

# LMD info

la lettre des utilisateurs

du modèle de circulation générale atmosphérique

de l'Institut Pierre Simon Laplace

No 4 Avril 2004



## Sommaire

1	Actualité	2
2	Evolutions du modèle et aspects informatiques	5
3	Applications climatiques	5
4	Etudes de processus et paramétrisations	9
5	Végétation - hydrologie	14
6	Dynamique - transport	19
7	Chimie - aérosols - climat	19
8	Climatologie - méthodes de validation	20
9	Les planètes	21
10	Le coin débat	23
	<i>Contacts et Informations</i>	

**Editorial** - L'année écoulée aura vu la chute du vieil adage selon lequel "Y'a plus d'saisons!".

Tout a commencé par la canicule de cet été. Assistait-on à une des premières manifestations sérieuses du changement climatique en cours? Ou cette canicule n'était-elle qu'un évènement extrême envisageable même dans un climat non perturbé par l'homme? Les scénarios réalisés il y a quelques années avec la version précédente du modèle couplé de l'IPSL semblent pencher pour la première hypothèse (cf. p2). Au-delà de la question de la confirmation ou non du changement climatique, un tel évènement peut en tous cas permettre de réfléchir à quel sens peut avoir ce changement climatique en termes de mode de vie, santé, bien-être, etc. L'occasion aussi pour nous de revenir dans ce numéro sur les scénarios du changement climatique qui vont être déclinés cette année avec le modèle couplé de l'IPSL. Après l'été chaud, l'hiver fut neigeux et froid, à l'image du désamour entre la recherche publique et les gouvernants. Il faut dire que les finances sont tellement basses que le tirage papier de LMDZinfo est de plus en plus menacé! Heureusement, après l'été chaud et l'hiver rigoureux, le mois de mars a vu le retour en force des giboulées. Et les turbulences du printemps ont permis de briser la glace et de faire renaître un peu d'espoir dans nos laboratoires.

La preuve est faite, réchauffement ou pas, "Y'a à nouveau des saisons" !

*LMDZinfo, journal en lutte...*

F.H

# 1 Actualité

## Canicule et changement climatique

**Une vague de chaleur sans précédent depuis le début de l'ère industrielle, une anomalie de seulement 4 K**

Nous avons tracé (figure 1) l'évolution de la température estivale moyenne sur la France depuis 1860 et jusqu'en 2100 pour les résultats d'une simulation climatique, jusqu'en 2000 pour les observations (compilation du Climate Research Unit au Royaume Uni). Dans ces observations, saisonnières et régionales, on retrouve les grands traits des observations annuelles, à l'échelle globale : accroissement pendant la période 1920-1940, stabilisation ou décroissance pendant les années 1940-1970, accroissement depuis les années 1970.

Dans les années 1950, il y a à la fois une succession d'étés très chauds ainsi que l'été le plus chaud du 20<sup>e</sup> siècle. Les autres étés les plus chauds se retrouvent à partir des années 1970. Si on regarde plus en détail les observations sur la figure 2, les étés les plus chauds correspondent

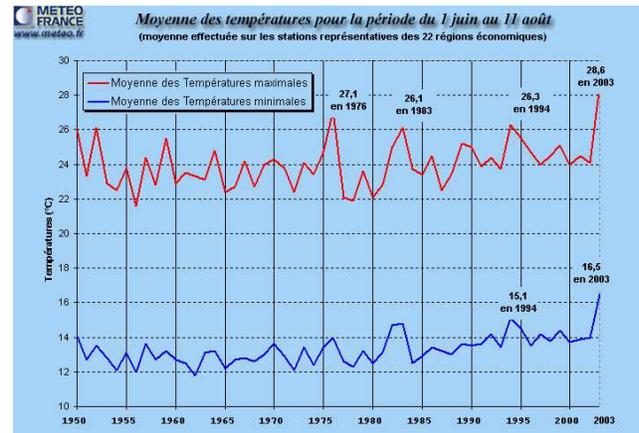


FIG. 2 – Moyennes estivales (juin, juillet, août) des températures quotidiennes minimales et quotidiennes maximales en France, depuis 1950 jusqu'en 2003 [Source Météo-France].

soit à des températures maximales particulièrement élevées alors que les températures nocturnes restent "fraîches" (année 1976), soit à une élévation concomitante des températures minimales et maximales (1983, 1994). L'été 2003 apparaît comme tout à fait exceptionnel par rapport aux autres événements chauds de ces 150 dernières années. L'anomalie est particulièrement forte et se retrouve aussi bien sur les maxima de température que sur les minima. Elle est environ 2 fois plus élevée que celle des canicules précédentes.

## Evolution de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100

(modèle de l'IPSL, scénario SRES A2, sans aérosols)

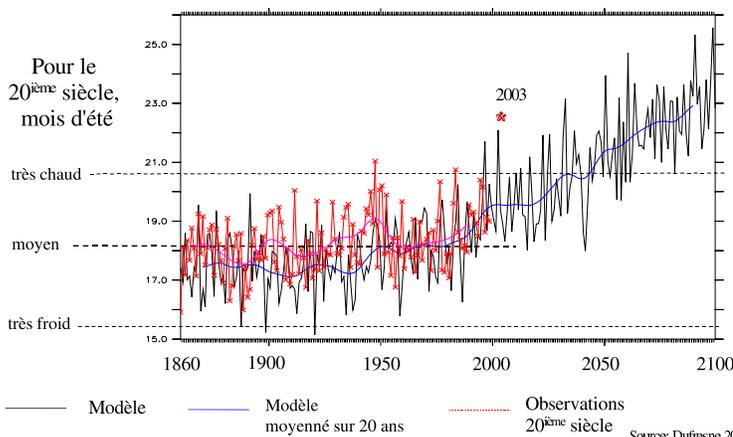


FIG. 1 – Evolution de la température d'été (moyenne juin, juillet, août) moyenne sur la France, observée (en rouge) et modélisée par le modèle IPSL-CM2 pour un scénario de l'IPCC (en noir) d'après [Dufresne et al., 2002].

## Un cas extrême qui pourrait devenir la norme

Les résultats représentés en noir sur la figure 1 sont issus d'une simulation réalisée avec le modèle couplé atmosphère-océan-végétation-glace IPSL-CM2 et avec comme seule perturbation anthropique les émissions de CO<sub>2</sub> [Dufresne et al., 2002]. Ces émissions évoluent d'après des estimations basées sur des observations de 1860 à 2000, d'après un scénario dans lequel peu de dispositions sont prises pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub> (scénario SRES A2 du GIEC/IPCC) après l'an 2000. Ces émissions de CO<sub>2</sub> sont converties en concentration de CO<sub>2</sub> grâce à une modélisation du cycle naturel du carbone. Ni les aérosols ni les gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> ne sont considérés. La perturbation des gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> a tendance à augmenter la température de surface alors que celle des aérosols a tendance à diminuer la température de surface de par un accroissement du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace. Négliger ces deux perturbations entraîne des erreurs sur le forçage radiatif dont les signes sont

opposés et dont on estime que les amplitudes sont actuellement comparables à l'échelle globale (même si le forçage des aérosols est très incertain). Au niveau de l'Europe par contre, le forçage des aérosols est particulièrement important et notre simulation aura tendance à surestimer le réchauffement. Ceci est cohérent avec ce que l'on observe sur la figure 1, où l'accroissement des températures simulées est supérieur à celui des températures observées.

Sur la période 1860-2000, le modèle simule bien des étés "pourris" et des étés "caniculaires", même s'il surestime l'amplitude de cette variabilité interannuelle. A partir de la fin des années 1990, le modèle simule des étés très chauds de plus en plus fréquents. L'accroissement de température est particulièrement important à partir des années 2000 et, dans la deuxième moitié du 21<sup>e</sup> siècle, la température moyenne des étés atteint la température de la canicule 2003. Autour de cette valeur moyenne, il y a toujours des étés "pourris", mais aussi des étés très chauds dont les températures sont supérieures d'environ 2 K à celles de la canicule 2003. Il est difficile de prévoir à quel climat précis cela correspondra mais, si l'on extrapole notre vécu de l'été 2003, on peut imaginer que l'ensemble de notre environnement naturel (champs, forêts, glaciers, animaux...), social (villes, habitations, régions touristiques...) et culturel (nos A.O.C!!) sera fortement modifié.

## En attendant...

La canicule 2003, en tant que réalisation d'un système aléatoire (le climat terrestre) ne peut pas être considérée comme une preuve stricte du changement anthropique du climat en cours. Seule l'accumulation de ces événements continuera de réduire progressivement les derniers doutes. Par contre cette canicule peut être considérée comme un bon analogue des changements climatiques futurs [Beniston, 2004] et illustre l'ampleur des conséquences possibles de ces changements. D'un autre côté, l'anomalie de température de cet "événement extrême" n'est que de 4 K environ, c'est à dire qu'elle correspond à moins d'un tiers de l'amplitude du cycle saisonnier, moins de la moitié du cycle diurne.

### Référence :

Beniston, M. (2004), The 2003 heat wave in Europe : A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L02202, doi :10.1029/2003GL018857.

Dufresne J.-L., Friedlingstein P., Berthelot M., Bopp L., Ciais P., L. Fairhead, H. LeTreut, P. Monfray. On the magnitude of positive feedback between future

climate change and the carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 10.1029/2001GL013777, 23 May 2002

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

## Le point sur la "physique commune" CNRM-LMD suite aux réunions du 14/03/2003 et du 2/12/2003 à Toulouse

### Cadre et objectifs

Depuis deux ans environ, les deux équipes développant les deux modèles globaux de climat français, ARPEGE-climat et LMDZ, ont commencé à œuvrer au rapprochement des paramétrisations physiques de leurs modèles. Depuis octobre 2003, Marie-Pierre Lefebvre, ingénieur Météo France, est mise à disposition auprès du LMD pour travailler sur ce projet de "physique commune".

En amont il y a la reconnaissance que pour certains phénomènes clefs, des questions fondamentales se posent, ce qui fait que la logique même de leurs paramétrisations n'est ni connue ni définie. Lorsqu'un travail sur un de ces phénomènes existe dans une équipe et pas dans l'autre, l'intérêt de pouvoir le partager facilement est évident. Lorsque ce travail existe dans les deux équipes et que les questions scientifiques sont très ouvertes, l'intérêt porte sur l'analyse commune des résultats de chacun de ces sous-modèles qui peut ou non déboucher à terme sur la convergence des paramétrisations elles-mêmes.

Par ailleurs, il faut préciser qu'il n'y a pas deux physiques, l'une d'Arpège, l'autre de LMDZ, mais plutôt deux environnements de paramétrisations physiques. En effet, dans chacun des modèles, il est possible d'activer différents jeux de paramétrisation (par exemple pour la convection, le rayonnement...). Dans la suite de ce texte, nous continuerons de parler de "deux physiques", par abus de langage et faute de mieux.

A terme, il y a un intérêt partagé pour pouvoir utiliser différents jeux de paramétrisations venant des deux équipes dans chacun des deux MCGs atmosphériques. Pour atteindre cet objectif, il y a accord pour l'utilisation du modèle 1D comme outil permettant une interface commune entre dynamique et physique, et pour la mise au point et le partage des paramétrisations. Ensuite, ces différentes mises en commun doivent pouvoir être récupérées facilement dans les différents MCGs.

De plus, pour le CNRM, le modèle 1D doit également être un environnement commun entre les différentes physiques (Arpège climat, Arpège prévision, Arome...).

Pour être plus précis, nous avons décomposé chacune des deux physiques en deux parties : un moniteur et l'ensemble des paramétrisations. Le moniteur assure l'interface avec la dynamique, appelle les différentes paramétrisations, gère ou assure l'interface pour les sorties... L'ensemble des paramétrisations lui-même peut être séparé en trois blocs :

1. ondes
2. rayonnement
3. couche limite / convection / nuage (abrégié CLCN par la suite)

A l'intérieur de chacun de ces blocs, il y a une ou plusieurs paramétrisations.

A terme, il y a un intérêt mutuel à partager les deux blocs "ondes" et "rayonnement". Pour le bloc "CLCN", les approches différentes seront conservées, par contre il y a un grand intérêt pour étudier des cas en commun, pour avoir des environnements communs pour les analyses...

Comme modèle 1D, il a été décidé de partir d'une version d'Arpège avec son environnement d'exemples, puis d'y inclure la physique de LMDZ. La progression retenue est la suivante :

1. physiques complètes interchangeable via l'appel à deux moniteurs différents,
2. blocs interchangeables,
3. paramétrisations ou modules interchangeables.

Au niveau du MCG 3D, la progression pourra être soit identique à la précédente, soit l'étape 1 (appel via deux moniteurs différents) pourra être supprimée s'il apparaît que sa mise en œuvre est trop lourde par rapport à son intérêt. La mise en œuvre sera réalisée en même temps dans les deux MCGs, Arpège et LMDZ.

Ce cadre général ne doit pas être considéré comme immuable, mais évoluera en fonction des avancées, des difficultés rencontrées, des changements de problématiques...

## Modèle commun 1D et bibliothèque commune de cas.

Pour la première année au moins, le travail autour de la "physique commune" portera donc essentiellement sur la mise en œuvre, le test et l'utilisation de la version 1D de ARPEGE-climat, interfacée avec la "physique" de LMDZ. C'est Marie-Pierre Lefebvre, épaulée par Pascal Marquet du CRNM, qui réalise l'essentiel du travail autour de

l'outil. Durant cette année, les points suivants seront abordés :

- Comparaison des versions 1D d'Arpège et LMDZ sur les cas EUROCS, déjà bien connus par les deux équipes. Interlocuteurs : J.-Y. Grandpeix (LMD), J.-F. Gueremy (CNRM).
- Installation de la nouvelle version de base du modèle 1D CNRM avec :
  - les physiques d'Arpège climat et Arpège prévision,
  - les cas de base : archétype météo, Toga COARE..Interlocuteurs : P. Marquet et J.-M. Piriou (CNRM).
- Introduction dans ce modèle 1D de la physique de LMDZ. Cette introduction se fera en deux étapes :
  1. Introduction de toute la physique en bloc. Dans le modèle 1D, il y aura deux appels, l'un à la physique d'Arpège, l'autre à la physique de LMDZ.
  2. Introduction des deux physiques dans le même environnement – le même "moniteur" – permettant de préparer la mise en commun et l'échange des trois blocs ondes, rayonnement et CLCN.
- Introduction de nouveaux cas. C.L. Interlocuteurs : F. Hourdin (LMD) et J.-M. Piriou (CNRM).
- Début de mise en place d'un environnement commun pour étudier les sorties du modèle 1D (comparaison aux observations, à des résultats de modèles LES...).

## A suivre

Les points suivants ont également été abordés et continueront à être approfondis :

- couplage dynamique-physique,
- développement en commun de nouvelles paramétrisations.

A l'ordre du jour de la prochaine réunion (prévue au printemps 2004, à Paris) :

- présentation détaillée des variables d'interfaces, des processus physiques représentés..., des différentes paramétrisations à l'intérieur du bloc CLCN (couche limite, nuage, convection),
- suivi du travail sur le modèle commun 1D,
- ...

---

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

## 2 Evolutions du modèle et aspects informatiques

Au prochain numéro

## 3 Applications climatiques

### Réalisation d'un ensemble de simulations avec le modèle couplé IPSL-CM4 en vue de la préparation du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC.

**Ça y est!** la version de référence du modèle climatique couplé IPSL-CM4 (atmosphère-océan-végétation-glace de mer) est testée et figée. Cette version du modèle sera notamment utilisée pour réaliser un ensemble de simulations de contrôle (conditions préindustrielles et actuelles), d'évolution récente du climat (1860-2000), de scénario de changement climatique (2000-2100) et de simulations des climats du passé (-6000 ans, -21 000 ans, entrée en glaciation...). Durant ces derniers mois, nos efforts ont principalement porté sur les points suivants :

- débogage et ajustement du modèle de végétation ORCHIDEE (amélioration des moussons et des précipitations continentales),
- ajustement des lois de frottement de l'atmosphère sur l'océan,
- modification de la diffusion verticale dans l'atmosphère (diminution des biais chauds aux hautes latitudes),
- ajustement de l'albédo de la glace de mer pour limiter son accumulation en Arctique,
- calibration des propriétés physiques des nuages lorsque le premier effet indirect des aérosols est pris en compte. Ce premier effet indirect correspond à l'influence des aérosols sur le rayon des gouttes d'eau des nuages.

Au cours de cette année 2004, un très gros effort va porter sur la réalisation de simulations couplées en vue de la préparation du 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC. Dans ce cadre, la liste des simulations est la suivante :

- Avec la prise en compte de la variation temporelle de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés (effet direct et premier effet indirect) (Figure 3),

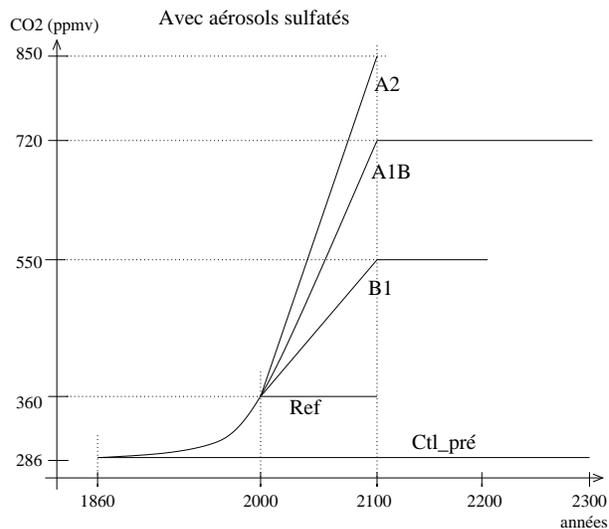


FIG. 3 – Représentation graphique de l'évolution (imposée) de la concentration de CO<sub>2</sub> pour les simulations prévues avec prises en compte de la variation de concentration des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés.

1. simulation de la période 1860-2000 en imposant les perturbations anthropiques déduites des observations,
  2. à partir de l'année 2000, stabilisation pendant 100 ans,
  3. scénario B1 (2000-2100) puis stabilisation pendant 100 ans,
  4. scénario A1B (2000-2100) puis stabilisation pendant 200 ans,
  5. scénario A2 (2000-2100).
- Avec la prise en compte de la variation temporelle de la concentration des gaz à effet de serre uniquement (Figure 4),
    1. simulation de la période 1860-2000 en imposant les concentrations observées,
    2. simulation de contrôle avec conditions préindustrielles,
    3. simulation de contrôle avec conditions actuelles,
    4. scénario A2 (2000-2100),
    5. accroissement du CO<sub>2</sub> de 1% par an, puis stabilisation pendant 150 ans à une concentration double de celle initiale (2xCO<sub>2</sub>),
    6. idem mais avec stabilisation pendant 150 ans à une concentration quadruple de celle initiale (4xCO<sub>2</sub>).

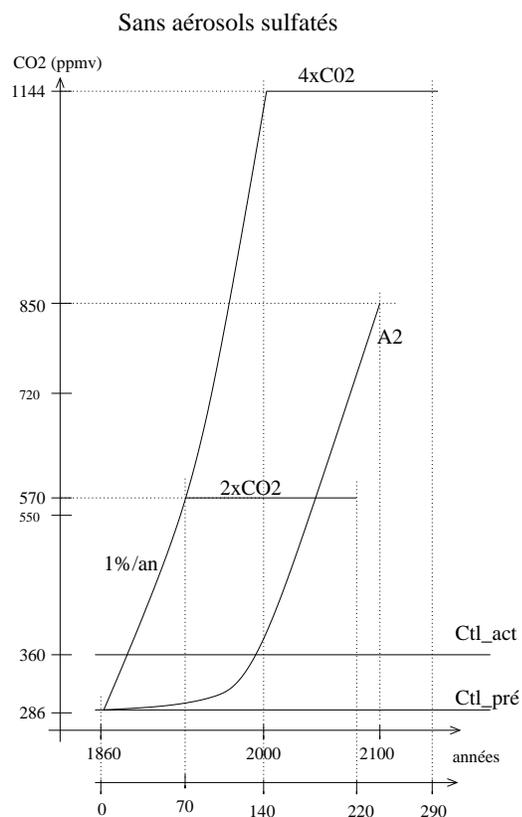


FIG. 4 – Représentation graphique comme Fig. 3 des simulations prévues avec prises en compte de la variation de concentration des gaz à effet de serre uniquement.

- Avec la prise en compte des principales perturbations naturelles (aérosols volcaniques, intensité du rayonnement solaire) et de perturbations anthropiques variées : utilisation des sols, aérosol organiques, suies, ozone... Un ensemble de simulations sera réalisé sur la période 1860-2100.

Autour de ces simulations du GIEC, très normatives, seront articulées des simulations de sensibilités à différentes perturbations (modification de l'utilisation des sols, émissions d'aérosols sulfatés ou organiques...), des simulations introduisant de nouveaux couplages (entre le climat et la chimie atmosphérique, entre le climat et le cycle du carbone...) ainsi que des simulations de sensibilité à la représentation de certains processus physiques, tels la convection profonde (schémas de K. Emanuel et schémas de Tiedke). Ces simulations permettront notamment d'alimenter des études sur la variabilité climatique à différentes échelles de temps ainsi que des études sur les rétroactions, notamment vapeur d'eau et nuage.

Si la mise au point du modèle couplé a déjà nécessité un gros effort coordonné par le pôle de

modélisation de l'IPSL, la réalisation de toutes ces simulations, le traitement et la diffusion des résultats représentent également un travail considérable et nécessitent de mobiliser d'importants moyens (par exemple, 30 000 heures de CPU sur chacune des machines NEC de l'IDRIS et du CEA, 70 To de stockage...). Les simulations elles-mêmes seront réalisées par Sébastien Denvil, et utiliseront de façon massive les outils principalement développés par Patricia Cadule et Patrick Brockman pour le lancement, le suivi et le post-traitement des données.

Avec la version préliminaire du modèle couplé, nous avons réalisé une première simulation de changement climatique idéalisé, dans laquelle le  $\text{CO}_2$  augmente de 1% par an. Après 70 ans, c'est à dire lorsque le  $\text{CO}_2$  a doublé par rapport à sa valeur initiale, la température moyenne de surface de la Terre a augmenté de 2.2 K, ce qui est comparable mais légèrement supérieur à la moyenne des modèles (1.8 K, cf. IPCC 2001). La répartition géographique des différences annuelles de température et de précipitation sont représentées sur les figures 5 et 6. La répartition spatiale de l'anomalie de température est assez classique, ce qui n'est pas le cas de l'anomalie de précipitation. En effet, les précipitations changent peu dans les régions de moussons (Inde, Afrique de l'ouest), alors que souvent les modèles prévoient des changements importants. A suivre donc...

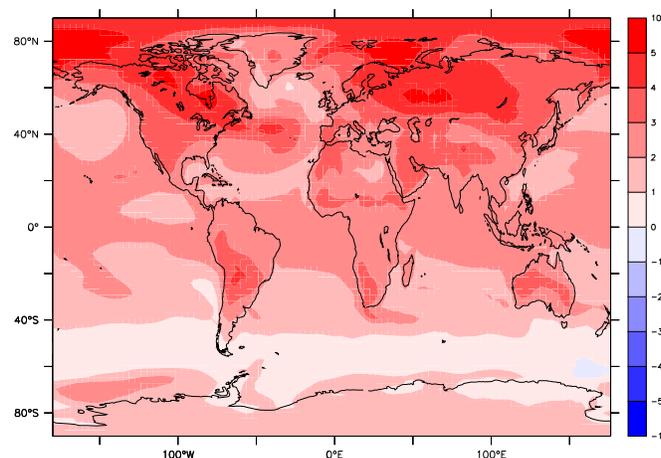


FIG. 5 – Répartition spatiale de l'anomalie de température (en °C) au moment du doublement de  $\text{CO}_2$ , dans une simulation transitoire idéalisée d'accroissement de  $\text{CO}_2$ , simulée avec la version 0 du modèle IPSL-CM4.

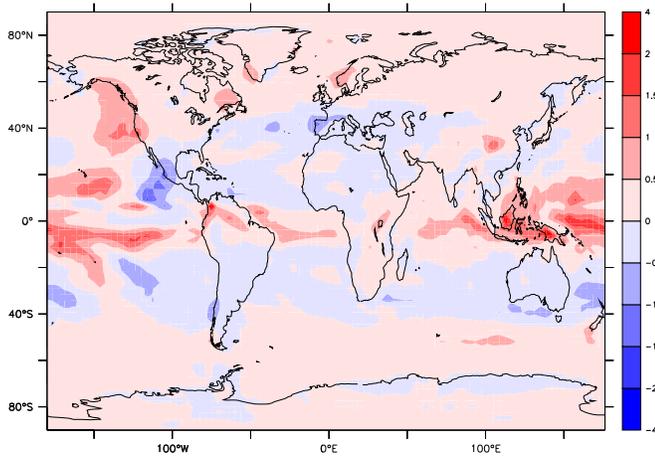


FIG. 6 – Idem Fig. 5, pour les précipitations en mm/jour.

Ce travail fait partie du projet MC2, “Modélisation Climat-Cycle” de l’ACI-FNS “Risque climatique”. Les résultats seront progressivement mis à disposition à partir de la page web de ce projet : <http://mc2.ipsl.jussieu.fr>

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

### Accélération de la croissance de calottes de glace par de grands lacs de barrage glaciaires

Il y a 90 000 ans, une calotte de glace majeure centrée sur les mers de Barents et Kara au Nord de la Russie commençait à bloquer l’écoulement de grands fleuves sibériens, dont l’Ob et le Iénisseï (Mangerud et al., sous presse). D’énormes lacs proglaciaires, en tout deux fois plus grands que le plus grand lac actuel, à savoir la “mer” Caspienne, se sont formés assez rapidement (figure 7). Des simulations avec LMDZ montrent que ces lacs, essentiellement à cause de leur grande inertie thermique, ont causé un fort refroidissement du climat régional en été. Ce refroidissement a mené à une forte réduction de la fonte estivale à la surface de la calotte de glace. Le bilan de masse en surface simulé de la calotte, négatif si les lacs ne sont pas pris en compte (simulation appelée ‘NL’ dans la suite), devient ainsi positif dans la simulation avec lacs proglaciaires (simulation ‘L’). Ces lacs ont donc eu un rôle important dans la dynamique du climat eurasiatique de l’époque.

La version utilisée de LMDZ contient un module thermique de lacs développé par Krinner (2003). Ce

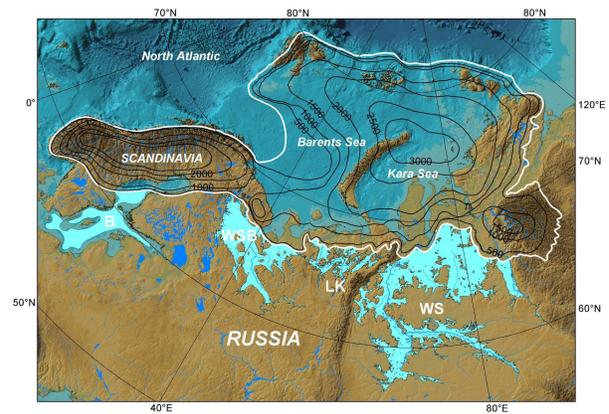


FIG. 7 – Etendue maximale de la calotte de glace et des lacs en Russie, il y a environ 90 000 ans. Les abréviations désignent le lac de la Sibérie de l’Ouest (WS), le lac du bassin de la Mer Blanche (WSB), et le lac baltique (B).

module prend en compte les processus thermiques essentiels (conduction moléculaire et turbulente dans la colonne d’eau, convection, absorption graduelle du rayonnement solaire, changements de phase de l’eau, etc) et calcule le bilan hydrique du lac afin de conserver l’eau dans LMDZ. LMDZ a été utilisé avec une grille irrégulière (96x72 points de grille, environ 100 km de résolution au centre du zoom). L’analyse du climat simulé montre que les lacs se trouvaient soumis à un climat très froid, pour l’essentiel à l’intérieur de la limite du pergélisol continu, ce qui est en accord avec les mesures géologiques. Dans leur partie septentrionale, les lacs étaient du type monomictique froid (c’est à dire que la température au fond était en-dessous de 4°C, température à laquelle l’eau a sa plus forte densité, et que les lacs ne se mélangeaient verticalement qu’une seule fois par an, en été); la température de surface estivale atteignait les 4°C seulement près des rives méridionales des lacs. Près de la calotte, les lacs étaient couverts de glace pendant onze mois sur douze.

Pendant l’été, la différence de température de l’air en surface entre les simulations L et NL atteint les 10°C. Cet impact est sensible jusqu’à une altitude de 2000 m environ, et s’étend horizontalement sur un bon millier de kilomètres (figure 8a). En conséquence, la fonte estivale de neige et de glace sur le versant de la calotte tournée vers les lacs est diminuée de 50% environ, tandis que l’impact des lacs sur l’évaporation et sur les précipitations simulées est faible (figure 8b). Le changement simulé du bilan de masse en surface de la calotte de glace est ainsi dominé par la diminution de la fonte. Le bilan de masse en surface de la calotte Barents-Kara est -0.43 m d’équivalent d’eau par an dans

la simulation NL et +0.18 m d'équivalent d'eau par an quand les lacs sont pris en compte (figure 9). Ces résultats de LMDZ indiquent donc que la calotte de glace aurait rapidement reculé en absence de ces lacs, tandis qu'elle était stabilisée par les lacs (l'excédent du bilan de masse en surface pouvant être facilement compensé par le vêlage d'icebergs).

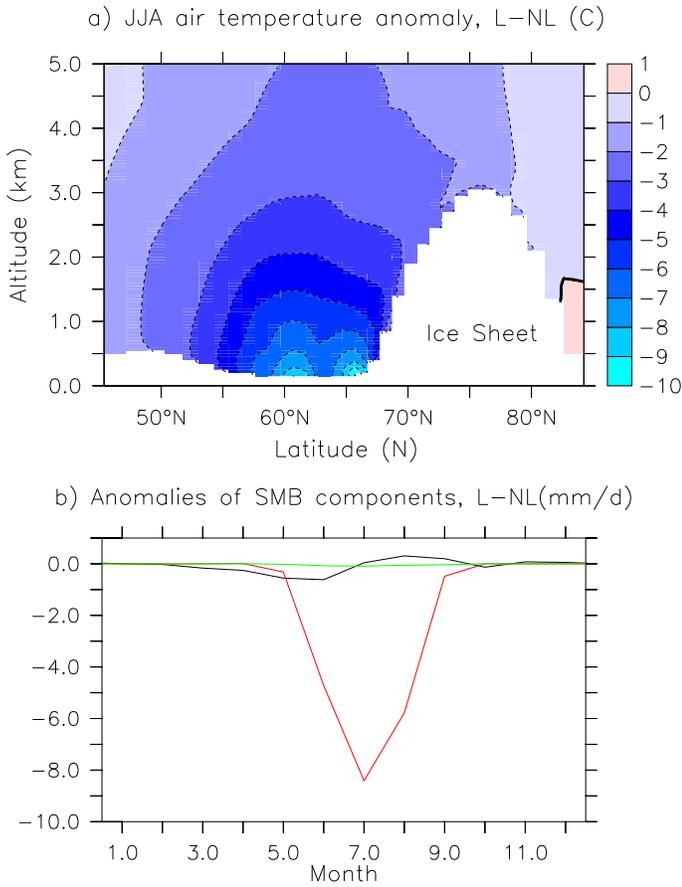


FIG. 8 – Anomalies climatiques (simulation L - simulation NL) dues à la présence des lacs. (a) Anomalie de la température de l'air en JJA : coupe verticale à travers l'atmosphère à 70°E. Les structures visibles sont représentatives pour toutes les longitudes où les lacs proglaciaires touchent la calotte de glace; (b) moyennes mensuelles des anomalies des composantes du bilan de masse en surface : précipitation (noir), ruissellement (rouge) et évaporation/sublimation (vert) sur les points de grille de la calotte qui appartiennent au bassin versant des lacs proglaciaires.

La conclusion principale de cette étude est que les lacs proglaciaires ont joué un rôle important dans la dynamique du climat de l'Eurasie. L'histoire climatique de l'époque semble s'être passée de la façon suivante : le début de la croissance de la calotte Barents-Kara était probablement causé par des variations d'ensoleillement autour de -115 ka BP,

renforcées par des rétroactions positives impliquant la circulation océanique ou la végétation. Quand la calotte était suffisamment grande pour bloquer l'écoulement des rivières russes, les lacs proglaciaires se sont rapidement formés, ce qui a mené à une accélération notable de la croissance de la calotte.

Entre -95000 et -85000 ans, l'ensoleillement estival à 65°N (ce qui correspond à peu près à la limite sud de la calotte de glace) a augmenté de 12% et des études géologiques indiquent que la calotte a atteint son étendue maximale entre 90 000 et 80 000 ans BP. Le scénario le plus cohérent est donc que la calotte a atteint son étendue maximale vers -90000 ans, et que le recul de la calotte a commencé vers -85000 ans. Ce recul était ralenti, mais pas arrêté, par la présence des lacs proglaciaires. Une fois que la calotte de glace avait

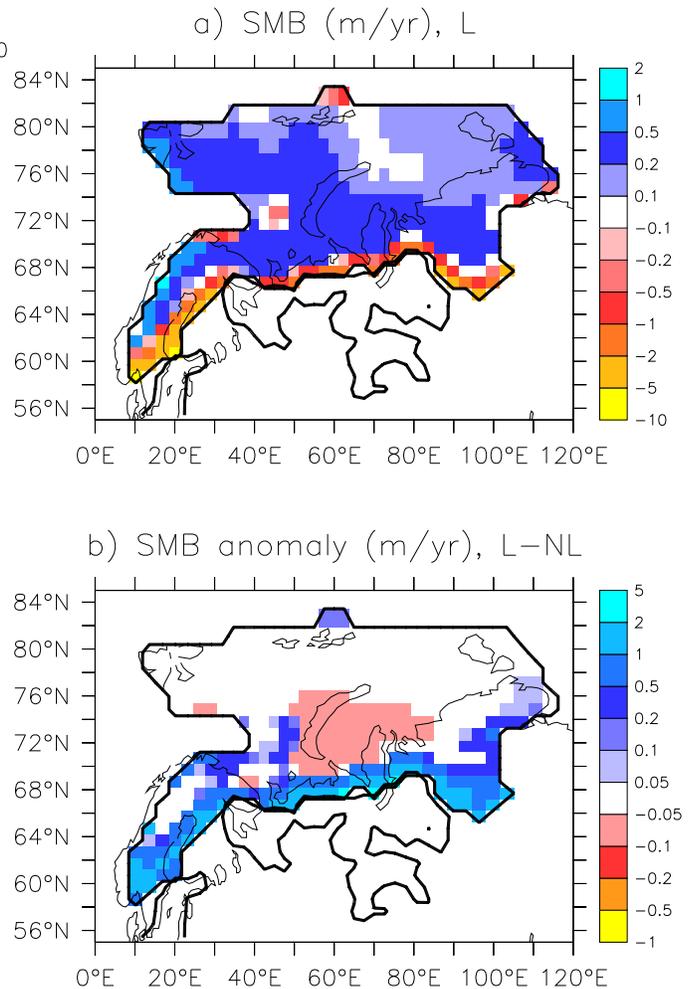


FIG. 9 – Bilan de masse en surface simulée, et anomalie du bilan de masse simulée. (a) Bilan de masse en surface de la calotte de glace dans la simulation L; (b) anomalie due à la présence des lacs proglaciaires (L-NL). Unité : mètres d'équivalent d'eau par an.

suffisamment reculé pour permettre un drainage rapide des lacs vers l’océan Arctique, la disparition de ces lacs a probablement mené à un réchauffement régional, qui a lui-même dû accélérer la fonte de la calotte de glace (notons ici que le drainage rapide de lacs proglaciaires peut avoir des impacts majeurs sur la circulation océanique, avec des conséquences importantes sur le climat global, qui restent à quantifier pour notre cas). Lors de stades ultérieurs du dernier cycle glaciaire, en particulier au dernier maximum glaciaire vers  $-20000$  ans, la calotte de glace sur la mer de Barents n’a plus atteint une taille suffisante pour bloquer l’écoulement des rivières russes, de sorte que l’effet des lacs proglaciaires montré ici n’a pu jouer.

#### Références :

Krinner, G. Impact of lakes and wetlands on boreal climate. *J. Geophys. Res.*, 4520, doi :10.1029/2002JD002597, 2003.

Mangerud, J., V. Astakhov, M. Henriksen, C. Hjort, M. Jakobsson, J.-P. Lunkka, H. Alexanderson, G. Clark, G. Krinner, P. Möller, A. Murray, O. Nikolskaya, M. Saarnisto, et J.I. Svendsen. Ice-dammed lakes and the rerouting of the drainage of Northern Eurasia during the last 120 000 years. *Quat. Sci. Rev.*, sous presse.

Krinner, G., J. Mangerud, M. Jakobsson, M. Crucifix, C. Ritz, et J.I. Svendsen. Enhancement of ice sheet growth by ice dammed lakes. *Nature*, 427, 429-432, 2004.

---

**Gerhard Krinner (LGGE)**  
gerhard@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

## 4 Etudes de processus et paramétrisations

### Processus de gel/dégel du sol et zones inondées

L’étude des régions polaires avec LMDZ s’est maintenant élargie aux terres boréales de l’Arctique. Le schéma de surface de la version “polaire” du modèle a été modifié pour prendre en compte les changements de phase de l’eau dans le sol, courant à ces latitudes, et l’existence de nombreuses zones inondées (regroupant les lacs et les zones humides). L’objectif est de représenter dans LMDZ

des interactions importantes pour le climat boréal, mais souvent mal paramétrées voire ignorées dans les modèles globaux. Le gel des sols, retardant le refroidissement hivernal et le réchauffement estival de la surface, influe sur le bilan d’énergie locale en surface. De même, la présence d’une zone inondée contribue localement à refroidir le climat en été. Ces spécificités surfaciques affectant le climat régionalement, peuvent donc potentiellement modifier l’amplitude d’un changement climatique simulé dans les latitudes boréales. Dans le cadre de l’avancée de la communauté climatique sur la prévision des changements climatiques, la prise en compte d’une surface boréale plus réaliste permet de préciser les changements attendus à l’échelle régionale et leurs conséquences.

Les impacts climatiques de l’introduction de ces nouvelles caractéristiques surfaciques dans LMDZ ont été analysés dans le cadre d’un changement climatique futur (de type  $2\times\text{CO}_2$ ) et passé (le Dernier Maximum Glaciaire, DMG). Ainsi, la figure 10 présente, à titre d’exemple, l’impact de la prise en compte des processus de gel/dégel du sol sur le changement de températures de surface futur (climat  $2\times\text{CO}_2$  - climat présent) en moyenne annuelle dans les régions boréales. Dans ce cas, un effet thermique du gel/dégel du sol correspondant à la libération/l’absorption d’énergie à/par la surface se combine à un effet hydrologique provoquant un très fort assèchement du sol et induit une réponse non uniforme sur l’ensemble des régions boréales : alors que l’augmentation des températures de surface dans le futur est accentuée en Amérique du Nord (Alaska + Canada) (+15%) et Sibérie Centrale (+36%), elle semble être modérée en Sibérie de l’Est (-23%). Concernant le climat du DMG, la question était la suivante : est-ce que la prise en compte des processus de gel du sol améliore la simulation du climat à cette époque glaciaire par LMDZ? Etant donné les biais forts existant dans certaines régions, sur les températures par exemple, l’impact relativement faible du gel du sol sur celles-ci est insuffisant pour améliorer les résultats de la simulation par LMDZ du DMG.

La prise en compte des lacs, et plus particulièrement des zones humides dans LMDZ ouvre la porte à une application importante : l’estimation des émissions de méthane provenant de ce type de surface. L’évolution des zones humides, principales sources naturelles de méthane atmosphérique, dans des conditions climatiques plus chaudes représente à l’heure actuelle un enjeu important dans la course à la réduction des gaz à effet de serre. Une estimation des émissions de méthane provenant des zones humides a été réalisée grâce à la combinaison de trois types d’outils : LMDZ donnant les caractéristiques climatiques et les extensions des zones humides,

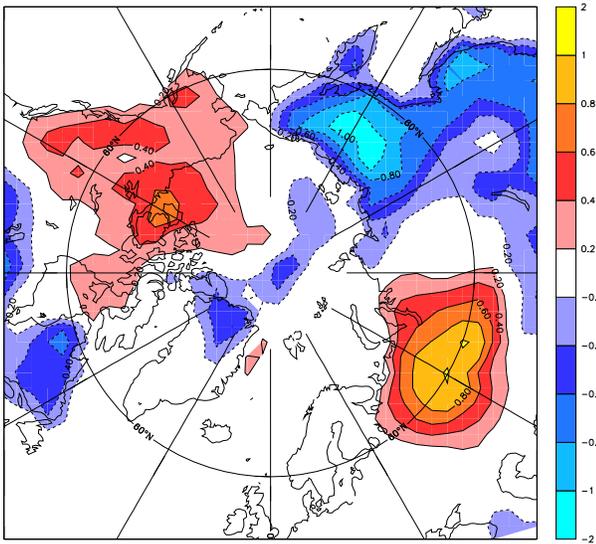


FIG. 10 – Effet de la prise en compte des processus de gel/dégel du sol sur le changement de températures de surface (K) (futur - présent), en moyenne annuelle.

le modèle de végétation ORCHIDEE fournissant des paramètres relatifs à la végétation et différents schémas calculant les émissions de méthane des zones humides.

Estelle Poutou (LGGE)  
 poutou@lgge.obs.ujf-grenoble.fr  
 Gerhard Krinner (LGGE)  
 gerhard@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

## Évaluation de la paramétrisation de la phase thermodynamique en utilisant des données satellitaires POLDER

Nous utilisons des observations spatiales de l'instrument POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) pour évaluer la paramétrisation de la phase thermodynamique dans le modèle LMDZ, qui décrit la fraction liquide de l'eau condensée,  $x_{liq}$ , en fonction de la température locale,  $T$  :

$$x_{liq} = \begin{cases} 0 & T < T_{ice} \\ \left(\frac{T - T_{ice}}{T_0 - T_{ice}}\right)^{n_x} & T \in [T_{ice}, T_0] \\ 1 & T > T_0 \end{cases} \quad (1)$$

où le paramètre  $T_{ice}$  représente la température au-dessus de laquelle l'eau liquide n'existe plus dans la maille,  $n_x$  fournit une indication sur la forme de

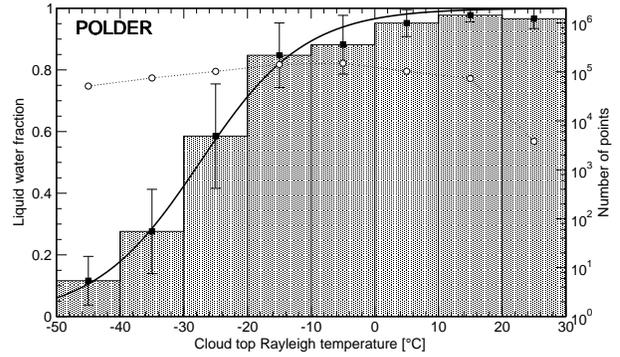


FIG. 11 – Relation statistique entre la température et la phase thermodynamique (fraction d'eau liquide) au sommet des nuages obtenue avec les données POLDER. La courbe en trait plein représente le lissage obtenu en utilisant la tangente hyperbolique. La courbe en trait pointillé représente le nombre de points présent dans chaque classe de température (échelle à droite).

la transition entre l'eau et la glace et  $T_0$  représente la température locale au-dessus de laquelle la glace n'existe plus. Alors que le choix de  $T_0 = 0^\circ\text{C}$  est assez logique (Houze, 1993), le choix des deux autres paramètres n'est pour l'instant basé sur aucune réelle physique.

Nous simulons avec le modèle LMDZ la période de mesures de POLDER (novembre 1996 à juin 1997) en mode guidé et avec des SST observées imposées. La température et la phase thermodynamique au sommet des nuages sont échantillonnées en utilisant l'hypothèse de recouvrement aléatoire sur la fauchée du satellite. La relation statistique entre la température et la phase thermodynamique au sommet des nuages est établie à la fois dans les sorties du modèle et dans les observations POLDER. Nous ajustons ensuite une tangente hyperbolique à deux paramètres à cette relation (figure 11). Nous avons montré que cette relation est très stable dans le modèle. Cette relation reste quasi similaire qu'elle soit établie à partir des sorties de quelques jours, plusieurs jours, ou toute la période. Nous effectuons alors plusieurs simulations courtes en faisant varier les deux paramètres de la paramétrisation de la phase thermodynamique ( $T_{ice}$  et  $n_x$ ) en fonction de la température locale dans le modèle et déduisons les deux paramètres  $a_1$  et  $a_2$  d'une tangente hyperbolique ajustée :

$$x_{liq} = (1 + \tanh(a_1 T + a_2))/2 \quad (2)$$

On obtient le meilleur accord possible entre le modèle et les observations POLDER, pour  $T_{ice} = -32^\circ\text{C}$  et une transition suivant une fonction

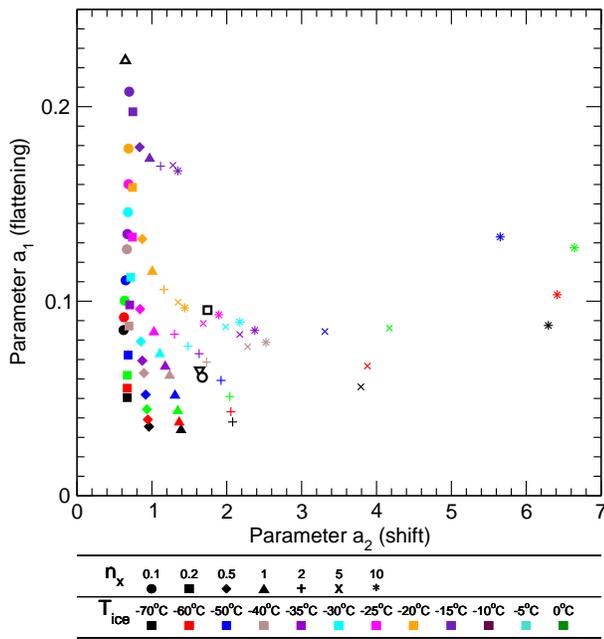


FIG. 12 – Les résultats des ajustements de la relation phase-température issus des simulations du modèle dans l’espace des deux paramètres de l’ajustement.  $\Delta$  : marche à 0°C,  $\nabla$  : POLDER,  $\square$  : le modèle standard,  $\circ$  : nouveaux paramètres.

exponentielle avec un exposant  $n_x=1.7$  (figure 12).

Ces deux valeurs sont différentes de celles choisies dans la formule standard de LMDZ ( $-15^\circ\text{C}$  et 6), mais sont proches des paramètres utilisés dans d’autres modèles ( $T_{ice} = -35^\circ\text{C}$ ; *Del Genio et al.*, 1996; *Lohmann et Roeckner*, 1996;  $n_x=2$ , *Smith et al.*, 1990). Afin de tester la validité de ces nouveaux paramètres, nous avons effectué deux simulations en imposant la SST. La première simulation utilise le jeu de paramètres “standard”, la seconde utilise les deux nouveaux paramètres. Nous avons comparé le forçage radiatif des nuages obtenu avec les observations de ScaRaB (*Kandel et al.*, 1998). Le forçage radiatif onde courtes des nuages est beaucoup mieux représenté en utilisant les nouveaux paramètres (figure 13), mais il reste très similaire pour les ondes longues (non présenté).

#### Référence :

- Doutriaux-Boucher, M., et J. Quaas, Evaluation of cloud thermodynamic phase parameterisations in the LMDZ GCM by using POLDER satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, *inpress*, 2003.
- Del Genio, A., M.-S. Yao, W. Kovari et K. K.-W. Lo, A prognostic cloud water parameterization for global climate models, *J. Clim.*, 9, 270–304, 1996.
- Houze, R. A., *Cloud Dynamics*, Academic Press, San Diego, 573 pp., 1993.
- Kandel, R., et al., The ScaRaB earth radiation budget dataset, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 765–783,

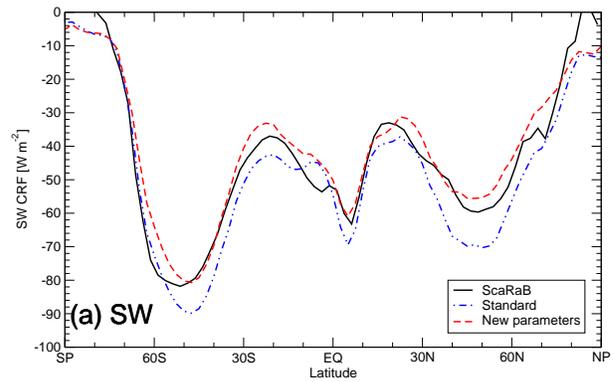


FIG. 13 – Forçage radiatif des nuages ondes courtes issu d’une simulation d’une année (SST imposées) avec la version standard du modèle (bleu, pointillé), les nouveaux paramètres (rouge, tireté) et les observations ScaRaB (noir, plein).

1998.

Lohmann, U. et E. Roeckner, Design and performance of a new cloud microphysics scheme developed for the ECHAM general circulation model, *Clim. Dyn.*, 12, 557–572, 1996.

Smith, R. N., A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 116, 435–460, 1990.

Marie Doutriaux-Boucher (LOA)  
 marieb@loa.univ-lille1.fr  
 Johannes Quaas (LMD)  
 johannes.quaas@lmd.polytechnique.fr

## Exploration d’un phénomène ondulatoire de l’Hémisphère Sud

Il s’agit d’une curiosité trouvée parmi les nombreux artefacts de sorties quotidiennes de LMDZ 3.2 à la résolution de 64x48x19, découverte en exploitant systématiquement les diagnostics de la couche limite développés par le deuxième auteur. Un diagramme de Hovmöller en donne l’illustration la plus parlante (figure 14). Il s’agit de la Hauteur de Couche Limite (HCL) diagnostiquée à 40°S en Juillet-Août. On observe une propagation vers l’Est d’ondes de HCL, de période d’environ 14 jours et de longueur d’onde proche de 4000 km. Ces ondes sont systématiquement observées dans l’hémisphère Sud entre les latitudes 20° et 60°. On a remarqué un blocage par les reliefs, mais aussi par les glaces de mer (figure 14, où on a blocage par les Andes à 60°W, et par le Sud de l’Australie à 150°E).

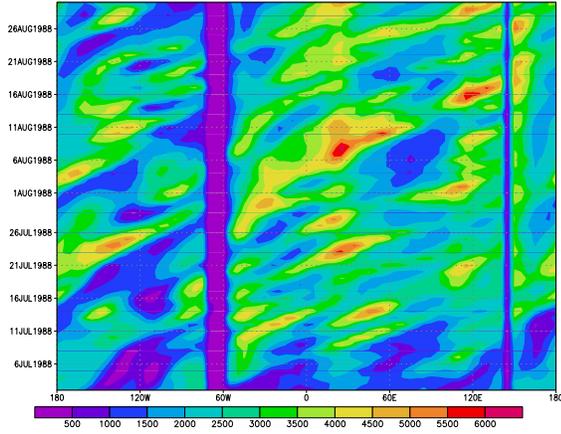


FIG. 14 – Hauteur de la Couche Limite (m) à 40°S

On a trouvé une vitesse de propagation vers l’Est de ces ondes proche de 10 m/s sur la bande 20-60°S. L’interprétation de ce phénomène est que la couche d’inversion détectée par le diagnostic oscillerait planétairement. D’où le nom de baptême des BLIWs (Boundary-Layer Inversion Waves).

Les figures 15 et 16 montrent respectivement trois instantanés à 30°S, et une oscillation sur une maille de l’Atlantique Sud. On constate que ces

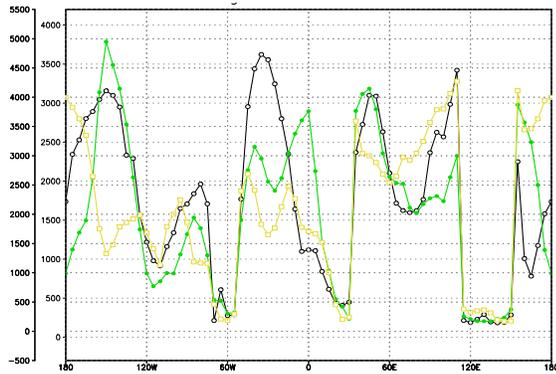


FIG. 15 – Hauteur de la Couche Limite (m) à 30°S sur trois jours consécutifs.

oscillations ne sont pas simples, avec une présence erratique d’ondes à trois jours par exemple. Dans l’hémisphère nord, on trouve aussi des oscillations de même période, mais stationnaires, à l’exception de l’Atlantique Nord où on voit des perturbations traverser en direction de l’Europe. On a tenté de quantifier les caractéristiques de ces BLIWs en filtrant les fréquences rapides et en ne retenant qu’une onde monochromatique de forme :  $hcl_f = A \cos(kx - \omega t)$ , associée à une vitesse de phase :  $v_p = \frac{\omega}{k}$ . Par filtrage et dérivation des signaux, on peut récupérer localement à la fois  $\omega$  et  $k$ . La carte de la figure 17 montre le résultat, avec une assez bonne homogénéité dans la bande Sud libre de glaces et

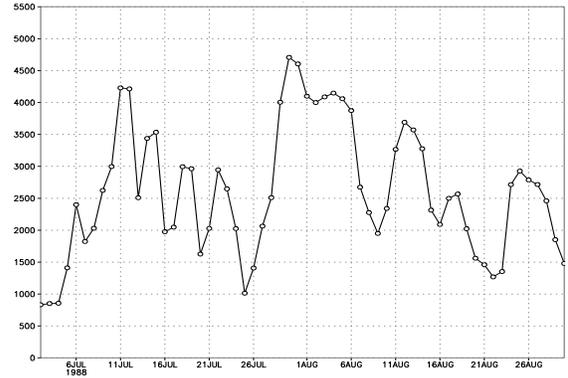


FIG. 16 – Hauteur de la Couche Limite à (m) 30°W;40°S sur deux mois.

continents. Ces vitesses sont moitié plus faibles que la vitesse donnée par la pente des Hovmüller, ce qui signifie que l’onde n’est pas monochromatique.

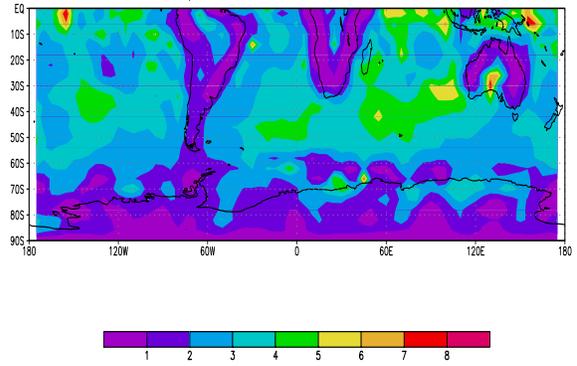


FIG. 17 – Vitesse locale de phase apparente ( $\text{m s}^{-1}$ ) des BLIWs dans l’hémisphère Sud.

Ces ondes, bloquées par les reliefs, non dispersives, nous ont fait penser à des ondes de gravité. Si on prend comme hypothèse que la couche d’inversion sépare deux fluides de densité constante, séparés par un saut de température potentielle virtuelle  $\Delta\theta_v$ , à une altitude de repos  $H = 2000$  m, avec les hypothèses de couche mince et d’ondes longues, la vitesse de phase est alors :

$$c = \sqrt{\frac{\Delta\theta_v}{\theta_v} g H}$$

Une vitesse de  $4 \text{ ms}^{-1}$  correspondrait ainsi à un saut à l’inversion de 0.24 K, ce qui représente une valeur un peu faible. Avec  $10 \text{ ms}^{-1}$ , on obtient une valeur plus réaliste de 1.5 K. Mais problème : les vitesses restituées comprennent une part d’entraînement par les vents moyens de basses couches, trouvés du même ordre de grandeur, ce qui suggère que les BLIWs seraient en réalité stationnaires (!) La question de leur nature reste donc ouverte.

## Voltes dans les quarantièmes

Dîtes “14 jours” dans les couloirs du LMD, on vous répondra “Rossby” (n’est-ce pas, Ionela?). Les BLIW étant a la fois “bloquées” par endroit, mais continues d’un bord à l’autre des continents, une excitation par des ondes planétaires plus élevées semblait probable. La source d’énergie que représentent les jets constitue également une source possible et importante d’excitation. D’où notre investigation suivante, où on a d’abord vérifié que la position et l’énergie cinétique des jets dans l’hémisphère sud étaient très comparables aux données climatologiques (on a comparé à Peixoto *in Physics of Climate*). La figure 18 montre un Hovmöller de la vorticité verticale des jets à 200 hPa.

On note la même propagation vers l’Est que les BLIWs, à la même vitesse, et en appliquant la technique de la monochromatique précédente, des cartes semblables de distribution de la pseudo vitesse de phase. L’effet des reliefs est subtil mais présent.

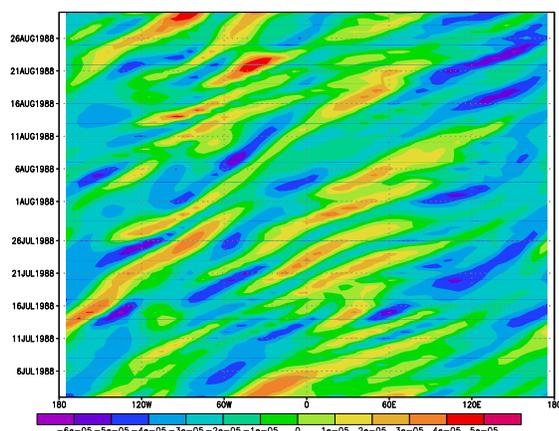


FIG. 18 – Ondes de vorticité dans les jets à 200hPa. ( $s^{-1}$ ) 40°S.

Peut-on expliquer ces ondes par une instabilité de Rossby? Le modèle le plus simple fournit leur vitesse de phase :

$$c_r = -\frac{\beta}{k^2 + \frac{f_0^2}{gH}}$$

avec  $H = 11\,000$  m,  $g$  la constante de gravité,  $f_0 (10^{-4} s^{-1})$  la composante de la rotation terrestre à 60°S et  $\beta$  sa variation le long du méridien, de valeur  $10^{-11} m^{-1} s^{-1}$ , on trouve  $4 m s^{-1}$  vers l’Ouest, pour les valeurs de  $k$  correspondant à une longueur d’onde de 4000 km. On a déterminé par ailleurs une vitesse moyenne d’entraînement par les jets de  $30 m s^{-1}$ , ce qui donnerait, pour les Hovmöller observés, une vitesse de phase de  $-20 m s^{-1}$  (10-30), beaucoup trop forte pour les longueurs d’onde observées. On trouve donc une incohérence entre l’hypothèse Rossby simple et nos observations.

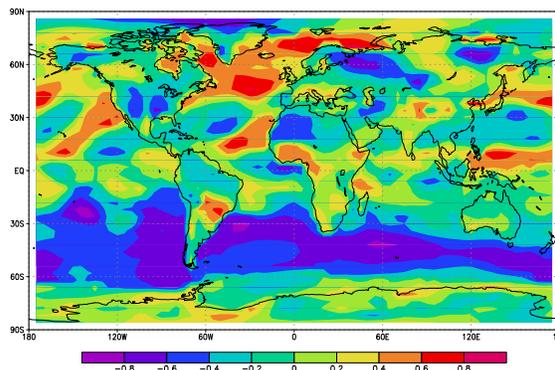


FIG. 19 – Corrélation verticale entre les BLIWs et les ondes de Vorticité à 200hPa, 40°S.

Ce qui est sûr, c’est que ces deux ondes sont couplées. On le vérifie sur la carte de corrélations de la figure 19, avec une bonne anti-corrélation de -0.7 dans la bande 20-40° libre. Un mécanisme de couplage simplissime a été testé, en ayant en tête le modèle de Saint-Venant, et en considérant la vorticité potentielle d’une colonne tourbillonnaire coincée entre 200 hPa (niveau source) et HCL (niveau libre de friction par la surface) :

$$v_p = \frac{\omega + f}{\rho H}$$

où  $H$  est la distance verticale entre la couche d’inversion et le niveau 11. On prend l’hypothèse que cette grandeur est un invariant de la troposphère libre de dissipation. D’après l’expression de la vorticité potentielle, si  $H$  augmente (c’est-à-dire HCL diminue),  $\omega$  doit augmenter. Comme les signaux de HCL et de la vorticité sont anti-corrélés, cette hypothèse est qualitativement vérifiée. Un couplage de ce type entre ces ondes serait en accord avec ce modèle théorique, qui lui n’a pas encore été validé dans le MCG. Il faudrait en effet étudier la conservation de la vorticité potentielle absolue dans le modèle, ce qui est en dehors de cet exercice.

Bref, on a une oscillation planétaire, mais on peut plus ou moins arbitrairement voir deux éléments couplés. On peut y insister, car les fans de Rossby nous renverront volontiers à nos études en interprétant ce phénomène comme une manifestation barocline des ondes de Rossby-gravité. Le problème, c’est qu’il semble difficile de certifier les ondes de vorticité du GCM en tant que Rossby, comme on l’a vu, et que par ailleurs, les BLIW ont leur manifestation propre et vérifiable. Car on peut dévoiler le résultat d’une étude préliminaire : l’artefact des BLIW est aussi réaliste que le “rain” (artefact de la précipitation) du modèle. En effet, les premières analyses de données ISCCP et même POLDER (merci à Geneviève Sèze) montrent que les nuages de basses couches, associés à la couche

d'inversion, et donc à HCL, oscillent et se propagent à la même vitesse de  $10 \text{ m s}^{-1}$  vers l'Est. Et quand les artefacts sont tous en accord la Réalité peut surgir à tout moment... Ce réalisme devrait logiquement avoir des conséquences favorables sur la prévision météo dans l'hémisphère Sud, car un phénomène aussi régulier devrait permettre une extension de l'horizon prévisible. On a ainsi constaté :

- a) que ces ondes se couplent bien aux précipitations convectives.
- b) qu'elles existent aussi bien quand on supprime la convection profonde du modèle; elles seraient donc plutôt un facteur de déclenchement de la convection.

## Une valse à trois temps

En forme d'épilogue provisoire, notre plus récente vision du phénomène procède d'un changement d'échelle : imaginez un tapis roulant vers l'est entre  $20^\circ$  et  $60^\circ$  Sud. Sur ce tapis, une succession d'énormes vortex de rotation alternée, de même vorticité potentielle, limités en haut par leur réservoir d'énergie, due à l'instabilité de Rossby des jets, et en bas par HCL (pour la conservation). Il faut alors, pour évaluer la vitesse d'entraînement, considérer la vitesse moyenne des vents à cette échelle, soit de l'ordre de  $15 \text{ m s}^{-1}$ . Dès lors, une vitesse de phase de  $-4 \text{ m s}^{-1}$  pour Rossby devient compatible avec les Hovm ller. Ces ondes de Rossby sont couplées aux ondes d'inertie gravité liées au gradient vertical de la densité et à l'inversion. Logiquement, ces ondes auraient également une propagation vers l'ouest (!) de  $4 \text{ m s}^{-1}$ , avec donc un verrouillage de phase par la vorticité. Ce sont les reliefs qui déclencheraient cette propagation rétrograde. La différence avec l'hémisphère nord ne concernerait ainsi que le tapis roulant, dont la vitesse ne serait déterminée que par la proportion de surfaces continentales ou de reliefs le long des parallèles. Il va sans dire que les auteurs sont prêts à recevoir toute suggestion différente d'interprétation.

Charline Marzin<sup>1</sup>, Anne Mathieu (LMD) et  
Alain Lahellec (LMD) [alain@lmd.jussieu.fr](mailto:alain@lmd.jussieu.fr)

## 5 Végétation - hydrologie

### INTRODUCTION

J'ai le plaisir de vous annoncer, d'entrée de jeu, que l'article présentant notre modèle ORCHIDEE

<sup>1</sup>stagiaire de Magistère

au reste du monde vient d'être soumis par Gerhard Krinner. Vous trouverez, sur le site Web :

[http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssips1/doc/\\doc\\_main.html](http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssips1/doc/\\doc_main.html)

une version "PDF" de cet article, ainsi que quelques présentations (format Power Point et PDF) de résultats.

Notre rubrique comporte trois contributions :

- Nicolas Vuichard, en deuxième année de thèse, sous la direction de Nicolas Viovy, nous présente ses premiers efforts pour introduire les prairies fortement anthropisées dans ORCHIDEE
- Juliette Lathiere, en dernière année de thèse, sous la direction de Didier Hauglustaine, nous parle de l'introduction des émissions de composés organiques volatiles dans ORCHIDEE et de leur lien avec la chimie de l'atmosphère;
- Rachid Benshila (ingénieur) nous présente le travail qu'il a réalisé pour faciliter l'utilisation d'ORCHIDEE et pour effectuer, rapidement, une série de simulations sur sites permettant de comparer une version en développement à la version de référence du code et aux données disponibles .

Nathalie de Noblet-Ducoudré (LSCE)  
[noblet@lsce.saclay.cea.fr](mailto:noblet@lsce.saclay.cea.fr)

## Prise en compte des prairies dans ORCHIDEE

Lorsqu'on s'intéresse aux flux échangés entre biosphère et atmosphère, la contribution des prairies est relativement importante, en premier lieu par la surface qu'occupe cet écosystème à l'échelle globale : 20% de la surface continentale (Scurlock & Hall, 1998). Par ailleurs, cet écosystème est dans de très nombreuses régions, géré par l'homme soit en étant pâturé soit en étant fauché. Outre le fait de modifier le bilan carboné, cette gestion anthropisée a pour conséquence l'émission de deux gaz à effet de serre au potentiel de réchauffement élevé : le protoxyde d'azote qui est émis par le sol suite à des  v nements de fertilisation et le méthane produit de la fermentation entérique des ruminants. Le modèle ORCHIDEE intègre déjà les prairies mais en les considérant comme un écosystème naturel. Aussi, une meilleure prise en compte de cet écosystème dans ORCHIDEE consisterait à introduire les différentes variables de gestion. Cependant, la gestion peut impliquer des apports d'azote, dont le cycle, complexe, n'est pas représenté

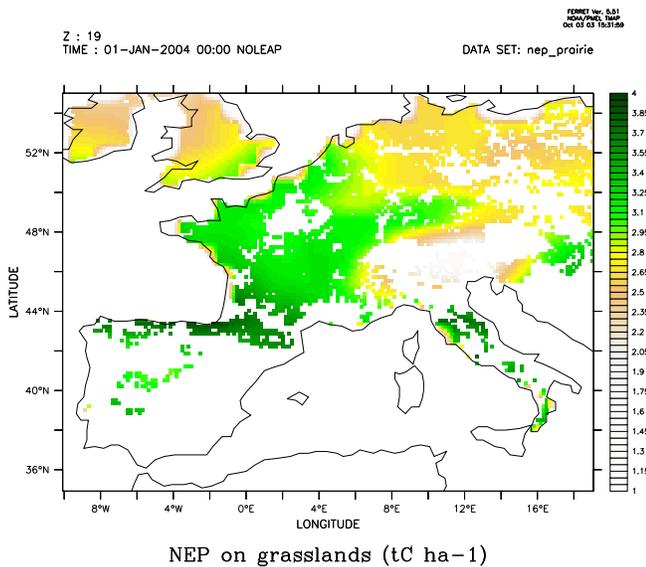


FIG. 20 – Productivité nette de l'écosystème. L'unité utilisée est la tonne de carbone par hectare et par an, ( $tC ha^{-1} an^{-1}$ ) des prairies européennes en considérant un même type de sol (42% limon, 15% argile) et une même gestion (4 fauches par an et apport 300 kg d'azote par hectare et par an.)

dans ce type de modèle. En revanche, des modèles développés en recherche agronomique pour simuler le fonctionnement d'une prairie à l'échelle de la parcelle prennent en compte le cycle de l'azote et possèdent un module de gestion. Afin de mieux représenter les prairies, nous nous proposons alors de coupler un modèle de ce type nommé PaSim (Riedo, 1998) avec ORCHIDEE. La première étape a consisté à développer une version spatialisée du modèle PaSim. Cette version a été validée par une simulation sur l'Europe qui nous a permis d'établir des cartes de bilan de gaz à effet de serre. La figure 20 présente la productivité nette de l'écosystème. Lorsque l'on souhaite prendre en compte l'ensemble des gaz à effet de serre présents sur les prairies ( $CO_2$ ,  $NO_2$  et  $CH_4$ ), on exprime les quantités de gaz par leur effet radiatif sur un certain horizon de temps. Ceci nous permet d'obtenir une carte du potentiel de réchauffement exprimé en équivalent tonne de carbone par hectare (figure 21).

Dans cette première simulation, n'était considérée que la variabilité météorologique, le type de sol et l'exploitation de la prairie étant supposés identiques partout en Europe. Aussi, ces premières cartes, de par leur faible réalisme, sont peu comparables avec des observations. La prise en compte de la diversité des types de sol et des pratiques de gestion dans le modèle PaSim sera notre prochaine étape. Sur ce point, il est à noter que si les forçages pédologiques

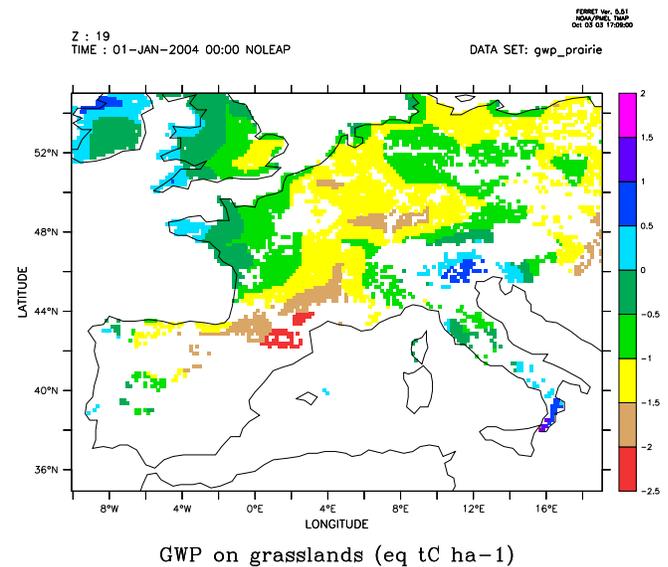


FIG. 21 – Potentiel de réchauffement ( $eq.tC ha^{-1} an^{-1}$ ) des prairies européennes en considérant un même type de sol (42% limon, 15% argile) et une même gestion (4 fauches par an et apport 300 kg d'azote par hectare et par an).

sont facilement disponibles à différentes résolutions spatiales, il en va autrement des informations relatives à la gestion des prairies (dates et quantités des apports azotés, dates des fauches et du pâturage) qui sont quasi-inexistantes à une échelle régionale. Qui plus est, cet ensemble de variables est d'une nature bien spécifique. Contrairement aux données sol et météo, les variables de gestion sont des données définies par l'agriculteur en réponse à l'état de la prairie. Aussi, même en possession de données de gestion très précises, celles-ci sont peu utiles tant que les modèles ne simulent pas parfaitement l'état de la végétation. Pour pallier ce problème, nous nous proposons de développer un module de gestion automatique définissant les dates de fauche, de fertilisation et de pâturage ainsi que le chargement animal (nombre d'animaux par hectare) en accord avec l'état de la végétation et de manière à optimiser l'utilisation de la prairie. L'automatisation du chargement animal a déjà été réalisée et permet de retranscrire une variabilité régionale (figure 22).

Dans ce module, la seule variable de gestion qui reste à définir et qui contrôle la productivité est la quantité d'azote apportée. Cette variable peut être rattachée à une intensité d'utilisation de la prairie. En appliquant en tout point de grille, la quantité minimale d'azote qui ne limite pas la production (conditions non limitantes en azote), on simule une prairie de type intensive. En réduisant de moitié cet apport puis en le rendant

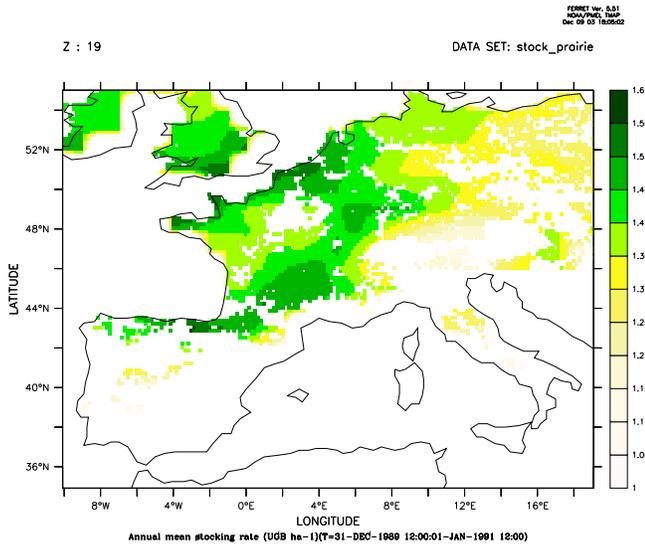


FIG. 22 – Moyenne annuelle du chargement animal (UGB  $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ ) défini par le modèle de gestion automatique de PaSim

mul, on représente respectivement des pratiques semi-intensives puis extensives. En attendant la possibilité d'utiliser des données de gestion précises, cet ensemble qualitatif (pratiques intensive/semi-intensive/extensive) pourrait faire l'objet d'une première carte de gestion à l'échelle régionale. Grâce à cette carte directement exploitable en entrée de nos modèles, des flux et bilans réalistes à l'échelle régionale, de carbone, d'azote et de méthane sur des prairies gérées pourront être simulés. A plus long terme, le couplage entre ORCHIDEE et PaSim nous permettra, quant à lui, de développer des scénarios tels qu'un changement d'usage des sols, remplaçant une prairie par une zone cultivée (ou l'inverse), dont l'impact en terme de stockage/déstockage de carbone reste discuté.

#### Référence :

Riedo M., G. A., Rosset M., Fuhrer J. (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling* 105 : 141-183. Scurlock, J.M.O., Hall, D.O. (1998). The global carbon sink : a grassland perspective. *Global Change Biology* 4 : 229-233

Nicolas Vuichard (LSCE)  
vuichard@lsce.saclay.cea.fr

## Interaction entre la chimie de la troposphère et la biosphère continentale :

### Estimations des émissions biogéniques dans le modèle ORCHIDEE

La biosphère continentale est une source majeure de composés organiques volatils (COV) très divers comme l'isoprène, les monoterpènes, le méthanol, le formaldéhyde, l'acide acétique émis par la végétation ainsi que de composés soufrés (COS, CS<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, DMS, DMSD) ou azotés (NO<sub>x</sub>), émis par les sols. Plus de 80% des COV émis à la surface sont d'origine biogénique, correspondant ainsi à une émission de plus de 1000 TgC/an. Ces espèces jouent un rôle crucial dans la chimie troposphérique : leur action est déterminante dans le contrôle des concentrations d'espèces chimiques importantes comme le radical hydroxyle OH, le méthane, l'ozone ou encore le monoxyde de carbone, influant ainsi sur le bilan radiatif.

Le travail mené au LSCE a permis dans un premier temps d'intégrer des paramétrisations dans le modèle global de végétation ORCHIDEE et ainsi d'estimer l'ensemble des émissions biogéniques avec une grande interaction entre climat et végétation. Le calcul des émissions de COV biogéniques repose sur les paramétrisations de Guenther et al. [1995] qui relient ces émissions aux différents paramètres climatiques et de développement de la végétation : densité foliaire (calculée par ORCHIDEE), influence de la température, influence du rayonnement (connue pour l'isoprène seulement), facteurs d'émissions (prescrits pour chaque type de végétation source). Ces paramétrisations initiales ont été complétées pour prendre en compte des facteurs importants comme l'extinction du rayonnement à travers la canopée, permettant ainsi de distinguer le niveau d'émissions de la canopée "au soleil" de celle qui est "à l'ombre", ou encore l'influence de l'âge des feuilles, connue pour l'isoprène et le méthanol. Le calcul des émissions de NO<sub>x</sub> par les sols (Yienger et al. 1995) repose sur la température et l'humidité du sol et sera complété pour prendre également en compte l'anthropisation des sols comme le brûlage de biomasse et l'utilisation de fertilisants, pratiques qui peuvent accroître ces émissions de façon significative (augmentation de 20% calculée par Ganzeveld et al. 2002). Le développement des paramétrisations d'émissions d'espèces soufrées par les sols (Guenther et al. 1989) est en cours. Les résultats sont encourageants et les émissions calculées par le modèle ORCHIDEE

se comparent bien aux différents inventaires disponibles, tant par leur variation saisonnière que par leur amplitude (Tableau 1 et figure 23).

L'étude de l'impact de ces émissions biogéniques sur la chimie troposphérique constituera la prochaine étape de notre travail : le modèle ORCHIDEE sera pour cela utilisé en couplage off-line avec le modèle de chimie INCA, pour différents scénarios climatiques (Dernier Maximum Glaciaire dans le cadre du projet ECLIPSE, une période préindustrielle, scénarios futurs de déforestation tropicale et de reforestation en Europe, réchauffement climatique), permettant ainsi d'étudier l'évolution des émissions biogéniques pour ces différents scénarios et leur impact sur des espèces chimiques prépondérantes comme l'ozone ou le monoxyde de carbone.

#### Références :

- 1- Ganzeveld, L. N., J. Lelieveld, F. J. Dentener, M. Krol, A. F. Bouwman and G.-J. Roelofs : Global soil-biogenic NO<sub>x</sub> emissions and the role of canopy processes. *J. of Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JD001289, 2002.
- 2- Guenther, A., Lamb, B.K. and Westberg, H.H., U.S National biogenic sulfur emissions inventory in Biogenic Sulfur in the Environment, E.S Saltzman and W.J. Cooper, American Chemical Society Symposium Series n° 393, Washington, DC, 14-39, 1989.
- 3- Guenther, A., C. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor, and P. Zimmerman, A global model of natural volatile organic compound emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, 8873-8892, 1995.
- 4- Yienger, J.J. and Levy II, H., Empirical model of global soil-biogenic NO<sub>x</sub> emissions, *J. Geophys. Res.*, 100, D6, 11,447-11,464, 1995.

---

**Juliette Lathière (LSCE)**  
lathiere@lsce.saclay.cea.fr

## Réalisation automatique d'Atlas pour ORCHIDEE

### Introduction

Il s'agit ici d'évoquer la réalisation d'outils de diagnostics simples pour ORCHIDEE, version off-line, pour des sites comportant des observations afin de mesurer l'impact des modifications effectuées. Ce paragraphe traite de l'aspect technique et de l'utilisation de ces outils. En concertation

avec l'ensemble des développeurs du modèle, ces diagnostics doivent permettre de comparer des observations, une version de référence, (la version tagguée par excellence) et la version courante de l'utilisateur.

### Choix techniques

Ces outils se décomposent en deux parties ou "boîtes" bien distinctes. D'une part, les scripts de lancement proprement dit doivent permettre de construire une "name list" associée au site qu'on choisit d'étudier, qui prenne en compte des paramètres particuliers comme le type de végétation, le LAI, ou des options de calcul (prise en compte ou non du carbone), et bien sûr de soumettre l'exécutable. D'autre part la partie graphique, après exécution, doit prendre en charge les diagnostics. Ces deux parties sont chaînées.

Le scripts de lancement sont des scripts shells permettant de lancer le modèle au choix sur VPP, NEC, et bientôt sous Linux. Ils sont largement inspirés par les scripts de lancement du couplé, avec des options différentes, puisqu'on est ici en mode forcé. Pour le tracé, je me suis appuyé sur les applications développées par Patrick Brockman (Fast, Atlas..) qui utilisent Ferret.

### Diagnostics proposés

Nous avons travaillé sur deux types de sites : le site de Cabauw (données fournies par The Royal Netherlands Meteorological Institute), et les sites issus de l'expérience Fluxnet. Il s'agit dans les deux cas de données en un point sur une durée de un à cinq ans. Pour le site de Cabauw, ils concernent les flux de chaleur latente et sensible, ainsi que les LWnet et SWnet. Pour chacune de ces variables, on peut observer la moyenne sur un an, ainsi que le "jour climatique" pour chaque mois. Chaque schéma comporte la courbe des observations, les sorties de la version tagguée ainsi que celle de la version lancée. Pour les autres sites (fluxnet), il s'agit des mêmes diagnostics complétés par les autres variables disponibles, notamment GPP et NEE. Pour ces deux dernières variables, des fichiers de "restart" du modèle ont été réalisés pour chaque site afin que les comparaisons aient un sens.

### Utilisation

Les scripts sont disponibles sur l'arborescence d'ORCHIDEE\_OL sous deux répertoires EXP00 et Utilitaire. Il s'agissait d'essayer de garder une certaine symétrie avec l'utilisation des autres modèles développés à l'IPSL : sous le répertoire EXP00.

TgC/an	Estimations	Version "évoluée" du modèle Extinction du rayonnement (isoprène) + Influence de l'âge des feuilles (isoprène et méthanol)
Isoprène	250-750	410
Monoterpènes	127	96
Méthanol	50-250	87
Acétone	15-48	35
Acétaldéhyde	10-50	12
Formaldéhyde	2-10	8
Acide acétique	0.4-2	0.24
Acide Formique	0.4-6	1.2
NO <sub>x</sub> TgN/an	5.5	3.5 sans anthropisation
DMS TgS/an	0.31	en cours

Tableau.1 Bilan des émissions biogéniques calculées dans le modèle ORCHIDEE

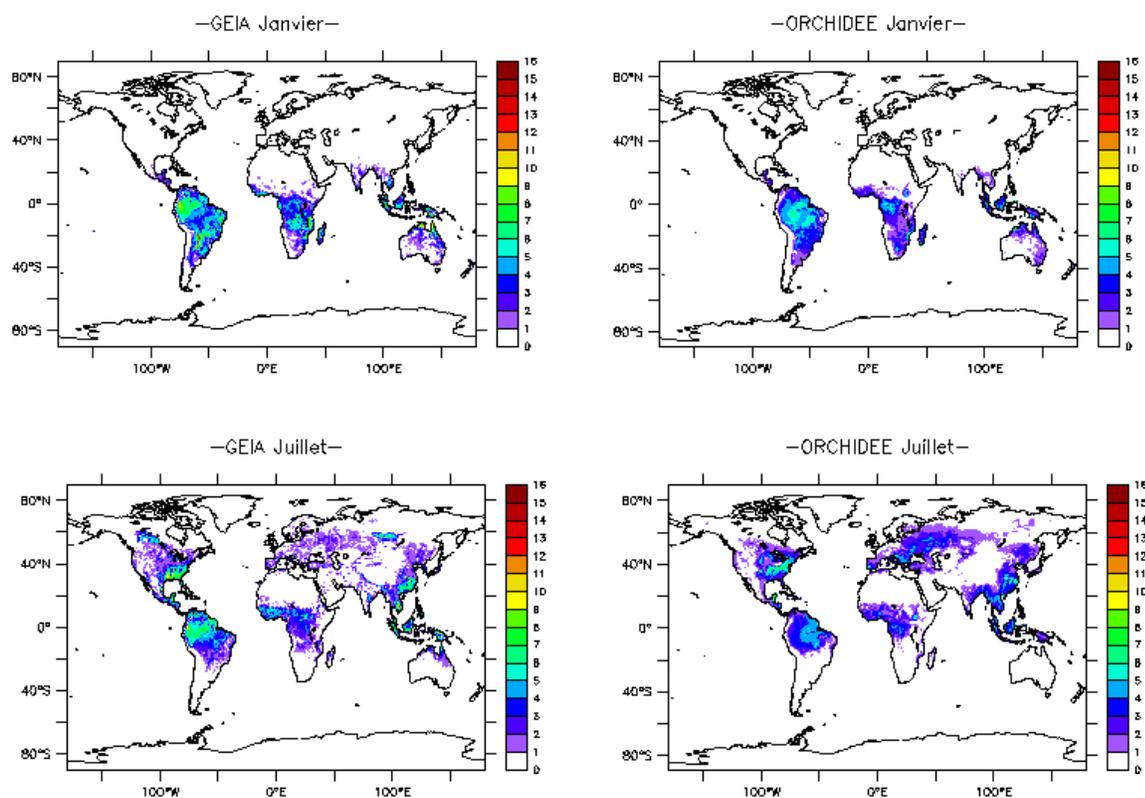


FIG. 23 – Comparaison des émissions d’isoprène calculées par le modèle ORCHIDEE (410 TgC/an) avec les inventaires GEIA (503 TgC/an, Guenther et al. 1995, pas de prise en compte de l’âge des feuilles), en  $10^{-10} \text{ kgC m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

► On dispose d'un `bench job.run` pour lancer Orchidée-sechiba, Orchidée-okco2 ou Orchidée-stomate; on peut lancer au choix une, deux, ou trois de ces versions. Ces scripts fonctionnent pour l'instant sur VPP et NEC.

► Mise en œuvre : le script principal est `job.run` dans `/EXP00`, ce script va créer un ou plusieurs jobs pour un site choisi. Il prend plusieurs options :

- `h` : aide
- `q` : ne soumet pas le job créé; relancer `job.run` sans `-q` pour le soumettre; n'est pas activé par défaut.
- `e nom` : nom du répertoire de sortie sur les machines de stockage (`SORTIE_CPL_IPSL/nom`); par défaut `nom=Test`.
- `n niter` : nombre d'itération sur le même forçage; 1 par défaut.
- `t machine` : machine utilisée; automatique pour Nec et VPP.
- `s site` : site choisi; Cabauw par défaut.
- `f flag` : flag choisi parmi `SECHIBA`, `OK_CO2`, `OK_STOMATE`, `all`; par défaut `SECHIBA`.

Exemple :

**`job.run -s Cabauw -f OK_CO2`**

va créer un `Job_OK_CO2` pour Cabauw et le soumettre.

**`job.run -f "SECHIBA OK_STOMATE" -q`**

va créer `Job_SECHIBA` et `Job_OK_STOMATE`, créer les `run.def` correspondants, mais ne va rien soumettre.

**`job.run -f "SECHIBA OK_STOMATE"`**

va ensuite les soumettre.

Sous le répertoire Utilitaire :

- `Cabauw.cfg` : c'est le script d'appel aux scripts ferret, c'est lui qu'il faut modifier pour éventuellement rajouter des diagnostics.
- Des outils de calendrier développés sous python.
- `Job_atlas` : Un atlas est ensuite créé pour chaque simulation. On définit dans ces scripts les fichiers des simulations de référence.

Les atlas produits sont ensuite disponibles au format `.gif` et `.pdf`, également sous DODS sur les machines de l'Idris.

## Perspectives

Il s'agit d'outils encore en cours de développement pour lesquels l'interaction avec les utilisateurs est importante. On peut notamment envisager le calcul d'indices plus rapides à analyser que l'observation de courbes. Le portage vers linux est très intéressant notamment en raison du faible coût numérique des simulations mises en cause et de leur rapidité. A plus

long terme, ce type de diagnostics s'inscrit dans l'utilisation d'interfaces graphiques pour analyser les sorties de simulations.

---

Rachid Benshila (IPSL)  
Rachid.Benshila@ipsl.jussieu.fr

## 6 Dynamique - transport

La suite au prochain numéro...

## 7 Chimie - aérosols - climat

### Forçages radiatifs futurs des aérosols soufrés

Après avoir estimé les forçages radiatifs dus aux aérosols anthropiques sulfatés de 1750 à 1990 (LMD-Z info n°2), nous avons calculé les distributions de composés soufrés, leur flux de dépôt à la surface et les forçages radiatifs associés pour la période de 1990 à 2100 (effet direct et premier effet indirect). Pour cela, nous avons utilisé 6 scénarios d'émission dits "marqueurs" correspondant à différentes hypothèses sur le développement démographique, social, technologique, économique et environnemental des différentes régions du monde. Les cartes d'émission ont été établies dans le SRES (Special Report on Emissions Scenarios) par Nakicenovic et al. [2000]. Les simulations ont été effectuées pendant 18 mois dont 6 mois de spin-up. La météorologie et les champs d'oxydants (à l'exception de celui de  $H_2O_2$ ) sont maintenus constants d'une simulation à l'autre (tous les 10 ans entre 1990 et 2100), alors que les émissions anthropiques de soufre issues du SRES évoluent en fonction du temps. Les forçages radiatifs sont calculés par rapport à 1990.

Pour tous les scénarios, le contenu intégré en sulfates anthropiques suit une évolution similaire à celle des émissions du soufre anthropique : croissance jusqu'au tour de 2040, suivie d'une décroissance jusqu'en 2100 (décroissance immédiate pour B2 et A1T), période à laquelle les techniques de désulfuration des combustibles devraient être

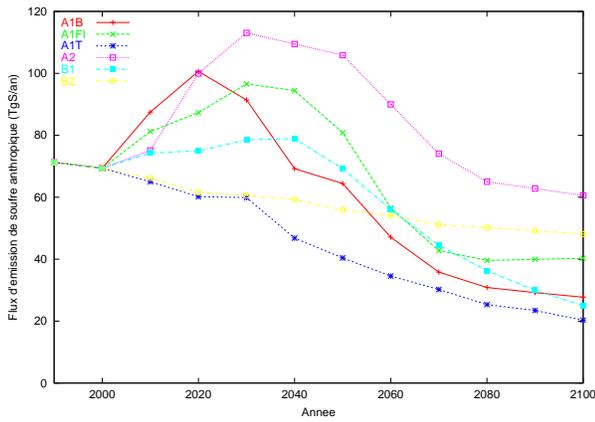


FIG. 24 – Emissions de soufre anthropique en moyenne annuelle et globale pour les 6 scénarios ( $\text{TgS an}^{-1}$ ).

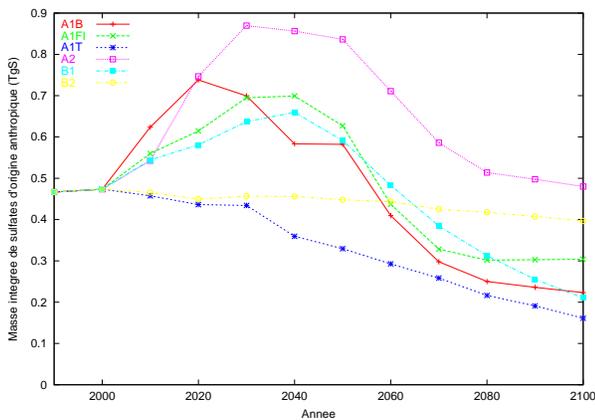


FIG. 25 – Masses intégrées de sulfates ( $\text{TgS}$ ) en moyenne annuelle et simulées pour les 6 scénarios.

accessibles partout dans le monde (figures 24 et 25). A l'échelle régionale en revanche, la répartition des colonnes de sulfates varie fortement au cours du temps pour un scénario donné ainsi qu'à un moment donné pour tous les scénarios, cela en fonction des hypothèses choisies pour construire les émissions.

Le forçage radiatif direct est également une fonction linéaire du contenu en sulfates alors qu'il existe des non-linéarités pour l'effet indirect (figures 26 et 27). Les valeurs du forçage varient respectivement entre  $-0,01$  et  $0,28 \text{ Wm}^{-2}$  et entre  $0,01$  et  $0,38 \text{ Wm}^{-2}$  pour les effets direct et indirect en 2100. On peut noter que les forçages correspondant aux deux effets sont du même ordre de grandeur sur la période 2000 - 2100 alors que le forçage radiatif direct sur la période du pré-industriel à 1990 ( $-0,42 \text{ Wm}^{-2}$ ) vaut pratiquement 2 fois moins que le forçage indirect ( $-0,79 \text{ Wm}^{-2}$ ) puisque la saturation de l'effet indirect y était moins marquée. Nous étudions actuellement les valeurs simulées de

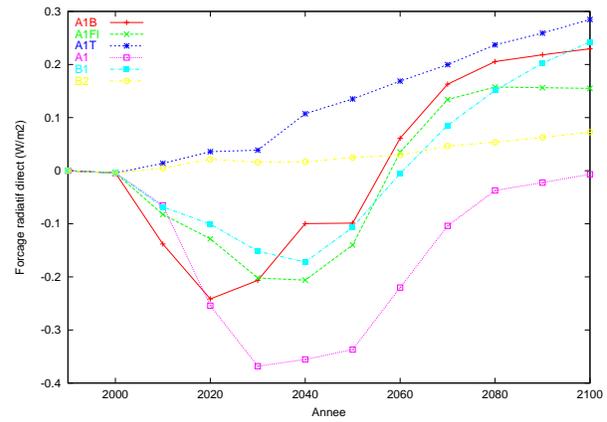


FIG. 26 – Evolution temporelle du forçage radiatif direct ( $\text{Wm}^{-2}$ ) en moyenne annuelle et globale pour les 6 scénarios.

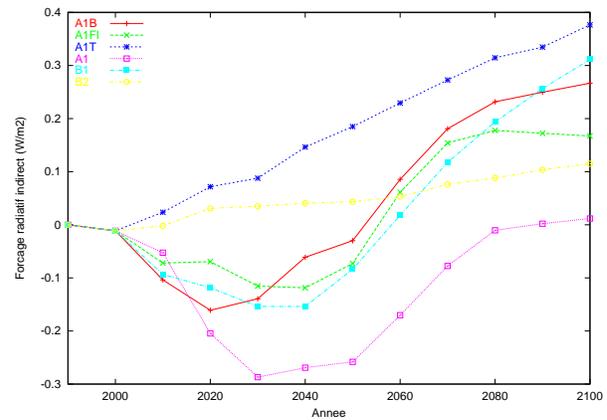


FIG. 27 – Evolution temporelle du forçage radiatif indirect ( $\text{Wm}^{-2}$ ) en moyenne annuelle et globale pour les 6 scénarios.

concentrations et de dépôt humide de soufre en termes de toxicité pour la santé de l'homme et les écosystèmes.

Mai Pham (SA)  
 mph@aero.jussieu.fr  
 Olivier Boucher (LOA)  
 boucher@loa.univ-lille1.fr

## 8 Climatologie - méthodes de validation

La suite au prochain numéro...

## 9 Les planètes

### Composition de l'atmosphère de MARS

#### Introduction

La mission Mars-Express vient de se mettre en orbite autour de la planète Mars. A son bord, Mars-Express contient deux spectromètres qui vont améliorer de façon significative notre connaissance de la composition de l'atmosphère martienne : SPICAM Light et PFS. SPICAM Light est un spectromètre ultraviolet et infrarouge qui permet des visées au limbe et au nadir, décrit en détail par *Bertaux et al.* [2000]. En ce qui concerne les constituants mineurs de l'atmosphère, cet instrument va apporter les premières cartes simultanées des densités colonne de vapeur d'eau et d'ozone, ainsi que de nombreux profils verticaux de vapeur d'eau, d'ozone et de monoxyde de carbone, par occultations solaires et stellaires. PFS (Planetary Fourier Spectrometer) va fournir des spectres haute-résolution dans la gamme 1.2-45  $\mu\text{m}$ . Il permettra (entre autres objectifs) de cartographier la distribution de vapeur d'eau dans l'atmosphère [*PFS Team*, 2002].

L'interprétation de ces nouvelles données va nécessiter d'aller au-delà des limitations des modèles photochimiques actuels de l'atmosphère martienne. Jusqu'à présent, seuls des modèles photochimiques à une dimension ont été utilisés pour déterminer les profils verticaux des constituants minoritaires de l'atmosphère de Mars [e.g. *Parkinson & Hunten*, 1972; *McElroy & Donahue*, 1972; *Shimazaki*, 1981; *Krasnopolsky*, 1993; *Nair et al.*, 1994]. Ces modèles ont été très utiles pour évaluer la distribution moyenne des espèces chimiques en fonction de l'altitude, et ont mis en évidence le rôle de la vapeur d'eau pour interpréter la stabilité du  $\text{CO}_2$  martien. En utilisant une paramétrisation de l'abondance d'eau et du profil de température, un modèle bidimensionnel [*Moreau et al.*, 1991], et des modèles 1D adaptés pour l'étude des variations saisonnières et diurnes du profil vertical d'ozone [*Shimazaki* 1981, *Clancy and Nair*, 1996] ont montré la nécessité de décrire complètement le cycle de l'eau de façon réaliste pour pouvoir comprendre les variations de composition dans l'atmosphère martienne.

Nous présentons ici le premier modèle tri-dimensionnel chimie-transport de l'atmosphère de

Mars. Le modèle de circulation général de Mars développé au LMD depuis une dizaine d'années [*Forget et al.*, 1999], incluant désormais le cycle de l'eau, a été couplé à un modèle photochimique pour obtenir une description complète de la composition atmosphérique martienne. Les premiers résultats du modèle sont exposés, en se focalisant sur l'ozone.

#### Le modèle

Nous avons développé un modèle photochimique utilisant les toutes dernières données en matière de coefficients de photodissociation et de taux de réactions, essentiellement issues de la compilation *Sander et al.* [2003]. Après avoir été stocké dans une table de référence, les taux de photodissociation sont interpolés en un point en fonction de la colonne de  $\text{CO}_2$ , de celle d'ozone, de la température et de l'angle zénithal. Les taux de réaction sont recalculés en fonction des conditions dans chaque cellule à chaque pas de temps chimique. Le modèle photochimique a été couplé au modèle de circulation générale de l'atmosphère de Mars développé sur la base de LMDZ. Ce modèle est utilisé en résolution 64x48, avec 32 couches verticales (120 km d'altitude). La toute dernière évolution permet un couplage avec la thermosphère, avec 55 couches (240 km d'altitude) en coordonnées hybrides. Le cycle de l'eau est inclus dans le modèle (thèse de Franck Montmessin, SA, soutenue en janvier 2003), ce qui permet d'étudier les cycles des autres composants de l'atmosphère dans un cadre 3D, sur une base réaliste. L'appel à la chimie se fait avec un pas de temps de 10 minutes. La condensation du peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) est prise en compte avec un schéma simplifié.

#### Les cycles de l'ozone

##### Cycle saisonnier dans les basses latitudes

Le cycle de l'eau est un élément essentiel contrôlant la composition de l'atmosphère de Mars, via la formation de radicaux  $\text{HO}_x$ . La figure 28 montre l'évolution de la colonne-densité de la vapeur d'eau, en moyenne diurne et zonale, en fonction de la latitude et de la longitude solaire. Cette évolution est très similaire à celle observée par l'instrument TES/Mars Global Surveyor [*Smith et al.*, 2000]. Une anti-corrélation entre l'eau et l'ozone a été prédite par les modèles photochimiques, due à l'implication des radicaux  $\text{HO}_x$  dans les cycles contrôlant l'ozone. Nous retrouvons cette anti-corrélation dans notre modèle, comme l'illustre la comparaison entre la figure 28a (cycle de l'eau) et la figure 28b (cycle de l'ozone). Cette anti-corrélation se voit également entre les figures 29a,

et 29b qui montrent ainsi l'influence des variations saisonnières de l'hygropause sur la distribution d'ozone. Dans l'atmosphère moyenne (20-80 km), la distribution verticale de la vapeur d'eau est nettement influencée par les variations du flux solaire associées à l'excentricité de l'orbite martienne. Autour de l'aphélie (longitude céleste  $L_s=60-120^\circ$ ), l'atmosphère est froide et relativement dépourvue de poussières. La condensation de la vapeur d'eau (hygropause) intervient alors à basse altitude (au-dessus de 10 km). Immédiatement après l'aphélie, l'altitude de l'hygropause augmente de façon régulière jusqu'au périhélie. Dans ces conditions plus chaudes, la saturation de l'eau intervient vers environ 40 km d'altitude. Ceci entraîne de très grandes variations de la teneur en eau de l'atmosphère moyenne, et ainsi de la quantité de radicaux  $HO_x$ , et d'ozone. Le profil d'ozone (figure 29b) répond rapidement à ces variations saisonnières de vapeur d'eau (figure 29a). La couche d'ozone (nocturne) présente entre 30 et 60 km d'altitude disparaît presque totalement autour du périhélie. Par contre, dans la basse atmosphère (sous 20 km d'altitude), la quantité d'ozone n'est que peu sujette au cycle saisonnier.

La comparaison entre le modèle et les observations disponibles montre un accord au printemps nord, mais qui se dégrade à l'approche du solstice d'été nord [Clancy et al. 1999; Novak et al. 2002]. Il peut y avoir plusieurs explications aux désaccords obtenus : incertitudes sur les sections efficaces de  $H_2O$  et  $CO_2$ , sur certaines réactions impliquant des radicaux  $HO_x$ , ou encore la possibilité de réactions hétérogènes à la surface des poussières, de cristaux de glace, ou au sol.

## Cycle diurne

En dehors de la saison correspondant au périhélie ( $L_s$  autour de  $250-300^\circ$ ), la teneur en eau de l'atmosphère moyenne est faible, et une couche d'ozone se forme au coucher du soleil. Cette couche d'ozone nocturne induit un fort cycle diurne, la quantité d'ozone intégrée dans cette couche étant comparable à celle située près du sol (relativement stable). Lorsque l'hygropause monte en altitude, l'augmentation de la teneur en radicaux  $HO_x$  de l'atmosphère moyenne détruit cette couche d'ozone, et le cycle diurne de la densité colonne d'ozone disparaît.

Avec la moisson de données SPICAM, nous espérons pouvoir étudier en détail le cycle de l'ozone, et mieux en comprendre tous les mécanismes.

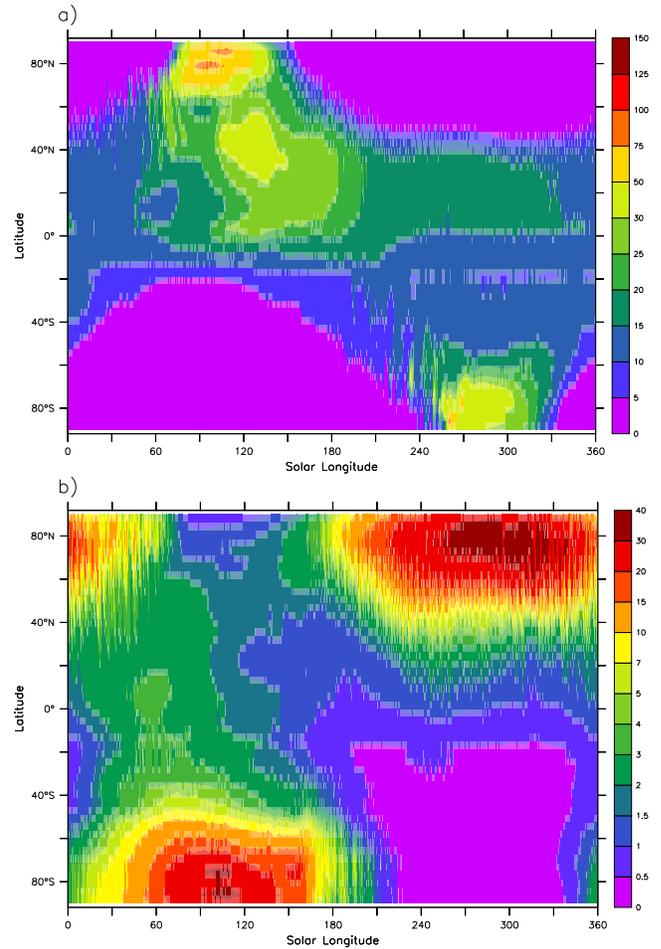


FIG. 28 – Colonne densité (moyenne diurne et zonale) en fonction de la saison et de la latitude pour (a) la vapeur d'eau (en microns précipitables) et (b) l'ozone (en  $\mu\text{m-atm}$ ).

## L'ozone polaire

Aux latitudes polaires (au-dessus de  $60^\circ$ ), l'ozone se concentre au-dessus de chaque pôle entre l'équinoxe d'automne et celle de printemps. La vapeur d'eau condense, les radicaux  $HO_x$  disparaissent, et l'ozone peut s'accumuler, surtout dans la basse atmosphère. Dans l'atmosphère moyenne, l'ozone s'accumule également en automne, mais en hiver, la dynamique induit un transport de vapeur d'eau et de radicaux  $HO_x$  vers le pôle à haute altitude (au-dessus de 50 km), qui provoque la destruction de la couche d'ozone.

L'ozone polaire hivernal est confiné dans le vortex polaire, avec un fort gradient entre  $50$  et  $60^\circ$  de latitude. L'extension en latitude de ce vortex est très sensible aux variations dynamiques (comme les ondes baroclines), et l'ozone montre très bien cette activité, qui est maximum entre la fin de l'hiver et le printemps.

## 10 Le coin débat

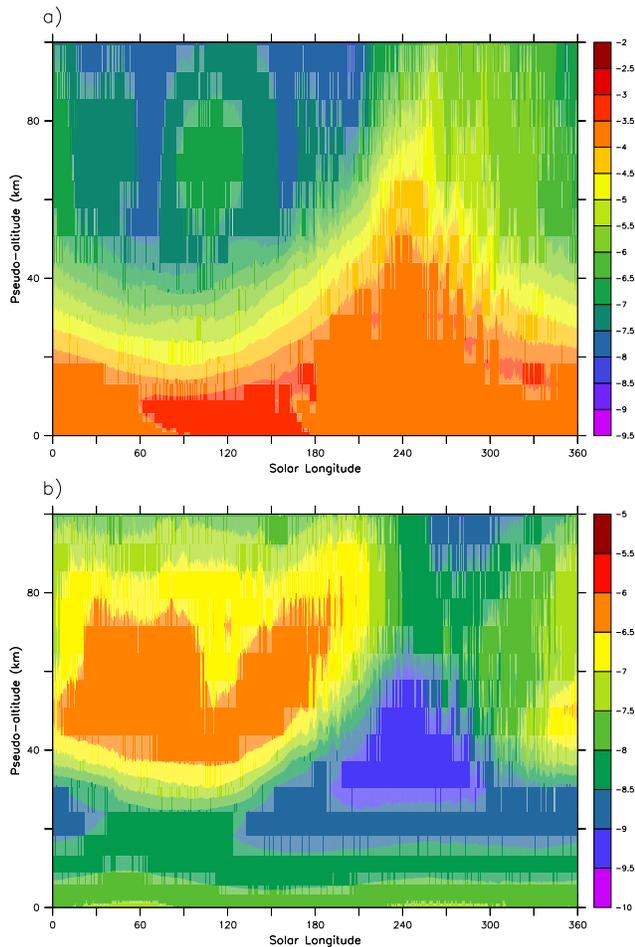


FIG. 29 – Profil vertical de la fraction molaire (moyenne diurne et zonale) (a) la vapeur d'eau et (b) l' ozone, en fonction de la saison à l'équateur.

### Sauvons la recherche

Le mouvement "Sauvons La Recherche" a été marqué par la démission collective de nombreux directeurs d'unité - démission désormais refusée par les tutelles, à la suite des dernières mesures gouvernementales, qui font droit à toutes les revendications de courte durée du mouvement. Dans mon cas, s'associer à un tel mouvement, m'est apparu comme relevant d'une nécessité absolue, face au mépris très explicite que représentaient les réductions sauvages non programmées, à la fois de nos ressources financières, et des embauches de jeunes chercheurs ou d'ITAs.

Je suis bien sûr content des résultats obtenus par ce mouvement. Pour autant, il me semble important que cette "victoire" très temporaire ne cache pas la permanence de très nombreux problèmes - dont certains sont aussi, je le pense, des problèmes de fond d'organisation de la recherche publique. Je crois que cette vigilance retrouvée des chercheurs doit continuer à s'exercer, et que le mouvement "Sauvons La Recherche" ne sera véritablement utile que s'il en est à ses débuts!

Hervé LE TREUT (LMD)  
letreut@lmd.jussieu.fr

### Conclusion

Les premiers résultats de ce modèle 3D chimie-transport de l'atmosphère de Mars montre le potentiel du GCM martien du LMD. De nombreuses études vont suivre (cycle du peroxyde d'hydrogène qui vient d'être observé dans l'atmosphère de Mars, chimie hétérogène, interactions avec la surface et degré d'oxydation, couplage avec la thermosphère, mécanismes d'échappement), en lien direct avec l'analyse des données de la mission Mars-Express.

Sebastien Lebonnois (LMD)  
Sebastien.Lebonnois@lmd.jussieu.fr  
Franck Lefevre (SA)  
François Forget (LMD)

# 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