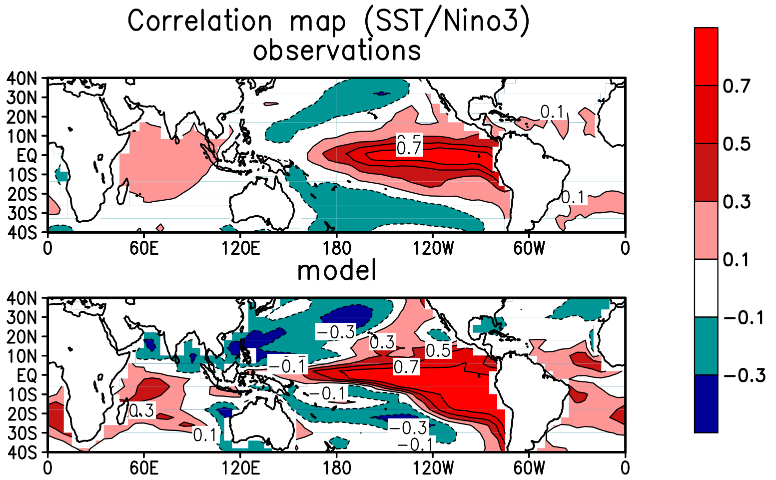
LMD Z info

la lettre des utilisateurs
du modèle de circulation générale atmosphérique de l'Institut Pierre Simon Laplace

N◦ 0 Juillet 2000

Sommaire



L'illustration du jour. Corrélation entre un indice El Niño et la température de surface des océans pour une simulation de 200 ans effectuée par Laurent Li avec la version 2.2 du modèle LMDZ, couplée avec le modèle d'océan ORCA du LODYC (sans glace).

Editorial – Le modèle de circulation générale atmosphérique LMDZ arrive aujourd'hui à maturité et commence à être distribué dans un certain nombre d'équipes. LMDZ est le modèle atmosphérique retenu par le "Pôle Modélisation" de l'IPSL pour étudier dans l'avenir les couplages entre les différentes composantes du système climatique. Le modèle est d'ores et déjà couplé avec l'océan (modèles OPA et ORCA du LODYC notamment), avec la végétation (modèle SECHIBA/STOMATE) et avec la glace de mer. LMDZ a également été couplé avec le modèle INCA de chimie développé au SA. Sans oublier bien sûr les versions pour les atmosphères de Mars et Titan, les premières historiquement.
Face à cette diversification, tant géographique que thématique, il a été décidé de mettre sur pied une lettre d'information à destination des utilisateurs et développeurs du modèle. Ce numéro zéro, un peu particulier, revient largement sur la présentation et l'histoire du modèle.

Frédéric Hourdin

1 Un peu d'histoire

LMDZ : les grandes étapes

Les origines

La modélisation du climat au LMD remonte à la fin des années 70. Phu LeVan se déplaçait alors dans les différents centres informatiques avec les tiroirs de cartes perforées qu'il codait avec Robert Sadourny.

En 1984, c'est l'article de référence de toute bonne publication sur le modèle : Sadourny et Laval, 1984. A la même époque, Robert Sadourny et Phu LeVan entreprennent la réécriture de la partie dynamique du code – qui ne s'appelle pas encore LMDZ – avec deux objectifs : une écriture modulaire et la possibilité de raffiner la grille sur une région du globe (le Z du baptême veut dire Zoom).

Les premières applications de ce nouvel outil sont martiennes. Le modèle du LMD est le premier à simuler un cycle saisonnier entier sur la planète rouge.

Pendant ce temps le modèle du LMD poursuit une vie trépidante. La version 4ter, qui donnait des résultats excellents sur la Mousson Indienne (présentez une simulation du modèle à un chercheur authentique du LMD, il commencera par regarder la "précip" de juillet sur l'Inde), est progressivement remplacée par les versions 5 et 6. Ces versions sont notamment couplées à Sechiba pour la végétation et à OPA pour l'océan.

Une date charnière : Fontevraud

C'est lors d'un séminaire interne du LMD, tenu en la royale abbaye de Fontevraud en 1990, qu'est prise collectivement la décision de faire de ce nouveau code dynamique l'ossature du futur modèle de climat du LMD. Ce choix est motivé par la volonté de disposer d'un outil souple et modulaire, permettant facilement l'échange et le test de modules et de procédures. Cette décision s'inscrit dans l'idée de modélisation communautaire alors dans l'air du temps.

Il faut donc adjoindre au code dynamique un jeu de paramétrisations physiques. Dans un premier temps, la décision est prise de partir de la physique du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme. Ce modèle contient en effet le code radiatif Fouquart/Morcrette, développé à l'origine pour le modèle du LMD, et les schémas de nuages d'Hervé LeTreut.

Cette décision ne sera finalement pas tenue. Si Laurent Li s'est bien battu pour effectuer les portages nécessaires, le groupe décidera quelques années plus tard de privilégier la continuité avec les versions précédentes. Un lourd exercice de "convergence" LMDZ/LMD-5ter sera mené à bien en 1996. Michèle Forichon y laissera pas mal d'énergie. Plus généralement, les acteurs de l'époque, qui tentent de mener à bien les décisions de Fontevraud, s'useront entre décisions, attaques et contre-décisions.

Les premières utilisations climatiques

A partir de 1995, le modèle LMDZ commence à être utilisé pour des études climatiques. Laurent Li développe des versions couplées avec des océans plus ou moins simplifiées. Au LGGE à Grenoble, Gerhard Krinner met à l'épreuve le zoom en configuration polaire. C'est à cette époque qu'on fige la première version distribuée du modèle : LMDZ.2.

L'écriture modulaire de LMDZ est également l'occasion de se repencher sur les paramétrisations : François Lott côté effet des montagnes; Laurent Li, Jean-Yves Grandpeix, Sandrine Bony et d'autres côté couche limite, convection et nuages. Le schéma de convection "Manabe-Kuo" est abandonné pour le schéma de Tiedtke. En parallèle, un travail important est engagé sur le schéma de Kerry Emanuel, en exploitant notamment la version uni-colonne de LMDZ.

LMDZT

En 1998, suivant une idée de Bernard Legras et Sandrine Edouard, un schéma de transport en volumes finis est introduit dans le modèle. LMDZ est alors doté de la capacité de transporter un nombre arbitraire d'espèces traces.

Le modèle LMDZ a depuis été retenu pour servir d'ossature à un modèle climatique couplé, chimie-aérosols-climat, en vue notamment d'effectuer des scénarios climatiques "branchés" (on-line) couplés incluant les gaz à effet de serre et des aérosols. Le nouveau code de chimie INCA, développé par Didier Hauglustaine (LSCE/SA), est interfacé depuis peu avec LMDZ. Le travail sur les aérosols est en cours au LSCE.

La version "traceur" du modèle, LMDZT, peut être utilisée soit en mode climatique, soit forcée par les vents "analysés" dans les grands centres de prévisions. Le modèle peut également être utilisé en mode débranché, sans recalculer la météo, en utilisant des archives d'une première simulation. Ceci fait de LMDZT (LMDZ dans sa version transport) un modèle de chimie-transport qui est utilisé en dehors des applications climatiques, par exemple pour des études menées en collaboration avec Jean-Pierre Issartel (CEA/DAM) concernant la détection des essais nucléaires.

Olivier Boucher, Alexandre Armengaud et Marie-Angèle Filiberti ont joué un rôle clef dans l'essor de LMDZT.

On continue sur les planètes

Pendant toute cette période, le modèle LMDZ a continué à être utilisé pour d'autres planètes. Il est le premier à avoir simulé la circulation atmosphérique sur Titan, avec une stratosphère qui tourne, dans son ensemble, plus de dix fois plus vite que la planète solide. Plus gros satellite de Saturne, Titan est l'objectif de la mission Européenne Huygens qui sera emmenée vers le système de Saturne par la sonde américaine Cassini. Sur Mars, François Forget s'attaque aux tempêtes de poussières et aux paléoclimats. Le modèle du LMD a aussi été utilisé pour développer une base de données climatiques martienne pour l'Agence Spatiale Européenne en collaboration avec une équipe d'Oxford.

LMDZ aujourd'hui

Avec l'arrivée du NEC-sx5 à l'IDRIS et l'abandon de LMD5 pour les scénarios couplés, Laurent Fairhead a pu se consacrer pleinement à LMDZ, côté environnement informatique et couplages notamment. Il a récemment effectué le basculement des entrées-sorties du modèles vers NetCDF et IO-IPSL. Il a surtout codé ces derniers mois, suite à des discussions avec Jean-Louis Dufresne, Pascale Braconnot, Laurent Li et Jan Polcher, une interface générale entre atmosphère et surface qui sera utilisée tant pour la végétation que pour l'océan ou la glace.

Phu LeVan continue bien sûr à jouer un rôle déterminant pour la partie dynamique du modèle. Il a récemment effectué le passage de la coordonnée verticale σ à la coordonnée hybride σ-p.

Ces étapes définissent la version LMDZ.3.3. Cette version est aujourd'hui distribuée :

- au LMD : variabilité et sensibilité climatiques. Etude de processus et développement de paramétrisations. Etude de la dynamique des atmosphères terrestre et planétaires. Etude du transport atmosphérique.
- au LSCE : études climatiques couplées avec l'océan. Représentation du cycle des aérosols. Cycle du carbone (simulations directes et inversion des puits et sources de dioxyde de carbone).
- au SA : couplages chimie-climat. Couplage aérosols-climat sur Titan.
- au LGGE : étude des climats polaires et transport de traceurs.
- au LOA : modélisation du cycle du soufre.
- à l'IIT/Dehli : étude de la mousson Indienne.
- en Argentine : étude de la circulation dans l'hémisphère sud.
- au CESR : couplage chimie-climat sur Titan.

LMDZ-info : pour quoi faire?

C'est la multiplication des utilisateurs, laboratoires et thématiques qui nous a conduits à créer cette lettre. LMDZ-info doit d'abord être un outil de travail permettant notamment aux utilisateurs et aux développeurs du modèle de se tenir informés de leurs travaux respectifs. LMDZ-info peut également devenir un lieu de débat autour des évolutions et utilisations du modèle. En revanche, la rédaction de LMDZ-info doit éviter de devenir un exercice technocratique, une corvée de plus s'ajoutant à la liste interminable des demandes de financements et comptes-rendus en tous genres. Nous ne souhaitons pas non plus que LMDZ-info soit un support de publications scientifiques au rabais; d'ailleurs, nous n'en avons pas les moyens. Il faudra donc se battre chaque jour pour la légèrté.

La formule qui a été retenue dans un premier temps est la suivante : une petite dizaine de rubriques, chacune organisée par une à trois personnes, avec un éditorial présentant les étapes récentes et introduisant une série de contributions. Chaque contribution est limitée à une demi-page (une colonne) de texte et à une page en incluant les figures éventuelles. Le texte sera envoyé de préférence en ASCII par messagerie électronique. C'est Soumya Jamili qui s'occupe de la centralisation des textes et de la réalisation du journal sous LaTeX(jamili@lmd.jussieu.fr). La périodicité n'est pas encore arrêtée, mais on table typiquement sur deux à quatre numéros par an. Les contributions pour le numéro 1 sont à envoyer avant le 15 Novembre. Le journal sera disponible sur le site web : http://www.lmd.jussieu.fr/LMDZ-info. Des tirages papiers seront distribués dans les laboratoires. Pour bien commencer, ce numéro 0, un peu particulier, enfreint la plupart des règles édictées plus haut. OUF!

Frédéric Hourdin
hourdin@lmd.jussieu.fr

La période artisanale de la modélisation du climat au LMD

La naissance de LMDZ, nouveau modèle unifié du groupe, me donne envie de rappeler quelques étapes de l'évolution de la physique dans le modèle. Je laisse le soin à R. Sadourny et P. le Van de parler de leur rôle essentiel pour définir la dynamique.

Les mécanismes physiques essentiels à inclure dans le MCG au départ ont été les paramétrisations du rayonnement, de la précipitation et des échanges de la couche limite. Y. Fouquart a été un acteur à part entière lors de cette étape et a développé "Sunray", paramétrisation du rayonnement solaire avec nous. Son modèle a été introduit par P. LeVan dans le MCG et je me rappelle le nombre de semaines et de mois où P. LeVan a travaillé sur ce programme; où avec lui j'ai testé tous les paramètres d'albedo et d'absorption de nuages pour tous les types de nuages "climatologiques" présents dans le modèle; où j'ai vérifié pour de nombreuses conditions "standard" les profils verticaux d'absorption pour chaque constituant de l'atmosphère.

Nous avons ensuite, au LMD, introduit la paramétrisation du rayonnement terrestre et atmosphérique définie par Katayama. Ce travail préliminaire a été utile à J.J. Morcrette pour caler sa paramétrisation du rayonnement infrarouge. C'est en utilisant la référence de "Katayama", off-line ou dans notre MCG, qu'il a effectué une grande part de ses ajustements. Les deux routines de rayonnement, appelées quelques fois rayonnement du centre Européen (!), doivent beaucoup, je le crois, au LMD.

J'ai ensuite introduit les mécanismes de précipitation dans le modèle: convection (cumulus) et sursaturation en situation de stabilité thermique (stratus). Le GFDL m'a proposé son code d'ajustement convectif. C'était tentant, car il avait l'avantage d'être "prêt à l'emploi". J'y ai ajouté une paramétrisation des cumulus en situation non saturée (situation qui est celle de la convection en zone tropicale). Bien qu'appelé "type Kuo" ce programme introduit les conditions d'instabilité à partir du profil de l'humidité statique humide, choix qui s'appuyait sur les travaux d'Arakawa et Shubert; ceux-ci, bien sûr, avaient ma préférence mais nécessitaient un travail de programmation supplémentaire. Ces deux subroutines, plus celle qui définit la condensation en situation d'atmosphère stable sursaturée, furent introduites par G. Lefevre dont l'aide m'a été précieuse car il a conduit l'ensemble des tests basés sur les situations d'observations de "GATE". Enfin G. Sommeria a introduit la représentation de la couche limite en incluant les termes de contre gradient de Deardorff.

On a ensuit effectué des simulations de 50 jours. J'ai commencé la comparaison entre les résultats du modèle et la climatologie lors d'un séjour au GFDL en utilisant les observations que les chercheurs du GFDL avaient et avec l'aide de S. Manabe. P. LeVan calculait les diagnostics à Paris (transfert d'énergie, transfert de moment cinetique) et m'envoyait les listings de chiffres. Le dessinateur du GFDL dessinait les courbes ! Ce travail a donné lieu à la première publication sur le modèle, à un colloque international à Nice en 1978. L'arrivée d'autres jeunes membres dans le groupe a donné une dynamique très positive à ce modèle. V. Serafini a introduit les échanges entre la surface continentale et l'atmosphère. Qu'on ne s'y trompe pas : bien que la végétation en tant que telle n'apparaisse pas (ni surface foliaire, ni résistance stomatique ...), les phénomènes essentiels tels que évaporation, température du sol, ruissellement, stockage de l'eau ou rôle du stress hydrique sont déjà representés dans le modèle. H. Le Treut a introduit les "nuages". Cela peut paraître surprenant aujourd'hui, mais les nuages (surface et paramètres) étaient prescrits dans les premières versions des MCG et il y avait à cela de bonnes raisons. Si les nuages convectifs pouvaient créer des nuages fractionnaires, la sursaturation à l'échelle de toute la maille impliquait une nébulosité pour les stratus de 100%. H. Le Treut a alors introduit le paramètre "qsat" qui permettait de définir une surface nuageuse fractionnaire sur la maille. Il faut être prudent quand on change ce paramètre qui joue sur l'équilibre entre cumulus et stratus. Une valeur erronée (qu'on peut choisir pour des ajustements) peut stopper la convection. Cette erreur a malheureusement porté préjudice au modèle lors des premiers runs AMIP.

S. Joussaume, C. Ottlé et L. Picon ont toutes les trois apporté leur contribution importante au MCG du LMD. Elles auront l'occasion d'inclure des contributions dans ce journal. Ensuite de nombreux étudiants nous ont rejoints et nous avons obtenu des moyens plus importants. Je laisse la suite de l'histoire des interactions nuages rayonnement à H. Le Treut et ses collaborateurs. On aura l'occasion aussi de revenir sur l'interaction végétation, hydrologie et climat, avec N. Ducoudré, J. Polcher... Il y a eu bien sûr beaucoup d'autres contributions. Je voudrais seulement encore rappeler l'importance de R. Butel qui a passé un temps considérable sur la réécriture et la vectorisation du modèle et nous a fourni LMD5 à un moment clef de l'évolution du modèle ...

Sans citer les acteurs plus récents qui se sont succédés, et qui interviendront dans le journal, je voudrais insister sur un travail qui pour moi a une grande importance et formuler un souhait. Pendant un certain nombre de mois, quelques "jeunes chercheurs" ont travaillé sur une version du modèle LMD5.3 pour l'améliorer. A. Harzallah, L. Li, J. Polcher, A. Vintzileos ont passé un temps considérable à vérifier les sorties du modèle et à améliorer le réalisme de ces simulations soit en jouant sur des paramètres ou des paramétrisations soit en trouvant un certain nombre de “bugs” dans le modèle. Ce travail n'a pas donné lieu à publication et a servi à tout le groupe. Mais il faut savoir que les publications qui se sont appuyées sur cette version ont eu un retentissement important dans la communauté internationale (aujourd'hui encore on me demande des résultats de ce modèle, publiés il y a si longtemps). Je souhaite très fort qu'un certain nombre “d'utilisateurs” accepte de s'investir dans ce travail ingrat et difficile. Je serais prête à donner beaucoup de mon temps pour que le modèle du LMD ait une climatologie de grande qualité.

Katia Laval
laval@lmd.jussieu.fr

2 Evolutions du modèle et aspects informatiques

Les évolutions informatiques récentes

L'évolution informatique récente de LMDZ a été marquée par la convergence des versions “climat” et “traceurs” de LMDZ, l'abandon du format de fichiers DRS et le passage au “tout NETCDF”, la mise en place d'une gestion du code plus “moderne”, un nettoyage “énergique” du code dû, en partie, à la volonté de portage sur toutes les machines à notre disposition et enfin, ces derniers mois, la préparation du raccordement entre LMDZ et les différents schémas de surface qu'on veut pouvoir y brancher.

Je laisserai à d'autres l'exposé de la convergence des versions climat et traceurs pour revenir sur les autres points. Si le choix de DRS peut paraître surprenant aujourd'hui, vu son abandon subséquent par son créateur, le PCMDI, il faut se rappeler qu'à l'époque où la décision a été prise, le format NetCDF n'était pas encore devenu le standard qu'il est aujourd'hui. De plus, les philosophies de ces deux formats de fichiers étant assez proches, le travail fait pour l'un était facilement récupérable pour l'autre. Ceci, en conjonction avec l'utilisation de la bibliothèque d'entrées/sorties IOIPSL (http://www.ipsl.jussieu.fr/~ioipsl/), rendit le passage entre les deux formats presque sans douleur, à part une ou deux nuits blanches subies par le “maso” de service pour que le modèle soit fin prêt pour la journée d'initiation LMDZ de l'automne dernier (1999) et la diffusion vers l'extérieur.

Pour la gestion du code, le choix s'est porté sur CVS, qui a l'avantage d'être sous licence GNU, donc disponible sur la plupart des architectures existantes (et gratuit), d'être facile d'emploi, de supporter le développement du code par plusieurs personnes en même temps et d'avoir une interface web facile à mettre en œuvre. On trouvera donc l'arborescence CVS de LMDZ à l'adresse
http://www.lmd.jussieu.fr/cgi-bin/cvsweb.cgi/LMDZ.3.3/
D'ailleurs et en général, toutes les informations concernant LMDZ se trouvent sur la page
http://www.lmd.jussieu.fr/LMDZ/
et en particulier le mode d'emploi pour récupérer LMDZ.

Cette visibilité du code de l'extérieur est essentielle vu le grand nombre d'équipes dans lesquelles LMDZ est distribué. Cette diffusion vers les autres laboratoires et centres de calcul nous a permis d'une part d'éliminer de nombreux bugs (par le passage par la grande diversité de compilateurs accessibles) mais surtout de constater que le code était extrêmement portable puisque, par exemple, des runs de production ont été lancés sur le NEC SX5 de l'IDRIS quelques jours seulement après son arrivée. Nous avons malheureusement pâti de la jeunesse du SX5 puisqu'un bug dans l'optimiseur du compilateur fortran a bloqué nos travaux pendant plusieurs semaines. Toutes ces étapes furent évidemment l'occasion rêvée d'un nettoyage vigoureux du code (même si quelques scories subsistent).

Nous avons finalement validé toutes ces étapes par le lancement d'une simulation de référence sur la période AMIP (1979-1994), les résultats étant disponibles sur la toile à l'adresse:

http://www.lmd.jussieu.fr/LMDZ/atlas.html

Au prochain numéro, nous reviendrons plus en détail sur le gros “morceau” informatique accaparant le temps de deux éditeurs de cette chronique (et cause de la sortie tardive de ce numéro 0 de LMDZ-infos): le raccordement de LMDZ et des schémas de surface (SECHIBA/STOMATE, OASIS/ORCA, ...). A l'occasion de ce travail, il nous a fallu mettre en place et valider le principe des surfaces mixtes atmosphère/océan dans le modèle et rendre l'interface atmosphère/surfaces plus générale et souple (ce dernier point nécessitant une réécriture de la formulation de l'interface, une réorganisation informatique de la couche limite dans LMDZ et l'écriture d'une interface générale entre LMDZ et les routines de surface). Ce travail est pratiquement terminé et devrait déboucher sur des tests “grandeur nature” dans les jours qui viennent. A suivre, donc ...

———–

Laurent Fairhead
fairhead@lmd.jussieu.fr

LMDZ au LSCE

Ca y est! LMDZ est installé au LSCE dans les équipes climat, géochimie tropo et carbone. Le modèle tourne actuellement plutôt bien et nous apprécions d’avoir tout en netcdf. Deux résolutions sont utilisées, 72x46x19 et 96x72x19, et ont respectivement tourné 20 et 15 ans. Les climatologies obtenues ressemblent à celles disponibles sur le web. Nous avons cependant mis un peu de temps à implanter le modèle sur le vpp500 du CEA à Grenoble. La raison principale est liée à l’interface netcdf. Nous compilons le code en double précision et les routines netcdf appelées étaient pour la plupart des routines simple précision. Le débogage a été compliqué par le fait que, suivant les parties de code, les entrées/sorties en netcdf sont effectuées en appelant ioipsl ou directement les routines netcdf. Cette expérience montre que, par la suite, il serait bon de tout faire via ioipsl. Ca évitera quelques fausses pistes en cas de problème. Il ne suffit hélas pas de compiler un code et d’arriver à faire des états initiaux pour que tout marche. Le calvaire peut continuer et pour nous il s’est appelé ”explosion” au bout de 6 mois de run. L’œil efficace de Laurent Li a remarqué que les “tetagdiv”, “tetagrot” et tetatemp étaient trop élevés. Les valeurs de 7200 ont été remplacées par 3600 et le modèle n’explose plus. Ce genre de choses ne s’invente pas lorsqu’on attrape un nouveau code. Un petit fichier supplémentaire sur le web donnant les valeurs devant être utilisées a priori suivant la résolution que l’on a serait le bien-venu.

Enfin, depuis une semaine le moral des troupes est remonté. Nous pouvons maintenant entreprendre de travailler avec le modèle. A très court terme nous envisageons
1. un peu de paléo-climat (équipe climat);
2. quelques modifications pour le couplage avec l’océan en collaboration avec les ”coupleurs fous” du LMD (équipe climat);
3. l’introduction du cycle des aérosols non souffrés (équipe géotropo);
4. l’utilisation du offline pour les traceurs (équipe carbone).

———–

Pascale Braconnot
pasb@lsce.saclay.cea.fr

LMD5 sur VPP500

LMD5 est-il mort? Pas du tout. Une version de LMD5 a été portée sur le VPP. Le portage a consisté
1. à enlever les spécificités cray du code. J. Latour de la cellule fujitsu de Toulouse nous a fourni des équivalents des bibliothèques spécifiques cray et a modifié en conséquence les appels dans le modèle.
2. à porter les entrées/sorties du modèle qui utilisaient toutes les astuces du cray, entre autres que le codage des réels, des entiers et des chaînes de 8 caractères était le même. Ce genre de choses, comme on peut s’en douter, ne passe absolument pas sur le fujitsu en arithmétique ieee. La chasse aux caractères et aux entiers a donc été ouverte pour tranformer les états de redémarrage cray en ieee, et, dans le code, différents aménagements ont été faits pour pouvoir écrire et lire les différents types de variables.

Nous avons aussi eu quelques soucis supplémentaires avec les pointeurs au passage entre le vpp300 et le vpp5000. Grâce à l’intervention efficace de l’assistance CEA, les problèmes ont été résolus et on a pu retrouver les mêmes résultats entre le VPP5000 et le VPP300. Ces modifications sont disponibles pour toute personne connaissant le même genre de besoins auprès de P. Braconnot (pasb@lsce.saclay.cea.fr).

Les choses ne sont cependant pas encore entièrement satisfaisantes. La climatologie de la simulation de contrôle de 15 ans qui vient d’être effectuée est différente de celle que nous avions sur le Cray. Nous cherchons actuellement à déterminer si ces différences viennent du changement de machine ou d’opérations de portage et d’optimisation qui auraient modifié le code. A suivre.....

———–

Pascale Braconnot
pasb@lsce.saclay.cea.fr

Point de vue d’un utilisateur satisfait

Grâce au travail réalisé sur LMDZ.3.3 par Laurent Fairhead et Marie-Angèle Filiberti, le portage de la version transport de LMDZ.3.3 sur le NEC SX5 s’est très bien passé. Je conseille de n’utiliser les routines minmaxq et minmaxqfi que de manière occasionnelle (débogage) car elles sont très mal optimisées. Les performances atteintes sur le NEC semblent satisfaisantes, environ 2.2 Gigaflops à la résolution 96x72x19 et 9 traceurs. Il est à noter que les performances sont beaucoup moins bonnes aux très faibles résolutions comme 32x24x9 en raison de vecteurs trop courts.

* * *

Olivier Boucher
boucher@mpch-mainz.mpg.de

3 Applications climatiques

Au cours des dernières années, l'étude du climat a très largement continué à s'effectuer au travers des modèles LMD5 et LMD6. Il était nécessaire d'avoir une grande période de recouvrement entre ces anciens modèles bien connus et validés et le modèle LMDZ en gestation. C'est avec le modèle LMD6 que des séries longues (30 ans) de simulations forcées par les températures de l'océan ont été réalisées (par K. Maynard et J. Polcher) pour le compte du projet DICE en particulier. C'est avec le modèle LMD5.3 qu'ont été réalisées toutes les expériences de scénarios du climat futur (et en particulier les plus récentes et les plus novatrices, associant le cycle du carbone au système climatique). Avec le nouveau millénaire cette situation est révolue : LMDZ devient le seul modèle du laboratoire. L'enjeu est lourd. Au-delà des problèmes de développement informatique accéléré que cela implique, cela aussi signifie que LMDZ, dont le développement a été beaucoup porté par un souci de cohérence physique, va se trouver jugé, critiqué, référencé en fonction d'un critère subtilement différent : son réalisme.

De ce point de vue les temps deviennent plus durs : le prochain rapport IPCC contiendra des comparaisons tout à fait explicites de la qualité des différents modèles, et cette tendance à " noter " les modèles très ouvertement va aller en s'affirmant.

Les premières expériences longues utilisant LMDZ, couplé au modèle du LODYC, viennent d'être réalisées dans le cadre de SINTEX par Laurent Li. Il s'agit d'une version intermédiaire du modèle couplé futur : elle ne comprend pas encore SECHIBA, et la glace de mer est fixée. Le choix des paramétrisations physiques ne peut donc pas être considéré comme définitif. Je peux faire quelques remarques " de l'extérieur " pour mettre en évidence quelques problèmes qui me paraissent devoir être débattus dans un futur proche :

- la climatologie obtenue par Laurent Li est globalement assez bonne, en dépit de la faible résolution horizontale utilisée (76x42). Les champs de précipitations sont aussi bons que ceux qui ont été obtenus dans les versions antérieures des modèles couplés. Mais cette climatologie a aussi été peu analysée. Le mot " assez bon " est très subjectif. Il y a dans certains cas une amélioration par rapport aux simulations précédentes (par exemple en ce qui concerne les Températures de Surface de l'Océan, la simulation des stratocumulus, ...). Mais le modèle reste clairement moins finement ajusté que celui du Hadley Centre ou du Max Planck.

- Laurent Li a choisi d'aller de l'avant en utilisant la convection Tietdke. Un avantage évident (essentiel dans la perspective de scénarios couplés chimie/climat par exemple) est la compatibilité avec la version LMDZT. D'autres résultats positifs peuvent résulter du schéma Tietdke comme de l'habileté de Laurent Li dans l'ajustement du modèle: le biais froid et sec de l'atmosphère est réduit, avant même que le schéma d'advection de Francis Codron ne soit ajouté. Certains défauts subsistent cependant. Le schéma de Tietdke constitue une boite noire dont il est difficile d'extraire un flux d'eau liquide qui serait détraîné de la partie convective vers la partie stratiforme : du coup un ajustement un peu ad hoc du seuil de condensation est nécessaire pour produire des nuages hauts associés à la convection. Le schéma de Tietdke ne conserve pas non plus l'eau, ce qui nécessite aussi un traitement ad hoc. A terme le schéma d'Emanuel étudié, disséqué et validé sur des campagnes effectuées par J-Y. Grandpeix, S. Bony et F. Chéruy est celui qui doit s'imposer.

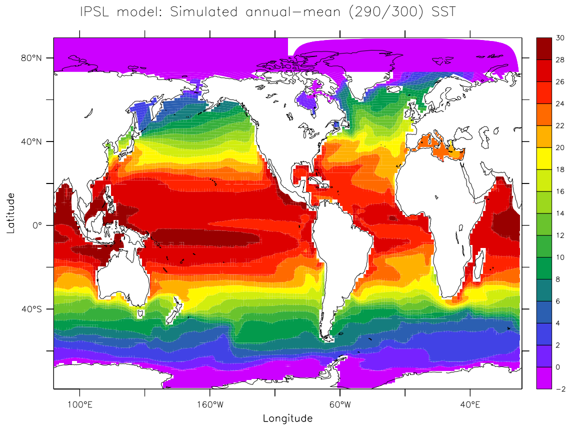
Dès que la version complète du modèle sera prête au niveau informatique, il me semble important que la validation de la version "climat" du modèle devienne une affaire collective, et que plusieurs mois soient utilisés pour débattre avec soin des résultats obtenus.

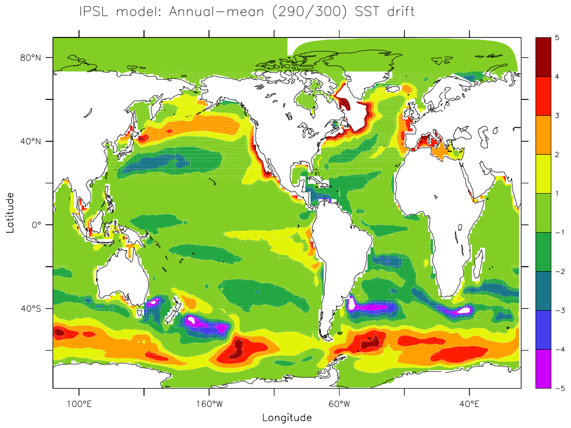
* * *

Hervé Le Treut
letreut@lmd.jussieu.fr

300 ans du climat simulé par le modèle couplé LMDZ/ORCA

Dans le cadre du programme de recherche européen SINTEX (Scale INTeraction Experiment), nous avons réalisé une simulation climatique de 300 ans en utilisant une nouvelle version du modèle couplé développé à l'IPSL. La composante atmosphérique est LMDZ version 3.2 dont la résolution horizontale est de 4° en latitude et 5° en longitude. La grille du modèle est régulière. Il y a 19 couches verticales dont une demi-douzaine dans la couche limite atmosphérique. La composante océanique est ORCA avec 149 points en latitude, 182 en longitude et 31 couches verticales. Dans la réalisation actuelle, la composante de la glace de mer n'a pas été activée, des valeurs climatologiques étant fixées suivant le cycle saisonnier observé. Le coupleur OASIS version 2.3 a été utilisé pour interpoler les variables échangées entre l'océan et l'atmosphère et assurer la synchronisation des deux modèles. La technique du couplage fait appel à la bibliothèque PVM.


IPSL model: Simulated annual−mean (290/300) SST


IPSL model: Annual−mean (290/300) SST drift

La simulation numérique a été effectuée sur le nouvel ordinateur NEC-sx5 de l'IDRIS. Le début a été lancé le 31 décembre 1999 et l'objectif de 300 ans a été atteint vers la fin janvier 2000. 500 heures SX5 ont été consommées dans l'atmosphère, 225 dans l'océan et 75 dans le coupleur. L'ensemble des données de cette simulation est actuellement disponible sur la machine de stockage de l'IDRIS. Les analyses scientifiques ainsi que les simulations complémentaires sont en cours. Les figures ci-dessus montrent respectivement la SST moyenne simulée et la dérive. La figure de la couverture de ce numéro montre la signature de El niño.

Laurent Li
li@lmd.jussieu.fr

Simulation couplée climat/carbone et estimation des rétroactions.

C'est de l'histoire ancienne, qui parle de LMD5 et des Cray C-90, mais c'est de l'histoire...

Dans les études sur les risques de changement climatique pour les prochaines décennies, on réalisait jusqu'à présent des simulations dans lesquelles l'augmentation du CO2 atmosphérique était prescrite. De telles simulations ont été réalisées en 98-99 avec le modèle couplé océan-atmosphère de l'IPSL (LMD-5/OPA-7). Récemment, plusieurs études ont montré que ce changement climatique pouvait en retour modifier le cycle du carbone, et donc l'accroissement du CO2 atmosphérique. Nous avons étudié la rétroaction climat-carbone en articulant des simulations pour lesquelles les modèles du cycle du carbone sont couplés au modèle climatique avec des simulations dans lesquelles les modèles du cycle du carbone sont forcés par différents climats.

Nous avons utilisé le Cray jusqu'à la dernière seconde pour réaliser deux simulations couplées climat/carbone dans lesquelles la concentration du CO2 dans l'atmosphère n'est plus prescrite mais résulte du bilan entre sources et puits. Le couplage entre les modèles de carbone et les modèles climatiques s'effectue chaque année. On effectue une année de simulation avec le modèle climatique couplé océan/atmosphère. Puis le modèle du cycle du carbone biosphérique CASA-SLAVE utilise les champs mensuels de température, précipitations et flux solaire pour calculer les puits de carbone biosphérique. Le modèle du cycle de carbone océanique OPA-HAMOCC3 utilise les champs mensuels océaniques 3D (vitesse, température, salinité, cœfficient de diffusion verticale) pour calculer le puits de carbone océanique. La variation du CO2 atmosphérique à la fin de cette année est établie à partir du bilan des puits pour l'expérience de contrôle, auquel on ajoute les sources anthropiques dans le cas du scénario. On passe ensuite à l'année suivante.

Une première simulation de contrôle de 190 ans, sans source anthropique de CO2, a mis en évidence la faisabilité d'un tel couplage, a permis d'étudier la variabilité naturelle associée... toutes choses alors mal connues. Une deuxième simulation a été réalisée avec des sources anthropiques de CO2. De 1860 à 1995 nous avons utilisé les émissions annuelles estimées; de 1995 à 2050 nous avons utilisé le scénario SRES 98-A2 du GIEC/IPCC. Les résultats montrent que l'augmentation du CO2 atmosphérique et de la température de surface moyenne du globe sont compatibles avec les observations depuis l'époque préindustrielle (année 1860) à nos jours (cf. Figures). Pour l'époque actuelle environ la moitié du CO2 émis est retenu dans l'atmosphère, le reste étant absorbé à peu près à parts égales par l'océan et la biosphère, ce qui est compatible avec les observations.

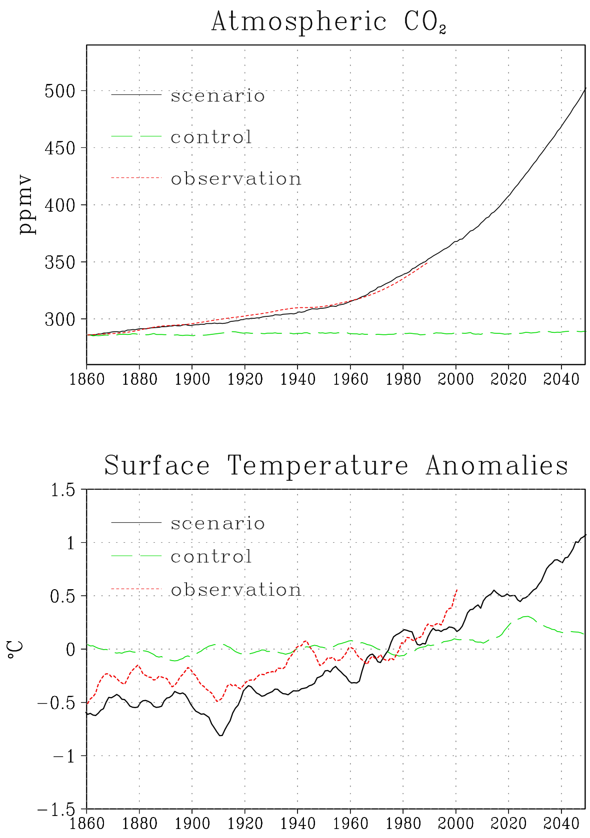


Figure: en haut, concentrations atmosphériques en CO2 simulée et observée. En bas, évolution de la température moyenne de la Terre (anomalie par rapport à la moyenne des années 1961-1990).

Pour étudier les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone, nous avons complété cette simulation couplée par des simulations "hors-lignes" dans lesquelles les modèles du cycle du carbone sont forcés par des climats différents. Le gain de rétroaction obtenu a une valeur d'environ 1.15, c'est-à-dire que l'augmentation de la température de surface moyenne de la Terre est augmentée de 15% si l'on tient compte de l'effet du climat sur le cycle du carbone. Ces résultats, très préliminaires, nécessitent confirmation mais montrent que la rétroaction entre le climat et le cycle du carbone ne semble pas pouvoir être négligée pour les études climatiques à longues échéances. Pour d'autres informations:

http://www.lmd.jussieu.fr/Climat/couplage/

Jean-Louis Dufresne
jldufres@lmd.jussieu.fr
L. Fairhead (IPSL/LMD) P. Friedlingstein
(IPSL/LSCE), L. Bopp (IPSL/LSCE)

4 Etudes de processus

Devenir des paramétrisations de la convection nuageuse

L'avenir immédiat de la paramétrisation de la convection profonde dans LMDZ est à peu près fixé : utilisation du schéma de Tiedtke (version LMD - Olivier Boucher - Laurent Li) en attendant la mise en œuvre de celui de K. Emanuel. Ce dernier devrait être opérationnel cet été : deux versions existent, qui ont permis des simulations dans LMDZ. Le plus gros travail va consister en la vectorisation de ce code et en sa restructuration.

Le devenir est ensuite beaucoup plus ouvert : d'une part des développements portant sur la paramétrisation de la convection profonde sont en cours, en particulier dans le cadre de deux programmes européens (WAMP, qui se termine début 2001 et EUROCS qui commence); d'autre part les personnes travaillant sur les processus de couche limite s'intéressent de plus en plus aux processus nuageux et, par là, à la convection peu profonde et à son évolution vers la convection moyenne.

Ces développements amènent de nouveaux éléments aux paramétrisations existantes : (1) un modèle d'enclumes et autres nuages associés à la convection profonde (Sandrine Bony, Kerry Emanuel - Modèle achevé, validé en 1D); (2) un modèle de poche froide participant à l'évolution des lignes de grains (Frédérique Cheruy, Jean-Yves Grandpeix - Modèle en cours de développement). Muni de ces deux paramétrisations, on pourra aborder la dynamique des lignes de grains. C'est chose impossible pour le moment, les modèles convectifs étant dépourvus de mode de propagation : la convection ne fait que suivre passivement les changements des conditions de grande échelle.

Un autre développement important va être accompli dans le cadre de WAMP : la paramétrisation du transport de quantité de mouvement. C'est un outil indispensable pour simuler les interactions onde-convection. Cependant, il semble indispensable d'avoir un modèle suffisamment sophistiqué, présentant à la fois un transport à contre gradient et dans le sens du gradient. Un modèle qui se contenterait du transport à contre gradient (c'est-à-dire dans le sens de la pente) aurait en effet de fortes chances de tuer les ondes. Vraisemblablement, ceci va passer par un transport passif (à contre gradient) par la colonne convective, et un transport dans le sens du gradient par les structures méso-échelle. Enfin, le travail dans cette zone floue que constitue la convection peu profonde, dont on ne sait pas trop si elle relève des processus de couche limite ou de la convection profonde, permettra d'éclaircir les mécanismes de déclenchement de la convection nuageuse (Sylvain Cheinet, Frederic Hourdin, Alain Lahellec). Ce phénomène fait l'objet d'une paramétrisation spécifique dans le schéma de Tiedtke utilisé par le Centre Européen. Faut-il en développer une autour du schéma de K. Emanuel ?

Jean-Yves Grandpeix
jyg@lmd.jussieu.fr

5 Végétation - hydrologie

Dans l'évolution du modèle on a introduit :
- un module qui définit les échanges hydrologiques avec la végétation (Sechiba).
- un modèle qui décrit le devenir de la lame d'eau qui arrive au sol (infiltration, ruissellemnt, stockage, profil d'humidité du sol).
- un module qui évalue le bilan du carbone et des nutriments et détermine la dynamique de la végétation.

Cet ensemble est en cours d'intégration pour former une seule entité du modèle de l'IPSL. Les développements sur ce thème (Sechiba - Stomate - Hydrologie) apparaîtront au prochain numéro.

Katia Laval

6 Dynamique - transport

Cette section regroupe les contributions relatives aux aspects dynamiques en général en incluant le transport atmosphérique, la paramétrisation des ondes de gravité ou de la dissipation sous-maille et toutes les analyses relatives à l'état dynamique de l'atmosphère. Dans ce contexte, un développement récent majeur concerne le passage du modèle en coordonnée verticale "hybride" σ-p, étape technique essentielle pour étendre le modèle dans la stratosphère.

L'autre aspect important concerne la représentation du transport atmosphérique d'espèces traces. Cette partie recoupe bien sûr en partie les aspects chimie-climat. On privilégiera ici les contributions relatives à l'étude du transport atmosphérique en tant que tel (développement de paramétrisations, validation, dispersion atmosphérique, etc ...).

La moyenne atmosphère dans LMDZ

Depuis une décennie il devient de plus en plus clair que la dynamique de l'atmosphère moyenne (stratosphère + mésosphère) joue un rôle sur le climat. Cette vision plutôt contre intuitive, puisque l'atmosphère moyenne contient seulement 10% de la masse totale de l'atmosphère, résulte entre autre de 3 facteurs:

1 Des constituants majeurs pour le bilan radiatif ont leurs sources et leurs puits dans l'atmosphère moyenne (ex: l'ozone).

2 La structure dynamique de l'atmosphère moyenne contrôle la propagation vers le haut des ondes planétaires décrivant la variabilité basse fréquence de la troposphère.

3 La circulation méridienne dans la basse stratosphère est contrôlée par des interactions ondes-écoulement moyen se produisant dans la haute stratosphère et dans la mésosphère.

A ces facteurs robustes se sont ajoutées des études récentes, visant à montrer que d'importantes oscillations troposphériques, comme l'oscillation arctique sont en partie contrôlées par la circulation stratosphérique. Cela résulte du fait que la première EOF d'hiver de la variabilité dans la troposphère correspond à des fluctuations du vent zonal à hautes latitudes, c'est-à-dire localisées sous le jet stratosphérique de nuit polaire.

D'autres études semblent montrer que certaines fluctuations lentes observables dans la basse troposphère sont précédées par des réchauffements stratosphériques soudains, phénomènes que l'on pensait être purement stratosphériques.

Au vu de ces différents points, il semble nécessaire de prendre en compte l'atmosphère moyenne dans LMDZ-T. C'est ce qui est fait à l'heure actuelle. Dans sa version stratosphérique le modèle comprend 50 niveaux s'étendant du sol à environ 90km, la résolution verticale est de 2km dans l'atmosphère moyenne. Pour éviter les réflections d'ondes planétaires au sommet, une couche d'amortissement de type friction de Rayleigh est spécifiée sur les 5 derniers niveaux. A l'heure actuelle, ces simulations sont stables et donnent des résultats satisfaisants en ce qui concerne les champs de vent zonal moyen. Pour améliorer les performances du modèle nous adaptons au modèle différentes paramétrisations d'ondes de gravité: orographiques et non orographiques.

François Lott
flott@lmd.jussieu.fr

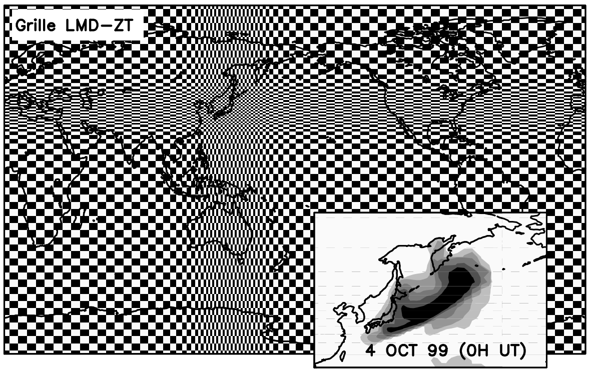
Simulation de dispersion atmosphérique pour l'accident de Tokaimura avec le modèle LMDZT.

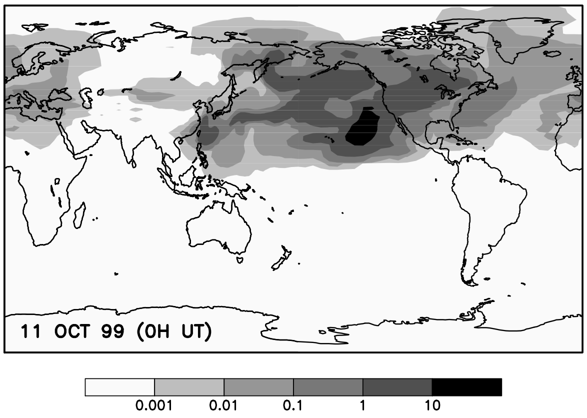
Le 30 septembre 1999, un accident nucléaire dit de criticité avait lieu à Tokaimura au Japon. Des dizaines de personnes étaient gravement irradiées et des centaines de milliers étaient bloquées chez elles par précaution pendant 24 heures. Dans de telles circonstances, la prévision en temps réel de la dispersion des radioéléments autour du site, aussi bien aux échelles locales que globales, revêt une importance capitale.

Nous avons choisi cette occasion pour tester notre capacité de réaction avec le modèle LMDZT. Ce modèle a été utilisé récemment pour simuler l'Expérience Européenne de Transport, ETEX qui consistait à mesurer en plus de 150 stations en Europe un gaz, le Perfluoro Méthyl Cyclo Hexane, émis intentionnellement depuis Monterfile près de Rennes. La comparaison entre les panaches observés et simulés peut être consultée sur le site WEB du LMD: http://www.lmd.jussieu.fr/ idelkadi/etex.gif

Pour cette simulation, au calcul de la météorologie était ajouté un terme de rappel vers les analyses du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT).

Avec ce modèle, nous avons donc décidé de simuler l'accident de Tokaimura avec une résolution horizontale de 150 km sur le Japon et un rappel vers les analyses du CEPMMT avec une constante de temps de 2h30. Le 7 octobre, une première simulation de 6 jours avait été effectuée jusqu'au 5 octobre. Pour différentes raisons (découverte d'une erreur dans le modèle, nécessité de rapatrier tous les jours les analyses depuis le CEPMMT), nous n'avons pas véritablement suivi les simulations en temps réel. Mais, le 28 octobre, la simulation jusqu'au 29 était disponible et consultable sur le site WEB du LMD: `http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/JAPON`





Les cartes ci-dessus montrent la concentration de traceur (unité: 10^{-18} kg/kg d'air) pour l'émission d'un kilograme sur 24 heures à Tokaimura. Le damier correspond à la grille du modèle. Les panaches de polluants sont montrés pour le 4 et le 11 octobre.

Comme nous ne disposions pas d'informations précises sur la source, nous n'avons pris en compte dans la simulation que la dispersion du polluant sous l'effet du transport de grande échelle et du mélange turbulent ou convectif. Les informations fournies depuis par le CEA indiquent que l'évènement a sans doute été bénin en dehors du site même.

Abderrahmane Idelkadi
idelkadi@lmd.jussieu.fr
F. Hourdin (IPSL/LMD), M. Bonazzola (IPSL/LMD), M-A. Filiberti (LMD/ODYC), L. Fairhead (IPSL/LMD), J-P. Issartel(CEA)

Caractérisation des dépressions atmosphériques simulées par le Modèle de Circulation Générale du LMD (MCG LMD6).

Dans la grande problématique de l'étude du Climat celle s'appliquant aux systèmes dépressionnaires est importante puisqu'elle concerne des phénomènes météorologiques qui ont un impact direct sur la société. C'est le cas des dépressions de mousson pendant l'été dans la région de l'Inde ou encore, à nos latitudes, des deux dépressions de Décembre 1999 qui ont causé d'importants dégâts en France. De plus nous savons que les dépressions de type "mousson" (monsoon depression, en anglais) sont essentielles pour déterminer le régime des pluies en Inde.

Afin de vérifier si le Modèle de Circulation Général Atmosphérique (MCGA) du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD6, Polcher and Laval 1994) est capable de reproduire de tels systèmes avec des caractéristiques réalistes de circulation, nous avons utilisé une méthode d'analyse objective. Le programme TRACK, utilisant une large gamme de techniques, a été développé par K. Hodges (1998) et adapté dans son application à nos besoins (Sabre et al., 2000). Il identifie automatiquement et objectivement les traits les plus distinctifs liés aux perturbations dans une série temporelle de données météorologiques. Ces spécificités sont traquées tout au long de la séquence temporelle afin de produire leurs trajectoires. Celles-ci sont ensuite analysées afin de produire un ensemble de statistiques qui résument, à l'aide du traceur choisi pour les représenter, les caractéristiques des perturbations. Les systèmes propagatifs comme les dépressions atmosphériques sont des phénomènes météorologiques à caractère transitoire c'est-à-dire ayant lieu sur des courtes échelle de temps (2-10 jours) mais pouvant se propager sur de longues distances (> 1000 km). L'identification de ces phénomènes propagatifs à l'échelle synoptique est basée sur un ensemble d'options et de contraintes permettant de délimiter et de focaliser le domaine de recherche.

Dans le cas présent, c'est la pression à la surface de la mer que nous avons choisie. Mais n'importe quels champs météorologiques peuvent être traités dès lors qu'ils comportent des extréma (minima et/ou maxima). Plus précisément, c'est le minimum dans le champ d'anomalies de pression que nous étudions comme traceur du centre d'une dépression de mousson. Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne saisonnière, ici Juin-Juillet-Août. La simulation utilisée, issue du modèle LMD6 d'une durée de 9 ans est celle de contrôle (Ctrl) avec une résolution spatiale de 96 points en longitude et de 72 en latitude ce qui correspond à une résolution aux tropiques inférieure à 2° en latitude et 3.75° en longitude. Cette résolution semble suffisante pour pouvoir suivre les perturbations lors de leur propagation. La résolution temporelle est d'une donnée moyenne par jour.

Le principe de la méthode (TRACK) est basé sur la recherche, dans une série temporelle, du point de coordonnée le plus proche répondant aux critères définis au préalable et de les lier entre eux. Nous avons imposé 3 critères pour identifier les perturbations de mousson simulées par le modèle et afin d'éliminer les incohérences. Les dépressions sont supposées avoir une durée de vie de plus de 2 jours, doivent parcourir une distance d'au moins 8° (ce qui correspond à 800 km) et avoir un centre dépressionnaire d'une intensité plus forte que -8 hPa. Une fois le champ de trajectoires des dépressions établi, nous pouvons calculer les statistiques concernant la distribution de ces systèmes, comme la densité des perturbations ainsi que leurs zones de génération et de disparition. Mais nous pouvons aussi estimer leurs propriétés moyennes telles que : intensité moyenne, taux de croissance et de décroissance, vitesse et direction de propagation moyennes. Cette étude, focalisée sur l'analyse des dépressions arrivant pendant la période de la mousson indienne, est réalisée dans une région comprise entre 60°E et 110°E de longitude et entre 0°N et 30°N de latitude.

Pour toute la série des 3 mois (JJA) des 9 années de Ctrl, la trajectoire des dépressions montre différents comportements tant au niveau de leur position que de leur direction de propagation. En effet, les perturbations peuvent prendre naissance aussi bien dans la partie Sud de l'Inde que le long de la vallée du Gange se dirigeant de l'Ouest vers le Nord et même parfois vers le Nord-Est.

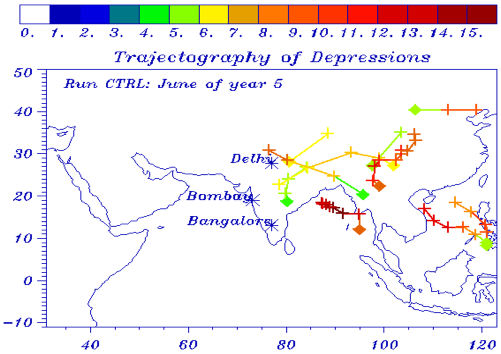


Figure 1.

La Figure 1 montre, pour le mois de Juin (le plus pluvieux) de l'année 05 de la série Ctrl, les trajectoires des minima locaux de pression au sol après application des contraintes spécifiques établies (Sabre et al., 2000). Le premier jour de la dépression est représenté par un losange et les positions du centre de la dépression à chaque pas de temps par des croix. Les couleurs indiquent l'intensité de l'anomalie de la pression au sol en hPa.

Après application des différents critères de sélection, les dépressions pour ce mois de Juin de l'année 05 de Ctrl apparaissent principalement sur la Birmanie, la Baie du Bengale et l'Inde. Elles se propagent plutôt vers le Nord et le Nord Ouest avec une intensité croissante lors de leur déplacement. Cet exemple reproduit bien un des faits observés à savoir que plusieurs perturbations de type "mousson" sont initiées par des dépressions venant de l'Est. Il est à noter également qu'une des dépressions semble suivre la vallée du Gange correspondant au thalweg de la basse pression existant sur cette région (monsoon trough, en anglais). Nous avons comparé nos résultats avec les observations issues des Réanalyses du centre Européen ERA-15 (Annamali et al., 1999). Bien que la variable choisie ne soit pas la même, dans les observations c'est la vorticité relative qui est utilisée comme traceur, la comparaison entre le modèle et les observations est satisfaisante.

L'ensemble des trajectoires ainsi obtenues est utilisé afin d'établir les caractéristiques de distribution de ces systèmes. La Figure 2 illustre l'analyse statistique quantitative de la variation spatiale des systèmes dépressionnaires, pour la série entière c'est-à-dire les 9 ans de Ctrl. Sont uniquement illustrées les densités de perturbation (Fig 2a) (en densité de nombre) et les zones de génération (Fig 2b.) des dépressions.

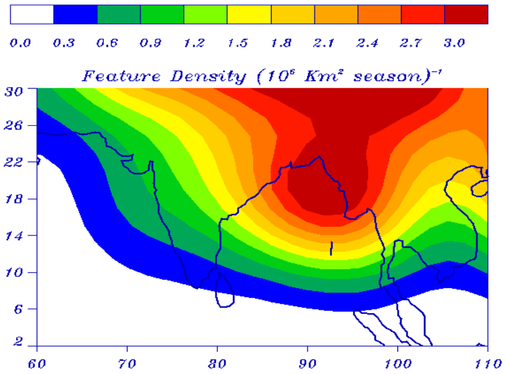


Figure 2a.

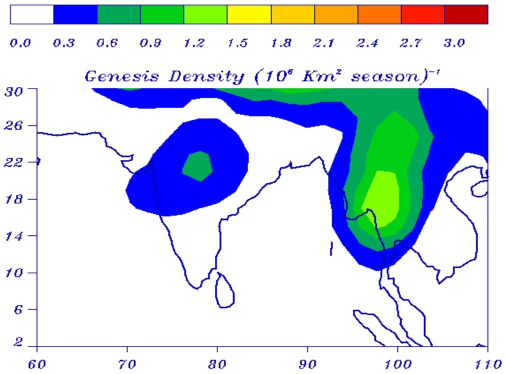


Figure 2b.

Un maximum de systèmes dépressionnaires est généré dans la région de la Birmanie avec un second maximum plus faible localisé sur la région centre de l'Inde (Fig 2b.). Les perturbations du premier maximum se déplacent vers l'Ouest et en partie vers le Nord Ouest (non montrées) à une vitesse de 4-5 m.s^{-1} et disparaissent dans la Baie du Bengale (non montrées). Les systèmes générés dans la région centre de l'Inde (Fig 2b.) se déplacent vers le Nord avant de disparaître aux pieds de l'Himalaya. La densité en nombre des perturbations (Fig 2a.) est élevée dans la Baie du Bengale associée à une propagation plus lente dans cette région. Lorsque l'on confronte ces résultats aux observations (Annamali et al., 1999) on constate que notre modèle est en bon accord général. Nos structures sont un peu décalées vers l'Est mais leur direction de propagation est correcte.

Pour conclure: a) le modèle du LMD est capable de simuler des dépressions de mousson ayant des caractéristiques de circulation réalistes b) la méthode de "tracking" employée est puissante et offre une panoplie d'études statistiques quantitatives et robustes permettant d'effectuer une analyse précise des systèmes dépressionnaires simulés, dans le cas présent, par le modèle du LMD.

Annamalai H., J.M. Slingo, K.R. Sperber and K. Hodges, 1999: The mean evolution and variability of the Asian Summer Monsoon: comparison of

ECMWF and NCEP/NCAR Reanalyses. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1157-1186.

Hodges K. I., 1998: Feature point detection using distance transform: application to tracking tropical convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 785-795.

Polcher J. and K. Laval, 1994: A statistical study of the regional impact of deforestation on climate in the LMD GCM. *Clim. Dyn.*, **10**, 205-219.

Sabre M., K.I. Hodges, K. Laval, J. Polcher and F. Désalmand, 2000: Simulation of Monsoon Disturbances in the LMD GCM. *accepté à Monthly Weather Review*.

Maeva Sabre
sabre@lmd.jussieu.fr

7 Chimie - aérosols - climat

L'objectif de l'action *Modélisation de la chimie à grande échelle dans LMDZ et interactions chimie-climat* est d'évaluer les rétroactions existant entre la composition chimique (gaz et aérosols) de l'atmosphère et le climat, et d'étudier l'évolution de la composition chimique sous l'effet des activités humaines et son impact sur le forçage radiatif. Dans ce but, il est nécessaire de développer des modèles globaux prenant en compte les processus climatiques et les processus photochimiques de l'atmosphère. Après avoir été largement impliquée dans le développement de modèles off-line de chimie-transport, la communauté renforce maintenant sa mobilisation sur ce nouvel objectif.

Chimie du soufre

Afin de disposer d'un modèle prenant en compte simultanément le rôle des gaz à effet de serre et des aérosols sur le bilan radiatif de l'atmosphère et le climat, une paramétrisation du cycle du soufre a été introduite dans LMDZ par Olivier Boucher (LOA) et Mai Pham (SA). Cette étude constitue la première étape de la représentation dans le MCG de l'ensemble des types d'aérosols, et permettra à terme de quantifier les effets radiatifs et climatiques de l'aérosol total. Plus récemment, le travail a également démarré au LSCE (Y. Balkanski, Michael Schulz) concernant la prise en compte des aérosols minéraux, carbonés et marins. Le module de chimie du soufre calcule l'évolution de 6 espèces soufrées, sulfure de diméthyle (DMS), sulfure d'hydrogène (H_2S), dioxyde de soufre (SO_2), oxysulfure de diméthyle (DMSO), acide méthylsulfonique (MSA) et sulfates autres que ceux issus des sels marins (nss-sulfates), au moyen de distributions prescrites d'oxydants (i.e., OH, NO_3, O_3, H_2O_2). Le cycle considéré comprend en outre des émissions récentes pour le SO_2 et le DMS et il prend en compte des paramétrisations dépendantes des variables calculées par LMDZ pour le dépôt sec, le transport advectif et convectif, le lessivage des espèces solubles et la chimie aqueuse du SO_2. Un travail de validation du modèle à l'échelle globale par comparaison avec les observations est en cours. Les premières simulations comprenant l'ensemble de ces processus laissent apparaître des concentrations et des temps de résidence pour chacun des composés soufrés qui sont en accord avec les études précédentes. L'étude du cycle du soufre en région polaire a également débuté au LGGE (Emmanuel Cosme, Patricia Martinerie, C. Genthon).

Chimie des gaz à effet de serre

Les travaux effectués au cours de l'année 1999 marquent réellement le démarrage du projet de couplage du modèle LMDZ (version transport) avec le nouveau module interactif de chimie atmosphérique INCA (module d'INteractions avec la Chimie Atmosphérique) développé par Didier Hauglustaine (SA).
L'approche retenue dans LMDZ/INCA est le calcul de la photochimie en mode on-line dans le modèle de circulation générale avec appel au module INCA à chaque pas de temps de la physique du MCG (i.e., 30 min) et transport des espèces traces (transport résolu de grande échelle, brassage convectif, couche limite) dans le MCG. Cette approche permet un couplage étroit entre les processus chimiques et le climat avec un échange rapide entre les différents modules et une meilleure prise en compte de la variabilité temporelle des processus et grandeurs physiques. Un point fort de la démarche suivie pour le développement de LMDZ (version transport) est d'avoir mis au point un outil pouvant être appliqué à différentes thématiques de recherche. En effet, le cœur dynamique de LMDZ, transport des espèces traces inclus, est identique pour de nombreuses études (e.g., simulations climatiques, mo-

dèle couplé océan-atmosphère, transport de radioéléments, mousson indienne, chimie atmosphérique, cycles biogéochimiques, poussières martiennes, atmosphère de Titan). Cette composante dynamique est couplée à différents jeux de paramétrisations physiques (e.g., rayonnement, convection profonde, physique des nuages). L'outil est souple, permettant d'intégrer différentes problématiques et de faire converger les efforts de développement.

Les objectifs visés avec la chaîne LMDZ/INCA sont:

1. La prise en compte des gaz à effet de serre dans le calcul des forçages radiatifs et des perturbations du climat dans le MCG LMDZ. Pour ce faire, une version minimale de INCA a été mise au point. Cette version doit permettre des intégrations longues du MCG (plusieurs dizaines-centaines d'années d'évolution) et une prise en compte réaliste de la distribution des principaux gaz radiativement actifs (i.e., CH_4, N_2O, composés halogénés, ozone).

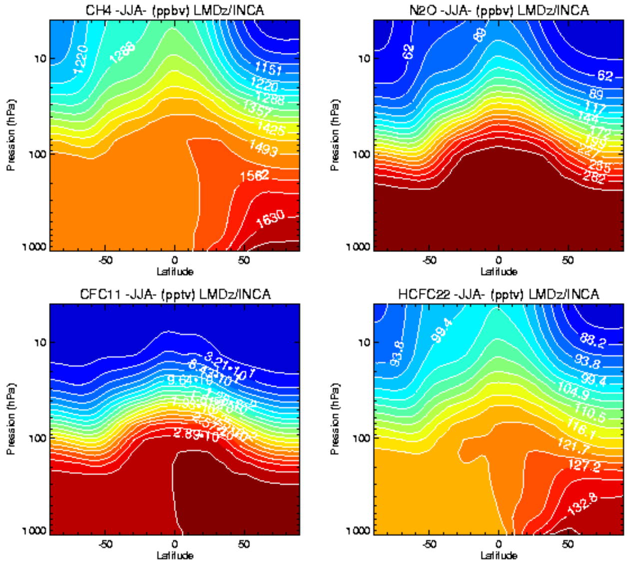
2. Le calcul interactif dans le MCG de la chimie de l'ozone dans la troposphère et des principaux oxydants (i.e., OH, H_2O_2, NO_3) avec une chimie d'oxydation du méthane et/ou une prise en compte plus détaillée de la chimie des composés organiques volatiles (COV) dans une version ultérieure. Cette version permettra l'étude des interactions existant entre la chimie et le climat mais également une étude plus détaillée de la formation des polluants et pourra être combinée avec la version de LMDZ contrainte par les réanalyses du CEPMMT et zoomée sur une région de mesures.

3. La prise en compte simultanée de la chimie de l'ozone dans la troposphère et la stratosphère pour l'étude du bilan de l'ozone, de son évolution et impact sur le climat dans la version de LMDZ à 39 niveaux verticaux.

4. Par ailleurs, les travaux sont menés en parallèle entre chimie gazeuse et chimie des aérosols pour à terme prendre en compte la chimie hétérogène dans le modèle et converger vers une même version.

La version 1.0 standard du module INCA permet de simuler la distribution et l'évolution de 25 traceurs. En particulier, les principaux gaz à effet de serre de longue durée de vie (i.e., CH_4, N_2O, 13 espèces halogénées incluant CH_3CCl_3, les principaux CFC, HCFC, et halons) et de plusieurs traceurs radioactifs permettent la validation du transport convectif, des échanges troposphère-stratosphère ou interhémisphériques. La figure 1 illustre les distributions zonales de plusieurs constituants calculées par le modèle. Les taux de perte photochimique de ces espèces sont calculés à partir d'une table à interpolations multiples pour les fréquences de photolyse et de distributions imposées des oxydants (i.e., OH, O^1D). Les distributions de OH et O^1D dans cette version 1.0 sont issues du modèle off-line de chimie-transport MOZART sous forme de distributions mensuelles tridimensionnelles. Ces champs sont interpolés au préalable sur la grille horizontale de LMDZ puis interpolés sur les 19 niveaux de pression du MCG à chaque pas en temps pour prendre en compte les variations de pression de surface. Cette version 1.0 permet de calculer la distribution des gaz à effet de serre dans la troposphère, de valider les échanges troposphère-stratosphère à partir des distributions calculées de ces espèces dans la stratosphère (e.g., CH_4, N_2O, CFC, traceur ozone inerte), de calculer la source stratosphérique de NO_x (réaction de N_2O avec O^1D), et de calculer le contenu en chlore et en brome dans la stratosphère. Un travail de validation du modèle par comparaison avec les observations est en cours. Cette version servira de structure pour l'introduction de la chimie de l'ozone dans la troposphère au cours de l'année 2000.
Afin de mieux prendre en compte l'effet climatique de l'ozone dans la stratosphère (calcul des taux de chauffage), nous avons remplacé la paramétrisation simplifiée de la distribution verticale d'ozone utilisée précédemment dans LMDZ par une climatologie 3D d'observations satellitaires combinées de SAGE et SBUV. Cette climatologie est mensuelle et s'étend de la surface à 80 km. Comme pour les champs d'oxydants issus de MOZART, les distributions d'ozone sont interpolées sur la grille de LMDZ et sur les niveaux de pression du MCG. La variation saisonnière est maintenant prise en compte de manière réaliste dans le modèle et inclut le trou d'ozone antarctique. Ces distributions ont pour l'instant été utilisées pour contraindre un traceur inerte ozone stratosphérique et simuler le transport à travers la tropopause. Elles seront utilisées également dans la version 2.0 de INCA pour relaxer l'ozone vers les observations dans la stratosphère et le contraindre à la limite supérieure du modèle.
La version 2 du module est actuellement en développement et prend en compte 40 espèces et une centaine de réactions photochimiques. Cette version permettra le calcul de l'ozone et de ses précurseurs (CH_4, CO, NO_x) dans la troposphère. Ces simulations sont essentiellement effectuées sur le NEC SX5. Une année de simulation avec 40 traceurs et la chimie de l'ozone requiert environ 16 heures de CPU. Près de 30% du temps de calcul sont dédiés au transport des traceurs et environ 20% à la chimie proprement

dite. Un travail d'optimisation sur le NEC est encore nécessaire pour améliorer les performances de cette version (1.6 GFlops).



Didier Hauglustaine
didier.hauglutaine@aero.jussieu.fr

8 Climatologie - méthodes de validation

Rencontre Modèles - Données

Une part essentielle du travail de modélisation consiste à ”évaluer” (plutôt que nécessairement ”valider”) la performance du modèle. Ceci afin de tester la qualité des paramétrisations physiques développées, pour vérifier la capacité du modèle à représenter les interactions entre processus physiques, ou simplement pour tester sa capacité à reproduire la climatologie et la variabilité du climat observé. L'évaluation du modèle se pratique donc à des niveaux très divers (des études de mécanismes aux études statistiques), et se focalise sur des échelles de temps et d'espace très variées.

Pour évaluer un modèle à tous ces niveaux, la modélisation MCG doit être absolument ouverte vers l'extérieur: modélisation à méso-échelle, expérimentation, observation. C'est déjà largement le cas (collaboration avec l'analyse de données satellite et lidar, utilisation des données d'expériences in-situ, collaborations avec les groupes de modélisation des nuages, etc), et nous ne pouvons qu'espérer renforcer ces interactions très fructueuses dans le futur.

Un autre mode d'interaction entre modélisation et observation se situe au niveau de l'interprétation de phénomènes physiques. La modélisation, avec toutefois la prudence qu'il convient d'y accorder, peut en effet fournir une aide précieuse dans la compréhension et l'interprétation de phénomènes observés. Les exemples de ce type d'interaction se sont multipliés ces dernières années, par exemple dans le domaine des atmosphères planétaires ou dans l'étude de l'effet de serre et de la rétroaction vapeur-d'eau. Outre son intérêt scientifique évident, la rencontre entre modélisateurs et expérimentateurs présente un intérêt pédagogique formidable qu'il convient de favoriser au sein de notre communauté.

L'objectif de cette rubrique est d'encourager les interactions entre modélisation et observation:

(1) en facilitant le transfert d'information et le contact entre modélisation à grande échelle, modélisation à méso-échelle, et observation:

- infos sur les nouveaux jeux de données disponibles (leurs forces et potentielles faiblesses), brèves sur les prochains projets spatiaux ou campagnes d'observations.
- présentation des méthodologies de comparaison modèle/données (approches ”modèle vers satellite” pour la comparaison des radiances, simulation par le modèle d'algorithmes satelitaires, etc)
- discussion des synergies méso-échelle/grande échelle
- présentation d'études d'analyse de données ou de simulations à méso-echelle permettant de caractériser des processus particuliers et pouvant ainsi avoir un intérêt direct pour l'évaluation du modèle (exemples: caractérisation des systèmes convectifs, lien entre convection et échanges océan-atmosphère, etc)
- diffusion des appels au secours des modélisateurs vers les expérimentateurs ou scientifiques de terrain (”que sait-on de...?”, ”avez-vous des données de...?”, ”quelle confiance accorder à...?”, ”peut-on mesurer...?”)
- réciproquement, diffusion des appels des expérimentateurs vers les modélisateurs: pour la préparation de manips ou l'interprétation de phénomènes, discussions autour de ce que l'on

peut attendre et ne pas attendre des modèles, etc.

(2) en diffusant le résultat des différents exercices d'évaluation du modèle de façon à mieux juger de leur cohérence, de leur complémentarité et mieux identifier les manques:

- défauts systématiques remarqués
- améliorations apportées
- questions & problèmes

Une première contribution de Rémy Roca et Laurence Picon est présentée dans ce numéro, qui montre que modèles et satellites peuvent arriver à parler le même "langage" (ici la température de brillance dans le canal vapeur d'eau) lorsque des méthodologies de comparaison adéquates sont employées. Espérons qu'elle sera suivie de nombreuses autres!

——————

Sandrine Bony
bony@wind.mit.edu

Validation de la convection et de la distribution d'humidité dans la haute et moyenne troposphère à l'aide des observations du canal "vapeur d'eau" de METEOSAT.

La vapeur d'eau de la troposphère libre intertropicale et la convection tropicale sont reconnues comme d'importantes variables pour la sensibilité climatique et leur représentation dans les modèles de circulation générale a souvent été critiquée. Le canal "vapeur d'eau", centré à 6.3 microns à bord des satellites METEOSAT, est influencé par l'humidité de la haute et moyenne troposphère en ciel clair et par les nuages hauts en ciel couvert. Dans le but d'évaluer la capacité des MCG à reproduire ces distributions telles qu'observées par METEOSAT, une approche dite modèle-vers-satellite a été développée. Cette méthode consiste à simuler à l'aide d'un code de transfert radiatif les radiances dans la bande spectrale correspondante. Ainsi des images satellites synthétiques sont construites et peuvent être directement comparées aux images observées. Cette méthode a été appliquée aux sorties d'un ensemble de 10 runs du cycle 6 du modèle du LMD forcés par des températures de mer climatologiques. La figure 1 montre à gauche les observations de METEOSAT et à droite les simulations pour un mois de Juillet moyen. La comparaison révèle que la ZCIT simulée est trop étendue spatialement et que les régions sèches de subsidence à grande échelle sont trop humides (biais froid en température de brillance) dans les simulations par rapport aux observations. Une étude plus approfondie des simulations a mis cependant en évidence que le modèle reproduit avec succès le fort assèchement observé au cours du cycle saisonnier des régions de subsidence, et ce malgré les biais mentionnés plus haut.

Ce diagnostic est en cours d'application à de nombreux MCG dans le cadre du programme AMIP et devrait permettre de resituer les simulations du MCG par rapport aux autres modèles de climat de la communauté. Enfin, les observations nécessaires à ces comparaisons sur une période de 10 années, disponibles depuis peu, permettent de prochainement rajouter ce diagnostic aux atlas de comparaison aux observations de LMDZ.