

## Demande DARI 2018 – 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. - février 2018

**Demande sur Ada à l'IDRIS : 3 198 000 heures CPU sur Ada, 339 Tera-octets sur Ergon.**

Comme depuis 3 ans, nous ne demandons pas d'heures sur Curie/Irène.

Notre demande est beaucoup plus forte que les années précédentes. Cela s'explique par la généralisation de la résolution dite « basse » du modèle LMDZ, qui est beaucoup plus coûteuse que la résolution anciennement utilisée dite « très basse ». De plus, un nouveau thème, qui concerne la mise au point de configurations de références et l'ajustement des paramètres libres, demande un très grand nombre de simulations.

## 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 des processus atmosphériques; evaluation et amélioration du modèle LMDZ . . . . .	3
1.3.2	Variabilité des températures en Atlantique tropical . . . . .	4
1.3.3	Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE . . . . .	4
1.3.4	Isotopes de l'eau . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Estimation des ressources consommées par les diverses configurations</b>	<b>5</b>
2.1	LMDZ . . . . .	5
2.1.1	Les différentes versions . . . . .	5
2.1.2	Les différentes résolutions . . . . .	5
2.1.3	Les différentes configurations . . . . .	6
2.1.4	Estimation des ressources . . . . .	6
2.2	ORCHIDEE et NEMO . . . . .	6
2.3	Espace de stockage . . . . .	7

<b>3</b>	<b>Demande détaillée</b>	<b>7</b>
3.1	Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ .	7
3.1.1	Mise au point de configurations de références et ajustement des paramètres libres . . . . .	7
3.1.2	Etude de l'organisation de la convection tropicale . . . . .	8
3.1.3	Impact de la stratosphère sur le climat . . . . .	10
3.1.4	Impact de la paramétrisation de la convection sur les phénomènes tropicaux .	11
3.1.5	Microphysique des nuages froids . . . . .	12
3.2	Variabilité des températures en Atlantique tropical . . . . .	13
3.3	Evaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE . . . . .	14
3.3.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE . . . . .	14
3.3.2	Couplages surfaces continentales - atmosphère . . . . .	14
3.3.3	Simulation des hautes latitudes et des cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE	15
3.4	Isotopes de l'eau . . . . .	16
3.4.1	Développements techniques . . . . .	16
3.4.2	Evaluation des processus nuageux, applications paleo-climatiques et régionales	16
3.4.3	LMDZ-iso au Cénozoïque . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Méthode</b>	<b>18</b>
4.1	Le modèle LMDZ . . . . .	18
4.2	Le modèle ORCHIDEE . . . . .	18

## 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 :

thème	calcul sur Ada (k heures CPU)	stockage sur Ergon (To)
<b>Etude des processus atmosphériques; evaluation et amélioration du modèle LMDZ</b>	<b>2 813</b>	<b>300</b>
dont ajustement de paramètres	2 000	100
dont organisation de la convection	202	60
dont stratosphère	375	120
dont convection	152	8
dont représentation des nuages froids	84	12
<b>Variabilité des températures en Atlantique tropical</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
<b>Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE</b>	<b>302</b>	<b>18</b>
dont suivi des versions	54	1
dont couplages surfaces continentales - atmosphère	184	7
dont cycles bio-géochimiques	64	10
<b>Isotopes de l'eau</b>	<b>80</b>	<b>20</b>
dont entretien	5	0
dont processus nuageux et applications régionales	18	10
dont LMDZ-iso au Cénozoïque	57	10
<b>Total</b>	<b>3 198</b>	<b>339</b>

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

- 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.

### 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 et sur 1 an (allocation A4) sont détaillées dans le tableau 1.

#### 1.3.1 Etude des processus atmosphériques; evaluation et amélioration du modèle LMDZ

Le modèle LMDZ est utilisé pour mieux comprendre certains processus atmosphériques et mieux prévoir leur évolution en changement climatique. En retour, cette compréhension est mise au service de l'évaluation et de l'amélioration de ce modèle.

## **Mise au point de configurations de références et ajustement des paramètres libres**

Le contenu physique du modèle LMDZ est en constante évolution. Régulièrement ces nouveaux développements donnent lieu à l'établissement d'une nouvelle configuration de référence largement distribuée en dehors du laboratoire. Une phase d'ajustement des paramètres libres est nécessaire pour chaque nouvelle configuration. Pour cet ajustement, nous comptons cette année commencer à appliquer de nouvelles méthodes plus automatiques, issues de la communauté UQ (Uncertainty Quantification) (section 3.1.1).

## **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 3.1.2).

## **Impact de la stratosphère sur le climat**

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. Elle s'intéresse en particulier à l'effet de la stratosphère. (section 3.1.3)

## **Convection et phénomènes tropicaux**

La représentation de la convection profonde dans LMDZ est un chantier permanent. Cette année, l'influence de la représentation de la convection profonde sur la variabilité des pluies tropicales sera particulièrement étudiée (section 3.1.4).

## **Microphysique des nuages froids**

Il s'agit d'améliorer les paramétrisations associées à la représentation microphysique des nuages froids, aussi bien dans la haute troposphère qu'en Antarctique (section 3.1.5).

### **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 Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE**

Les processus à la surface des continents constituent un élément clef du système climatique. Le modèle de surface continentale ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est utilisé pour mieux comprendre les processus hydrologiques à la surface des continents et leur couplage avec l'atmosphère, et pour mieux prévoir leur évolution en changement climatique. En retour, cette compréhension est mise au service de l'évaluation et de l'amélioration du modèle ORCHIDEE et de son couplage avec LMDZ.

## **Suivi des versions successives d'ORCHIDEE**

Il est nécessaire de vérifier que les versions successives du modèle ORCHIDEE fonctionnent bien (section 3.3.1).

**Couplages surfaces continentales - atmosphère** Ces travaux visent à mieux comprendre les processus de couplage entre surfaces continentales et atmosphère, ainsi qu'à évaluer et améliorer la représentation de ces processus dans LMDZ-ORCHIDEE (section 3.3.2).

**Simulation des hautes latitudes et cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE** Le modèle ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est aussi un outil adapté pour mieux comprendre et prévoir l'évolution future des cycles hydrologiques, bio-géochimiques et des ressources en eau. Cette année, les tests sur la version haute latitude d'ORCHIDEE se poursuivront, ainsi que les développements liés à la représentation des cycles de l'azote et du phosphore (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. Nous explorons la possibilité d'utiliser les mesures de compositions isotopiques de l'eau pour mieux évaluer les modèles de climat en général, et LMDZ en particulier, et pour des applications paléo-climatiques (section 3.4). Cette année, les développements techniques se poursuivront, ainsi que l'étude de la signature isotopique de la surrection du plateau tibétain au cours du Cénozoïque.

## 2 Estimation des ressources consommées par les diverses configurations

### 2.1 LMDZ

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

Des optimisations récentes dans les paramétrisations physiques de LMDZ ont permis de faire baisser significativement les ressources consommées pour une configuration donnée par rapport aux années précédentes.

#### 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 inclut 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 est utilisée pour CMIP6. Elle se base sur LMDZ5B, mais inclut 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.

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

- R144x142 est la résolution « basse » ou « LR » (low resolution), anciennement appelée « moyenne » dans CMIP5.
- R96x95 est la résolution « très basse » ou « VLR » (very low resolution), anciennement appelée « basse » dans CMIP5. Elle permet d'économiser du temps de calcul et est utilisée quand les résultats ne sont pas crucialement sensibles à la résolution horizontale.
- R96x71 est encore plus basse que la résolution très basse. Elle permet d'économiser du temps de calcul et n'est plus utilisée que pour les simulations isotopiques.

Chacune de ces résolutions peut être utilisée en mode zoomé, dans lequel la grille devient irrégulière. Par exemple, R144x142-zoomé 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 températures 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, 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 sur 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.

Dans le cas de simulations guidées, il est possible de devoir rajouter 10% de consommation.

Pour LMDZ6 en résolution LR, les estimations peuvent varier selon le nombre de variables sorties et selon les paramétrisations utilisées. On donne donc une fourchette de 1 000h à 1 200h par an de simulation.

## 2.2 ORCHIDEE et NEMO

- Quand ORCHIDEE est utilisé seul, le temps de calcul est de 1h/an pour une grille de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  sur 64 coeurs.

configuration de LMDZ → grille horizontale ↓	LMDZOR	LMDZ aquaplanète SST uniforme	LMDZ-iso
R96x71 (VVLr)	-	-	LMDZ5B : 300h
R96x95 (VLR)	LMDZ5A : 150h LMDZ6 : 600h		-
R144x142 (LR)	LMDZ6 : 1 000h à 1 200h	LMDZ6 : 900h	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. Les cases non renseignées sont celles pour lesquelles aucune simulation n'est prévue dans cette demande.

- 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 ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ

*Demande totale pour le thème : 2 813 000 heures CPU sur Ada, Stockage : 300 To sur Ergon*

#### 3.1.1 Mise au point de configurations de références et ajustement des paramètres libres

Frédéric Hourdin, Ionéla Musat, Laurent Fairhead

*Demande : 2 000 000 heures CPU sur Ada, 100 To sur Ergon*

Le contenu physique du modèle LMDZ est en constante évolution, suite à des avancées dans la compréhension des processus physiques et dans leur paramétrisation. Régulièrement ces nouveaux développements donnent lieu à l'établissement d'une nouvelle configuration de référence largement distribuée en dehors du laboratoire.

L'évolution constante du contenu physique du modèle LMDZ nécessite des phases d'ajustement des paramètres libres, afin d'obtenir une nouvelle version de référence utilisable pour les applications climatiques. Ce "tuning" des paramètres libres, intrinsèque à la modélisation numérique en général, est rendu particulièrement sensible pour les modèles climatiques du fait que les contraintes exigées en terme de précision sur la représentation des échanges radiatifs sont très supérieures aux incertitudes provenant de la représentation de la convection et des nuages ([Hourdin et al., 2017]). Jusque récemment, et faute de formalisation suffisante de cette question dans la communauté, ce tuning est réalisé de façon relativement manuelle ou empirique. En pratique, à partir d'un certain jeu de paramètres, on lance une dizaine de simulations, en changeant à chaque fois un paramètre

particulièrement important pour le bilan radiatif (taux d’auto-conversion de l’eau nuageuse en pluie, vitesse de chute des cristaux de glace, taille des gouttes, entraînement convectif ...) et on essaie sur la base de diagnostics systématiques (largement automatisés ces deux dernières années pour la mise au point de la version CMIP6 du modèle), de choisir des nouvelles valeurs de ces dix paramètres permettant de se rapprocher des observations (notamment des variations spatiales du rayonnement moyen absorbé et réémis en moyenne sur l’année). A partir de cette nouvelle configuration, on itère en faisant à nouveau varier les mêmes dix paramètres ou éventuellement d’autres. Cette méthode a permis des améliorations notables dans la climatologie des dernières versions du modèle LMDZ, mais reste très lourde à mettre en oeuvre, avec une répétition de phase de simulations et d’évaluation.

Or il existe aujourd’hui des méthodes plus automatiques, issues de la communauté UQ (pour Uncertainty Quantification), pour réaliser ce type de tuning. En pratique, pour un jeu d’une dizaines de paramètres, et en se donnant a priori une gamme de valeurs possibles sur chacun d’eux, on tire de façon judicieuse une fois pour toute quelques centaines de vecteurs de ces dix paramètres. On calcule les métriques cibles du tuning sur chacune de ces centaines de simulations. On applique ensuite un outil statistique, appelé émulateur ou méta-modèle, qui permet de prédire la valeur de ces métriques en n’importe quel point de l’espace des paramètres.

Nous avons commencé à nous approprier ces outils UQ dans le cadre d’une ANR high-tune (CNRM/LMD) dans laquelle l’approche est appliquée au calage des paramétrisations en mode unidimensionnel par rapport à des résultats de simulations LES tri-dimensionnelles. Dans ce cas, les centaines de simulations 1D sont effectuées typiquement sur un ordinateur portables en 1 heure. L’étape suivante consiste à appliquer ces approches directement sur le modèle global. Nous bénéficions pour ce travail de la collaboration de Daniel Williamson [Williamson et al., 2013, Williamson et al., 2015], un spécialiste de ces questions, un des plus avancés sur l’application de telles méthodes au réglage de modèles globaux.

En pratique, il faut donc réaliser quelques centaines de simulations avec le modèle global. D’expérience, quelques années de simulations suffisent. On commencera par explorer la méthode avec la configuration basse résolution du modèle, en 144x142x79. En réalisant typiquement 500 simulations de 4 ans chacune, soit 2000 ans de simulations.

$$\implies 500 \times 4 \text{ ans} \times 1\,000 \text{ h} = 2\,000\,000 \text{ heures}$$

*Stockage : 100 To sur Ergon*

La stratégie d’échantillonnage peut être choisie de façon à commencer à travailler même avec seulement une partie des simulations. On réalisera donc une première tranche de 200 simulations pour vérifier la faisabilité avant de compléter le jeu de simulations.

### 3.1.2 Etude de l’organisation de la convection tropicale

Sandrine Bony, Max Popp (Postdoc), Addisu Semie (post-doc), David Coppin (post-doc)

*Demande : 216 500 h CPU sur Ada, 60 To sur Ergon*

**Étude de l’influence sur la circulation de grande échelle de l’organisation de la convection dans l’ITCZ** Différentes études numériques (e.g. [Bretherton et al., 2005, Coppin and Bony, 2015, Wing et al., 2017]) et observationnelles ([Tobin et al., 2012, Tobin et al., 2013, Holloway et al., 2017]) ont montré que l’organisation spatiale de la convection avait une influence sur l’état moyen de l’atmosphère à grande échelle. Il est également possible que l’organisation de la convection dans la zone de convergence intertropicale (ZCIT) joue aussi un rôle dans la circulation tropicale à grande

échelle ([Bony et al., 2016]), mais cette hypothèse reste à vérifier. Pour tester cette hypothèse, nous proposons de réaliser une série de simulations avec le modèle de circulation générale atmosphérique LMDZ5A-MR dans lesquelles nous modifierons artificiellement l’organisation spatiale de la convection dans la ZCIT et examinerons l’influence sur la circulation de grande échelle. Pour cela, nous réaliserons des simulations idéalisées en mode aquaplanète. Nous avons développé une méthode permettant de forcer différentes structures spatiales de la convection en imposant différentes structure spatiales de l’évaporation. Pour atteindre notre but, nous réaliserons un grand ensemble de simulations de courte durée pour tester une diversité d’organisations spatiales de la convection suffisante pour pouvoir identifier les principaux mécanismes par lesquels cette organisation influence la circulation à grande échelle. Il nous faudra utiliser impérativement la version du modèle à résolution moyenne pour pouvoir prescrire des champs d’organisation suffisamment bien résolus. En détail, nous proposons de réaliser 120 simulations de deux années sur des aquaplanètes avec des températures de surface prescrites :

$$\Rightarrow 120 \times 2 \text{ années} \times 500 \text{ h} = 120\,000 \text{ heures}$$

**Étude des mécanismes sous-jacents à l’organisation de la convection en bande zonale** Dans des simulations en équilibre radiatif-convectif, la convection a tendance à s’organiser en clusters, créant des états agrégés (e.g. [Muller and Bony, 2015, Wing et al., 2017]). Cette forme d’organisation de la convection a un effet significatif sur l’état moyen de l’atmosphère et induit des circulations spécifiques à méso-échelle qui maintiennent l’état agrégé. Cependant sur terre le mode d’organisation dominant et celui d’une bande zonale, la ZCIT. Cette organisation en bande zonale semble être liée au gradient méridional de température de surface (e.g. [Schneider, 1977, Oueslati and Bellon, 2013]) ou à la rotation (e.g. [Kirtman and Schneider, 2000, Chao and Chen, 2004]) mais il n’est pas clair si les mécanismes qui tendent à organiser la ZCIT en bande sont les mêmes que ceux qui tendent à organiser la convection en cluster dans les simulations en équilibre radiatif-convectif. Pour étudier cette question, nous proposons de réaliser des simulations idéalisées dans lesquelles le modèle est initialisé par un état agrégé en cluster convectif et des gradients de température et d’insolation imposés. Dans un deuxième temps, nous réaliserons les simulations inverses, c’est-à-dire que le modèle sera initialisé par un état avec ZCIT et les gradients d’insolation et de température seront supprimés. Si nécessaire, nous réaliserons des simulations similaires mais en couplant l’atmosphère à une couche de mélange océanique. Nous réaliserons toutes ces simulations avec le modèle de circulation générale LMDZ5A-MR en configuration aquaplanète. Cela nécessitera 1 simulation de 100 ans :

$$\Rightarrow 100 \text{ ans} \times 500 \text{ h} = 50\,000 \text{ heures}$$

**Participation au “ Radiative-Convective Equilibrium Model Intercomparison Project ” (RCEMIP)** RCEMIP est un projet international (soutenu par le Grand Challenge « Clouds, Circulation and Climate Sensitivity » du WCRP) dédié à la comparaison des modèles atmosphériques en configuration d’équilibre radiatif-convectif, c’est-à-dire avec une insolation et/ou des températures de surface spatialement uniformes et sans rotation ([Wing et al., 018]). Ce type de simulations est reconnu depuis longtemps comme permettant d’étudier très efficacement de nombreux aspects de la physique de l’atmosphère tropicale, et notamment l’organisation spatiale de la convection (e.g. [Emanuel et al., 2014]). En plus, une intercomparaison, permet de comparer les modèles à un niveau très élémentaire en supprimant l’effet des inhomogénéités spatiales imposées et les circulations induites. Les objectifs de RCEMIP sont d’évaluer la robustesse de la réponse des nuages, de la circulation atmosphérique et de l’organisation spatiale de la convection à un changement de température de la surface. Une particularité de RCEMIP est qu’il permettra de comparer dans des

configurations identiques les résultats de modèles de circulation générale et de modes explicites de nuages (CRMs). Le LMD participera à cet effort en réalisant les simulations proposées par RCEMIP avec les modèles LMDZ5A-LR et LMDZ6-LR :

- 6 simulations de 5 années avec LMDZ5A-LR :  
 $\implies 6 \times 5 \text{ années} \times 150 \text{ h} \simeq 5\,000 \text{ heures}$
- 6 simulations de 5 années avec LMDZ6 :  
 $\implies 6 \times 5 \text{ années} \times 900 \text{ h} = 27\,000 \text{ heures}$

*Demande : total : 120 000 heures + 50 000 heures + 5 000 + 27 000 heures = 202 000 heures  
CPU sur Ada*

*Stockage : 60 To sur Ergon*

### 3.1.3 Impact de la stratosphère sur le climat

F. Lott, S. Mailler, L. Guez, D. Cugnet, B. Ribstein (post-doc)

*Demande : 375 000h CPU sur Ada, 120 To sur Ergon*

**Rôle de la stratosphère dans la variabilité ENSO** En 2018, nous allons continuer d'analyser comment comment la stratosphère contribue à la régionalisation du changement climatique, et en particulier estimer le rôle de la QBO et des réchauffements stratosphériques soudains. Nous allons pour cela analyser les teleconnections entre les différentes régions du globe suivant des scénarios où la stratosphère est dégradée (et dans des configuration "La nina" versus ENSO extrêmes). On va pour cela diminuer l'amplitude des ondes issues de la convection, ce qui va faire disparaître la QBO, et augmenter celles dues aux fronts, ce qui va modifier l'amplitude des réchauffements stratosphériques soudains. Nous contrasterons les résultats obtenus aux erreurs corrigées dans LMDz entre la version utilisée durant CMIP5 et celle utilisée durant CMIP6. En effet, aux moyennes latitudes cette erreur est en partie contrôlée par la représentation des montagnes d'échelles sous-maille, une représentation avec laquelle il est facile de jouer. Ces études sont en support du projet GOTHAM (ANR-Belmont Forum) nous occupant les 4 prochaines années.

- Pour ces tâches, nous allons avoir besoin de tester la réponse du modèle aux ENSO extrêmes en configuration de stratosphère dégradée, ce qui va nous demander de contraster des expériences en forçage perpétuels, 2 ensembles correspondant à l'année « neutre » 2002, et un autre à l'ENSO extrême de 1995. Comme nous cherchons des impacts sur la variabilité basse fréquence aux moyennes latitudes, des expériences d'une cinquantaine d'années sont nécessaires, à la résolution nominale (e.g. CMIP6) 144x142x79 :  
 $\implies 2 \text{ expériences} \times 50 \text{ ans} \times 1\,200 \text{ h} = 120\,000 \text{ heures}$

**Amélioration de la paramétrisation des ondes de gravité** En parallèle à ces exercices de sensibilité, nous allons continuer à améliorer le réalisme des ondes de gravité, et en particulier vis à vis d'une nouvelle génération d'observations, celles concernant la propagation des infrasons (projet européen ARISE-2). Ces observations sont importantes car il y a relativement peu d'instruments qui mesurent directement les champs dynamique dans la haute stratosphère et dans la mésosphère. Ces régions forment pourtant un guides d'onde pour les infrasons, et à l'heure actuelle les propagations calculées en utilisant les réanalyses de l'ECMWF font des erreurs importantes sur les temps d'arrivée. Nous avons montré que ces erreurs pouvaient potentiellement être corrigées en en ajoutant aux

champs des réanalyses des champs d'ondes de gravité prédits par les schémas de paramétrisation utilisés dans LMDz, mais dans des configurations qui ne sont pas encore tout à fait acceptable par le modèle. Il semble par exemple qu'il faille émettre des ondes de gravité depuis tout les niveaux de l'atmosphère (pas uniquement depuis la troposphère) mais cela doit être mieux testé.

- Pour cela, nous réaliserons une dizaine d'expériences de modifications des paramétrisations des ondes de gravité. Elles dureront 15 ans en vue de les rendre plus compatible avec les mesures infrason

$\Rightarrow 10 \text{ simulations} \times 15 \text{ ans} \times 1 \text{ 200 h} = 180 \text{ 000 heures}$

*Demande : total : 120 000 heures + 180 000 heures = 300 000 heures*

*Stockage : Si nous optimisons l'archivage, environ 100 To devraient être suffisant.*

### 3.1.4 Impact de la paramétrisation de la convection sur les phénomènes tropicaux

*Demande : 152 000 h CPU sur Ada, 8 To sur Ergon*

#### Couches de réchauffement diurne, flux à l'interface et convection

Jean-Philippe Duvel, Hugo Bellenger, Lionel Guez, postdoc COCOA

Dans le cadre de l'ANR COCOA (Comprehensive Coupling Approach for the Ocean and the Atmosphere), il est prévu de lancer une étude sur la représentation des interactions océan-atmosphère dans le modèle LMD-Z, en particulier sur l'impact des couches de réchauffement diurne (CRD) sur le déclenchement de la convection.

Une nouvelle paramétrisation des CRD sera implémentée dans la dernière version de LMD-Z sur la base de l'étude de [Bellenger et al., 2017]. Cette nouvelle paramétrisation des CRD comporte également la représentation des lentilles d'eau douce résultant des précipitations. Une première phase de validation de cette modification sera faite à partir d'un cas 1D provenant des observations de Cindy-Dynamo. Une attention particulière sera portée sur la réponse du modèle d'atmosphère, en particulier l'action des CRD sur la structure de la couche limite et sur la convection peu profonde. Comme ces CRD se développent pendant les phases de forte stabilité statique, on testera également que le modèle ne provoque pas de déclenchement intempestif de la convection profonde.

L'impact de ces modifications de l'interface océan-atmosphère sur la représentation du climat sera évalué sur des simulations globales de type AMIP avec différentes résolutions et/ou avec des zooms sur certaines régions océaniques particulièrement sujettes au CRD. Un accent particulier sera mis sur l'analyse des modifications du climat tropical et de sa variabilité.

- 4 simulations de 12 ans avec LMDZ6 144x142x79.

$\Rightarrow 4 \text{ simulations} \times 12 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} = 53 \text{ 000 h}$

*Stockage : 4 To.*

#### Impact du transport et des nuages convectifs sur la distribution et la variabilité des précipitations tropicales

Catherine Rio, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix

En 2018 les développements visant à améliorer le transport convectif d'une part et la représentation des nuages convectifs d'autre part vont se poursuivre. Il sera nécessaire d'analyser et de

comprendre leur impact sur la distribution, l'intensité et la variabilité des pluies tropicales, point faible de la version du modèle LMDZ figée pour CMIP6. Pour cela, il sera nécessaire de réaliser des séries de simulations globales de plusieurs années pour tester les développements et les versions ré-ajustées correspondantes du modèle.

- une trentaine de tests de sensibilité aux processus physiques sur des périodes de 3 ans, avec LMDZ6 en  $144 \times 142 \times 79$ .

$\Rightarrow 30 \text{ simulations} \times 3 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} = 99 \text{ 000 h}$

*Stockage : 4 To.*

### 3.1.5 Microphysique des nuages froids

*Demande totale pour le sous-thème : 84 000 h CPU sur Ada, 12 To sur Ergon*

## Brumes et précipitations en Antarctique

J.-B. Madeleine, F. Lemonnier (thèse)

*Demande : 25 000 h CPU sur Ada, 6 To sur Ergon*

Comme mentionné dans le rapport, ce que nous avons prévu pour la demande DARI 2017 n'a pas été réalisé dans les temps. Par conséquent, nous reportons une demande similaire pour DARI 2018, que nous résumons ci-dessous.

Dans le cadre du projet ANR APRES3 et de la thèse de Florentin Lemonnier, nous avons réalisé plusieurs tests 1D et 3D de développement dans le modèle LMDz portant sur la physique des nuages et de la précipitation dans le modèle LMDz. Nous voudrions valider par des simulations haute résolution longues sur Ada ces développements.

Un premier développement porte sur la formation des brumes sur le continent Antarctique à la station de mesure Concordia. Il nous faudra en tout 3 simulations de deux ans (sur la période 2015–2016 de la campagne d'observation de l'ANR APRES3), correspondant à 3 paramétrisations différentes (l'ancienne et deux versions de la nouvelle) guidées à chaque fois en vent, le tout en  $144 \times 142 \times 79$  avec notre version modifiée de LMDz 6.

$\Rightarrow 3 \times 2 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} \simeq 7 \text{ 000 heures.}$

Nous allons également réaliser des simulations portant sur la précipitation dans le modèle à l'échelle du continent Antarctique mais aussi plus spécifiquement à la base française de Dumont D'Urville, où de nombreuses mesures de précipitation ont été réalisées par radar polarimétrique et peuvent être comparées aux profils de précipitation, en  $\text{mm hr}^{-1}$ , du modèle. Nous avons déjà réalisé des simulations légères qui ont été concluantes et publiées l'année dernière ([Grazioli et al., 2017]). Nous voudrions ici étendre ces simulations sur l'ensemble du continent Antarctique avec une meilleure résolution pour évaluer nos développements sur l'ensemble du continent. Pour se comparer aux observations satellite et sur site, nous voudrions donc réaliser 4 simulations guidées zoomées : 2 sur la période 2015–2016, et 2 sur la période 2006–2011 en  $144 \times 142 \times 79$ , toujours avec notre version modifiée de LMDz 6.

$\Rightarrow (2 \text{ simulations} \times 2 \text{ ans} + 2 \text{ simulations} \times 6 \text{ ans}) \times 1 \text{ 100 h} \simeq 18 \text{ 000 heures.}$

*Stockage : 6 To sur Ergon*

## Représentation des nuages hauts

M. Bonazzola

*Demande : 37 000 h CPU sur Ada, 4 To sur Ergon*

L'an prochain, nous continuerons d'essayer d'améliorer la représentation des nuages hauts de LMDZ, en utilisant des observations pour contraindre des paramètres encore mal contraints.

L'an dernier, nous avons testé différentes paramétrisations de vitesse de sédimentation de cristaux de glace de la littérature. En particulier nous avons testé l'impact d'une dépendance de la vitesse de chute à la température. Nous envisageons de poursuivre cette étude de manière plus systématique, en faisant dépendre la vitesse de chute des cristaux de glace de la température, du contenu en glace et de l'origine du cirrus (convective ou in situ).

- Pour chaque paramétrisation envisagée (disons 10), deux ans de simulations seront réalisées à la résolution 144x142x79, de manière à avoir suffisamment de statistiques pour l'étude des systèmes nuageux.

$\Rightarrow 10 \times 2 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} = 22 \text{ 000 heures.}$

- Dans un deuxième temps nous souhaitons tester différentes paramétrisations de rayon effectif des cristaux de glace. Ce paramètre a un rôle important car il détermine l'émissivité nuageuse. Pour chaque paramétrisation testée (disons 5), il sera sans doute nécessaire de "retuner" le modèle, c'est-à-dire d'ajuster un certain nombre de paramètres pour l'obtention de l'équilibre radiatif. Cette procédure nécessite elle aussi quelques années de simulation.

$\Rightarrow 5 \times 2 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} + 4000h \text{ pour le retunage} = 15 \text{ 000 heures.}$

Sur la base de ces simulations, nous sélectionnerons les paramétrisations qui permettent de reproduire au mieux les caractéristiques des systèmes nuageux observés de la haute troposphère.

*Stockage : 4 To sur Ergon*

## Représentation des nuages bas Antarctique

M. Bonazzola

Pour étudier la réponse future des nuages à la fonte de glace, nous souhaitons réaliser des simulations RCP8.5 et RCP4.5 d'une dizaine d'années, en résolution 144x142x79.

$\Rightarrow 2 \times 10 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} = 22 \text{ 000 heures.}$

*Stockage : 2 To sur Ergon*

*Demande : total : 25 000+37 000+22 000=84 000 h ; 6+4+2= 10 To sur Ergon*

### 3.2 Variabilité des températures en Atlantique tropical

*Demande totale pour le thème :*

*Demande : 3 000 h CPU sur Ada ; 1 To sur Ergon*

Marta Martin del Rey et Alban Lazar

La variabilité de l'Atlantique tropicale est régie par deux modes couplés air-mer nommés Mode Méridien (MM) et Mode Equatorial (ME) au printemps et en été respectivement. Plusieurs études suggèrent que l'ENSO puisse modifier la variabilité Atlantique tropicale et par conséquent l'apparition et les caractéristiques du MM et ME. Néanmoins, les caractéristiques d'ENSO (type, intensité,

durée) semblent influencer sur la téléconnection atmosphérique et elles pourraient, par conséquent, avoir un impact différent sur le MM and le ME. De plus, les changements de l'état moyen de l'Atlantique Tropical pourraient être aussi cruciaux pour la réponse à la contrainte d'ENSO.

On réalisera des simulations de deux ans chacune avec le modèle NEMO, forcé par des anomalies du vent associés à deux états différents d'ENSO (signal Central ou Est) dans l'Atlantique Tropical, ayant lui même deux états possibles chauds ou froids (C, F) :

- 5 expériences de sensibilité « C-ENSO-TAC » : On forcera par des anomalies du vent dérivé du composite vent du C-ENSO sur un état moyen chaud de l'Atlantique tropical.
- 5 expériences de sensibilité « C-ENSO-TAF » : On forcera par des anomalies du vent dérivé du composite vent du C-PENSO sur un état moyen froid de l'Atlantique tropical.
- 5 expériences de sensibilité « E-ENSO-TAC » : On forcera par des anomalies du vent dérivé du composite vent du E-PENSO sur un état moyen chaud de l'Atlantique tropical.
- 5 expériences de sensibilité « E-ENSO-TAF » : On forcera par des anomalies du vent dérivé du composite vent du E-PENSO sur un état moyen froid de l'Atlantique tropical.

$\Rightarrow 4 \text{ types d'expériences} \times 5 \text{ expériences} \times 2 \text{ ans} \times 80h \text{ CPU} \simeq 3\,000 \text{ h}$

$\text{Stockage} = 40 \text{ années} \times 6 \text{ Go} = 240 \text{ Go} \simeq 1 \text{ To}$

### 3.3 Evaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE

*Demande totale pour le thème :*

*Demande : 238 000 heures CPU sur Ada, 18 To sur Ergon*

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

Joséfine Ghattas

Des tests récurrents seront effectués comme décrits dans le rapport de cette année. Certains de ces tests sont également utilisés pour l'évaluation scientifique des modèles.

L'augmentation des heures demandées par rapport aux années précédentes est liée au fait que les tests par défaut sont désormais effectués en résolution 144x142x79 d'une part et que d'autre part il est prévu d'intégrer de nouveaux développements liés au cycle de l'azote dans la version Orchidée de référence.

- Simulations forcées :

*5 000 heures CPU sur Ada*

- Simulations couplées LMDZOR :

*40 ans  $\times$  1 100h + 5 000 heures pour le débogage = 49 000h*

*Demande : 54 000 heures CPU sur Ada, 1 To sur Ergon*

#### 3.3.2 Couplages surfaces continentales - atmosphère

Frédérique Cheruy, Agnès Ducharne, Fuxing Wang (post-doc), Claire Magand (post doc)

*Demande : 184 000 heures sur Ada, 7 To sur Ergon*

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

L'intensité du contrôle exercé par l'humidité superficielle du sol sur l'évapo-transpiration a d'importantes conséquences pour les climats régionaux et leur réponse à l'augmentation de CO<sub>2</sub>. Lorsque l'humidité du sol s'éloigne de la saturation, l'évaporation de l'eau contenue dans le sol est plus difficile. Dans les paramétrisations actuelles, une résistance à l'évaporation du sol nu devrait permettre de rendre compte de ce phénomène. Le modèle LMDZOR semble très sensible à ce paramètre. Des études de sensibilité sont prévues pour mieux comprendre les mécanismes expliquant cette sensibilité, et éventuellement proposer une nouvelle paramétrisation de l'évaporation en régime peu humide. Ces études seront évaluées à l'aide de simulations guidées multi-annuelles LMDZOR comparées à des jeux d'observations satellitales. Ces simulations seront analysées avec une approche qui permet de documenter à l'échelle régionale le rôle conjoint du rayonnement et de l'humidité superficielle des sols sur l'évaporation.

- Pour cela, nous souhaitons réaliser 3 expériences de 10 ans. On ajoute 10% de consommation supplémentaire pour le guidage.

$\Rightarrow 3 \text{ simulations} \times (10 \text{ ans} + 2 \text{ ans spin-up}) \times 1100h \times 1.1 \text{ guidage} + 2000 \text{ pour le débogage} \simeq 46\,000 \text{ h}$

*Stockage : 3 T*

## Évaluation des composantes du bilan d'énergie à la surface en lien avec les développements des paramétrisations de la physique atmosphérique et du modèle de surface sur le site du SIRTA

Pour poursuivre les analyses sur ce sujet, nous avons besoin d'effectuer des simulations zoomées guidées d'une quinzaine d'années pour chaque jeu de paramétrisation. Le rôle des hétérogénéités spatiales dans la maille du modèle et la représentativité des mesures ponctuelles pour les flux turbulent sera abordée. Des tests de sensibilité à la résolution du modèles seront effectués.

Nous prévoyons donc :

- 3 expériences de 15 ans à très basse résolution (96x95x79) :

$\Rightarrow 3 \text{ simulations} \times 15 \text{ ans} \times 600h \times 1.1 \text{ guidage} + 2000 \text{ pour le débogage} \simeq 32\,000 \text{ h}$

- 2 expériences de 15 ans à basse résolution (144x142x79) :

$\Rightarrow 2 \text{ simulations} \times 15 \text{ ans} \times 1100h \times 1.1 \text{ guidage} + 2000 \text{ pour le débogage} \simeq 38\,000 \text{ h}$

*Stockage : 2 T*

**Impact de la variabilité interne liée au processus locaux dans la représentation des vagues de chaleur** Pour évaluer la part de variabilité interne liée aux processus locaux dans la représentation des vagues de chaleur, nous proposons d'effectuer un jeu de simulations d'ensemble avec une configuration zoomée et guidée à l'extérieur du zoom par des analyses.

- 100 simulations d'une année, zoomée et partiellement guidée, en très basse résolution (96x95x79) :

$\Rightarrow 100 \text{ simulations} \times 600h \times 1.1 \text{ guidage} + 2000 \text{ pour le débogage} = 68\,000 \text{ h}$

*Stockage : 2 T*

*Demande : total : 46 000+32 000+38 000+68 000=184 000 h ; 3+2+2= 7 To sur Ergon*

### 3.3.3 Simulation des hautes latitudes et des cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE

Matthieu Guimberteau, Philippe Ciais, Fabienne Maignan, Albert Jornet-Puig et Zun Yin (post-doc)

*Demande : 64 000 heures CPU sur Ada, 10 To sur Ergon*

Le modèle MICT sera utilisé pour une étude idéalisée afin de tester la sensibilité de l'infiltration de l'eau dans le sol aux fréquences de précipitations du forçage atmosphérique. Cette étude demandera de tester plusieurs scénarios de fréquences de pluies allant de la demi-heure à 3h et ceci sur plusieurs régions du globe à régimes de pluies différents.

Le modèle de phosphore-azote ORCHIDEE-CNP est à présent opérationnel et va demander plusieurs tests de sensibilité avant d'être implémenté dans le modèle ORCHIDEE-MICT pour mener à bien les objectifs du projet IMBALANCE-P (Effects of phosphorus limitations on Life, Earth system and Society). L'une des applications globales du modèle ORCHIDEE-CNP sera notamment l'étude de la sensibilité de l'hydrologie à la prise en compte ou non de la disponibilité en nutriment (azote et phosphore). Par exemple, la réduction de la photosynthèse par la limitation de l'azote peut potentiellement réduire l'évapotranspiration via la conductance stomatique. Le changement de l'humidité du sol qui en résulte peut se répercuter sur le cycle du carbone.

Enfin, seront effectués régulièrement des tests de suivi du modèle ORCHIDEE-MICT (bilan d'eau et carbone) après des modifications majeures du code.

- Au total, nous estimons nécessaires une vingtaine de simulations forcées globales de 50 ans à une résolution spatiale maximale de  $0.5^\circ$  :

$\implies 20 \text{ simulations} \times 50 \text{ ans} \times 64 \text{ coeurs} \times 1h \simeq 64\,000 \text{ heures}$

*Espace de stockage : 10 To*

### 3.4 Isotopes de l'eau

*Demande totale pour le thème :*

*Demande : 80 000 heures CPU sur Ada, 20 To sur Ergon*

#### 3.4.1 Développements techniques

Camille Risi

Nous avons implémenté l'an dernier les isotopes dans LMDZ5A2, version choisie pour la mise en place de la version isotopique du modèle couplé de l'IPSL. Il reste encore plusieurs problèmes à corriger, en particulier des plantages en mode OpenMP.

*Demande : 5 000 h sur Ada, 0 To sur Ergon*

#### 3.4.2 Evaluation des processus nuageux, applications paleo-climatiques et régionales

Camille Risi

Pour 2018-2019, la demande est plus modeste en prévision du congé maternité de C. Risi. Il s'agira surtout de valoriser des simulations déjà faites sous la forme de publications. Des simulations seront réalisées pour consolider certains résultats déjà obtenus, et pour les diverses collaborations. Sur une base de 10 simulations de 6 ans chacune :

$\implies 10 \text{ simulations} \times 6 \text{ ans} \times 300h = 18\,000 \text{ heures.}$

*Stockage : 10 To sur Ergon*

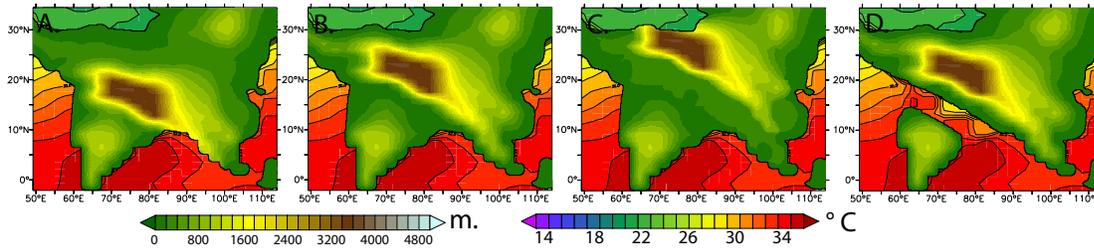


FIG. 1 – Géographie, topographie et les températures de surface de l’océan (SSTs) obtenues par FOAM pour les simulations Eocene prévues dans la demande : (A) plateau tibétain déplacé vers le sud, (B) position normale du plateau tibétain (control), (C) plateau tibétain déplacé vers le nord, (D) ajout d’un passage maritime entre l’Inde et l’Asie, représentant la Parathétys.

### 3.4.3 LMDZ-iso au Cénozoïque

Pierre Sepulchre, Yannick Donnadieu, Svetlana Botsyun (doctorante)

*Demande 57 000 heures CPU sur Ada, 10 To sur Ergon*

Une variété des conditions aux limites pour l’Eocene ont été utilisée en 2015, 2016 et 2017 afin d’effectuer 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. Cependant, des incertitudes majeures persistent concernant les conditions aux limites, la position du plateau tibétain latitudinal et la paléogéographie asiatique locale. Ces facteurs sont déterminants pour la circulation atmosphérique locale et des valeurs de  $\delta^{18}O$  associées. Afin d’augmenter le niveau de confiance aux simulations isotopiques appliquées à l’Eocene, plusieurs scénarios de paléogéographie locale asiatique seront réalisés (figure 1).

Chaque simulation zoomée avec LMDZ5A-iso prend environ 1900 heures/an :

$\Rightarrow 3 \text{ paléogéographies} \times 10 \text{ ans} \times 1900h = 57\,000 \text{ heures}$

En terme de stockage, nous nous archiverons les sorties mensuelle et journalières (en vue d’utilisation des calculations retro-trajectoires).

*Stockage : 10 To sur Ergon*

## 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-indiçage 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.

### 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

- [Bellenger et al., 2017] Bellenger, H., Drushka, K., Asher, W., Reverdin, G., Katsumata, M., and Watanabe, M. (2017). Extension of the prognostic model of sea surface temperature to rain-induced cool and fresh lenses. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 122(1) :484–507.
- [Bony et al., 2016] Bony, S., Stevens, B., Coppin, D., Becker, T., Reed, K., Voigt, A., and Me-deiros, B. (2016). Thermodynamic control of anvil-cloud amount. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113(32) :8927–8932, 10.1073/pnas.1601472113.
- [Bretherton et al., 2005] Bretherton, C. S., Blossey, P. N., and Khairoutdinov, M. (2005). An Energy-Balance Analysis of Deep Convective Self-Aggregation above Uniform SST. *J. Atmos. Sci.*, 62 :4273–4292.
- [Chao and Chen, 2004] Chao, W. C. and Chen, B. (2004). Single and double itcz in an aqua-planet model with constant sst and solar angle. *Climate Dyn.*, 22 :447–459.
- [Coppin and Bony, 2015] Coppin, D. and Bony, S. (2015). Physical mechanisms controlling the initiation of convective self-aggregation in a general circulation model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(4) :2060–2078.
- [Emanuel et al., 2014] Emanuel, K., Wing, A. A., and Vincent, E. M. (2014). Radiative-convective instability. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6 :75–90, doi :10.1002/2013MS000270.
- [Grazioli et al., 2017] Grazioli, J., Madeleine, J.-B., Gallée, H., Forbes, R. M., Genthon, C., Krinner, G., and Berne, A. (2017). Katabatic winds diminish precipitation contribution to the antarctic ice mass balance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(41) :10858–10863.
- [Holloway et al., 2017] Holloway, C. E., Wing, A. A., Bony, S., Muller, C., Masunaga, H., L'Ecuyer, T. S., Turner, D. D., and Zuidema, M. A. (2017). Observing convective aggregation. *Surveys in Geophysics*, 38 (6) :1199–1236.
- [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., 2017] Hourdin, F., Mauritsen, T., Gettelman, A., Golaz, J.-C., Balaji, V., Duan, Q., Folini, D., Ji, D., Klocke, D., Qian, Y., Rauser, F., Rio, C., Tomassini, L., Watanabe, M., and Williamson, D. (2017). The Art and Science of Climate Model Tuning. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 98 :589–602.
- [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.

- [Kirtman and Schneider, 2000] Kirtman, B. P. and Schneider, E. K. (2000). A spontaneously generated tropical atmospheric general circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(7) :2080–2093.
- [Muller and Bony, 2015] Muller, C. and Bony, S. (2015). What favors convective aggregation and why? *Geophys. Res. Lett.*, 42 :5626–5634.
- [Oueslati and Bellon, 2013] Oueslati, B. and Bellon, G. (2013). Tropical precipitation regimes and mechanisms of regime transitions : Contrasting two aquaplanet general circulation models. *Climate Dyn*, 40 :2345–2358.
- [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.
- [Schneider, 1977] Schneider, E. K. (1977). Axially symmetric steady-state models of the basic state for instability and climate studies. part ii. nonlinear calculations. *J. Atmos. Sci*, 34 :280–296.
- [Tobin et al., 2013] Tobin, I., Bony, S., Holloway, C. E., Grandpeix, J.-Y., Seze, G., Coppin, D., Woolnough, S. J., and Roca, R. (2013). Does convective aggregation need to be represented in cumulus parameterizations? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(4) :692–703.
- [Tobin et al., 2012] Tobin, I., Bony, S., and Roca, R. (2012). Observational evidence for relationships between the degree of aggregation of deep convection, water vapor, surface fluxes and radiation. *Journal of Climate*.
- [Williamson et al., 2015] Williamson, D., Blaker, A. T., Hampton, C., and Salter, J. (2015). Identifying and removing structural biases in climate models with history matching. 45 :1299–1324.
- [Williamson et al., 2013] Williamson, D., Goldstein, M., Allison, L., Blaker, A., Challenor, P., Jackson, L., and Yamazaki, K. (2013). History matching for exploring and reducing climate model parameter space using observations and a large perturbed physics ensemble. 41 :1703–1729.
- [Wing et al., 2017] Wing, A., Emanuel, K., Holloway, C., and Muller, C. (2017). Convective self-aggregation in numerical models. *Surv. Geophysics.*, 38 :1173. <https://doi.org/10.1007/s10712–017–9408–4>.
- [Wing et al., 018 ] Wing, A. A., Reed, K. A., Satoh, M., Stevens, B., Bony, S., and Ohno, T. (2018 ). Radiative-convective equilibrium model intercomparison project. *Geosci. Mod. Dev.*, accepted.