

## Demande DARI 2013 – projet 0292

Modélisation du climat : cycle de l'eau et variabilité climatique

### Description du projet de recherche

Camille Risi et Jean-Yves Grandpeix  
crlmd@lmd.jussieu.fr, 01 44 27 52 62

L.M.D. - Octobre 2012

**Demande sur l'IDRIS : 714 000 heures CPU sur Ada, 176 Tera-octets sur gaya**  
De plus, à l'Idris :

- Pour nos travaux sur Ulam, l'accès à gaya depuis à la fois en lecture et en écriture est essentiel.
- Nco et cdo sont des outils nécessaires sur Ada puisque nous en aurons besoin pour les post-traitements.
- Nous aurons besoin de 300 jobs de post-traitements mono lançables simultanément.

**Demande sur Curie : 162 000 heures CPU sur noeuds fin, 40 500 heures CPU noeuds larges et 47 To de stockage**

Le demande sur Curie est assez modeste, car nous ne sommes pas encore très familiers avec cette machine. Si nous arrivons à nous familiariser, alors nous demanderont beaucoup plus d'heures en mai.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Présentation générale</b>	<b>2</b>
2.1	Evolution et validation du modèle LMDZ . . . . .	3
2.2	Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat . . . . .	3
2.3	Etude des interactions océan-atmosphère lors des événements ENSO . . . . .	4
2.4	Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE . . . . .	4
2.5	Isotopes de l'eau . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Estimation des ressources consommées par les diverses configurations</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Demande détaillée</b>	<b>5</b>
4.1	Evolution et validation de la version de référence de LMDZ . . . . .	5
4.1.1	Amélioration du modèle . . . . .	5
4.1.2	L'approche Transpose AMIP pour l'évaluation de modèles climatiques . . . . .	6
4.2	Etude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat . . . . .	7
4.2.1	Sensibilité de la simulation des oscillations intrasaisonniers tropicales au schéma de convection profonde . . . . .	7
4.2.2	Montagnes, ondes de gravité et stratosphère . . . . .	8

4.2.3	Microphysique des nuages de glace et des traînées de condensation des avions . . . . .	8
4.3	Impact des ondes longues planétaires et des anomalies interannuelles de vents sur la variabilité des températures en Atlantique tropical . . . . .	9
4.4	Evolution, validation et utilisation du modèle ORCHIDEE . . . . .	10
4.4.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE . . . . .	10
4.4.2	Couplage LMDZ-ORCHIDEE . . . . .	10
4.4.3	Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique . . . . .	11
4.4.4	Sensibilité de l'évaporation potentielle au changement climatique . . . . .	11
4.5	Isotopes de l'eau . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Méthode</b>	<b>14</b>
5.1	Le modèle LMDZ . . . . .	14
5.2	Le modèle ORCHIDEE . . . . .	14

## 1 Résumé

Le projet est centré sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation général LMDZ et du modèle de surface continentale ORCHIDEE, les deux modèles pouvant chacun être utilisé seul (offline) ou couplé entre eux.

L'essentiel des moyens de calcul demandé implique des simulations utilisant LMDZ. Ce projet est ainsi très lié :

- au projet 1167, consacré au développement et à l'utilisation de la version transport de LMDZ pour des études de chimie atmosphérique et de transport de traceurs passifs,
- au projet 239, qui utilise LMDZ comme élément du modèle couplé Océan-Atmosphère-Végétation.

Ce projet comporte 5 thèmes :

1. Evolution et validation du modèle LMDZ
2. Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat
3. Etude des interactions océan-atmosphère lors des événements ENSO
4. Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE
5. Isotopes de l'eau

Les demandes en temps de calcul et en stockage par thèmes sont détaillées dans le tableau 1.

## 2 Présentation générale

Le présent projet porte principalement sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale (MCG) atmosphérique LMDZ couplé ou non au modèle de surface et de végétation ORCHIDEE. Ce MCG est un outil d'étude de l'atmosphère et du climat pour plusieurs équipes en France et à l'étranger ; il constitue la composante atmosphérique des modèles couplés IPSL-CM5A et IPSL-CM5B qui ont été utilisés pour les simulations de changement climatique du programme international CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), dont l'analyse alimentera le prochain rapport de l'IPCC (voir projet 239).

Le modèle de surface continentale ORCHIDEE est d'autre part utilisé seul (offline) ou couplé à LMDZ pour la compréhension des processus hydrologiques continentaux et des couplages sol-atmosphère. Enfin, les processus océaniques liés sont étudiés à l'aide du modèle de circulation générale océanique NEMO du LOCEAN.

Le projet porte sur 5 grands thèmes.

thème	calcul sur Ada (k heures CPU)	stockage sur Gaya (To)	calcul sur Curie noeuds fins	calcul sur Curie noeuds larges	stockage sur Curie (To)
Evolution et validation du modèle LMDZ	218	57	150	37.5	40
Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat	85	14	0	0	0
Etude des interactions océan-atmosphère lors des évènements ENSO	1.2	1	0	0	0
Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE	310.5	68	0	0	0
Isotopes de l'eau	101	38	12	3	7
<b>Total</b>	<b>714</b>	<b>176</b>	<b>162</b>	<b>40.5</b>	<b>47</b>

TABLE 1 – Tableau résumant les demandes de temps de calcul et de stockage sur l’IDRIS et sur Curie.

## 2.1 Evolution et validation du modèle LMDZ

Ces dernières années a été développée au LMD la « nouvelle physique » du modèle LMDZ, comprenant des paramétrisations des thermiques de couche limite et des courants de densité ainsi qu’une nouvelle façon de représenter le couplage entre ces composantes et la convection profondes. Cette « nouvelle physique » a permis un progrès certain dans la représentation de certains aspects climatiques (tels que le cycle diurne de la convection profonde continentale ou la variabilité convective). Toutefois, des biais persistent. En 2013, les travaux de développement tenteront de réduire ces biais, en proposant des améliorations de la représentation de la convection profonde, des nuages et des proches froides (section 4.1.1).

De manière complémentaire, l’approche transpose AMIP, selon laquelle les modèles sont évalués en mode prévision du temps, est une approche novatrice pour essayer de mieux comprendre l’origine des biais (section 4.1.2).

## 2.2 Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat

Le modèle LMDZ est utilisé pour mieux comprendre certains processus atmosphériques et mieux prévoir leur évolution en changement climatique. En retour, les études de processus permettent aussi des améliorations du modèle LMDZ. Ce thème est ainsi très complémentaire du thème 1.

**Sensibilité de la simulation des oscillations intrasaisonnières tropicales à la fermeture du schéma de convection profonde** Parmi les grand biais des modèles de climat qui persistent depuis plusieurs décennies, on peut citer les difficultés persistantes des modèles (y compris LMDZ « nouvelle physique ») à simuler les oscillations intrasaisonnières tropicales. Nous essaierons de mieux comprendre la sensibilité de ces oscillations à la représentation de la convection dans LMDZ (section 4.2.1).

**Montagnes, ondes de gravité et stratosphère** De nombreux efforts ont été réalisés ces dernières années pour améliorer la représentation de l'oscillation quasi-biennale par LMDZ. Ces efforts se poursuivront cette année et l'impact de ces améliorations sera évalué (section 4.2.2).

**Microphysique des nuages de glace et des traînées de condensation des avions** Les traînées de condensation formées par les avions peuvent persister pendant des heures, voire se transformer en cirrus. Nous cherchons à modéliser cet effet et à en quantifier le forçage radiatif (section 4.2.3).

## 2.3 Etude des interactions océan-atmosphère lors des événements ENSO

Le rôle des interactions océan-atmosphère dans les événements ENSO sera étudié (section 4.3).

## 2.4 Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE

Le couplage des processus de surface continentale avec les processus atmosphériques constitue un élément clef pour aboutir à une bonne simulation climatique. Ainsi, nous proposons de valider et d'améliorer la représentation de l'hydrologie de surface dans le modèle ORCHIDEE (section 4.4.1), et de valider son couplage avec LMDZ (section 4.4.2). Le modèle de surface continental ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est aussi un outil adapté pour les études visant à :

- mieux comprendre les processus hydrologiques sur la surface continentale dans le présent, par exemple les interactions humidité du sol-climat (section 4.4.2),
- mieux comprendre et prévoir l'évolution future du cycle hydrologiques et des ressources en eau. C'est le but des travaux proposés sur l'évolution des débits amazoniens (section 4.4.3) et de l'évaporation potentielle (section 4.4.4).

## 2.5 Isotopes de l'eau

La composition isotopique de l'eau (rapport des concentrations en molécules lourdes  $HDO$  ou  $H_2^{18}O$  et légères  $H_2^{16}O$ ) est affectée par les changements de phase lors du cycle de l'eau. Depuis 2006, nous essayons d'explorer la possibilité d'utiliser les mesures de compositions isotopiques de l'eau pour mieux évaluer les modèles de climat en général, et LMDZ et ORCHIDEE en particulier. Cette année, ces efforts seront continués avec comme cible particulière la représentation de la convection et des interactions surface continentales-atmosphère dans LMDZ (section 4.5).

## 3 Estimation des ressources consommées par les diverses configurations

L'essentiel des temps calcul de ce projet est dû aux simulations réalisées avec le modèle atmosphérique LMDZ5 couplé au modèle de sol et de végétation ORCHIDEE ; une autre partie des simulations, moins importante, portera sur des configurations de type "aqua-planètes", pour lesquels aucun modèle de sol n'est nécessaire.

Le modèle complet (appelée aussi LMDZOR) sera en général utilisé dans une des quatre configurations correspondant aux deux "physiques" du modèle et à deux résolutions spatiales : une "basse résolution" (96x95x39, c'est-à-dire 96 points en longitude, 95 points en latitude et 39 niveaux sur la verticale), laquelle constituait jusqu'à présent la résolution la plus utilisée, et une "résolution moyenne" (144x142x39) qui tend à s'imposer dès lors que le modèle utilisé est au point.

Les ressources consommées par les simulations réalisées avec ces diverses configurations sont approximativement :

**Basse résolution** 96x95x39 : 100 h CPU/an sur Ada avec l'ancienne physique et 200 h CPU/an sur Ada avec la nouvelle physique.

**Résolution moyenne** 144x142x39 : 200 h CPU/an sur Ada avec l'ancienne physique et 600 h CPU/an sur Ada avec la nouvelle physique.

**Isotopique très basse résolution** La version isotopique d'LMDZ prend environ 3 fois plus de temps que la version standard. Pour ne pas trop consommer d'heures, on utilise donc souvent la très basse résolution : 96x71x19 : 120h CPU/an avec l'ancienne physique. Stockage : 70 Go/an

**Isotopique zoom** 144x142x19 250h CPU/an avec l'ancienne physique. Stockage : 250 Go/an Sur Ada, on doit rajouter 25 % pour le post-traitement des résultats, qui se fera dorénavant sur Ada.

Pour estimer les temps sur Curie noeuds fin, nous prenons les mêmes temps que sur Ada et multiplions par un facteur 1.3. Nous ajoutons 25% de temps de calcul sur Curie noeuds fins pour le post-traitement.

## 4 Demande détaillée

### 4.1 Evolution et validation de la version de référence de LMDZ

#### 4.1.1 Amélioration du modèle

Sandrine Bony, Jean-Louis Dufresne, Laurent Fairhead, Marie-Alice Foujols, Jean-Yves Grandpeix, Frédéric Hourdin, Abderrahmane Idelkadi, Ionela Musat, Jan Polcher, Catherine Rio, Camille Risi

*Demande : 200 000 heures CPU Ada, 40 To sur Gaya.*

*150 000 heures CPU Curie noeuds fins, 37 500 heures CPU sur Curie noeuds larges, 40 To sur Curie*

Les simulations de l'exercice CMIP5 sont pour l'essentiel maintenant terminées. Elles ont montré que le modèle LMDZ5 avec les derniers développements que nous appelons "Nouvelle Physique", s'ils constituaient un progrès certain sur certains aspects climatiques (tels que le cycle diurne de la convection profonde continentale ou la variabilité convective), comportait encore des défauts importants :

1. une couverture nuageuse basse insuffisante ;
2. une convection profonde active trop souvent ;
3. une convection profonde dont l'intensité maximale est trop faible ;
4. des tempêtes en points de grille toujours présentes pour les résolutions fines.

Les développements vont porter essentiellement sur l'amélioration de ce différents points.

Les évolutions prévues pour cette année comprennent :

1. La prise en compte de la thermodynamique de la glace dans le schéma de convection profonde et dans le schéma de condensation de grande échelle. Ceci n'avait pas été fait auparavant parce que le surcroît d'intensité des descentes précipitantes induit par la fusion de la glace inhibait trop fortement la convection. En présence du schéma de poches froides, au contraire, ce renforcement des descentes précipitantes amène un renforcement des poches et donc de la convection profonde. On s'attend à ce que cette prise en compte de la thermodynamique de la glace modifie favorablement le comportement du modèle dans les situations de forte humidité de la couche limite, situations pendant lesquelles l'intensité des descentes froides est due essentiellement à la fusion de la glace. Ceci devrait améliorer le point (3) ci-dessus.

2. Le développement et la mise en oeuvre du nouveau déclenchement stochastique. Des essais préliminaires ont montré que ce nouveau déclenchement permettait enfin de simuler une convection plus intermittente (amélioration du point (2)). Cette évolution prometteuse devra s'accompagner d'une modification de la fermeture convective. Il s'agit là d'un monde complètement nouveau qui va demander de nombreux tâtonnements.
3. La poursuite de la mise en oeuvre des nouveaux développements des modèles de nuages, en particulier concernant la représentation des stratocumulus (amélioration du point (1)).
4. Le traitement séparé des couches limite situées à l'intérieur et à l'extérieur des poches froides. On s'attend à ce que ce développement permette aux cumulus de couche limite de coexister avec la convection profonde en se développant en dehors des poches froides. Ceci devrait aussi mener à une amélioration du point (1).

Pour la mise au point de ces développements, nous utiliserons d'abord la version de basse résolution 96x95x39, pour laquelle le temps CPU sur la machine Ada est estimé à 120 heures par an (y compris le post-traitement). En estimant que la mise au point va demander l'équivalent de 10 simulations de 30 ans, on obtient *36 000 heures CPU* pour la mise au point.

Ensuite, pour le réglage de la version finale, nous allons utiliser la version à moyenne résolution 144x142x39, pour laquelle la consommation de ressource est de *8000 heures CPU par an (y compris le post-traitement)*. L'expérience montre qu'il faut de l'ordre de *10 simulations de 30 ans* pour un tel réglage, soit une consommation de *240 000 heures*.

Au total, l'évolution de LMDZ va consommer environ *300 000 heures CPU*, que nous comptons partager en *200 000 heures sur Ada et 100 000 heures sur Curie*.

Pour ce qui concerne l'élimination des tempêtes en point de grille, nous comptons utiliser une version aqua-planète (c'est à dire une version simplifiée où les continents sont absents) avec des résolutions variées comme 96x95x39, 144x142x39, 280x280x39 et 768x768x39. Il s'agit de simulations brèves (1 mois) que nous comptons réaliser sur la machine Curie. La consommation est dimensionnée par la résolution la plus fine, soit environ *85000 heures CPU par an*. On peut estimer que *50 000 heures CPU* est une bonne approximation des ressources nécessaires.

#### 4.1.2 L'approche Transpose AMIP pour l'évaluation de modèles climatiques

Solange Fermepin (thèse), Sandrine Bony

*Demande : 17700 heures CPU sur Ada, 17 To sur gaya*

L'approche Transpose AMIP (également connu comme "utiliser un GCM Climatique en mode prévision du temps") permet d'étudier les biais systematiques des modèles qui se développent rapidement. Nous avons testé cette approche sur avril 2009. Nous souhaitons à présent étendre les analyses pour des autres mois de l'année. En particulier, nous voudrions faire plusieurs mois pour tenir compte de la saisonnalité de nos résultats. Nous prévoyons donc de répéter des simulations pour les mois de juillet, octobre et janvier. Nous testerons aussi d'autres heures d'initialisation.

*Temps de calcul : (1280 heures par simulation) × (4 mois) = 5120 heures sur Ada  
+ test d'autres heures d'initialisation : 1920 heures*

Nous souhaitons aussi :

- Répéter les simulations Transpose-AMIP II mais avec le modèle IPSL-CM5B-LR, ce qui inclu le nouveau package physique du modèle atmosphérique, pour regarder la sensibilité des résultats aux paramétrisations physiques (*340 heures de calcul*).
- Perturber le modèle en modifiant les effets radiatifs à la surface (*6820 heures de calcul pour les quatre mois, avec initialisation toutes les 6 heures et avec quatre types des simulation différentes*).

## 4.2 Etude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat

### 4.2.1 Sensibilité de la simulation des oscillations intrasaisonniers tropicales au schéma de convection profonde

Jean-Philippe Duvel, Jean-Yves Grandpeix, Lionel Guez, Marine Rémaud (thèse),  
Catherine Rio

*demande : 20000h CPU sur Ada, 5 To sur Gaya*

Les oscillations intrasaisonniers (20-100 jours) sont des perturbations de la convection tropicale organisées à grande échelle sur les océans Indien et Pacifique. Ces perturbations sont très importantes dans la variabilité de la mousson asiatique et de la mousson Australienne et sont une source de prévisibilité à l'échelle étendue (15-30 jours). Une simulation correcte des ces oscillations dans les modèles de climat est nécessaire pour obtenir une bonne représentation des moussons, mais aussi du phénomène El Niño. Malgré une légère amélioration de la variabilité intrasaisonnaire en janvier-février-mars avec la « nouvelle physique » de LMDZ, celle-ci est encore assez peu satisfaisante (propagation deux fois trop lente, forte variabilité au nord de l'équateur). Les événements intrasaisonniers sont toujours trop peu organisés, réalistes et reproductibles.

**Tests de sensibilité à la fermeture** Des études précédentes ont montré que la variabilité de la convection tropicale pouvait être améliorée en modifiant certains paramètres des schémas de convection profonde (fermeture, déclenchement, entrainement, etc.). L'objectif de ce projet est d'inspecter, de quantifier et de comprendre l'effet de ces paramètres du schéma de convection profonde sur la représentation des oscillations intrasaisonniers et, plus généralement, sur la variabilité des précipitations et l'intensité des transitoires dans les tropiques.

En 2013, nous poursuivrons les tests de sensibilité de la variabilité tropicale aux paramètres du schéma de convection sur la base des schémas de type Tiedtke ou Emanuel. A chaque étape, les sorties quotidiennes de ces simulations seront analysées avec la méthode décrite dans [Xavier et al., 2010] et [Duvel et al., 2012] afin de déterminer l'origine de l'activité intrasaisonnaire et son lien avec l'organisation de la convection à grande échelle. 150 ans de simulation forcée (avec des durées pour chaque configuration comprises entre 2 et 10 ans) seront typiquement nécessaires. Différentes résolutions spatiales seront également considérées. On stockera les moyennes diurnes pour les champs 2D et les champs 3D sur 8 niveaux.

**Participation à une intercomparaison internationale** De plus, nous réaliserons des simulations dans le cadre d'une intercomparaison internationale de modèles globaux dédiée à l'évaluation de la représentation de la MJO (MJO Diabatic Processes Intercomparison Project). Cet exercice se base sur le fait qu'un certain nombre de biais présents dans les simulations climatiques se mettent en place très rapidement et sont déjà présents dans des simulations de quelques jours. Il reprend la méthodologie des simulations dites « TransposeAMIP » de l'exercice CMIP5, dans lesquelles les modèles de climat sont utilisés en mode prévision (voir section 4.1.2).

Dans ce cadre, nous réaliserons des simulations globales en mode prévision à 2 jours et à 20 jours sur deux périodes issues du projet YOTC (Year of tropical convection) en octobre/novembre 2009 et décembre 2009/janvier 2010 ; ainsi que sur une période issue de la campagne de mesures Cindy-Dynamo, entre octobre 2011 et mars 2012. Ces simulations seront effectuées avec deux versions du modèle atmosphérique LMDZ, la "physique standard" et la "nouvelle physique", différant dans la représentation de la convection et des nuages. L'analyse portera sur l'identification du rôle des processus convectifs, nuageux, radiatifs et dynamiques dans la mise en place et l'évolution d'un événement MJO. Ce type de simulation permettra

d'identifier les paramètres des schémas de convection et de nuages qui ont le plus d'impact sur la dérive du modèle pour différents états initiaux (phase sèche et humide de la MJO). Cela est donc une approche complémentaire des simulations de type AMIP décrites ci-dessus.

#### 4.2.2 Montagnes, ondes de gravité et stratosphère

François Lott, Lionel Guez, Sylvain Mailler

*Demande : 40 000 heures CPU sur Ada, 3 To sur gaya*

En 2012, nous avons réussi à simuler une QBO dans le modèle LMDz étendu à la stratosphère en introduisant une paramétrisation stochastique des ondes de gravité dues à la convection. Cet effort doit être consolidé en veillant en particulier à ce que les améliorations apportées aux régions tropicales, ne soient pas au dépend des performances du modèle aux moyennes latitudes. Il faut aussi que nous validions de façon exhaustive les climatologies du modèle. D'un point de vue plus scientifique, nous devons à présent ajuster nos paramétrisations de façon à ce qu'elles aient des propriétés statistiques proches de celles révélées à l'heure actuelle par les campagnes de mesures par ballon des ondes dans la stratosphère menées au LMD.

Cette convergence vers encore plus de réalisme va nous demander de nombreuses simulations. Si nous tablons sur 10 simulations de 20 ans, à la résolution 95x96x80, l'expérience en 2012 nous montre que nous aurons besoin d'environ *40 000 heures de calcul*. Cette estimation n'est pas excessive, car nous serons sûrement amenés à tester le modèle à d'autres résolutions, et en particulier à la résolution 144x145x80 qui est en train de devenir la norme au sein de l'IPSL.

#### 4.2.3 Microphysique des nuages de glace et des traînées de condensation des avions

Olivier Boucher, Marine Bonazzola, Marie Nguyen (post-doc)

*Demande : 25 000 heures CPU sur Ada ; 6 To sur Gaya.*

Les mesures in-situ et par satellite montrent que la concentration en vapeur d'eau varie considérablement dans la haute troposphère, y compris à des échelles spatiales très courtes. On sait également que l'atmosphère peut être sursaturée par rapport à la glace sans qu'il y ait présence d'un nuage, en raison du manque de noyaux glaçogènes dans la haute troposphère. C'est pourquoi les traînées de condensation formées par les avions peuvent persister pendant des heures, voire se transformer en cirrus. Nous cherchons à modéliser cet effet et à quantifier le forçage radiatif des traînées persistantes et des cirrus induits.

En 2013, les paramètres variables de la paramétrisation des nuages de glace seront ajustés de manière à reproduire les observations de vapeur d'eau (valeur moyenne et variabilité spatiale et temporelle). Nous introduirons ensuite un diagnostic de formation des traînées de condensation dans le modèle LMDz. Ce diagnostic prendra en compte la variabilité sous maille de la vapeur d'eau, la variation verticale de la température dans la maille et l'efficacité des moteurs d'avion. Un algorithme de détection automatique des traînées sur les images de la caméra TSI440 du SIRTÀ, qui a été développé en 2012, permettra d'évaluer le modèle quant à sa capacité à former les traînées. La paramétrisation de traînées sera ensuite couplée avec les inventaires d'émissions qui auront été introduits dans LMDz afin de simuler une distribution tridimensionnelle des traînées de condensation. On utilisera également une hypothèse de recouvrement vertical pour estimer la couverture bidimensionnelle par les traînées de condensation. Les paramètres de la paramétrisation seront ajustés de manière à reproduire les quantités moyennes de traînées sur certaines régions clés. On testera la cohérence de la simulation vis-à-vis des observations pour un jeu optimal de paramètres ajustables.

Ce travail s'insère dans le projet IMPACT (étude de l'impact de l'aviation sur le climat) qui est maintenant financé pour 4 ans par la Direction Générale de l'Aviation Civile à partir de novembre 2012. Seul du développement (et de l'évaluation) de modèle est prévu pour 2013.



Nous aurons besoin de simulations courtes (1 mois à 1 an) en nombre suffisant pour pouvoir affiner les paramétrisations, vérifier leur sensibilité aux paramètres incertains et à la résolution (verticale et horizontale) du modèle atmosphérique. Nous estimons le besoin à l'équivalent de 100 ans de simulation avec LMDZ en 39 niveaux.

*100 ans de simulation en  $96 \times 95 \times 39 \times (200 \text{ h/an en moyenne}) + 25\% \text{ post-traitement} = 25\,000 \text{ heures sur Ada, } 6 \text{ To stockage}$*

### 4.3 Impact des ondes longues planétaires et des anomalies interannuelles de vents sur la variabilité des températures en Atlantique tropical

Malick Wade (post-doc), Marta Martín del Rey (doctorante) et Alban Lazar

*Demande : 1200 heures CPU sur Ada ; 1 To sur Gaya*

Le but de ce projet est d'analyser le rôle des hautes pressions subtropicales et des ondes océaniques dans le développement du mode de variabilité interannuelle équatorial

Des résultats antérieurs ont montré qu'un affaiblissement des hautes pressions subtropicales dans l'hémisphère Nord ou/et Sud pouvait contribuer au développement de des anomalies de SST du "NINO atlantique". Parallèlement, les composantes équatoriales et côtières de ces anomalies sont considérées comme dépendantes des ondes longues piégées sur ces "rails" océaniques. Afin de quantifier l'influence relative du forçage par le vent des flux de chaleur air-mer ainsi que des ondes océaniques, différentes simulations avec la configuration « ATLTROP » (développée l'an dernier) de NEMO seront réalisées :

- Simulations de sensibilité aux anticyclones
  1. Simulation de contrôle avec vents interannuels
  2. Comme la simulation 1, mais des anomalies composites de tension de vent observée pendant la période 1971-90 seront ajoutées dans l'Atlantique Nord seulement.
  3. Comme la simulation 2, mais les anomalies seront ajoutées seulement dans l'Atlantique Sud.
  4. Comme la simulation 2, mais les anomalies seront ajoutées dans l'Atlantique Nord et Sud
  5. Comme la simulation 2, les anomalies seront ajoutés dans toute la bande équatoriale.

*La simulation 1 de référence nécessite  $8 \text{ h CPU /année} \times 50 \text{ ans} = 400 \text{ h CPU}$*

*Chacune des 4 autres expériences nécessite  $1 \text{ an} \times 10 \text{ expériences tests} \times 8 \text{ h CPU/année} = 80 \text{ h}$*

*Au total, nous demandons donc 720 heures CPU, auquel on rajoute 25% pour le post-traitement.*

*Chaque année de simulation nécessite 6Go/année de stockage soit 564Go.*

- Simulations de sensibilité aux ondes équatoriales et côtières :
  1. Sensibilité des SST de l'upwelling équatorial aux coups de vent à l'ouest du bassin : 5 expériences d 1 an  $\times 8 \text{ h CPU/année} = 40 \text{ h}$
  2. Sensibilité des SST de l'équateur et des côtes africaines aux ondes aux échelles interannuelles : 5 expériences de 10 ans  $\times 8 \text{ h CPU/année} = 400 \text{ h}$ .

*Soit au total 550h et 330Go*

## 4.4 Evolution, validation et utilisation du modèle ORCHIDEE

### 4.4.1 Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE

Joséfine Ghattas

*5000 heures CPU sur Ada, 2 To sur Gaya*

ORCHIDEE est un modèle qui évolue tout le temps et les nouvelles versions doivent être validés régulièrement. Il s'agit des mettre en place des simulations courtes mais récurrentes pour valider la compilation, la parallélisme (mode MPI seul et bientôt hybrid MPI-OpenMP), la reproductibilité, restartabilité et les performances dans différentes configurations. Il y aura différents niveaux de validation selon la fréquence hebdomadaire, mensuelle ou annuelle. :

- Nous allons mettre on place un bench automatique avec des petits tests qui tourneront chaque semaine.
- Des simulations courtes de référence ainsi qu'un batterie des tests techniques plus large seront fait à fréquence mensuelle.
- Une ou deux fois par ans, nous ajouterons des simulations plus longue pour la validation scientifique.

### 4.4.2 Couplage LMDZ-ORCHIDEE

Frédérique Cheruy, Agnès Ducharne, Aurélien Campoy (thèse), Sonia Ait-Mesbah (thèse), Post-Doc Embrace

*Demande : 288 000 heures sur Ada, 62 To sur Gaya*

**Evaluation de LMDZOR avec le nouveau module d'hydrologie en mode global** Le nouveau module d'hydrologie, CWRR, résolvant l'équation de Richards pour représenter les mouvements d'eau dans le sol, est maintenant en phase d'implémentation dans le modèle couplé de l'IPSL. Ce nouveau modèle assure une représentation physique des flux d'eau dans le sol et en conséquence de l'interaction sol-plante et de la gestion de l'eau dans le sol. Outre une description plus réaliste des phénomènes hydrologiques, il permettra une analyse plus physique et cohérente des couplages hydrologie/climat. Une évaluation approfondie de ce module en mode couplé a commencé en 2012 elle sera intensifiée en 2013. Un premier objectif est d'assurer le réglage fin du modèle à l'échelle globale comme aux échelles regionales (Afrique sub-saharienne, Amazonie, Moyennes latitudes). Nous essaierons aussi d'en améliorer certains aspects (spatialisation de paramètres clés comme les propriétés hydrodynamique des sols, leur profondeur, le lien entre le routage et les eaux profondes).

Plusieurs séries de simulations globales (SST forcées) d'une dizaine d'année avec activation ou non du module de végétation pour le réglage et l'évaluation du nouveau modèle en mode couplé avec l'atmosphère. On utilisera la physique standard et la nouvelle physique atmosphérique (e.g. Hourdin et al. 2012) pour plusieurs réglages du modèle de sol.

*Nouvelle hydrologie + Ancienne physique : 150 ans , 32 proc. 14400 heures de calcul sur Ada (+3600 post-traitement), stockage 5To*

*Nouvelle hydrologie + Nouvelle physique : 150 ans , 32 proc 33600 heures de calcul sur Ada (+8400 post-traitement), stockage 5To*

**Rôle du couplage humidité des sols / atmosphère dans le climat** L'impact de la représentation de la physique atmosphérique et de l'hydrologie sur le réalisme du couplage sol/atmosphère sera évalué en confrontant les réponses des différents modèles à l'assèchement moyen des sols prédit par les scénarios de changement climat. On s'intéressera à l'occurrence des vagues de chaleur, des sécheresses aux moyennes latitudes et dans les zones de transitions où le couplage sol/atmosphère est déterminant.

*Expérience CMIP5 (un scénario à déterminer ancienne physique) 250 ans, 32 proc. : 24000 heures de calcul sur Ada (+6000h post-traitement), stockage 8To*

*Expérience CMIP5 (un scénario à déterminer nouvelle physique) 250 ans, 32 proc. : 64000 heures de calcul sur Ada (+16000 post-traitement), stockage 8To*

*Expérience GLACE-CMIP5/nouvelle hydrologie :  $2 \times (250 \text{ ans})$ , 32 proc. : 48000 heures de calcul sur Ada (+12000h post-traitement), stockage 20To*

**Impact des nappes phréatiques** L'impact potentiel des nappes phréatiques sur les échanges sol/atmosphère et son évolution lors du changement climatique sera évalué en effectuant des simulations couplées globales en climat présent et climat modifié avec et sans nappes phréatiques.

*Simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE globales (résolution 95x95) sur de longues périodes (1850-2100) dans une configuration semblables à celles mises au point pour l'exercice CMIP5 :  $(2 \text{ simulations}) \times (250 \text{ ans/simulations}) \times (96 \text{ h de calcul/année simulé}) = 48\,000 \text{ h sur Ada}$ , + 25% de post-traitement, stockage 16To*

#### 4.4.3 Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique

Matthieu Guimberteau, Agnès Ducharne et Philippe Ciais

*Demande : 1500 heures CPU sur Ada ; 2 To sur gaya*

Les ressources allouées par les machines de l'Idris seront utilisées pour continuer à remplir les objectifs du projet européen AMAZALERT (Raising the alert about critical feedbacks between climate and long-term land use change in the Amazon, <http://www.eu-amazalert.org/home>). La majorité des simulations se fera en mode forcé ou offline (sans GCM) sur le bassin amazonien. Nous poursuivrons tout d'abord les comparaisons du bilan d'eau simulé par le modèle de surface ORCHIDEE couplé avec STOMATE avec d'autres estimations (modèles+satellites, mesures du flux...). Des séries de simulations de référence avec des forçages différents seront effectuées et comparées aux autres simulations provenant d'autres LSMs du projet, selon le protocole Moore. Nous demandons une quantité de stockage importante pour pouvoir importer les fichiers de forçage qui seront utilisées lors de nos simulations.

De plus, des simulations globales en mode offline sont prévues afin d'évaluer les différences qui existent entre les deux versions hydrologiques du modèle.

#### 4.4.4 Sensibilité de l'évaporation potentielle au changement climatique

Jan Polcher, Anaïs Barella-Ortiz (thèse)

*Demande : 16 000 heures CPU sur Ada ; 2 To sur gaya*

Nous continuerons l'étude de la sensibilité de l'évaporation potentielle au changement climatique à plusieurs méthodes du calcul. Des simulations globales pour le période correspondant au 21ème siècle et pour un période de référence de 11 ans seront effectuées en mode offline, ce qui fera environ 300 ans de simulation.

D'autre part, des simulations globales d'ORCHIDEE en mode offline sont prévues concernant notre collaboration avec Estellus S.A.S. Cette collaboration vise à mesurer l'humidité du sol par télédétection. Nous travaillerons sur l'obtention de températures de brillance à partir d'un modèle de transfert radiatif. Le but de cet étude sera de comparer ces températures avec celles fournies par SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity). Cette comparaison permettra d'analyser l'algorithme permettant d'obtenir l'humidité du sol à partir des températures de brillance et d'en identifier de possibles améliorations. Pour ce faire, nous réaliserons des simulations régionales avec ORCHIDEE offline sur l'Espagne et l'Afrique de L'Ouest pour un total d'une quinzaine d'années.

## 4.5 Isotopes de l'eau

Camille Risi, Francesca Guglielmo (post-doc), Victor Gryazin (ingénieur), Obbe Tuinenbourg (post-doc), Catherine Ottlé

*demande : 101 000 heures CPU sur Ada, 38 To sur Gaya ;*

*10 000 heures CPU sur Curie-noeuds fins, 3 000 sur Curie-noeuds larges, 7 To sur Curie*

Depuis 6 ans, nous travaillons sur le développement et l'utilisation d'une version d'LMDZ contenant les isotopes de l'eau ( $H_2^{18}O$ ,  $HDO$ ,  $H_2^{17}O$ ) et le traçage de l'eau, pour des applications atmosphériques, hydrologiques et paléo-climatiques.

**Evaluation des processus convectifs et nuageux** Le projet ANR CONV-ISO vise à étudier les processus convectifs et nuageux associés à la variabilité intra-saisonnière tropicale, et à évaluer leur représentation dans les modèles de climat, en combinant des mesures d'humidité, de nuages et d'isotopes de l'eau. Dans ce cadre, des simulations 2004-2012 (période sur laquelle nous disposons de données satellites) seront réalisées avec différents paramètres affectant les processus convectifs et nuageux. Les processus affectant l'humidification de la troposphère par la convection (détrainement convectif, réévaporation de la pluie) et le déclenchement de la convection seront plus particulièrement explorés. O. Tuinenbourg (post-doc) contribuera à la réalisation de ces tests.

*9 ans  $\times$  30 tests de sensibilité  $\times$  120 h /simulation + 25% post-traitement = 40 000 heures, 19 To*

**Couplage LMDZ-ORCHIDEE-iso et simulations en Sibérie** Le projet megagrants WSibISO vise à mieux comprendre le cycle de l'eau et du carbone sur la Sibérie, et à améliorer la fiabilité des projections climatiques dans cette région. Dans cet objectif, nous proposons de travailler avec une nouvelle version du modèle de surface continentale ORCHIDEE intégrant les processus biogéophysiques spécifiques aux hautes latitudes comme la modélisation des pergélisols et son interaction avec la couverture neigeuse et le couvert végétal. Nous souhaitons aussi utiliser les isotopes de l'eau pour aider à la validation de ce nouveau modèle en version offline et couplée avec l'atmosphère. Nous avons donc entrepris d'implémenter ces isotopes dans cette nouvelle version d'ORCHIDEE. Les isotopes étaient initialement implémentés dans les versions vectorielles d'LMDZ et d'ORCHIDEE. En 2012, nous avons transféré les isotopes dans la version parallèle d'LMDZ, mais le travail pour ORCHIDEE reste à faire. C'est le travail de F. Guglielmo (post-doc). Si la première partie de son travail se fera offline sur une machine locale, la deuxième partie de son travail impliquera le test du couplage avec LMDZ. Après une période de débogage, elle réalisera une simulation 1979-2012 forcée par les SSTs observées ainsi que quelques tests de sensibilités plus courts. Compte tenu de la limitation en temps de calcul, les simulations isotopiques sont réalisées en 96x79x19.

*70 ans  $\times$  120 h /simulation + 25% post-traitement = 10 000 heures, 5 To*

Dans le cadre du même projet WSibIso, V. Gryazin réalisera des simulations avec la nouvelle version isotopique d'ORCHIDEE développée par F. Guglielmo, pour le climat présent et en changement climatique. Certaines seront zoomées. Il réalisera aussi des tests de sensibilité à des paramètres atmosphériques et hydrologiques continentaux, afin de tester l'importance des rétroactions continent-atmosphère dans cette région. Les simulations seront courtes (10 ans).

*10 ans  $\times$  12 simulations standard  $\times$  120 h /simulation + 25% post-traitement = 18 000 heures, 8 To*

*10 ans  $\times$  3 simulations zoomées  $\times$  390 h /simulation  $\simeq$  12 000 heures CPU sur Curie noeuds fins, 7 To*

**Réanalyse 20e siècle** Afin de mieux évaluer la crédibilité des projections climatiques, les modèles sont de plus en plus testés sur la variabilité climatique récente, au cours du 20e siècle.

Les enregistrements isotopiques (cellulose d'arbres, glaciers) permettent de compléter les données d'observations directes lorsque celles-ci deviennent éparses au fur et à mesure qu'on recule dans le temps. Afin de comparer les enregistrements isotopiques observés à ceux simulés, nous prévoyons de réaliser une simulation isotopique sur tout le 20<sup>e</sup> siècle, en utilisant un nouveau jeu de réanalyses ([Compo et al., 2011]).

*150 ans × 120 h /simulation + 25% post-traitement = 22 000 heures, 4 To (car pas de sorties haute fréquence)*

**Simulations stratosphériques** Dans le cadre d'une collaboration franco-suédoise, nous prévoyons de réaliser des simulations isotopiques utilisant les développements récents améliorant la représentation stratosphérique (voir section 4.2.2). Cette simulation sera comparée aux données satellitaires Odin sur la période 2001-2012. Plusieurs tests de sensibilité seront faits à la représentation des processus affectant le transport d'eau de la troposphère vers la stratosphère : convection profonde, condensation grande échelle, sur-saturation.

*12 ans × 3 simulations standard × 200 h /simulation + 25% post-traitement = 9 000 heures, 2 To*

## 5 Méthode

Ce projet porte principalement sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ et du modèle de surface continentale ORCHIDEE. Certains travaux portent sur l'utilisation du modèle d'océan NEMO, mais quantitativement, cela représente une très faible part de notre demande. Nous ne décrivons donc ici que les modèles LMDZ et ORCHIDEE.

### 5.1 Le modèle LMDZ

Site web LMDZ : <http://lmdz.lmd.jussieu.fr>

Le modèle de circulation générale LMDZ est divisé en deux parties :

1. une partie dynamique qui consiste en une résolution par différences finies des équations tridimensionnelle de la météorologie dans l'approximation hydrostatique ;
2. une partie physique qui consiste en une résolution de modèles unidimensionnels (les paramétrisations physiques) représentant les divers processus d'échanges verticaux à échelle sous-maille (échanges radiatifs, processus de couche limite, convection profonde, effet de l'orographie).

**Configurations** Dans le présent projet, le modèle est utilisé dans différentes configurations :

1. configuration climatique, où les seules forçages sont les températures de surface des océans (SST = Sea Surface Temperature) et le forçage solaire, la grille étant régulière ou zoomée sur une région particulière, l'Afrique de l'Ouest ou la Méditerranée dans notre cas ;
2. configuration guidée, dans laquelle certains champs dynamiques ou thermodynamiques sont rappelés vers les valeurs données par des analyses ou réanalyses. On pourra ainsi guider le modèle vers les analyses du Centre Européen ou du NCEP.

**Le code d'LMDZ** Le code est conçu de façon modulaire. Les constantes physiques sont passées par Common Fortran. Toutes les autres variables sont passées en argument, ce qui permet de changer aisément les modules des paramétrisations physiques. Cette facilité est essentielle à la vie d'un modèle climatique, puisque les paramétrisations utilisées ont des origines très variées et font l'objet d'échanges permanents entre laboratoires.

**Optimisation du code** Le modèle est optimisé pour la vectorisation. Les boucles intérieures traitent des vecteurs dont la longueur est en général la taille de la grille (7000 dans la version standard), sauf pour certains processus (comme la convection qui n'est active que sur 20% des mailles) pour lesquels on effectue un ré-indices des champs. Les performances obtenues étaient de l'ordre de 3 Gflops sur NEC SX8.

Le code existe maintenant en version parallèle MPI/OpenMP : (1) le découpage du domaine en bandes de latitude est géré par MPI ; (2) le découpage vertical est géré par OpenMP. Des tests ont été effectués avec succès sur IBM SP6 utilisant 96 processeurs. Par ailleurs LMDZ est actuellement testé sur 2000 processeurs sur la machine Curie du CCRT dans le cadre du programme PRACE.

### 5.2 Le modèle ORCHIDEE

Site web ORCHIDEE (en cours de finalisation) : <http://labex.ipsl.fr/orchidee>

Documentation technique : <https://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee>

Le modèle de surface continentale ORCHIDEE est le couplage de 3 modèles :

1. Le modèle SECHIBA simule le bilan hydrique et énergétique de la surface
2. Le modèle STOMATE simule la phénoménologie de la végétation et les transferts biogéochimiques

### 3. Le modèle LPJ simule l'évolution dynamique de la végétation

Le modèle ORCHIDEE peut être utilisé soit seul (offline) ou couplé à LMDZ.

**Le code d'ORCHIDEE et son optimisation** Le code est conçu de manière modulaire en fortran 90. Il a été optimisé pour la vectorisation de la même manière que toutes les paramétrisations d'LMDZ. La version officielle d'ORCHIDEE est parallélisée en MPI. Une version hybride MPI-OpenMP est en cours de validation.

## Références

- [Compo et al., 2011] Compo, G., Whitaker, J., Sardeshmukh, P., Matsui, N., Allan, R., Yin, X., Gleason, B., Vose, R., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R., Grant, A., Groisman, P., Jones, P., Kruk, M., Kruger, A., Marshall, G., Maugeri, M., Mok, H., Nordli, Ø., Ross, T., Trigo, R., Wang, X., Woodruff, S., and Worley, S. (2011). The twentieth century reanalysis project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137 :1–28. DOI : 10.1002/qj.776.
- [Duvel et al., 2012] Duvel, J.-P., Bellenger, H., Belon, G., and Remaud, M. (2012). An event-by-event assessment of tropical intraseasonal perturbations for general circulation models. *Clim. Dyn.*, pages DOI : 10.1007/s00382-012-1303-6.
- [Xavier et al., 2010] Xavier, P. K., Duvel, J.-P., Braconnot, P., and Doblas-Reyes, F. J. (2010). An evaluation metric for intraseasonal variability and its application to cmip3 twentieth-century simulations. *J. Climate*, 23 :3497–3508.