

Le modèle de circulation atmosphérique global LMDZ

Frédéric Hourdin

14 mai 2008¹

1 Description du modèle

Généralités. Le Laboratoire de Météorologie Dynamique (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’énstrophie. Des opérateurs de dissipation sont introduits pour représenter l’interaction entre échelles horizontales explicites et échelles sous-mailles, et notamment le pompage d’énstrophie 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. Dans sa version terrestre, LMDZ constitue, couplé à d’autres modèles (surfaces continentales, océan, glaces ...) le cœur atmosphérique du modèle intégré du climat de l’IPSL. LMDZ est également décliné dans des versions planétaires, notamment pour Mars (Hourdin et al., 1993; Forget et al., 1999), Titan (Hourdin et al., 1995; Rannou et al., 2006) ou Vénus.

Paramétrisations physiques Couplé au noyau hydrodynamique, le modèle inclue, dans sa version terrestre, un jeu de paramétrisations physiques qui a connu des évolutions successives au cours du temps. On dispose actuellement (2008) de deux versions. La version dite AR4 (Hourdin et al., 2006; Braconnot et al., 2007), utilisée pour effectuer des projections du changement climatique pour le 4^{ème} rapport du GIEC et une nouvelle physique, en cours de validation.

i - Physique AR4 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 turbulence dans la couche limite est représentée au travers d’une ”diffusion turbulente” dont l’intensité est spécifiée 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. 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 (1993). 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 Emanuel, 2001). 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. 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).

ii - Physique nouvelle Différents développement physiques ont été entrepris depuis une dizaine d’années au LMD portant à la fois sur les paramétrisations pour le bloc couche-limite/convection/nuages et sur l’extension à la stratosphère. La nouvelle physique comprend :

1. Un nouveau schéma de couche limite combinant un modèle en diffusion turbulente avec équation pronostique pour l’énergie cinétique turbulente (Yamada, 1983) et un schéma ”en flux de masse” pour représenter les structures cohérentes de la couche limite convective sèche (Hourdin et al., 2002) ou nuageuse (Rio and Hourdin, 2008).
2. Une version modifiée du schéma de convection orageuse d’Emanuel (modification de la prescription des probabilité de mélange avec l’environnement, fermeture et déclenchement basés sur les caractéristiques de la couche limite) (Grandpeix et al., 2004).

¹Il s’agit d’un document de travail. Mes excuses par avance pour les inévitables oublis ou imprécisions.

3. Prise en compte des poches froides créées par réévaporation des pluies convectives. Ces poches froides sont utilisées en retour pour le déclenchement et la fermeture de la convection.
4. Des paramétrisations spécifiques des ondes pour la représentation de la dynamique stratosphérique (Lott et al., 2005).
5. Le nouveau schéma de rayonnement du Centre Européen (RRTM dans l'infra-rouge thermique et modèle à 6 bandes dans le visible) est également en cours de test.

Un travail constant est effectué sur l'évaluation des performances climatiques du modèle. Une approche particulièrement mis en avant autour de LMDZ est l'utilisation de simulateurs d'observations satellites (RTTOV, ISCCP, CALIPSO,...).

Le modèle LMDZ est également 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).

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
Abderrahmane Idelkadi	LMD	80	Support informatique
Jean-Louis Dufresne	LMD	30	couplages, scénarios, diagnostics
Frédéric Hourdin	LMD	30	coordination, couche limite, transport, réglage
Lionel Guez	LMD	15	Appuis divers
Josefine Ghattas	LMD(CDD)	100	Interface/surface
Laurent Li	LMD	5	paramétrisations couche-limite/nuages
François Lott	LMD	10	effet du relief, stratosphère
Pascale Braconnot	LSCE	15	couche de surface, couplages
Gerhard Krinner	LGGE	5	couche limite, régions polaires
Marie-Pierre Lefèbvre	LMD	20	à 100% sur physique commune ARPEGE/LMDZ
François Forget	LMD		Mars/Exo-planètes
Ewarn Millour	LMD(CDD)		Mars
Sébastien Lebonnois	LMD		Titan/Vénus
Pascal Rannou			Titan
Frank Lefèvre	SA		Mars

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 (je n'ai pas demandé à chacun), et pourront être affinés par la suite.

Certains ingénieurs de l'IPSL ont également contribué de façon déterminante au développement de LMDZ ces dernières années. C'est le cas notamment pour Marie-Angèle Filiberti sur les aspects traceurs/chimie et pour Yann Meurdesoif sur la parallélisation. Le travail effectué par Sébastien Denvil, Marie-Alice Foujols ou Arnaud Caubel sur les configurations couplées bénéficient également au développement du modèle.

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 pour les simulations AR4). 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.). Des configurations intermédiaires (océan SLAB, aquaplanètes, ...) ont également été remises au goût du jour récemment.

Les configurations stratosphérique dans lesquelles on accroît le nombre de niveaux au dessus de la tropopause et on active les paramétrisations mentionnées plus haut.

Les configurations chimique/aérosols : le modèle a été couplé à des modèles de chimie/aérosols par Olivier Boucher au LOA et au modèle INCA (LSCE) par Didier Hauglustaine pour la chimie gazeuse (Hauglustaine et al., 2004) et Yves Balkanski et Michael Schultz pour les aspects aérosols. Le modèle est également couplé à REPROBUS (Franck Lefèvre et Slimane Bekki) pour étudier la chimie stratosphérique (Jourdain et al.).

Les configurations zoomées jusqu'à une vingtaine de km pour certaines applications.

Les configurations guidées dans lesquelles on contraint le modèle à 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), pour des calculs de dispersion ou rétro-dispersion atmosphérique et pour la "régionalisation" des simulations globales.

Les configurations uni-colonne : utilisée pour le développement et la validation des paramétrisations en comparaison avec les résultats de simulations à nuages résolus, 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, MC2, IPCC)

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

Configurations de LMDZ utilisées : Modèle couplé de l'IPSL. Versions idéalisées type aqua-planètes.
Sujets :

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

• **Variabilité et Prévisibilité du Climat dans les Tropiques** (LOTI, VASCO-CIRENE, MOTIV)

Jean-Philippe Duvel, H Bellenger, Phu LeVan, H. Nguyen (LMD), Jérôme Vialard (LODYC), P. X. Xavier (CAOS/IISc), D. Nethery

Configurations de LMDZ utilisées : Forcé et couplé océan, guidage et zoom. Simulations d'ensemble courtes (qq années)

Sujets de recherche :

L'objectif est la compréhension et la modélisation des processus physiques (interaction océan-atmosphère, convection, couplage onde-convection) gouvernant les variations intrasaisonnières et interannuelles dans les tropiques. L'accent est mis sur l'étude de la variabilité intrasaisonnière (synoptique 2-10 jours et de type Madden-Julian 20-60 jours) et de son lien avec les changements interannuels (Intensité des moussons

Africaine et Indienne, ENSO). LMDZ est utilisé pour déterminer l'origine physique de ces phénomènes et leur impact sur la prévisibilité. Concrètement, en s'appuyant sur des campagnes de mesure, on effectue des tests de sensibilité de la simulation de ces phénomènes à différents processus physiques. Nous avons en particulier implémenté une paramétrisation des couches de réchauffement diurne océanique (c'est bien une paramétrisation du modèle d'atmosphère) qui peuvent jouer un rôle important sur l'organisation de la convection à grande échelle et donc sur la variabilité tropicale.

• **Etude de la mousson africaine, processus convectifs, transport d'eau** (AMMA)
Jean-Yves Grandpeix, Ionela Musat, Remy Roca, Jingmei Yu, Serge Janicot, Amadou Gaye, Saydou Sall + 5 thèses franco-sénégalaises

Configurations de LMDZ utilisées : SST prescrites, zoom (80 ou 20 km au centre du zoom) avec ou sans guidage.

- Paramétrisation des poches froides et propagation des lignes de grain.
- Cycle diurne de la convection.
- Rôle des surfaces continentales dans la variabilité.
- Rôle des intrusions d'air sec troposphérique.
- Test de la nouvelle physique.
- Variations décennales et intra-saisonnières de la pluie au Sahel.
- Hydrologie de la région du Futa Jalon.

• **Etude du cycle de vie des nuages et microphysique** (COMPERE/SIRTA)
Catherine Rio, Frédéric Cheruy + Alexandre Armengaud Frédéric Hourdin, Sandrine Bony, Jean-Yves Grandpeix

- Test et amélioration de la nouvelle physique.
- Cycle diurne de la couche limite continentale.
- Nuages bas océaniques.

• **Etude du climat méditerranéen** ()

Laurent Li Frédérique Cheruy

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

• **Dynamique et chimie de la stratosphère** (SCOUT-O3, CCM-Val, GEMS, GEOMON)
François Lott, Sliman Bekki, Marion Marchand, Franck Lefevre, P Keckhut

Configuration de LMDZ utilisée : LMDz Strato (50-60 niveaux verticaux)

Etude avec de la dynamique de la stratosphère et de la mésosphère. Influence de la dynamique aux moyennes latitudes dans la stratosphère (en particulier les réchauffements stratosphériques soudains) sur la persistance de l'oscillation Arctique dans la troposphère.

Etdude de la dynamique équatoriale et des ondes planétaires se propageant dans la stratosphère équatoriale. Un des objectifs est de fournir à la communauté un modèle de circulation générale du climat reproduisant l'Oscillation Quasi Biennale.

Impact de la variabilité dynamique et climatique sur la distribution de l'ozone dans la stratosphère

Impact de l'évolution de l'ozone stratosphérique sur la chimie troposphérique et la capacité oxydante de l'atmosphère.

Impact de la variabilité solaire et des éruptions volcaniques sur l'ozone stratosphérique et le climat.

• **Etude de la chimie des gaz à effet de serre et aérosols** (RETRO, GEOMON, CREATE, PHOENICS, SCOUT-O3, QUANTIFY, GEMS, CNES, METRIC, AMMA, MINATROC, AEROCOM, IASI, ACCENT, CYCLE, TRADE.OFF)
Balkanski, Y., Bazureau, A., Bouarar, I., Caro, D., Castebrunet, H., Clerbaux, C., Cozic, A., Deandreis, C., Fluteau, F., Hauglustaine, D., Jegou, F., Klenov, L., Klonecki, A., Law, K. SA, Martinerie, P., Pham, M., Schulz, M., Szopa, S., Tsigaridi, K., Turquety, S. (LSCE, SA, LGGE, IPGP, NOVELTIS)

- Calcul des conditions aux limites pour le modèle Chimère de pollution.
- Etude des interactions chimie-climat dans la stratosphère (SCOUT_O3).
- Création d'une version stratosphérique du modèle avec 50 niveaux et chimie de la stratosphère. Application à l'étude de la formation du trou d'ozone et à son évolution future.
- Plateforme de prévision et accompagnement campagnes terrain
- Chaîne temps réel du modèle ayant notamment pour objectif de servir de support aux campagnes de mesures. Cette chaîne prend en compte les feux sur la base de données satellites en temps réel.
- Inter-comparaison modèles/données (CREATE, AEROCOM)
- Comparaison des sorties de LMDz-INCA avec les observations relevées par les réseaux de mesures en aérosol existant sur le globe et extension à l'évaluation de 16 modèles.

Projets et chantiers en cours

- Chimie gazeuse simplifiée CH₄-CO-NO_x-O₃ et chimie stratosphère (Cl, Br, PSC)
- Version 1x1°
- Utilisation du modèle de sol de ORCHIDEE pour le couplage LMDz-INCA
- Modèle couplé système terre avec aérosols (CICLE)
- Traceurs inertes dans LOOP

• **Transport du CO₂ et inversion des sources** (TRANSCOM, CarboEurope)
Philippe Bousquet, Pilippe Peylin, Frédéric Chevalier

- Etude du transport du CO₂ et expériences d'inter-comparaisons.
- Inversion des sources de CO₂.

• **Assimilation de données satellites** ()
Cathy Clerboux (SA), Didier Hauglustaine

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

• **Etude des paléoclimats** ()
Masa Kageyama, Gilles Ramstein, Pascal You, Pierre Sepulchre, Ramdane Alkama, Alexandre Laine, Olivier Marti, Pascale Braconnot, Charline Marzin, Yannick Donnadieu, Frédéric Fluteau, Adriana Sima (LSCE/IGPB)

Configurations de LMDZ utilisées : (planète, couplages, guidage, zoom, LMDZ/INCA ...) modele couple ocean 2 degres-atmosphere 96x72

- modelisation des paleoclimats et experiences de sensibilite associees
 - modelisation des paleoclimats avec une bonne resolution sur l'Europe. Configuration tres utile pour l'interaction avec d'autres communautes (reconstructions climatiques, archeologues)
 - Rôle de la convection et des teleconnection Inde-Afrique.
 - modélisation des climats anciens, distribution des aérosols volcaniques (IPGP).
- Les thèmes abordés recouvrent pour une part les études climat actuel ou futur (ex mousson, convection, sensibilité climatique).
- Etude du dernier millénaire.

• **Etude des climats polaires** ()
G. Krinner, C. Genthon, P. Martinerie, C. Ritz

Configurations de LMDZ utilisées : Planète Terre, couplage calottes (peut être un jour INCA...), guidage régions polaires, zoom régions polaires / calottes de glace.

Sujets : Climat, variabilité et changement climatique en régions polaires et sub-polaires, paléoclimat des calottes de glace, chimie atmosphérique du soufre.

• **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 (LMD), 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

Physique

Objectif : Finalisation, évaluation et utilisation pour l'étude de la sensibilité du changement climatique du nouveau bloc couche-limite/convection/nuages. Personnes impliquées : Jean-Yves Grandpeix, Sandrine Bony, Frédéric Hourdin, Francis Codron, Catherine Rio (thèse). Dans les années qui viennent, on bénéficiera d'un jeu de paramétrisations physiques dont le contenu physique sera beaucoup plus assis.

Objectif : Utilisation de RRTM et réécriture possible de nouveaux codes de transfert radiatif. **Personnes impliquées :** Collaboration forte avec le LE (Richard Fournier, Stéphane Blanco, Vincent Eymet) et à l'étude avec le CNRM (via Jean-François Geleyn).

Lien avec des affaires développées en planétologie comme la création d'un GCM universel.

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).

Objectif : Modélisation des isotopes de l'eau.

Personnes impliquées : Sandrine Bony, Camille Risi, ... (LMD/LSCE).

Question ouverte : jusqu'où va-t-on sur la micro-physique nuageuse ?

Evolutions du code dynamique

Personnes impliquées : Frédéric Hourdin, Vladimir Zitlin, Guillaume Lapeyre, Yann Meurdesoif, Phu LeVan, Rashmi Mittal, Harish Hupadyaya

L'augmentation de la résolution spatiale est une évolution naturelle des modèles, liée à l'évolution des moyens informatiques. En ce qui concerne les simulations longues du changement climatique, il ne s'agit pas de résoudre explicitement tous les processus nuageux ; la modélisation explicite des nuages bas océaniques, déterminants dans la sensibilité du climat, nécessiterait en effet des simulations LES avec des mailles de quelques dizaines de mètres dans les trois directions. En revanche, le fait de passer à des résolutions globales de quelques dizaines de kilomètres permettra de résoudre les fronts dans les moyennes latitudes, ou les cyclones sur les océans, par exemple.

Le fait d'augmenter ainsi la résolution nécessite de passer sur des infra-structures parallèles à massivement parallèles (quelques milliers de processeurs par exemple).

Un effort important a été réalisé récemment par des ingénieurs de l'IPSL pour paralléliser LMDZ (Yann Meurdesoif et Arnaud Caubel). Cette parallélisation "gros grain" permettra de passer le cap des prochaines simulations du GIEC avec une résolution globale de 200 km environ.

Les évolutions futures nécessitent en revanche qu'on revienne sur l'écriture du cœur dynamique du modèle. Le rapprochement des longitudes près des pôles reste en effet un handicap car il induit un

filtrage qui se marie mal avec une parallélisation en découpage de domaines, naturelle pour un modèle de mécanique des fluides en points de grille. Différents travaux sont en cours actuellement pour contourner ce problème comme le développement d'une dynamique sur une grille icosaédrique utilisant des schémas en volumes finis pour les variables météorologiques, dans le cadre d'une collaboration franco-indienne.

Les 4 ans qui viennent seront consacrées à l'exploration de différentes solutions (en allant y compris chercher des cœurs dynamiques existants) et à la mise au point d'un nouveau modèle permettant de viser des simulations longues globales avec des mailles de quelques dizaines de kilomètres.

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 : bouclage des bilans, réglage des flux au sommet, bonne représentation des flux en surface pour l'océan et l'hydrologie continentale, bonne représentation du transport des espèces chimiques etc ...

La communauté des utilisateurs de configurations lourdes notamment, et la multiplicité des configurations, fait porter un poids trop lourd sur une équipe de développement sous-dimensionnée si on veut se projeter à moyen terme. Une autre façon de prendre le même problème est de dire que le retour ou l'investissement dans le modèle de cette communauté des utilisateurs est insuffisant. Ce fait est sans doute conséquence d'un manque de visibilité/coordination des travaux de modélisation.

Dans cette configuration, deux défis successifs on cependant été relevés ces dernières années : une participation "à niveau" au dernier exercice du GIEC, et le développement d'un nouveau jeu de paramétrisation physiques.

C'est donc le moment aujourd'hui d'assoier cette dynamique dans le temps en améliorant la coordination et l'information autour du projet LMDZ, et en tachant d'impliquer notamment davantage de chercheurs et d'enseignants chercheurs dans le développement du modèle.

Les modalités de cette organisation sont en cours de définition. Il est également envisagé de proposer le modèle LMDZ, dans ces composantes terrestre et planétaire, comme outil national de l'INSU. Un plan de développement à 4 ans avec demande de soutien sera finalisé prochainement.

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.
- Braconnot, P., F. Hourdin, S. Bony, J.-L. Dufresne, J.-Y. Grandpeix, and O. Marti, 2007 : Impact of different convective cloud schemes on the simulation of the tropical seasonal cycle in a coupled ocean-atmosphere model, *Clim. Dyn.*, **29**, 501–520.
- Emanuel, K. A., 1993 : A cumulus representation based on the episodic mixing model : the importance of mixing and microphysics in predicting humidity, *A.M.S. Meteorol. Monographs*, **24**, 185–192.
- Eyring, V., N. Butchart, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, G. E. Bodeker, B. A. Boville, C. Brühl, M. P. Chipperfield, E. Cordero, M. Dameris, M. Deushi, V. E. Fioletov, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, V. Grewe, L. Jourdain, D. E. Kinnison, E. Mancini, E. Manzini, M. Marchand, D. R. Marsh, T. Nagashima, P. A. Newman, J. E. Nielsen, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, M. Schraner, T. G. Shepherd, K. Shibata, R. S. Stolarski, H. Struthers, W. Tian, and M. Yoshiki, Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past, 2006.
- 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, 2004 : Improved mixing representation in Emanuel's convection scheme, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 3207–3222.

- Hauglustaine, D. A., F. Hourdin, L. Jourdain, M.-A. Filiberti, S. Walters, J.-F. Lamarque, and E. A. Holland, 2004 : Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model : Description and background tropospheric chemistry evaluation, *J. Geophys. Res.*, **109**, 4314–4357.
- Hourdin, F., and A. Armengaud, 1999 : The use of finite-volume methods for atmospheric advection of trace species. part i : Test of various formulations in a 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.
- Hourdin, F., F. Couvreur, and L. Menut, 2002 : Parameterisation of the dry convective boundary layer based on a mass flux representation of thermals, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1105–1123.
- Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, G. Krinner, P. Levan, Z.-X. Li, and F. Lott, 2006 : The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, *Climate Dynamics*, **27**, 787–813.
- Jourdain, L., B. Bekki, F. Lott, and F. Lefevre, The coupled stratospheric chemistry climate model lmdz/reprobus : description and evaluation of a transient simulation of the period 1980-1999.
- 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.
- Lott, F., L. Fairhead, F. Hourdin, and P. Levan, 2005 : The stratospheric version of LMDz : dynamical climatologies, arctic oscillation, and impact on the surface climate, *Clim. Dyn.*, **25**, 851–868.
- 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.
- Rannou, P., F. Montmessin, F. Hourdin, and S. Lebonnois, 2006 : The Latitudinal Distribution of Clouds on Titan, *Science*, **311**, 201–205.
- Rio, C., and F. Hourdin, 2008 : A thermal plume model for the convective boundary layer : Representation of cumulus clouds, *J. Atmos. Sci.*, **65**, 407–425.
- 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.
- Yamada, T., 1983 : Simulations of nocturnal drainage flows by a q^2l turbulence closure model, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 91–106.