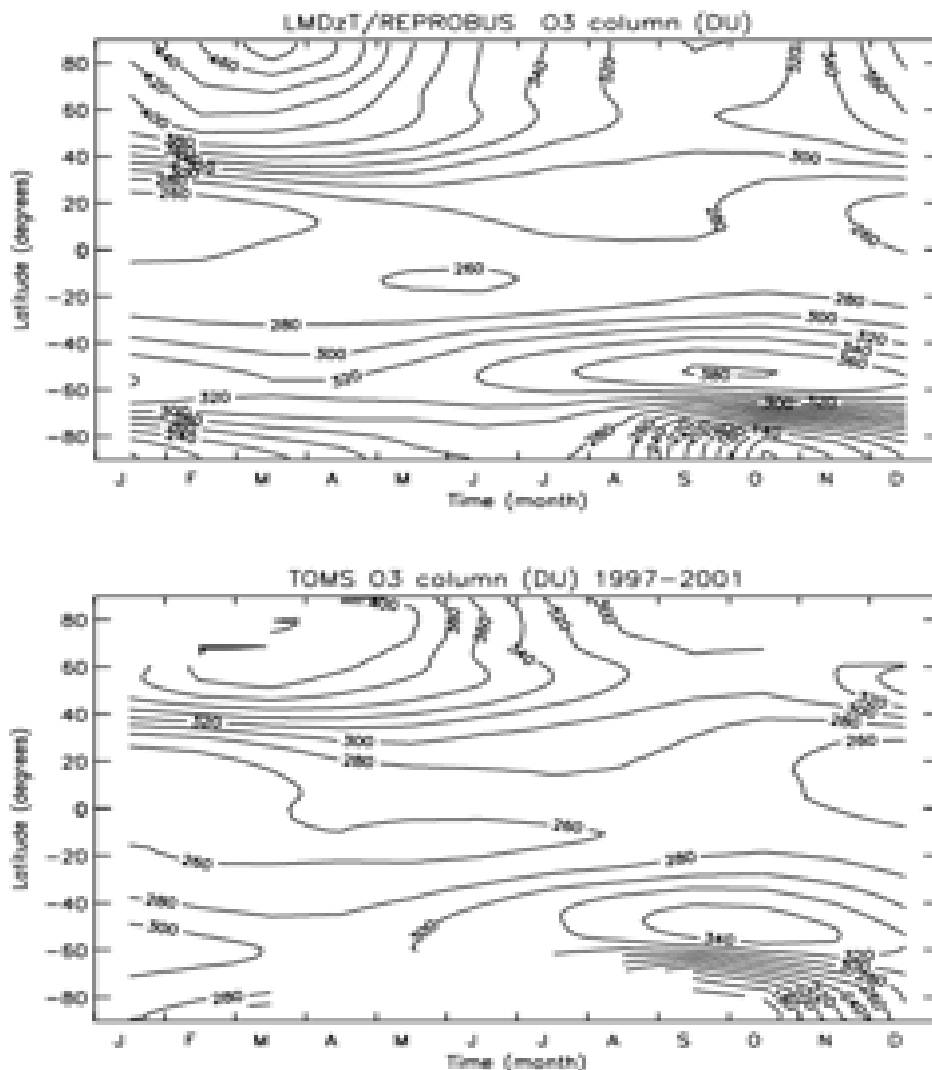


Figure 3.1.b: Variation saisonnière de l’ozone total calculée pour la période présente à l’aide de LMDz et comparée aux données de l’instrument TOMS

3.2 Les surfaces continentales.

Les surfaces continentales sont une composante importante du système climatique. Elles sont encore trop souvent traitées comme des interfaces ‘purement’ physiques entre le sol et l’atmosphère, qui transforment l’énergie solaire reçue en flux de chaleur latente et sensible. Depuis quelques années, le modèle biophysique SECHIBA s’est vu adjoindre un modèle du cycle du carbone (STOMATE), et un modèle de dynamique des écosystèmes extrait du modèle globale LPJ. L’incorporation d’un cycle du carbone réaliste est la seule manière de pouvoir simuler correctement le cycle foliaire saisonnier, et par conséquent tous les flux biophysiques et biogéochimiques échangés entre la surface et l’atmosphère.

Au cours de ces 4 dernières années, nous avons mis au point et stabilisé une version de référence du modèle, qui a donné lieu à la première publication (Krinner et al. in press) dans laquelle nous faisons une évaluation à l’échelle globale d’ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystemEms), ainsi qu’une validation, sur un ensemble de sites du réseau FLUXNET, des flux de chaleur latente et sensible, et de la productivité primaire nette de l’écosystème. La figure 3.2 illustre la remarquable sensibilité de notre modèle à la sécheresse subie en 2003 en Europe (Ciais et al. soumis).

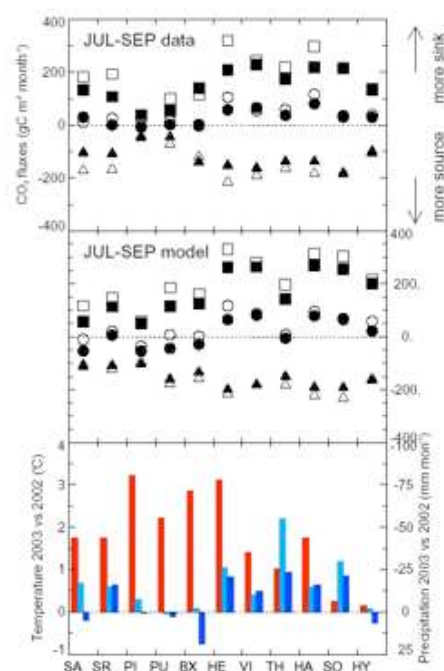


Figure 3.2.a : Evaluation des simulations ORCHIDEE entre les mois de Juillet et Septembre pour les années 2002 et 2003. (a) Mesures par 'eddy-correlation' et (b) simulations des flux bruts (carrés = photosynthèse, triangles = respiration des sols) et nets de CO₂ (ronds) en 2002 (sigles vides) et 2003 (sigles noirs). La photosynthèse et la productivité primaire nette de l'écosystème sont positives si le CO₂ est absorbé par la surface. (c) Anomalies de précipitation (estivales en bleu clair, annuelles en bleu foncé et de température (en rouge) entre les années 2003 et 2002. Les différents sites reportés en abscisse sont, du Sud au Nord : El Saler (SA), San Rossore (SR), Pianosa (PI), Puéchabon (PU), Bray (BX), Hesse (HE), Vielsam (VI), Tharandt (TH), Hainich (HA), Soroé (SO) and Hyytiälä (HY). Pour plus de détail, lire Ciais et al. (soumis).

Parallèlement à ce travail, nous avons assisté à une évolution importante de la masse critique de chercheurs, étudiants et ingénieurs s'impliquant dans le développement et les applications de ce code, à diverses échelles spatiales (du site au globe), et diverses périodes climatiques (paléoclimats, climat présent et changement climatique futur) (http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssipsl/doc/Fiche_ORCHIDEE_Nov2004.pdf). Nous avons donc mis en place une gestion d'ORCHIDEE sous CVS afin de pouvoir suivre d'une part la version de référence (1.3), d'autre part les développements multiples. Nous avons également développé et mis à la disposition de tous des utilitaires permettant 1) de rapidement évaluer toute nouvelle version du code sur un ensemble de sites sur lesquels nous disposons de données de forçage et de validation, et 2) de la comparer aux versions précédentes sur ces mêmes sites ainsi qu'à l'échelle globale en générant un atlas regroupant une grande partie des variables simulées. Cet atlas nous sert également de lien entre les simulations des bilans de surface générés avec le modèle couplé IPSLCM4, et ceux issus de simulations d'ORCHIDEE forcé par une climatologie prescrite, afin d'évaluer l'impact du couplage surface-atmosphère sur ces bilans et sur les flux à l'interface.

D'autres études réalisés de façon indépendantes ont aussi donné des résultats intéressants. Les développements développements associés seront petit-à-petit intégrés dans la version de référence. En particulier, divers travaux réalisés sur le *module hydrologique* concernant 1) le développement d'un schéma de routage de l'eau de surface et de sub-surface (J. Polcher, communication personnelle), 2) l'incorporation du *module d'hydrologie multi-couche* développé par de Rosnay et al. (2002), ont été utilisés pour quantifier le rôle de la résolution

spatiale dans la détermination du bilan hydrologique en Espagne (Vérant et al. 2004) et sur la vallée du Rhone. Un modèle permettant de calculer l'irrigation et son effet sur le climat a été introduit dans ORCHIDEE par de Rosnay et al. (2003) et testé en mode couplé avec l'atmosphère. Les simulations réalisées ont montré que non seulement les zones irriguées mais une région bien plus étendue aux alentours subissait un accroissement de précipitation (Culson et al, 2004). Des recherches très nouvelles concernant la variation interannuelle du contenu en eau des continents ont pu être entreprises grâce à une collaboration avec A. Cazenave, du LEGOS, Toulouse. Les résultats de simulations ont été comparés aux données de Topex-Poseidon. Nous avons ainsi montré l'importance de la région tropicale dans cette variabilité interannuelle (Ngo-Duc et al. 2004a, figure 3.2.b). Une dernier développement majeur a été accompli grâce à la création d'une nouvelle base de données de précipitations et d'états atmosphériques sur 50 ans pour déterminer le bilan hydrologique sur la planète (Ngo-Duc et al. soumis). Les études en cours étudient les tendances de bilan sur les surfaces continentales et les effets sur le niveau de la mer. Cette banque de données sera très précieuse pour évaluer les bilans hydrologiques des bassins versants et les comparer aux résultats de la Mission GRACE.

Les surfaces fortement anthropisées (cultures céréalières et prairies gérées dans un premier temps) étaient, jusqu'à présent, traitées comme des prairies naturelles dans ORCHIDEE, alors que leur fonctionnement est assez différent compte tenu de l'ingérence de l'agriculteur dans leur cycle. Nous avons donc choisi, pour améliorer la simulation des divers flux et bilans sur ces surfaces, de faire appel à des modèles spécifiques : le modèle agronomique STICS pour les sites céréaliers (Gervois et al. sous presse, de Noblet-Ducoudré et al. sous presse), et le modèle PASIM pour les prairies gérées

Enfin, pour faire le lien avec la chimie atmosphérique (modèle INCA), des paramétrisations d'émission de plusieurs composés organiques volatiles (e.g. isoprènes, monoterpènes, méthanol) par la végétation, et d'oxyde d'azote par les sols ont été introduites dans ORCHIDEE (Lathière et al. en préparation).

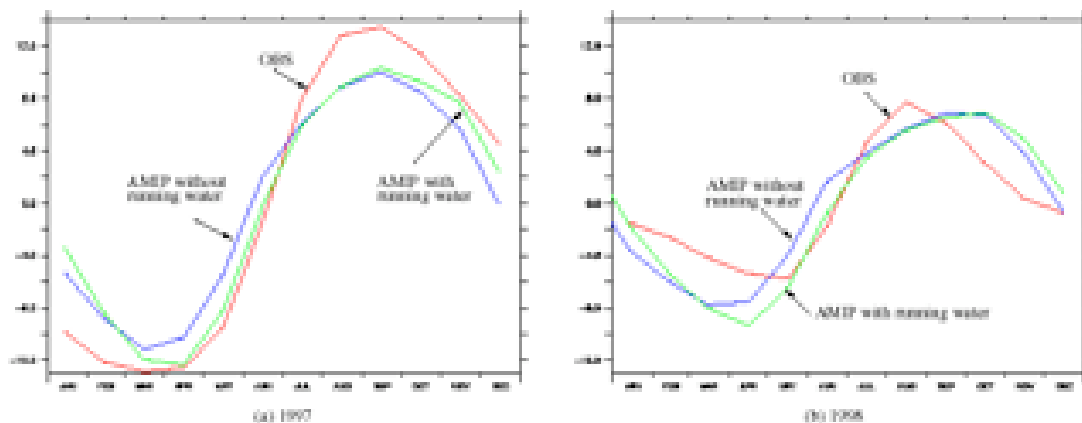


Figure 3.2 b: Contribution de l'eau continentale aux variations du niveau de la mer en 1997 et 1998. Les courbes rouges sont les observations dérivées 1) des mesures du satellite Topex-Poséidon, 2) des mesures in-situ de la température de l'océan et 3) des estimations de la vapeur d'eau dans l'atmosphère issues des réanalyses NCEP/NCAR. Les courbes bleues et vertes sont respectivement les sorties des simulations ORCHIDEE avec et sans routage de l'eau continentale. L'amélioration de la phase des courbes vertes comparée aux courbes bleues montre l'avantage du schéma du routage. Pour plus de détail, lire Ngo-Duc et al. (2004a).

.....

3.3 Le couplage océan-biogéochimie marine

La modélisation de la biogéochimie marine à l'IPSL s'appuie sur plusieurs outils et les thématiques abordées par les chercheurs de l'IPSL dans ce domaine sont nombreuses. Plusieurs des thèmes abordés à l'IPSL ne sont pas spécifiquement reliés à l'étude de l'évolution du climat. De nombreux chercheurs, en particulier au LODyC, se sont intéressés spécifiquement à différentes régions de l'océan mondial (Pacifique Equatorial, Atlantique Nord, Atlantique Tropical, Chili-Pérou, Méditerranée...). Un chantier important concerne le rôle de la petite échelle (sub-méso et méso-échelle) sur la biogéochimie marine (Levy 2003, Levy et Klein 2004, ...). La modélisation des traceurs (CFC, Helium, radio-carbone) a aussi été utilisée pour diagnostiquer/ valider la circulation océanique simulée par le modèle océanique de l'IPSL, OPA (Dutay et al. 2004, Dutay et al. 2003, Rodgers et al. 2004).

Le couplage de la biogéochimie marine au système climatique pour aborder les questions des rétroactions climat-biogéochimie marine a également progressé, en partie grâce au travail fourni en amont (étude régionales, utilisation de traceurs, ...). Le modèle utilisé pour ces questions de couplage avec le climat est le modèle biogéochimique de l'océan mondial, PISCES. Ce modèle a bénéficié de nombreuses avancées, principalement en terme de représentation de l'écosystème (plusieurs groupes fonctionnels de phytoplancton, co-limitation par plusieurs éléments nutritifs)(Aumont et al. 2003) mais aussi concernant la représentation de la zone aphotique (processus dans la colonne d'eau jusqu'au sédiment).

Les premières études menées à l'IPSL et concernant le couplage biogéochimie marine-climat se sont focalisées sur le cycle du carbone, pour l'anthropocène (Friedlingstein et al. 2001, Dufresne et al. 2003, Friedlingstein et al. 2003), mais aussi pour la période du Dernier Maximum Glaciaire (Bopp et al. 2003). En collaboration avec des chercheurs du LOA (Lille), nous nous sommes aussi intéressés au cycle du soufre et à l'effet du changement climatique sur les émissions marines de DMS (Bopp et al. 2003) et sur l'effet radiatif associé (Bopp et al. 2004) (cf. Figure 3.3). Enfin, toujours en utilisant le modèle PISCES, nous avons commencé à aborder l'étude des effets biophysiques de la biologie marine sur la circulation marine et sur le climat, en particulier en ce qui concerne le Pacifique Tropical. Des modifications substantielles de l'état moyen (réchauffement des eaux de surface, refroidissement en sub-surface) et du cycle saisonnier (renforcé) ont été mis en évidence dans le Pacifique Tropical.

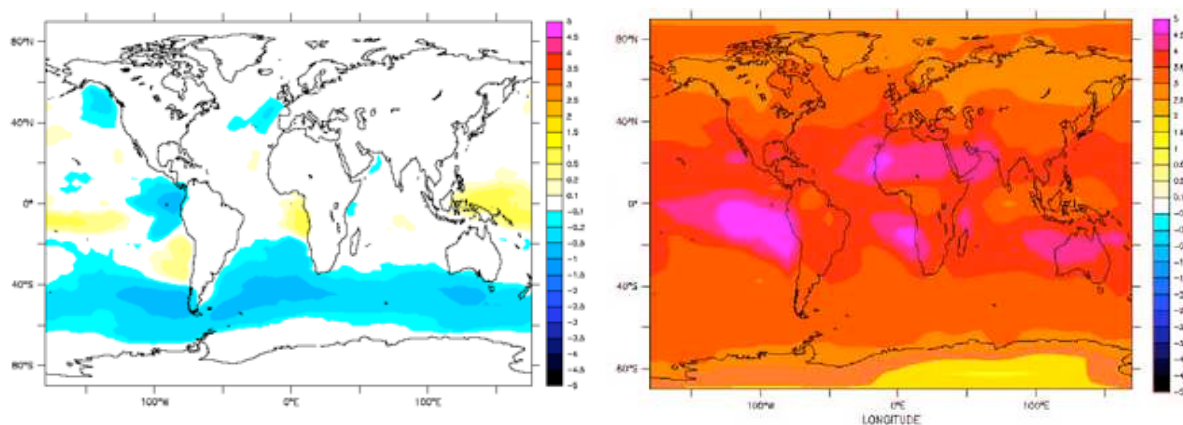


Figure 3.3 : Effet radiatif (à 2xCO₂), lié aux modifications par le changement climatique des émissions marines de DMS (à gauche) et lié à l'augmentation du CO₂ atmosphérique (à droite). Les unités sont des W/m²

4. Thématiques scientifiques coordonnées par le pôle de modélisation

Les activités scientifiques directement coordonnées par le pôle de modélisation concernent principalement deux thématiques. Toutes deux sont liées par l'analyse de scénarios climatiques soit à l'échelle globale (groupe 20°-21°), soit à l'échelle régionale (groupe régionalisation).

4.1 20^e-21^e

Le principal objectif du groupe 20^{ème}-21^{ème} siècle du pôle de modélisation consiste à quantifier les rôles respectifs de différentes perturbations anthropiques et d'estimer la réponse du système couplé (climat-cycle) à ces perturbations, et ce pour la période historique et pour le futur. Différents axes de recherche sont privilégiés et correspondent à des configurations particulières du modèle de climat de l'IPSL. Ils concernent l'étude du changement climatique, des changements de variabilité et de dynamique du climat associés. La quantification des principales rétroactions climatiques (nuages-vapeur d'eau, cycle hydrologique-salinité, hautes latitudes) et de leurs incertitudes. Il s'agit aussi d'intégrer de nouvelles composantes dans le système climatique de manière à estimer leur rôle et, le cas échéant, rétroaction dans le changement climatique à venir. Ces études concernent l'utilisation des sols; le cycle du carbone continental et océanique; la chimie et les aérosols (BC, O₃, CH₄, ...).

Ces études s'articulent autour des simulations réalisées dans le cadre du 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC-AR4). Il s'agit des simulations suivantes (figure 4.1):

- Simulation "historique" (1860-2000), avec les aérosols sulfatés et les concentrations observées des gaz à effet de serre.
- Simulation future (2000-2100) avec stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés à la valeur 2000.
- Simulation future (2000-2100) avec évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés suivant le scénario SRES-B1
- Simulation future (2000-2100) avec évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés suivant le scénario SRES-A1B
- Simulation de contrôle, avec les concentrations actuelles (1980) des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés.
- Simulation de contrôle, avec les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés de l'époque préindustrielle (année 1860)
- Simulation type CMIP : accroissement idéalisé de CO₂ et stabilisation à 2xCO₂ et 4xCO₂

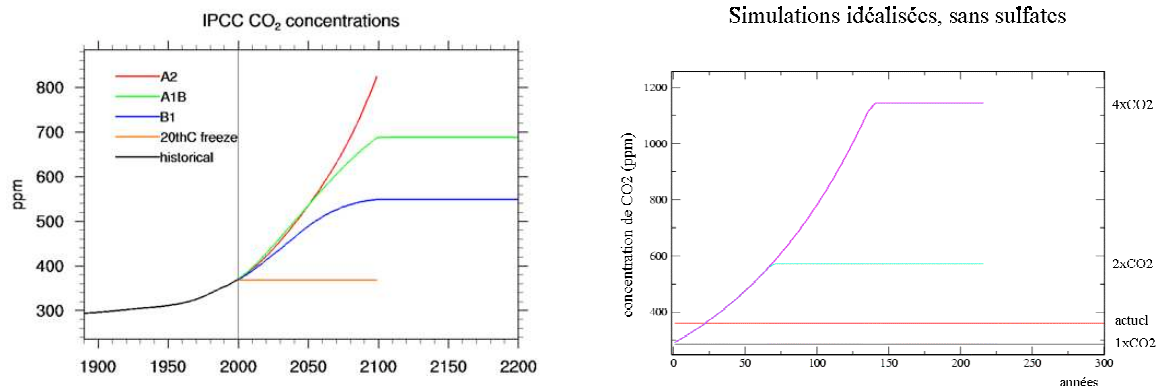


Figure 4.1a: Représentation de l'évolution de la teneur atmosphérique en gaz carbonique associées aux différents scénarios climatiques devant être réalisés pour le GIEC. Scénarios de référence (gauche), scénarios complémentaires ou idéalisés (droite)

Des diagnostics sont effectués automatiquement « en ligne » tels que des séries temporelles, des moyennes saisonnière, annuelles, par décade,... ainsi que des calculs d'indices climatiques les plus utilisés par la communauté étudiants les impacts climatiques. Les sorties de ces simulations sont disponibles par DODS via la page web du projet MC² (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr/simules.html>). En outre, ces simulations seront mises à la disposition de la communauté scientifique internationale via IPCC (archives au PCMDI). La figure 4.1.B montre d'une part le réchauffement obtenu au moment du doublement de CO₂ pour la simulation CMIP. On retrouve les caractéristiques classiques avec une augmentation de température plus importantes sur les continents de l'hémisphère nord, dans les régions

enneigées. Un léger refroidissement apparaît en Atlantique nord. Il est associé à une forte réduction de la circulation thermohaline de l'océan qui tend à ralentir le réchauffement dans cette région. Pour la période historique, la simulation incluant les aérosols sulfatés reproduit bien l'augmentation de température observée au long du 20^e siècle. La comparaison avec la simulation n'incluant pas l'effet des sulfates confirme le rôle important joué par les aérosols dans les dernières années.

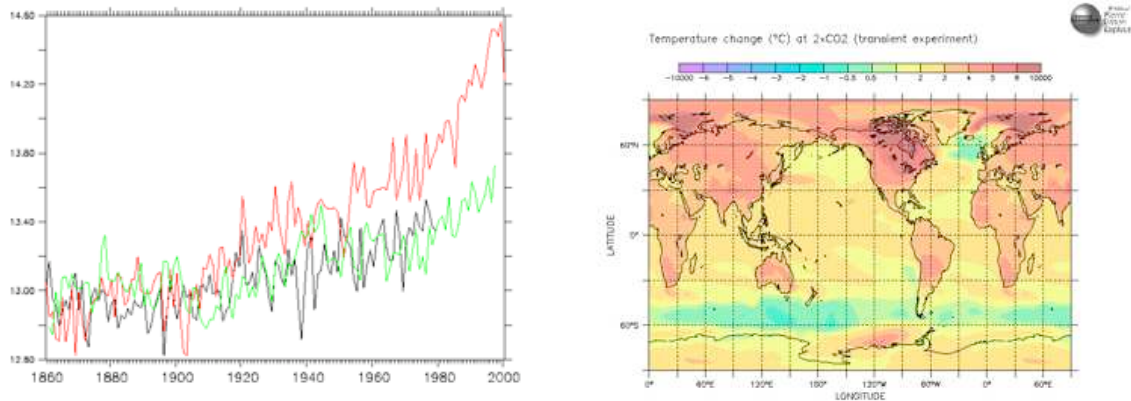


Figure 4.1b: Evolution de la température de surface sur la période historique (gauche) pour la simulation avec gaz à effet de serre et aérosols (en vert) et sans aérosols (en rouge). Les observations sont en noir. Changement de température de surface pour un doublement de CO₂ obtenu pour la simulation CMIP (droite).

Plusieurs analyses ont démarré. Elle concerne pour le moment les simulations de contrôle. En particulier, des comparaisons avec les observations sont effectuées pour la variabilité saisonnière à interannuelle tropicale (Atlantique et Pacifique pour l'instant). Une analyse fine des rétroactions radiatives (dans les régions tropicales pour l'instant) séparant les composantes thermodynamiques et radiatives a été effectuée. Des analyses ont également été menées afin d'estimer les rétroactions aux hautes latitudes liées à la représentation de la surface (en particulier le rôle du gel du sol), ainsi que les rétroactions du cycle hydrologique liées à la salinité (en isolant les différents flux d'eau douce). Un modèle théorique simplifié de la circulation aux moyennes latitudes a été développé afin de comprendre leur évolution sous l'impact du changement climatique.

Au niveau des cycles biogéochimiques, des simulations offline (océan) ont été réalisées afin de simuler le cycle du carbone en équilibre avec le climat de contrôle, ainsi que des simulations LMDz-ORCHIDEE (à SST fixes) pour le carbone continental. Le rôle de l'utilisation des sols est en cours d'introduction dans le modèle couplé. Une première quantification de l'impact radiatif de l'utilisation des sols a été obtenue à partir de simulations ORCHIDEE. Au niveau de la chimie et des aérosols, les simulations GIEC en cours de réalisation incluent l'effet direct et le 1^{er} effet indirect des aérosols sulfatés, leur concentration étant prescrite. Les autres aérosols sont inclus dans la version LMDz-INCA, leur introduction dans la version de référence est en cours.

L'activité de ce groupe fait l'objet d'un investissement dans différents projets. Les différentes actions en cours font partie du projet MC² (ACI-FNS, coordinateurs Pierre Friedlingstein, LSCE, et Jean Louis Dufresne, LMD). Des analyses croisées entre les simulations réalisées par l'IPSL et par Météo-France seront réalisées dans le cadre du projet français ESCRIME (action directement suivie par le conseil scientifique du pôle de modélisation, cf section 6). Enfin, au niveau européen, ces activités rentrent dans le cadre du projet ENSEMBLES (FP6) coordonné par le Hadley Centre (responsable IPSL: Hervé Le Treut). ENSEMBLES est un projet intégré regroupant 70 partenaires, dont l'objectif est de munir l'Europe d'un système de prévision climatique couvrant les échelles de temps saisonnières à multidécennales. Ce projet intègre des simulations climatiques globales et régionales, les liens avec les modèles d'impact (agriculture,

industrie), la concertation avec les économistes, et la formation. D'autres projets menés dans les différentes équipes viennent renforcer des aspects scientifiques particuliers.

4.2 Exploitation des scénarios à l'échelle régionale

L'activité, animée par le pôle autour des scénarios régionaux de modélisation, s'est focalisée sur l'Etudes des changements climatiques naturels et anthropiques en Europe et Méditerranée. La régionalisation de scénarios climatiques dans le cadre du réchauffement global est une étape incontournable pour mener des études sur les impacts du changement climatique. Durant ces dernières années, des avancées significatives ont été obtenues dans la modélisation du climat à haute résolution qui se rapproche, petit à petit, de l'échelle régionale. La région Méditerranée est une région très peuplée et active où les incidents climatiques peuvent entraîner d'importantes conséquences économiques. C'est une zone de transition entre un climat chaud et sec au sud et un climat doux et humide au nord. Elle est très sensible et vulnérable au changement climatique.

Dans l'état actuel de la recherche scientifique, les prévisions des différents modèles globaux sont concordantes à l'échelle continentale, mais elles divergent nettement dans leurs détails aux échelles locales, voire régionales. Néanmoins, une certaine cohérence parmi les différents modèles a été trouvée sur la région Europe - Méditerranée et les tendances réellement observées corroborent les résultats modélisés. Lors d'un réchauffement global, l'anticyclone des Açores semble se renforcer et s'étendre sur une zone plus large. Sous l'influence de l'anticyclone, le bassin méditerranéen connaît une diminution des pluies. Le gradient méridien de pression sur l'Atlantique du nord est aussi renforcé, tout comme le gradient méridional de température dans les hautes couches de l'atmosphère. Ceci a pour effet de renforcer la route dépressionnaire nord-atlantique et de décaler cette zone de dépression vers le nord. Ainsi des perturbations qui arrivent sur le nord du continent européen sont plus nombreuses et plus fortes. Le nord de l'Europe voit donc une augmentation de pluie. Le contraste hydrologique entre le nord et le sud de l'Europe est ainsi accentué.

Le cycle de l'eau dans le bassin méditerranéen et la façon dont il est modifié sous l'impact de différentes perturbations anthropiques (gaz à effet de serre, aérosols d'origine anthropique) est le point central dans nos études. Etant donnée l'évolution démographique, les changements de mode de vie, le développement de besoins alimentaires nouveaux, l'eau est devenue la denrée essentielle conditionnant le devenir des populations. Les études utilisent une série d'outils qui ont été récemment développés pour modéliser les différentes composantes du système climatique régional du bassin méditerranéen, le modèle LMDZ zoomé sur la Méditerranée à 80 ou 50 km, et une configuration du modèle d'océan OPA pour la mer Méditerranée (MED8, huitième de degré).

En ce qui concerne les scénarios régionaux, quatre scénarios du changement climatique global sont utilisés comme source initiale d'informations. Il s'agit du scénario A2 (nomenclature IPCC) produit par quatre modèles globaux du système climatique couplé océan-atmosphère, développés respectivement à IPSL, Météo-France, GFDL et NCAR. L'utilisation d'un nombre important de scénarios globaux disponibles nous permet de mieux cerner les incertitudes liées aux différents modèles physiques utilisés. Ces quatre scénarios ont été régionalisés en utilisant LMDZ zoomé, avec une résolution spatiale de 80 km. Nous avons tout d'abord réalisé une simulation de contrôle qui représente le climat moyen de la période actuelle. Nous avons réalisé ensuite les simulations du changement climatique qui représentent le milieu et la fin du 21^e siècle. Ces simulations se sont réalisées en mode climatologique avec les conditions aux limites moyennées respectivement sur 1970/1999 (climat actuel) 2030/2059 (climat futur proche) et 2070/2099 (climat futur lointain). Ce choix du mode climatologique est principalement dû aux faibles ressources informatiques disponibles. Il est aussi justifié par le fait que notre intérêt essentiel au stade actuel du projet n'est pas sur la variabilité interannuelle qui aurait nécessité les modèles couplés océan-atmosphère. La durée de toutes les simulations est de 30 ans pour assurer une stabilité statistique des résultats.

Le modèle LMDZ qui fonctionne en mode guidage est également utilisé pour effectuer sa validation contre les données de terrain. Le facteur du zoom est de 3 et la résolution du modèle

atteint les 50 km. Cela ouvre une très large perspective de valider un modèle climatique à travers les données acquises pendant les campagnes de terrain. La comparaison avec les données Meteosat pleine résolution est entamée. Elle est en cours d'analyse sur le mois d'octobre 2000. On peut déjà voir des dynamiques différentes dans l'évolution temporelle des couvertures nuageuses du modèle et déduite de Meteosat.

4.3 Journées spécifiques

Au-delà de la coordination des activités liées au changement climatique futur, de nombreuses journées thématiques scientifiques ont été réalisées dans le cadre du pôle de modélisation. Elles concernent soit des activités scientifiques, la formation aux outils de l'IPSL ou la diffusion d'information. Les journées thématiques ont concerné le groupe régionalisation, avec la mise en place du projet medWater sur la méditerranée, la prospective du pôle de modélisation, ou les premières analyses des résultats du modèle couplé. Signalons également la mise en place d'un atelier tropiques (responsable Jean-Philippe Duvel, LMD) permettant de discuter les résultats obtenus par les différentes personnes de l'IPSL s'intéressant au climat des régions tropicales.

Une demande de formation sur les outils et le modèle couplé de l'IPSL a émergé des journées du pôle de modélisation organisées à Trouville en 2002. La première journée intitulée « Prise en main du modèle couplé de l'IPSL » a eu lieu en avril 2003 à l'IDRIS, ce qui a permis d'organiser des TP pour la visualisation. Une vingtaine de personnes y a assisté. Les journées de formation suivantes se sont succédées en mai 2004 au LSCE et au LMD Jussieu et ont été focalisées sur le modèle couplé lui-même : comment accéder aux programmes sources du couplé, comment le compiler, comment (re)exécuter la simulation de référence, comment se repérer dans les fichiers de résultats, comment lancer les post-traitements automatiquement, Une dizaine de personnes ont assisté à la séance du LSCE et une demi-douzaine au LMD, Jussieu. Les supports de ces formations sont accessibles sur le serveur WWW de IPSL : <http://www.ipsl.jussieu.fr/poles/Modelisation/SupportsCours.htm> Une note technique détaillée est également accessible et permet de prendre en main facilement le modèle : <http://www.ipsl.jussieu.fr/~ioipsl/MODIPSL/index.html>. De plus, de nombreux exposés techniques ont été réalisés (sur le Earth Simulator, l'IBM de ECMWF, UNICORE,...)

Notons qu'aucune formation sur le contenu du modèle lui-même n'a été organisée pendant ce temps. Seuls des exposés individuels, lors de la mise en route des stages de DEA ou thèses ont été réalisés sur rendez-vous.

4.4 Liens avec CLIMPACT

La société CLIMPACT est une "start up" issue de l'IPSL qui se spécialise dans le conseil en climatologie. L'accord entre l'IPSL et CLIMPACT prévoit l'exploitation par CLIMPACT des scénarios réalisés à l'IPSL. Nous illustrons cette collaboration par l'étude réalisée pour la société Nestlé Waters. Cette société est responsable de l'exploitation et de la commercialisation d'eaux minérales issues de plusieurs sources françaises et étrangères. Sur l'une de celle-ci, l'apport est principalement influencé par les précipitations. Or, les variations annuelles et saisonnières enregistrées dans les niveaux de l'eau souterraine sont susceptibles d'influer sur l'approvisionnement en eau de la source.

La société Climact a été chargée de l'étude de l'évolution des précipitations sur cette région pendant la période historique (1885-2003) et pour la période future (2003-2100). Entre 1885-2003, les observations sont issues de Météo-France. Sur les années 2003-2100, les prévisions sont issues de la simulation couplée climat-carbone de l'IPSL (IPSL-CCM2). Sur ces deux périodes, les principales caractéristiques des précipitations ont été analysées, en considérant la tendance, la variabilité, les événements extrêmes ainsi que l'influence respective des précipitations saisonnières sur les précipitations annuelles. Les cycles de grande échelle observés au dessus de l'Atlantique Nord sont corrélés avec l'apparition d'événements extrêmes. Nous montrons comment les précipitations sont influencées par ces phénomènes pour la région de Plancoët sur la période historique et comment ces résultats sont exploitables pour la période future.

5. coordination infrastructure

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le modèle du système climatique de l'IPSL couplé IPSL s'appuie sur une infrastructure logicielle, commune avec les composantes et adaptée aux calculateurs utilisés. Dans la pratique cela représente un travail lourd que chacun des groupes de travail n'a pas toujours mis en priorité. Pour pouvoir faire évoluer cet infrastructure en fonction des différents besoins et des avancées technologiques, le pôle de modélisation a assuré une veille technologique et l'investissement dans le projet Européen PRISM ou la prospective sur les moyens de calcul ont été directement coordonnées par le conseil scientifique du pôle de modélisation

5.1 Projet PRISM

Le projet PRISM était un projet européen de 3 ans (fin le 30 novembre 2004) dont l'objectif principal était de définir, développer, déployer et tester l'infrastructure logicielle nécessaire à la préparation et au lancement de simulations d'ensembles de multi-modèles du système terre. L'infrastructure développée au cours du projet a comme objectif d'aider à standardiser le couplage des différents modèles européens. Le projet a ainsi permis de mener une réflexion sur les interfaces physique et une proposition d'interface standard a été proposée. Une infrastructure logicielle autour des modèles a été développée. Elle comprend le coupleur qui permet d'échanger les champs et de faire dialoguer les différents modèles entre eux, une arborescence des différents codes sources nécessaires à l'exécution d'une simulation couplée, un système de compilation des modèles, un système d'exécution, une possibilité d'implémentation de post-traitement des résultats des simulations au cours de l'exécution, un GUI ou interface graphique de lancement des simulations. L'ensemble de ce système bénéficie de facilité de portage et d'optimisation des performances sur une grande variété de calculateurs. La dernière partie du projet a consisté à tester le système proposé en mettant au point différentes configurations de modèles (à partir des différents modèles développés en Europe).

Au cours du projet l'IPSL a participé à la standardisation et aux définitions initiales des différentes actions, ce qui a permis de proposer des solutions pour l'interface physique, de participer aux spécifications de l'environnement de couplage et de promouvoir une architecture logicielle (OpeNDAP/DODS) pour l'accès et le partage à distance des données. Les différents modèles ont été adaptés au système PRISM et les environnements de compilation et d'exécution nécessaires ont été implémentés sur les centres de calcul auxquels nous avons accès (IDRIS, CEA/CCRT, Earth Simulator). Les tests comparatifs du modèle de l'IPSL sous l'environnement modipsl et PRISM ont été effectués. L'IPSL a également réalisé plusieurs développements et installations de logiciels. D'autres partenaires du projet ont également contribué à la mise en conformité PRISM des modèles de l'IPSL en ce qui concerne la glace de mer et la biogéochimie marine.

Tous les éléments proposés par PRISM ne sont pas arrivés à état de maturité à l'issue du projet. Une action est en cours pour la poursuite des actions PRISM au niveau européen. L'IPSL participe activement à cette initiative. En parallèle une évaluation détaillée est en cours pour déterminer les développements qui entreront en standard dans les prochaines versions de l'infrastructure IPSL.

5.2 Bilan calcul.

Les activités du pôle nécessitent des ressources informatiques lourdes que nous trouvons à l'IDRIS et au CEA/CCRT. Outre des calculateurs, les systèmes de fichiers et les possibilités de post-traitement sont primordiaux et doivent évoluer de concert avec les moyens de calcul. Enfin le poste de travail du scientifique reste un poste individuel, habituellement sous Linux, qui doit lui permettre d'accéder aisément et rapidement aux ressources de calcul distribuées sur ces 2 centres au moins et aux résultats ou données distribués eux aussi entre plusieurs serveurs de fichiers. Les 2 tableaux suivants montrent les ressources attribuées à l'IPSL sur les calculateurs de l'IDRIS et du CEA/CCRT. Pour l'IDRIS, est également présentée l'évolution sur les 5 années.

Les attributions de ressources 2004 IPSL

IDRIS			CEA		
Heures NEC SX-5	Heures IBM SP4	Fichiers	Heures NEC SX-6	Heures HP	Fichiers
106 790 h	23 500 h	60 To	82 920 h	12 500 h	30 To

Historique des attributions du CP1 « environnement » à l'IDRIS de 2000 à 2004 (inclus l'IPSL)

CP1	2000	2001	2002	2003	2004
NEC SX-5 IDRIS	47 000 h	70 000 h	85 000 h	107 000 h	140 000 h

En juin 2003, lors de la présentation du pôle de modélisation au Conseil Scientifique de l'IPSL OSU : Observatoire des Sciences de l'Univers, nous avons attiré l'attention de nos tutelles sur le besoin de réactualiser la prospective calcul. En effet, le NEC SX-5 de l'IDRIS a été installé en 2000 et sa saturation se présentait. Actuellement, en octobre 2004, la situation est critique sur l'IDRIS et la mise en œuvre de nouvelles configurations plus gourmandes en temps de calcul ou en mémoire devient impossible. Nous avons aussi de grandes difficultés à suivre les simulations type scénario qui restent plusieurs mois en machine. Dans le même temps, le renouvellement des calculateurs du CEA soit l'arrivée du NEC SX-6 a permis de nous organiser en distribuant les simulations lourdes entre les 2 centres. Par ailleurs, la situation comparée avec les ressources calculs dont nous disposons et celles accessibles par nos partenaires anglais et allemands montre un décalage qui s'amplifie et cela sans compter le Earth Simulator (Japon) ou les projets américains.

Nos inquiétudes et nos besoins ont été exprimés à diverses reprises, auprès du groupe Simulation de l'Académie des technologies en septembre 2003, aux représentants français de l'ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures), à Patrick Mascart, président du groupe GEPCI2 (Groupe d'Etudes pour le Calcul Intensif 2, INSU) puis au groupe GEPCI2. Enfin, nous avons participé, le 1^{er} septembre 2004, à la journée enjeux des simulations extrêmes pour les études sur le climat de Jean-Claude André. Ces différents exercices de prospective montrent que, pour la modélisation du climat à l'IPSL a besoin de l'équivalent de 100 processeurs NEC dès maintenant et du double dans 2 ans. Cela signifie que nous devons être prêts à tourner sur d'autres calculateurs et que les modèles de l'IPSL doivent avoir de bonnes performances sur tout type de machine (du PC au Earth Simulator). La parallélisation du couplé (travail en cours) doit être effective au plus vite. Enfin, des coopérations avec le Earth Simulator sont possibles et encouragées. Si ce constat est partagé par les spécialistes en calcul en France, notre communauté doit rester mobilisée pour faire entendre nos besoins et faciliter les arbitrages budgétaires.

6. La stratégie commune Météo-France/IPSL

6.1 Mise en place d'un projet commun pour la réalisation et l'exploitation des scénarios climatiques (ESCRIME)

L'IPSL et Météo-France ont pour objectif commun d'étudier l'impact des activités humaines sur le système climatique. Bien que l'objectif général des deux groupes soit identique, chaque groupe développe une activité de recherche sur des aspects originaux et complémentaires de l'étude de l'impact des activités humaines sur le climat. Comme nous l'avons montré dans le bilan ci-dessus, l'IPSL développe un ensemble de thématiques permettant

d'analyser et de quantifier le rôle des interactions entre le système climatique et les cycles biogéochimiques. Le projet de Météo-France, bien que s'intéressant aux rétroactions du système climatique dans son ensemble en liaison avec le cycle hydrologique et les processus de surface, met quant à lui davantage l'accent sur des études aux échelles régionales. Cela concerne à la fois des études de variabilité climatique (Atlantique Nord-Europe, régions de moussons, régions polaires), le développement d'une méthodologie de régionalisation dynamique des changements climatiques, et des études de détection et d'attribution des changements climatiques aux échelles régionales en collaboration avec le CERFACS.

La stratégie commune se découpe en trois volets : (i) la mutualisation des forçages appliqués dans les simulations, (ii) l'analyse commune des résultats (iii) la mise en commun de modules numériques. Cet effort commun a été mis en place pour la réalisation, la diffusion et l'analyse des simulations réalisée pour le GIEC (cf section 2.5). Les simulations du GIEC représentent un effort sans précédent, qui mobilisent fortement les ressources de calcul (48000 heures monoprocesseur pour l'IPSL, 40000 heures pour Météo-France). La mise en place des simulations scénarios s'est fait en forte intégration entre les deux groupes. Un effort est en cours pour faciliter l'accès aux données des ces simulations. Un projet d'analyse des simulations a aussi été lancé pour favoriser une exploitation scientifique de haut niveau de cet ensemble de données. Cette initiative fait pendant à la démarche lancée au travers du projet CMIP pour l'analyse des scénarios climatiques et est détaillée dans la partie prospective.

6.2 Le projet de physique commune

Météo-France et l'IPSL se sont entendus pour développer une bibliothèque commune de paramétrisations physiques compatibles avec les deux modèles. Le but est d'avoir une stratégie commune de développement des paramétrisations physiques dans les modèles de climat. Ce projet pluriannuel initié à la fin de l'année 2002 s'est développé au cours de l'année 2003 avec notamment l'affectation d'un ingénieur de Météo-France à l'IPSL/LMD. Les premières actions consistent à mettre en place un outil de modélisation unidimensionnel destiné à évaluer les schémas de paramétrisation à partir de différents jeux de données expérimentaux. L'inventaire des cas disponibles permettra de définir les expériences les mieux adaptées pour les études d'intérêt commun. Les développements possibles de paramétrisations communes ont été recensés. Le travail qui sera mené dans les prochaines années devrait voir une convergence entre les deux modèles pour les modules traitant le rayonnement et les ondes. Les paramétrisations de couche limite, convection et nuages continueront dans un premier temps à être développés dans chaque groupe, en veillant à développer des interfaces rendant les paramétrisations facilement adaptables d'un modèle à l'autre. Ces développements constituent une base pour l'évolution des modèles et la préparation des jeux de scénarios suivants.

Les réunions de travail du 14/03/2003 et du 2/12/2003 ont permis de définir et de préciser le cadre, les objectifs et la méthode de travail. Il a été décidé de se concentrer dans un premier temps sur une version 1D commune et d'analyser les deux physiques sur un ensemble choisi de cas test. Trois blocs ont été bien identifiés, « onde », « rayonnement » et « couche limite-nuage-convection ». La modularité entre les ces blocs doit être défini, ce qui demande d'analyser en détail le couplage entre ces trois blocs et le module dynamique dans les deux modèles, en portant une attention particulière aux problèmes de conservation (eau, énergie...). La réunion du 11/06/2004 a permis de commencer à travailler sur ce dernier point. Il a également été décidé de commencer un travail sur la partie radiative à travers une interface commune avec les codes radiatifs. Les résultats concrets sont les suivants:

- modification de la version 1D d'Arpège pour l'interfacer avec la physique de LMDZ. Validation des résultats.
- dans ce cadre, début de comparaison et d'analyse des résultats pour une configuration Toga COARE
- adaptation de cette version 1D pour pouvoir ne réaliser que les calculs radiatifs. Introduction de profils atmosphériques standards et réponse en commun à l'exercice d'intercomparaison des codes radiatifs dans le cadre du prochain rapport du GIEC.

En conclusion, l'ensembles des activités coordonnées pas le pôle de modélisation ces dernières années ont permis de mieux identifier un projet inter-laboratoire sur l'étude du changement climatique et de fédérer les développements et besoins importants autour des différents modèles du système climatique de l'IPSL. Les études autour des cycles biogéochimiques et les développements de modèles associés sont en plein essor. La composante climatique a connu une période plus difficile avec le développement du nouveau modèle de l'IPSL, qui a démarré dans une période de sous-effectif important, tant au niveau du support en ingénierie qu'au niveau du nombre de chercheurs impliqués dans le développement. La nouvelle version du modèle a des performances très honorables et le travail de cette dernière année montre qu'une nouvelle dynamique scientifique est en train de se mettre en place.

Références

Liste non exhaustive, restreinte aux études majeures répertoriées dans ce bilan. Les informations complémentaires figures dans les documents bilans et prospective des différents laboratoires.

- Aumont O, Maier-Reimer E, Blain S, et al. An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES 17 (2): Art. No. 1060 JUN 4 2003
- Bauer, S., Y. Balkanski, M. Schulz, D. A. Hauglustaine, et F. Dentener, Heterogeneous chemistry on mineral aerosol surfaces : a global modelling study on the influence on tropospheric ozone chemistry and comparison to observations, *J. Geophys. Res.*, 109, D02304, doi:10.1029/2003JD003868, 2004.
- Bonasoni, P., P. Cristofanelli, F. Calzolari, U. Bonafè, F. Evangelisti, A. Stohl, R. van Dingenen, T. Colombo, Y. Balkanski, Aerosol-ozone correlations during dust transport episodes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, Vol. 4, pp 1201-1215, 3-8-2004.
- Bony, S., and K. A. Emanuel, 2001: A parameterization of the cloudiness associated with cumulus convection; evaluation using TOGA COARE data, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3158-3183.
- Bony, S., J. L. Dufresne, H. Le Treut, J. J. Morcrette, and C. Senior, 2004: On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Climate Dynamics*, 22, 71-86.
- Bopp L, Aumont O, Belviso S, et al. Potential impact of climate change on marine dimethyl sulfide emissions TELLUS SERIES B-CHEMICAL AND PHYSICAL METEOROLOGY 55 (1): 11-22 FEB 2003
- Bopp L, Boucher O, Aumont O, et al. Will marine dimethylsulfide emissions amplify or alleviate global warming? A model study CANADIAN JOURNAL OF FISHERIES AND AQUATIC SCIENCES 61 (5): 826-835 MAY 2004
- Bopp L, Kohfeld KE, Le Quere C, et al. Dust impact on marine biota and atmospheric CO2 during glacial periods PALEOCEANOGRAPHY 18 (2): Art. No. 1046 JUN 7 2003
- Braconnot, P. and O. Marti, 2003: Impact of precession on monsoon characteristics from coupled ocean atmosphere experiments: changes in Indian monsoon and Indian ocean climatology. *Marine Geology*, 201, 23-34.
- Braconnot, P., 2003: La modélisation du climat. Clefs CEA, 47, 16-22.
- Braconnot, P., M. F. Loutre, B. Dong, S. Joussaume, and P. Valdes, 2002: How the simulated change in monsoon at 6 ka BP is related to the simulation of the modern climate: results from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project. *Climate Dynamics*, 19, 107-121.
- Braconnot, P., P. Friedlingstein, and J. L. Dufresne, 2003: Le climat de demain: inquiétudes face à l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre. *Flux*, 223, 49-55.
- Brunner, D., J. Staehelin, H. L. Rogers, M. O. Köhler, J. A. Pyle, D. A. Hauglustaine, L. Jourdain, T. K. Berntsen, M. Gauss, I. S. A. Isaksen, E. Meijer, P. van Velthoven, G. Pitari, E. Mancini, V. Grewe, et R. Sausen, An evaluation of the performance of chemistry transport models by comparison with research aircraft observations. Part 1: concepts and overall model performance, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1606-1631, 2003.
- Cadule P., and M.A Foujols 2004 : technical note on MODIPSL (http://www.ipsl.jussieu.fr/~ioipsl/MODIPSL/top_page_title.html)
- Ciais P, Viovy N, Reichstein M, Granier A, Ogée J, Rambal S, Ourcival J-M, Bernhofer C, Grunwald T, Pilegaard K, Berbigier P, Vesala T, Aubinet M, Heinesch B, Loustau D, Seufert G, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Soussana J-F, Knohl A, Sanz M-J, Carrara A, Friend A, Chevallier F, Schulze E-D, Valentini R (submitted) An Unprecedented Reduction in the Primary Productivity of Europe during 2003 caused by Heat and Drought.
- Davey, M. K., M. Huddleston, K. R. S)perber, P. Braconnot, F. Bryan, D. Chen, A. Colman, C. Cooper, U. Cubasch, P. Delecluse, D. De Witt, L. Fairhead, G. Flato, C. Gordon, T. Hogan, M. Ji, M. Kimoto, A. Kitoh, T. Knutson, M. Latif, H. Le Treut, T. Li, S. Manabe, C. Mechoso, G. A. Meehl, J. Oberhuber, S. Power, E. Roeckner, L. Terray, A. Vintzileos, R. Voss, B. Wang, W. M. Washington, I. Yoshikawa, J.-Y. Yu, S. Yukimoto,

- and S. Zebiak, 2002: STOIC : a study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions. *Climate Dynamics*, 18, 403-420.
- de Noblet-Ducoudré N, Gervois S, Ciais P, Viovy N, Brisson N, Seguin B, Perrier A (in press) Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*
- de Rosnay P, Bruen J, Polcher J (2000) Sensitivity of surface fluxes to the number of layers in the soil model used in GCMs. *Geophysical Research Letters* 27 (20):3329-3332
- de Rosnay P, Polcher J, Bruen M, Laval K (2002) Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large scale land surface processes. *Journal of Geophysical Research* 107 (D11) doi:10.1029/2001JD
- de Rosnay P, Polcher J, Laval K, Sabre M (2003) Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Geophysical Research Letters* 30 (19) doi: 10.1029/2003GL018024
- Dufresne JL, Friedlingstein P, Berthelot M, et al. On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 29 (10): Art. No. 1405 MAY 15 2002
- Dutay JC, Jean-Baptiste P, Campin JM, et al. Evaluation of OCMIP-2 ocean models' deep circulation with mantle helium-3 *JOURNAL OF MARINE SYSTEMS* 48 (1-4): 15-36 JUL 2004
- Edwards D. P., L. K. Emmons, D. A. Hauglustaine, A. Chu, J. C. Gille, Y. J. Kaufman, G. Pétron, L. N. Yurganov, L. Giglio, M. N. Deeter, V. Yudin, D. C. Ziskin, J. Warner, J.-F. Lamarque, G. L. Francis, S. P. Ho, D. Mao, J. Chen, E. I. Grechko, et J. Drummon, Observations of carbon monoxide from the Terra satellite : northern hemisphere variability, *J. Geophys. Res.*, sous presse, 2004.
- Fichefet, T., and M.A. Morales Maqueda, 1997: Sensitivity of a global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics. *J. Geophys. Res.*, 102, 12,609-12,646.
- Folberth, G., D. A. Hauglustaine, P. Ciais, et J. Lathière, On the role of atmospheric chemistry in the global CO₂ budget, soumis à *Geophys. Res. Lett.*, 2004
- Foujols M.A, Lévy M., Aumont O. and Madec G., 2000: OPA 8.1 Tracer Model reference manual. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No, 45pp.
- Friedlingstein P, Bopp L, Ciais P, et al. Positive feedback between future climate change and the carbon cycle *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 28 (8): 1543-1546 APR 15 2001
- Friedlingstein P, Dufresne JL, Cox PM, et al How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *TELLUS SERIES B-CHEMICAL AND PHYSICAL METEOROLOGY* 55 (2): 692-700 APR 2003
- Gauss, M., G. Myhre, G. Pitari, M. J. Prather, I. S. A. Isaksen, G. P. Brasseur, F. Dentener, R. G. Derwent, D. A. Hauglustaine, L. W. Horowitz, D. J. Jacob, M. Johnson, K. Law, L. J. Mickley, J.-F. Muller, P.-H. Plantévin, J. A. Pyle, H. L. Rodgers, D. S. Stevenson, J. Sundet, M. van Weele, et O. Wild, Radiative forcing in the 21st century due to ozone changes in the troposphere and lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 108, D9, 10.10029, 2003.
- Generoso, S., Bréon, F.M. , Balkanski, Y. , Boucher, O., et Schulz, M, Improving the seasonal cycle and interannual variations of biomass burning aerosol sources, *Atmos. Chem. Physics*, 3, 1211-1222, 2003.
- Gervois S, de Noblet-Ducoudré N, Viovy N, Ciais P, Brisson N, Seguin B, Perrier A (in press) Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interactions*
- Goosse, H., and T. Fichefet, 1999: Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study. *J. Geophys. Res.*, 104, 23,337-23,355.
- Grandpeix, J.-Y., V. Phillips, and R. Tailleux: Improved mixing representation in emanuel's convection scheme, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, in press.
- Guibert, S., V. Matthias, M. Schulz, J. Bösenberg, R. Eixmann, I. Mattis, G. Pappalardo, M. R. Perrone, N. Spinelli, and G. Vaughan, The vertical distribution of aerosol over Europe - Synthesis of one year of EARLINET aerosol lidar measurements and aerosol transport modeling with LMDzT-INCA, submitted to *Atmospheric Environment*, 2004
- Hauglustaine, D. A., F. Hourdin, S. Walters, L. Jourdain, M.-A. Filiberti, J.-F. Lamarque, et E. A. Holland, Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model : description and background tropospheric chemistry evaluation, *J. Geophys. Res.*, 109, D04314, doi:10.1029/2003JD003957, 2004.
- Hauglustaine, D. A., F. Hourdin, S. Walters, L. Jourdain, M.-A. Filiberti, J.-F. Lamarque, et E. A. Holland, Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model : description and background tropospheric chemistry evaluation, *J. Geophys. Res.*, 109, D04314, doi:10.1029/2003JD003957, 2004.
- Hourdin, F., and A. Armengaud, 1999: Test of a hierarchy of finite-volume schemes for transport of trace species in an atmospheric general circulation model, *Mon. Wea. Rev.*, 127, 822-837.

- Hourdin, F., and J.-P. Issartel, 2000: Sub-surface nuclear tests monitoring through the CTBT xenon network, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2245-2248.
- Khodri, M., Y. Leclainche, G. Ramstein, P. Braconnot, O. Marti, and E. Cortijo, 2001: Simulating the amplification of orbital forcing by ocean feedbacks in the last glaciation. *Nature*, **410**, 570-574.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Polcher J, Prentice IC (in press) A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*
- Latif, M., K. Sperber, J. Arblaster, P. Braconnot, D. Chen, A. Colman, U. Cubasch, C. Cooper, P. Delecluse, D. DeWitt, L. Fairhead, G. Flato, T. Hogan, M. Ji, M. Kimoto, A. Kitoh, T. Knutson, H. Le Treut, T. Li, S. Manabe, O. Marti, C. Mechoso, G. Meehl, S. Power, E. Roeckner, J. Sirven, L. Terray, A. Vintzileos, R. Voss, B. Wang, W. Washington, I. Yoshikawa, J. Yu, and S. Zebiak, 2001: ENSIP: the El Nino simulation intercomparison project. *Climate Dynamics*, **18**, 255-276.
- Levy, M (2003) Mesoscale variability of phytoplankton and of new production : Impact of the large scale nutrient distribution, *J. Geophys. Res.*, Vol 108, C11, 3358 10.1029/2002JC001577
- Levy, M. and P. Klein (2004) Does the low frequency variability of mesoscale dynamics explain a part of the phytoplankton and zooplankton spectral variability ? *Proc. Royal Soc. Lon*, vol 460, Issue 2046, pp 1673-1683, DOI : 10.1098/rspa.2003.1219
- Lott, F., 1999: Alleviation of stationary biases in a gcm through a mountain drag parametrization scheme and a simple representation of mountain lift forces, *Monthly Weather Rev.*, **127**, 788-801.
- Lott, F., and M. Miller, 1997: A new sub-grid scale orographic drag parametrization: its formulation and testing., *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **123**, 101-128.
- Loustau, D, A. Bosc, A. Colin, H. Davi, C. François, E. Dufrêne, M. Déqué, E. Cloppet D. Arrouays, C. Le Bas Christine, N. Saby Nicolas, G. Pignard, N. Hamza A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy N, J. Ogée, F. Delage (sous presse): Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. *Tree Physiology*.
- Lunt D, de Noblet-Ducoudré N, Charbit S (on-line first) Effects of a melted greenland ice sheet on climate, vegetation, and the cryosphere. *Climate Dynamics*
- Madec, G., Delecluse P., Imbard M., and Lévy C., 1998: OPA 8.1 Ocean General Circulation Model reference manual. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No11, 91pp
- Morales P., M. T. Sykes, I. C. Prentice, P. Smith, B. Smith, H. Bugmann, B. Zierl, P. Friedlingstein, N. Viovy, S. Sabaté, A. Sánchez, E. Pla, C. A. Gracia, S. Sitch, A. Arneth, J. Ogée (soumis): Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes *Global change biology*
- Ngo-duc T, Laval K, Polcher J, Cazenave A (2004a, soumis) Contribution of continental water to sea level variations during the 1997-1998 ENSO event: comparison between AMIP simulations and Topex-Poséidon satellite data. *Journal of Geophysical Research*.
- Ngo-duc T, Polcher J, Laval K (2004b, soumis) A 53 year forcing data set for land-surface models. *Journal of Geophysical Research*.
- PRISM : Report Series: The IPSL_CM4 coupled model adaptation guide. Number 9 Marie-Estelle Demory <http://www.ipsl.jussieu.fr/~prisipl/Docs/PRISM-IPSLCM4.pdf>
- Quaas, J., O. Boucher, and F.-M. Bréon : Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and in the Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom (LMDZ) general circulation model *J. Geophys. Res.*, **109**, D08205, doi :10.1029/2003JD004317, 2004
- Rodgers KB, Aumont O, Madec G, et al. Radiocarbon as a thermocline proxy for the eastern equatorial Pacific *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* **31** (14): Art. No. L14314 JUL 30 2004
- Roelofs, G. J., A. S. Kentarchos, T. Trickl, A. Stohl, W. J. Collins, R. A. Crowther, D. A. Hauglustaine, A. Klonecki, K. S. Law, M. G. Lawrence, R. von Kuhlmann, et M. van Weele, Intercomparaison of tropospheric ozone models: ozone transports in a complex tropopause folding event, *J. Geophys. Res.*, **108**, D12, 10.1029, 2003.
- Santaren D, Peylin P, Viovy N, Ciais P (submitted) Optimizing a process based ecosystem model with eddy-covariance measurements of carbon dioxide, water and energy fluxes: a case study for a pine forest in southern France.
- Vérant S, Laval K, Polcher J, Castro M (2004) Sensitivity of the continental hydrological cycle to the spatial resolution over the Iberian Peninsula. *Journal of Hydrometeorology* **5** 265-283.