

LMD **Z** info

la lettre des utilisateurs

du modèle de circulation générale atmosphérique

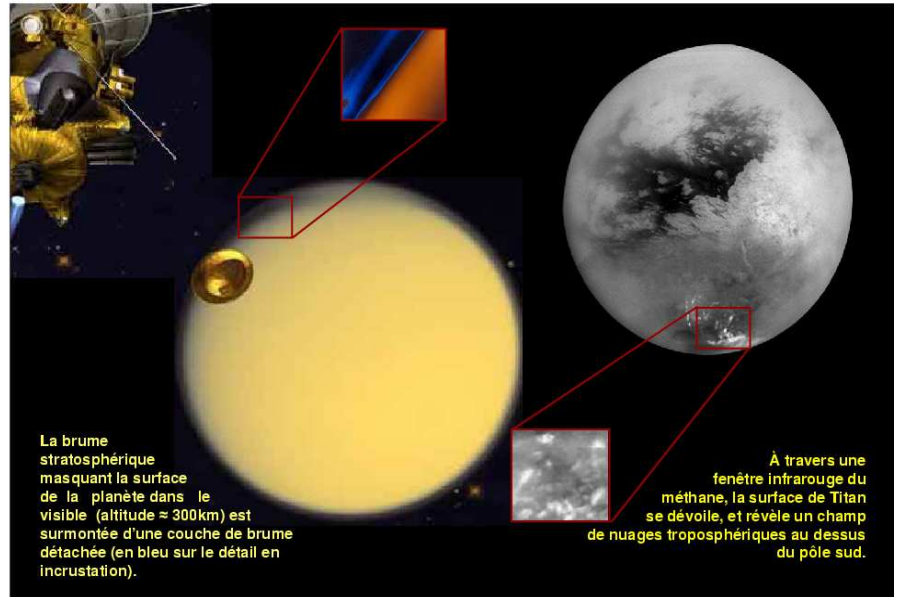
de l'Institut Pierre Simon Laplace

N° 5 Février 2005

Sommaire

1	Actualité	2
2	Evolutions du modèle et aspects informatiques	4
3	Applications climatiques	5
4	Etudes de processus et paramétrisations	9
5	Végétation - hydrologie	10
6	Dynamique - transport	16
7	Chimie - aérosols - climat	16
8	Climatologie - méthodes de validation	17
9	Les planètes	17
10	Le coin débat	21

Contacts et Informations



L'image du jour : Brumes et nuages dans l'atmosphère de Titan

Editorial - Le froid et le chaud soufflent sur ce numéro.

Le froid d'abord, c'est Titan, dévoilé par les magnifiques photos de la sonde européenne Huygens envoyées depuis ce monde glacé, au sol duquel s'écoulent sans doute méthane ou éthane liquides. Pendant ce temps, la sonde américaine Cassini, en orbite autour de Saturne, continue ses survols réguliers de Titan, apportant une moisson d'informations nouvelles sur la brume ou les nuages (l'image du jour). L'occasion de faire le bilan du travail de modélisation initié au LMD au début des années 90.

Le chaud, ce sont les nouvelles simulations du changement climatique effectuées avec le tout nouveau modèle couplé de l'IPSL. Ce modèle reproduit d'abord, assez fidèlement, l'évolution de la température moyenne du globe pour le XXI^e siècle quand on prend en compte les effets directs et indirects des aérosols sulfatés (Figure 4). D'autre part le modèle répond plutôt fortement aux scénarios du GIEC d'augmentation des gaz à effet de serre. Il prédit une augmentation de 4,5 K à l'horizon 2100 pour les scénariis d'émission les plus probables (Fig. 1). Des analyses sont en vue pour identifier et comprendre les mécanismes contrôlant l'amplitude de la réponse au changement climatique.

F. H.

1 Actualité

Naissance de l'équipe "modélisation globale et changement climatique"

Au cours de ces dernières années, l'effort considérable apporté à la mise en place d'un modèle atmosphérique qui puisse servir les différents objectifs de la communauté IPSL a absorbé une part importante de notre force de travail. A présent que le modèle couplé de l'IPSL est opérationnel, une réflexion sur nos objectifs scientifiques était d'actualité.

La dynamique créée par la prospective du LMD nous a convaincu de la nécessité de structurer les personnels concernés par le développement de modèles. Une équipe est née dont la responsabilité m'a été confiée. Notre thématique scientifique est centrée sur l'étude des mécanismes du changement climatique. Les aspects opérationnels du développement logiciel sont par ailleurs répartis en deux actions, regroupant d'une part la modélisation du climat dans la perspective d'une hiérarchie de modèles, et d'autre part l'accompagnement à la diffusion du modèle LMDZ, cette action comprenant notamment la définition d'une physique commune ARPEGE-LMDZ.

L'étude des mécanismes et rétroactions du changement climatique

Les mécanismes du climat sont intimement liés à l'amplitude globale de la réponse climatique aux perturbations radiatives telles que la croissance anthropique de l'effet de serre. La signature de ces mécanismes sera recherchée par approche interactive entre l'observation et la modélisation. Il s'agit d'analyser les mécanismes à la fois impliqués dans les variations observables du climat (notamment sur la période récente pour laquelle on dispose des données satellitaires) et identifiés dans les simulations de changement climatique.

Par "mécanisme" nous entendons une relation particulière et quantifiable faisant référence à un modèle simplifié théorique, conceptuel ou empirique. Les mécanismes seront étudiés aux échelles climatiques (moyennes mensuelles des grandeurs et structures planétaires), ainsi qu'aux échelles de temps plus rapides (par exemple le cycle diurne et ses modifications). Nous considérerons également l'interface avec d'autres systèmes (comme le couplage économie/climat).

Outre la simulation globale et l'observation satellitaire, cette activité s'appuiera sur des modèles simplifiés du climat (modèles conceptuels, modèles bi-colonnes) en relation avec les stations terrestres d'observation (comme le SIRTA). Enfin, des logiciels d'analyse dynamique des perturbations (tels que le TEF¹) ainsi que des simulations climatiques régionalisées compléteront la batterie d'outils d'identification et d'analyse des mécanismes aux différentes échelles.

L'étude de processus climatiques

Les modèles globaux font largement usage de paramétrisations destinées à représenter de façon approchée l'impact de phénomènes non explicitement résolus par le modèle sur la grande échelle. Ces paramétrisations restent très empiriques. Il est important de mieux expliciter à la fois les hypothèses sur lesquelles elles reposent et leur domaine de validité, et de renforcer leur confrontation à des observations ou à des résultats de modèles plus explicites (LES, CRM...).

Les processus nuageux sont au cœur des interrogations relatives aux changements climatiques : bien qu'ils jouent un rôle important dans la dynamique atmosphérique elle-même, dans le bilan radiatif terrestre et dans le couplage de l'atmosphère avec l'océan et les surfaces continentales, ils constituent encore un problème majeur pour l'observation et pour la modélisation. Les progrès récents dans ces deux domaines permettent d'envisager des études à échelle temporelle fine et une capacité d'intercomparaison observations-modèles accrue.

Les premières études sont centrées sur le cycle diurne de la couche limite et de la convection nuageuse sur les continents, et sur la propagation de la convection et le cycle de vie des systèmes convectifs. Une très grande partie de ces activités va se placer dans le cadre du projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), l'Afrique de l'Ouest étant ainsi choisie comme principale région test. Une autre partie va se dérouler en liaison avec le SIRTA.

La modélisation du climat

En ce qui concerne la modélisation du climat proprement dite, les développements envisagés dans les quatre prochaines années sont les suivants :

► Extension à la stratosphère (avec la nécessaire modification du code radiatif). Cette partie est réalisée en grande partie en dehors de l'équipe (François Lott, à l'ENS, + SA et LSCE).

¹Transfert evolution formalism.

- ▶ Introduction du “modèle du thermique” et couplage avec la convection.
- ▶ Introduction des poches froides dans le modèle de convection.
- ▶ Développement d’une nouvelle dynamique.
- ▶ Modèles simplifiés (couche de mélange océanique, dynamique 2D, aqua-planète, modèle à 20 paramètres, ...).
- ▶ Evaluation des versions régionalisées du modèle.

Une “boîte à outils LMDZ”

Par ailleurs, pour répondre aux multiples demandes, tant internes qu’externes, nous avons décidé de créer un groupe “Boîte à Outils LMDZ”, **LE BOL**, dirigé par Laurent Fairhead, avec pour missions principales :

- d’assurer la distribution du modèle sous ses différentes configurations (climatiques, zoomées, guidées, avec traceurs, rétro-transport).
- d’assurer le portage sur différentes plate-formes (Linux, stations de travail, vectorisation, parallélisation),
- de garantir la continuité de l’interface vis-à-vis du modèle du système Terre développé dans le cadre du pôle modélisation,
- d’assurer un suivi de qualité sur les versions successives du modèle (bench-marks automatiques de différentes configurations, documentation de la climatologie),
- d’assurer le support aux utilisateurs et d’organiser régulièrement des formations,
- de mener à bien le projet de physique commune ARPEGE/LMDZ.

Jean-Louis Dufresne (LMD)
Jean-Louis.Dufresne@lmd.jussieu.fr

Réunion du pôle modélisation à Trouville

La biennale du pôle de modélisation s’est tenue pour la seconde fois cette automne à Trouville. Autant la réunion précédente avait été tendue et polluée par les mauvais résultats du modèle couplé (imputables à un petit bug aux interfaces éliminé depuis), autant celle-ci a été constructive. La dernière main a été mise au modèle couplé juste à temps pour réaliser les simulations requises pour participer au nouveau rapport de l’IPCC. Ce modèle montre des comportements intéressants aux latitudes polaires (avec

une climatologie plus qu’honorable grâce à Gerhard Krinner notamment, entachée d’une sous-estimation des vents catabatiques sur le pourtour de l’Antarctique) jusqu’aux tropiques (avec des évènements El Nino aux comportements variés). Les défauts les plus importants concernent sans doute : le biais froid dans les moyennes latitudes sur les océans, la sous-estimation des précipitations de moussons et une circulation thermohaline trop faible.

La réunion a aussi été l’occasion de nombreuses discussions. L’étude des cycles et des couplages reste au cœur des préoccupations du pôle, avec en chantier à très court terme, le lancement d’une chaîne couplée climat-carbone. La chimie était aussi présente en force avec une entrée remarquée des “stratosphériciens”.

Pour les évolutions futures du modèle couplé dans sa partie physique, on privilégiera à court terme un accroissement modéré de la résolution horizontale du modèle atmosphérique, pour améliorer la représentation de l’activité transitoire dans les moyennes latitudes et peut-être le problème du biais froid. Par la suite, l’accent sera mis sur : 1) la représentation du cycle diurne, à la fois avec le nouveau bloc de paramétrisations couche-limite/convection/nuages en cours de développement au LMD et avec les nouvelles versions à haute résolution verticale près de la surface pour le modèle ORCA et 2) l’extension à la stratosphère avec accroissement de la résolution verticale des hautes couches atmosphériques.

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

Avancement des simulations avec le modèle couplé IPSL-CM4 pour le prochain rapport du GIEC

Dans le cadre de la préparation du prochain rapport du GIEC (qui devrait être publié début 2007), l’IPSL réalise tout un ensemble de simulations, principalement avec le modèle couplé atmosphère-végétation-océan IPSL-CM4 (cf. LMDZ info n°4). Ces simulations suivent les recommandations du GIEC et leurs résultats seront mis à la disposition de la communauté scientifique. Les recommandations portent sur la réalisation des simulations, sur les forçages, sur la liste, la fréquence et le format d’enregistrement de nombreuses variables de sortie. Ces simulations sont réalisées sur les deux calculateurs NEC du CNRS (à l’IDRIS) et du CEA.

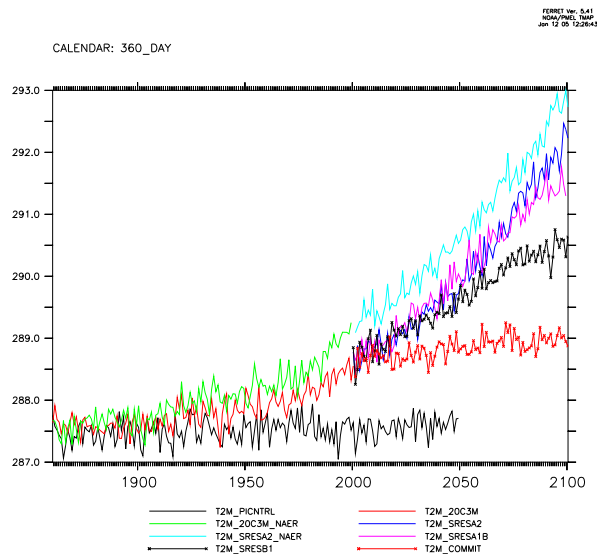


FIG. 1 – Évolution de la température moyenne de l’air en surface de la Terre, en fonction du temps (années 1860-2100), pour plusieurs des simulations réalisées dans le cadre du GIEC. La nomenclature des courbes suit la nomenclature des simulations du texte.

Après une ultime phase de mise au point et de débogage au printemps 2004, la version du modèle a été figée en juillet 2004². Depuis cette date, la quasi-totalité des simulations requises a été réalisée (par ex. figure 1). Il reste à prolonger certains scénarii en maintenant constante la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols.

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

- ▶ Modèle atmosphérique forcé LMDZ-4 : ensemble de simulations AMIP (1979-2002). Cet ensemble sera complété.
- ▶ Modèle atmosphérique LMDZ-4 couplé à un “slab ocean” : simulation de contrôle et simulation $2\times\text{CO}_2$, dans le 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_2 de 1% par an

²Ont 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, et Johannes Quaas.

- pendant 70 ans, puis stabilisation à $2\times\text{CO}_2$
- **1%to4x** : accroissement de CO_2 de 1% par an pendant 140 ans, puis stabilisation à $4\times\text{CO}_2$
- ▶ Modèle couplé IPSL-CM4 : *simulations 20ème siècle*
 - **20C3M** : simulations 1860-2000, avec variations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés
 - **20C3M_naer** : idem, mais avec aérosols sulfatés constants (valeurs pré-industrielles)
- ▶ Modèle couplé IPSL-CM4 : *simulations selon certains scénarii 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 constants (valeurs pré-industrielles)
 - **SRESB1** : scénario SRES-B1
 - **SRESA1B** : scénario SRES-A1B
 - **COMMIT** : on maintient les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols constants, égales à leurs valeurs en l’an 2000.

Les résultats des simulations de l’IPSL sont accessibles via la page web du projet MC2 : mc2.ipsl.jussieu.fr.

Sébastien Denvil (IPSL)
 Sebastien.Denvil@ipsl.jussieu.fr
 Jean-Louis Dufresne (LMD)
 Jean-Louis.Dufresne@lmd.jussieu.fr
 Pierre Friedlingstein (LSCE)
 pierre@lsce.saclay.cea.fr

2 Evolutions du modèle et aspects informatiques

LMDZ.3.3 est mort ; vive LMDZ4 !

Ce titre un peu provocant pour vous annoncer que nous arrêtons de développer LMDZ.3.3 (il ne sera plus procédé sur cette version qu’à des corrections de bugs) et que tous nos efforts de développement se portent maintenant sur LMDZ4. Vous êtes donc vivement encouragés à faire la bascule! Pour rappel, LMDZ4 est le résultat de la convergence des deux branches de LMDZ.3.3 : la branche LMDZT (utilisée pour les études de traceurs et de chimie) et la branche couplée (celle avec les sous-surfaces utilisée pour les couplages

avec les surfaces continentales et l'océan). En gros, on peut dire que LMDZ4, c'est la dynamique de LMDZ.3.3 branche traceurs, dont l'écriture a été nettoyée et pour laquelle M.-A. Filiberti a rationalisé l'interface traceurs/chimie, et la physique de LMDZ.3.3 branche couplée, pour laquelle I. Musat a procédé à une remise à plat des fichiers de sorties. La continuité entre les deux codes a été vérifiée et des simulations couplées utilisant les versions IPCC de LMDZ.3.3 et LMDZ4 ont tourné un mois en donnant strictement les mêmes résultats numériques. C'est cette version de LMDZ4 qui a été utilisée pour effectuer les simulations envoyés au PCMDI dans le cadre du programme AMIP.

Nouveaux outils pour LMDZ

Suite à la bascule du serveur CVS de LMDZ, l'adresse à utiliser maintenant pour toutes vos mises à jour CVS est (le mot de passe reste inchangé) :

```
:pserver:lmdzbrowse@cvs.lmd.jussieu.fr:  
/home/cvsroot
```

L'arborescence CVS est à présent visible à l'adresse :

```
http://web.lmd.jussieu.fr/cgi-bin/  
viewcvs.cgi/
```

Vous y noterez l'installation de l'outil **cvsgraph** qui produit un graphe permettant de suivre le cheminement des différentes versions d'un fichier.

Enfin, nous avons mis en place un rapporteur de bugs pour LMDZ à l'adresse :

```
http://web.lmd.jussieu.fr/flyspray/
```

Ce système nous permettra d'avoir un suivi et un historique des bugs que vous nous notifierez et des demandes que vous pourriez nous faire. Pour utiliser cet outil, il vous suffit de vous enregistrer comme nouvel utilisateur puis "d'ajouter une nouvelle tâche" et de remplir les différentes rubriques proposées. Vous pourrez toujours nous envoyer directement vos rapports de bugs mais une entrée en parallèle sur ce nouveau serveur serait fort appréciée.

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

3 Applications climatiques

LMDZ/LICOM : un modèle simple du couplage atmosphère et océan

La modélisation complète du système Terre est un outil important pour étudier le climat. Mais sa complexité décourage souvent sa pleine exploitation. D'où vient la nécessité de construire un système flexible et modulable qui fasse intervenir les mécanismes les plus importants du couplage entre l'océan et l'atmosphère. C'est dans cet esprit que le modèle LMDZ/LICOM a été mis récemment en place. L'objectif principal est de fournir un outil simple mais efficace pour étudier la variation du climat et les mécanismes du couplage océan-atmosphère.

La composante atmosphérique de ce modèle est le LMDZ, version 3.2, identique à celle utilisée dans le projet SINTEX pour produire une simulation très longue de mille ans. La résolution horizontale est de 5 degrés en longitude et 4 degrés en latitude. Il y a 19 couches en verticale. La convection dans l'atmosphère est traitée avec le schéma de Tiedtke qui est un schéma simple basé sur la notion de flux de masse. La couche limite est traitée par une équation de diffusion dont le coefficient est dépendant du nombre de Richardson. La surface continentale est prise en compte par un modèle de type "seau d'eau" avec une profondeur de 15 cm.

LICOM, la composante océanique, est un modèle de circulation générale de l'océan global. Développé à Pékin (Chine), au LASG³. Le LASG fait partie de l'IAP (Institut of Atmospheric Physics), sous la tutelle de la CAS (Chinese Academy of Sciences). Le LICOM est basé sur les équations primitives gouvernant la circulation de l'océan global. Ces équations sont décomposées en trois parties : circulation barotrope, circulation barocline et circulation thermohaline. Trois schémas numériques distincts sont utilisés séparément pour résoudre ces trois mouvements dont les critères de stabilité numérique sont très différents. Cette technique permet une résolution rapide de la dynamique et fournit ainsi un modèle de circulation générale de l'océan avec un calcul léger. Le nom LICOM est l'acronyme de "LASG/IAP Climate Ocean Model". Dans la version couplée, LI-

³State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics

COM possède une résolution horizontale de 1x1 degré avec une maille régulièrement distribuée dans les coordonnées latitude-longitude. Il y a 30 couches en profondeur.

Le couplage est réalisé à travers le coupleur OASIS3, version PRISM. MPI2 est la technique utilisée pour réaliser le passage de contrôle et d'information. La bibliothèque MPI, fournie par LAM-7.1.1, est téléchargeable sur Web. L'interpolation de la SST et des flux de chaleur entre l'atmosphère et l'océan est réalisée par l'outil MOZAIK/OASIS, la technique SCRIPR/OASIS étant inadaptée à cause de la régularité des deux grilles (c'est un peu surprenant, n'est-ce pas? mais cette technique souffre bien de ce défaut). L'interpolation des tensions de vent se fait avec le programme bicubique de l'outil INTERP/OASIS. L'échange entre l'océan et l'atmosphère est quotidien pour l'instant.

Une composante interactive de la glace de mer étant absente, le modèle LMDZ/LICOM n'est pas utilisable pour prévoir le climat du futur et ainsi réaliser les scénarii du climat pour un réchauffement global. Mais ce n'est pas le but recherché pour ce modèle couplé. Il sera plutôt utilisé dans les études du couplage océan-atmosphère (mécanismes et rétroactions). Dans l'immédiat, des simulations forcées, avec la simulation couplée comme référence, seront effectuées. Ensuite, l'atmosphère fonctionnera en mode de guidage pour pousser la traditionnelle interface océan-atmosphère en hauteur dans l'atmosphère. Ce sera une utilisation innovante du modèle couplé. Il est également envisagé d'étudier le climat régional tropical (surtout l'Océan Indien) en laissant libre la zone étudiée et en rappelant le reste du monde vers des grandeurs climatologiques.

La prévisibilité du climat en fonction de l'état de la circulation océanique entre également dans le champ d'étude du modèle LMDZ/LICOM. Enfin, on doit aussi signaler que ce modèle pourra jouer le rôle d'outil d'enseignement pour des étudiants et des jeunes chercheurs, car il est peu coûteux et facile à utiliser. Il peut tourner sur un PC sous Linux. Actuellement, il est disponible sur le serveur AMD Opteron du LMD. Avec deux processeurs, une simple journée est suffisante pour simuler 3 ans du climat. Remarquons que la charge informatique est à peu près équitable pour LMDZ et LICOM.

La réalisation du modèle couplé a été faite pendant la visite au LMD de Dr. LIU Hailong, auteur principal du LICOM, et chercheur au LASG à Pékin. Cette visite est financée par le PRA T03-03 de l'AFCRST (Association Franco-Chinoise Pour la Recherche Scientifique et Technologique).

Ce travail a bénéficié de l'assistance de l'équipe informatique du LMD. L'aide en provenance de

Messieurs Sébastien Denvil et Arnaud Caubel a été également très appréciée.

Laurent Li (LMD)
Li@lmd.jussieu.fr

Effets des aérosols sulfatés sur le climat du 20ème 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 a 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).

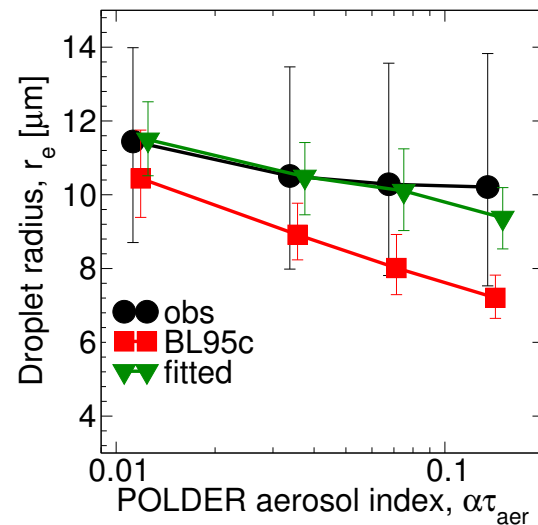


FIG. 2 – La relation entre le rayon effectif des gouttelettes au sommet des nuages d'eau liquide et l'indice des aérosols. En noir, les données POLDER, en rouge, LMDZ avec la formule de Boucher et Lohmann (1995), et en vert, le modèle avec des paramètres réajustés.

Les deux paramètres dans cette formule diagnostique ont été ajustés pour reproduire avec le modèle la relation entre la taille des gouttelettes et l'indice des aérosols donnés par POLDER (Fig. 2).

Dans cette version du modèle, on impose des champs d'aérosols sulfatés précalculés. La figure 3 montre la moyenne zonale annuelle du forçage radiatif par l'effet indirect des aérosols diagnostiquée dans le modèle, avec les formules originales et réajustées. Le forçage est considérablement réduit, de -0.9 à -0.5 W m^{-2} en moyenne globale.

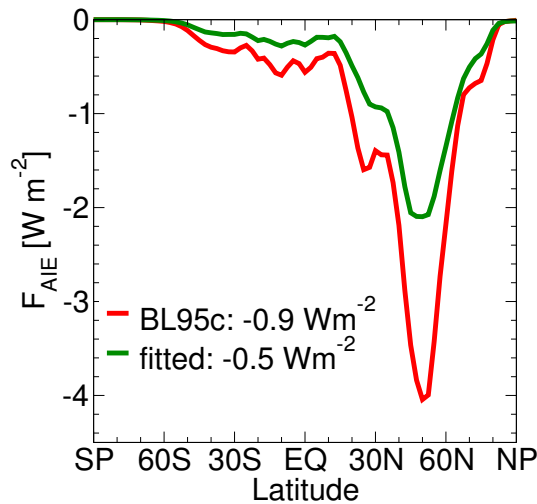


FIG. 3 – La moyenne zonale annuelle du forçage radiatif par l'effet indirect des aérosols (premier effet seulement). En rouge, en utilisant la formule Boucher et Lohmann (1995), en vert, avec la formule réajustée.

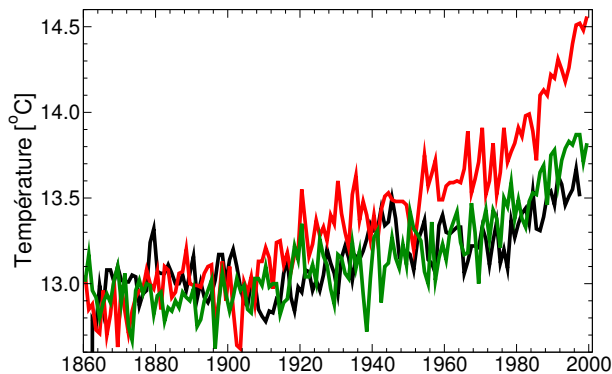


FIG. 4 – Évolution de la température moyenne de l'air à la surface de la Terre pour les simulations avec accroissement des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés (ligne verte), avec accroissement des gaz à effet de serre uniquement (rouge) et observée (noir). L'abscisse est le temps (année). Les simulations sont réalisées avec le modèle couplé IPSL-CM4.

C'est ce nouvel ajustement qui est inclu dans la version du modèle couplé de l'IPSL utilisée pour réaliser les scénarii de changement climatique, et qui semble donner des résultats très encourageants. 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 du 20ème siècle que la simulation avec uniquement les gaz à effet de serre (Fig. 4).

Référence :

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

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.

Johannes Quaas (MPI-Met)
quaas@dkrz.de
Olivier Boucher (LOA)
boucher@loa.univ-lille1.fr
Jean Louis Dufresne (LMD)
Jean-Louis.Dufresne@lmd.jussieu.fr

Impact du changement climatique sur la mousson Ouest Africaine

L'Afrique de l'Ouest et en particulier le Sahel connaissent depuis les années 1970 une sécheresse sans précédent. Cependant, les causes de cette sécheresse sont encore mal connues (déforestation, changement de circulation océanique, augmentation des gaz à effet de serre, variabilité naturelle?). La compréhension de la mousson Ouest Africaine est donc l'objet du projet AMMA (financé par les organismes français et par l'UE) qui débute cette année et sera l'occasion de nombreuses expériences et campagnes de mesures.

Une des questions principales qui se pose dans AMMA est l'impact du changement climatique (augmentation des gaz à effet de serre) sur la mousson. Pour aborder ce problème, deux stratégies sont possibles :

- Utiliser les modèles couplés Océan-Atmosphère : ceux-ci permettent en effet de simuler l'effet d'une augmentation des gaz à effet de serre directement. Cependant, la représentation de la mousson par ces modèles est très mauvaise. De plus, leur utilisation est très coûteuse.
- Utiliser un modèle atmosphérique en mode "time-slice" : on effectue une simulation de contrôle et une simulation perturbée par augmentation des SST⁴ et des gaz à effet de serre du modèle.

⁴Sea Surface Temperature

Nous avons montré dans un premier temps que les modèles couplés ne s'accordent pas sur un changement de la mousson Ouest-Africaine et qu'une discrimination entre les modèles afin de parvenir à un consensus ne semble pas une solution. Nous avons donc effectué des simulations time-slice afin de déterminer les principales sources d'incertitudes. Celles-ci peuvent provenir :

- ▶ du modèle atmosphérique utilisé.
- ▶ du modèle de surface.
- ▶ de la concentration en gaz à effet de serre prescrite.
- ▶ du changement de SST qui force le modèle en "time-slice". On peut par ailleurs décomposer cette dernière en :

- Augmentation moyenne des SST.
- Changement de la structure de SST (apparition de gradients parasites).

Nous avons d'abord cherché l'accord que l'on peut trouver sur le changement climatique entre plusieurs modèles pour un changement de SST et de gaz donné. Pour cela nous avons utilisé les résultats du projet LSPCR⁵. Selon les différents modèles (4 modèles atmosphériques couplés chacun à deux modèles de surface différents), le centre de la bande de mousson se trouve plus au sud en avril et en juin. Par ailleurs, la mousson est moins étendue en latitude selon 6 modèles sur huit en début et en fin de saison (avril et octobre). Cependant l'incertitude sur le changement reste importante puisque ces résultats représentent le seul consensus que l'on observe entre les 8 modèles. L'incertitude est forte en juillet-août à cause non seulement de la différence entre les modèles atmosphériques, mais aussi de leur représentation des sols. (Fig. 5)

Nous avons par la suite cherché quel forçage était le plus important pour ces changements de la mousson, en effectuant une série de simulations avec différents forçages (table 1).

On s'intéresse d'abord à la position du centre de la mousson (Fig. 6). En avril, où le signal est le plus clair, il est principalement dû à la structure de la SST. Au contraire, en juin, le signal, moins apparent, semble davantage lié à l'augmentation globale des SST, même si la structure garde une influence non négligeable. Par ailleurs, l'impact des seuls gaz à effet de serre est relativement faible (non significatif), sauf en août. En effet, on a pu montrer qu'à cette période, ils augmentent l'énergie statique humide disponible au nord de la bande de mousson et "tirent" donc celle-ci vers le Nord. Cependant l'augmentation de la SST a un effet inverse. L'incertitude en juillet-août sera donc principalement liée à l'équilibre entre gaz à effet de serre et augmentation des SST obtenu par le modèle atmosphérique.

⁵Land-Surface Processes and Climate Response, impliquant le LMD, le Hadley Center -HC-, l'Université de Reading -UR- et Météo-France -CNRM

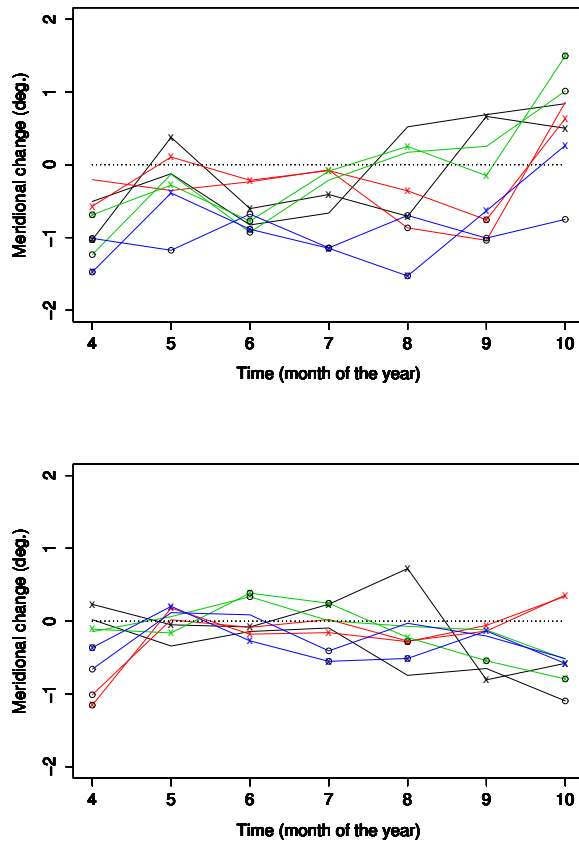


FIG. 5 – Changement moyen de la latitude du coeur de la mousson (en haut) et de la largeur de la bande de mousson (en bas) d'avril à octobre entre simulation perturbée et simulation de contrôle (LMD en noir, CNRM en rouge, Hadley Center en vert, University of Reading en bleu). Les graphes avec des croix correspondent à une version différente du modèle de surface. Les points cerclés sont significatifs au niveau 5% d'après le test non-paramétrique développé par Preisendorfer et Barnett (1993)

Enfin sur toute la période, LMDZ prévoit une mousson moins étendue. Ce résultat est principalement lié au modèle puisqu'on a vu dans LSPCR que les autres modèles ne répondaient pas de manière similaire au même forçage. Cependant, il faut noter que la moitié des modèles couplés de CMIP2 simulent également une bande de mousson plus fine sous effet du changement climatique (non montré ici), l'autre moitié ne donnant pas de modification significative.

En conclusion

L'incertitude reste trop grande pour déterminer un scénario de changement climatique pour la mousson Africaine à partir des modèles actuels.

Experience	SST utilisée	Gaz à effet de serre
CTL	Climatologie AMIP 1979-1999	Valeurs Actuelles
CTL+	Climatologie AMIP 1979-1999	Scénario A2 en 2070
UNI	Clim. AMIP + 1.35K	Valeurs Actuelles
UNI+	Clim. AMIP + 1.35K	Scénario A2 en 2070
HAD	Clim. AMIP + HadCM2 SST change	Valeurs Actuelles
HAD+	Clim. AMIP + HadCM2 SST change	Scénario A2 en 2070
PAT	Clim. AMIP + HadCM2 SST change - 1.35K	Valeurs Actuelles
PAT+	Clim. AMIP + HadCM2 SST change - 1.35K	Scénario A2 en 2070

TAB. 1 – Description des forçages utilisés pour les 8 simulations avec LMDZ3.3

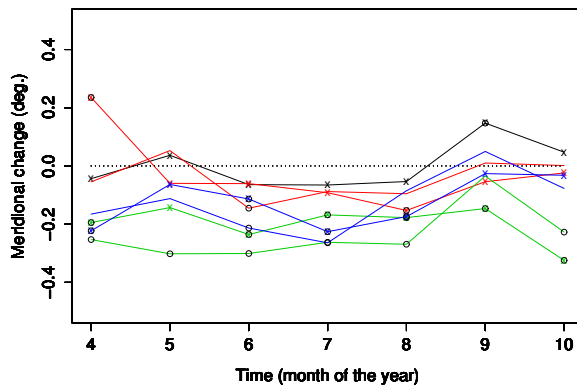
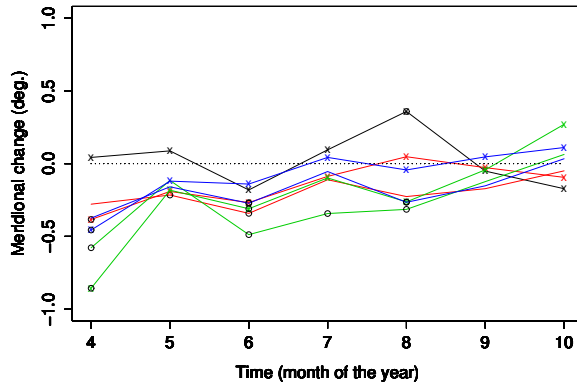


FIG. 6 – Changement moyen de la latitude du coeur de la mousson (en haut) et de la largeur de la bande de mousson (en bas) entre avril et octobre entre la simulation perturbée et la simulation de contrôle (CTL en noir, UNI en rouge, HAD en vert, PAT en bleu). Les graphes avec des croix correspondent aux runs +, dans lesquels les concentrations de gaz sont augmentées. Les points cerclés sont significatifs au niveau 5% d’après le test non-paramétrique développé par Preisendorfer et Barnett (1993)

La principale incertitude est l’anomalie de SST provenant de modèles couplés. Cependant, le modèle

atmosphérique et la manière dont il s’équilibre après augmentation des gaz à effet de serre et des SST d’autre part est aussi un problème important en particulier en août au plus fort de la mousson. Enfin, en juillet-août, le modèle de surface peut aussi avoir un impact non-négligeable. Il semble enfin essentiel d’améliorer la représentation longitudinale de la mousson (mieux simuler le déplacement des systèmes convectifs afin de pouvoir étudier les changements longitudinaux de la mousson).

Tristan D’Orgeval (LMD)
Tristan.d.Orgeval@lmd.jussieu.fr
Jan Polcher (LMD)
polcher@arnaud.lmd.jussieu.fr

4 Etudes de processus et paramétrisations

Développement d’une nouvelle représentation des effets indirects des aérosols

Dans le cadre du changement climatique, le forçage radiatif des aérosols anthropiques est le moins bien connu. Il s’agit notamment des “effets indirects”, des modifications des propriétés des nuages par les aérosols anthropiques, qui ont un impact fort et encore très mal représenté dans des modèles de grande échelle. Un nouveau schéma de microphysique dans le modèle de circulation générale LMDZ a été développé (Quaas, 2003) avec pour but de mieux représenter dans ce modèle les processus de création des nouvelles particules dans les nuages

(activation et nucléation), qui sont désormais traités de manière “physique” et non plus “diagnostique” comme c’était le cas avant. Ce schéma “bulk” traite les rapports de mélange de l’eau liquide, de la glace, ainsi que les concentrations en nombre de gouttelettes liquides et de cristaux de glace comme variables pronostiques, et utilise trois espèces différentes de précipitations : la pluie, la neige, et les grêlons. Il traite des conversions entre toutes ces espèces, et il prend en compte l’influence des aérosols sur les nuages en eau liquide et sur les nuages de glace. Ceci nous permet de simuler les effets importants des aérosols sur le cycle de vie des nuages et sur la formation de la précipitation. Ce modèle devrait permettre aussi de mieux simuler la distribution et l’intensité de la précipitation.

Des études d’évaluation par rapport à des observations ont été réalisées. Pour la comparaison aux données du Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique (SIRTA), une méthode a été développée pour simuler les signaux mesurés par le RADAR et le LIDAR au sol à partir de la distribution verticale des propriétés des aérosols et des nuages. Pour plusieurs cas, les signaux ainsi simulés ont été comparés aux observations, indiquant que dans le modèle, il y a trop peu de nuages bas. Le modèle a également été évalué avec des données satellitaires du TIROS-N Operational Vertical Sounder (TOVS). Cet instrument permet de mesurer des propriétés microphysiques des nuages de glace. Des méthodes pour rendre comparable le modèle et les données satellitaires ont été développées et mises en place. Les propriétés au sommet des nuages sont échantillonnées dans le modèle pour simuler une distribution 2D telle qu’elle est vue par le satellite. Le passage du satellite à 9.30 et 21.30 heures locales à chaque point du globe est échantillonné pour donner une vue globale journalière de la même façon qu’elle s’expose au satellite. Enfin, des hypothèses nécessaires sont appliquées dans le modèle pour échantillonner le même type des nuages (concernant son altitude, son épaisseur optique, etc.). A partir des données satellitaires ainsi que dans plusieurs réalisations de simulations avec le modèle, des histogrammes des quantités microphysiques ont été établis et comparés.

Toutes ces études ont aussi pour but de mettre en place les méthodes d’exploitation du futur instrument Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO), un lidar satellitaire qui sera lancé au printemps 2005, et qui permettra d’évaluer en détail les distributions verticales des aérosols et des nuages, et qui ainsi nous rendra capable de mieux comprendre les impacts des aérosols sur les nuages.

Référence

Quaas, J. : L’effet indirect des aérosols : Paramétrisation dans des modèles de grande échelle et évaluation avec des données satellitaires. Thèse de doctorat, École Polytechnique, 157pp., 2003.

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

Olivier Boucher (LOA)

boucher@loa.univ-lille1.fr

Jean Louis Dufresne (LMD)

Jean-Louis.Dufresne@lmd.jussieu.fr

5 Végétation - hydrologie

Introduction

Le papier ORCHIDEE est enfin sous presse dans Global Biogeochemical Cycles et disponible sur le site Web d’ORCHIDEE. De nombreux autres articles ont été soumis ou sont publiés. Nous essaierons de les mettre à la disposition de tous sur le site. Vous trouverez, à cette adresse :

http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssipsl/doc/Fiche_ORCHIDEE_Nov2004.pdf

le compte-rendu des développements réalisés au cours des 4 dernières années, les différentes configurations du modèle, et une liste des personnes impliquées dans le développement et l’application de notre outil.

Nous sommes heureux de vous annoncer l’arrivée d’un ingénieur permanent, recruté par le CNRS à l’IPSL, qui va soutenir nos divers développements sur ORCHIDEE. Cet ingénieur est Martial Mancip, que nombre d’entre vous ont déjà rencontré.

Dans ce numéro de LMDZinfo vous sont présentées 2 contributions :

- celle de Thanh Ngo-Duc, en thèse au LMD, qui décrit la procédure qu’il a employée pour obtenir 53 années de forçage atmosphérique pour les modèles de surface,
- et celle de Diego Santaren, en thèse au LSCE, qui décrit la méthode qu’il a développée pour optimiser certains paramètres d’ORCHIDEE.

Nathalie de Noblet (LSCE)
Nathalie.De-Noblet@cea.fr

NCC, 53 ans de forçage atmosphérique pour les modèles de surface

Dans le contexte des études de la variabilité climatique inter-annuelle à décennale à l'échelle globale, nous avons construit 53 ans de forçage atmosphérique pour les modèles de surface, appelé NCC (Ncep/Ncar Corrected by Cru). La construction et la validation de ce forçage ont été décrites dans *Ngo-Duc et al.* [2004, soumis à *J. Geophys. Res.*]. Ici, on présente le résumé d'une partie de ce papier.

Construction de NCC

Les données atmosphériques disponibles qui peuvent être utilisées par les modèles de surface concernent des périodes trop anciennes pour être comparées avec des données récentes (satellitaires par exemple) et elles sont trop courtes pour la détection et l'analyse des tendances, comme celles qui sont liées au réchauffement global.

Pour examiner la qualité d'un modèle de surface, les débits des fleuves ou les données hydrologiques observées par le satellite seront employés pour être comparés avec les quantités simulées. Donc, plus la période de la simulation est longue, plus grande est la chance de trouver des débits de fleuves observés.

Toutes ces raisons nous ont poussé à tout mettre en œuvre pour faire des simulations longues avec notre modèle de surface ORCHIDEE. Pour un tel but, il nous faut un forçage atmosphérique de bonne qualité et de période longue. Nous avons construit un tel forçage, appelé NCC, pour la période de 1948-2000 avec une résolution spatiale de $1^\circ \times 1^\circ$ sur tout le globe et une résolution temporelle de 6 heures.

Le travail a débuté par la construction de 53 ans (1948-2000) de forçages atmosphériques à partir des données NCEP/NCAR Réanalyses [Kistler et al., 2001]. Ces données ont été interpolées sur une maille $1^\circ \times 1^\circ$ en tenant compte de la différence d'orographie entre la nouvelle maille et la maille de NCEP/NCAR. On a ensuite effectué des corrections des réanalyses. Les valeurs mensuelles des précipitations et des températures de CRU (Climate Research Unit) [New et al., 1999; New et al., 2000] et des rayonnements SRB (Surface Radiation Budget) produits au NASA/Langley Research Center ont été utilisées pour ajuster celles des données NCEP/NCAR. L'ajustement de température influence la pression à la surface, l'humidité spécifique et la partition entre la neige et la pluie car ces variables dépendent de la température.

Expériences numériques

Nous avons fait 4 simulations numériques, qui utilisent les forçages obtenus à chaque étape de correction des réanalyses pour forcer ORCHIDEE : NCEP (NCEP/NCAR réanalyses interpolées sur la maille $1^\circ \times 1^\circ$), NPRE (NCEP/NCAR corrigé par CRU précipitation), NCRU (NPRE corrigé par CRU température) et NCC (NCRU corrigé par SRB rayonnements). Les sorties de ces simulations sont respectivement appelées NCEP, NPRE, NCRU, NCC. La comparaison de ces sorties entre elles montre la nécessité de faire les corrections des réanalyses ainsi que la qualité de NCC.

Résultats et discussions

On a fait la comparaison des débits des 10 plus grands fleuves du monde (caractérisés par le débit estimé à l'embouchure) simulés par les 4 expériences avec les observations. Cette comparaison a été faite à l'aide du diagramme de Taylor (Fig. 7) [Taylor, 2001]. Le diagramme de Taylor est une forme schématique qui donne des informations statistiques (écart-type et corrélation) sur la similitude entre les modèles et les observations. Sur le diagramme, le point de référence (observation) se trouve sur le point d'unité de l'abscisse.

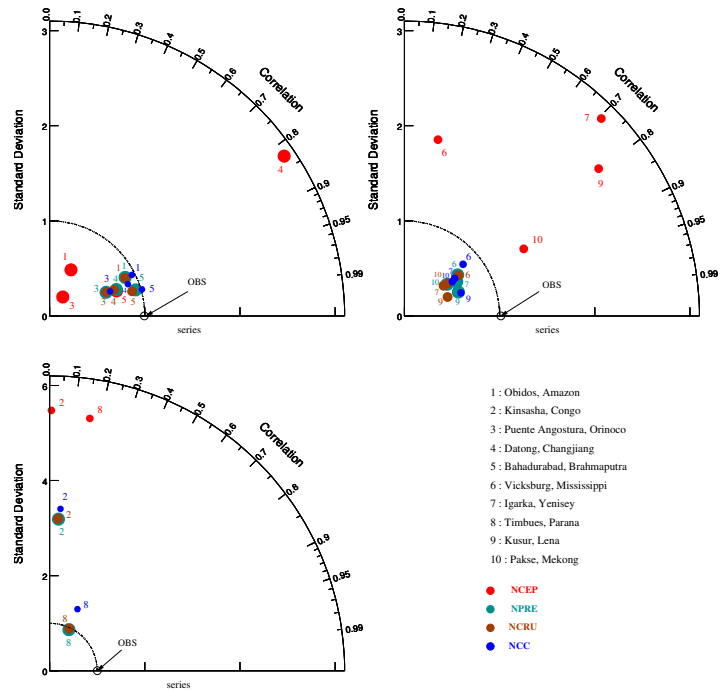


FIG. 7 – Le diagramme de Taylor donne les statistiques des débits mensuels des 10 plus grands fleuves du monde simulés par les expériences NCEP, NPRE, NCRU et NCC comparés avec les observations. Figure extraite de *Ngo-Duc et al.* [2004, soumis à *J. Geophys. Res.*]

Pour presque tous ces bassins, nous avons montré que les données ont une meilleure qualité après chaque correction. Les débits simulés de l'Amazone, le Changjiang et le Brahmaputre sont tout à fait réalistes. Les débits obtenus avec NPRE montrent une amélioration importante comparée à ceux obtenus avec NCEP, et montrent donc que la mauvaise qualité de précipitation d'entrée est la cause principale de la mauvaise qualité des débits simulés. La correction de température (NCRU) a un léger effet sur les débits des fleuves aux basses et moyennes latitudes. Dans les hautes latitudes, la correction de température devient plus importante parce que le changement de température affectera également la précipitation (partition entre la pluie et la neige), qui change par conséquent les processus sur la surface. La correction de rayonnement (NCC) améliore la qualité de forçage, particulièrement pour les amplitudes des débits. Cette correction n'a presque aucun effet sur les phases.

Pour les deux stations Kinshasa (bassin Congo) et Timbues (bassin Paraná), les débits simulés sont très différents des observations pour toutes les expériences. Mis à part le fait que la précipitation dans ces régions peut être mal évaluée, ce problème peut également être expliqué par le fait qu'ORCHIDEE ne représente pas correctement un certain nombre de phénomènes : la perte d'eau employée par l'irrigation, par les villes, le rôle des barrages ou encore des plaines d'inondation.

La construction de NCC est une étape importante pour la compréhension de l'évolution du cycle de l'eau continentale au cours des 50 dernières années. Elle nous permet de valider la capacité des modèles de surface en répondant à la variabilité inter-annuelle de forçage atmosphérique et nous permet également de raffiner des études de l'impact du changement de climat sur le cycle de l'eau.

Références

- [1] Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. V. den Dool, R. Jenne, and M. Fiorino, 2001 : The NCEP-NCAR 50-year reanalysis : monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **82**,247–267.
- [2] New, M., M. Hulme, and P. Jones, 1999 : Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I : Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, **12**,829–856.
- [3] New, M., M. Hulme, and P. Jones, 2000 : Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II : Development of a 1901-90 mean monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate*, **13**,2217–2238.
- [4] Ngo-duc, T., J. Polcher, and K. Laval, 2004 : A 53 year forcing data set for land surface models. *Journal of Geophysical Research*, soumis.

- [5] Taylor, K. E., 2001 : Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, **106** (D7),7183–7192.

Thanh NGO-DUC (LMD)
thanh.ngo-duc@lmd.jussieu.fr
Jan Polcher (LMD)
Jan.Polcher@lmd.jussieu.fr
Katia Laval (LMD)
Katia.Laval@lmd.jussieu.fr

Optimisation de paramètres du modèle ORCHIDEE

En comparant des mesures de flux turbulents de carbone, d'eau, d'énergie et de rayonnement net avec les sorties correspondantes d'ORCHIDEE, nous avons ajusté, par un processus itératif d'optimisation bayésienne, certains paramètres d'ORCHIDEE afin de minimiser l'écart entre modèle et observations. De plus, nous évaluons à l'issue de l'optimisation, l'incertitude a posteriori sur les valeurs optimisées. Finalement, l'analyse des valeurs ajustées des paramètres ainsi que leur incertitude nous permettent :

1. de déterminer quels sont les paramètres bien contraints par l'optimisation.
2. de mettre l'accent sur des lacunes structurelles du modèle.

On évalue aussi le contenu en information des données utilisées par l'optimisation. Une vision plus exhaustive de l'étude ici présentée se trouve sur le site d'ORCHIDEE :

<http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssipsl>

Cadre de l'optimisation

Nous utilisons des mesures semi-horaires de flux net de CO₂ (NEE), de flux de chaleur latente (LE), de flux de chaleur sensible (H) et de rayonnement net (R_n) qui ont été effectuées sur le site du Bray (44°43N 0°46W, près de Bordeaux) en 1997 dans le cadre du projet FLUXNET (Baldocchi et al. 2001). De ce fait, nous restreignons le cadre de notre étude à un écosystème particulier qui est celui du Pin (*Pinus pinaster*). D'autre part, nous avons effectué deux types d'optimisation : pour la première, dite de type "GS", nous utilisons une période de 3 semaines de données durant l'été 1997 afin d'utiliser l'information contenue dans le cycle diurne au pic de la saison de croissance. Pour la deuxième optimisation, dite de type "FY",

nous utilisons l'année entière d'observations afin de prendre en compte le cycle saisonnier dans l'optimisation.

Les paramètres que nous avons choisis d'optimiser sont associés aux principaux processus entrant en compte dans la modélisation des échanges de CO₂, d'eau et d'énergie entre l'atmosphère et la biosphère au sein d'ORCHIDEE (Table 2). Remarquons que la plupart de ces paramètres sont des facteurs multiplicatifs de variables du modèle (K_{vmax} , K_{mr} , K_{hr} , K_{zo} , K_{ra} , K_{csoil} , K_{alb}). Leur valeur a priori est donc l'unité alors que celle des autres paramètres correspond directement aux valeurs standard d'ORCHIDEE pour cet écosystème (β , f_{stress} , K_{gr} , Q_{mr} , Q_{10}).

Le but de l'optimisation est alors de trouver un jeu de paramètres qui minimise l'écart entre les sorties du modèle et les observations correspondantes tout en garantissant une valeur physiquement acceptable pour les valeurs optimisées. Pour ce faire, on va chercher le minimum d'une fonction coût dite bayésienne :

$$J(x) = \frac{1}{2} \left[(y - H(x))^t R^{-1} (y - H(x)) + (x - x_b)^t P_b^{-1} (x - x_b) \right]$$

x est le vecteur paramètre (de dimension 12), x_b le vecteur paramètre a priori, y le vecteur observation (dimension pour l'optimisation de type "GS" : 21x48x4), $H(x)$ représente les sorties du modèle. R est la matrice d'erreur sur les observations que nous considérons comme diagonale (pas de corrélation entre les erreurs sur les observations). P_b est la matrice d'erreur sur la valeur a priori des paramètres que nous prenons aussi comme diagonale. Pour la plupart des paramètres, l'incertitude a priori est prise égale à 100% de la valeur à priori du paramètre. Pour plus de précisions sur le formalisme bayésien, voir l'ouvrage de A. Tarantola (1987). Compte tenu de la non linéarité d'ORCHIDEE par rapport à ces paramètres, nous utilisons un schéma itératif de type BFGS afin de trouver le minimum de la fonction coût. Cet algorithme nécessite à chaque itération le calcul de la fonction coût et de son gradient approché par différences finies. D'autre part, cet algorithme permet d'imposer les intervalles au sein desquels doivent rester les valeurs des paramètres au cours de l'optimisation (Table 2), on évite ainsi d'explorer des zones irréalistes dans l'espace des paramètres. Après convergence de l'algorithme, on évalue l'erreur a posteriori sur les paramètres optimaux en calculant, sous l'hypothèse de linéarité locale (approximation), la matrice des erreurs a posteriori :

$$P_a = [H_\infty^t R^{-1} H_\infty + P_b^{-1}]^{-1}$$

H_∞^t est la matrice représentant les dérivées de

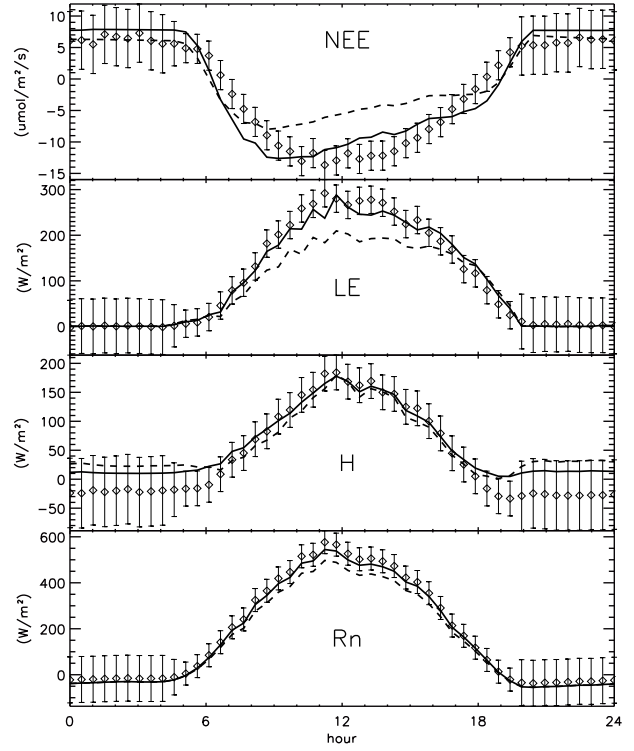


FIG. 8 – Cycles diurnes moyens observés (symbole, plus barres d'erreur) et modélisés (valeurs a priori en tireté, et valeurs ajustées en traits pleins) pour l'optimisation sur la période de 22 jours.

chaque sortie par rapport à chaque paramètre au minimum de la fonction coût.

Ajustement aux données

La figure 8 représente pour chaque type de donnée le cycle diurne moyen observé et modélisé, représentatif dans l'optimisation de type "GS" (saison de croissance, jours 195-216). L'optimisation corrige de manière satisfaisante l'amplitude du cycle diurne a priori pour la NEE, le flux de chaleur latente et la radiation nette. Néanmoins, le modèle optimisé n'arrive pas à reproduire le flux de chaleur sensible observé la nuit, ce qui met en évidence un problème lié à l'utilisation d'une seule température pour toute la canopée qui ne permet pas de simuler correctement le flux de chaleur sensible la nuit où une inversion du gradient de température au sein de la canopée a probablement lieu. D'autre part, il reste un problème de phase entre la NEE observée et modélisée le matin et le soir ; celui-ci est dû en partie à un problème sur les mesures mais aussi probablement à la non prise en compte du rayonnement diffus dans le calcul de la photosynthèse par le modèle.

La figure 9 montre le cycle saisonnier pour les observations, le modèle à priori et pour le modèle

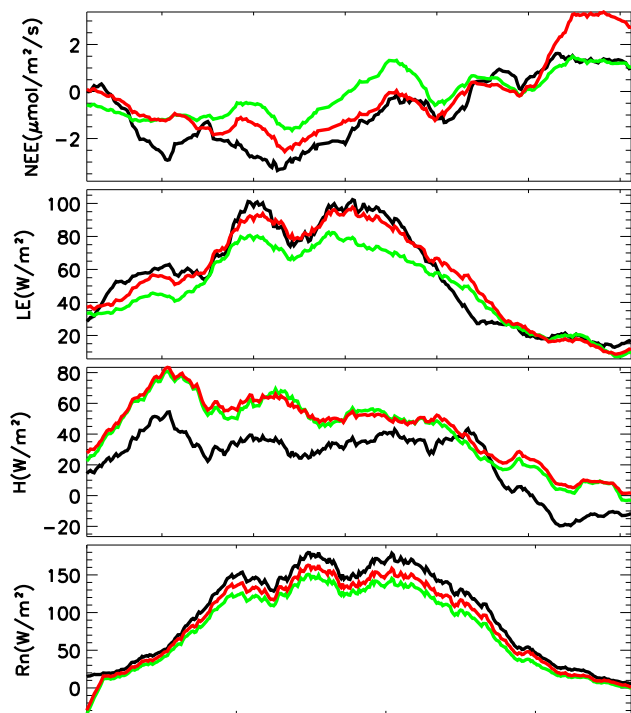


FIG. 9 – Cycles saisonniers observés (courbes en noir) et modélisés (valeurs a priori en vert, et valeurs optimisées en rouge) pour l’optimisation sur la période totale annuelle (cas “FY”, toutes les valeurs pour 1997) pour la NEE, le flux de chaleur latente LE, de chaleur sensible H et le rayonnement net Rn.

dont les paramètres sont déduits de l’optimisation utilisant toutes les données de l’année 1997 (cas “FY”). L’ajustement aux observations du flux net de CO₂ n’est que faiblement amélioré, avec un problème majeur au niveau de la respiration hivernale qui est fortement surestimée. De même, l’optimisation n’a pas du tout corrigé l’écart important qui existait entre le cycle saisonnier du flux de chaleur sensible modélisé a priori et celui des observations. Fort heureusement, le cycle saisonnier du flux de chaleur latente et de la radiation nette observés sont quant à eux correctement reproduits par le modèle optimisé. Cette déficience dans l’optimisation saisonnière est à relier aux contenus en information du cycle diurne qui écrase fortement celui du cycle saisonnier, de par l’utilisation d’observations semi-horaires.

Valeurs et incertitudes des paramètres optimisés

L’analyse de la table 2 et de la figure 10 fait tout d’abord ressortir que les paramètres peuvent être scindés en deux catégories : tout d’abord, les paramètres bien contraints dont la réduction

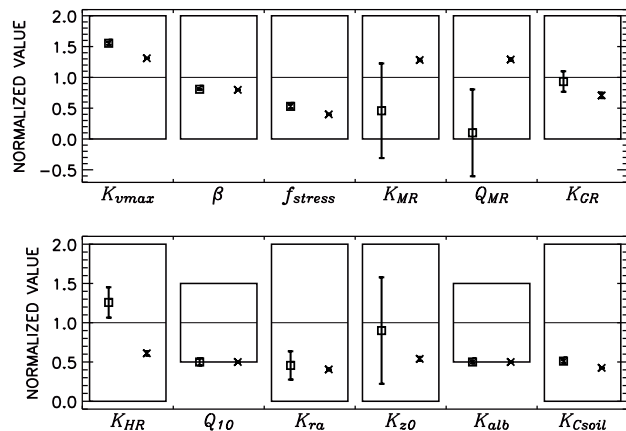


FIG. 10 – Paramètres et erreurs associées. Les valeurs optimisées sont normalisées par rapport aux valeurs a priori (ligne horizontale de chaque boîte centrée à un). La demi-hauteur de chaque boîte correspond à l’incertitude a priori. Dans chaque boîte sont ensuite reportées les valeurs optimisées des paramètres et leur incertitude pour l’optimisation sur les 3 semaines de la saison de croissance (cas “GS”, symboles carrés) et pour l’optimisation sur toute l’année (cas “FY”, croix).

d’incertitude est importante et dont les valeurs pour les deux types d’optimisation sont proches (K_{vmax} , β , f_{stress} , Q_{10} , K_{alb} et K_{csoil}). Pour ce type de paramètre, les valeurs optimisées sont robustes et peuvent donner lieu à une interprétation biogéochimique. Ensuite, il existe des paramètres peu contraints où la réduction d’incertitude est relativement faible et où les valeurs optimisées pour chaque type d’optimisation peuvent être très différentes (K_{mr} , Q_{mr} , K_{gr} , K_{hr} , K_{ra} et K_{zo}). Ces paramètres, associés principalement aux différentes respirations, sont peu contraints du fait qu’ils sont liés à des processus relativement lents, et parce que l’optimisation utilisant des données semi-horaires privilégie l’information contenue dans le cycle diurne au détriment de celle contenue dans le cycle saisonnier. La faible contrainte sur les paramètres associés au calcul de la résistance aérodynamique (K_{ra} et K_{zo}) s’explique plutôt par la faible sensibilité du flux de chaleur latente modélisé par rapport à ces paramètres, du fait de la prépondérance de la résistance stomatale par rapport à la résistance aérodynamique. Ensuite, les valeurs optimisées des paramètres Q_{10} et K_{alb} sont particulièrement intéressantes car elles sont égales à la borne inférieure de l’intervalle où ces paramètres gardent un sens physique. Ce comportement montre que l’optimisation conduit à donner à ces paramètres des valeurs physiquement aberrantes, ce qui nous a permis de mettre en évidence des lacunes

Params et unités	Processus	range	Valeur initial	Valeur optimisée (GS)	Valeur optimisée (FY)	Error reduction (GS)	Error reduction (FY)
Photosynthèse							
$K_{vmax}(-)$	Taux max. de carboxylation	0.1-2	1.	1.55	1.31	97.6%	99.5%
Photosynthèse et transpiration							
$\beta(-)$	Conductance stomatale	0.9-18	9.	7.29	7.38	98.6%	99.9%
$f_{stress}(-)$	Stress hydrique	0.05-1.	0.5	0.25	0.45	97%	98.5%
Respiration							
$K_{mr}(-)$	Respiration de maintenance (RM)	0.1-2.	1.	0.47	1.52	24%	96.7%
$Q_{mr}(K^{-1})$	Contrôle thermique de la RM	0.02-0.33	1/6.	0.02(EH)	1.49	31%	96.7%
$K_{gr}(-)$	Respiration de croissance	0.028-					
$K_{hr}(-)$	Respiration hétérotrophe (RH)	0.1-2.	1.	1.24	0.35	80%	98.5%
$Q_{10}(-)$	Contrôle thermique de la RH	1.4.	2.	1.(EH)	1.(EH)	95.5%	98.7%
Transport turbulent							
$K_{ra}(-)$	Résistance aérodynamique	0.1-2.	1.	0.47	0.43	75%	99.6%
$K_{zo}(-)$	Longueur de rugosité	0.1-2.	1.	0.73	0.5	26%	98.6%
Bilan d'énergie							
$K_{csoil}(-)$	Capacité thermique du sol	0.1-2.	1.	0.55	0.5	98%	99.4%
$K_{alb}(-)$	Albedo	0.5-2.	1.	0.5(EH)	0.5(EH)	97.7%	99.8%

TAB. 2 – Paramètres optimisés groupés par processus importants. La deuxième colonne précise le processus ou la variable associée au paramètre. La troisième colonne montre l'intervalle où on considère que le paramètre garde une valeur physiquement acceptable. Les quatre dernières colonnes donnent les valeurs optimisées ainsi que les réductions d'incertitude pour chaque type d'optimisation (voir texte).

structurelles du modèle. Dans le cas de K_{alb} , l'optimisation fait décroître l'albédo calculée par ORCHIDEE jusqu'à des valeurs inférieures à 0.1, mettant en évidence un problème au niveau du calcul du bilan d'énergie par le modèle. Dans le cas du Q_{10} , la valeur optimisée est égale à 1, ce qui a pour conséquence d'éliminer le contrôle thermique de la respiration hétérotrophe. Ce contrôle initialement élaboré pour des variations saisonnières de la respiration du sol, n'est donc plus valable à l'échelle diurne privilégiée par l'optimisation utilisant des données semi-horaires. Cependant, de manière plus positive, l'augmentation de 30% des taux de carboxylation maximale (par rapport à leur valeur à priori pour ce type d'écosystème) prédite par l'optimisation de K_{vmax} est corroborée par des mesures indépendantes effectuées sur le terrain (Porté et al. 1998)

Perspectives

Dans les prochains mois, nous allons inclure de nouveaux paramètres associés par exemple à la phénologie ou l'allocation dont l'optimisation pourrait nous permettre d'améliorer le fit au cycle saisonnier. La méthode d'optimisation sera aussi modifiée afin qu'elle puisse saisir de manière équilibrée l'information contenue dans le cycle diurne par rapport au

cycle saisonnier des observations. Finalement, l'optimisation sera étendue à d'autres sites de mesures afin d'étudier l'influence du climat et du type de biome sur la valeur des paramètres optimisés.

Références :

- Baldocchi, D. D., E. Falge, et al. (2001). FLUXNET : a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of American Meteorological Society* 82(11) : 2415-2434.
- Porté, A. and D. Loustau (1998). Variability of the photosynthetic characteristics of mature needles within the crown of a 25-year old *Pinus pinaster*. *Tree physiology* 18 : 223-232.
- Tarantola, A. (1987). *Inverse problem theory : Methods for data fitting and parameter estimation*. Amsterdam, Elsevier.

Diego Santaren (LSCE)
Diego.Santaren@cea.fr
Philippe Peylin (BIOMCO)
philippe.peylin@grignon.inra.fr
Nicolas Viovy (LSCE)
Nicolas.Viovy@cea.fr
Philippe Ciais (LSCE)
Philippe.Ciais@cea.fr

6 Dynamique - transport

La suite au prochain numéro...

7 Chimie - aérosols - climat

Effet radiatif des aérosols dans les ondes longues

Nous avons réactivé la possibilité d'introduire les effets radiatifs des aérosols dans le domaine infrarouge dans la version lilloise du modèle LMDZ-aérosols. Le code de transfert de rayonnement dans le domaine des ondes longues ne traitant pas la diffusion, nous prescrivons uniquement l'épaisseur optique d'absorption des aérosols de manière à privilégier un bilan radiatif correct au sommet de l'atmosphère, au détriment d'une représentation exacte du bilan radiatif à la surface (Dufresne et al., 2002). Compte-tenu des larges variations spectrales des propriétés optiques des aérosols dans le domaine infrarouge et du faible nombre de bandes spectrales du code actuel, il convient de moyenniser ces propriétés optiques de manière propre. Cela est fait en calculant le coefficient d'absorption des aérosols à une résolution assez fine puis en le pondérant par l'émission d'un corps noir à une température assez froide, de manière à prendre en compte le fait que ce sont les aérosols les plus hauts qui contribuent le plus au forçage radiatif au sommet de l'atmosphère. Les forçages radiatifs des poussières désertiques dans l'infrarouge ressortent respectivement à $+0.33$ et $+0.23$ Wm^{-2} en ciel clair et en total. Ceux des sels marins sont un peu inférieurs à $+0.21$ et $+0.11$ Wm^{-2} (Fig. 11). L'effet de serre des aérosols industriels représente entre 10% et 15% de leur forçage radiatif dans le domaine solaire (Reddy et al., 2005).

Références :

J.-L. Dufresne, C. Gautier, P. Richiazzi, and Y. Fouquart, Longwave scattering effects of mineral aerosols, *Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 1959-1966, 2002.

M. Shekar Reddy, O. Boucher, N. Bellouin M. Schulz, Y. Balkanski, M. Pham, and J.-L. Dufresne, Estimates of global multi-component aerosol optical depth and direct radiative perturbation in the LMDZT General Circulation Model, *Journal of Geophysical Research*, sous presse, 2005.

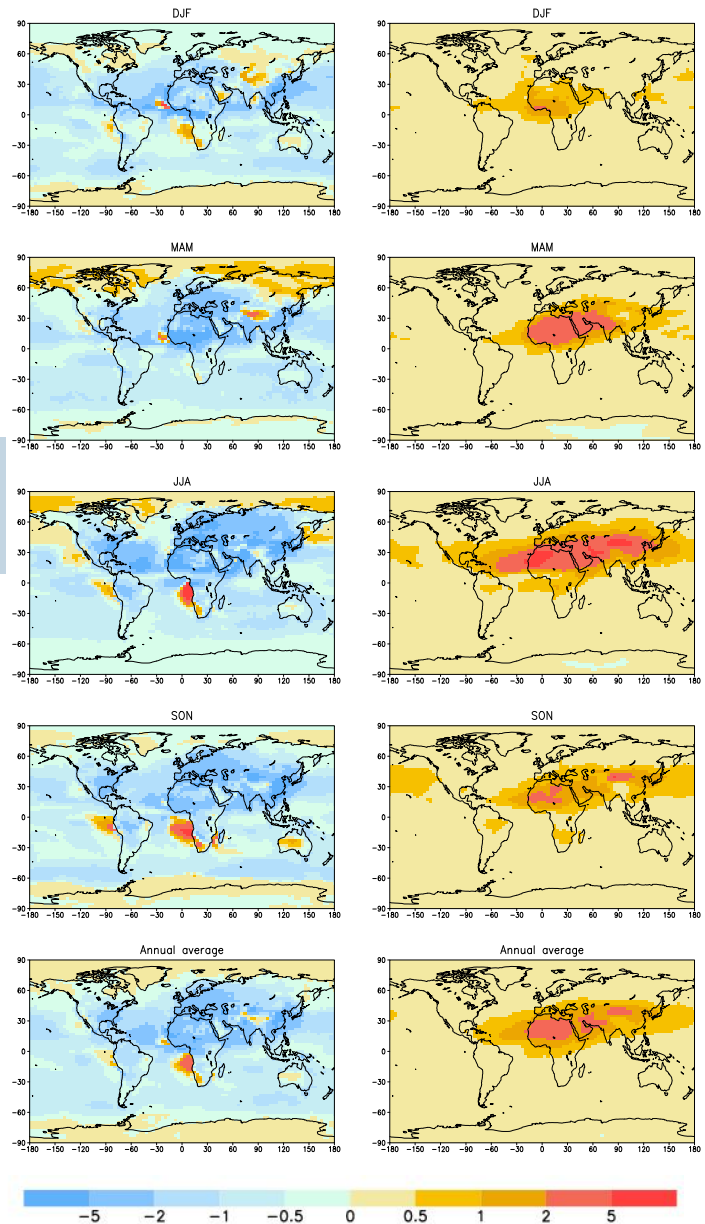


FIG. 11 – Perturbation radiative directe des aérosols en ondes courtes (colonne de gauche) et en ondes longues (colonne de droite) en Wm^{-2} .

Olivier Boucher (LOA)
boucher@loa.univ-lille1.fr
Jean-Louis Dufresne (LMD)
dufresne@lmd.jussieu.fr
Shekar Reddy (GFDL)
shekar.reddy@noaa.gov

8 Climatologie - méthodes de validation

La suite au prochain numéro...

9 Les planètes

Titan dévoilé

Titan fait partie de ces objets fascinants du système solaire révélés par l'épopée Voyager. En 1981, les responsables des missions Voyager choisissent de privilégier pour la sonde Voyager 1 de survoler Titan plutôt que de poursuivre leur course vers Uranus et Neptune (périple magistralement réussi ensuite par Voyager 2). On sait en effet à l'époque que Titan est, avec la Terre, le seul corps tellurique du système solaire entouré d'une atmosphère dense d'azote (1,5 bar à la surface). Les photos renvoyées vers la Terre sont très décevantes. Une épaisse couche de brume orangée voile entièrement la surface (Fig. 12B). Tout juste peut-on distinguer un léger contraste entre les deux hémisphères, signe probable d'un effet saisonnier. Les mesures spectroscopiques permettent en revanche d'identifier un grand nombre de composés chimiques, hydrocarbures et nitriles. Ces espèces chimiques (dont on pense que certaines pourraient s'apparenter à des acides aminés), créées dans la très haute atmosphère à partir de la photo-dissociation de l'azote moléculaire et du méthane (second constituant atmosphérique) sont ensuite transportées vers le bas dans la stratosphère où on pense qu'elles polymérisent pour donner naissance à la brume orange (Fig. 12A). L'analyse des contrastes latitudinaux de température dans la stratosphère suggère également que l'atmosphère tourne beaucoup plus vite que le satellite, lui-même en phase bloquée autour de Saturne, avec une durée du jour de 16 jours terrestres environ. Si la direction de la rotation de l'atmosphère ne peut être obtenue à partir des observations de la température, l'analogie avec Vénus ainsi que des arguments théoriques, suggèrent que l'atmosphère est en régime de "superrotation", l'atmosphère vers 200 km tournant une dizaine de fois plus vite que la surface, et dans la même direction.

Suite au passage des sondes Voyager, une mission est programmée vers Saturne, sous l'impulsion de Toby Owen et Daniel Gautier (LESIA). La sonde américaine Cassini devra se consacrer au système de Saturne et emmener à son bord la sonde européenne Huygens qui plongera dans l'atmosphère de Titan. Contrat rempli. On peut mesurer sur la figure 12 le changement de point de vue au fil du temps. Avant l'arrivée de Cassini, le progrès de l'observation depuis le sol (interférométrie, optique adaptative) ou depuis des instruments en orbites (avec le Hubble Space Telescope), et la découverte de fenêtres spectrales dans le proche infrarouge, avaient déjà permis de révéler des structures à la surface (une grande zone plus brillante que le reste) et des nuages (Fig. 12C). Les premières images de Cassini ont amené les premières surprises. Les contrastes entre zones sombres et claires de la surface sont en fait très marqués (Fig. 12D), à la manière de côtes ou de bords d'un glacier. Les nuages qui apparaissaient très grossièrement depuis la Terre sont en fait morcelés. Enfin, la plongée de Huygens, magnifique réussite technologique, a révélé sous la brume des paysages incroyablement familiers (Fig. 12E). A Darmstadt (où étaient réceptionnées les images), les scientifiques italiens et français se sont querellés pour savoir s'il s'agissait de la Riviera ou de la côte d'Azur. Alcatel a tranché : il s'agit de Cannes. Mais d'autres interprétations sont proposées : Alger et sa rade (Michel Capderou), le lac de Roselend en Savoie (Sandrine Bony), Chicago et le lac Michigan (Ray Pierrehumbert), une arrivée à la voile dans un port de Bretagne (Jean-Louis Dufresne)... L'image évoque en tous cas un rivage avec peut-être, au premier plan, un lac ou un océan de méthane ou d'éthane liquide.

Un défi pour la modélisation du climat

Au début des années 90, sous la houlette de Daniel Gautier (LESIA) et Christopher P. McKay (NASA/Ames), différents travaux de modélisation sont entrepris pour interpréter les résultats des missions Voyager et préparer la mission Cassini-Huygens. Le modèle de circulation du LMD est adapté aux conditions de Titan (Hourdin et al., 1995) et prédit effectivement une forte superrotation sur Titan, avec des vents de 100 m s^{-1} à l'équateur, vers 200 km d'altitude, pour une rotation équatoriale de Titan de seulement 11 m s^{-1} . Cette superrotation a depuis été confirmée par des mesures Doppler. Dans les simulations numériques, c'est la circulation méridienne qui, en moyenne sur l'année, transporte

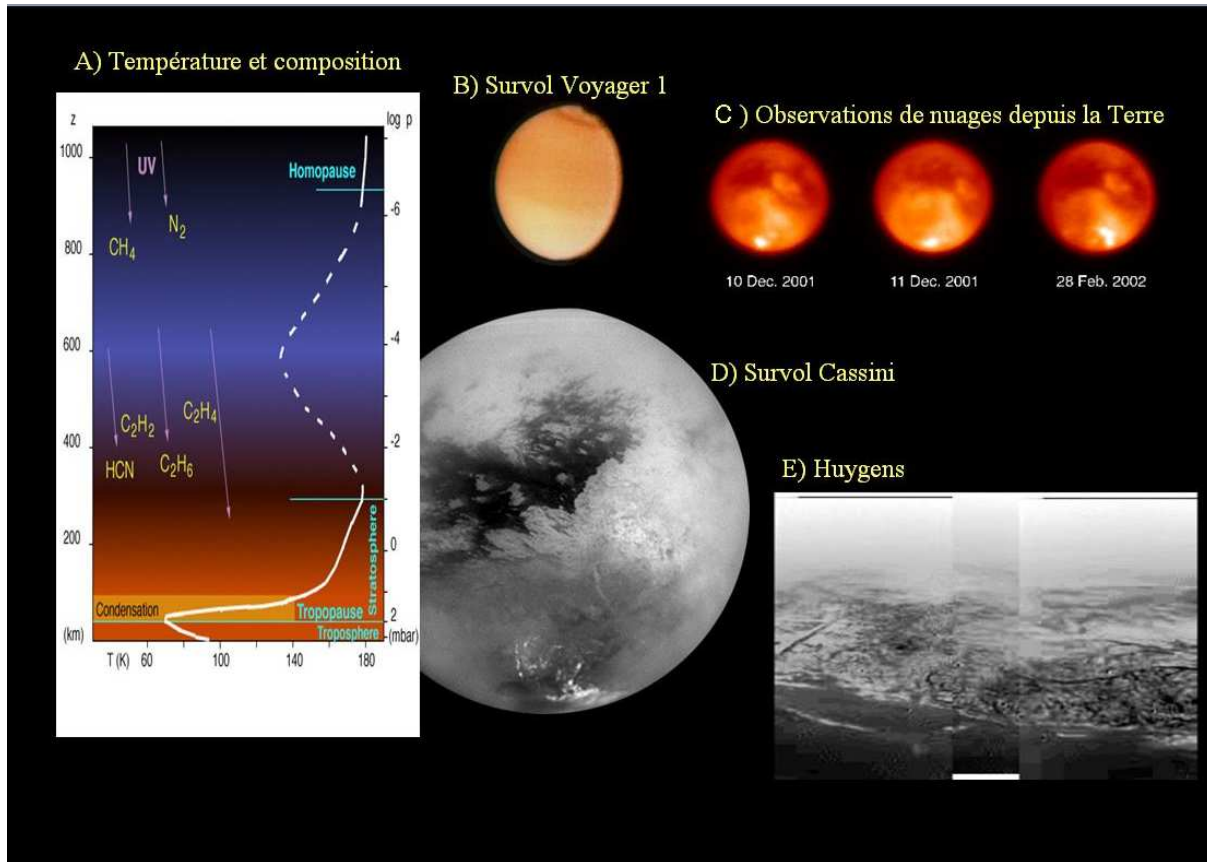


FIG. 12 – Titan en quelques images. A) Profil vertical de température et schéma explicatif de la composition de l’atmosphère. B) Photo Voyager 1 montrant des contrastes latitudinaux d’albédo dans la brume orange. C) Images dans le proche infrarouge prises depuis la Terre (avec le télescope du Keck) et montrant des contrastes sous la couche de brume. La zone un peu plus claire correspond à une zone claire en surface et les points brillants, près du pôle sud, à des nuages. D) Photo prise par Cassini dans le proche infrarouge montrant à la fois des contrastes très bien délimités entre régions sombres et claires et des nuages morcelés. E) Photo prise par Huygens à 8 km du sol de Titan et montrant l’apparence d’un rivage au bord d’un grand lac de méthane.

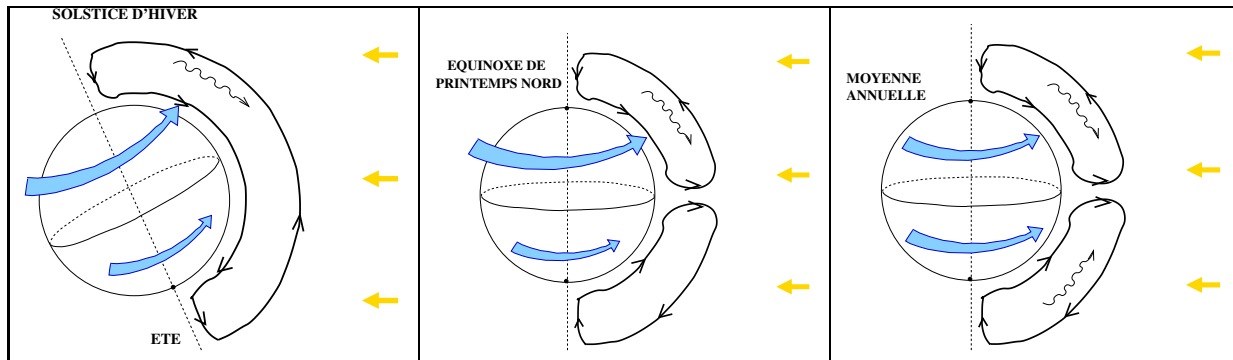


FIG. 13 – Description schématique de la circulation méridienne moyenne sur Titan : à gauche au solstice d’hiver nord, au milieu à l’équinoxe et à droite en moyenne annuelle. Les flèches bleues représentent les jets zonaux, avec un jet particulièrement marqué dans l’hémisphère nord au solstice. Ce jet persiste en fait à l’équinoxe de printemps et c’est seulement en moyenne annuelle que les vents zonaux sont symétriques comme indiqué sur le graphique de droite. Les ondes sont plus développées sur le flanc équatorial du jet hivernal. En moyenne sur l’année, ces ondes transportent le moment cinétique vers l’équateur dans la branche haute de la cellule de Hadley.

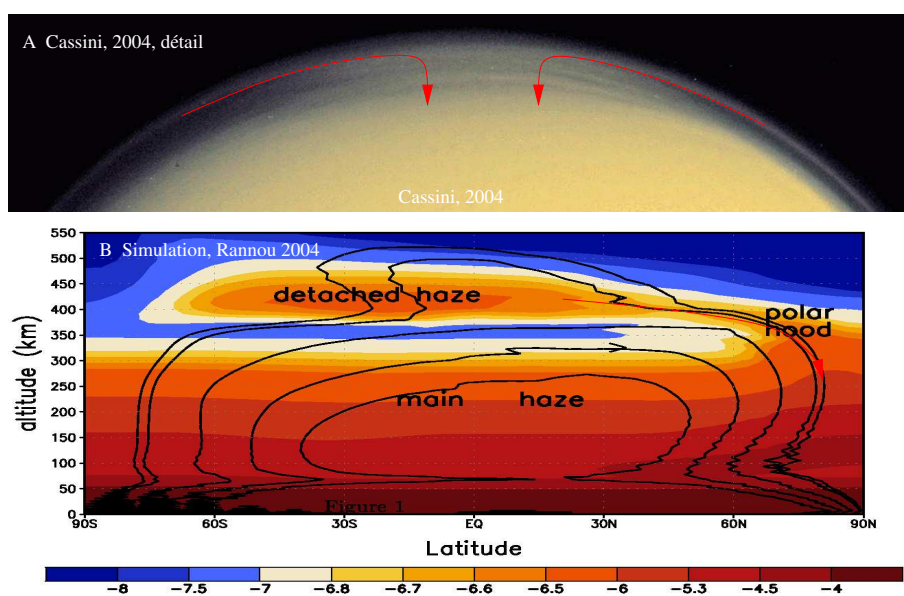


FIG. 14 – La couche détachée de brume.

A : Photo prise par Cassini le 24 octobre 2004 avec un filtre dans l’UV proche à une distance d’un million de kilomètres. Le soleil illumine principalement l’hémisphère sud à cette époque de l’année. La brume au pôle nord est illuminée par le soleil parce qu’elle est suffisamment haute mais la surface de la planète est dans la nuit (Source : NASA/JPL/Space Science Institute).

B : Distribution de l’extinction de la brume simulée par le modèle climatique de Titan dans le plan méridien. Les niveaux de couleurs correspondent au log de l’extinction normalisée. La brume détachée apparaît comme une couche secondaire à 400 km, surplombant la couche principale (en dessous de 300 km). La brume s’accumule de façon préférentielle au pôle d’hiver et le maximum perdure encore en été (bien que très affaibli). La fonction de courant de la circulation méridienne moyenne dans la saison qui précède ($L_s = 274^\circ - 353^\circ$) est superposée sur la brume.

vers le haut plus de moment cinétique dans les zones équatoriales que vers le bas dans les hautes latitudes. Cette circulation méridienne est dominée pendant une longue saison autour d’un solstice par une cellule méridienne de type Hadley, mais courant d’un pôle à l’autre. Le transport de moment cinétique par cette cellule conduit à la création d’un jet intense, qui finit par devenir instable (instabilité barotrope) et par nourrir des ondes qui transportent le moment cinétique vers l’équateur. Sur une base annuelle, ces ondes compensent le transport vers les pôles de moment cinétique par deux cellules symétriques, permettant de maintenir un excès de moment cinétique dans les basses latitudes (Fig. 13).

En parallèle, des modèles spécifiques unidimensionnels sont développés pour la photochimie (Toublanc et al., 1995) et la microphysique des brumes (Cabane et al., 1992, Rannou et al., 1995). Il apparaît cependant rapidement que les différentes composantes de ces systèmes sont fortement couplées. Les brumes sont formées par la polymérisation des constituants chimiques et peuvent servir également de noyaux de condensation à ces dernières au niveau de la troposphère glaciale de Titan (70 K environ). Brumes et espèces chimiques sont évidemment transportées par les vents. En retour, les contrastes latitudinaux de la composition sont suspectés de

jouer un rôle dans le forçage de la circulation. Vers 1996, nous commençons avec Michel Cabane et Dominique Toublanc à envisager de réunir les différents efforts de modélisation pour s’attaquer à ce système climatique complexe.

En 1998, lors du colloque quadriennal du Programme National de Planétologie, le programme est déjà clair (Hourdin et al., 1998) : *“L’arrivée sur Titan de la mission Cassini-Huygens est sans doute une des dernières occasions avant des décennies d’explorer un système physique analogue à la Terre mais encore très mal connu. Pour l’atmosphère et le climat en particulier, c’est une occasion unique avant longtemps de mettre à l’épreuve pour une planète tellurique les théories et modèles développés dans le contexte terrestre. [...] [La mise en évidence] de l’importance des couplages entre dynamique, chimie et microphysique des brumes, nous a conduit à bâtir et à proposer au PNP pour les années à venir, un projet de modélisation du climat de Titan intégrant ces différentes composantes. L’enjeu est d’importance et la tâche ardue quand on connaît les problèmes rencontrés dans la modélisation de ces problèmes sur Terre. Mais la perspective de la confrontation du modèle aux observations de la mission Cassini-Huygens en 2005 en font [un objectif] scientifique de tout premier plan.”*

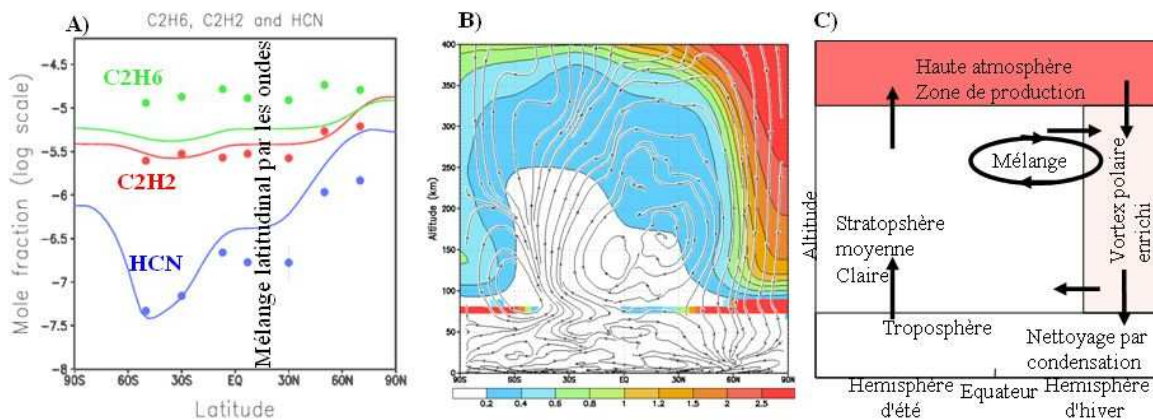


FIG. 15 – Mécanismes de contrôle des contrastes latitudinaux des espèces chimiques dans la stratosphère de Titan. A) Variations latitudinales de concentrations observées par Voyager (points) et simulées (courbes) pour les trois espèces chimiques principales. A cette saison, les hautes latitudes de l’hémisphère nord sortent de la nuit polaire, dans laquelle la branche descendante d’une grande cellule pôle-à-pôle a accumulé les espèces chimiques produites plus haut. B) La circulation méridienne moyenne pendant l’hiver nord est superposée à la distribution du rapport de mélange de HCN (en log, couleurs). Les petits carrés colorés correspondent pour leur part au taux de condensation de HCN, à son approche de la tropopause. La circulation méridienne crée également un jet zonal très intense (non montré) vers 200 km d’altitude dans les moyennes latitudes de l’hémisphère nord. L’instabilité générée par ce jet alimente des ondes qui mélangent les espèces en latitude. C) Vision schématique du contrôle des contrastes latitudinaux des espèces chimiques.

Après une mise en route souvent ardue, le modèle couplé a bien été développé. Un des résultats les plus spectaculaires, déjà relaté dans un numéro précédent, concerne la structure de la brume et son couplage avec les vents (Rannou et al., 2002). Cette brume, formée dans la haute atmosphère, est d’abord soufflée vers les pôles où elle s’accumule et sédimente, avant d’être redistribuée plus bas vers les basses latitudes. Ceci explique la double structure observée dans la brume avec une couche détachée et une couche principale, et observée à nouveau récemment par Cassini (Fig 14). L’accumulation de brume, maximum dans la nuit polaire, renforce le refroidissement radiatif vers l’espace. Sur une base annuelle, ce refroidissement des hautes latitudes vient renforcer les contrastes d’insolation entre équateur et pôle (l’obliquité de Titan est très proche de celle de la Terre). L’effet additionnel de la brume est en fait aussi important sur Titan que le forçage initial par l’insolation (Rannou et al., 2004).

Le modèle a également permis d’expliquer les contrastes latitudinaux observés dans la composition chimique (Lebonnois et al., 2001, Lebonnois et al., 2003, Hourdin et al., 2004). Comme pour la brume, les espèces chimiques, formées dans la très haute atmosphère, sont transportées vers le bas dans la nuit polaire. Les températures sont tellement froides à la tropopause (70 K) que ces espèces condensent (“Nettoyage par condensation”,

Fig 15C). L’air remontant de la tropopause dans les tropiques de l’hémisphère d’été est donc beaucoup moins riche en espèces chimiques. Les contrastes latitudinaux de composition (Fig 15A) sont donc contrôlés par le transport vertical, qui tend à les renforcer, et le mélange latitudinal par les ondes (paramétrisé dans le modèle, Luz et Hourdin, 2003; Luz et al., 2003) qui tend à les réduire. Le fait que les contrastes chimiques soient bien représentés est la validation la plus directe des mécanismes de transport responsables de la création de la superrotation atmosphérique. La figure 15B montre également sous forme de petits carrés le taux de condensation de HCN à la tropopause. Cette condensation a lieu dans une région où les particules de brumes sont relativement abondantes. Les particules pourraient donc servir de noyaux de condensation pour ces espèces et être à l’origine des nuages polaires.

A partir de ces simulations numériques, une base de données de résultats du modèle a été mise à disposition de la communauté sur la toile avant l’arrivée de la mission. Les données sont là. Les premières photos ont réservé leur lot de surprises. Les dépouillements en cours des enregistrements des spectromètres et “imageurs spectraux” n’en manqueront sans doute pas non plus.

Références :

- Cabane, M., E. Chassefière, and G. Israel, 1992 : Formation and growth of photochemical aerosols in Titan's atmosphere, *Icarus*, **96**, 176–189.
- Hourdin, F., O. Talagrand, R. Sadourny, C. Régis, D. Gautier, and C. P. McKay, 1995 : General circulation of the atmosphere of Titan, *Icarus*, **117**, 358–374.
- Hourdin, F., R. Courtin, D. Gautier, C. P. McKay, P. Rannou, and O. Talagrand, Dynamique de l'atmosphère de titan, in *Actes du 2^{ème} Colloque National de Planétologie de l'INSU, vol 1*, edited by W. Kofman, J. Lilensten, B. Pibaret, and I. Raynaud, 1998.
- Hourdin, F., S. Lebonnois, D. Luz, and P. Rannou, Titan's stratospheric composition driven by condensation and dynamics, *Icarus*, sous press, 2004.
- Lebonnois, S., D. Toubanc, F. Hourdin, and P. Rannou, 2001 : Seasonal variations of titan's atmospheric composition, *Icarus*, **152**, 384–406.
- Lebonnois, S., F. Hourdin, P. Rannou, D. Luz, and D. Toubanc, 2003 : Impact of the seasonal variations of composition on the temperature field of Titan's stratosphere, *Icarus*, **163**, 164–174.
- Luz, D., and F. Hourdin, 2003 : Latitudinal transport by barotropic waves in Titan's stratosphere. I. General properties from a horizontal shallow-water model, *Icarus*, **166**, 328–342.
- Luz, D., F. Hourdin, P. Rannou, and S. Lebonnois, 2003 : Latitudinal transport by barotropic waves in Titan's stratosphere. II. Results from a coupled dynamics-microphysics-photochemistry GCM, *Icarus*, **166**, 343–358.
- Rannou, P., M. Cabane, E. Chassefière, R. Botet, C. P. McKay, and R. Courtin, 1995 : Titan's geometric albedo : Role of the fractal structure of the aerosols, *Icarus*, **96**, 355–372.
- Rannou, P., F. Hourdin, and C. P. McKay, 2002 : A wind origin for Titan's haze structure, *Nature*, **418**, 853–856.
- Rannou, P., F. Hourdin, C. P. McKay, and D. Luz, 2004 : A coupled dynamics-microphysics model of Titan's atmosphere, *Icarus*, *in press*.
- Toubanc, D., J. P. Parisot, J. Brillet, D. Gautier, F. Raulin, and C. P. McKay, 1995 : Photochemical modelling of Titan's atmosphere, *Icarus*, **113**, 2–26.

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

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 : Olivier Boucher

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