

# Le modèle de circulation atmosphérique global LMDZ

Document de travail

Frédéric Hourdin

6 octobre 2004

## 1 Description du modèle

**Généralités.** Le LMD développe et utilise depuis les années 70 un modèle de circulation générale atmosphérique (Sadourny and Laval, 1984) basé sur un noyau dynamique qui intègre sur la sphère et dans le temps les équations primitives de la météorologie –une version simplifiée des équations de Navier Stokes–. Le modèle LMDZ est basé sur une réécriture modulaire de la version originale du modèle. Les équations sont discrétisées spatialement sur une grille horizontale rectangulaire dans le plan longitude-latitude. La répartition des longitudes et latitudes peut être fixée arbitrairement pour raffiner le maillage sur une région du globe (le Z de LMDZ signifie Zoom). La discrétisation horizontale privilégie la conservation de l’entrophie. Des opérateurs de dissipation sont introduits pour représenter l’interaction entre échelles horizontales explicites et échelles sous-maillages, et notamment le pompage d’entrophie aux petites échelles. La coordonnée verticale ”hybride  $\sigma - p$ ” épouse la topographie près de la surface et correspond à des niveaux de pression dans la haute atmosphère.

**Paramétrisations physiques** Couplé à ce noyau hydrodynamique, le modèle inclue un jeu de paramétrisations physiques qui a connu des évolutions successives au cours du temps :

1. Le transfert radiatif est calculé au moyen de modèles bandes larges dans le visible (Fouquart and Bonnel, 1980) et dans l’infrarouge thermique (Morcrette, 1991). La distribution d’ozone est prescrite ainsi que, optionnellement, une distribution d’aérosols soufrés avec un début de modélisation microphysique pour l’effet indirect.
2. La turbulence dans la couche limite est représentée au travers d’une paramétrisation diffuse. Le coefficient de diffusion turbulente  $K_z$  est spécifié en fonction du nombre de Richardson. Deux calculs, dépendant de la force de l’inversion en sommet de couche limite, permettent de simuler les stratocumulus sur les bord Est des océans. Pour les calculs de couche limite, chaque colonne d’atmosphère est divisée en quatre sous-colonnes, couplées respectivement avec les océans, les surfaces continentales, la banquise et les glaciers.
3. La paramétrisation de la convection nuageuse repose sur une approche en flux de masse. On peut activer au choix la paramétrisation de Tiedtke (1989) ou celle d’Emanuel (1991) modifiée par Grandpeix et al.. La fraction nuageuse associée à la convection est prédite à partir du contenu en eau des nuages prédit par le schéma en flux de masse au travers d’une distribution statistique (Bony and Emmanuel, 2001).
4. En plus des nuages convectifs, on prédit des nuages ’stratiformes’ à partir de l’eau totale dans la maille et de l’humidité à saturation en imposant une distribution statistique avec une largeur imposée arbitrairement.
5. La génération d’ondes de gravités par les montagnes non résolues ainsi que l’effet de freinage ou de détournement du fluide sont décrits aux travers des paramétrisation de Lott and Miller (1997).

**Transport d’espèces traces et chimie** Le modèle LMDZ est doté de modules permettant de calculer le transport grande échelle et convectif ou turbulent d’un nombre arbitraire d’espèces traces. Le transport grande échelle est prédit en utilisant des schémas en volume finis de Van Leer (1977) mis en œuvre et testés dans LMDZ par Hourdin and Armengaud (1999). La version transport de LMDZ-INCA est couplée à un module de chimie aérosols développé au LOA et au module de chimie-aérosols INCA.

**Mars, Titan, et les autres ...** LMDZ est également décliné dans des versions planétaires, pour Mars (Hourdin et al., 1993; Forget et al., 1999) et Titan (Hourdin et al., 1995).

## L'équipe de développement

Laurent Fairhead	LMD	40	couplages, développements informatiques
Ionela Musat	LMD	60	validation, diagnostics
Phu LeVan	LMD	30	nouvelle dynamique
Jean-Yves Grandpeix	LMD	30	paramétrisations convection, poches froides
Sandrine Bony	LMD	15	paramétrisations convection, nuages, diagnostics
Jean-Louis Dufresne	LMD	30	couplages, scénarios, diagnostics
Frédéric Hourdin	LMD	30	coordination, couche limite, transport, réglage
Alain Jejcic	LMD	100	parallélisation
Laurent Li	LMD	5	paramétrisations couche-limite/nuages
François Lott	LMD	10	effet du relief, stratosphère
Marie-Angèle Filiberti	IPSL	80	traceurs et convection
Pascale Braconnot	LSCE	15	couche de surface, couplages
Gerhard Krinner	LGGE	5	couche limite, régions polaires
Olivier Boucher	LOA	5	transport, microphysique
Johanes Quaas	LOA	10	microphysique
Marie-Pierre Lefèbvre	LMD	20	à 100% sur physique commune ARPEGE/LMDZ

Les pourcentages correspondent au pourcentage d'activité consacré au développements pour le modèle LMDZ, typiquement au cours de la dernière année. Ils ne sont qu'indicatifs, et seront affinés par la suite.

## 2 Les différentes configurations de LMDZ

**Les configurations climatiques classiques** sont basées sur une grille horizontale régulière de 96x71 points en longitude latitude avec 19 niveaux verticaux. Le modèle peut être utilisé seul en prescrivant les SST et avec un modèle simplifié des surfaces continentales (bucket) ou couplé au modèle d'océan global (ORCA/LIM) et au modèle des surfaces continentales ORCHIDEE (Krinner et al.).

**Les configurations stratosphérique** dans lesquelles ont accroît le nombre de niveaux au dessus de la tropopause. Cette version nécessite également une paramétrisation adhoc des ondes de gravités.

**Les configurations chimiques :** le modèle est couplé en particulier à un modèle de la chimie du soufre développé au LOA par Olivier Boucher et à une modèle de la chimie gazeuse troposphérique INCA développé par Didier Hauglustaine au LSCE et en cours d'extension aux aérosols. Différentes grilles utilisées.

**Les configurations zoomées** sont plus variables et dépendent de la question abordée (d'une centaine de kilomètres de résolution sur la Méditerranée, sur l'Amérique du sud ou sur l'Inde) jusqu'à une 40aine de km pour certaines simulations de cyclones.

**Les configurations guidées** dans lesquelles on contraint le modèle a rester proche de la situation synoptique observée en relaxant les champs du modèle vers les champs issus des centres de prévisions météorologiques (analyses en temps réel ou réanalyses). Cette configuration est utilisée pour le développement et la validation des paramétrisations (notamment en version zoomée-guidée sur le SIRTa) et pour des calculs de dispersion ou rétro-dispersion atmosphérique.

**Les configurations uni-colonne :** utilisée pour le développement et la validation des paramétrisation en comparaison avec les résultats de simulations à nuages résolu, en particulier dans le cadre de la 'physique commune ARPEGE/LMDZ'.

**Les configurations transport débranché et rétro-dispersion :** le transport d'espèces traces peut être effectué en ligne, en même temps que la simulation météorologique, ou en mode débranché, en relisant des archives météorologiques construites dans une première simulation. Dans ce mode débranché, il est possible de faire tourner le modèle de dispersion à l'envers, afin de calculer par exemple l'origine d'une masse d'air échantillonnée lors d'une mesure (Hourdin and Issartel, 2000).

### 3 Différents domaines d'application

On note pour chaque sujet les acronymes des projets dans lesquels ces études sont impliquées et la liste des personnes impliquées. Les noms en gras correspondent aux personnes utilisant directement LMDZ et chaque nom n'apparaît qu'une fois en gras, pour donner une meilleure idée du nombre d'utilisateurs effectifs, des forces en présence et du poids potentiel pour l'équipe de développement.

- **Etude de la sensibilité climatique et prévision du changement climatique** (ENSEMBLE, GICC, IPCC)

**Jean-Louis Dufresne, Sébastien Denvil, Pierre Friedlingstein, Pascale Braconnot, Olivier Marti, Participa Cadule, Laurent Fairhead, Sandrine Bony**

- Simulations séculaires
- Simulations XXe et XXIe siècles et scénarios IPCC
- Couplage climat-carbone.
- Nuages et variations climatiques.

- **Variabilité et prévisibilité du climat tropical** (LOTI, VASCO-CIRENE, MOTIV)

**Jean-Philippe Duvel, H Bellenger, Phu LeVan, H. Nguyen (LMD), Jérôme Vialard (LODYC), B.N. Goswami, P. X. Xavier (CAOS/IISc), Harish Upadhyaya (IIT/Dehli), Prashant Goswami (CMACS)**

- Interactions océan/atmosphère, oscillations intra-saisonnières, prévisibilité.
- Prévisibilité de la mousson indienne.
- Prévisibilité des cyclones sur la baie du Benghal.
- Interaction convection/rayonnement/nuages et variabilité synoptique de la convection.

- **Etude de la mousson africaine, processus convectifs, transport d'eau** (AMMA)

**Jean-Yves Grandpeix, Ionela Musat, Tristan D'Orgeval, Remy Roca**

- Paramétrisation des poches froides et propagation des lignes de grain.
- Rôle des surfaces continentales dans la variabilité.
- Rôle des intrusions d'air sec troposphérique.

- **Etude du cycle de vie des nuages et microphysique** (COMPERE/SIRTA)

**Anne Mathieu, Alain Lahellec, Catherine Rio, Johannes Quaas** Frédéric Hourdin

- Développement d'un nouveau schéma de couche limite.
- Cycle diurne de la couche limite continentale.
- Couplage couche limite-convection.
- microphysique/effet indirect des aérosols.

- **Etude du climat méditerranéen** ()

**Laurent Li, Frédéric Chéruy**

- Simulations couplées régionalisées.
- Etudes du cycle de vie des nuages sur la Méditerranée.

- **Etude du climat de l'Amérique du sud** (CLARIS)

**Claudio Menendez, Jean-Philippe Boulanger**

- **Dynamique et chimie de la stratosphère** ()

François Lott et Line Jourdain

- **Cycle du soufre et climat** ()

Olivier Boucher, Nicolas Huneeus, Mai Pham (SA), Johannes Quaas

- Cycle du soufre (chimie et aérosols).
- Microphysique et effet radiatif direct et indirect.
- Réponse et rétroactions climatiques.

- **Etude de la chimie des gaz à effet de serre et aérosols** ()

Didier Hauglustaine, Yves Balkanski, Michale Shultz, Juliette Lathière

- **Transport du CO<sub>2</sub> et inversion des sources** (TRANSCOM, CarboEurope)

Philippe Bousquet, Léonrad Rivier, Abderrahmane Idelkadi

- Etude du transport du CO<sub>2</sub> et expériences d'inter-comparaisons.
- Inversion des sources de CO<sub>2</sub>.

- **Assimilation de données satellites** ()

Cathy Clerbaux (SA), Didier Hauglustaine

- Assimilation des contenus en ozone, CO et méthane pour l'étude de la chimie troposphérique.

- **Etude des paléoclimats** ()

Masa Kageyama, Pierre Sepulchre (LSCE) Gilles Ramstein, Olivier Marti, Pascale Braconnot, Yannick Donnadieu, Frédéric Fluteau

- Etude des paléoclimats du Tchad.
- Dernier maximum glacière.

- **Etude des climats polaires** ()

Gerhard Krinner, Emanuel Cosmes

- Climat des calottes de glaces.
- Interactions surface/atmosphère dans les régions boréales.
- Etude du cycle du soufre en Antartique.

- **Surveillance des essais nucléaires** (TICE)

Philippe Heinrich, Olivia Coindreau (CEA/DASE) Frédéric Hourdin

- Mise en place d'une chaîne opérationnelle avec rétro-transport depuis les stations des réseaux de mesure de la concentration de radio-éléments.
- Utilisation des mesures du réseau pour étudier la physique du transport.

- **Etude des climats planétaires** (Projet ESA/CNES, Mars-Expres, Venus-Express, Cassini-Huygens)

François Forget, Sébastien Lebonnois, Karine Dassas (LMD), Monica Angelats i Colls (UCLA), Frank Montmessin, Frank Lefèvre, Pascal Rannou (SA), David Luz, Thierry Fouchet (LESIA), Benjamin Levrard (ENS/Lyon), Frédéric Hourdin

- Etude des cycles climatiques martiens (eau, Deutérium).
- Dynamique de la haute atmosphère et chimie.
- Paléoclimats. Couplage chimie/microphysique/dynamique sur Titan.
- Développement d'un modèle de circulation générale pour Vénus.

## 4 Les chantiers en cours et les enjeux

### Paramétrisations couche limite/convection/nuages

**Objectif :** Amélioration de la paramétrisation des couplages couche-limite/convection/nuages dans le cadre des simulations du changement climatique. Aller vers des paramétrisations plus physiques. Coller aux processus et permettre une validation des variables internes des paramétrisations. Ces paramétrisations sont également essentielles pour la bonne représentation du transport vertical des aérosols et espèces chimiques.

**En cours :** Inclusion d'une paramétrisation des courants de densité sous les colonnes convectives. Nouvelle paramétrisation non locale pour la couche limite convective. Schéma pronostique de la distribution sous maille de l'eau couplé à la paramétrisation de la convection. Inclusion des traceurs dans la paramétrisation de la convection d'Emanuel.

**A faire :** Inclusion des nuages dans le modèle non local de couche limite. Traitement spécifique pour la transition stratocumulus/cumulus. Couplage entre couche limite et convection nuageuse. Propagation des courants de densité dans un modèle tridimensionnel. Choix d'un jeu de variables différent pour décrire la thermodynamique atmosphérique.

**Personnes impliquées :** Jean-Yves Grandpeix, Sandrine Bony, Frédéric Hourdin, Alain Lahellec, Anne Mathieu, Catherine Rio (thèse), Marie-Angèle Filiberti.

### Extension à la stratosphère

**Objectif :** Couplage stratosphère/climat. Couplage tropo/strato, notamment pour la chimie.

**En cours :** Extension du modèle en altitude. Réglage de la paramétrisation des ondes de gravité pour obtenir une bonne climatologie, au moins en moyenne zonale. Développement de la chimie stratosphérique.

**Personnes impliquées :** François Lott, Slimann Bekki, Line Jourdain, Didier Hauglustaine

**Difficultés :** Le coût du code de transfert radiatif actuel qui croît en carré du nombre de couches.

### Transfert radiatif

**Objectif :** Efficacité numérique (voir plus haut), développement de schémas plus précis, inclusion de la diffusion dans l'infrarouge thermique.

**A faire :** Importer un code de transfert radiatif plus récent que celui de Fouquart/Morcrette comme le code RTTM. Développer des nouveaux algorithmes rapides basés sur des idées de "puissances nettes échangées" dans la suite de ce qui a été fait pour la version Martienne du même code de transfert radiatif et de ce qui commence pour Vénus.

**Difficultés :** Qui ? Nuages.

**Personnes impliquées :** Collaboration forte avec le LE (Richard Fournier, Stéphane Blanco, Vincent Eymet) et à l'étude avec le CNRM (Jean-François Geylin).

### Physique commune

**Objectif :** Comparaison des physiques de LMDZ et Arpège/Climat. A terme : possibilité de partager des paramétrisations (le code d'effet des montagnes de François Lott) ou de nouveaux développements (transfert radiatif).

**En cours :** Interfaçage de la physique du LMD dans le logiciel 1D de ARPEGE.

**Personnes impliquées :** Marie-Pierre Lefèbvre

### Parallélisation

**Objectif :** Parallélisation de LMDZ.

**En cours :** Parallélisation de la version actuelle. Ecriture d'une nouvelle dynamique en volume finis.

**Personnes impliquées :** Alain Jejcic, Support CEA, Phu LeVan, Tentatives indiennes

**Difficultés :** de coordination

## Automatisation, documentation, ...

**Objectif :** Faciliter la distribution et l'utilisation de LMDZ.

**En cours :** Le modèle est déjà accessible en ligne sous CVS ou via Mod-IPSL.

**A faire :** Automatiser les procédures de choix de grille, d'initialisation, de création de conditions initiales, de champs de guidage. Améliorer la documentation.

**Personnes impliquées :** Laurent Fairhead, Frédéric Hourdin.

## 5 Enjeux relatifs aux couplages avec les autres modèles

Le développement du modèle intégré de climat de l'IPSL fait peser un poids très important sur le développement du modèle, qui va très au-delà de la bonne représentation du climat moyen :

- Elle nécessite de boucler presque exactement les bilans en même temps qu'un réglage fin des flux au sommet.
- Il faut pour le couplage avec les surfaces simuler de bons flux en surface ce qui nécessite (entre autres) de bonnes paramétrisations de la couche limite et des nuages.
- La réussite du couplage avec la chimie repose beaucoup sur la bonne représentation du transport atmosphérique, aussi bien par les vents de grande échelle que par les paramétrisations physiques.
- Toutes les affaires CO<sub>2</sub> sont très sensibles à la bonne représentation du cycle diurne de la couche limite du fait de sa très forte corrélation avec le cycle diurne de la respiration des plantes.
- La représentation correcte des échanges troposphère-stratosphère met des contraintes fortes sur la résolution verticale. Cette augmentation est incompatible avec le code de Morcrette actuel.
- La réussite de la partie chimie nécessite qu'on puisse maintenir et si possible automatiser l'utilisation guidée des modèles pour travailler sur des données chimiques à météo connue.

La multitude et la diversité des demandes autour du modèle pose des questions importantes en termes d'information/coordination. Les réponses apportées sur l'information au travers du site web ou de LMD-Zinfo (lettre interne des utilisateurs de LMDZ à parution bisannuelle) sont sans doute insuffisantes.

Il faudrait arriver à relancer des réunions autour de LMDZ (typiquement deux réunions d'un jour par an). Mais de telles réunions viennent se rajouter pour les personnes les plus impliquées à tout un tas d'autres du même type (pôle de modélisations, groupe couplage LMDZ/ORCA, groupe LMDZ/INCA, groupe XX/XXIe, ENSEMBLE, ...).

La participation à ce projet donne prise à toutes les dérives technocratiques classiques des grandes organisations, qui ne font en général qu'ajouter à la lourdeur de l'ensemble. L'exemple le plus marquant est sans doute le projet européen PRISM qui n'aura en rien contribué à aider à la mise en place du modèle IPSLCM mais aura en revanche consommé beaucoup d'énergie de personnes dont on avait besoin pour d'autres choses.

Pour finir, l'importance du côté développement réglage et validation du modèle contribue à la difficulté pour l'équipe LMD-Jussieu de trouver une dynamique scientifique propre.

## Références

- Bony, S., and K. A. Emanuel, 2001 : A parameterization of the cloudiness associated with cumulus convection; evaluation using TOGA COARE data, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3158–3183.
- Emanuel, K. A., 1991 : A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2313–2335.
- Forget, F., F. Hourdin, R. Fournier, C. Hourdin, O. Talagrand, M. Collins, S. R. Lewis, P. L. Read, and J.-P. Huot., 1999 : Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km, *J. Geophys. Res.*, **104**, 24,155–24,176.
- Fouquart, Y., and B. Bonnel, 1980 : Computations of solar heating of the Earth's atmosphere : A new parametrization, *Contrib. Atmos. Phys.*, **53**, 35–62.

- Grandpeix, J.-Y., V. Phillips, and R. Tailleux : Improved mixing representation in emanuel’s convection scheme, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, in press.
- Hourdin, F., and A. Armengaud, 1999 : Test of a hierarchy of finite-volume schemes for transport of trace species in an atmospheric general circulation model, *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 822–837.
- Hourdin, F., and J.-P. Issartel, 2000 : Sub-surface nuclear tests monitoring through the CTBT xenon network, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2245–2248.
- Hourdin, F., P. Le Van, F. Forget, and O. Talagrand, 1993 : Meteorological variability and the annual surface pressure cycle on Mars, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 3625–3640.
- Hourdin, F., O. Talagrand, R. Sadourny, C. Régis, D. Gautier, and C. P. McKay, 1995 : General circulation of the atmosphere of Titan, *Icarus*, **117**, 358–374.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and C. Prentice : A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Glob. Biogeochem. Cyc.*
- Lott, F., and M. Miller, 1997 : A new sub-grid scale orographic drag parametrization : its formulation and testing, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **123**, 101–128.
- Morcrette, J., 1991 : Radiation and cloud radiative properties in the European Centre for Medium Range Weather Forecasts forecasting system, *J. Geophys. Res.*, **96**, 9121–9132.
- Sadourny, R., and K. Laval, January and July performance of the LMD general circulation model, in *New perspectives in Climate Modeling*, edited by A. Berger and C. Nicolis, Elsevier, 173–197, Amsterdam, 1984.
- Tiedtke, M., 1989 : A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1179–1800.
- Van Leer, B., 1977 : Towards the ultimate conservative difference scheme : IV. a new approach to numerical convection, *J. Computational Phys.*, **23**, 276–299.