

# LMD **Z** info

la lettre des utilisateurs

du modèle de circulation générale atmosphérique

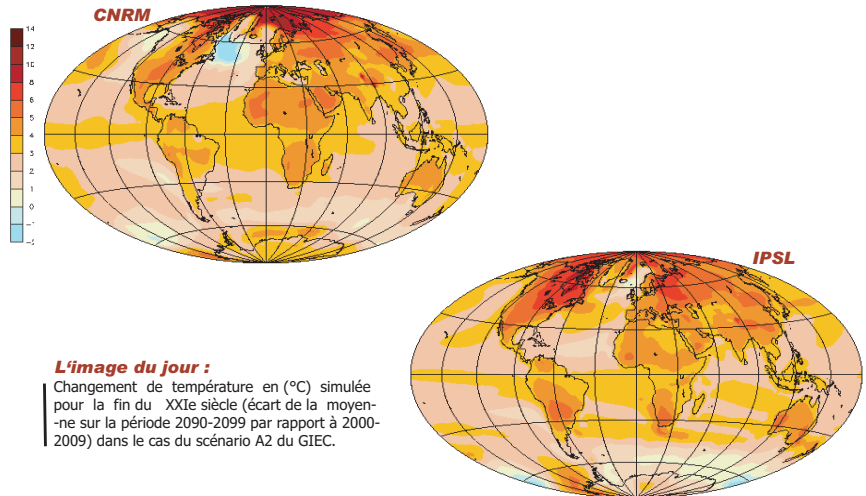
de l'Institut Pierre Simon Laplace

N° 6 Mars 2006

## Sommaire

1	Actualité	2
2	Evolutions du modèle et aspects informatiques	6
3	Applications climatiques	6
4	Etudes de processus et paramétrisations	9
5	Végétation - hydrologie	11
6	Dynamique - transport	14
7	Chimie - aérosols - climat	15
8	Climatologie - méthodes de validation	19
9	Les planètes	21
10	Le coin débat	21
	<i>Contacts et Informations</i>	

Réchauffement simulé par les modèles de climat de l'IPSL et du CNRM



**Editorial - Vous avez dit GIEC ?** Avant le tout récent exercice de simulation du changement climatique pour le **G**roupe d'**E**xperts **I**ntergouvernemental sur l'**E**volution du **C**limat, il existait un certain consensus dans la communauté sur le peu d'intérêt scientifique de l'exercice. Les "modélisateurs" impliqués eux-mêmes ne voyaient dans cet exercice fastidieux qu'un passage obligé pour pouvoir continuer à développer une recherche originale de pointe en modélisation du climat. L'état d'esprit a brusquement changé quand les simulations ont commencé à être rassemblées et distribuées sur un serveur. En quelques jours, c'est une pluie d'analyses multimodèles qui s'est abattue des quatre coins du globe ; soit autant de retours pour les équipes qui avaient développé les modèles et réalisé les simulations. Il apparaît clair aujourd'hui que ce rendez-vous sera un élément stimulant de la recherche sur le climat pour les prochaines années. Quelques enseignements à chaud : si les modèles couplés – dont les deux modèles français développés au CNRM et à l'IPSL – représentent plutôt mieux le climat actuel qu'il y a quelques années, la dispersion des réponses en termes de réchauffement global n'a pas décré. Les nuages, et notamment les nuages bas tropicaux, apparaissent comme un élément déterminant de cette dispersion. Ces résultats soulignent l'importance qu'il y a à continuer le travail sur la paramétrisation des processus nuageux, turbulents et convectifs, et à soutenir la petite communauté nationale structurée autour de ces aspects, dans le cadre des projets "AMMA" (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) et "physique commune".

F. H.

# 1 Actualité

## GIEC : simulations avec les deux modèles couplés français

Le 2 juin dernier, au siège du CNRS, à Paris, le CNRS, Météo-France et le CEA organisaient une conférence de presse pour présenter les nouveaux résultats des modèles français de simulation climatique. C'est Sylvie Joussaume, directrice de l'Insu, qui a accueilli les journalistes en soulignant la forte implication de la France dans l'effort international de recherche climatique coordonné par le GIEC. Puis Jean Jouzel, directeur de l'IPSL et vice-président du groupe scientifique du GIEC, a expliqué que les simulations climatiques dont on allait présenter les résultats avaient été réalisées par deux modèles couplés français : le modèle de l'IPSL et celui du CNRM. Ces simulations vont contribuer au 4ème rapport du GIEC, qui doit paraître en 2007. Jean Jouzel a rappelé le rôle du GIEC et son articulation avec la Convention sur le climat, organisation plus politique. Il a ensuite présenté une brève synthèse des connaissances actuelles sur le réchauffement climatique, en distinguant les certitudes et les incertitudes. Il a enfin recommandé l'action politique pour maîtriser les émissions de gaz à effet de serre et pour mettre en place les nécessaires mesures d'adaptation face au réchauffement.

C'est ensuite Éric Brun, directeur du CNRM, qui a pris la parole pour montrer dans quel contexte ont été entreprises ces simulations climatiques françaises : l'exercice international de simulation du climat destiné à préparer le 4ème rapport du GIEC rassemble 14 groupes de recherche représentant 10 pays (contre 8 groupes représentant 6 pays pour le précédent rapport, datant de 2001). Pour ces nouvelles simulations, le GIEC a recommandé de s'appuyer sur un certain nombre de scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols couvrant les XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles. Ces scénarios sont au nombre de 11 (figure 1), dont le scénario B1 dit "optimiste" (émissions faibles) et le scénario A2 dit "pessimiste" (émissions fortes).

Après avoir rappelé les principales différences entre les deux modèles français (résolution horizontale, paramétrisation des phénomènes d'échelle inférieure à la maille, traitement des équations), Éric Brun a insisté sur l'effort considérable consenti en

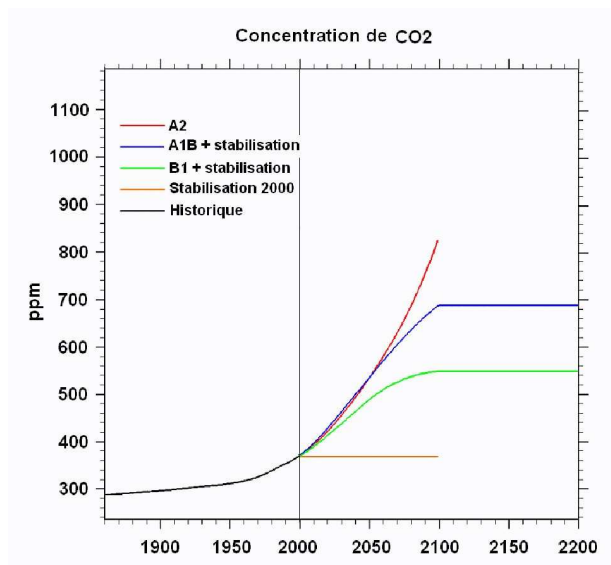


FIG. 1 – Les principaux scénarios d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) servant de base aux simulations climatiques réalisées pour le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC. Le scénario A2 est un scénario "pessimiste" privilégiant une croissance démographique et économique rapide. Le scénario B1 est un scénario "optimiste" privilégiant les préoccupations environnementales. Plusieurs scénarios envisagent aussi une stabilisation des concentrations en CO<sub>2</sub>.

France pour ces travaux : il a fallu simuler en tout 2000 années d'évolution du système Terre, ce qui a représenté 20 000 heures de calcul pour l'IPSL et 22 600 heures pour Météo-France. L'ensemble des résultats est archivé avec ceux des diverses simulations internationales dans une base de données située à Livermore (États-Unis) afin d'être analysé par des chercheurs du monde entier.

C'est alors Pascale Braconnot, responsable du pôle de modélisation du climat à l'IPSL, qui a présenté à l'auditoire les principaux résultats des simulations françaises. D'abord sur le paramètre le plus couramment étudié : la température moyenne de l'air à la surface du globe (figure 2). Le réchauffement moyen simulé pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle est compris entre 1,5 et 4 °C selon le scénario et le modèle utilisés, chiffres qui restent en accord avec les résultats publiés dans le précédent rapport du GIEC. La divergence entre les deux modèles, évidente sur certains scénarios, pourrait provenir de la différence de prise en compte des aérosols sulfatés<sup>1</sup>. En outre, les modèles montrent qu'au-delà de 2100, une éventuelle stabilisation des concentrations de dioxyde de carbone - préfigurant l'impact de mesures de réduction des émissions humaines - ne suffit pas à maintenir la température

<sup>1</sup>Voir rubrique 3 de ce numéro.

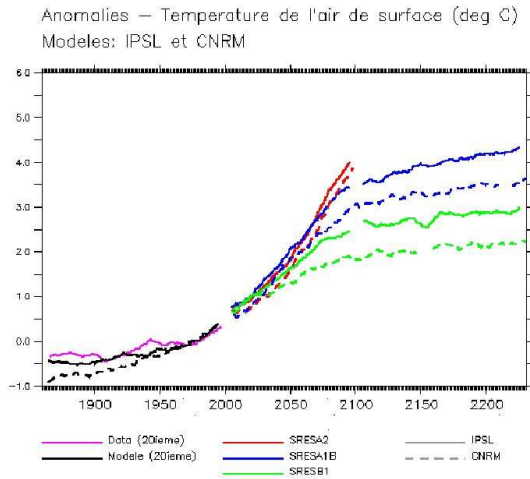


FIG. 2 – Évolution de la température moyenne de l'air à la surface du globe (écart à la normale) simulée par les modèles du CNRM (pointillés) et de l'IPSL (traits pleins) pour différents scénarios d'émissions.

de la planète, le système climatique continuant néanmoins à se réchauffer pendant au moins 150 ans.

P. Braconnot a ensuite présenté la répartition géographique des changements de température et de précipitations simulée par les deux modèles. Pour le scénario pessimiste, les deux modèles prévoient une répartition des changements de température similaire dans ses grands traits (Voir l'image du jour) : réchauffement maximal dans les régions arctiques, réchauffement plus important sur les continents que sur les océans... En revanche, les modèles divergent dans certains détails à échelle plus petite : ainsi, sur le nord-ouest de l'Atlantique, le modèle du CNRM simule un refroidissement localisé qui n'est pas reproduit par le modèle de l'IPSL. Cela montre que, malgré les progrès récents des modèles, des incertitudes demeurent sur le réchauffement dès lors qu'on se place à l'échelle d'un pays ou d'une région.

En ce qui concerne l'évolution des précipitations, la divergence entre modèles est plus importante. Ils s'accordent néanmoins pour simuler une intensification du cycle hydrologique, une aridification accrue des régions déjà arides (les régions subtropicales, par exemple) et une augmentation de la pluviosité dans les régions déjà arrosées (telles que les régions équatoriales).

Pour conclure son exposé, P. Braconnot a présenté le projet Escrime<sup>2</sup> qui vise à rassembler de nombreuses équipes françaises autour de l'analyse détaillée de ces simulations climatiques. Il s'agit,

<sup>2</sup>Le projet Escrime analyse les résultats des modèles de simulations français réalisés pour le GIEC

par exemple, de tenter de comprendre l'origine des différences entre les résultats du CNRM et de l'IPSL. Il s'agit aussi de raffiner l'analyse des résultats sur des questions comme le rôle des nuages, les connexions entre tropiques et latitudes moyennes, le comportement des régions de mousson ou encore l'influence du réchauffement climatique sur les événements extrêmes.

La séance s'est achevée sur de nombreuses questions et interviews de la part des journalistes présents. Retenons la question qui portait sur l'impact du réchauffement sur la pluviométrie dans le Sahel. Éric Brun a reconnu que c'était là un problème difficile : si l'on est à peu près certain que le Sahel connaîtra un réchauffement important, on ne sait pas vraiment comment y évolueront les précipitations. Celles-ci mettent en effet en jeu les mécanismes de la mousson et on ignore actuellement si les modèles climatiques sont capables de représenter ces mécanismes avec un réalisme suffisant. Cette question sera au coeur de la prochaine campagne AMMA sur la mousson africaine, dont les résultats permettront d'analyser en détail la réponse des modèles de climat.

**Didier Renaut**

**didier.renaut@meteo.fr**

**“Article paru initialement dans “La Météorologie”, n°50, août 2005, p. 2-4, et reproduit avec l'accord de la Société météorologique de France.”**

## GIEC : Inventaire des simulations réalisées avec le modèle couplé IPSL-CM4

Dans le cadre de la préparation du prochain rapport du GIEC (qui devrait être publié début 2007), l'IPSL a réalisé tout un ensemble de simulations, principalement avec le modèle couplé atmosphère-végétation-océan (cf. LMDZ-info N.5). Ces simulations suivent les recommandations du GIEC et leurs données sont mises à la disposition de la communauté scientifique. Les recommandations portent sur la réalisation des simulations, sur les forçages, sur la liste, les fréquences et le format d'enregistrement de nombreuses variables de sortie.

La seule mise au point de la version<sup>3</sup> IPCC du modèle aura, entre autres, consommé environ 30 000 heures de calcul sur les calculateurs vectoriels de l'IDRIS et du CEA/CCRT; elle aura vu se succéder une cinquantaine de versions différentes avant l'obtention de la version finale, en juillet 2004. La réalisation en elle-même des simulations IPCC s'est traduite par 3000 ans de simulations, soit également un peu plus de 30 000 heures de calcul sur 9 mois, ce grâce aux 6 processeurs dédiés accordés par l'IDRIS et le CEA/CCRT. Durant cette période de 9 mois, les modèles auront généré 35 To de données (70% à l'IDRIS, 30% au CEA/CCRT).

Au printemps 2005, la totalité des simulations requises a été réalisée (par ex. figure 3A et figure 3B). A noter cependant que les scénarios SRES n'ont pas démarré de la simulation 20<sup>e</sup> siècle distribuée à l'IPCC. Une erreur dans la lecture des forçages aérosols au cours de la décennie 1980-1989 a plongé le modèle dans un état un peu chaud durant cette période. La décennie suivante, si elle a permis de se ramener à un état moyen raisonnable, n'a pas corrigé complètement la perte de glace des années 80 (figure 3C) d'où une discontinuité visible dans les volumes de glace.

La liste des simulations réalisées dans ce cadre, avec rigoureusement les mêmes modèles, sont les suivantes :

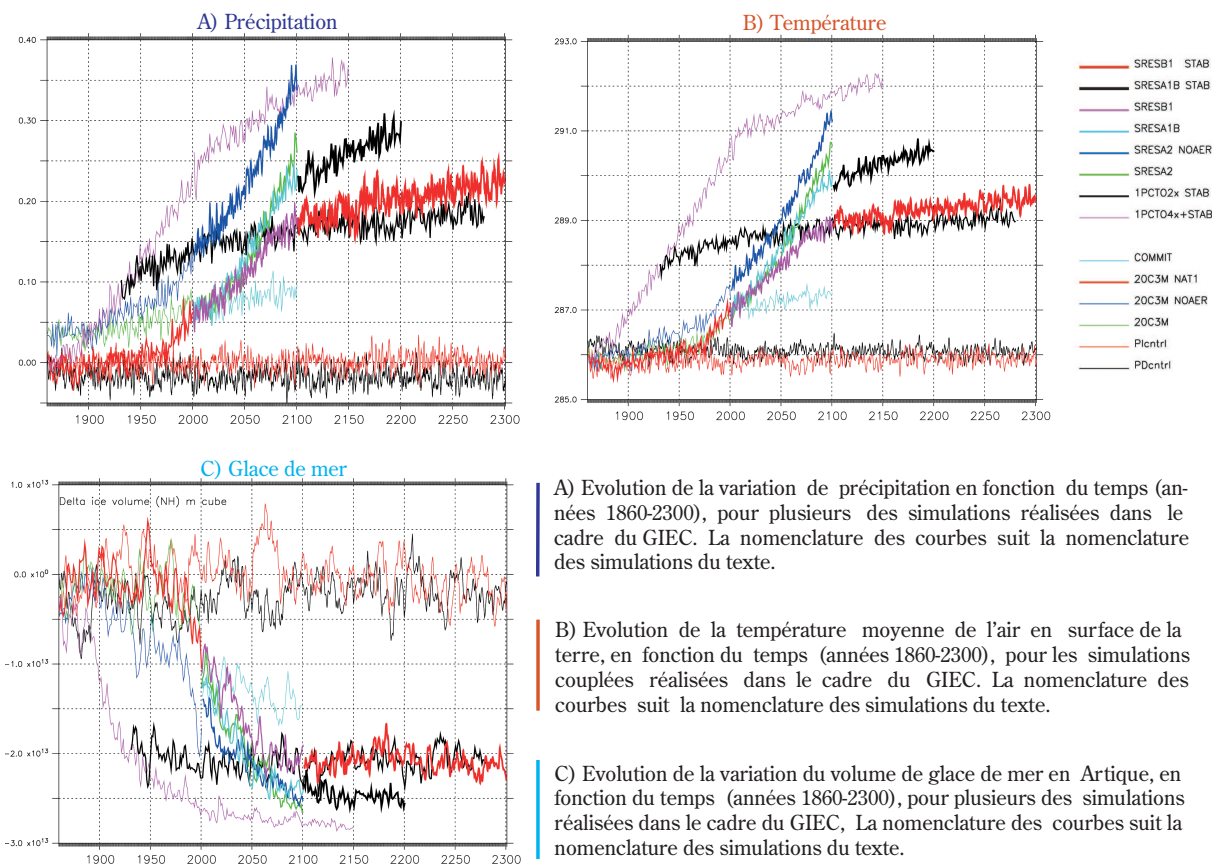
- ▶ Modèle atmosphérique forcé : ensemble de 6 membres de simulations AMIP (1979-2002)
- ▶ Modèle atmosphérique couplé à un "slab ocean" : simulation de contrôle et simulation 2xCO<sub>2</sub>, dans le

<sup>3</sup>Ont notamment participé au développement de ce modèle couplé : Sandrine Bony, Pascale Braconnot, Patrick Brockmann, Patricia Cadule, Arnaud Caubel, Nathalie de Noblet, Sébastien Denvil, Jean-Louis Dufresne, Jean-Yves Grandpeix, Laurent Fairhead, Marie-Alice Foujols, Pierre Friedlingstein, Frédéric Hourdin, Claire Levy, Gurvan Madec, Olivier Marti, Ionela Musat, Jan Polcher

cadre de CFMIP

- ▶ Modèle couplé IPSL-CM4 : *simulations de contrôle*
- **PIcntrl** : concentrations pré-industrielles des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés
- **PDcntrl** : idem avec les concentrations "actuelles" (1980)
- ▶ Modèle couplé IPSL-CM4 : *simulations CMIP*
- **1%to2x** : accroissement de CO<sub>2</sub> de 1% par an pendant 70 ans, puis 150 ans de stabilisation à 2xCO<sub>2</sub>
- **1%to4x** : accroissement de CO<sub>2</sub> de 1% par an pendant 140 ans, puis 150 ans de stabilisation à 4xCO<sub>2</sub>
- ▶ Modèle couplé IPSL-CM4 : *simulations 20<sup>e</sup> siècle*
- **20C3M** : simulations 1860-2000, avec variations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés
- **20C3M\_naer** : idem, mais avec aérosols sulfatés constant (valeurs pré-industrielles)
- **20C3M\_NAT1** : idem simulation 20C3M, mais avec variation de la constante solaire pour prendre en compte l'évolution de l'intensité du rayonnement solaire et des éruptions volcaniques
- ▶ Modèle couplé IPSL-CM4 : *simulations selon certains scenarii de l'IPCC*. Période 2000-2100 avec ensuite stabilisation éventuelle pendant 200 ans
- **SRESA2** : scénario SRES-A2, avec changement des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés
- **SRESA2\_naer** : idem, mais avec aérosols sulfatés constantes (valeurs préindustrielles)
- **SRESB1** : scénario SRES-B1
- **SRESA1B** : scénario SRES-A1B
- **COMMIT** : on maintient les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols constant et égales à leur valeur en l'an 2000
- **SRESB1-STAB** : stabilisation du scénario SRES-B1, on maintient les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols constantes et égales à leur valeur scénario en l'an 2100
- **SRESA1B-SRAB** : stabilisation du scénario SRES-A1B, on maintient les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols constantes et égales à leur valeur scénario en l'an 2100

La distribution de ces résultats via la base de données du PCMDI aura nécessité la mise en conformité des sorties netCDF avec les "spécifications" de l'IPCC, plus strictes que la convention-CF. La librairie CMOR (Climate Model Output Rewriter) développée au PCMDI a facilité cette réécriture. L'interpolation des résultats ORCA2-LIM sur une grille régulière s'est faite en utilisant la librairie SCRIP (Spherical Coordinate Remapping and Interpolation Package). Le choix a été fait d'utiliser l'interpolation bicubique pour les scalaires (points T), les composantes de vitesse (U,V,W) ont été projetées sur le point T avant l'interpolation.



A) Evolution de la variation de précipitation en fonction du temps (années 1860-2300), pour plusieurs des simulations réalisées dans le cadre du GIEC. La nomenclature des courbes suit la nomenclature des simulations du texte.

B) Evolution de la température moyenne de l'air en surface de la terre, en fonction du temps (années 1860-2300), pour les simulations couplées réalisées dans le cadre du GIEC. La nomenclature des courbes suit la nomenclature des simulations du texte.

C) Evolution de la variation du volume de glace de mer en Arctique, en fonction du temps (années 1860-2300), pour plusieurs des simulations réalisées dans le cadre du GIEC. La nomenclature des courbes suit la nomenclature des simulations du texte.

FIG. 3 – Résultat des simulations avec le modèle couplé IPSL-CM4 pour les scénarios du GIEC.

Des simulations du même type ont été réalisées par le CNRM et un projet d'analyse commune des résultats des deux jeux de simulations a été lancé sous le nom de projet ESCRIME.

Les résultats des simulations de l'IPSL sont accessibles via la page web du projet MC2 : [mc2.ipsl.jussieu.fr](http://mc2.ipsl.jussieu.fr). On y trouve pour chaque expérience les séries temporelles de nombreuses variables à différentes fréquences (hautes fréquences, c'est-à-dire toutes les six heures, fréquences journalières, mensuelles et annuelles); ainsi que le cycle saisonnier moyen sur 10 ans de tous "les fichiers histoires". Les fichiers sont stockés sur le serveur DODS local ou sur celui des centres de calculs (IDRIS/CEA) en fonction de leur taille.

Les résultats de ces simulations sont utilisés par un grand nombre d'études, aussi bien au niveau national qu'international. Les résultats de plusieurs de ces études seront présentés aux Ateliers Modélisation de l'atmosphère, à Toulouse, 18-20 janvier 2006.

Sébastien Denvil (IPSL)  
[Sebastien.Denvil@ipsl.jussieu.fr](mailto:Sebastien.Denvil@ipsl.jussieu.fr)  
 Abderrahmane Idelkadi (IPSL)  
[Abderramane.Idelkadi@ipsl.jussieu.fr](mailto:Abderramane.Idelkadi@ipsl.jussieu.fr)

Jean-Louis Dufresne (LMD)  
[Jean-Louis.Dufresne@lmd.jussieu.fr](mailto:Jean-Louis.Dufresne@lmd.jussieu.fr)  
 Pierre Friedlingstein (LSCE)  
[pierre@lsce.saclay.cea.fr](mailto:pierre@lsce.saclay.cea.fr)

## Le mot du Directeur de l'IPSL

Même si je n'ai pas moi-même contribué à la réalisation des simulations couplées réalisées dans le cadre des exercices recommandés par le GIEC en vue de son 4<sup>e</sup> rapport, je me permets de partager avec vous le plaisir de cette réussite à laquelle, nombreux, vous avez contribué.

Je me souviens d'une discussion que nous avons eue avec Gérard au moment de la sortie du précédent rapport et de notre déception de ne pas voir les modèles français y figurer en très bonne place. Nous nous étions promis que les choses iraient mieux en 2007. Ce défi, c'est formidable que vous l'ayez réalisé. Et j'apprécie beaucoup l'éditorial de ce numéro; le pari que nous faisons alors de l'intérêt scientifique d'une intercomparaison, bien conduite, de modèles climatique n'était finalement pas complètement idiot.

Un brin de fierté, vous ne m'en voudrez pas trop ... Fierté, vis à vis de la qualité des résultats que vous avez obtenus; et au-delà des simulations "obligatoires" de toutes les autres qui ont été menées à bien. Fierté, à l'avance, des publications qui dans les prochains mois vont s'appuyer sur cet ensemble de simulations. Fierté également de cet esprit de collaboration qui progressivement s'est mis en place au sein du Pôle de Modélisation du Climat, et au-delà avec nos collègues du CNRM. Fierté enfin de votre implication très forte dans le processus de rédaction et de revue de ce prochain rapport scientifique du GIEC qui devrait être approuvé à Paris en janvier 2007

Un grand merci à chacun d'entre vous.

**Jean Jouzel**  
Jean.Jouzel@ipsl.jussieu.fr

## 2 Evolutions du modèle et aspects informatiques

### LMDZ retrouve de sa souplesse avec les compilateurs GNU

Avec l'introduction de Fortran 90 dans le code LMDZ, une certaine souplesse de travail avait été malheureusement perdue puisque un compilateur fortran90, est nécessaire et que ces derniers étaient jusqu'à présent payants. Cette souplesse est maintenant retrouvée grâce à l'arrivée à maturité du compilateur fortran 90 GNU, g95. Des modifications mineures apportées au code vous permettent maintenant, après avoir installé ce compilateur sur votre PC sous Linux, de compiler NetCDF, IOIPSL et LMDZ4 avec ORCHIDEE (merci à Martial Mancip) et donc de faire tourner le modèle sur votre PC où que vous soyez dans le monde à quelque distance d'un compilateur payant que vous soyez. Une version "EXPORT" de LMDZ comprenant ce qu'il faut pour installer LMDZ sur un PC/Linux avec g95 est en préparation. Vous pouvez vous adresser à moi pour toutes informations supplémentaires et obtenir un patch permettant d'installer LMDZ4OR sous Linux/g95.

Le site de g95 : <http://g95.sourceforge.net/>

**Laurent Fairhead (LMD)**  
Laurent.Fairhead@lmd.jussieu.fr

## 3 Applications climatiques

### Bilan de masse en surface de l'Antarctique, présent et futur

Dans le cadre de divers programmes nationaux (ACI) et internationaux (ENSEMBLES), nous avons proposé de faire de la régionalisation des simulations IPCC de l'IPSL sur l'Antarctique, avec un intérêt particulier pour le bilan de masse en surface (en gros, précipitation neigeuse moins évaporation moins fonte, plus l'eau de fonte et la pluie qui peuvent regeler près de la surface). C'est fait ! Il s'agit de simulations avec LMDZ4 et un zoom sur l'Antarctique (144x108, facteur 3 en latitude, on arrive à 60 km environ; en longitude, la résolution est assez élevée de toutes façons car on est près du pôle). Nous avons utilisé, pour prescrire les températures de surface de l'océan et la glace de mer, les résultats des simulations 20CM3 (1980 à 2000) et SRESA1B (2080 à 2100) d'IPSL-CM4, directement, sans passer par une méthode d'anomalies par rapport aux observations du présent, puisque le modèle couplé a une climatologie tout à fait honorable.

Un premier aspect de notre travail consistait à évaluer le bilan de masse simulé pour le présent. Dans des simulations avec des températures observées, le modèle s'en sort très bien. Dans les simulations avec les températures de l'océan issues des simulations couplées (donc les simulations qui nous intéressent ici), les biais sont, sans surprise, plus forts, mais ils restent acceptables, d'autant plus qu'un grand problème lors de l'évaluation de la performance des modèles en Antarctique est que les données sont parfois aussi douteuses que les modèles, et que la variabilité du bilan de masse à petite échelle spatiale est énorme.

La figure 4 montre le bilan de masse en surface simulé par LMDZ4 pour le présent. Le bilan de masse en surface, intégré sur la calotte antarctique entière, est de 157 kg/m<sup>2</sup>/an, ce qui est en bon accord avec les estimations disponibles. Pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle, le bilan de masse en surface intégré est de 175 kg/m<sup>2</sup>/an. La raison est une augmentation de la précipitation suite au réchauffement; dans les deux simulations (présent et futur), la perte de masse due à la fonte est négligeable (tout comme actuellement dans la réalité). La figure 5 montre le rapport des précipitations moyennes annuelles entre les deux simulations (fin du 21<sup>e</sup> siècle par rapport à la fin du

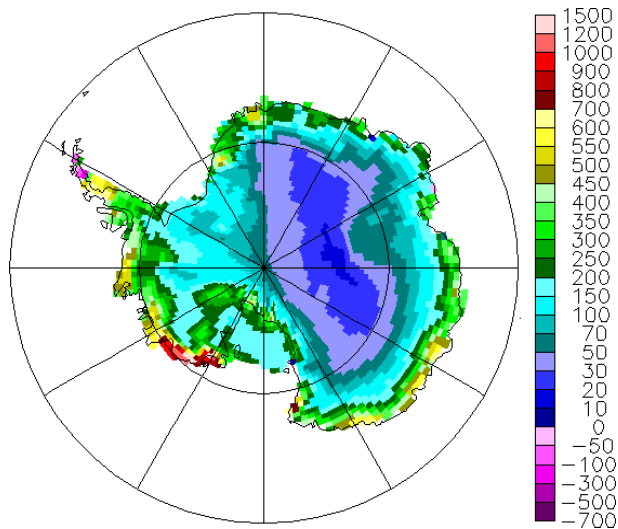


FIG. 4 – Bilan de masse en surface (en  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{an}$ ) simulé par LMDZ4.

20<sup>e</sup> siècle). On voit des différences régionales assez marquées. Dans certaines régions, on prévoit même une réduction de la précipitation. La raison est une augmentation de la glace de mer dans les simulations couplées, elle-même due à une modification de la circulation atmosphérique dans l’océan austral (renforcement du gradient latitudinal de pression de surface au-dessus de l’océan austral, cohérent avec des tendances observées récentes).

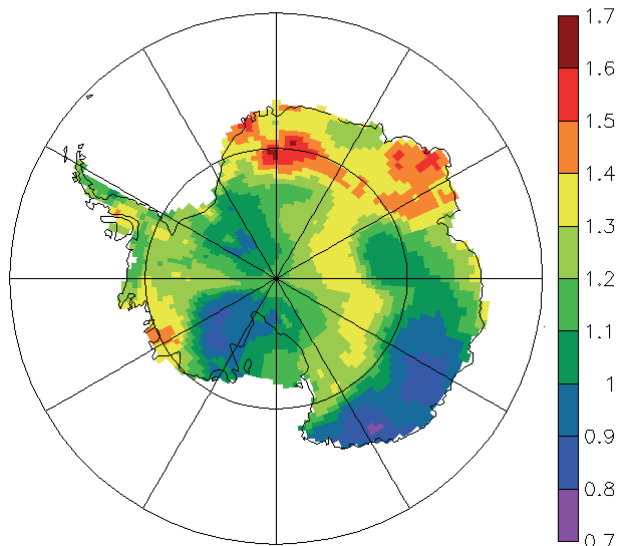


FIG. 5 – Rapport des précipitations moyennes annuelles : fin du 21<sup>e</sup> siècle par rapport à la fin du 20<sup>e</sup> siècle.

Malheureusement, nous venons de constater que ces simulations ont été faites avec un relief artificiellement lissé. C’est dommage. On pensait tourner avec un relief à 60 km, mais en réalité, le relief de LMDZ4 est passé par un filtre en moyenne glissante (si si ! Et, sauf erreur de notre part, il y a ça dans vos simulations aussi !), après avoir été méticuleusement calculé à la bonne résolution... On a évidemment tout de suite lancé des simulations sans lissage de la topographie. La suite au prochain numéro...

#### Référence :

Krinner, G., O. Magand, I. Simmonds, G. Genthon, J.-L. Dufresne,  
 Simulated Antarctic precipitation and surface mass balance at the end of the 20th and 21st centuries. Climate Dynamics, soumis.

Gerard Krinner (LGGE)

Gerhard.Krinner@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

### Effet des aérosols sulfatés sur le climat du 20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> siècle.

La représentation de l’effet indirect des aérosols utilisée pour les simulations de changement climatique est assez ancienne (Boucher et Lohmann, 1995). Elle est basée sur une loi empirique spécifiant la dépendance du nombre de gouttelettes de nuages par unité de volume en fonction de la masse d’aérosols présents. L’arrivée des observations POLDER nous avait permis de montrer que la dépendance du rayon effectif des nuages en fonction de la quantité d’aérosols était trop forte dans LMDZ, comparée aux données satellitales (Quaas et al. 2004).

Dans le modèle, la concentration des nuages en nombre de gouttelettes est diagnostiquée à partir de la masse des aérosols suivant Boucher et Lohmann (1995). Les deux paramètres dans cette formule diagnostique ont été ajustés pour reproduire la relation entre la taille des gouttelettes et l’indice des aérosols donnés par POLDER (Quaas et Boucher, 2005 ; Dufresne et al. 2005). C’est ce nouvel ajustement qui est inclus dans la version du modèle couplé de l’IPSL utilisée pour réaliser les scénarios de changement climatique, et qui donne des résultats très satisfaisants (cf. LMDZ-info N.5). En effet, la simulation incluant l’effet direct et le premier effet indirect des aérosols sulfatés reproduit beaucoup plus fidèlement l’évolution de la température moyenne de surface observée au cours

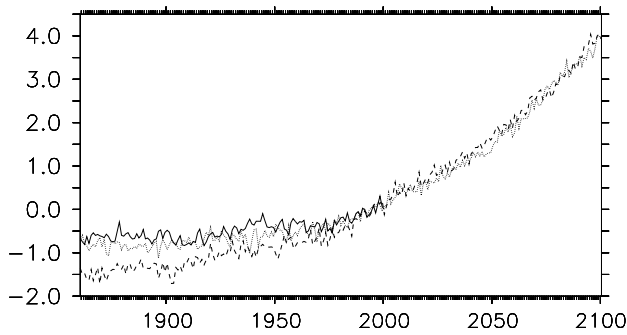


FIG. 6 – Évolution de la température moyenne de l'air en surface de la Terre, en fonction du temps (années 1860-2100), observée (trait continu) et simulée avec les aérosols sulfatés anthropiques (pointillé) ou avec les aérosols sulfatés maintenus à leur valeurs préindustrielles (tirets). Pour le futur, nous utilisons le scénario SRES-A2.

du 20<sup>e</sup> siècle que la simulation avec uniquement les gaz à effet de serre (figure 6). L'accroissement de température au 20<sup>e</sup> siècle aurait été plus important sans l'effet "refroidisseur" des aérosols sulfatés.

Nous avons également réalisé des simulations de changements climatiques futurs en prenant en compte ou en négligeant l'effet direct et le premier effet indirect des aérosols, et ce pour le scénario SRES-A2. On obtient alors le résultat apparemment paradoxal qui est que l'accroissement de température pendant le 21<sup>e</sup> siècle est peu dépendant du fait que l'on considère ou que l'on néglige les effets des aérosols sulfatés, (figure 6). Les principales raisons de cet effet moindre des aérosols sont les suivantes : la diminution de la quantité de sulfate émis, le fait que le CO<sub>2</sub> s'accumule dans l'atmosphère alors que les aérosols sont rapidement lessivés, et enfin la non linéarité de l'effet indirect des aérosols (leur forçage radiatif par unité de masse est réduit lorsque la masse augmente).

Si on regarde l'effet des aérosols sur la température à 2m, en moyenne globale et en moyenne zonale (figure 7), on observe que l'effet des aérosols augmente jusque vers les années 2020, puis reste à peu près constant. Le refroidissement est d'abord principalement situé au nord de l'hémisphère nord, puis s'étend progressivement à tout le globe en perdant en amplitude.

Nous avons ensuite utilisé les forçages radiatifs pour interpréter ces résultats et savoir s'ils pouvaient être étendus aux autres scénarios (Dufresne et al. 2005). Sur les trois périodes consécutives de 50 ans, 1945-1995, 1995-2045 et 2045-2095 (figure 8), on obtient des résultats très différents. Durant la période 1945-1995, l'accroissement (en valeur absolue) du forçage radiatif des aérosols

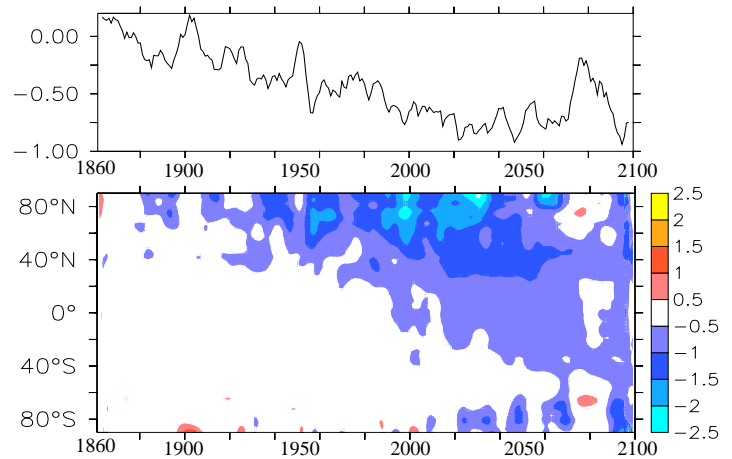


FIG. 7 – Évolution de l'anomalie de température de l'air près de la surface due aux aérosols sulfatés d'origine anthropique en fonction du temps (années 1860-2100), en moyenne globale (haut) et en moyenne zonale (bas). Cette anomalie est calculée par différence entre la simulation avec aérosols anthropiques et celle avec aérosols constants (époque pré-industrielle).

sulfatés compense à hauteur d'un tiers environ l'accroissement du forçage radiatif des gaz à effet de serre. Sur la période 1995-2045, le forçage radiatif des aérosols sulfatés change peu alors que celui des gaz à effet de serre continue à croître. Enfin sur la période 2045-2095, la forte diminution des émissions de sulfate réduit leur effet "refroidisseur"; on a alors une augmentation du forçage radiatif qui vient s'ajouter à l'accroissement du forçage par les gaz à effet de serre.

Ainsi, si l'on en croit cette modélisation simplifiée, l'effet des aérosols sulfatés représentent une bombe à retardement : ces aérosols ont masqué une partie importante de l'augmentation de température due à l'accroissement des gaz à effet de serre, et la réduction de leurs émissions, alors que leur durée de séjour dans l'atmosphère, devrait annihiler prochainement cet effet de refroidissement temporaire.

### Références :

Boucher, O., et U. Lohmann : The sulfate-CCN-cloud albedo effect - a sensitivity study with two general circulation models, *Tellus*, 47B, 281-300, 1995.

Dufresne, J-L, J. Quaas, O. Boucher, S. Denvil et L. Fairhead (2005) : Contrasts in the effects on climate of anthropogenic sulfate aerosols between the 20th and the 21st century, accepted in *Geophys. Res. Lett.*

Pham, M., O. Boucher, and D. Hauglustaine, Changes in atmospheric sulfur burdens and concen-



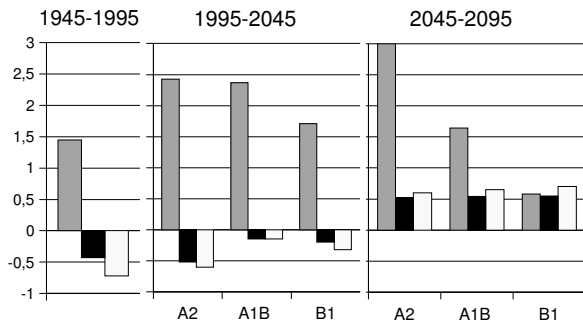


FIG. 8 – Changement du forçage radiatif pendant 3 périodes de 50 ans (1945-1995, 1995-2045, 2045-2095) dû aux gaz à effet de serre (gris) et aux aérosols sulfatés tel que calculés par le modèle couplé IPSL-CM4 (noir) ou par Pham et al. (2005) (blanc). Les changements du forçage radiatif sont calculés comme la différence entre les moyennes sur 10 ans, centrées sur chacune des limites de la période. Pour Le 21<sup>e</sup> siècle, les changements sont calculés pour les scénarios A2, A1B et B1.

trations and resulting radiative forcings under IPCC SRES emission scenarios for 1990-2100, *J. Geophys. Res.*, 110, D06112, doi:10.1029/2004JD005125, 2005.

Quaas, J., and O. Boucher (2005), Constraining the first aerosol indirect radiative forcing in the LMDZ GCM using POLDER and MODIS satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17814, doi :10.1029/2005GL023850.

Quaas, J., O. Boucher, et 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.

Jean-Louis DUFRESNE (LMD)  
jldufres@lmd.jussieu.fr

## 4 Etudes de processus et paramétrisations

En 2001, le schéma de convection de Kerry Emanuel (1991) a été choisi pour le modèle LMDZ. Cette paramétrisation tente de représenter d’une façon physiquement réaliste les processus d’entraînement et de mélange, les processus microphysiques nuageux et le contrôle de l’activité convective par la structure thermodynamique locale de la troposphère. Ce dernier point remplace la classique “fermeture” de la convection sur la convergence d’humidité en bas de la colonne convective.

Le choix de cette paramétrisation couplée au schéma de nuage de Bony et Emanuel (2001) à la place de celle de Tiedtke, a impliqué un grand nombre de tests et de réglages et a permis une nette amélioration de la climatologie du modèle (Hourdin et al., 2005). L’adoption de ce nouveau schéma de convection pour les aspects transport-chimie est un enjeu important, à la fois pour les simulations couplées chimie-climat, mais aussi parce que la meilleure représentation de la localisation et de l’intensité de la convection avec le schéma d’Emanuel peut avoir un impact positif important sur le transport des espèces chimiques.

En 2004, la composante traceurs a été introduite dans le schéma de convection d’Emanuel. Deux formulations (en échange ou en flux) de l’équation d’évolution des traceurs liée à la convection de Kerry Emanuel ont été intégrés dans la version distribuée du modèle LMDZ4.

Pour évaluer l’impact du changement de paramétrisation de la convection sur la composition atmosphérique, deux simulations de un an avec les schémas de Tiedtke et Emanuel en résolution 96x72x19 avec 45 traceurs et le modèle de chimie atmosphérique INCA en version CH<sub>4</sub> ont été réalisées. Pour des espèces comme le <sup>222</sup>Rn, émis uniquement par les continents avec un flux à peu près constant d’un atome par cm<sup>2</sup> et par seconde et qui décroît radioactivement avec une constante de quelques jours, le changement de schéma a une influence directe sur la distribution du radon.

Il a aussi un impact important sur des espèces à plus longue durée de vie comme le monoxyde de carbone ainsi que le montre la figure 9 (graphiques du bas), qui représente par ailleurs l’humidité relative et le chauffage convectif simulés avec les deux schémas (graphiques du haut). On constate que Emanuel chauffe plus haut que Tiedtke sur terre, c’est-à-dire au nord de 5°N,

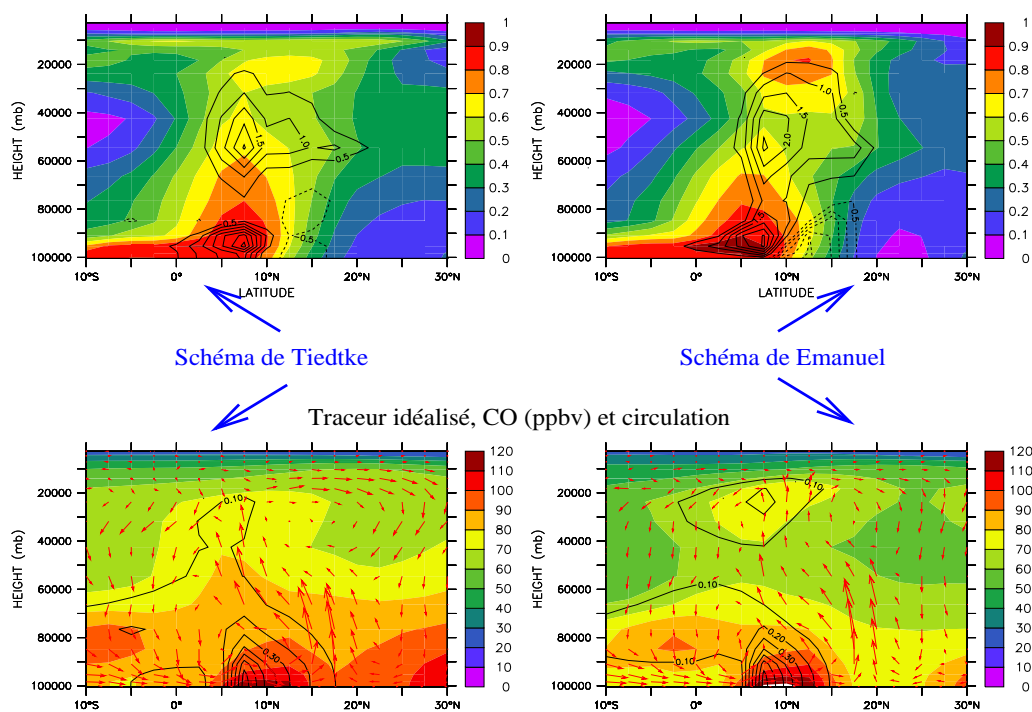


FIG. 9 – Coupe verticale moyennée entre 13W et 13E des distributions de l’humidité relative (couleurs) et des tendances de la température liées à la convection en K/j (contours noirs) sur les figures du haut. Coupe verticale moyennée entre 13W et 13E des distributions de CO en (ppmv) (couleurs), du traceur tangente hyperbolique émis en Afrique jusqu’à 10° N (contours) et vent méridien et vertical (vecteurs) sur les figures du bas. Les simulations correspondent à un mois de juillet climatologique. (à gauche : schéma de Tiedtke, à droite : schéma de Emanuel)

ce qui est cohérent avec les résultats obtenus à l’échelle globale. Les deux simulations présentent des caractéristiques très différentes mais on note une cohérence entre l’humidité relative, le chauffage et CO pour une même simulation. En particulier, il y a un étranglement des structures vers 500hPa avec Emanuel alors qu’avec Tiedtke la répartition verticale est plus homogène. Par ailleurs, le rôle de la convection sur la circulation grande échelle est particulièrement notable sur cette figure : les vents de mousson diffèrent d’un schéma à l’autre avec une poche de “recirculation” aux environs de 10° N plus présente dans le cas du schéma de Emanuel. Par ailleurs, la branche nord de la cellule de Hadley chez “Emanuel” est beaucoup plus réaliste que chez “Tiedtke”. Nous poursuivons l’analyse de ces simulations à l’aide de comparaisons entre résultats du modèle et séries de mesures (longues séries temporelles du Radon dans les îles de l’hémisphère sud, campagnes MOZAIC, données satellitaires MOPITT,...) et de simulations effectuées à l’aide de traceurs idéalisés.

Sur les graphiques du bas de la figure 9 nous montrons en particulier, superposée à la concentration de CO, la concentration d’un traceur idéalisé émis à chaque pas de temps en Afrique équatoriale. La source de ce traceur est telle que sa concentration

dans la couche limite reste supérieure à un profil vertical fixé (tangente hyperbolique décroissant de 1 à la surface à 0 au sommet de la couche limite). Avec une durée de vie de 5 jours, ce traceur “tangente hyperbolique” permet d’expliquer l’essentiel des différences obtenues pour le CO. On voit donc bien l’intérêt de tels traceurs pour analyser le transport. Nous avons l’intention de systématiser cette approche pour intercomparer les modèles de chimie-transport dans le cadre de la campagne “AMMA”.

#### Références :

Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, G. Krinner, and P. LeVan, The lmdz4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, *submitted to Climate Dynamics*, 2005.

Sandrine Bony and Kerry A. Emanuel, A Parameterization of the Cloudiness Associated with Cumulus Convection; Evaluation Using TOGA COARE Data, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58, 3158–3183, 2001

Kerry A. Emanuel, A Scheme for Representing

Marie-Angèle Filiberti (IPSL)  
Marie-Angèle.Filiberti@ipsl.jussieu.fr  
Jean-Yves Granpeix (LMD)  
jean-yves.grandpeix@lmd.jussieu.fr  
Frédéric Hourdin (LMD)  
Frederic.Hourdin@lmd.jussieu.fr  
Mai Pham (SA)  
mai.pham@aero.jussieu.fr  
Didier Hauglustaine (LSCE)  
Didier.Hauglustaine@cea.fr

## 5 Végétation - hydrologie

### Un froid numérique

Laurent Li s'intéressait aux extrêmes dans les simulations de l'IPCC; et il en a trouvé! Sur les régions arides et semi-arides dans les tropiques, on observe presque chaque mois une poignée de points de grille avec des températures minimales de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  voire  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dans des régions où on s'attend à des minima positifs (cf. panneaux de gauche de la figure 10). Ces minima sont obtenus plutôt l'été et en milieu de journée et correspondent à une chute de température très brusque sur 1 ou 2 pas de temps, accompagnée de pluies (contours sur la figure).

La cause de ces oscillations est la suivante. Dans des régions très sèches et surchauffées, il arrive pour une raison ou une autre qu'il se produise un tout petit peu de pluie ou condensation (typiquement  $1\text{ }\mu\text{m}$  d'eau). Cette pluie crée automatiquement un réservoir superficiel<sup>4</sup> dans le modèle de sol SE-

<sup>4</sup>Le schéma hydrologique (modèle dit de Choissel et décrit par Ducoudré et al., 1993, *Clim. Dyn.*, 6, 248-273) est un modèle à deux couches d'épaisseurs  $z_1$  et  $z_2$ . Chaque couche est considérée comme un saut d'eau. La couche du haut est par exemple constituée d'une hauteur de sol humide  $h_1$  surmontée d'une couche de sol sec d'épaisseur  $s_1 = z_1 - h_1$  (respectivement  $s_2 = z_2 - h_2$  pour la couche du fond). Quand il pleut, si le réservoir du haut n'existe pas, il est créé avec une hauteur de sol sec nulle ( $s_1 = 0$ ). Si ce réservoir existe, il se remplit par l'eau de pluie et se vide par évaporation et drainage vers la couche du fond. L'évaporation est calculée sous la forme  $E = \rho U_s (q_{\text{sat}}(T_s) - q_a) / (r_{\text{aero}} + r_{\text{sol}})$  où  $\rho$  est la masse volumique de l'air,  $q_{\text{sat}}(T_s)$  l'humidité à saturation à la température du sol  $T_s$  et  $q_a$  est l'humidité dans la première couche du modèle d'atmosphère. La résistance

CHIBA.<sup>5</sup> Sur ce point, la résistance à l'évaporation était jusque là très forte parce que l'eau était enfouie très profondément. Subitement, l'eau est à la surface et le modèle SECHIBA prédit alors une résistance nulle à l'évaporation (le sol évapore alors comme une surface liquide). La demande en évaporation étant alors gigantesque (en centaines de mm/jour), et la couche superficielle ne contenant presque pas d'eau, c'est la couche profonde qui évapore d'un coup plein d'eau. Cette eau produit alors une pluie plus forte et le tout explose ce qui explique la chute extrêmement brutale de température.

Ce problème avait en fait été identifié il y a longtemps par Nathalie De Noblet sur des versions précédentes de SECHIBA. Une solution avait été apportée qui consistait à appeler deux fois une partie du schéma. Cette solution, qui avait le mérite d'éliminer les oscillations numériques, a été abandonnée par la suite pour des raisons inconnues. Une autre façon de résoudre le problème (à laquelle nous avons pensé avec Jean-Louis Dufresne) est de supposer que, jusqu'à une certaine quantité d'eau dans le réservoir de surface, on aura une partie de la surface sèche et une partie humide<sup>6</sup>. Cette solution qui demande très peu de codage permet d'améliorer à moindre frais les aberrations du modèle, comme on le voit sur la droite de la figure 10.

Depuis que le pôle de modélisation de l'IPSL s'est attaqué au développement de ce nouveau modèle, un certain nombre de problèmes ont été

aérodynamique  $r_{\text{aero}} = 1 / (C_d \|\mathbf{v}\|)$  (où  $C_d$  est le coefficient de frottement en surface et  $\|\mathbf{v}\|$  le module de la vitesse du vent dans la première couche du modèle atmosphérique) et la résistance de la végétation  $r_{\text{sol}}$  sont appliquées en série. Dans le cas du sol nu (qui est en cause dans les oscillations numériques), on prend  $r_{\text{sol}} = C_{\text{sol}} \times s$  où  $s$  est la hauteur de sol sec sous la surface et  $C_{\text{sol}}$  correspond à la résistance de sol par mètre de sol sec. Cette hauteur est égale à  $s_1$  si la couche du haut existe et  $s_2$  sinon. Le paramètre  $U_s$  avait été introduit à l'origine pour permettre de calculer proprement l'humidité relative du sol nu. Par la suite, il a été réinterprété pour les couverts végétaux censé représenter la disponibilité de l'eau pour les plantes au travers des racines. Cette "Uptake function" est alors calculé comme  $U_s = e^{-ks}$ . Dans ce cas, le  $r_{\text{sol}}$  est remplacé par une résistance à l'évaporation des feuilles ou stomates et  $U_s$  représente la difficulté à aller puiser l'eau en profondeur. Le paramètre  $k$  dépend du "profil" racinaire ( $k$  est par exemple plus grand pour l'herbe que pour les arbres). À noter que dans la description originale de Ducoudré et al. (1993),  $U_s$  est en facteur de  $q_{\text{sat}}(T_s)$  plutôt que de  $q_{\text{sat}}(T_s) - q_a$ .

<sup>5</sup>Schématisation des EChanges Hydriques à l'Interface Biosphère - Atmosphère, composante hydrologique du modèle ORCHIDEE.

<sup>6</sup>Dans la solution proposée ici, on détermine alors une fraction  $\lambda = \min(h_1/z_{1\text{min}}, 1)$  (où  $z_{1\text{min}}$  est une profondeur minimum pour l'humidification) qu'on utilise pour pondérer l'évaporation de la première couche et de la couche de fond. On prend alors  $r_{\text{sol}} = C_{\text{sol}} [\lambda s_1 + (1 - \lambda)(z_1 + s_2)]$  et  $U_s = \lambda \exp(-ks_1) + (1 - \lambda) \exp(z_1 + s_2)$ . Cette pondération linéaire des coefficients n'est pas justifiée physiquement mais suffit à assurer une transition continue et douce pour des valeurs très faibles de l'humidité du sol.

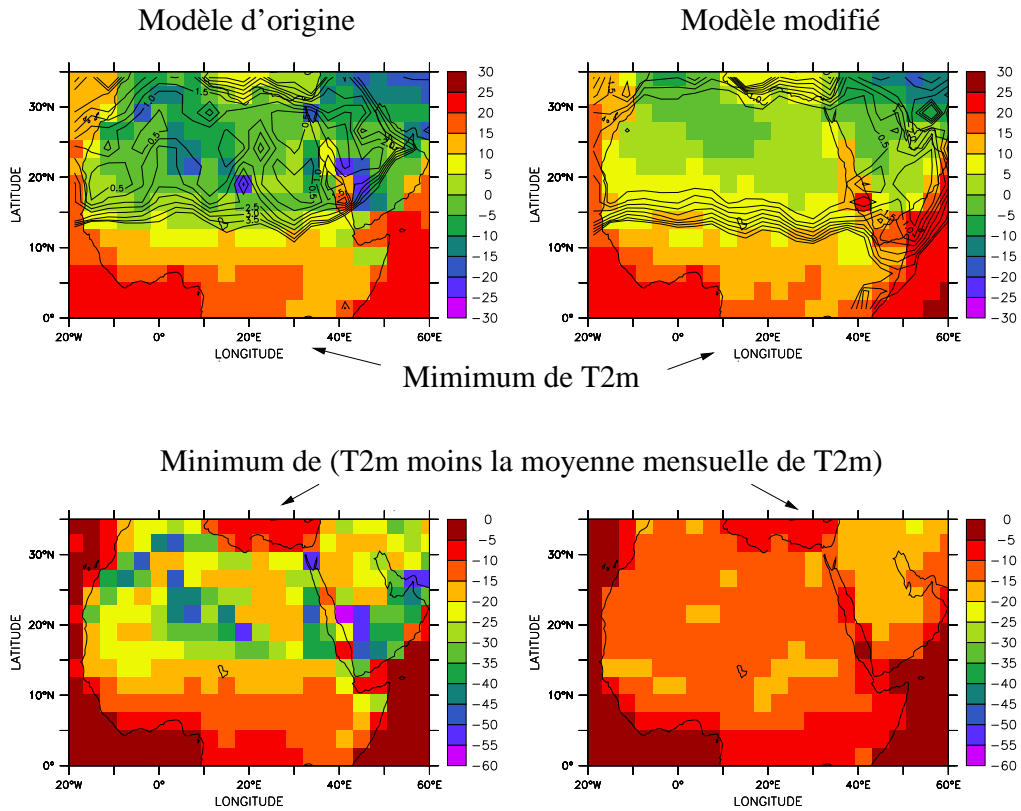


FIG. 10 – Diagnostics concernant les oscillations de la température à 2m dans le modèle ancien (simulation AMIP effectuée par Ionela Musat) et dans le modèle modifié. En haut, on montre le minimum de la température à 2m observé sur 3 ans de simulations (Celsius). Les contours correspondent au maximum des précipitations mensuelles avec des contours espacés de 0,5 entre 0 et 4 mm/jour. On voit que les minima de températures souvent inférieurs à 10 degrés sont associés à des précipitations mensuelles pouvant dépasser 0,5 ou 1 mm/jour. Pour mieux isoler le problème numérique, on montre le minimum, sur les 3x12 mois de la simulation, de la différence entre la température minimum sur le mois et la température moyenne du même mois. On voit que les oscillations numériques produisent occasionnellement des températures jusqu'à 50 degrés plus froides que les températures moyennes. Avec la version modifiée (à droite), les minima de températures sont essentiellement positifs sur le Sahara et les pluies mensuelles toujours inférieures à 0,5 mm/jour.

rencontrés avec le modèle SECHIBA. Certains ont été résolus par Pascale Braconnot, Jean-Louis Dufresne, et Pierre Friedlingstein (problème de cohérence des coefficients de frottement entre l'atmosphère et la surface, erreur dans l'écriture du schéma implicite, dépendance en température du LAI, ...) mais, faute d'une volonté suffisante, de nombreux points d'ombre ont subsisté. Au delà du problème décrit ci-dessus, on a découvert un bug potentiel sur la résistance structurelle, dans la version `OK_CO2_STOMATE=y`, (potentiel car il pourrait encore ne s'agir que d'un problème de diagnostic), des inquiétudes sur l'interception qui représente en moyenne plus de 50% de l'évaporation sur les forêts tropicales, un biais chaud et sec sur les continents des moyennes latitudes l'été qui pourrait être corrigé par un ajustement du modèle de sol.

Pour essayer de franchir un cap, nous avons défini une version, minimale mais robuste, de SECHIBA. Les modifications apportées au code sont les suivantes : 1) Abandon de l'humidité relative ( $k = 0$ ) pour le sol nu. 2) Condensation nulle (pas de rosée) dans le cas où le réservoir d'interception a une hauteur nulle. 3) Suppression de la résistance structurelle de la végétation. 4) Introduction d'un paramètre ajustable en facteur de la résistance de la végétation. Ce paramètre, ainsi que  $C_{\text{sol}}$  pour les sols nus, sont remontés dans le fichier de configuration `orchidee.def`. Ceci permet d'avoir un contrôle indépendant sur l'efficacité d'évaporation du sol nu et sur celle des couverts végétaux. 5) Modification de la résistance du sol sec quand on s'approche d'un assèchement complet. Cette version a été testé avec LMDZ forcé par les températures

de surface de l’océan (Ionela Musat) ainsi que dans le modèle couplé IPSLCM4 (Sébastien Denvil). On montre sur la figure 11 pour 50 années de simulations et pour les mois d’été (Juin-Juillet-Août), la différence entre les valeurs maximale et minimale de la température à 2m. On retrouve bien que le modèle utilisé pour les simulations GIEC (au milieu) surestime largement cet écart par rapport aux réanalyses ERA40 (en haut) sur le nord de l’Afrique, l’Arabie Saoudite et le Pakistan. Les corrections apportées à SECHIBA corrigent bien ces défauts et améliorent en prime la comparaison sur beaucoup d’autres régions continentales.

Il serait souhaitable de tester exactement la même version d’ORCHIDEE en mode forcé sur les sites de mesures pour voir si on détériore beaucoup les résultats par rapport à la version standard. Pour la suite, la ré-inclusion (souhaitable) de certaines sophistications devra nécessairement passer à la fois par des tests de robustesse et par un réajustement du modèle climatique.

Frédéric Hourdin (LMD)  
Frederic.Hourdin@lmd.jussieu.fr

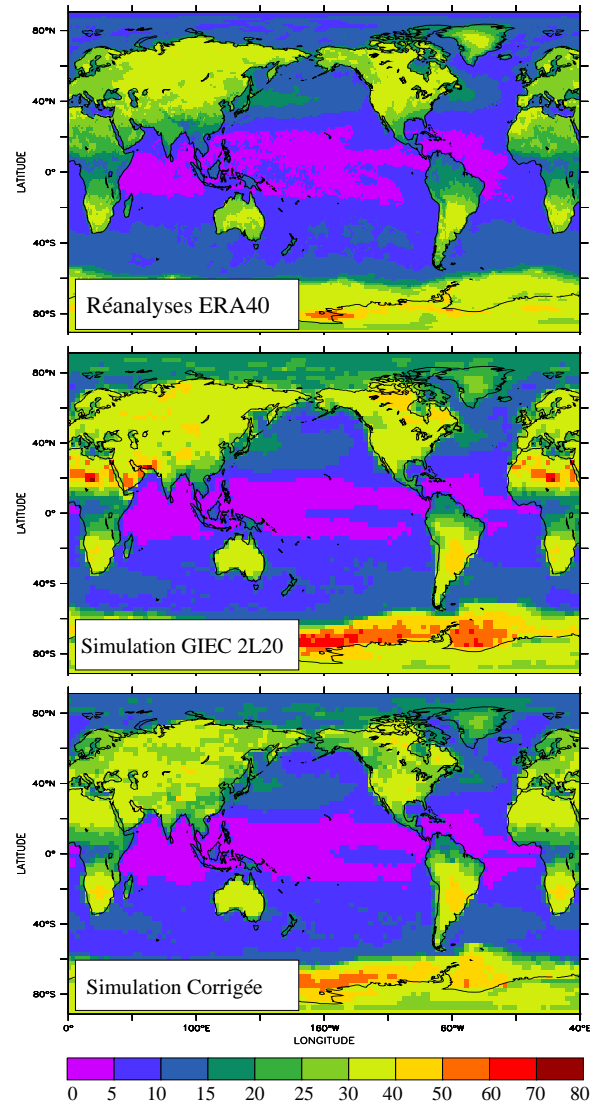


FIG. 11 – Comparaison des différences, sur la période considérée, entre les valeurs maximales et minimales des écarts maximaux de température à 2m pendant la période Juin-Juillet-Août, obtenues pour les réanalyses ERA40 (en haut) et avec le modèle couplé IPSLCM sur 50 ans pour une simulation effectuée pour le GIEC (2L20, au milieu) et pour une simulation avec ORCHIDEE corrigé (en bas). Les simulations et les diagnostics ont été réalisés par Sébastien Denvil.

## 6 Dynamique - transport

### Analyse de la vapeur d'eau dans la troposphère libre tropicale avec LMDZ en mode guidé

La vapeur d'eau troposphérique joue un rôle important dans le climat tropical à travers deux mécanismes principaux. Radiativement, l'humidité est un gaz à effet de serre qui est impliqué dans une boucle de rétroaction positive forte. En particulier, la sécheresse des zones de subsidences à grande échelle apparaît comme un élément clé d'une bonne simulation climatique et de son évolution. Thermodynamiquement, l'humidité de la troposphère libre contrôle l'inhibition convective et est impliquée dans les processus de contrôle du développement vertical des nuages à travers l'entraînement d'air environnemental dans la colonne convective. La bonne représentation de la vapeur d'eau dans les MCG comme LMDZ est un important enjeu. La qualité de sa représentation dans le modèle dépend à la fois des schémas physiques (efficacité des précipitations, développement vertical et niveau de saturation,...) mais aussi des schémas d'advection qui transportent ce gaz d'une maille à l'autre. On présente ici un diagnostic orienté "vapeur d'eau", où l'on a testé certaines options, essentiellement numériques, du modèle LMDZ. On a utilisé le modèle en mode transport, guidé par la température et le vent d'ECMWF, afin de s'affranchir au maximum des erreurs liées à la dynamique du modèle et d'offrir une évaluation du comportement des algorithmes de transport dans un environnement réaliste.

### Observations

Nous avons utilisé deux sources de données pour jouer le rôle de référence observée. D'une part, le produit NVAP (NASA water Vapor Project) qui consiste en une estimation de l'eau précipitable intégrée sur 3 couches (surface-700hPa, 700-500 hPa, 500-300hPa) à la résolution de 1° disponible quotidiennement. Ces données sont le produit de l'intégration de mesures des radiosondages et des satellites. Nous avons donc développé une petite interface pour projeter les résultats du modèle dans ces couches.

### Résultats préliminaires

Nous avons testé le modèle sous différentes configurations concernant les schémas d'advection : Van Leer (ordre 1), PPM<sup>7</sup> (ordre 2) monotone (pas d'extrema) ou semi monotone (pas de minima). On a aussi testé le modèle avec différentes constantes de rappel pour le guidage (6h, 1j, sans guidage) afin de savoir s'il était nécessaire de guider fortement le modèle pour établir un diagnostic. Intégrant sur la verticale les sorties du modèle, nous avons aussi testé avec 19 ou 29 niveaux verticaux. Une série de tests portant sur la variable Température nous ont amenés à porter une attention particulière au post-traitement des sorties du modèle (typiquement, interpolation verticale des variables des niveaux hybrides sur des niveaux de pression).

Les figures 12a à 11d comparent l'eau précipitable intégrée sur la couche 500-300 hPa et en moyenne journalière pour la référence NVAP, et pour le modèle avec 3 schémas différents sur la ceinture tropicale pendant l'été. On peut remarquer que le modèle LMDZ reproduit assez bien les mesures et en particulier les minima subtropicaux quelque soit le schéma de transport. Le schéma PPM défini positif, le plus coûteux, semble moins diffuser que les deux autres, et reproduit relativement bien les extrema. De même, la simulation avec 29 niveaux (non montrée) obtient de bien meilleurs résultats, car on diminue simultanément les effets de la diffusion verticale du modèle et celle liée à l'interpolation pour comparaison aux observations.

### En conclusion

Le modèle LMDZ permet de simuler très correctement la vapeur d'eau dans la troposphère libre si on le configure pour l'advection avec les schémas les plus précis et une constante de guidage de l'ordre de 6h. Ces résultats préliminaires doivent être confirmés dans le cadre de la campagne AMMA pour laquelle des intégrations similaires du modèle guidé seront confrontées aux observations récoltées lors de la campagne.

---

Marilyne Tombette (CEREA, ENPC)  
tombette@cereve.enpc.fr  
Rémy Roca (LMD)  
roca@lmd.ens.fr

---

<sup>7</sup>Piecewise Parabolic Method

TIME : 01-JUL-1999 00:00 to 31-JUL-1999 00:00 (averaged)

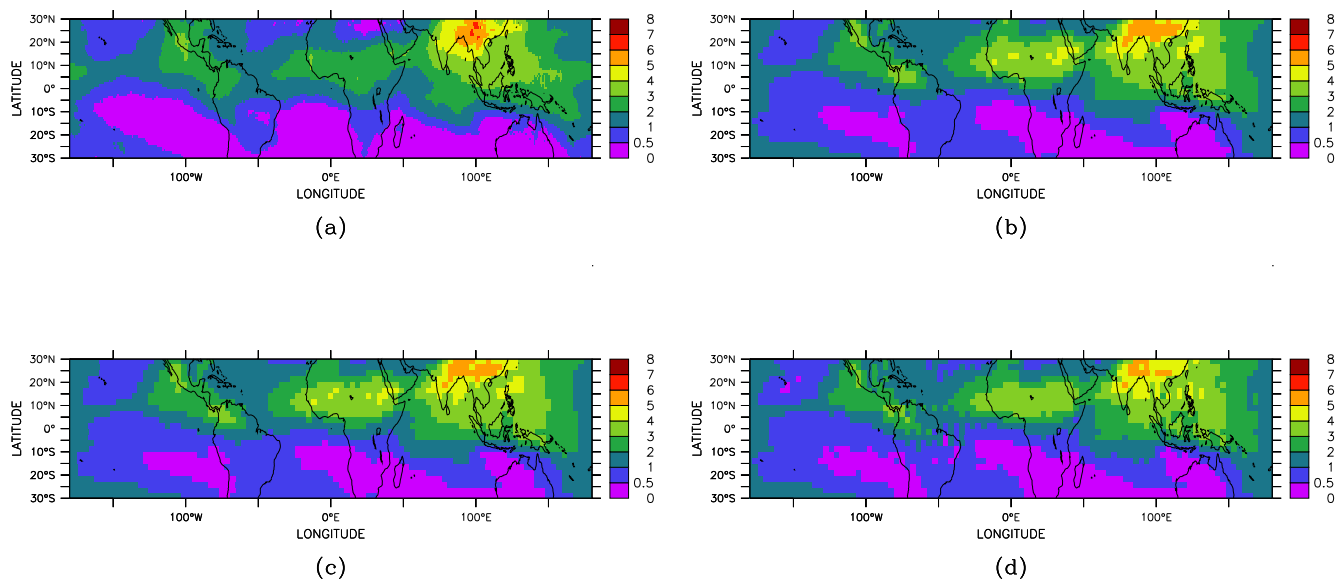


FIG. 12 – Eau précipitable (mm) intégrée de 500 à 300 hPa et moyennée sur Juillet 1999 pour (a) NVAP, (b) le modèle avec schéma de Van Leer, (c) le modèle avec Van Leer+PPM et (d) le modèle avec PPM défini positif. La constante de guidage est ici de 6h.

## 7 Chimie - aérosols - climat

### Prévisions de la composition chimique à l'échelle globale

Quelle sera la concentration d'ozone à la surface en France, en Europe, en Asie au cours des prochains jours? Combien de temps durera la tempête de poussières désertiques sur l'Europe? Comment évoluera la concentration de CO<sub>2</sub> anthropique au-dessus de la Sibérie cette semaine? Des questions que nous nous posons tous les jours, pas vous? Pour y répondre, nous avons mis en place au LSCE une plateforme fonctionnant en temps réel permettant, à partir du modèle LMDZ-INCA, de prévoir de 3 à 10 jours la composition de l'atmosphère globale en espèces chimiques gazeuses réactives, en aérosols et en dioxyde de carbone.

Outre l'intérêt que constitue le fait d'avoir chaque jour une prévision de l'ozone, des particules et des gaz à effet de serre de longue durée de vie sur toute l'atmosphère, cette chaîne de prévision de la composition chimique a également

d'autres objectifs plus spécifiques. D'une part, le modèle global permet de fournir, avec une résolution journalière, les conditions aux limites au modèle régional CHIMERE permettant de prévoir l'ozone et les aérosols en Europe et en France dans le cadre de PREV'AIR<sup>8</sup> Par ailleurs, les champs prédits par LMDZ-INCA peuvent être utilisés pour la préparation de campagnes de mesures comme YAK en Sibérie en 2005 ou AMMA dès janvier 2006.

Cette chaîne en temps réel a été mise en place au début de l'été 2005 dans le cadre du couplage de la version 4 de LMDZ et de la version 2 de INCA dans sa version simulant de manière détaillée la chimie de l'ozone troposphérique et de ses principaux précurseurs et des différents types d'aérosols. Pour cette première version de la plateforme temps réel, nous avons adopté une résolution standard de 3,75° en longitude et 2,5° en latitude. Une prochaine version permettra de passer à une résolution plus fine et proche de 1°x1°. Ce travail a été mené tambour battant par Anne Cozic et Sophie Szopa et orchestré par Didier Hauglustaine et Michael Schulz. Nous avons largement profité, pour mettre en place cette première version, de l'expérience déjà acquise au LMD pour les simulations climatiques en mode prévisionnel effectuées par Frédéric Hourdin et Laurent Fairhead. Grâce à l'opiniâtreté de Frédéric

<sup>8</sup>Prévision et observation de la qualité de l'air en France et en Europe.

Chevallier, deux chaînes fonctionnent en fait en parallèle. La première utilise les prévisions à 3 jours du NCEP et la seconde les prévisions sur 3 à 10 jours de l’ECMWF. L’utilisation de ces deux chaînes constitue un atout supplémentaire permettant de confronter les deux prévisions.

Une interface graphique a été mise au point permettant de visualiser rapidement, grâce à un site internet dédié, les distributions simulées pour les principales espèces gazeuses et particulaires dans le mode de prévision à 3 jours mais également d’accéder aux archives des jours précédents. Les distributions sont représentées à l’échelle globale, ainsi que pour des régions spécifiques comme l’Europe, l’Afrique de l’Ouest et l’Asie du Sud-Est. A titre d’exemple, la figure 13 montre la concentration de l’ozone à la surface simulée pour le 23 juillet 2005 à l’échelle globale et au-dessus de l’Europe lors d’un épisode de pollution survenu cet été. A partir de cartes satellitaires fournies par l’instrument MODIS à bord de EOS-TERRA et récupérées chaque jour sur le site de INCA, il est également possible de confronter les résultats du modèle avec les mesures. La figure 14 illustre par exemple une tempête de poussières désertiques au-dessus de l’Afrique du Nord simulée par LMDZ-INCA et vue par MODIS.

Bien sûr, il nous reste maintenant à évaluer a posteriori les résultats de nos prévisions de cet été et ce travail débutera très prochainement. Outre le passage à de plus hautes résolutions horizontale et verticale, nous envisageons à moyen terme d’inclure sur cette plateforme une prévision de la visibilité fort utile pour le transport aérien. Il est également prévu de présenter la colonne totale d’ozone, la dose de rayonnement UV reçue à la surface et de suivre l’évolution du trou d’ozone à partir de la version stratosphérique de LMDZ-INCA. Par ailleurs, des algorithmes d’assimilation de données sont également en cours d’intégration dans INCA et cette plateforme en temps réel sera utilisée dans le cadre de l’exploitation des données satellitaires de IASI/METOP pour la chimie ou de CALIPSO pour les aérosols. A suivre donc.

---

**Didier Hauglustaine (LSCE)**  
**Didier.Hauglustaine@cea.fr**  
**Anne Cozic (LSCE)**  
**anne.cozic@cea.fr**  
**Sophie Szopa (LSCE)**  
**sophie.szopa@cea.fr**  
**Michael Schulz (LSCE)**  
**michael.schulz@cea.fr**

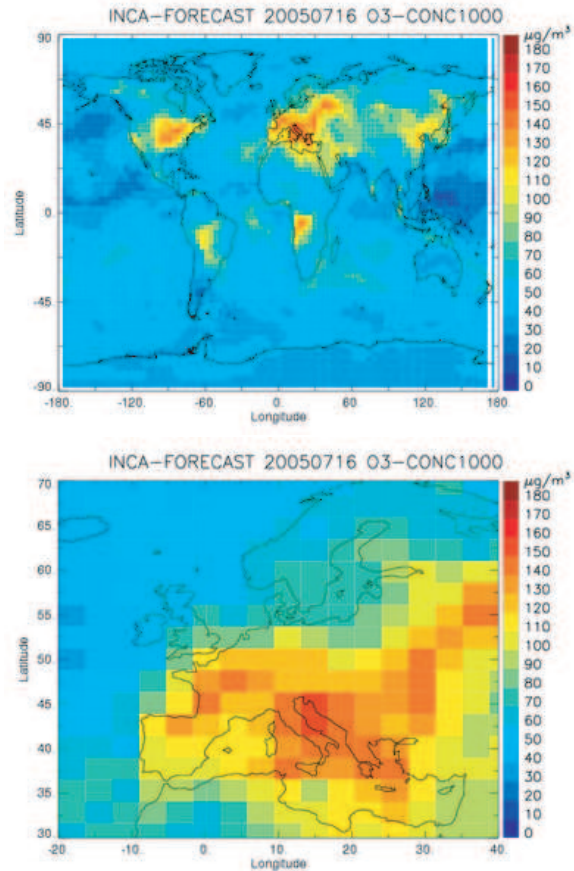


FIG. 13 – Distribution de la concentration d’ozone simulée à l’échelle globale et au-dessus de l’Europe pour le 23 juillet 2005 par LMDZ-INCA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### Réglage de la paramétrisation de l’effet indirect des aérosols avec des données satellitaires

L’effet indirect des aérosols anthropiques<sup>9</sup> est reconnu comme un forçage à la fois parmi les plus importants et des plus incertains du changement climatique. Dans la version actuelle de LMDZ, il est représenté suivant *Boucher et Lohmann [1995]* :

$$N_d = \exp(a_0 + a_1 \ln m_a) \quad (1)$$

où  $N_d$  est la concentration en nombre des gouttelettes,  $m_a$  la concentration en masse des aérosols, et  $a_0$  et  $a_1$  sont des paramètres qui ont été définis à partir des observations aéroportées. Ces deux paramètres ont été ajustés afin que la relation entre la

<sup>9</sup>Les aérosols, servent de condensation et module leur concentration en nombre des gouttelettes d’eau nuageuses – Davantage de noyaux résulte en des gouttes plus nombreuses et plus petites – Les nuages réfléchissent alors plus efficacement le rayonnement solaire.



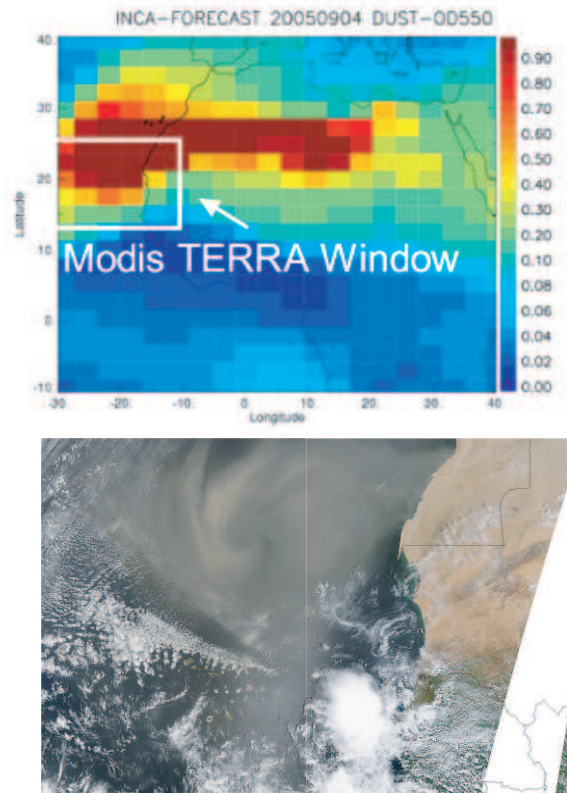


FIG. 14 – Épaisseur optique des aérosols simulée par le modèle LMDZ-INCA (haut) lors d’un épisode d’export de poussières désertiques en Afrique de l’Ouest et ce même épisode observé par l’instrument MODIS à bord du satellite EOS/TERRA (bas). La fenêtre d’observation de MODIS est représentée par le rectangle sur la figure du haut. Un bon accord qualitatif est obtenu entre les deux distributions pour cet épisode

taille des gouttelettes au sommet des nuages et l’indice des aérosols soit bien représentée dans le modèle ([Quaas et al., 2005a; Quaas et Boucher, 2005; Dufresne et al., 2005]). Ce réglage a réduit d’environ 50% le forçage par rapport à la version standard du modèle. Dufresne et al. [2005] ont montré en outre que l’utilisation du schéma ORCHIDEE, qui réduit la couverture nuageuse basse au-dessus des continents dans le modèle, induit une réduction de l’effet indirect des aérosols de 50% supplémentaires.

L’effet indirect des aérosols peut aussi augmenter le contenu en eau liquide et la durée de vie des nuages, car des gouttelettes plus petites forment moins efficacement la précipitation (“deuxième effet indirect”). Cet effet peut être inclus dans LMDZ en appliquant le schéma de microphysique des nuages de Boucher et al. [1995]. Ce schéma prend en compte la concentration des gouttelettes dans la paramétrisation de la formation de la pluie (le processus d’autoconversion). En l’appliquant, les

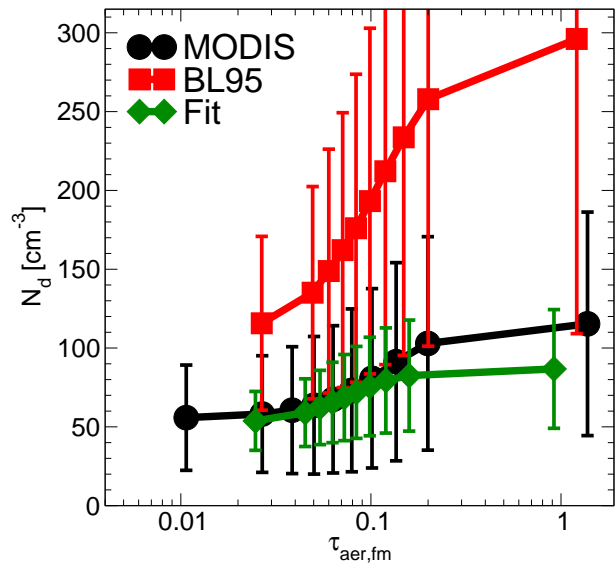


FIG. 15 – Relation entre la concentration en nombre des gouttelettes et l’épaisseur optique du mode fin des aérosols au-dessus des océans ( $60^{\circ}\text{S}$ - $60^{\circ}\text{N}$ ), par les données MODIS (noir), par le modèle avec la formule originale de Boucher et Lohmann [1995] (rouge) et par le modèle avec les nouveaux paramètres (vert). Les barres d’erreur montrent l’écart-type dans chaque bin.

aérosols ont un effet sur le contenu en eau des nuages (qui augmente alors avec la concentration des aérosols). La relation entre la taille des gouttelettes (qui dépend de  $N_d$  et du contenu en eau liquide) et la concentration des aérosols peut ainsi être perturbée. Afin de résoudre ce problème, nous avons établi un jeu de données de la concentration des gouttelettes à partir des données spatiales MODIS en appliquant l’hypothèse de nuages adiabatiques [Quaas et al., 2005b]. Ainsi, nous avons pu corrélérer  $N_d$  et l’épaisseur optique du mode fin des aérosols (qui correspond aux aérosols anthropiques) à partir des données satellitaires, et nous avons réglé les paramètres de la formule 1 pour reproduire cette relation dans le modèle. La figure 15 montre ces relations pour cinq ans de données, pour lesquelles l’ajustement permet de bien reproduire cette relation, alors que la variabilité (l’écart-type) est un peu trop petit dans le modèle.

La Table 1 liste les paramètres ajustés et les forçages adoptés par nos différentes études.

## Références

- [1] Boucher, O., and U. Lohmann, The sulfate–CCN–cloud albedo effect - a sensitivity study with two general circulation models, *Tellus*, 47B, 281–300, 1995.

Étude	$a_0$	$a_1$	Forçage [ $\text{Wm}^{-2}$ ]
BL95, sulfate	5.1	0.41	-0.9
BL95, tous	5.1	0.41	-0.7
BL95, tous	5.1	0.41	-0.8*
QB05, sulfate	3.9	0.20	-0.5
QB05, tous (POLDER)	1.7	$0.45^1, 0.30^2, 0.25^3, 0.20^4$	-0.4
QB05, tous (MODIS)	$1.2^5, 1.4^6$	$0.20^7, 0.15^8$	-0.3
Q05, tous (MODIS)	4.3	0.30	-0.5*

TAB. 1 – Effet indirect des aérosols : valeurs des paramètres  $a_0$  et  $a_1$  de l'équation (1) et moyenne annuelle globale du forçage radiatif associé dans les différentes études. *Boucher and Lohmann* [1995, leur formule “D”], QB05 : *Quaas and Boucher* [1995, ajustement de la relation taille des gouttelettes - concentration des aérosols avec données POLDER et MODIS], Q05 : *Quaas et al.* [2005b, ajustement de la relation concentration des gouttelettes - concentration des aérosols avec données MODIS]; sulfate :  $m_a$  dans Eq. (1) est la masse des sulfates (moyennes mensuelles), tous :  $m_a$  est la masse de tous les aérosols (interactifs); (\*): l'effet combiné des deux effets indirects des aérosols (la version plus récente de LMDZ utilisée dans cette étude a moins de nuages bas au-dessus des continents et alors un effet indirect plus petit). (1) : nuages convectifs (définis comme nuages dans les points de la grille où il y a de la convection) au-dessus des continents; (2) : nuages convectifs au-dessus des océans; (3) : nuages stratiformes au-dessus des continents; (4) : nuages stratiformes au-dessus des océans; (5) : au-dessus des continents; (6) : au-dessus des océans; (7) : nuages convectifs; (8) : nuages stratiformes.

- [2] Boucher, O., H. Le Treut, and M. B. Baker, Precipitation and radiation modeling in a general circulation model : Introduction of cloud microphysical processes, *J. Geoph. Res.*, 100, 16395–16414, 1995.
- [3] Dufresne, J.-L., J. Quaas, O. Boucher, S. Denvil, et L. Fairhead, Contrasts in the effects on climate of anthropogenic sulfate aerosols between the 20th and the 21st century, *Geophys. Res. Lett.*, doi :10.1029/2005GL023619, in press, 2005.
- [4] Quaas, J., et O. Boucher, Constraining the first aerosol indirect radiative forcing in the LMDZ GCM using POLDER and MODIS satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17814, doi :10.1029/2005GL023850, 2005.
- [5] Quaas, J., O. Boucher, et J.-L. Dufresne, Effets des aérosols sulfatés sur le climat du 20ème siècle, *LMDZ-Info*, 5, 6-7, 2005a.
- [6] Quaas, J., O. Boucher, and U. Lohmann, Constraining the total aerosol indirect effect in the LMDZ and ECHAM4 GCMs using MODIS satellite data, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, in press, 2005b.

—————  
**Johannes Quaas (MPI-Met)**  
**quaas@dkrz.de**

**Olivier Boucher (Hadley Centre, Met Office)**  
**olivier.boucher@metoffice.gov.uk**

### Forçage indirect par différents types d'aérosols : Sulfates et mélanges “externe” et “interne”

Une des raisons pour laquelle le forçage par l'effet indirect est toujours mal connu est l'ignorance de la capacité des différents types d'aérosols à servir de noyaux de condensation des nuages (*cloud condensation nuclei*, CCN). Pendant longtemps, on n'a pris en compte que les aérosols sulfatés (d'origine naturelle par biogéochimie des océans, et d'origine anthropique par pollution). Il a été observé, pourtant, que d'autres espèces d'aérosols tels que les aérosols organiques peuvent, eux aussi, servir de CCN. En général, l'état de mélange des aérosols est d'importance. Dans l'hypothèse d'un mélange “externe”, les différentes composantes chimiques des aérosols forment des particules séparées. Au contraire dans l'hypothèse d'un mélange “interne”, l'une des composantes peut condenser sur une autre, ou différentes espèces peuvent coaguler, et ainsi chaque particule peut être composée de plusieurs espèces.

Nous avons examiné l'influence de ces trois hypothèses sur le forçage par l'effet indirect dans le modèle LMDZ. L'effet indirect est exprimé par le lien entre la concentration en masse des aérosols et la concentration en nombre des gouttelettes suivant *Boucher et Lohmann* [1995; BL95] (voir le chapitre précédent). Pour l'étude de sensibilité, nous avons choisi trois méthodes pour définir la masse des

aérosols, où les hypothèses de mélanges externes et internes ne sont approximées que de manière très grossière :

1. Comme proposé par BL95, et comme il est courant dans de nombreuses études,  $m_{aer}$  est la masse des sulfates seule (Expérience “Sulfate”).
2. Pour simuler l’hypothèse de mélange externe, on prend la somme des masses des aérosols hydrophiliques (et donc CCN potentiels) : sulfates, carbonés hydrophiliques et sels de mer de petits rayons (inférieurs à  $1 \mu\text{m}$ ) (Expérience “Somme”).
3. Pour l’hypothèse de mélange interne, le maximum des masses des aérosols hydrophiliques est pris (Expérience “Maximum”).

Pour chacune des expériences, une simulation d’une année est effectuée. Suivant Quaas et al. [2005; QBL05], nous évaluons les paramétrisations en comparant la relation entre la concentration en nombre de gouttelettes et l’épaisseur optique du mode fin des aérosols observée par les données satellitaires MODIS et celles simulées par les trois expériences (figure 16). Les trois hypothèses sont en accord avec les données satellitaires, lorsque les bons paramètres sont choisis. Pour l’hypothèse “sulfate”, on constate que les paramètres originaux de BL95 donnent un accord satisfaisant<sup>10</sup>, alors que les deux autres relations sont très comparables et en accord avec les observations pour le choix de paramètres proposé par QBL95. Dans la Table 2, nous listons ces trois expériences et les forçages simulés par l’effet indirect.

En conclusion, les données satellitaires ne permettent pas de savoir laquelle des hypothèses est correcte, mais le choix a une influence importante sur le forçage simulé. Il est de loin le plus grand quand on ne choisit que les sulfates, et cela est dû au fait que la plupart des sulfates sont d’origine anthropique et que l’aérosol de fond est en faible concentration, et il est un peu plus grand pour l’hypothèse de mélange externe que pour celle de mélange interne.

## Références

- [1] Boucher, O., and U. Lohmann, The sulfate-CCN-cloud albedo effect - a sensitivity study with two general circulation models, *Tellus*, 47B, 281-300, 1995.

<sup>10</sup>Il faut d’ailleurs remarquer que BL95 décrit un modèle où les aérosols sont interactifs, contrairement à d’anciennes études, parmi lesquelles les simulations pour l’IPCC où les champs de sulfates en moyennes mensuelles sont imposés – mais avec ce choix des paramètres, l’effet indirect serait sur-estimé

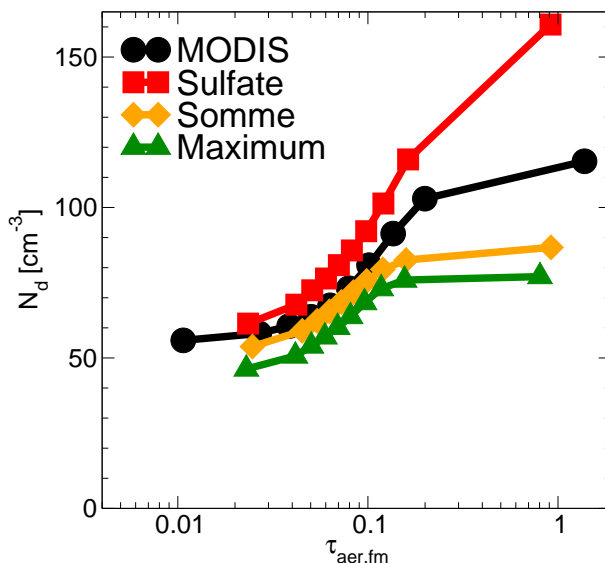


FIG. 16 – Relation entre la concentration en nombre de gouttelettes et l’épaisseur optique des aérosols au-dessus des océans, par MODIS (noir), et par LMDZ pour les expériences “Sulfate” (rouge), “Somme” (jaune), et “Maximum” (vert, voir texte).

- [2] Quaas, J., O. Boucher, and U. Lohmann, Constraining the total aerosol indirect effect in the LMDZ and ECHAM4 GCMs using MODIS satellite data, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5, 9669-9690, SRef-ID : 1680-7375/acpd/2005-5-96695, 2005.

Johannes Quaas (MPI-Met)  
quaas@dkrz.de

Olivier Boucher (Hadley Centre, Met Office)  
olivier.boucher@metoffice.gov.uk

## 8 Climatologie - méthodes de validation

### Nuages et réchauffement climatique : d’où viennent les incertitudes ?

La réponse des nuages au réchauffement global est très variable selon les modèles climatiques, et cette diversité est considérée depuis plus de 15 ans comme l’une des principales sources d’incertitudes

Étude	Sulfate	Somme	Maximum
Forçage [ $\text{Wm}^{-2}$ ]	-2.0	-0.5	-0.4

TAB. 2 – Forçage radiatif dans le visible en moyenne annuelle globale par l’effet indirect des aérosols combiné (premier et deuxième), pour les trois expériences en utilisant les paramètres comme proposés par BL95 (pour Sulfate) et par QBL05 (pour Somme et Maximum).

pour les projections de changement climatique. De très nombreux facteurs sont potentiellement responsables de cette diversité. Peut-on préciser un peu mieux quels sont les facteurs dominants et par conséquent quelle est l’origine principale de ces incertitudes? Cela aiderait mieux à définir les tests observationnels et les développements de paramétrisations propices à la fameuse “réduction des incertitudes”.

Dans cette optique, nous avons analysé la réponse radiative des nuages tropicaux au réchauffement climatique (augmentation du  $\text{CO}_2$  de 1% par an) simulée par 15 modèles couplés océan-atmosphère participant au 4<sup>e</sup> rapport de l’IPCC. A l’échelle globale et tropicale, le signe et l’amplitude de cette réponse est extrêmement variable selon les modèles (particulièrement dans le domaine visible), et cela contribue substantiellement aux écarts de sensibilité climatique entre les modèles. En décomposant cette réponse selon différents régimes de circulation atmosphérique (définis d’après la vitesse verticale de grande échelle à 500 hPa  $\omega$ ), nous montrons que cette diversité s’explique en premier lieu par différentes réponses des nuages de couche limite dans les régimes de subsidence atmosphérique ( $\omega > 0$ , figure 17). En comparaison, les différences de réponse des nuages dans les régimes convectifs ( $\omega < 0$ ) entre les modèles jouent un rôle secondaire.

D’autre part, nous avons estimé la sensibilité du forçage radiatif des nuages (FRN) à un changement interannuel des températures de surface de l’océan à l’aide d’observations, puis nous avons comparé la capacité des 15 modèles couplés à reproduire dans des simulations du 20<sup>e</sup> siècle les résultats observés (figure 18). Nous montrons que c’est dans les régimes de subsidence atmosphérique ( $\omega > 0$ ) que (1) la sensibilité du FRN à la température est la plus grande dans les observations, (2) que l’écart entre simulations et observations est le plus grand (avec notamment 13 modèles sur 15 qui sous-estiment cette sensibilité), et (3) que l’écart entre les simulations des différents modèles est le plus important.

La combinaison de ces différents résultats nous mène à conclure qu’actuellement, la réponse des nuages de couche limite aux changements des conditions climatiques est au cœur des incertitudes des rétroactions nuageuses dans les modèles cli-

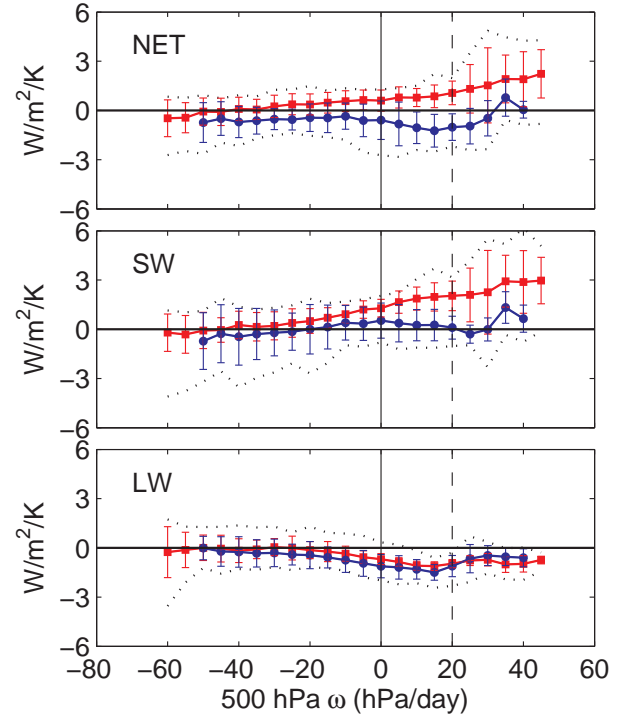


FIG. 17 – Sensibilité du forçage radiatif des nuages (FRN, ou “cloud radiative forcing” en anglais) au réchauffement de la surface de l’océan (en  $\text{W/m}^2/\text{K}$ ) simulée par 15 modèles couplés océan-atmosphère au cours d’un scénario de changement climatique (+1%/an de  $\text{CO}_2$ ). Deux groupes de modèles couplés ont été définis d’après la réponse tropicale moyenne du FRN en changement climatique : en rouge, les 8 modèles qui prédisent une anomalie positive du FRN NET en réponse au changement climatique (c’est-à-dire une diminution de l’effet de refroidissement des nuages sur le climat), et en bleu les 7 modèles qui prédisent une anomalie négative du FRN NET (c’est-à-dire une augmentation de l’effet de refroidissement des nuages); les modèles du groupe rouge prédisent un réchauffement du climat tropical plus important que les modèles du groupe bleu. La figure indique la moyenne et l’écart-type de la réponse des 2 groupes de modèles pour les composantes LW, SW et NET du FRN. Les lignes pointillées montrent l’enveloppe des réponses des 15 modèles.

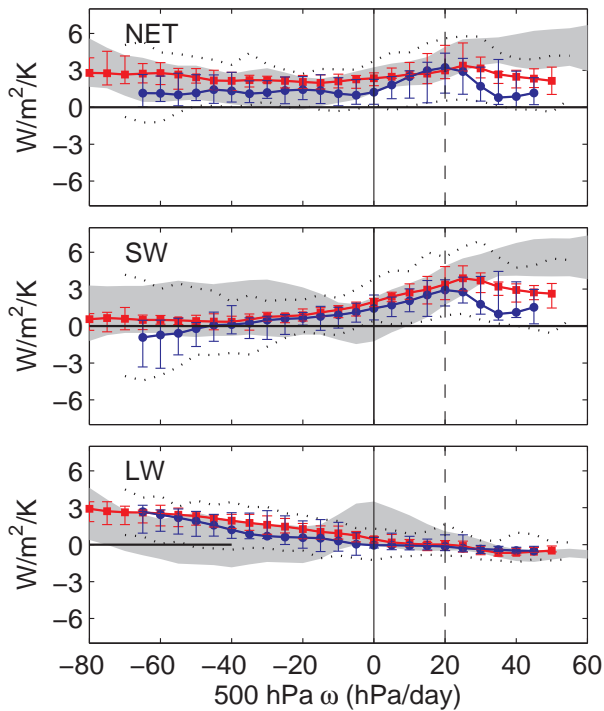


FIG. 18 – Sensibilité du FRN NET, SW et LW à des changements interannuels de la température de surface de l’océan dans le climat actuel. La fourchette d’estimations observationnelles de cette sensibilité est indiquée par la zone grisée (dérivée des données ERBE et ISCCP-FD, et des réanalyses météorologiques ERA40 et NCEP2). Les courbes rouge et bleue montrent les sensibilités interannuelles (dérivées de simulations du 20<sup>e</sup> siècle) des 2 groupes de modèles définis dans la figure 17 ; les barres verticales montrent les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles de la réponse des modèles au sein de chaque groupe) ; les courbes pointillées montrent l’enveloppe des réponses des 15 modèles.

matiques. Nous souhaitons à présent approfondir l’analyse de ces résultats afin de comprendre plus précisément pourquoi les nuages de couche limite répondent diversement au réchauffement climatique dans les modèles. Nous essaierons alors de proposer des tests observationnels susceptibles de discriminer les différents comportements nuageux simulés en réponse au changement climatique, et ainsi de mieux contraindre la fourchette des estimations de la sensibilité climatique par les modèles.

#### Références :

Bony S and J-L Dufresne, 2005 : Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 32, No. 20, L20806, doi :10.1029/2005GL023851.

Bony S and 13 co-authors, 2005 : How well do we understand and simulate climate change feedback

processes? *J. Climate*, en révision.

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.

Sandrine Bony (LMD)  
 bony@lmd.jussieu.fr  
 Jean-Louis Dufresne  
 jlufres@lmd.jussieu.fr

## 9 Les planètes

La suite au prochain numéro...

## 10 Le coin débat

Grand calme!

# LMDZ-info

la lettre des utilisateurs du modèle de circulation générale  
de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)  
Editée par le Laboratoire de Météorologie Dynamique  
Case postale 99  
Tour 45-55, 3ème Etage - 4, place Jussieu  
75252 Paris Cedex 05  
tel : 01.44.27.50.15 fax : 01.44.27.62.72  
Site Internet : <http://www.lmd.jussieu.fr/LMDZ-info>  
Rédacteur en chef : Frédéric Hourdin  
Adjoint : Jean Louis Dufresne  
Réalisation : Soumya Jamili

Equipe rédactionnelle :

Evolution du modèle et aspects informatiques : L. Fairhead  
Applications climatiques : J.-L. Dufresne  
Etudes de processus et paramétrisations : J.-Y. Grandpeix  
Végétation - hydrologie : N. de Noblet-Ducoudré  
Dynamique - transport : F. Hourdin  
Chimie - aérosols - climat : D. Hauglustaine  
Climatologie - méthodes de validation : S. Bony  
Planètes : F. Forget