

**Demande DARI 2016 – projet 0292**

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

**Description du projet de recherche**

Camille Risi

crlmd@lmd.jussieu.fr, 01 44 27 52 62

L.M.D. - Octobre 2015

**Demande sur l'IDRIS : 972 000 d'heures CPU sur Ada, 131 Tera-octets sur Ergon.**

Comme l'an dernier, nous ne demandons pas d'heures sur Curie.

**Table des matières**

<b>1</b>	<b>Présentation générale</b>	<b>2</b>
1.1	Les modèles utilisés . . . . .	2
1.2	Lien avec les autres projets . . . . .	2
1.3	Vue d'ensemble des quatre thèmes du projet . . . . .	3
1.3.1	Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat . . . . .	3
1.3.2	Variabilité des températures en Atlantique tropical . . . . .	4
1.3.3	Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE . . . . .	4
1.3.4	Isotopes de l'eau . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Estimation des ressources consommées par les diverses configurations</b>	<b>4</b>
2.1	LMDZ . . . . .	4
2.1.1	Les différentes versions . . . . .	5
2.1.2	Les différentes résolutions . . . . .	5
2.1.3	Les différentes configurations . . . . .	5
2.1.4	Estimation des ressources . . . . .	6
2.2	ORCHIDEE et NEMO . . . . .	6
2.3	Espace de stockage . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Demande détaillée</b>	<b>6</b>
3.1	Etude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat . . . . .	6
3.1.1	Etude de l'organisation de la convection dans LMDZ en configuration d'équilibre radiatif-convectif (RCE) . . . . .	7
3.1.2	Montagnes et stratosphère . . . . .	8

3.1.3	Paramétrisation de la convection et phénomènes tropicaux . . . . .	8
3.1.4	Microphysique des nuages froids . . . . .	9
3.2	Variabilité des températures en Atlantique tropical . . . . .	10
3.3	Evolution, validation et utilisation du modèle ORCHIDEE . . . . .	10
3.3.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE . . . . .	10
3.3.2	Couplage LMDZ-ORCHIDEE . . . . .	11
3.3.3	Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique . . . . .	12
3.4	Isotopes de l'eau . . . . .	13
3.4.1	Mise à jour et pérennisation des isotopes dans LMDZ6 et dans le couplé IPSL . . . . .	13
3.4.2	Evaluation des processus convectifs et nuageux . . . . .	13
3.4.3	Applications paleo-climatiques et régionales . . . . .	14
3.4.4	LMDZ-iso au Cénozoïque . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Méthode</b>	<b>15</b>
4.1	Le modèle LMDZ . . . . .	15
4.2	Le modèle ORCHIDEE . . . . .	15

# 1 Présentation générale

## 1.1 Les modèles utilisés

Comme tous les ans, ce projet est centré sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ, du modèle de surface continentale ORCHIDEE, et du modèle d'océan NEMO. Les différents modèles peuvent chacun être utilisés seuls (offline) ou couplés entre eux.

- LMDZ est le modèle de circulation général atmosphérique développé au LMD. Il constitue la composante atmosphérique du modèle couplé de l'IPSL. Ce dernier est utilisé pour les simulations de changement climatique des programmes internationaux CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), dont l'analyse alimente les rapports d'évaluation de l'IPCC (voir projet 239). Il est un outil d'étude de l'atmosphère et du climat pour plusieurs équipes en France et à l'étranger.
- ORCHIDEE est le modèle de surface continentale développé à l'IPSL. Il constitue la composante continentale du modèle couplé de l'IPSL. Il est utilisé seul ou couplé à LMDZ pour la compréhension des processus hydrologiques continentaux et des couplages sol-atmosphère.
- NEMO est le modèle de circulation générale océanique développé au LOCEAN. Il constitue la composante océanique du modèle couplé de l'IPSL. Dans cette demande, il est utilisé seul pour la compréhension des processus océaniques.

Dans notre demande, la grande majorité des moyens de calcul demandés implique des simulations avec LMDZ.

## 1.2 Lien avec les autres projets

Ce projet est 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.
- au projet genCMIP6, qui est consacré à la mise au point et le réglage de la prochaine version d'LMDZ, LMDZ6.

thème	calcul sur Ada (k heures CPU)	stockage sur Ergon (To)
Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat	503	87
dont agrégation de la convection	148	22
dont montagnes et stratosphère	150	50
dont convection et phénomènes tropicaux	63	9
dont microphysique des nuages froids	142	6
Etude des interactions océan-atmosphère lors des évènements ENSO	3	1
Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE	210	21
Isotopes de l'eau	256	22
<b>Total</b>	<b>972</b>	<b>131</b>

TAB. 1 – Tableau résumant les demandes de temps de calcul et de stockage sur l'IDRIS

### 1.3 Vue d'ensemble des quatre thèmes du projet

Le projet porte sur 4 grands thèmes, résumés ci-dessous. Les demandes en temps de calcul et en espace de stockage par thèmes sont détaillées dans le tableau 1.

#### 1.3.1 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.

**Etude de l'organisation de la convection dans LMDZ en configuration d'équilibre radiatif-convectif (RCE)** Nous essayons de mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent la circulation générale de l'atmosphère, le rôle des nuages et de la vapeur d'eau, et sa réponse à un réchauffement global. Pour cela, nous nous plaçons dans le cadre très idéalisé d'une aqua-planète en équilibre radiatif-convectif (ensoleillement et température de surface océanique uniformes sur l'ensemble de la planète, pas de rotation) (section 3.1.1).

**Montagnes et stratosphère, convection** L'équipe « Dynamique et Physique de l'Atmosphère et de l'Océan » (DPAO), implantée à l'Ecole Normale Supérieure et à l'école Polytechnique, participe à l'amélioration des paramétrisations physiques du modèle LMDZ et utilise ce modèle pour identifier les processus dynamiques fondamentaux qui contribuent à la variabilité du climat aux grandes échelles d'espace et de temps. Parmi ces processus, nous étudions en particulier l'influence des montagnes sur le climat ou l'influence de la représentation de la convection profonde sur la variabilité du climat tropicale, en particulier l'oscillation de Madden-Julian et les systèmes dépressionnaires (section 3.1.2).

**Microphysique des nuages froids** Les développements autour de la microphysique froide du modèle LMDZ se poursuivent avec l'amélioration dans le modèle des nuages froids et de la précipitation solide, ainsi que de la sursaturation. Ces développements seront évalués à la fois en Antarctique (notamment dans le cadre d'un projet ANR, section 3.1.4) et dans la haute troposphère, pour les nuages hauts (section 3.1.4).

### 1.3.2 Variabilité des températures en Atlantique tropical

Nous analysons les mécanismes atmosphériques et océaniques impliqués dans le développement du mode de variabilité interannuelle équatorial de type « ENSO Atlantique » (section 3.2).

### 1.3.3 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 3.3.1), et de valider son couplage avec LMDZ (section 3.3.2). Le modèle de surface continental ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est aussi un outil adapté pour mieux comprendre et prévoir l'évolution future du cycle hydrologiques et des ressources en eau. C'est par exemple le but des travaux proposés sur l'évolution des débits amazoniens (section 3.3.3).

### 1.3.4 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.

- Nous travaillerons à la pérennisation de cet outil (section 3.4.1)
- Nous poursuivrons nos travaux sur l'évaluation de la représentation des processus convectifs et nuageux et de leur rôle dans la variabilité intra-saisonnière (section 3.4), dans le cadre du projet ANR CONV-ISO.
- Des travaux sont en cours sur l'interprétation d'enregistrements isotopiques paléo-climatiques au cours de l'Holocène (section 3.4.3) et du Cénozoïque (section 3.4.4) dans des régions où la topographie nécessite une modélisation régionale avec résolution fine.

## 2 Estimation des ressources consommées par les diverses configurations

L'estimation des ressources consommées par les diverses configurations est presque inchangée par rapport à l'année 2015.

### 2.1 LMDZ

L'essentiel du temps calcul de ce projet est consommé par des simulations avec le modèle atmosphérique LMDZ

### 2.1.1 Les différentes versions

Il existe plusieurs versions d’LMDZ utilisées dans ce projet :

- LMDZ5A est l’une des versions utilisées pour le projet d’intercomparaison CMIP5. Elle est proche de LMDZ4 ([Hourdin et al., 2006]), utilisé pour CMIP3.
- LMDZ5B est l’autre version utilisée pour CMIP5. Elle inclue de nombreuses améliorations dans les paramétrisations de la convection profonde, peu profonde et de leur couplage ([Rio et al., 2009, Rio et al., 2013, Hourdin et al., 2012]).
- LMDZ6 est la version qui sera utilisée pour CMIP6. Elle se base sur LMDZ5B, mais inclue des améliorations supplémentaires dans les paramétrisations de la convection et de nuages, ainsi qu’un nouveau réglage.

### 2.1.2 Les différentes résolutions

La résolution horizontale et verticale est définie par la grille. Par exemple, R96x71x39 signifie qu’il y a 96 points en longitude (3.75° de résolution), 71 points en latitude (2.5° de résolution) et 39 niveaux verticaux.

La résolution verticale est une caractéristique rarement modulable de la version de LMDZ. Ainsi, LMDZ5A et LMDZ5B sont utilisés avec 39 niveaux verticaux, tandis que LMDZ6 est utilisé avec 79 niveaux verticaux.

Pour l’étude de la stratosphère, LMDZ6 mais utilisé avec 72 niveaux verticaux seulement. Des niveaux près du sol ont été enlevés par rapport à LMDZ6. On appelle ci-après cette version LMDZ6-strato.

Concernant la résolution horizontale, les simulations de notre demande seront réalisées avec l’une des grilles suivantes :

- R96x71 est encore plus basse que la résolution dite « basse » de CMIP5. Elle permet d’économiser du temps de calcul et n’est plus utilisée que pour les simulations isotopiques.
- R96x95 est la résolution appelée « basse » dans CMIP5, maintenant appelée « très basse » ou « VLR » (very low resolution). Elle permet d’économiser du temps de calcul et est utilisée quand les résultats ne sont pas crucialement sensibles à la résolution horizontale.
- R144x142 est la résolution dite « moyenne » dans CMIP5, maintenant appelée « LR ».
- R96x95-zoomé correspond à une variante irrégulière de la grille R96x95. Elle permet d’atteindre des résolutions fines dans la région du zoom tout en économisant le temps de calcul.
- R144x142-zoomé correspond à une variante irrégulière de la grille R144x142. Elle permet d’atteindre des résolutions aussi fines que 50km dans la région du zoom.

### 2.1.3 Les différentes configurations

LMDZ peut-être utilisé dans de multiples configurations. Pour représenter les surfaces continentales, LMDZ peut être couplé ou non au modèle de sol et de végétation ORCHIDEE. Sur océan, LMDZ peut-être forcé par des température de surface de l’océan observées (simulations « AMIP ») ou calculées par des modèles couplés océan-atmosphère, dans le cas de simulations paléo-climatiques. La température de surface de l’océan peut aussi être imposée constante et uniforme partout, dans le cas de simulations aquaplanètes. Les vents peuvent être guidés ou non par des réanalyses. Enfin, une version isotopique, LMDZ-iso ([Risi et al., 2010]), est disponible pour LMDZ5A et LMDZ5B.

En terme de temps de calcul, on peut classer les différentes configurations utilisées dans ce projet en 4 groupes :

- Les simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE, appelées LMDZOR.
- Les simulations avec LMDZ seul.

configuration de LMDZ → grille horizontale ↓	LMDZOR	LMDZ seul	LMDZ aquaplanète	LMDZ-iso
R96x71 (VVLR)	-	-	-	LMDZ5B : 300h
R96x95 (VLR)	LMDZ6 : 600h	-	LMDZ5A : 72.5h	-
R144x142 (LR)	LMDZ6 : 1 780h	LMDZ6-strato : 500h	LMDZ6 : 1 335h	-
R96x95 -zoomé	LMDZ5B : 300h	-	-	-
R144x142 -zoomé	LMDZ5B : 450h	-	-	LMDZ5A : 1 900h

TAB. 2 – Temps de calcul, en heures CPU par an, que prennent les différentes versions de LMDZ pour différentes résolutions horizontales et verticales et différentes configurations prévues en 2016 dans cette demande. LMDZ5A et LMDZ5B sont utilisés avec 39 niveaux verticaux, tandis que LMDZ6 est utilisé avec 79 niveaux verticaux et LMDZ6-strato avec 72 niveaux verticaux. Les cases non renseignées sont celles pour lesquelles aucune simulation n’est prévue dans cette demande.

- Les simulations avec LMDZ seul, en aquaplanètes en équilibre radiatif-convectif. Le temps d’exécution est allégé.
- Les simulations isotopiques : LMDZ-iso est utilisé seul et le temps d’exécution est augmenté par les calculs isotopiques.

#### 2.1.4 Estimation des ressources

Les ressources consommées par les simulations réalisées avec ces diverses versions, grilles et configurations sont indiquées dans le tableau 2.

Les post-traitements se font la plupart du temps dur des noeuds dédiés sur Adapp et ne sont pas comptabilisés. Seules certaines chaînes de lancement nécessitent des post-traitements (rebuild) sur Ada. Dans ce cas, on doit rajouter 20 % pour le post-traitement par rapport au temps de calcul.

## 2.2 ORCHIDEE et NEMO

- Quand ORCHIDEE est utilisé seul, le temps de calcul est de 8h/an pour une grille de  $2^\circ \times 2^\circ$  sur 32 coeurs et de 20h/an pour une grille de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  sur 64 coeurs.
- Quand NEMO est utilisé seul, il utilise 80h/an.

## 2.3 Espace de stockage

L’espace de stockage nécessaire dépend de la fréquence et de la quantité des sorties que chacun souhaite. C’est donc très variable d’une étude à l’autre.

## 3 Demande détaillée

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

*Demande totale pour le thème :*  
*Temps de calcul : 558 000 heures CPU sur Ada,*  
*Stockage : 78 To sur Ergon*

### 3.1.1 Etude de l'organisation de la convection dans LMDZ en configuration d'équilibre radiatif-convectif (RCE)

Sandrine Bony et David Coppin (thèse)

*Demande : 148 000h CPU sur Ada, 22 To sur Ergon*

En 2015, nous avons commencé à étudier l'effet de l'agrégation sur le climat et plus particulièrement sur les propriétés de la zone de convergence intertropicale (ITCZ). Nous avons réalisé pour cela des simulations aquaplanète en équilibre radiatif-convectif (RCE) avec ou sans rotation et avec des gradients variables de la température de surface de l'océan (SST). Les résultats préliminaires montrent une sensibilité de l'ITCZ, de sa largeur et de son organisation à la SST, aux effets radiatifs des nuages et aux flux de surface. Pour 2016, nous comptons poursuivre l'étude des simulations sans rotation et ajouter la rotation pour étudier un cas plus réaliste et quantifier l'effet de la rotation sur l'agrégation.

D'autre part, dans le but de savoir si l'agrégation existe et est contrôlée de la même façon dans LMDZ-6 que dans LMDZ-5A, nous comptons réaliser un nombre réduit d'expériences afin de tester, sur LMDZ-6, les mécanismes qu'on a mis en évidence sur LMDZ-5A.

Pour l'étude sur l'ITCZ, nous continuerons à réaliser une batterie de tests de sensibilité pour comprendre ce qui contrôle la largeur de l'ITCZ et voir si l'agrégation de la convection est importante. Nous estimons nos besoins en calcul à :

- 6 groupes de 5 simulations de deux ans avec LMDZ-5A pour finir l'étude sans rotation :  $6 \text{ groupes} \times 5 \text{ simulations} \times 2 \text{ ans} \times 72.5h = 4350 \text{ heures}$
- 14 groupes de 5 simulations de deux ans avec LMDZ-5A pour faire l'étude avec rotation qui est à peine commencée :  $14 \text{ groupes} \times 5 \text{ simulations} \times 2 \text{ ans} \times 72.5h = 10150 \text{ heures}$

Pour la partie sur les mécanismes d'agrégation de la convection dans LMDZ 6, afin de limiter les ressources demandées, nous nous limiterons à tester les mécanismes d'initiation de l'agrégation identifiés dans LMDZ 5A et nous ferons une simulation tous les 2K (contrairement à une simulation tous les 1K dans l'étude des mécanismes d'initiation de l'agrégation dans LMDZ 5A). Si l'on reste sur la gamme de SST utilisée auparavant, cela fait des groupes de 10 simulations.

Pour chaque SST, il faudra faire une simulation de deux ans pour atteindre un équilibre qui servira ensuite à lancer les différentes expériences à la même SST. Comme l'agrégation de la convection peut dépendre des conditions initiales, on compte deux simulations à chaque SST pour avoir une simulation référence où la convection passe d'un état désagrégé à un état agrégé. Enfin, pour tester les mécanismes, il faudra faire 4 tests par SST mais ces tests peuvent durer seulement un an. Pour cette partie, nos besoins s'élèvent à :

- 10 simulations LMDZ6-LR de deux ans pour atteindre un équilibre qui servira à initialiser les simulations à chaque SST :  $10 \text{ simulations} \times 2 \text{ ans} \times 1335h = 26\,700 \text{ heures}$
- 20 simulations LMDZ6-LR de deux ans pour avoir des simulations contrôle où la convection passe de l'état désagrégé à l'état agrégé :  $2 \text{ simulations} \times 2 \text{ ans} \times 1335h = 53\,400 \text{ heures}$
- 4 groupes de 10 simulations LMDZ6 de un an pour tester les mécanismes d'initiation :  $4 \text{ groupes} \times 10 \text{ simulations} \times 1335h = 53\,400 \text{ heures}$

*Temps de calcul total :  $4350 + 10150 + 26700 + 53400 + 53400 = 148\,000 \text{ heures}$ .*

*Stockage : Base de calcul pour l'espace de stockage : 11 To ont été occupés en plus par rapport à la première année pour 58 500 heures de calcul. Comme on prévoit 148 000 heures de calcul, nous aurons besoin de  $2 \times 11 = 22 \text{ To}$ .*

### 3.1.2 Montagnes et stratosphère

F Lott, S. Mailler, L. Guez, et D Cugnet

*Demande : 150 000h CPU sur Ada, 50 To sur Ergon*

En 2016, nous allons commencer à analyser plus en détail comment la stratosphère dans LMDZ répond au changement climatique. La motivation est que maintenant que nos ondes de gravité ont des sources troposphériques bien identifiées, l'impact du changement climatique sur ces sources va être important, ce qui peut potentiellement affecter la réponse du modèle. Nous analyserons aussi comment l'Oscillation Quasi-Biennale évolue dans le cadre d'un changement climatique, et mènerons cette étude dans le cadre du consortium international QBOi (QBO-initiative, PI Scott Osprey, Université d'Oxford), comparant les performances des meilleurs modèles de climat en ce qui concerne la stratosphère. Dans ce cadre nous serons aussi amené à faire des expériences de « Hincast » (prévisions météorologiques rétrospectives), initialisées par des champs dynamiques observés, afin de voir si le modèle est capable de prévoir l'évolution de la QBO sur quelques mois.

Pour ces tâches, nous allons avoir besoin d'une dizaine de simulations de 30 ans, à résolution 144x142x72, à raison de 500 heures de calcul par an :

$$10 \text{ simulations} \times 30 \text{ ans} \times 500 \text{ h} = 150\,000 \text{ heures}$$

Si nous optimisons l'archivage, environ 50 To devraient être suffisant.

### 3.1.3 Paramétrisation de la convection et phénomènes tropicaux

Jean-Philippe Duvel, Jean-Yves Grandpeix, Marine Remaud (doctorante), Catherine Rio

*Demande : 63 000 heures CPU sur Ada ; 9 To sur Ergon.*

**Impact du schéma de convection sur les dépressions tropicales** Les résultats sur les simulations des dépressions tropicales et des cyclones sont très encourageants et on envisage maintenant d'étendre notre analyse avec les nouvelles paramétrisations de la convection et de la couche limite de LMDZ.

Un objectif à plus long terme est d'analyser l'évolution de l'activité des cyclones et des transitions extratropicales dans un climat plus chaud. À cette fin, des simulations forcées par des sorties CMIP5 seront effectuées. Des simulations d'ensemble ou sur plusieurs années seront nécessaires.

On estime qu'on réalisera environ 100 ans de simulations avec une résolution identique à la simulation AMIP déjà réalisée, qui consomme 450 h/an.

$$\text{Temps de calcul : } 100 \text{ ans} \times 450 \text{ h} = 45\,000 \text{ h}$$

Stockage : 4 To

**Impact du schéma de convection sur les pluies en Afrique de l'Ouest** Concernant la mousson africaine, nous étudierons plus particulièrement l'impact du partitionnement entre pluies de grande-échelle et convectives sur la distribution des pluies, en jouant sur les interactions entre le schéma de convection et la condensation grande-échelle. Par ailleurs, l'impact des processus convectifs et nuageux étudiés ici sera également évalué sur d'autres régions du globe à partir de simulations zoomées guidées en résolution R96x95x39 : l'océan Indien pour l'étude de la MJO, ainsi que le continent maritime pour l'étude des effets de brise sur le déclenchement de la convection.

Nous réaliserons pour cela une quinzaine de tests de sensibilité avec LMDZ5B aux processus physiques sur plusieurs régions du globe :

$$\text{Temps de calcul : } 15 \text{ simulations} \times 1 \text{ an} \times 4 \text{ régions} \times 300 \text{ h} = 18\,000 \text{ h}$$

*Stockage : 5 To.*

### 3.1.4 Microphysique des nuages froids

*Demande : 142 000 heures CPU sur Ada ; 6 To sur Ergon.*

## Brumes et précipitations en Antarctique

Jean-Baptiste Madeleine

L'analyse préliminaire des résultats du modèle LMDZ en Antarctique initiée cette année (voir le rapport d'activité) a permis d'identifier de premiers biais importants du modèle dans cette région, qui reflètent des limites du modèle dans son ensemble. L'Antarctique est particulièrement révélateur d'imprécisions faites sur le calcul du transfert radiatif ainsi que sur la condensation et précipitation solide. Cette recherche Antarctique va connaître une nouvelle dynamique grâce au projet ANR APRES3 (Antarctic Precipitation, Remote sensing from Surface and Space) qui a démarré le 1er Octobre 2015. S'étendant sur une durée de 3 ans, cette ANR a pour objectif d'améliorer notre connaissance de la précipitation et des nuages en Antarctique et d'améliorer ainsi les modèles climatiques. Une tâche entière (coordonnée par Jean-Baptiste Madeleine et Hubert Gallée) porte sur l'amélioration des paramétrisations de la microphysique froide du modèle LMDZ ainsi que du modèle à aire limitée MAR (Modèle Atmosphérique Régional) développé au LGGE. Une thèse portant sur le développement du modèle LMDZ y est également financée. Cette tâche comprend notamment des développements dans la représentation de la sursaturation et du calcul du flux de précipitation solide dans LMDZ qui sont prévus pour l'année 2016.

Dans ce cadre, nous aimerions réaliser quatre simulations. Deux simulations avec le modèle LMDZ6, en mode AMIP forcée puis guidée. Et deux simulations avec la physique du modèle MAR, qui est en cours d'implémentation dans l'architecture du modèle LMDZ. Ces deux simulations du modèle "LMDZ/MAR" seront réalisées toutes deux en mode AMIP forcée avec deux réglages différents de la microphysique froide du modèle. La résolution sera de  $144 \times 142 \times 79$  sur une durée de 10 ans. Ces 4 simulations permettront de comparer la microphysique relativement simple du modèle LMDZ à celle, plus avancée, du modèle MAR. Ceci permettra d'identifier les points forts et les points faibles du modèle LMDZ et d'entreprendre des développements optimaux à la lumière du modèle MAR, développé spécifiquement pour les régions polaires.

*Temps de calcul :  $1780h \times 10 \text{ ans} \times 4 \text{ simulations} = 71\,000 \text{ heures CPU sur Ada}$*

*Stockage : 3 To sur Ergon.*

## Représentation des nuages hauts

Jean-Baptiste Madeleine, Marine Bonazzola

L'amélioration de la représentation des nuages hauts se poursuit avec notamment l'implémentation prévue en 2016 de la sursaturation dans le modèle qui sera également évaluée en Antarctique (voir partie précédente). Afin de mieux comparer les résultats du modèle aux observations, l'implémentation d'un simulateur des données AIRS au modèle LMDZ est également prévue, et permettra d'accroître le nombre de diagnostics (« ice water path », taille des cristaux, épaisseur des nuages...). Une fois ces deux nouvelles implémentations réalisées, nous aimerions donc réaliser quatre simulations de 10 ans en mode AMIP, deux pour tester l'implémentation de la sursaturation et deux pour activer le simulateur sur une version forcée puis guidée du modèle (le tout en  $144 \times 142 \times 79$ ).

*Temps de calcul : 1780h × 10 ans × 4 simulations = 71 000 heures CPU sur Ada*  
*Stockage : 3 To sur Ergon.*

## 3.2 Variabilité des températures en Atlantique tropical

Malick Wade, Amadou Thierno Gaye, Marta Martin del Rey, Belen R. de Fonseca, Alban Lazar

*Demande totale pour le thème : 3 000 h CPU sur Ada ; 1 To sur Ergon*

En plus du mode Niño Atlantique (appelé aussi Mode Equatorial, EM) qui domine en été boréal, existe le Mode Méridien (MM) Atlantique qui domine au printemps boréal. Bien que plusieurs mécanismes aient été proposés, les forçages de ces modes ne sont pas encore bien compris. C'est pourquoi une analyse des différents événements pour les phases positives et négatives du MM et de l'Atlantique Niño sera effectuée. Le vent en particulier sera analysé comme forçage principal.

Nous réaliserons des simulations d'une année chacune avec le modèle NEMO, forcé par des anomalies dans chacune de 5 sous-régions de l'océan Atlantique tropical :

- 5 expériences de sensibilité « WIND-EM » : On forcera par des anomalies de vents dérivées des observations dans 5 régions différentes du bassin Atlantique Tropical, ceci pour un événement EM spécifique, tandis que des climatologies seront prescrites dans le reste des domaines.
- 5 expériences de sensibilité « WIND-MM ». Identique à WIND-EM mais pour le Mode Méridien
- 5 expériences de sensibilité « WIND-BW ». Identique à WIND-EM mais pour le Mode « Basin-Wide » Atlantique Niño.
- 5 expériences de sensibilité « WIND-C ». Identique à WIND-EM mais pour le Mode « Canonical » Atlantique Niño.

Chaque expérience sera effectuée deux fois, pour les phases positive et négative de chaque mode.

Un an de simulation avec NEMO nous coûte 80h CPU sur Ada et occupe 6 Go sur Ergon.

4 types d'expériences × 5 expériences × 2 phases × 80h = 3200h.

Stockage = 40 années × 6 Go = 240 Go

En arrondissant :

*Temps de calcul : 3 000 heures.*

*Espace de stockage : 1 To.*

## 3.3 Evolution, validation et utilisation du modèle ORCHIDEE

*Demande totale pour le thème :*

*Temps de calcul : 210 000 heures CPU sur Ada*

*Stockage : 21 To sur Ergon*

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

Joséfine Ghattas

*15 000 heures CPU sur Ada, 1 To sur Ergon*

Des tests récurrents seront effectués comme décrits dans le rapport de cette année, avec une consommation légèrement supérieure (15 000 heures)

### 3.3.2 Couplage LMDZ-ORCHIDEE

Frédérique Cheruy, Agnès Ducharne, Sonia Ait-Mesbah (thèse), Fuxing Wang (post-doc)

*Demande : 150 000 heures sur Ada, 10 To sur Ergon*

#### Mieux comprendre les rétroactions humidité du sol/climat.

L'humidité des sols peut moduler significativement les températures au voisinage du sol, soit directement en agissant sur le partitionnement chaleur latente/chaleur sensible dans l'atmosphère ou sur le transfert de chaleur dans le sol, soit indirectement en modifiant la structure de la couche limite rendant l'environnement propice ou non au déclenchement de la convection, selon les conditions climatiques/météorologiques locales. Sur le long terme, elle peut agir sur l'intensité et l'occurrence de vagues de chaleur. C'est toutefois une variable mal contrainte dans les modèles de climat dont les résultats peuvent différer grandement dans les régions où ces rétroactions sont en jeux. Une façon d'avancer sur la question est de produire et analyser des expériences numériques multi-modèles et coordonnées de sensibilité à l'humidité des sols. C'est le sens de notre participation au projet LS3MIP et plus particulier à ses volets LSMIP et GLACE/CMIP6.

1. Le premier (LSMIP) propose une inter-comparaison de modèles de sol forcés par un même forçage préparé avec soin et est programmé pour l'année à venir.
2. Le second volet GLACE/CMIP6 s'inspire du projet GLACE-CMIP5 auquel nous avons participé précédemment. Toutefois des questions de méthodologie se posent que nous aborderons au cours de l'année à venir. En particulier GLACE-CMIP5 a été fait avec un modèle de sol conceptuel à deux couches, nous avons maintenant un modèle de sol diffusif à 11 couches. Dans GLACE-CMIP5, la climatologie de l'humidité du sol était imposée à partir de simulations antérieures. Cette approche a pour conséquence d'une part de coupler des couches superficielles de sol qui peuvent être incohérentes avec la météorologie en surface (e.g. l'atmosphère produisant un événement pluvieux avec un sol sec en superficie à l'issue de l'évènement) et d'autre part de ne pas conserver l'eau dans le système. Ces artefacts peuvent fausser l'analyse des expériences, il est nécessaire de mieux en cerner les conséquences et de chercher à les réduire au maximum (par exemple ne contraindre que les couches plus profondes du sol et laisser les couches superficielles interagir librement avec l'atmosphère). Ce sera l'objet des travaux préliminaires de l'année à venir.

Pour ces projets, nous demandons :

- 20 ans de simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE en résolution VLR (96x95x79) :  $600h \times 20 ans = 12\ 000h$
- 20 ans de simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE en résolution MLR :  $1780h \times 20 ans = 35\ 600h$
- simulations avec ORCHIDEE forcé, à la résolution de 0.5°. Nous prévoyons 1 ensemble de 2 membres de 165 ans + 35 ans de spin-up pour chaque membre, donc 400 ans de simulations  $400 ans \times 20h = 8000h$
- heures pour le développement et le débogage :  $2000h$

*Temps de calcul total : 57 600h*

*Stockage : 4 T*

**Evaluation de LMDZOR en mode global** Les tests d'évaluation de LMDZOR intégrant les développements les plus récents se poursuivront de façon à disposer d'une version de référence qui sera être intégrée au modèle de climat de l'IPSL. Un développement d'ores et déjà identifié

concerne la représentation de la neige. Elle est essentielle pour représenter les climats présent et futur à l'échelle globale comme régionale en raison de l'impact de la neige sur le rayonnement, le débit des fleuves ou encore le climat aux hautes latitudes. Sa représentation a récemment été améliorée dans le modèle de sol ORCHIDEE et son couplage avec l'atmosphère a été également revu. La version actuelle du modèle souffre d'un biais froid qui s'étend sur l'ensemble des continents. Ce biais se manifeste également dans les éléments du bilan d'énergie à la surface (rayonnement SW, Flux latent) et est influencé par les hypothèses qui contrôlent le couplage entre l'atmosphère et la surface.

Nous effectuerons des simulations LMDZ6-ORC11 avec l'hydrologie 11 couches et la nouvelle physique, en résolution moyenne 144x142x79. En comptant le spinup, des tests courts et une simulation guidée de 10 ans, ça fera environ 30 ans de simulations.

*30 ans × 1780h = 53 400h*

*Stockage : 2 To*

### **Préparation d'une configuration zoomée-guidée de LMDZOR à haute résolution sur l'Europe. (SEEN, rôle du couplage sol/atmosphère dans les canicules en Europe).**

Nous effectuerons 50 ans de simulations avec une grille 144x142x39, avec LMDZ5B, Orchidee11-trunk, en mode guidé.

*Temps de calcul : 12 000 heures*

*Stockage : 2 T.*

### **Analyse du biais chaud sur les Grandes Plaines du Sud (SGP) des Etats Unis : Participation au projet CAUSES (Clouds Above the United States and Errors at the Surface).**

Nous poursuivrons l'analyse du biais chaud sur les grandes plaines. Les simulations CAUSES seront refaites avec les derniers développements de la physique atmosphérique (couche limite, convection, nuages) et du modèle de sol (nouvelle discrétisation verticale, nouvelles propriétés thermiques des sol).

Nous effectuerons 15 ans de simulations en résolution 144x142x79, avec LMDZ6, ORCH11-trunk

*Temps de calcul : 15 ans × 1780h = 26 700 heures*

*Stockage : 2 T.*

### **3.3.3 Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique**

Matthieu Guimberteau, Agnès Ducharne, Philippe Ciais

*Demande : 45 000 heures CPU sur Ada, 10 To sur Ergon*

Nous continuons les batteries de tests pour tester les développements du code de la version d'ORCHIDEE utilisée dans le cadre du projet IMBALANCE-P (Effects of phosphorus limitations on Life, Earth system and Society). Les objectifs sont de représenter le cycle du phosphore dans ORCHIDEE, d'étudier son évolution en interaction avec les changements de bilans en carbone, azote et eau dans les différents écosystèmes et d'évaluer l'impact d'un déséquilibre existant entre ces trois éléments sur la biosphère. Cette année, nous allons élaborer un rapprochement de plusieurs développements pour former une nouvelle branche de développement d'ORCHIDEE : la version MICT v6. Celle-ci inclut l'hydrologie multicouche, le changement d'utilisation des terres, le module de feux SPITFIRE, le module de carbone permafrost et le gel du sol, la neige multicouche, le routage

avec plaines d'inondations et le module de méthane des zones inondées. Différentes paramétrisations seront ensuite envisagées puisque nous voulons par la suite introduire les cycles de l'azote et du phosphore dans cette version. Des premières simulations à l'échelle globale en mode offline vont débiter ces prochains mois pour tester cette version d'ORCHIDEE. Au total, nous estimons nécessaires une quinzaine de simulations globales. Nous imposerons un spinup analytique de 350 ans pour équilibrer les stocks de carbone. La résolution spatiale sera de  $2^\circ \times 2^\circ$  pour des premiers tests puis de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  pour affiner nos analyses. Notre demande est donc :

*Temps de calcul :*

–  $2^\circ \times 2^\circ$  :  $(7 \text{ simulations} \times 100 \text{ ans} + 2 \text{ spinups} \times 350 \text{ ans}) \times 8h = 11\ 000 \text{ heures}$

–  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  :  $(10 \text{ simulations} \times 100 \text{ ans} + 2 \text{ spinups} \times 350 \text{ ans}) \times 20h = 34\ 000 \text{ heures}$

*Soit un temps de calcul total de :  $11\ 000 + 34\ 000 = 45\ 000 \text{ heures}$*

*Espace de stockage : 10 To*

### 3.4 Isotopes de l'eau

Camille Risi, Pierre Sepulchre, Yannick Donnadieu, Svetlana Betsyun

*Demande totale pour le thème :*

*Temps de calcul : 294 000 heures CPU sur Ada,*

*Stockage : 22 To sur Ergon*

#### 3.4.1 Mise à jour et pérennisation des isotopes dans LMDZ6 et dans le couplé IPSL

*Demande : 5 000 heures CPU sur Ada, 0 To sur Ergon*

Un travail a commencé en vue d'une pérennisation des isotopes de l'eau dans LMDZ. Après la partie dynamique dans laquelle les isotopes ont été implémentés de manière pérenne en 2015, nous souhaitons nous attaquer à la partie physique. Une fois l'algorithme mis au point et l'implémentation réalisée, de nombreux tests seront lancés en séquentiel, parallèle MPI et/ou Open MP, avec différents types de traceurs d'eau (isotopes classiques, coloriage de l'eau) et avec des options de LMDZ activant les différentes paramétrisations physique.

De manière plus générale, on espère disposer dans les mois ou années à venir du modèle couplé de climat complet de l'IPSL. Cela inclut la composante atmosphérique (LMDZ), continentale (ORCHIDEE) et océanique (NEMO). Anne Mouchet, post-doctorante au LSCE, a implémenté les isotopes dans NEMO. Camille Risi est en train de mettre à jour les isotopes dans des versions compatibles de LMDZ et d'ORCHIDEE. Des tests seront réalisés pour vérifier les simulations isotopiques LMDZ-ORCHIDEE dans différentes configurations.

Pour ces travaux de développement, de nombreuses simulations très courtes seront lancées. Nous estimons le besoin à *5 000 heures*, et peu d'outputs seront stockés.

#### 3.4.2 Evaluation des processus convectifs et nuageux

*Demande : 15 000 heures CPU sur Ada, 16 To sur Ergon*

Dans le cadre du post-doc d'Obbe Tuinenburg, une batterie de tests de sensibilité ont été réalisés en mode guidé par des réanalyses. Ces tests permettent de comprendre comment, pour une forçage dynamique donné, les paramétrisations influencent les profils d'humidification et de chauffage par la convection. Ces tests sont en train d'être reproduits en mode libre. Le but est de comprendre dans quelle mesure les profils d'humidification et de chauffage par la convection impactent la capacité de

LMDZ à simuler l'oscillation de Madden-Julian (MJO). Pour cela, 5 simulations de 10 ans seront réalisées :

$$5 \text{ simulations} \times 10 \text{ ans} \times 300h = 15\,000 \text{ heures.}$$

Comme nous devons stocker les tendances tri-dimensionnelles à l'échelle journalière voire horaires sur quelques périodes spécifiques, il faut compter 200 Go/an. Au total, nous demandons donc 16 To.

### 3.4.3 Applications paleo-climatiques et régionales

*Demande : 38 000 heures CPU sur Ada, 5 To sur Ergon*

Dans le cadre d'une collaboration avec des collègues de l'Université de Californie à Los Angeles, nous essayons de réaliser des simulations zoomées sur l'Indonésie et sur les Etats-Unis au dernier maximum glaciaire. Nous nous sommes malheureusement heurtés jusqu'à présent à des problèmes d'instabilité numérique que nous espérons résoudre courant 2016.

$$10 \text{ ans} \times 2 \text{ simulations} \times 1\,900h = 38\,000 \text{ heures}$$

*Stockage : 5 To*

### 3.4.4 LMDZ-iso au Cénozoïque

*Demande : 236 000 heures CPU sur Ada, 1 To sur Ergon*

Quatre paléogéographies reconstruites pour le Cénozoïque (55, 42, 30, 15 millions d'années avant notre ère) ont été utilisées afin de préparer des conditions aux limites et réaliser en 2015 des simulations « réalistes » des paléoclimats dans un contexte où topographie, températures océaniques, insolation et concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique étaient radicalement différentes de l'actuel. Pour chacune de ces simulations l'analyse a été effectuée pour établir les conditions aux limites qui influencent le plus le  $\delta^{18}O$  de la précipitation. Les conditions de surface continentale, i.e. albedo et rugosité liés à la distribution de la végétation sur le plateau sont apparues comme des facteurs déterminant pour l'intensité et la saisonnalité des précipitations et des valeurs de  $\delta^{18}O$  associées. L'origine des masses d'air qui arrivent sur l'Asie joue également un rôle important dans la composition du  $\delta^{18}O$ . Ce changement peut être détecté avec l'outil de « colorage d'eau » (water-tagging) de LMDZ-iso. Ce design expérimental nous conduira à réaliser une dizaine de simulation LMDZ-iso, dont la moitié prendra en compte le coloriage de l'eau (temps de calcul plus élevé) pour des régions-clefs (Paratethys, Océan Indien, Plateau Tibétain).

– Pour chacune des 5 périodes de Cénozoïque (actuel compris), nous réaliserons 2 simulations de 10 ans avec albédo différent. Chaque simulation zoomée prend environ 1900 heures/an  
Temps de calcul :  $5 \text{ paléogéographies} \times 10 \text{ ans} \times 1\,900h \times 2 \text{ albedos différent} = 190\,000 \text{ heures}$

– Certaines des simulations « réalistes » seront relancées avec le traçage de l'eau, pour étudier la rôle des changement de circulation atmosphérique sur le transport de l'humidité.  
Temps de calcul :  $2 \text{ paléogéographies} \times 3 \text{ ans} \times 1\,900h \times 4 \text{ pour le traçage} = 46\,000 \text{ heures}$

En terme de stockage, nous nous restreindrons aux sorties mensuelle et journalières (en vue d'utilisation des calculations retro-trajectoires), soit environ 5 To.

## 4 Méthode

La majeure partie de notre demande en ressources de calcul porte sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ et du modèle de surface continentale ORCHIDEE.

### 4.1 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 de 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-inciçage 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 TGCC dans le cadre du programme PRACE.

### 4.2 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 bio-géochimiques

### 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 de LMDZ. La version officielle d'ORCHIDEE est parallélisée en MPI. Une version hybride MPI-OpenMP est en cours de validation.

## Références

## Références

- [Hourdin et al., 2012] Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., Rio, C., Bony, S., Jam, A., Cheruy, F., Rochetin, N., Fairhead, L., Idelkadi, A., Musat, I., Dufresne, J.-L., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., and Roehrig, R. (2012). LMDZ5B : the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection. *Clim. Dyn.*, pages DOI 10.1007/s00382-012-1343-y.
- [Hourdin et al., 2006] Hourdin, F., Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron, F., Dufresne, J.-L., Fairhead, L., Filiberti, M.-A., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Krinner, G., Levan, P., Li, Z.-X., and Lott, F. (2006). The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim. Dyn.*, 27 :787-813.
- [Rio et al., 2013] Rio, C., Grandpeix, J.-Y., Hourdin, F., Guichard, F., Couvreux, F., Lafore, J.-P., Fridlind, A., Mrowiec, A., Bony, S., Rochetin, N., Roehrig, R., Idelkadi, A., Lefebvre, M.-P., and Musat, I. (2013). Control of deep convection by sub-cloud lifting processes : The alp closure in the lmdz5b general circulation model. *Clim. Dyn.*, 0 (9-10) :2271-2292. doi : 10.1007/s00382-012-1506-x.
- [Rio et al., 2009] Rio, C., Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., and Lafore, J.-P. (2009). Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land. *Geophys. Res. Lett.*, 36 :L07809, doi :10.1029/2008GL036779.
- [Risi et al., 2010] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., and Jouzel, J. (2010). Water stable isotopes in the LMDZ4 General Circulation Model : model evaluation for present day and past climates and applications to climatic interpretation of tropical isotopic records. *J. Geophys. Res.*, 115, D12118 :doi :10.1029/2009JD013255.