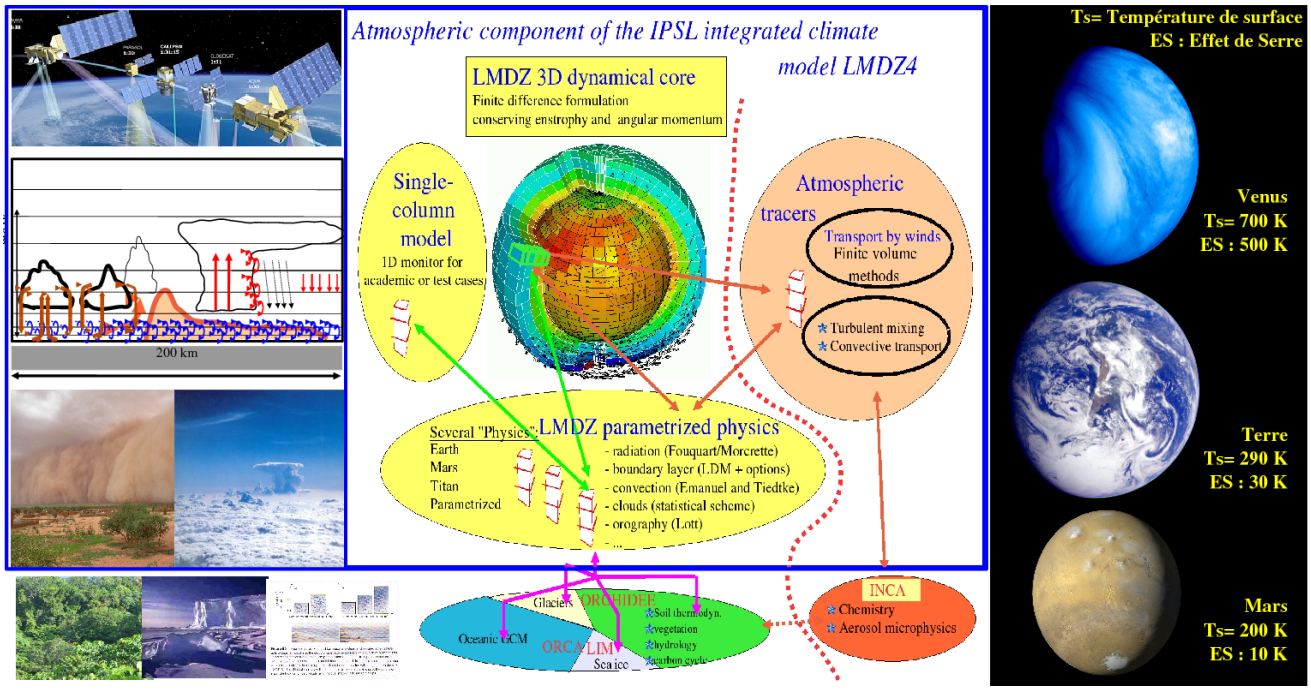
Demande de label Insu pour le modèle LMDZ

Le comité de pilotage,
Frédéric Hourdin, Jean-Louis Dufresne, François Forget, Laurent Fairhead, Véronique Fabart

2 février 2010



Nom du SOERE : **LMDZ**
Responsable : **Frédéric Hourdin**, Directeur de Recherche au CNRS, CV en Annexee C
Laboratoire : **LMD**
Organismes de rattachement : **CNRS, ENS, UPMC, Ecole Polytechnique**

Autres laboratoires intervenant dans le fonctionnement du SOERE LMDZ :

Fédération IPSL (FR 636) : le modèle LMDZ est au cœur du modèle de système Terre de l'IPSL, coordonné par le pôle modélisation (cf. Section 3.5). Un ingénieur du pôle modélisation (Josefine Gatthas) est à 100% sur la partie « traceurs » du modèle LMDZ.

LSCE (unité mixte de recherche CEA-CNRS, UMR1572) : le LSCE est moteur au sein du pôle modélisation pour les aspects de « modélisation du système Terre ». Yann Meurdessoif, personnel CEA/LSCE, contribue directement au Soere LMDZ en tant que responsable de l'optimisation et de la parallélisation de LMDZ.

Table des matières

1 Motivation de la demande et description du Soere LMDZ **1**
- 1.1 Qu'est-ce que LMDZ ? . . . 1
- 1.2 Les spécificités de LMDZ . . . 1
- 1.3 La dimension actuelle du projet . . . 1
- 1.4 Organisation . . . 2
- 1.5 Le pourquoi d'une demande de label Soere ? . . . 3

2 Contexte scientifique **4**
- 2.1 La modélisation numérique dans les sciences du climat . . . 4
- 2.2 LMDZ, un modèle de la circulation générale des atmosphères . . . 4
- 2.3 LMDZ : un modèle de circulation aux utilisations multiples . . . 5
- 2.4 LMDZ : un outil en évolution . . . 8

3 Le Soere LMDZ **10**
- 3.1 Engagement de distribution du code source . . . 11
- 3.2 Tâches de service spécifiques Océan Atmosphère . . . 11
- 3.3 Tâches de service spécifiques Astrophysique . . . 11
- 3.4 Par rapport à l'existant . . . 12
- 3.5 Articulation avec le modèle de l'IPSL et les outils du pôle de modélisation . . . 12
- 3.6 Contrôle qualité . . . 13
- 3.7 Gouvernance . . . 14

A Description et architecture du modèle LMDZ **17**

B Organisation **21**

C CV du responsable du Soere LMDZ **24**

D Bibliographie **25**

E Acronymes **28**

1 Motivation de la demande et description du Soere[1] LMDZ

1.1 Qu'est-ce que LMDZ ?

LMDZ[2] est un modèle de circulation générale atmosphérique développé par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, le Z faisant référence à la capacité de raffinement régional de la grille ou **Zoom**). Il s'agit d'un code numérique en différences et volumes finis s'appuyant sur les équations de la physique et de la dynamique des fluides. Le modèle de climat terrestre s'accompagne de **versions planétaires**, partageant le même cœur hydrodynamique. LMDZ est au cœur du modèle intégré de climat[3] dont le développement est coordonné par le pôle modélisation de l'IPSL et qui contribue largement aux **projections du changement climatique** effectuées pour alimenter les rapports du Giec. LMDZ calcule à la fois l'évolution des variables météorologiques et le transport d'un nombre quelconque de constituants (aérosols, composés chimiques, radioéléments, isotopes stables de l'eau). Le transport de constituants est utilisé aussi bien pour des questions de couplage entre composition et dynamique atmosphérique que de **surveillance de l'environnement**. Les différentes versions planétaires ont quant à elles été largement utilisées pour la préparation de l'**exploration du système solaire** et pour l'exploitation et l'interprétation des données recueillies. Associé à des études théoriques ou à l'analyse d'observations, LMDZ est enfin un **outil de recherche sur les phénomènes atmosphériques et climatiques** et leur modélisation.

1.2 Les spécificités de LMDZ

Le fait qu'un même modèle de circulation globale soit développé et utilisé aussi bien pour l'étude du climat terrestre que pour l'étude des atmosphères planétaires est unique et constitue un enrichissement mutuel des deux domaines. Une autre caractéristique de LMDZ est de présenter une grande souplesse : dans la même infrastructure coexistent des configurations zoomées, guidées par des réanalyses d'observations, 1D, 2D, ainsi que la possibilité de gérer en parallèle différentes physiques. Enfin LMDZ privilégie à la fois les configurations lourdes qui "tournent" sur des super calculateurs et des configurations plus légères, téléchargeables automatiquement sur un ordinateur personnel sous système d'exploitation Linux, et ne faisant appel qu'à des logiciels libres. Ces dernières permettent aux équipes de recherche de s'approprier facilement l'outil et de l'utiliser pour étudier des questions spécifiques. Il existe également une version de LMDZ dédiée à l'enseignement.

1.3 La dimension actuelle du projet

Dans sa version terrestre, LMDZ est :

- **au cœur du modèle climatique de l'IPSL**. Il est directement couplé au modèle des surfaces continentales Orchidee pour le sol, la végétation, l'hydrologie et le cycle du carbone ; aux modules Inca et Reprobus pour la représentation de la chimie et des aérosols dans la troposphère et la stratosphère ; via le coupleur Oasis du Cerfacs à la plate-forme

[1] Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche et l'Environnement. Une liste des acronymes est consultable en annexe E. Suivant une règle classique en typographie, les acronymes sont écrits entièrement en majuscule s'ils sont habituellement dits comme une suite de lettres (ex. C. N. R. S.) et avec des minuscules quand ils se prononcent comme un mot (ex. Cnes).

[2] Site web LMDZ : http ://lmdz.lmd.jussieu.fr/

[3] Les Earth System Models ou ESM

Nemo (Soere), pendant de LMDZ du côté océanique, qui comprend le modèle de circulation océanique, le modèle de glace de mer Lim et le modèle de biogéochimie marine Pisces.

- **étroitement associé à l'analyse d'observations**, qu'elles soient issues de campagnes de mesure (Amma, Vorcor...), de sites instrumentés (Soere Sirta) ou d'instruments sur satellites (Calipso, Parasol, MeghaTropiques, MeteoSat, etc). Ceci induit des développements spécifiques – configurations 1D ou zoomées et guidées par les analyses météorologiques, simulateurs d'instruments spatiaux, inclusion des isotopes stables de l'eau – et contribue à l'enjeu essentiel d'exploitation et de valorisation de ces observations.
- **largement distribué** à l'IPSL (50 à 60 personnes du LSCE, Latmos et Locean), au niveau national (LGGE, CEA-Dam) et international : IIT Delhi (Inde), LPAOSF (Sénégal), LASG Beijing, KLME Nanjing, LOAICC Qingdao, Climate Center Taiyuan (Chine), Cima Buenos-Aires (Argentine)
- **largement utilisé** seul ou en tant que composante du modèle climatique de l'IPSL. LMDZ contribue à de nombreux programmes internationaux (AMIP, PMIP, CFMIP, ...) et aux simulations réalisées en vue de la préparation des différents rapports du Giec. Ces résultats sont mis à la disposition de la communauté internationale et sont très largement exploités (**cf. demande de labélisation Soere Prodiguer)**.

Dans sa version planétaire, LMDZ est :

- **distribué auprès d'une dizaine d'équipes à l'étranger** dans le cadre de collaborations demandant des développements spécifiques : IAA Grenade (Espagne), The Open University (UK), Oxford University (UK), Brown University (USA), Observatoire Royal (Belgique), Estec/Esa (Pays-Bas) ...
- **appliqué à de multiples domaines d'études :** simulations paléoclimatiques de la formation de glaciers ou de rivières sur Mars, échappement atmosphérique (extension à la thermosphère, ionosphère et exosphère), photochimie des gaz et des aérosols, simulation des cycles du radon, des isotopes, du transport de cendres volcaniques, etc.
- **utilisé pour constituer des bases de données climatiques**. La "Mars Climate Database" (MCD), devenue une référence pour la communauté scientifique ainsi que les agences et l'industrie spatiales. La MCD est en ligne et une version plus aboutie est également distribuée sur DVD-ROM ; elle est utilisée par plus d'une centaine d'équipes réparties dans une vingtaine de pays. La version Titan de LMDZ a également servi à construire une base de données climatiques mise à disposition de la communauté internationale.

LMDZ est source de nombreuses publications :
une soixantaine par an en moyenne (cf. annexe D et document joint).

1.4 Organisation

Se reporter en annexe B pour le détail de l'organisation.

Le **comité de pilotage** coordonne l'ensemble du projet LMDZ et définit les grandes orientations. Il réunit les responsables du développement, des outils informatiques, des applications climatiques et planétologiques plus un coordinateur, au rythme de 2 ou 3 fois par an.

L'**équipe de développement** de LMDZ rassemble : 1) le noyau dur des développeurs du LMD et de l'IPSL : 10 chercheurs impliqués à des degrés divers et 8 ingénieurs, qui passent en

moyenne 40 % de leur temps à cette activité ; 2) les collaborateurs en développement du LMD, de l'IPSL ou de laboratoires extérieurs (LGGE, CEA-Dam, IIT en Inde) qui interviennent sur des thématiques ou des aspects techniques spécifiques.

Enfin, deux structures nouvelles seront mises en place en 2010 : un **conseil scientifique** avec des membres extérieurs au projet, dont le rôle est de définir la politique scientifique générale du projet et de s'assurer de son application, ainsi qu'une **réunion utilisateurs** annuelle sur deux jours permettant 1) de recenser les études et résultats scientifiques marquants obtenus avec LMDZ, 2) d'évaluer les performances climatiques du modèle, 3) de recenser les attentes des utilisateurs et 4) de présenter et discuter des évolutions récentes et futures du modèle. A cette fin aussi, des **représentants des utilisateurs** ont été identifiés sur les différents domaines d'applications du modèle (cf. Annexe B).

1.5 Le pourquoi d'une demande de label Soere ?

Les perspectives sont nombreuses en termes d'études ou d'applications du modèle LMDZ, aussi bien pour la Terre que pour les autres planètes du système solaire. Une bonne représentation de la physique et de la dynamique atmosphériques est essentielle pour la plupart de ces études ainsi que pour le couplage avec les autres composantes du système. Il faut donc garantir dans le temps un contrôle qualité rigoureux sur des versions éprouvées du modèle, et en même temps améliorer constamment son contenu physique et rester à la pointe des recherches dans le domaine. C'est dans le but d'asseoir et de faire reconnaître cette démarche et de garantir l'idée "d'outil pour la communauté" qui anime l'équipe de développement que nous demandons aujourd'hui un label, avec les objectifs principaux suivants :

1. établir un cadre qui permette de **garantir sur le moyen ou le long terme** :
   - **les exigences du projet de modélisation intégrée de l'IPSL** avec notamment la participation aux exercices successifs du Giec ;
   - **les applications en planétologie et météorologie comparée**, à la fois pour la recherche et pour la préparation des missions spatiales ;
   - **la souplesse d'un outil pour des recherches de pointe** multi-configurations pour l'étude des processus atmosphériques et des mécanismes climatiques que les chercheurs de nos disciplines puissent facilement s'approprier ;
   - **la pérennisation des développements nouveaux** comme l'introduction récente du fractionnement des isotopes stables de l'eau.
2. **assurer des moyens pour les objectifs cités** et couvrir des aspects insuffisamment pris en compte tels que l'animation scientifique, la formation et la communication. Nous visons un soutien récurent de 15 K€/an et, à terme, deux postes de physiciens.
   - **Le premier poste, prioritaire, aura une mission de coordination, de formation, d'aide aux utilisateurs et de contrôle qualité autour des paramétrisations physiques**. Interlocuteur privilégié des représentants des utilisateurs des différents domaines d'application, il veillera à assurer la compatibilité des versions successives du modèle avec les autres composantes du système climatique et orientera ou effectuera de nouveaux développements en lien avec les divers domaines applications.
   - **Le second poste aura une mission de coordination, de formation et d'aide aux utilisateurs autour des cœurs dynamiques**. Il sera chargé de garantir la compatibilité des cœurs dynamiques avec les différents jeux de paramétrisations physiques, de la mise en place ou du suivi de configurations nouvelles, du calcul haute performance et de la formation et de l'aide aux utilisateurs autour des aspects dynamiques.

2 Contexte scientifique

2.1 La modélisation numérique dans les sciences du climat

La modélisation numérique (c'est à dire l'ensemble des activités allant de l'élaboration d'un modèle physico-mathématique à sa mise en œuvre informatique et à la réalisation de simulations numériques) en conjonction avec l'observation (campagnes de terrain, télédétection spatiale ou autres) est devenue au fil des années un outil essentiel pour la compréhension et la prévision des phénomènes atmosphériques. La modélisation climatique, dont on parle plus particulièrement ici, se situe à la croisée entre vision planétaire globale et vision à l'échelle des processus (lesquels sont représentés au travers de paramétrisations). Elle poursuit à la fois des **objectifs** de **compréhension physique** du système climatique (le sens classique des modèles en physique), d'**exhaustivité** (intégration successive des différents processus et composantes du système) et de **réalisme**.

Cette **modélisation intégrée** est souvent le seul moyen de vérifier que des idées physiques, issues de théories ou d'observations, sont bien à l'œuvre dans le système climatique, une fois pris en compte le couplage du phénomène considéré avec l'ensemble du système. Elle est aussi souvent le meilleur moyen d'identifier ces mécanismes physiques en coupant des boucles de rétroactions ou en réalisant des simulations avec des configurations idéalisées (sensibilité aux paramètres, aquaplanètes, physiques simplifiées, équations en eaux peu profondes, etc). Réalisme et exhaustivité sont d'abord des arguments (sans en être les garants) en faveur des interprétations physiques faites à partir de ces modèles. Ils sont également essentiels pour la prévision des évolutions futures du climat, pour lesquelles on est face à une question un peu particulière en physique : avancer des résultats pour lesquels on ne peut pas proposer aujourd'hui de vérification.

Dans ce contexte, il est essentiel de **renforcer les dynamiques de travail autour du développement des modèles numériques dans les grands centres d'étude du climat**, en conservant une grande diversité d'approches. **L'amélioration des modèles est un enjeu scientifique majeur de nos disciplines, en ce qu'elle signifie une amélioration de notre compréhension du système lui-même et de notre capacité à prévoir**. Pour que ce point, qui motive souvent les programmes d'observations, dépasse le stade de l'affichage, il est même souhaitable qu'une partie croissante de la communauté s'approprie ces outils, au même titre que les modélisateurs doivent s'approprier la problématique de l'observation, le sens qu'on peut donner à des mesures locales de flux en surface, à des observations lidar de nuages depuis l'espace, etc.

2.2 LMDZ, un modèle de la circulation générale des atmosphères

LMDZ est un modèle de circulation générale atmosphérique. Il s'agit d'un modèle numérique en différences et volumes finis, basé sur les équations de la dynamique des fluides et de la physique (transfert radiatif, thermodynamique). Développé à l'origine pour l'étude du climat terrestre, ce modèle se décline aussi pour d'autres atmosphères de planètes telluriques comme Mars, Titan, Vénus et Pluton, de satellites comme Titan et Triton, ou, plus récemment, pour l'étude du climat sur les planètes extrasolaires. Le fait que ces aspects terrestres et planétaires soient développés au sein d'un même laboratoire est une spécificité dans la communauté scientifique internationale que nous voulons préserver. Cette interdisciplinarité est une richesse et une force, même si elle apporte des contraintes supplémentaires sur les développements.

Le fait de pouvoir s'appuyer sur des outils à la fois théoriques, numériques et informatiques éprouvés dans le cadre terrestre, a été un élément important de la reconnaissance ra-

pide de l'équipe de planétologie du LMD sur la scène internationale. En retour, cette composante planétaire donne un éclairage particulier sur les processus atmosphériques et leur paramétrisation, en permettant d'explorer une plus grande gamme de paramètres que dans le seul contexte terrestre. L'exploration de mondes moins bien connus que la Terre oriente également vers le développement de paramétrisations s'appuyant au maximum sur la physique.

L'étude des atmosphères terrestres et planétaires se rejoint également dans la problématique de l'étude des couplages entre composition atmosphérique et dynamique, ainsi que dans l'étude des paléoclimats martiens (le problème de la Terre primitive est par exemple un endroit où se retrouvent les deux communautés).

Le modèle de circulation générale LMDZ est utilisé également pour des études plus théoriques des régimes de circulation sur des planètes en rotation, avec des versions idéalisées : physique simplifiée, aqua-planètes, équation des eaux peu profondes (restriction à une couche du modèle).

2.3 LMDZ : un modèle de circulation aux utilisations multiples

Nous donnons ci-dessous les principaux types d'utilisation et renvoyons au document joint sur les applications pour une description détaillée avec la liste des équipes impliquées et des références bibliographiques.

Modélisation des changements climatiques

LMDZ (18)[4] est la composante atmosphérique du modèle intégré de climat de l'IPSL (34; 3). Ce modèle est utilisé à la fois pour comprendre les variations passées du climat, depuis la reconstruction du climat des dernières décennies jusqu'aux paléoclimats lointains ou à l'étude de la terre primitive, et aussi pour essayer d'anticiper ses variations futures. Les simulations réalisées sur la base de différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre contribuent notamment à la préparation des différents rapports du Giec. Pour ces études, LMDZ est couplé à un modèle de surface continentale (Orchidee), d'océan-glace (Nemo-Lim) ainsi qu'aux modèles de chimie-aérosol Inca et Reprobus. Cette modélisation intégrée induit de fortes contraintes sur le développement du modèle, aussi bien en terme de phasage et compatibilité des développements que de qualité du climat simulé. De même, ceci nécessite d'intégrer de nombreux diagnostics dans les modèles, afin d'alimenter les études de plus en plus nombreuses qui utilisent ces simulations.

Dans le cadre de l'anticipation du changement climatique, on demande également aux modèles atmosphériques de fournir des résultats de simulations qui soient plus robustes, plus pertinents, et ce non seulement pour la température mais aussi pour des grandeurs plus critiques telles que la pluie, les événements rares ou extrêmes, etc. Une attention particulière est apportée notamment au réalisme et à la modification de ces différentes variables sur les régions habitées du globe. L'amélioration de la représentation de ces climats régionaux relève là aussi pour une bonne part de l'amélioration du contenu physique des modèles. Pour des études focalisées sur une région particulière, on dispose également de configurations zoomées du modèle, avec une grille raffinée sur une région particulière. Des versions zoomées de LMDZ sont notamment impliquées dans des études régionales du climat sur les régions polaires, l'Europe (29), l'Inde (1), la Chine, l'Argentine, l'Afrique de l'Ouest (19), la région parisienne (6) ...

[4] Les chiffres entre parenthèses renvoient à des références bibliographiques citées en annexe D

Etude des mécanismes en jeu lors des changements climatiques

On sait que la représentation des processus atmosphériques (e.g. convection, couche limite, nuages, etc) joue un rôle majeur dans la dispersion des simulations de changements climatiques (sensibilité climatique, changements paléoclimatiques, changements de précipitations, etc). Cependant, l'identification des mécanismes climatiques responsables de cette dispersion et des processus dont il faudrait améliorer en priorité la représentation pour accroître la confiance dans les projections futures reste en grande partie une question ouverte.

Pour attaquer cette question, une approche consiste à analyser les expériences de changement climatique au moyen d'une hiérarchie de modèles (simulations couplées océan-atmosphère, simulations atmosphériques idéalisées, aqua-planètes, 1D, etc) de façon à identifier et à hiérarchiser plus facilement les principaux processus mis en jeu. Des tests observationnels spécifiques peuvent alors être proposés pour évaluer le réalisme de ces processus. Cette approche est suivie en particulier pour étudier les mécanismes mis en jeu dans les rétroactions nuageuses, dans l'amplification polaire des changements de température ou dans les changements de précipitation de mousson.

Une autre approche consiste à évaluer des simulations des variations lentes du climat (aux échelles décennales et plus) en utilisant des proxys tels que les différents isotopes de l'eau. Cela suppose soit de disposer d'une calibration robuste du lien proxys-variables climatiques, soit de modéliser directement ces proxys. LMDZ a été doté récemment d'une représentation des isotopes de l'eau (oxygène 18, deutérium, et bientôt oxygène 17). Ainsi il est désormais possible de comparer ces simulations aux données isotopiques disponibles dans la précipitation, l'atmosphère, les fleuves, la canopée, les glaciers tropicaux ou les calottes polaires. Cela permet de tester la capacité du modèle à simuler des changements paléoclimatiques (e.g. dernier maximum glaciaire, Holocène) ou séculaires (e.g. variabilité décennale au cours du dernier siècle). En retour, LMDZ aide à interpréter les proxys mesurés, et à mieux comprendre la dynamique des variations climatiques à toutes les échelles de temps (41).

Surveillance de l'environnement et détermination des sources et puits de CO_2

LMDZ est utilisé pour le calcul du transport de constituants dans l'atmosphère (14) et pour l'inversion du transport atmosphérique. Ces calculs sont effectués soit en mode direct, soit en mode rétro-transport (20; 21) pour des aspects de surveillance de l'environnement ou pour l'inversion des sources de certains constituants. LMDZ a notamment été impliqué en amont de la définition des réseaux de détection des radioéléments atmosphériques dans le cadre du traité d'interdiction totale des essais nucléaires (16) et aujourd'hui dans l'inversion des sources et puits de CO_2 (35). Pour tous ces aspects également, le réalisme du modèle atmosphérique, aussi bien en terme de transport à grande échelle que de représentation des processus turbulents, convectifs et nuageux, est un enjeu majeur.

Paramétrisation des processus atmosphériques et analyse d'observations

Le dernier exercice CMIP (réalisation de projections du changement climatique pour alimenter le rapport du Giec) a montré l'arrivée à maturité d'un certain nombre d'outils de modélisation du climat, mais a souligné en même temps les progrès qui restent à faire dans la représentation des processus atmosphériques au travers de paramétrisations. La stratégie qui a émergé des programmes internationaux comme Eucrem, Eurocs ou GCSS constitue aujourd'hui un des socles du développement et de l'évaluation des paramétrisations. Il s'agit de réaliser, sur des domaines ayant la taille typique d'une maille horizontale de modèle de climat, des simulations

tridimensionnelles avec des modèles non hydrostatiques dits des grands tourbillons (Les avec des mailles d'une centaine de mètres de côté) ou avec des modèles explicites de nuages (CRM). Ces simulations, souvent validées par rapport à des campagnes de terrain, sont ensuite utilisées pour développer et évaluer les paramétrisations dans des **versions unidimensionnelles des modèles de climat**. Cette approche a été largement utilisée pour le développement du nouveau jeu de paramétrisations physiques de LMDZ (38; 39; 11).

L'évaluation par confrontation à des observations de routine effectuées sur des observatoires atmosphériques, comme le Sirta, ou issues de longues campagnes de mesures est complémentaire aux études de cas. Elle permet de tester les modèles sur des échelles synoptiques, saisonnières, interannuelles voire climatique à faible coût numérique. Pour cette évaluation, le modèle LMDZ est utilisé en **configuration zoomée**, avec des mailles de quelques dizaines de kilomètres sur la région concernée, **et "guidée"** (nudged en anglais) par les analyses produites par les grands centres de prévision météorologique (6). Cette évaluation sur sites permet d'identifier les insuffisances des paramétrisations physiques, d'orienter les développements futurs et de tester de nouvelles approches.

Les nouvelles générations de satellites, comme Calipso ou Cloudsat sur la constellation A-train, permettent également une évaluation plus fine de la représentation des processus nuageux dans les modèles. Plutôt que de comparer les nuages du modèle à une climatologie établie par inversion des données satellites, on préfère effectuer des comparaisons au travers d'un **simulateur d'observations spatiales** (4). Le modèle LMDZ intègre notamment le simulateur Cosp co-développé par le LMD dans le cadre du projet CFMIP, qui inclut des simulateurs d'observable pour Calipso, Parasol, CloudSat, MISR et ISCCP. Les comparaisons peuvent être effectuées soit sur des situations observées, à partir de simulations guidées, soit de façon statistique pour des simulations climatiques (sans rappel vers la situation synoptique observée). On essaie alors en général de "stratifier" les observations en fonction du régime dynamique concerné (2).

Enfin, l'introduction récente de la représentation des processus de fractionnement isotopique pour les différents isotopes stables de l'eau dans LMDZ ouvre de nouvelles perspectives pour l'évaluation de la représentation des processus physiques : convection, microphysique nuageuse, processus de surface (40)

Modélisation du climat des planètes telluriques

Les années 90 ont connu une explosion de l'exploration spatiale des planètes telluriques. L'Agence Spatiale Européenne (Esa) a largement contribué à cet effort, avec en particulier les sondes Huygens (descendue dans l'atmosphère de Titan), Mars-Express et Vénus-Express. Des versions de LMDZ dédiées aux différentes atmosphères du système solaire ont été développées en lien avec ces missions. Plus récemment, la recherche de planètes extra-solaires a impulsé une nouvelle orientation à nos recherches.

Pour **Mars**, un véritable modèle du "système Mars" a été développé. Ce modèle représente les grands cycles climatiques martiens : cycle des poussières (soulèvement et transport de poussière minérale capable de fortement chauffer l'atmosphère), cycle du CO_2 (condensation saisonnière de l'atmosphère dans les calottes polaires et des nuages de glaces carboniques) et cycle de l'eau (en quantité très faible, mais capable de former nuages et givre). Sur cette base il a été possible de construire le premier modèle chimie-transport sur Mars – devenu la référence pour interpréter les observations d'ozone, de péroxyde d'hydrogène et de méthane (28) – , de simuler les cycles des isotopes de l'eau et des dérivés radioactifs du radon, et enfin d'étendre LMDZ jusqu'à la thermosphère et la ionosphère en incluant l'ensemble des processus physiques actifs dans ces

couches atmosphériques. Les sorties de cet ensemble sont appliquées au traitement d'observations et à la préparation de missions spatiales par plus d'une centaine d'équipes dans 18 pays via la **"Mars Climate Database"**, un outil basé sur les sorties de LMDZ et développé avec le soutien du Cnes et de l'Esa. Par ailleurs, le modèle est utilisé pour simuler des variations climatiques générées par les oscillations des paramètres orbitaux ou de la composition atmosphérique. Ces travaux de paléoclimatologie ont contribué à expliquer plusieurs énigmes de la géologie martienne : glaciers rocheux, sédiments glaciaires polaires, ravines creusées par l'eau liquide, rivières et lacs sur Mars il y a 4 milliards d'années (10).

Pour **Titan**, les études ont principalement porté sur les couplages entre la dynamique atmosphérique et la microphysique des brumes qui jouent un rôle très significatif dans le contrôle du climat (36; 37). L'interaction entre la dynamique atmosphérique et la photochimie a également été étudiée, en lien avec l'observation spatiale des distributions de composés minoritaires comme l'éthane (C_2H_6), l'acétylène (C_2H_2) ou le cyanure d'hydrogène (HCN) (17; 8). Ces composés interviennent également dans le transfert radiatif et dans la production de brumes (24; 26; 27). On achèvera ainsi la prise en compte des couplages gérant ce système atmosphérique.

Pour **Vénus**, une version spécifique de LMDZ a été développée pour accompagner la mission Vénus-Express. Ce modèle a permis de s'attaquer au phénomène de super-rotation également rencontré sur Titan (25). Comme sur Titan, il est nécessaire de développer la microphysique des nuages, ici constitués d'acide sulfurique concentré et couvrant l'ensemble de la planète, ainsi que la photochimie. Ces développements sont en cours, essentiellement au Latmos.

Nos travaux sont à présent étendus aux **planètes extrasolaires** telluriques qui commencent à être observées. Nous développons une version de LMDZ de plus en plus "universelle" (capable de simuler le climat pour une planète de taille, composition atmosphérique, orbite et étoile quelconques) afin d'explorer les régimes climatiques possibles sur ces planètes et de mieux comprendre les conditions nécessaires pour qu'une planète soit propice à l'eau liquide et à la vie.

Nous mentionnerons aussi le développement de versions de LMDZ pour **Pluton** (objectif de la mission Nasa New Horizons) et **Triton** (satellite de Neptune survolé par Voyager en 1989), dotés de fines atmosphères d'azote et de méthane en équilibre solide-gaz avec des calottes polaires, et à l'origine de brumes, nuages, dépôts éoliens, etc.

Le développement parallèle de ces différentes versions permet de mener des études croisées sur les divers régimes de circulation. Dans ce cadre des versions utilisant une physique simplifiée sont également développées pour isoler et mieux cerner les processus fondamentaux.

2.4 LMDZ : un outil en évolution

Les enjeux concernant les paramétrisations physiques

Comme on l'a dit plus haut, le réalisme des modèles globaux, aussi bien dans leur capacité à représenter le climat (pluie, vent, températures) que le couplage avec les autres composantes (océan, chimie, aérosols, végétation) repose pour une bonne part sur les performances des paramétrisations physiques. Il faut, par exemple, régler très finement la distribution saisonnière et spatiale des flux radiatifs au sommet de l'atmosphère ; il faut améliorer la représentation de la distribution des pluies à toutes les échelles de temps et d'espace ; il faut, pour le couplage avec les surfaces, très bien simuler les flux en surface, ce qui nécessite (entre autres) de bonnes paramétrisations de la couche limite et des nuages ; le couplage avec la chimie repose pour sa part beaucoup sur la représentation du transport atmosphérique, aussi bien par les vents de grande échelle que par les paramétrisations physiques ; les inversions des puits et sources de CO_2

sont en particulier 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.

Les paramétrisations, approximations souvent grossières des processus réels, ont été un peu délaissées pendant deux décennies dans le développement des modèles climatiques au profit de la complexification et du couplage avec les autres composantes du système Terre. Le fait de passer aujourd'hui un cap en terme de réalisme de ces paramétrisations est certainement le grand chantier du moment pour LMDZ. Des recherches actives en ce sens ont été entreprises depuis une dizaine d'années au LMD, en collaboration avec le MIT et l'équipe Moana du CNRM, autour 1) de la représentation des ondes de gravité et de l'effet de l'orographie sous maille (33), 2) de la paramétrisation de la couche limite, au travers du développement d'une paramétrisation en flux de masse des structures cohérentes de la couche limite convective (15; 38), 3) de la représentation de la convection profonde nuageuse, en améliorant le schéma développé à l'origine par Kerry Emanuel (9) et en y adjoignant une paramétrisation des courants de densité ou poches froides créés sous les orages par évaporation des pluies convectives (11). Récemment une version de cette physique incluant les isotopes stables de l'eau a également été développée.

L'enjeu principal pour les années à venir va être de tester, d'améliorer et d'asseoir ce nouveau jeu de paramétrisations, à la fois dans son côté climatique mais également dans son couplage avec tout le reste du système. Au niveau national, le projet Dephy (pour Développement et Evaluation PHYsique des modèles atmosphériques) a été proposé aux programmes Eve et Idao de l'Insu afin de coordonner les efforts de la communauté autour de ces aspects de développements physiques.

Calcul haute performance et nouveaux cœurs dynamiques

Le modèle du LMD a toujours "tourné" sur les machines des centres de calcul nationaux. A ce titre, l'écriture informatique a longtemps privilégié la vectorisation. Un travail très important a été réalisé ces dernières années pour paralléliser le modèle LMDZ. La parallélisation repose pour l'essentiel sur un découpage de domaine en utilisant les logiciels MPI et OpenMP.

La parallélisation de la partie dynamique du code pose un problème particulier du fait du resserrement des points en longitude près du pôle dans un système longitude-latitude, qui oblige à appliquer des filtrages en longitude. Pour arriver à paralléliser le modèle LMDZ dans son état actuel, il a donc fallu adopter une stratégie compliquée, dans laquelle le découpage varie en fonction des sous-parties concernées. Cette parallélisation a permis d'obtenir de très bonnes performances, même avec des grilles relativement grossières. Elle va être largement exploitée en 2010 pour réaliser les simulations pour le Giec. Cette parallélisation permet également d'effectuer des simulations sur les machines parallèles en utilisant quelques centaines à quelques milliers de processeurs pour des grilles avec des mailles de quelques dizaines de km de côté.

Mais pour utiliser pleinement les capacités de machines massivement parallèles, il sera nécessaire de repenser les cœurs dynamiques. Un groupe de travail a été mis en place autour de ces questions en collaboration entre le LMD, le Laboratoire d'analyse et de mathématiques appliquées de l'Université Paris-Est (Marne-la-Vallée) et l'IIT Dehli. Le développement d'un cœur dynamique en volumes finis sur grille icosaédrique (maillage de la sphère par un polyèdre régulier de 20 triangles) est en cours dans le cadre de cette collaboration, avec une thèse à la clef, reprenant des idées développées dans les années 70.

3 Le Soere LMDZ

Au fil des années, le modèle de circulation générale LMDZ s'est complexifié aussi bien dans ses versions terrestre que planétaires. Le développement du modèle intégré de climat de l'IPSL, en particulier, fait peser un poids très important sur le degré de réalisme de la composante atmosphérique qui est au cœur du système. Cette exigence de réalisme nécessite des phases importantes de développement, d'ajustement et d'évaluation du modèle. Afin de répondre aux différents enjeux présentés dans la section précédente, que ce soit pour l'analyse des mécanismes climatiques et processus atmosphériques, pour l'amélioration et l'évaluation du modèle ou pour des études plus théoriques, différentes configurations de LMDZ ont été développées au fil du temps (cf. annexe A pour une description détaillée). LMDZ peut aujourd'hui être utilisé :

- avec une **grille régulière** (longitude-latitude) **ou zoomée** sur une région du globe ;
- en **mode climatique** (simulations longues sans rappel vers les observations) **ou guidé** par les analyses fournies par les centres opérationnels de prévision du temps ;
- **seul** ou **couplé** à tout ou partie des autres composantes du système climatique (végétation, chimie, océan) ;
- en mode **branché** ou **débranché pour le transport des traceurs** ; dans le mode débranché, les champs de transport (flux de masse à grande échelle, flux de masse convectif, coefficients de mélange) sont pré calculés par LMDZ ; ce mode débranché peut être **utilisé en mode rétro-transport** pour l'inversion des concentrations atmosphériques ;
- avec une **dynamique 3D complète**, une dynamique **2D latitude-altitude**, (surtout utilisée sur les planètes), une dynamique **2D longitude-latitude** correspondant aux équations des eaux peu profondes, ou en mode **uni-colonne** pour travailler notamment sur le développement des paramétrisations physiques et l'étude des processus nuageux ;
- avec **différents jeux de paramétrisations physiques**, pour la Terre, Mars, Titan et Vénus ainsi qu'une physique idéalisée à 20 paramètres pour explorer de façon générique les régimes de circulation atmosphérique, toutes couplées au même cœur dynamique.
- avec ou sans modélisation des **isotopes stables de l'eau**.
- avec ou sans **simulateurs satellitaires**.

L'enjeu de la labélisation est d'**asseoir dans la durée le développement et la distribution de cet outil de modélisation** avec un double objectif : 1) la réalisation de **simulations de production** dans le cadre par exemple des projections du changement climatique ou de l'exploration du système solaire et 2), au travers de **configurations variées et plus légères**, une recherche de pointe sur **les processus atmosphériques, les régimes de circulation des atmosphères, ou encore les mécanismes impliqués dans les variations du climat**.

La multitude et la diversité des demandes autour du modèle posent des questions importantes en termes d'information/coordination. Les réponses apportées sur l'information au travers du site web ou de LMDZinfo (lettre interne des utilisateurs de LMDZ à parution semestrielle) sont aujourd'hui encore insuffisantes. Dans un système aussi complexe, un souci permanent de l'équipe est de développer une dynamique de travail collective en évitant les travers de la technocratisation si chère à notre mode de fonctionnement moderne.

Nous décrivons ci-dessous les engagements de services envers la communauté, ceux que nous sommes d'ores et déjà en mesure d'assurer et ceux que nous souhaitons offrir en plus dans le cadre d'un service labélisé, en identifiant les engagements spécifiques des communautés Océan-Atmosphère et Astrophysique ; nous abordons aussi la question du maintien de la compatibilité de LMDZ avec le modèle couplé de l'IPSL, du contrôle qualité et enfin la gouvernance sur laquelle

reposera l'ensemble du service proposé.

3.1 Engagement de distribution du code source

• **Mise à disposition du code source** des versions terrestre et planétaires de LMDZ sur site web, distribué sous licence CeCILL.

• **Distribution d'un outil d'installation automatique sur PC-Linux**. Ce script d'installation inclut le rapatriement et l'installation de tous les logiciels nécessaires à la compilation et au lancement du modèle. Une simulation test est lancée automatiquement par ce script.

• **Portabilité** sur PC Linux et sur les machines de production des grands centres nationaux de calcul. Cette partie inclut l'optimisation, y compris sur les machines parallèles (jusqu'à quelques centaines de processeurs).

• **Documentation du code** mise à disposition au travers du site web LMDZ.

3.2 Tâches de service spécifiques Océan Atmosphère

• **Distribution de configurations évaluées du modèle climatique**. L'équipe s'engage à distribuer tous les 1 à 3 ans, à l'occasion d'évolutions majeures du modèle ou de grands rendez-vous comme les exercices du Giec, des versions dites de production ou *prod*. Ces versions donneront lieu à une phase importante de réglage et d'évaluation, aussi bien sur le plan du réalisme climatique que des aspects logiciels (compatibilité avec les autres composantes, efficacité numérique, portage, etc). Les résultats des évaluations seront mis à disposition sur le web et donneront si possible lieu à des publications (cf. la rubrique sur le contrôle qualité ci-dessous). Un suivi sera assuré sur 4 ans pour les versions de production.

• **Distribution de versions intermédiaires**. L'équipe s'engage à éditer régulièrement, tous les 2 à 6 mois, des versions intermédiaires qui auront subi un certain nombre de tests et de réglages. Ces versions *trunk* seront destinées notamment à être testées dans le cadre du modèle intégré de climat de l'IPSL en préparation des versions de production.

• **Distribution de cas tests pour les différentes configurations** du modèle terrestre : 1) configuration climatique en grille régulière, 2) configuration zoomée et guidée par les analyses météorologiques, 3) modèle uni colonne. Dans tous les cas, il s'agit de scripts permettant de rapatrier et lancer automatiquement un cas test d'une de ces configurations, et incluant un minimum de post-traitement permettant de contrôler que la configuration a bien bien installée.

• **Compatibilité avec le modèle du système Terre de l'IPSL**. L'équipe s'engage à garantir cette compatibilité tant pour le code que pour les outils de lancement et de post-traitement. Cet engagement porte notamment sur l'inclusion d'une composante traceurs dans les versions successives du modèle et sur les couplages avec les surfaces continentales et océaniques.

3.3 Tâches de service spécifiques Astrophysique

• **Mise à disposition de la "Mars Climate Database"**, outil climatologique de référence bâti sur des sorties de LMDZ. Les logiciels de post-traitement de la version "pro" distribuée librement sur DVD-ROM sont mis à jour tous les 6 à 12 mois (actuellement version 4.3). Les simulations et les fichiers de données sont renouvelés tous les 3 à 4 ans (version 5.0 prévue en 2010-2011), après chaque stabilisation d'une nouvelle version de LMDZ-Mars et calibration d'une simulation de référence. La version en ligne interactive suit ces évolutions au même rythme.

• **Mise à disposition de la base de données Titan**. A l'instar de Mars, la base de données Titan sera régulièrement mise à jour, complétée, et améliorée.

• **Appui aux missions spatiales** En complément des bases de données, les versions planétaires de LMDZ (et les modèles méso-échelles associés) sont intensivement utilisées pour effectuer les études indispensables à la préparation des missions spatiales européennes et internationales. Parmi les applications : la descente et la pose des atterrisseurs (Mars, Vénus), l'aéro-freinage et l'aéro-capture en orbite (Mars, Vénus), le vol de ballons (Vénus, Mars, Titan), l'environnement en surface, etc. Par ailleurs, les modèles offrent une plateforme de référence pour le traitement, l'exploitation et l'assimilation des données atmosphériques planétaires.

3.4 Par rapport à l'existant

La description ci-dessus montre le service vers lequel l'équipe qui développe LMDZ tend depuis plusieurs années. Les parties concernant la gestion des versions successives du code, la distribution des sources, l'installation automatique (incluant des cas tests), le portage sur les plateformes de calcul et la compatibilité avec le modèle du système Terre sont opérationnelles. Des configurations climatiques validées sont régulièrement définies et évaluées.

Un besoin persiste sur la documentation et la diffusion de l'information autour de ces versions de référence. De façon similaire, un effort doit être fait en ce qui concerne la mise à disposition d'outils autour de LMDZ, notamment pour le post-traitement. Enfin, des progrès doivent être réalisés en matière à la fois de communication, de documentation, de formation, de contrôle qualité et d'aide aux utilisateurs.

3.5 Articulation avec le modèle de l'IPSL et les outils du pôle de modélisation

Un des enjeux importants du label demandé est de garantir dans le temps la compatibilité de LMDZ avec les autres composantes du modèle couplé de l'IPSL (IPSLCM) et avec son infrastructure logicielle développée par l'IGCM (IPSL Global Climate Modeling Group ou pôle de modélisation du climat IPSL).

Compatibilité avec les autres composantes du modèle couplé : LMDZ est directement couplé au modèle Orchidee pour le sol, la végétation, l'hydrologie et le cycle du carbone, et aux modèles Inca et Reprobus pour la représentation de la chimie et des aérosols dans la troposphère et la stratosphère. LMDZ est couplé via le coupleur Oasis du Cerfacs à la plateforme Nemo, pendant de LMDZ du côté océanique, qui comprend le modèle de circulation océanique, le modèle de glace de mer Lim et le modèle de biogéochimie marine Pisces.

Compatibilité avec l'infrastructure IGCM : cette infrastructure, prévue pour accueillir tout un ensemble de modèles, a des fonctionalités très larges. Elle permet de récupérer le code LMDZ, seul ou couplé à d'autres composantes du système, de lancer des chaînes de simulations sur les centres de calcul, de produire automatiquement des visualisations et post-traitements.

Pour assurer cette compatibilité, nous nous appuierons sur le travail effectué par l'équipe de développement du modèle de système Terre de l'IPSL en identifiant plus spécifiquement des **responsables de la version système Terre de LMDZ :**

- couplage avec l'océan via Oasis : Arnaud Caubel
- couplage avec Orchidee : Martial Mancip
- couplage avec Inca : Anne Cozic
- couplage avec Reprobus : Marion Marchand
- lien avec la distribution documentée des résultats : Sébastien Denvil

– compatibilité avec la plate-forme couplée : Marie-Alice Foujols

Distribution du modèle couplé : Le modèle couplé est distribué avec l'ensemble des outils IGCM qui permettent de réaliser une première expérience en couplé incluant quelques post-traitements systématiques. Le pôle modélisation de l'IPSL, de son côté, fait évoluer le modèle couplé en incluant au fur et à mesure les versions les plus à jour des composantes et en les validant techniquement et scientifiquement.

3.6 Contrôle qualité

Des efforts importants ont été réalisés ces dernières années pour améliorer les aspects de contrôle qualité. Cette question requiert de plus en plus d'efforts au fur et à mesure que les potentialités du modèle s'élargissent. Les modifications du code sont quasiment quotidiennes, que ce soit pour des corrections de petites erreurs ou pour des apports plus fondamentaux. Il est donc essentiel d'avoir une stratégie bien définie. On peut distinguer deux grands aspects dans ce contrôle, le premier relatif au contenu physique du modèle et le second aux aspects logiciels.

Aspects relatifs au contenu physique et au réalisme climatique

Comme on l'a dit précédemment, le réglage et l'évaluation du modèle requièrent de plus en plus de travail au fur et à mesure que le modèle se complexifie et que les exigences sur l'utilisation climatique des résultats s'affine. Un travail de base est fait sur le contrôle d'atlas de référence, montrant des moyennes de variables fondamentales (cartes et moyennes zonales à différentes saisons et analyses en régimes dynamiques). D'autres outils portant sur la variabilité ou la comparaison aux observations satellites récentes sont également disponibles. Un objectif important pour l'année 2010 sera d'automatiser ces outils additionnels et de les distribuer plus largement. On compte également automatiser une série de validation sur des cas d'études 1D qui permettent de focaliser le regard sur des processus spécifiques.

Un enjeu important est de croiser sur une même configuration l'ensemble des regards provenant des différentes composantes couplées à LMDZ (océan, chimie, surface) ou d'études focalisées sur la variabilité des moyennes latitudes, les régions polaires, les moussons, etc. La compétence ne peut être que distribuée entre les différents utilisateurs. La mise en place des représentants utilisateurs a pour vocation notamment d'identifier et d'impliquer davantage un certain nombre d'experts de différents aspects autour du contrôle qualité des versions successives de LMDZ. Cet aspect de contrôle qualité du réalisme du modèle sera notamment traité à l'occasion des réunions annuelles des utilisateurs.

Le renforcement de l'équipe autour du développement, de l'évaluation et du contrôle qualité de la partie physique, en lien avec les représentants des utilisateurs, est une priorité pour l'équipe. Le poste prioritaire de physicien adjoint demandé dans le cadre de cette demande de labélisation contribuera à ce renforcement.

Aspects logiciels

Il faut garantir au fil du temps la **portabilité** sur un ensemble de machines de production et sur des PC-Linux, avec des compilateurs du domaine public (g95 ou gfortran), à la fois en version séquentielle et en version parallèle MPI/OpenMP. Ce contrôle de la portabilité passe par la réalisation et l'automatisation de tests lancés régulièrement sur un ensemble de machines et de configurations. Cette partie du contrôle qualité s'est largement renforcée récemment.

Il faut garantir également la **compatibilité avec les outils et modèles du pôle modélisation** (cf. ci-dessus)

On veille enfin à garantir l'**efficacité numérique** des codes. Des développements nouveaux ou des corrections peuvent facilement détériorer les performances du modèle et un travail régulier est nécessaire pour garantir dans le temps de bonnes performances, à la fois sur les machines scalaires, vectorielles et parallèles. Certains développements ou l'arrivée de nouvelles plateformes de calcul nécessitent des phases plus spécifiques d'optimisation des codes.

Stratégie et organisation

Ces aspects de contrôle qualité sont directement sous la responsabilité de l'équipe de développement et sont un des sujets importants de discussion des POInts Hebdomadaires LMDZ (Poihl).

Des outils automatiques sont petit à petit développés et activés à intervalles réguliers pour tester ces différents aspects. Certains de ces outils sont appliqués avec une fréquence hebdomadaire sur les versions de développement dites *dev* du code.

Les versions intermédiaires ou *trunk*, définies tous les 2 à 6 mois, et destinées notamment à être utilisées dans les versions de développement du modèle couplé de l'IPSL, subissent un certain nombre de tests de bases : 1) équilibrage du modèle et validation au premier ordre sur la base d'atlas standard, 2) portabilité sur les plateformes de production principales avec contrôle de l'efficacité numérique ainsi que sur PC linux et 3) compatibilité avec les autres composantes du pôle modélisation.

Enfin les versions *prod*, définies tous les 1 à 3 ans, sont l'objet d'un contrôle beaucoup plus approfondi en termes de réalisme physique. Ces diagnostics ainsi que les fichiers de configuration associés sont mis à disposition sur une page web spécifique. Si possible, ce travail s'accompagne de publications dans des journaux scientifiques. Les différences avec les versions de production précédentes sont documentées. L'optimisation du code est davantage poussée que dans les versions *trunk*. Enfin un suivi est assuré sur ces versions pendant 4 ans : aide aux utilisateurs, corrections de bugs, portabilité éventuelle sur de nouvelles plateformes, etc.

3.7 Gouvernance

Organisation

L'organisation autour du modèle LMDZ repose sur différents groupes et un comité. Se reporter en annexe B pour les listes des membres de chacune de ces entités.

Le comité de pilotage est le conseil exécutif de coordination du projet LMDZ dans son ensemble. Il se réunit typiquement tous les 3 à 6 mois. Il est responsable de LMDZ et rend des comptes tous les ans devant le conseil scientifique.

Le conseil scientifique (en cours de constitution) est composé d'une petite dizaine de personnes représentant les principaux laboratoires partenaires. Ce conseil se réunit au moins une fois par an, à l'occasion des journées annuelles des utilisateurs afin de définir, valider ou infléchir les orientations du développement du modèle.

Les représentants utilisateurs sont chargés, sur les différents domaines d'application, de faire le lien entre les utilisateurs et l'équipe de développement ; ils seront également chargés de réaliser (ou de faire remonter) une évaluation spécifique des performances des versions de production de LMDZ pour leur domaine d'application. Le but est de s'appuyer sur ces représentants pour mettre en place un véritable **contrôle qualité** en termes de "réalisme" du modèle.

L'équipe de développement s'appuie sur le fonctionnement du "Point Hebdomadaire LMDZ" qui réunit le noyau dur des développeurs du modèle pour un suivi régulier et aussi de la "Boîte à Outil LMDZ" qui prend en charge la distribution, le portage du code, les pré et post traitements. Cette équipe va se structurer, avec la nomination d'un correspondant par branche de développement (dynamique, nouvelle physique, parallélisme ...). Elle est complétée par les responsables des développements de la version système Terre de LMDZ.

Une réunion utilisateurs annuelle, ouverte à tous, se tiendra sur deux jours à partir de 2010, avec les objectifs suivants :

- faire le point sur les utilisations de LMDZ et les résultats scientifiques majeurs obtenus ;
- échanger sur le degré de réalisme des dernières versions du modèle ;
- présenter les évolutions récentes et discuter des évolutions futures.

Stratégie de communication

La communication autour de LMDZ passe actuellement par :

- le site web http ://lmdz.lmd.jussieu.fr/ : ce site dédié à LMDZ permet d'en consulter la documentation, les applications et projets, la bibliographie, les évolutions ; il comporte aussi un espace collaboratif "Groupes de travail" et un forum de discussions ;
- la liste de diffusion lmdz@lmd.jussieu.fr : les 125 membres de cette liste reçoivent une lettre mensuelle concernant l'actualité et les évolutions de LMDZ ; les archives de cette liste sont disponibles sur : http ://mailhost.lmd .jussieu.fr/pipermail/lmdz/ ;
- le journal LMDZinfo : ce journal semestriel (publication interrompue un certain temps suite au décès de Soumia Jamili) fait le point sur l'évolution du modèle et ses applications récentes ; il est envoyé à environ 150 destinataires sous forme papier, il est aussi consultable sur le site web de LMDZ : http ://lmdz.lmd.jussieu.fr/applications/lmdz-infos .

Programme de formation

Une formation par an est proposée en mars, au moment du début des stages de Master2. Cette formation a été initiée en 2009. Elle comprend une part de formation sur la modélisation numérique et sur les paramétrisations physiques du modèle LMDZ. Elle comprend également un volet de prise en main des outils informatiques : installation, compilation, exécution, post-traitement. Cette formation nécessite au moins 2 à 3 journées. Elle s'adressait jusque là plutôt à des étudiants des laboratoires de l'IPSL et se déroulait donc en plusieurs journées séparées. En fonction de la demande, des formations plus compactes sur quelques jours consécutifs à une semaine seront mises en place.

Lien avec les autres services d'observation

Le modèle LMDZ n'a pas fait l'objet de proposition groupée de systèmes d'observations dans le cadre de la récente réflexion de restructuration des services. LMDZ est cependant étroitement associé à d'autres services déjà labélisés ou proposés pour la labélisation.

D'abord, LMDZ est le pendant du côté atmosphérique de la plateforme Nemo qui comprend le modèle de circulation océanique, le modèle de glace de mer Lim et le modèle de biogéochimie marine Pisces et qui bénéficie d'un label. Ces deux modèles, qui intègrent chacun une représentation des processus chimiques et biophysiques, sont les deux piliers du modèle intégré de climat de l'IPSL. Ces deux modèles contribuent notamment à la réalisation des projections du changement climatique dont la distribution des résultats fait l'objet d'une demande de Soere : Prodiguer.

Enfin, une forte synergie s'est développée ces dernières années entre LMDZ et le Site instrumenté de l'IPSL, le Sirta, pour l'étude des processus atmosphériques, l'amélioration des paramétrisations et l'évaluation des modèles.

A Description et architecture du modèle LMDZ

Le coeur dynamique du modèle

Le LMD développe et utilise depuis les années 70 un modèle de circulation générale atmosphérique (44) ; il s'appuie sur un cœur 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 fondé sur une récriture 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. La discrétisation horizontale privilégie la conservation de l'enstrophie (43; 42). Des opérateurs de dissipation sont introduits pour représenter l'interaction entre échelles horizontales explicites et échelles sous-mailles, et notamment le pompage d'enstrophie 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 inclut un jeu de paramétrisations physiques. On peut distinguer schématiquement trois grands blocs dans ces paramétrisations : 1) d'abord le transfert radiatif, moteur premier de la circulation ; il s'agit souvent d'une partie très coûteuse du modèle, et très spécifique de l'atmosphère considérée (même si un code un peu plus générique est en cours de développement pour la partie planétaire) ; 2) la représentation des ondes de gravités (orographiques ou non) et de l'impact du relief sous-maille sur la circulation ; et 3) enfin le bloc couche limite/convection/nuages. Dans cette troisième partie, la représentation des processus dynamiques peut être relativement commune entre les différentes planètes, mais certaines parties sont beaucoup plus spécifiques. C'est le cas notamment pour la physique des nuages terrestres, pour la condensation/sublimation du CO_2 sur Mars, ou pour la physique des brumes orangées qui couvrent la surface de Titan.

Pour les planètes, des jeux de paramétrisations physiques ont été développés successivement pour Mars, Titan, Vénus et maintenant Triton et Pluton. Des jeux de paramétrisations physiques plus génériques ou idéalisés ont également été développés ou sont prévus, pour s'attaquer à des questions générales de dynamique atmosphérique ou à des questions liées aux conditions d'habitabilité dans les atmosphères autour de planètes extra-solaires.

Pour le jeu des paramétrisations physiques du modèle terrestre, comme on l'a dit plus haut, un cap important est en train d'être franchi. Par rapport à la version LMDZ4 (18) utilisée pour le dernier exercice du Giec (3; 34), la version LMDZ5 permettra d'utiliser une physique presque entièrement nouvelle, basée sur un peu plus d'une décennie de recherche dans l'équipe qui développe LMDZ au LMD, recherches menées pour une bonne part en collaboration avec l'équipe GMME/Moana du CNRM.

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 (45; 14).

Les différentes configurations de LMDZ

Les configurations climatiques classiques s'appuyaient jusqu'à présent sur une grille horizontale régulière de 96x71 points en longitude/latitude avec 19 niveaux verticaux. Pour le prochain exercice d'inter comparaison CMIP5 (base du prochain rapport Giec), la configuration utilisée sera de 96x95 et 144x142 points en longitude/latitude et de 39 niveaux verticaux. Le modèle peut être utilisé seul en prescrivant les températures de surface des océans (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 (23).

Les configurations stratosphériques dans lesquelles on accroît le nombre de niveaux au dessus de la tropopause. Cette version nécessite également une paramétrisation adhoc des ondes de gravité (30; 32). Cette version stratosphérique est en train de devenir une version de base pour les simulations climatiques.

Les configurations chimiques : LMDZ a été couplé à un modèle d'aérosols par Olivier Boucher au Loa, au modèle "Interaction with Chemistry and Aerosols" (Inca) par Didier Hauglustaine (12), Yves Balkanski et Michael Schulz au LSCE et enfin au modèle Reprobus développé par Franck Lefèvre et utilisé au Latmos pour l'étude de la chimie stratosphérique (22).

La configuration isotopique : les isotopes stables de l'eau (oxygène 18, deutérium et bientôt oxygène 17) ont été introduits dans LMDZ par Camille Risi et Sandrine Bony, ainsi que dans le module d'hydrologie continentale de Orchidee (40). Cette version est utilisée pour apporter des évaluations indépendantes et supplémentaires au modèle, et pour interpréter des données de campagne, des données paléoclimatiques, ou des observations spatiales.

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 vingtaine de kilomètres pour des études de processus.

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 (5), pour la validation des configurations chimiques et pour des calculs de dispersion ou rétro-dispersion atmosphérique.

Les configurations uni-colonne : utilisées pour le développement et la validation des paramétrisations en comparaison avec les résultats de simulations à nuages résolus (38; 11), en particulier dans le cadre du projet "physique commune Arpege/LMDZ", qui a donné naissance au projet Dephy proposé récemment aux comités Eve et Idao.

Les configurations transport débranché et rétro-dispersion : le transport d'espèces traces peut être effectué en ligne (14), en même temps que la simulation météorologique, ou en mode débranché, en relisant des archives météorologiques d'une simulation préalable (20; 21). 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 (7; 16; 35).

Organisation informatique

Modularité

L'organisation du modèle LMDZ est calquée sur la distinction entre partie "dynamique" – la seule partie où soient pris en compte des échanges horizontaux entre des mailles du modèle – et la partie "physique" qui peut être vue comme une juxtaposition de "colonnes" d'atmosphère.

Cette spécificité de la partie physique est exploitée en ce sens que le codage de toutes les paramétrisations est fait avec un indice interne muet qui représente la grille horizontale. Cette organisation est illustrée sur la Fig. 1.

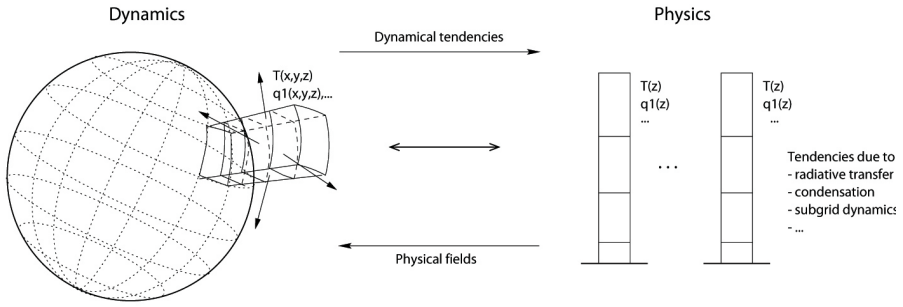


FIG. 1 – *Séparation entre les parties dynamique 3D et physique 1D du code LMDZ.*

Cette écriture se prête à la fois à la vectorisation et à la parallélisation des codes. Cette approche permet également de disposer de façon transparente d'une version unidimensionnelle du modèle de circulation. Pour disposer d'un modèle unidimensionnel, il suffit d'écrire un programme dans lequel on initialise des profils météorologiques sur un point particulier du globe et dans lequel on appelle ensuite en boucle le moniteur physique.

Autre atout important, cette conception modulaire permet de gérer en parallèle des "physiques" différentes interfacées avec le même code dynamique. Ce point est essentiel pour les études menées au LMD sur Mars, sur Titan et sur Vénus. Enfin, on peut noter qu'il existe aussi une version bidimensionnelle, latitude-altitude, du noyau dynamique du modèle qui a été notamment abondamment utilisée sur Titan.

Un autre aspect de la modularité du modèle est de pouvoir contrôler la majorité de ses paramètres de configuration à l'aide de fichiers texte extérieurs (appelés communément "fichiers .def" et s'apparentant à des namelists Fortran).

Le code

Cette modularité se retrouve dans la structure du code distribué. Les fichiers sources, en Fortran, sont regroupés dans des répertoires distincts reflétant ce découpage modulaire du code et offrant la possibilité d'y inclure différentes physiques ou dynamiques. Le code source du modèle est structuré en répertoires regroupant :

- les procédures d'entrées-sorties ;
- les procédures décrivant la grille et le maillage utilisés ;
- les procédures de la partie dynamique du modèle dans sa configuration séquentielle ;
- les versions parallèles des mêmes procédures ;
- les procédures décrivant le filtre utilisé pour les régions polaires ;

– les procédures de la partie physique du modèle, chaque “physique” (terrestre, planétaire) se voyant dotée d’un répertoire distinct.

Noyau dynamique nouveau ou physique supplémentaire se verraient attribuer, de même, leur propre répertoire.

D’un point de vue pratique, la gestion de l’historique du code est assurée par un serveur Subversion/SVN (http ://svn.lmd.jussieu.fr/LMDZ) et le suivi des erreurs et demandes d’amélioration par un serveur Trac (http ://lmdz.lmd.jussieu.fr/trac).

L’installation et la compilation du modèle s’effectuent soit par un script d’installation “standalone” développé par l’équipe soit par l’infrastructure “Modipsl” développée à l’IPSL. Les deux techniques sont testées régulièrement et maintenues.

Une fois rapatrié (soit directement du dépôt SVN, soit à l’aide d’un des scripts d’installation disponibles), le code LMDZ fournit :

– des scripts dédiés à la compilation du modèle (l’un utilisant les outils standards linux, l’autre un outil développé par le Hadley Centre pour la gestion des dépendances),
– des exemples de fichiers de configuration du modèle, contenant les paramètres le pilotant,
– les fichiers sources du modèle.

La séparation dynamique/physique se retrouve au niveau des entrées/sorties du modèle, chaque partie ayant ses propres fichiers de conditions initiales et de sorties.

Language et calcul haute performance

Le programme est écrit en Fortran. Il a pour ambition d’être conforme à la norme Fortran 95 et nous nous assurons que le code puisse être compilé par les principaux compilateurs à notre disposition (des outils “open source” aux compilateurs disponibles sur les calculateurs nationaux). Une norme à respecter pour l’écriture de nouveaux codes à inclure au modèle a été rédigée et elle est appliquée progressivement au code source existant.

Comme indiqué plus haut, un travail très important a été réalisé ces dernières années pour paralléliser le modèle LMDZ. Cette parallélisation repose sur les deux standards MPI et OpenMP et la stratégie utilisée est différente entre la partie dynamique et la partie physique du code, débouchant sur un code capable de “tourner” en MPI seul, OpenMP seul ou en mode mixte MPI-OpenMP. A noter que le modèle peut déterminer de façon automatique le découpage en domaines le plus approprié, garantissant le meilleur équilibre de charge possible compte tenu du maillage et du nombre de processeurs utilisés.

Interfaces

Compte tenu de la place du modèle LMDZ au sein du modèle intégré de l’IPSL, un soin particulier a été apporté à l’élaboration des interfaces entre celui-ci et les modèles décrivant les autres composantes du système climatique. L’interface entre l’atmosphère et les surfaces (océan, surfaces continentales, glace de mer, glaciers) a ainsi été récrite récemment pour la rendre plus modulaire et de maintenance plus aisée. Les communications entre modèle “atmosphère” et modèles de surface (océanique, continentale) peuvent ainsi se faire directement (par inclusion de codes dans LMDZ) ou par le biais du coupleur Oasis développé par le Cerfacs. L’interface avec les codes chimiques se fait par appel direct aux codes Inca ou Reprobus au sein même du code LMDZ.

Enfin, les entrées-sorties du modèle LMDZ utilisent la bibliothèque IOIPSL développée et maintenue par l’IPSL et permettant la création de fichiers de données au format Netcdf.

B Organisation

On donne ici la composition des différentes structures mises en place pour la gouvernance et le développement de LMDZ.

Responsabilités

Composition du comité de pilotage

Nom	Domaine de responsabilité
Frédéric Hourdin	Développement
Laurent Fairhead	Outils
Jean-Louis Dufresne	Applications climatiques
François Forget	Applications en planétologie
Véronique Fabart	Coordination, communication

Composition du conseil scientifique

Nom	Laboratoire
Pascale Braconnot	LSCE
Claude Frankignoul	Locean
Gerhard Krinner	LGGE
Katia Laval	LMD
Franck Lefèvre	Latmos
Bernard Legras	LMD
Gilles Ramstein	LSCE
Pascal Rannou	GSMA
(à solliciter)	CNRM/Météo-France

Représentants utilisateurs par groupes d'application

Nom	Laboratoire	Thématique
Philippe Heinrich	LSCE	Surveillance et analyse de la radioactivité atmosphérique
Philippe Bousquet	LSCE	Transport et inversion des sources de CO2
Christophe Genthon	LGGE	Régions polaires
Frédérique Cheruy	LMD	France/Europe
Laurent Li	LMD	Chine/Amérique du sud, versions zoomées
Jean-Philippe Duvel	LMD	Inde et variabilité tropicale
Francis Codron	LMD	Dynamique des moyennes latitudes
Serge Janicot	Locean	Mousson africaine
Sandrine Bony	LMD	Sensibilité climatique et Modélisation des isotopes de l'eau
Yves Balkanski	LSCE	Aérosols
Sophie Szopa	LSCE	Chimie troposphérique
François Lott	LMD	Dynamique stratosphérique et effet du relief
Masa Kagayema	LSCE	Paléoclimat
Slimane Bekki	Latmos	Chimie stratosphérique et Transport grande échelle
Nathalie de Noblet	LSCE	Usage des sols
Patricia Cadule	IPSL	Cycle du carbone
François Forget	LMD	Mars et autres planètes hors Mars, Vénus, Titan
Sébastien Lebonnois	LMD	Vénus
Pascal Rannou	GSMA	Titan

Une photographie de l'équipe de développement en 2009

Equipe des développeurs de LMDZ

Nom	Laboratoire	Statut	%	Spécialité
Laurent Fairhead	LMD	Ingénieur	60	Couplages, développements informatiques
Ionela Musat	LMD	Ingénieur	50	Validation, diagnostics
Jean-Yves Grandpeix	LMD	Chercheur	30	Paramétrisations convection, poches froides
Sandrine Bony	LMD	Chercheur	15	Paramétrisations convection, nuages, diagnostics
Abderrahmane Idelkadi	LMD	Ingénieur	80	Support informatique
Jean-Louis Dufresne	LMD	Chercheur	30	Couplages, scénarios, diagnostics
Frédéric Hourdin	LMD	Chercheur	50	Coordination, couche limite, transport, réglage
Lionel Guez	LMD	Ingénieur	50	Développements divers
Laurent Li	LMD	Chercheur	15	Paramétrisations couche-limite/nuages
François Lott	LMD	Chercheur	10	Effet du relief, stratosphère
Marie-Pierre Lefebvre	Météo France	Ingénieur	50	Physique commune Arpege/LMDZ - Dephy
François Forget	LMD	Chercheur	50	Mars/Exo-planètes
Ehouarn Millour	LMD	Ingénieur	65	Mars
Sébastien Lebonnois	LMD	Chercheur	70	Titan/Vénus
Francis Codron	LMD	Chercheur	15	Dynamique, configurations guidées
Frédérique Chéruy	LMD	Chercheur	50	Diagnostic versions zoomée, zoomée-guidée
Josefine Ghattas	IPSL	Ingénieur	100	Transport de traceurs, couplages chimiques
Yann Meurdesoif	LSCE	Ingénieur	50	Parallélisation

Les pourcentages correspondent au pourcentage d'activité consacré aux développements du modèle au sens large (développement de code, évaluation, distribution, aide aux utilisateurs) au cours de la dernière année.

Responsables des développements de la version système Terre de LMDZ

Nom	Laboratoire	Statut	Spécialité
Arnaud Caubel	LSCE	Ingénieur	Couplage avec l'océan via Oasis
Anne Cozic	LSCE	Ingénieur	Couplage avec Inca
Sébastien Denvil	IPSL	Ingénieur	Lien avec la distribution documentée des résultats
Marie-Alice Foujols	IPSL	Ingénieur	Compatibilité avec la plate-forme couplée
Martial Mancip	IPSL	Ingénieur	Couplage avec Orchidee
Marion Marchand	Latmos	Chercheur	Couplage avec Reprobus

Les thésards, post-docs, stagiaires et CDD ne figurent pas dans ces listes ; on en dénombre en moyenne une quinzaine par an.

C CV du responsable du Soere LMDZ

Frédéric Hourdin

1966 : born in Paris, France
1989-1992 : PhD, University Paris 7, Astrophysique et techniques spatiales.
1994 : Permanent position at CNRS
2005 : "habilitation à diriger des recherches"
2009 : "directeur scientific adjoint" at LMD

Expertise :

- Study and numerical modeling of the general circulation of planetary atmosphere (the Earth, Mars, Titan, Venus).
- Numerical modeling of the Earth climate and climate change.
- Numerical modeling of the advection of atmospheric trace species and inversion of atmospheric transport.
- Parameterization of the atmospheric boundary layer.
- West African climate.
- In charge of the development LMDZ global climate model.

Publications available at : http ://www.lmd.jussieu.fr/ hourdin/publis.html
5 most significative publications in the 5 last years :

1. Hourdin, F., O. Talagrand, and A. Idelkadi, 2006b, Eulerian backtracking of atmospheric tracers. II : Numerical aspects, Q. J. R. Meteorol. Soc., 132, 585-603, 2006b.
2. 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, 2006a, The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, Climate Dynamics, 27, 787-813, 2006a.
3. Rannou, P., F. Montmessin, F. Hourdin, and S. Lebonnois, 2006, The Latitudinal Distribution of Clouds on Titan, Science, 311, 201-205, 2006.
4. Rio, C., et F. Hourdin, A thermal plume model for the convective boundary layer : Representation of cumulus clouds, J. of Atmosph. Sci., 65, 407-425, 2008.
5. Rio, C., F. Hourdin, J.-Y. Grandpeix, and J.-P. Lafore, 2009, Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land,Geophys. Res. Lett., 36, 7809-+ 2009

D Bibliographie

Références

[1] H. Bellenger, J.-P. Duvel, M. Lengaigne, and P. Levan. Impact of organized intraseasonal convective perturbations on the tropical circulation. *Geophysical Research Letters*, 36, AUG 25 2009.

[2] S. Bony, J.-L. Dufresne, H. Le Treut, J.-J. Mo rcrette, and C. Senior. On dynamic and thermodynamic components of cloud change s. *Climate Dynamics*, 22 :71–86, 2004.

[3] P. Braconnot, F. Hourdin, S. Bony, J.-L. Dufresne, J.-Y. Grandpeix, and O. Marti. 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, 2007.

[4] H. Chepfer, S. Bony, D. Winker, M. Chiriaco, J. Dufresne, and G. Sèze. Use of CALIPSO lidar observations to evaluate the cloudiness simulated by a climate model. *Journal of Geophysical Research*, 35 :15704–+, Aug. 2008.

[5] O. Coindreau, F. Hourdin, M. Haeffelin, A. Mathieu, and C. Rio. Assessment of physical parameterizations using a global climate model with stretchable grid and nudging. *Monthly Weather Review*, 135(4) :1474–1489, APR 2007.

[6] O. Coindreau, F. Hourdin, M. Haeffelin, A. Mathieu, and C. Rio. A global climate model with strechable grid and nudging : a tool for assesment of physical parametrizations. *Mon. Wea. Rev.*, 135 :1474–1489, 2007.

[7] E. Cosme, F. Hourdin, C. Genthon, and P. Martinerie. Origin of dimethylsulfide, non-sea-salt sulfate, and methanesulfonic acid in eastern Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 110(D9) :3302–+, 2005.

[8] A. Crespin, S. Lebonnois, S. Vinatier, B. Bézard, A. Coustenis, N. A. Teanby, R. K. Achterberg, P. Rannou, and F. Hourdin. Diagnostics of Titan's stratospheric dynamics using Cassini/CIRS data and the 2-dimensional IPSL circulation model. *Icarus*, 197 :556–571, Oct. 2008.

[9] K. A. Emanuel. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 48 :2313–2335, 1991.

[10] F. Forget, R. M. Haberle, F. Montmessin, B. Levrard, and J. W. Head. Formation of Glaciers on Mars by Atmospheric Precipitation at High Obliquity. *Science*, 311 :368–371, 2006.

[11] J.-Y. Grandpeix and J.-P. Lafore. A density current parameterization coupled with Emanuel's convection scheme. part I : the models. *J. Atmos. Sci.*, 2010. in press.

[12] D. A. Hauglustaine, F. Hourdin, L. Jourdain, M.-A. Filiberti, S. Walters, J.-F. Lamarque, and E. A. Holland. Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model : Description and background tropospheric chemistry evaluation. *J. Geophys. Res.*, 109 :4314–4357, Feb. 2004.

[13] P. Heinrich and X. Blanchard. Simulation of Atmospheric Circulation over Tahiti and of Local Effects on the Transport of 210Pb. *Monthly Weather Review*, 137 :1863–1880, 2009.

[14] F. Hourdin and A. Armengaud. The use of finite-volume methods for atmospheric advection of trace species. part i : Test of vairious formulations in a general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, 127 :822–837, 1999.

[15] F. Hourdin, F. Couvreux, and L. Menut. Parameterisation of the dry convective boundary layer based on a mass flux representation of thermals. *J. Atmos. Sci.*, 59 :1105–1123, 2002.

[16] F. Hourdin and J.-P. Issartel. Sub-surface nuclear tests monitoring through the CTBT xenon network. *Geophys. Res. Lett.*, 27 :2245–2248, 2000.

[17] F. Hourdin, S. Lebonnois, D. Luz, and P. Rannou. Titan's stratospheric composition driven by condensation and dynamics. *J. Geophys. Res.*, 109 :12005–+, 2004.

[18] F. Hourdin, 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. The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics*, 27 :787–813, 2006.

[19] F. Hourdin, I. Musat, F. Guichard, P. M. Ruti, F. Favot, M.-A. Filiberti, M. Pham, J.-Y. Grandpeix, J. Polcher, P. Marquet, A. Boone, J.-P. Lafore, J.-L. Redelsperger, A. Dell'aquilla, T. Losada Doval, A. K. Traore, and H. Gallée. BAMS, in press, 2010.

[20] F. Hourdin and O. Talagrand. Eulerian backtracking of atmospheric tracers. I : Adjoint derivation and parametrization of subgrid-scale transport. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132 :567–583, 2006.

[21] F. Hourdin, O. Talagrand, and A. Idelkadi. Eulerian backtracking of atmospheric tracers. II : Numerical aspects. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132 :585–603, Jan. 2006.

[22] L. Jourdain, S. Bekki, F. Lott, and F. Lefèvre. The coupled chemistry-climate model LMDz-REPROBUS : description and evaluation of a transient simulation of the period 1980-1999. *Annales Geophysicae*, 26 :1391–1413, June 2008.

[23] G. Krinner, 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.* submitted.

[24] S. Lebonnois, E. Bakes, and C. P. McKay. Transition from gaseous compounds to aerosols in Titan's atmosphere. *Icarus*, 159 :505–517, 2002.

[25] S. Lebonnois, F. Hourdin, V. Eymet, A. Crespin, R. Fournier, and F. Forget. Superrotation of Venus' atmosphere analysed with a full General Circulation Model. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 2010. accepted.

[26] S. Lebonnois, F. Hourdin, P. Rannou, D. Luz, and D. Toublanc. Impact of the seasonal variations of composition on the temperature field of Titan's stratosphere. *Icarus*, 163 :164–174, 2003.

[27] S. Lebonnois, P. Rannou, and F. Hourdin. The coupling of winds, aerosols and chemistry in Titan's atmosphere. *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, 367 :665–682, Feb. 2009.

[28] F. Lefèvre and F. Forget. Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics. *Nature*, 460 :720–723, Aug. 2009.

[29] L. Z. X. Li. Atmospheric GCM response to an idealized anomaly of the Mediterranean sea surface temperature. *Climate Dynamics*, 27(5) :543–552, OCT 2006.

[30] F. Lott, L. Fairhead, F. Hourdin, and P. Levan. The stratospheric version of LMDz : dynamical climatologies, arctic oscillation, and impact on the surface climate. *Clim. Dyn.*, 25 :851–868, 2005.

[31] F. Lott, L. Goudard, and A. Martin. Links between the mountain torque and the Arctic Oscillation in the Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDz), general circulation model. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 110 :22107–+, Nov. 2005.

[32] F. Lott, J. Kuttippurath, and F. Vial. A Climatology of the Gravest Waves in the Equatorial Lower and Middle Stratosphere : Method and Results for the ERA-40 Re-Analysis and the LMDz GCM. *Journal of Atmospheric Sciences*, 66 :1327–+, 2009.

[33] F. Lott and M. Miller. A new sub-grid scale orographic drag parametrization : its formulation and testing. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 123 :101–128, 1997.

[34] O. Marti, P. Braconnot, J. Dufresne, J. Bellier, R. Benshila, S. Bony, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Codron, N. de Noblet, S. Denvil, L. Fairhead, T. Fichefet, M. Foujols, P. Friedlingstein, H. Goosse, J. Grandpeix, E. Guilyardi, F. Hourdin, A. Idelkadi, M. Kageyama, G. Krinner, C. Lévy, G. Madec, J. Mignot, I. Musat, D. Swingedouw, and C. Talandier. Key features of the IPSL ocean atmosphere model and its sensitivity to atmospheric resolution. *Climate Dynamics*, 34 :1–26, Jan. 2010.

[35] P. Peylin, P. J. Rayner, P. Bousquet, C. Carouge, F. Hourdin, P. Heinrich, P. Ciais, and A. Contributors. Daily CO2 flux estimates over Europe from continuous atmospheric measurements : 1, inverse methodology. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 5 :1647–1678, 2005.

[36] P. Rannou, F. Hourdin, and C. P. McKay. A wind origin for Titan's haze structure. *Nature*, 418 :853–856, 2002.

[37] P. Rannou, F. Montmessin, F. Hourdin, and S. Lebonnois. The Latitudinal Distribution of Clouds on Titan. *Science*, 311 :201–205, 2006.

[38] C. Rio and F. Hourdin. A thermal plume model for the convective boundary layer : Representation of cumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 65 :407–425, 2008.

[39] C. Rio, F. Hourdin, J. Grandpeix, and J. Lafore. Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land. *Geophys. Res. Lett.*, 36 :7809–+, Apr. 2009.

[40] C. Risi, S. Bony, and F. Vimeux. Influence of convective processes on the isotopic composition (δ^{18}O and δD) of precipitation and water vapor in the tropics : 2. Physical interpretation of the amount effect. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113 :19306–+, Oct. 2008.

[41] C. Risi, S. Bony, F. Vimeux, and J. Jouzel. Water stable isotopes in the LMDZ4 General Circulation Model : model evaluation for present day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records. *J. Geophys. Res.*, 2010. in press.

[42] R. Sadourny. Compressible model flows on the sphere. *J. Atmos. Sci.*, 32 :2103–2110, 1975.

[43] R. Sadourny. The dynamics of finite-difference models of the shallow-water equations. *J. Atmos. Sci.*, 32 :680–689, 1975.

[44] R. Sadourny and K. Laval. January and July performance of the LMD general circulation model. In A. Berger and C. Nicolis, editors, *New perspectives in Climate Modeling*, Elsevier, pages 173–197. Amsterdam, 1984.

[45] B. Van Leer. Towards the ultimate conservative difference scheme : IV. a new approach to numerical convection. *J. Computational Phys.*, 23 :276–299, 1977.

E Acronymes

Selon une règle classique en typographie, les acronymes sont écrits entièrement en majuscule s'ils sont habituellement dits comme une suite de lettres (ex. C. N. R. S.) et avec des minuscules quand ils se prononcent comme un mot (ex. Cnes).

Amma	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AMIP	Atmospheric Model Intercomparison Project
AOPP	Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, Oxford university
AR4	Fourth Assessment Report (IPCC)
AR5	Fifth Assessment Report (IPCC)
Arpege	Action de Recherche à PEtite et Grande Echelle, modèle de Météo France
Calipso	Cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations
CEA-Dam	Commissariat à l'Energie Atomique - Direction des Applications Militaires
CeCILL	Cea Cnrs Inria Logiciel Libre
Ceras	Centre d'Etudes et de Recherche par l'amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
Cerfacs	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
Cesoa	Cycle atmosphérique du soufre en relation avec le climat aux moyennes et hautes latitudes Sud
CFMIP	Cloud Feedback Model Intercomparison Project
Chimere	Modèle eulérien de chimie-transport
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
Cima	Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, Buenos Aires
CloudSat	satellite d'observation des nuages - Nasa
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse
Cnes	Centre National d'Etudes Spatiales
Cosp	CFMIP Observations Simulator Package
Cordex	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment - projet AR5
CRC	Centre de Recherches de Climatologie
CRM	Cloud Resolving Model
CTBT	Comprehensive Test Ban Treaty (= Tice)
Dephy	Développement et Evaluation PHYsique des modèles atmosphériques
DMN	Direction de la Météorologie Nationale Du Sénégal
ENEA	Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'EnergiA e lo sviluppo economico sostenibile, Rome
Enso	El Niño Southern Oscillation
Esa	European Space Agency
ESM	Earth System Model
Estec	European Space Research and Technology Centre - Esa
Eucrem	EUropean Cloud REsolving Model project
Eurocs	EURopean project On Cloud Systems
Eve	Evolution et Variabilité du climat à l'Echelle globale - projet Lefe
FST	Fluides Stratifiés et tournants
IFM-Geomar	Leibniz Institute of Marine Sciences, Kiel
GHG	GreenHouse Gas
GCM	Global Circulation Model
GCSS	Gewex Cloud System Study

Giec	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
Gewex	Global Energy and Water cycle EXperiment
GMME/Moana	Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle/Modélisation de l'Atmosphère Nuageuse et Analyse
GSMA	Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique, Reims
Hapex	Hydrology-Atmosphere Pilot EXperiment in the Sahel
IAA	International Academy of Astronautics
Idao	Interactions et Dynamique de l'Atmosphère et de l'Océan - projet Lefe
IGBP	International Geosphere Biosphere Programme
IGCM	IPSL Global Climate Modeling Group
IIT	Indian Institute of Technology, Delhi
Inca	INteractions with Chemistry and Aerosols
Insu	Institut National des Sciences de l'Univers
IOIPSL	Interface utilisateurs pour les entrées/sorties du modèle de l'IPSL
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPG	Institut de Physique du Globe de Paris
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
IPSLCM	IPSL Climate Model
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project - Nasa
ISS	(Cassini's high resolution) Imaging Science camera System
KLME	Key Laboratory of MEteorological disaster, Nanjing
LASG	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Latmos	Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales - IPSL
Lefe	Les Enveloppes Fluides et l'Environnement - programme Insu
Les	Large Eddy Simulation
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Grenoble
Lim	Modèle de glace de mer
LMD	Laboratoire de Méréorologie Dynamique - IPSL
LMDZ	Modèle de circulation générale atmosphérique développé au LMD, Z pour Zoom
LMDZ-Sacs	LMDZ - Simplified Atmospheric Chemistry System
LOAICC	Lab. Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Change, Qingdao
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
Loa	Laboratoire d'Optique Atmosphérique
Locean	Laboratoire d'OCEANographie et du climat - IPSL
LPAOSF	Lab. de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang, Dakar
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement - IPSL
Megha-Tropiques	Microsatellite pour l'étude du cycle de l'eau dans les régions tropicales - CNES
MCD	Mars Climate Database
MeteoSat	Satellite géostationnaire : observation globale du continent africain et européen - Esa
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (satellite) - Nasa
MJO	Madden-Julian Oscillation
MODIPSL	Interface utilisateurs d'accès aux MODèles de l'IPSL
MPI	Message Passing Interface
Nasa	National Aeronautics and Space Administration
Nemo	Nucleus for European Modelling of the Ocean
NetCDF	NETwork Common Data Format

Oasis	Coupleur entre les modèles d'atmosphère et de surface développé par le Cerfacs
OpenMP	OPEN MultiProcessing
Orca-Lim	Modèle couplé d'océan et de glace de mer
Orchidee	Modèle de surfaces continentales
Parasol	Microsatellite pour l'étude de l'impact radiatif des nuages et des aérosols sur le climat - CNES
Pisces	Modèle de biogéochimie marine
PMIP	Paleoclimatic model intercomparison project
PNEDC	Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat - Insu
Prodiguer	Projet de diffusion internationale des données du Giec AR5
Reprobus	Modèle de chimie-transport
Roms	Regional Ocean Modeling System
Sirta	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique
Soere	Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche et l'Environnement
Sop-Amma	Special Observing Periods - Amma
SST	Sea Surface Temperature
SVN	Software Version Number
Tice	Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (= CTBT)
Toga-Coare	Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment
TRP Esa	Technology Research Program - European Space Agency
TTL	Tropical Tropopause Layer
UCM	Universidad Complutense Madrid
UTLS	Upper Troposphere and Lower Stratosphere
VIMS	Visible and Infrared Mapping Spectrometer
Virtis	Visual IR spectral and Thermal Spectrometer
VMC	Vulnérabilité Milieux et Climat - programme ANR
Vorcore	Campagne de mesures de la couche d'ozone
WCRP	World Climate Research Programme