

## Demande DARI 2019 – 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. - janvier 2019

**Demande sur Ada à l'IDRIS : 1 155 000 heures CPU, 225 Tera-octets sur Ergon.  
Demande sur Irène NKL au TGCC : 150 000 heures CPU sur Irène SKL, 200 000  
heures CPU sur Irène NKL, 5 Tera-octets**

Cette année pour la première fois depuis des années, nous demandons des heures au TGCC. Cette année marque aussi l'utilisation d'un nouveau modèle : SAM-iso, permettant de simuler la composition isotopique de l'eau à des échelles hectométriques à kilométriques.

Notre demande est plus modeste que celle de l'an dernier, car le thème sur l'ajustement des paramètres libres du modèle LMDZ, très gourmand, n'est pas reconduit. Le thème sur la variabilité océanique est aussi interrompu.

## 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 . . . . .	3
1.3	Vue d'ensemble des 3 thèmes du projet . . . . .	3
1.3.1	Etude des processus atmosphériques; evaluation et amélioration du modèle LMDZ . . . . .	4
1.3.2	Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE . . . . .	4
1.3.3	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 . . . . .	7
2.3	SAM-iso . . . . .	7
2.4	Espace de stockage . . . . .	7

<b>3</b>	<b>Demande détaillée</b>	<b>8</b>
3.1	Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ . . . . .	8
3.1.1	Entretien d'une version distribuable et mise à jour de modules . . . . .	8
3.1.2	Etude de l'organisation de la convection tropicale . . . . .	8
3.1.3	Impact de la stratosphère et des montagnes sur le climat . . . . .	10
3.1.4	Impact de la paramétrisation de la convection sur les phénomènes tropicaux . . . . .	10
3.1.5	Microphysique des nuages froids . . . . .	12
3.2	Evaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE . . . . .	12
3.2.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE . . . . .	12
3.2.2	Couplages surfaces continentales - atmosphère . . . . .	13
3.2.3	Simulation des cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE . . . . .	14
3.3	Isotopes de l'eau . . . . .	14
3.3.1	Entretien et applications régionales . . . . .	15
3.3.2	SAM-iso . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Méthode</b>	<b>19</b>
4.1	Le modèle LMDZ . . . . .	19
4.2	Le modèle ORCHIDEE . . . . .	19
4.3	Le modèle SAM-iso . . . . .	20

# 1 Présentation générale

## 1.1 Les modèles utilisés

Ce projet est centré sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ et du modèle de surface continentale ORCHIDEE. Les différents modèles peuvent chacun être utilisé 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.

De plus, le projet utilise aussi :

- **NEMO**, 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 couplé à LMDZ pour certaines simulations de scénarios climatiques.
- **SAM**, que nous utiliserons pour la première fois cette année. C'est un modèle haute résolution, résolvant les équations anélastiques de la dynamique atmosphérique, permettant des simulations à des échelles hectométriques à kilométriques. Nous en utiliserons la version isotopique pour étudier la signature isotopique des processus liés aux nuages et à la convection.

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

thème	calcul sur Ada (k heures CPU)	stockage sur Ergon (To)	calcul sur Irène KNL (k heures CPU)	calcul sur Irène SKL (k heures CPU)	stockage sur Irène (To)
<b>1) Etude des processus atmosphériques ; evaluation et amélioration du modèle LMDZ</b>	<b>857</b>	<b>197</b>	-		-
dont entretien	20	1	50	150	2
dont COSP	242	20	-		-
dont organisation de la convection	66	60	-		-
dont stratosphère	300	100	-		-
dont convection	154	8	-		-
dont représentation des nuages froids	75	8	-		-
<b>2) Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE</b>	<b>280</b>	<b>18</b>	-		-
dont suivi des versions	54	1	-		-
dont couplages surfaces continentales - atmosphère	186	7	-		-
dont cycles bio-géochimiques	40	10	-		-
<b>3) Isotopes de l'eau</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>150</b>		<b>3</b>
dont entretien et applications régionales	18	10	-		-
dont SAM-iso	-	-	150		3
<b>Total</b>	<b>1 155</b>	<b>225</b>	<b>200</b>	<b>150</b>	<b>5</b>

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

## 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.
- au projet **gen10314**, consacré à l'étude de l'organisation de la convection avec le modèle haute-résolution SAM.

## 1.3 Vue d'ensemble des 3 thèmes du projet

Le projet porte sur 3 grands thèmes, résumés ci-dessous. Les demandes en temps de calcul et en espace de stockage par thème 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.

**Entretien d'une version distribuable et mise à jour de modules** Il est nécessaire de vérifier que les versions successives du modèle LMDZ fonctionnent bien et de mettre à jour certains modules (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 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 3.2.1).

**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 3.2.2).

**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 3.2.3).

### 1.3.3 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 3.3). Cette année, ce thème prend un nouvel élan avec l'utilisation du modèle haute résolution SAM, qui permettra d'étudier en détail l'impact des processus nuageux et de la convection sur la composition isotopique de l'eau.

## 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 :

- R280x280 est la résolution « moyenne » ou « MR » (medium resolution), anciennement appelée « haute » dans CMIP5.
- 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 LMDZ-OR.
- 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.
- Les simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE-NEMO permettent de réaliser des scénarios de projection climatique. Le temps d'exécution est dominé par LMDZ.

### 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.

configuration de LMDZ → grille horizontale ↓	LMDZOR	LMDZ aquaplanète	LMDZ-iso
R96x71 (VVLr)	-	-	LMDZ5B : 300h
R96x95 (VLR)	LMDZ5A : 150h LMDZ6 : 350h	-	-
R144x142 (LR)	LMDZ6 : 1 000h à 1 200h	LMDZ5A : 150h LMDZ6 : 900h	-
R280x280 (MR)	-	LMDZ5A : 500h	-

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.

Type de simulation	domaine : $n_x \times$ $n_y \times n_z$	résolution horizontale	durée	Temps de calcul CPU par simula- tion	Stockage par simu- lation
Aggrégation de la convection	$512 \times 512 \times 64$	2-3 km	100 jours	5000 h	100 Go
Transition strato-cumulus -> cumulus	$512 \times 512 \times 64$	100m	3 jours	8000 h	100 Go
Equilibre radiatif-convectif	$128 \times 128 \times 64$	750m	100 jours	500 h	10 Go

TAB. 3 – Temps de calcul, en heures CPU par an, que prennent les différentes simulations prévues avec SAM-iso. Elles tournent sur 128 processeurs. Les estimations viennent de l’expérience de Caroline Muller avec SAM, en ajoutant 50% de temps en plus pour les isotopes.

## 2.2 ORCHIDEE

- 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.

## 2.3 SAM-iso

Le temps de calcul pour SAM-iso dépend de la taille du domaine, de la résolution horizontale et verticale et du pas de temps utilisé. Elle est donc calculée au cas par cas (tableau 3).

## 2.4 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 : 993 000 heures CPU sur Ada, Stockage : 197 To sur Ergon*

#### 3.1.1 Entretien d'une version distribuable et mise à jour de modules

##### Entretien d'une version distribuable de LMDZ

Laurent Fairhead

Des simulations routinières de 1 mois sont lancées sur Ada et Irène pour vérifier que le modèle tourne et donne les résultats attendus dans différentes configurations (séquentielle, MPI, OMP, MPI/OMP, LMDZ seul, LMDZ couplé à ORCHIDEE). Il est parfois nécessaire de lancer une batterie de simulations pour comprendre quand le modèle ne fonctionne pas comme prévu.

*Demande : 20 000 heures CPU sur Ada,  
50 000 heures CPU sur Irène KNL,  
150 000 heures CPU sur Irène SKL.  
Stockage : 1 To sur Ergon*

#### Mise à jour des diagnostics COSP

Artem Feofilov

Les travaux de test de COSP2 (la nouvelle version de COSP, qui rassemble une collection de simulateur d'observations satellitaires, [Swales et al., 2018]) dans LMDZ6 se poursuivront. Pour cela, nous auront besoin de :

- une dizaine de simulations courtes (2 ans) avec LMDZ6,
- deux simulations de 100 ans avec le modèle couplé LMDZ-ORCHIDEE-NEMO : scenario historique et RCP8.5 avec COSP2.

*$\Rightarrow (10 \text{ simulations} \times 2 \text{ ans} + 2 \text{ simulations} \times 100 \text{ ans}) \times 1 \text{ 100 h} = 242 \text{ 000 heures.}$   
Stockage augmenté avec diagnostics COSP2 : 20 To sur Ergon.*

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

Sandrine Bony, Max Popp (Postdoc), Anna-Lea Albright (doctorant)

*Demande : 66 000 h CPU sur Ada, 60 To sur Ergon*

**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. Des simulations ont déjà été faites mais certaines devront être refaites avec davantage de diagnostics calculés on-line (e. g. termes de tendances diabatiques du bilan de variance d'énergie statique humide). Nous aurons besoin de 40 To de stockage sur Ergon pour stocker les données créées.

– 6 simulations de 5 années avec LMDZ5A-LR :

$$\Rightarrow 3 \times 5 \text{ années} \times 150 \text{ h} \simeq 2\,000 \text{ heures}$$

– 6 simulations de 5 années avec LMDZ6 :

$$\Rightarrow 3 \times 5 \text{ années} \times 900 \text{ h} = 14\,000 \text{ heures}$$

*Demande : total : 50 000 heures + 16 000 heures = 66 000 heures CPU sur Ada  
Stockage : 60 To sur Ergon*

### 3.1.3 Impact de la stratosphère et des montagnes sur le climat

F. Lott, S. Mailler, L. Guez, D. Cugnet, T. Dubos, G. Gastineau, J. Mignot, F. d'Andrée, G. Rivière, J. Riboldi (post-doc)

*Demande : 300 000h CPU sur Ada, 100 To sur Ergon*

**Rôle de la stratosphère dans la variabilité ENSO** En 2019, nous allons continuer d'analyser la régionalisation du changement climatique dans le modèle LMDz. Nous allons pour cela nous focaliser sur 2 scénarios, les ENSO extrêmes et les pertes de glaces dans les régions arctiques. Pour ces 2 scénarios des expériences de sensibilité où la stratosphère est dégradée (et dans des configuration "La nina" versus ENSO extrêmes, année normale contre année avec minimum de glace arctique). Nous allons aussi 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. Nous étudierons aussi l'effet des montagnes en modifiant leur représentation.

Pour ces tâches, nous allons avoir besoin de tester la réponse du modèle aux pertes de glace Arctique en configuration de stratosphère dégradé, ce qui va nous demander de contraster 2 simulations en forçage perpétuels :

1. une simulation correspondant à l'année « neutre » 2002
2. une autre à l'année 2016 particulièrement déficitaire en glace.
  - 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) 143x142x79 :  
 $\Rightarrow 2 \text{ simulations} \times 50 \text{ ans} \times 1 \text{ 200 h} = 120 \text{ 000 heures}$

**Rôle des montagnes** En parallèle à ces exercices de sensibilité, nous allons repenser le formalisme de représentation des montagnes d'échelles sous-maille en essayant de reconcilier les approches visant à modifier les propriétés de la couche limite turbulente par les montagnes des approches paramétrisant les effets méso-échelle (c'est à dire contrôlés par ondes de gravité de montagne). Ce travail est fait en collaborations avec le centre européen. Du côté du LMD, il s'agira en 2019 de tester de nouvelles bases de données orographiques, et d'ajuster les paramètres. nous ferons aussi le passage vers le modèle DYNAMICO. Pendant cette phase technique nous nous concentrerons sur le formalisme, en espérant commencer à tester des paramétrisations innovantes les années suivantes.

- nous aurons besoin d'une dizaine d'expérience de 15ans :  
 $\Rightarrow 10 \text{ simulations} \times 15 \text{ ans} \times 1 \text{ 200 h} = 180 \text{ 000 heures}$

*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 totale pour le sous-thème : 154 000 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, Xavier Perot (post-doc)

Dans le cadre de l'ANR COCOA, nous avons lancé 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. En 2018, nous avons intégré une nouvelle paramétrisation des CRD dans la dernière version de LMDZ 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.

La première phase de validation de cette modification va débuter en 2019 à partir d'un cas 1D provenant des observations faites à bord du RV Revelle pendant la campagne Cindy-Dynamo en 2011. Nous avons pour cela optimisé les forçages sur une région de 50km de rayon autour du RV Revelle en coopération avec le Lawrence Livermore National Laboratory (Y. Zhang et S. Xie). Cela permet de tester des simulations 1D avec une résolution plus comparable aux mesures ponctuelles du navire. Pour les simulations 1D, 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 de l'atmosphère, on testera également que le modèle ne provoque pas de déclenchement intempestif de la convection profonde.

En 2019, 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.

- 1 simulation de type AMIP de 50 ans avec LMDZ6 144x142x79.

$\implies 1 \text{ simulation} \times 50 \text{ ans} \times 1 \text{ 100h} = 55 \text{ 000 h}$

*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

Plusieurs développements concernant la représentation des processus convectifs ont été effectués entre les versions LMDZ5B et LMDZ6 du modèle atmosphérique : introduction de l'effet thermodynamique de la glace, déclenchement stochastique du schéma de convection profonde, activation du modèle du thermique dans les zones de stratocumulus, modification de la densité des poches froides ; et d'autres sont en cours : modification du mélange entre panaches convectifs et leur environnement, modification de la précipitation dans les tours convectives.

En 2019 l'objectif sera de comprendre l'impact de ces modifications sur la distribution et la variabilité des précipitations tropicales. On analysera également dans quelle mesure le re-réglage des paramètres libres (tuning), étape obligatoire pour assurer l'équilibre radiatif du modèle au sommet de l'atmosphère après chaque modification, compense l'effet sur les pluies simulées. Pour cela, il sera nécessaire de réaliser des séries de simulations globales de plusieurs années pour tester les développements un par un et les versions ré-ajustées correspondantes du modèle. Nous demandons :

- une trentaine de tests de sensibilité aux processus physiques sur des périodes de 3 ans, avec LMDZ6 en 144x142x79.

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

*Stockage : 4 To.*

*Demande : total : 55 000 heures + 99 000 heures = 154 000 heures ; Stockage : 4 + 4 = 8 To*

### 3.1.5 Microphysique des nuages froids

*Demande totale pour le sous-thème : 75 000 h CPU sur Ada, 8 To sur Ergon*

#### Brumes et précipitations en Antarctique

J.-B. Madeleine, F. Lemonnier (thèse)

Dans le cadre de la thèse de Florentin Lemonnier (ANR APRES3 pour “Antarctic Precipitation : Remote Sensing from Surface and Space”), nous avons demandé en 2018 les heures nécessaires à la réalisation des simulations “de contrôle” (en l’occurrence 4 simulations guidées zoomées, 2 sur la période 2015-2016, et 2 sur la période 2006-2011, le tout en  $144 \times 142 \times 79$ ). Dans la période de DARI 2019, nous voudrions réaliser les simulations incluant les nouvelles paramétrisations développées dans le cadre de l’ANR APRES3 uniquement sur la période 2006-2011, avec trois physiques différentes. Comme nous comparerons aux simulations de contrôle, nous réalisons les mêmes types de simulations, avec le même comptage des heures ci-dessous.

$\implies (3 \text{ physiques donc } 3 \text{ simulations} \times 6 \text{ ans}) \times 1 \text{ } 100 \text{ h} \simeq 20 \text{ } 000 \text{ h.}$   
*Stockage : 6 To sur Ergon.*

#### Représentation des nuages hauts

M. Bonazzola

Nous voudrions poursuivre nos efforts de modélisation des nuages hauts, en essayant de mieux représenter l’efficacité de précipitation convective dans la haute troposphère (fixée par le paramètre  $ep_{max}$ ). En effet actuellement, comme tout le condensat est soulevé jusqu’au niveau de flottabilité neutre, ce paramètre doit atteindre une valeur très haute. Il serait plus réaliste de faire précipiter une partie du condensat à plus basse altitude, et de faire dépendre cette proportion de condensat précipité de la vitesse verticale dans le système convectif. Ce travail de modélisation peut bénéficier des observations de systèmes nuageux restitués par AIRS/IASI, en particulier de leur extension verticale.

– Nous souhaitons donc réaliser plusieurs simulations de sensibilité de type AMIP d’une dizaine d’années, en résolution  $144 \times 142 \times 79$ .

$\implies 5 \text{ simulations} \times 10 \text{ ans} \times 1 \text{ } 100 \text{ h} = 55 \text{ } 000 \text{ heures.}$

*Stockage : 2 To sur Ergon*

*Demande : total :  $20 \text{ } 000 + 55 \text{ } 000 = 75 \text{ } 000$ ;  $6 + 2 = 8$  To sur Ergon*

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

*Demande totale pour le thème :*

*Demande : 280 000 heures CPU sur Ada, 18 To sur Ergon*

### 3.2.1 Suivi des versions et performances d’ORCHIDEE

Joséfine Ghattas

Comme l'an dernier, 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.

- 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*

### 3.2.2 Couplages surfaces continentales - atmosphère

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

*Demande : 186 000 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 du l'évaporation en régime peu humide.

A l'aide d'un modèle conceptuel et de simulations numériques, [Cheruy et al., 2017] ont mis en évidence une nouvelle rétroaction de l'humidité du sol sur la température de surface au travers de l'inertie thermique. Cette rétroaction particulièrement efficace dans les zones où le couplage avec la surface est fort et où l'humidité de superficielle a une importante variabilité à haute fréquence, n'a pas été mise en évidence sur des observations. La température de surface et l'humidité superficielle du sol sont parmi les variables essentielles restituées à partir des observations des satellites de l'ESA. Nous avons proposé d'utiliser ces observations conjointement à nos simulations pour mieux caractériser et évaluer l'intensité de cette rétroaction. (Projet accepté, CMUG, Climate Model User Group).

Ces études seront évaluées à l'aide de simulation guidée multi-annuelles LMDZ6-OR :

- 4 expériences de 10 ans. On ajoute 10% de consommation supplémentaire pour le guidage.

*$\Rightarrow 4 \text{ simulations} \times (10 \text{ ans} + 2 \text{ ans spin-up}) \times 1100\text{h} \times 1.1 \text{ guidage} + 2000 \text{ pour le débogage} \simeq 60\,000 \text{ h}$*

*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 les sites instrumentés français du SIRTA et de Toulouse

Pour poursuivre ces analyses nous avons besoin d'effectuer des simulations zoomées guidées d'une quinzaine d'années pour chaque jeu de paramétrisations. Le rôle des hétérogénéité spatiale dans la maille du modèle et la représentativité des mesures ponctuelles pour les flux turbulent sera abordée. Un projet d'ANR sur ce sujet (MOSAI : Model and Observation for Surface Atmosphere Interactions) a été soumis en Octobre 2018 (A. Lohou coordinatrice).

Des tests de sensibilité à différentes résolutions seront effectués. On ajoute 15% de consommation supplémentaire pour le guidage et les sorties à haute résolution.

- En résolution 96x95x79 :

*4 simulations × 15 ans × 350h × 1.15 guidage et sorties haute résolution + 1000 pour le débogage*  
*≈ 25 000 h*

– En résolution 144x142x79 :

*2 simulations × 10 ans × 1100h × 1.15 guidage et sorties haute résolution + 2000 pour le débogage*  
*≈ 27 000 h*

*Stockage : 2 T*

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

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

*⇒ 60 simulations × 1100h × 1.1 guidage + 2000 pour le débogage ≈ 74 000 h*

*Stockage : 2 T*

*Demande : total : 60 000+25 000+27 000+74 000=186 000 h ; 3+2+2= 7 To sur Ergon*

### 3.2.3 Simulation des cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE

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

*Demande : 40 000 heures CPU sur Ada, 10 To sur Ergon*

Afin de continuer à améliorer les performances du modèle ORCHIDEE-MICT, nous sollicitons les outils de développement et les heures de calculs de l'IDRIS pour les tests et débogage.

De plus, les simulations idéalisées de l'influence de la fréquence des pluies sur l'infiltration de l'eau dans le sol demandent encore quelques ajustements mais ne devraient pas solliciter beaucoup de ressources.

La majeure partie de la demande d'heure réside dans les simulations pour tester la sensibilité de l'hydrologie à la prise en compte ou non de la disponibilité en nutriments (azote et phosphore), l'objectif principal de la fin du projet IMBALANCE-P. Nous aimerions voir si la réduction de la photosynthèse par la limitation de l'azote peut potentiellement réduire l'évapotranspiration via la conductance stomatique, changer l'humidité du sol et se répercuter sur le cycle du carbone.

– Au total, nous estimons nécessaire l'équivalent d'une quinzaine de simulations globales à une résolution spatiale maximale de 1.0°. Le temps réel de base estimé étant de l'ordre de 50min/an (64 cœurs sollicités) pour une résolution de 1.0°, notre demande est donc :

*⇒ 15 simulations × 50 ans × 64 cœurs × 50mins ≈ 40 000 heures*

*Espace de stockage : 10 To*

*Demande : total : 54+186+40=280 heures CPU sur Ada.*

*Stockage : 1+7+10= 18 To sur Ergon*

### 3.3 Isotopes de l'eau

*Demande totale pour le thème :*

*Demande : 18 000 heures CPU sur Ada, 10 To sur Ergon  
Demande : 150 000 heures CPU et 3 To sur Irène*

### 3.3.1 Entretien et applications régionales

Camille Risi

Pour 2019-2020, la demande reste modeste en prévision du mi-temps 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, qui concernent surtout des applications régionales de LMDZ-iso. Sur une base de 10 simulations de 6 ans chacune :

*⇒ 10 simulations × 6 ans × 300h = 18 000 heures.*

*Stockage : 10 To sur Ergon*

### 3.3.2 SAM-iso

Camille Risi, Caroline Muller, Joe Galewsky (chercheur invité)

*Demande : 50 000 + 80 000 + 20 000 heures = 150 000 heures CPU sur Irène ; 3 To*

Après avoir longtemps travaillé exclusivement avec LMDZ-iso, cette année nous allons prendre en main un nouveau modèle isotopique : SAM-iso, la version isotopique du modèle résolvant les nuages SAM ([Khairoutdinov and Randall, 2003], section méthode 4.3). En effet, afin de mieux comprendre les processus contrôlant la composition isotopique de l'eau, nous voulons que ces processus soient résolus explicitement. Cela demande des échelles kilométrique pour la convection profonde, et encore hectométriques pour la convection peu profonde. Caroline Muller, qui a une longue expérience avec SAM sans isotopes ([Muller and Held, 2012, Muller and Bony, 2015, Muller and Romps, 2018]), a déjà réussi à faire tourner quelques simulations avec SAM-iso sur Irène (figure 1). Camille Risi a déjà développé des diagnostics d'analyse testés sur des simulations déjà tournées par Peter Blosser (figure 2). Elle apprendra aussi dans les prochains moi à faire tourner SAM-iso sur Irène. Les activités s'organiseront en 3 axes.

#### Aggrégation de la convection

L'aggrégation de la convection est connue pour impacter l'humidité troposphérique ([Tobin et al., 2012]). Plusieurs études suggèrent qu'elle impacte aussi la composition isotopique de la vapeur d'eau ([Lawrence et al., 2004, Tremoy et al., 2014]). Pour étudier comment l'aggrégation de la convection affecte la composition isotopique de la vapeur d'eau, nous réaliserons des simulations dans lesquelles la convection s'agrège d'elle même (auto-aggrégation : [Bretherton et al., 2005, Wing et al., 2017]).

Ce genre de simulation nécessite de grands domaines (au moins 1000km de côté) et une résolution horizontale de 2-3km pour résoudre la convection profonde. Typiquement, nous réaliserons des simulations avec 512 points en x, 512 points en y et 64 niveaux verticaux. Pour atteindre l'équilibre radiatif-convectif, 100 jours sont nécessaires. D'après l'expérience de Caroline Muller sur Irène sur gen10314, cela prendrait environ 5000h CPU sur Irène.

La version isotopique de SAM utilise une paramétrisation microphysique différente de celle habituellement utilisée par Caroline. Nous aurons besoin de plusieurs simulations pour déterminer quelle configuration (en particulier quelle taille de domaine) permet l'auto-aggrégation avec cette nouvelle paramétrisation.

*⇒ 10 simulations × 5 000h = 50 000 heures*

*Stockage : 10 × 100 Go = 1 To*

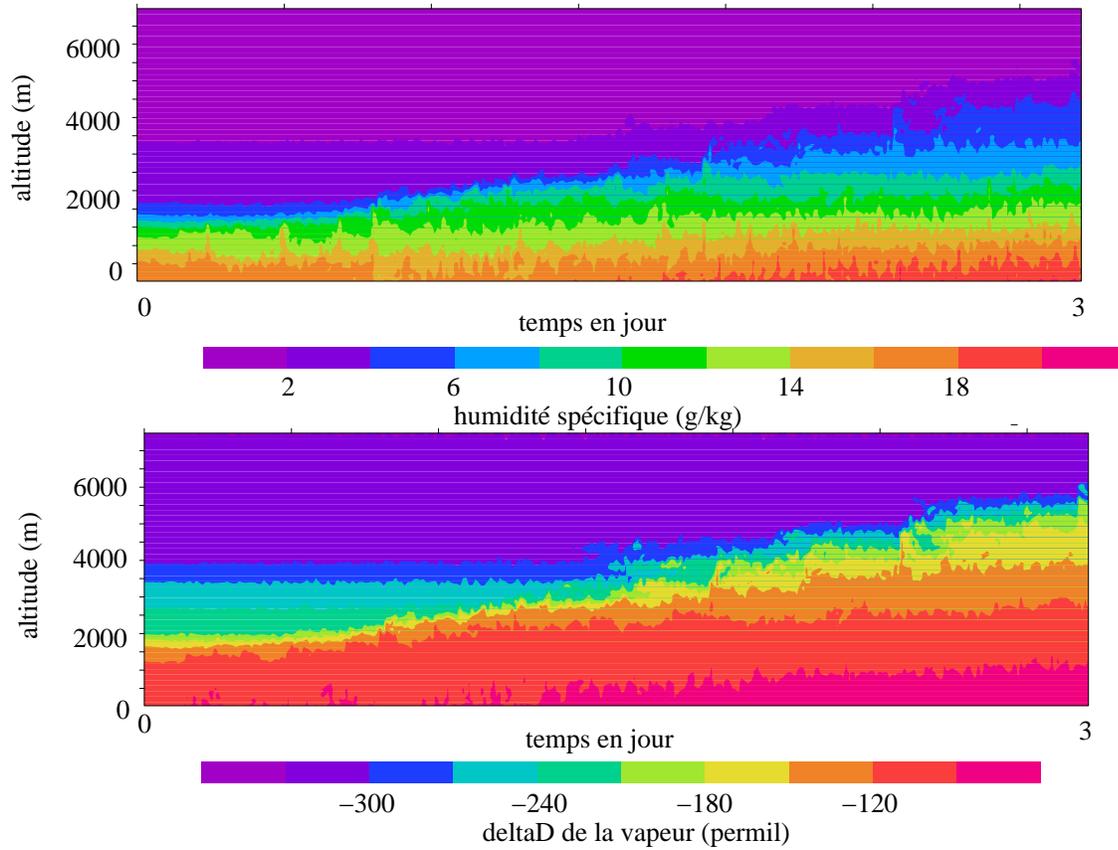


FIG. 1 – Premiers résultats de la simulation du cas de transition de convection peu profonde à profonde de [Kuang and Bretherton, 2006], dont la faisabilité a pour l’instant été testée en 2D. Humidité spécifique (haut) et  $\delta D$  de la vapeur (bas) en fonction du temps, en moyenne sur tout le domaine horizontal. Au cours de la simulation, on voit que la couche limite devient de plus en plus profonde, humide et enrichie en isotopes lourds.

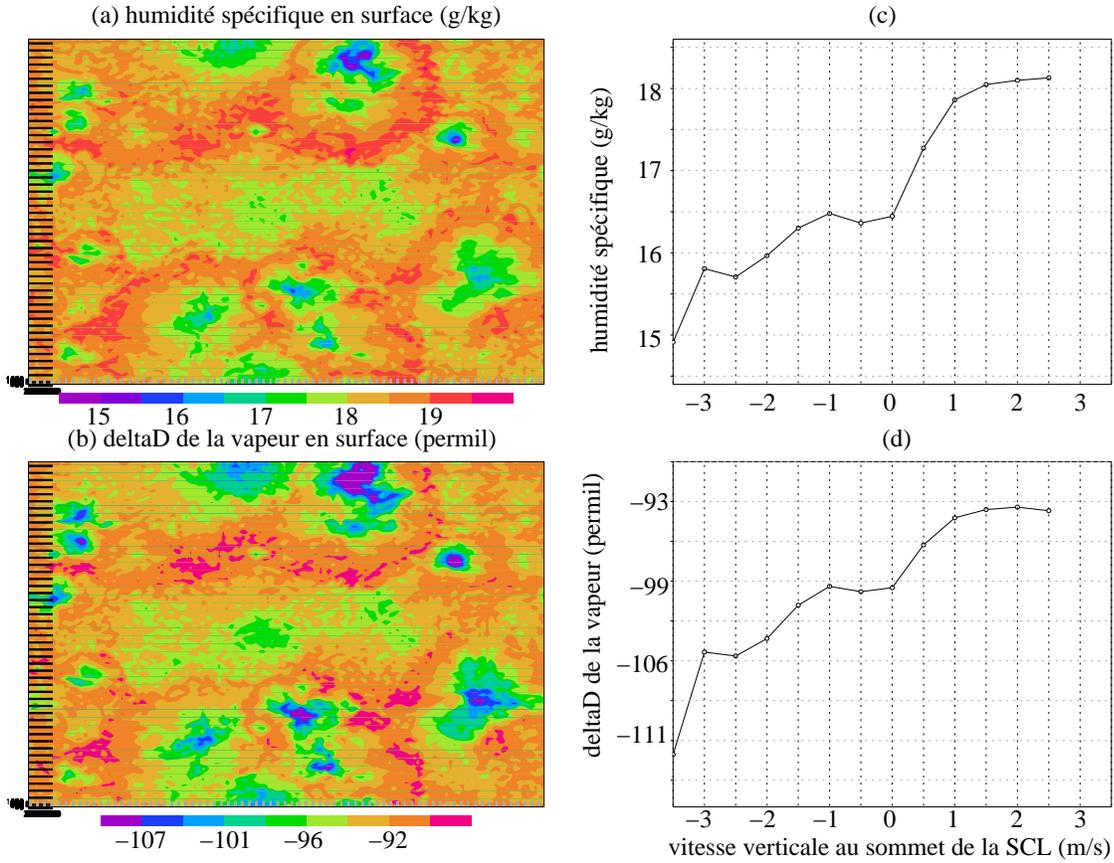


FIG. 2 – Analyse de la simulation SAM-iso en équilibre radiatif convectif de Peter Blossey : humidité spécifique (a) et  $\delta D$  de la vapeur (b) près de la surface, à un pas de temps au hasard, sur l'ensemble du domaine horizontal. Humidité spécifique (c) et  $\delta D$  de la vapeur (d) au sommet de la couche sous nuageuse, en fonction de la vitesse verticale au sommet de la couche sous-nuageuse au même point de grille. On voit que les panaches ascendants sont humides et enrichis en isotopes lourds, tandis que les panaches descendants sont secs et appauvris.

## Nuages bas

Avec Joe Galewsky, chercheur invité de l'Université du Nouveau Mexique à Albuquerque, nous travaillons sur le mélange vertical dans les basses couches, avec comme enjeu une meilleure compréhension des processus contrôlant la fraction nuageuse des nuages bas ([Galewsky and Rabanus, 2016, Galewsky, 2018b, Galewsky, 2018a]). Après avoir étudié la signature isotopique du mélange dans les observations et dans le modèle LMDZ-iso, nous souhaitons étudier les processus plus en détail dans les simulations SAM-iso.

Nous réaliserons un cas de transition des strato-cumulus (caractérisés par une forte inversion) aux cumulus (caractérisés par une faible inversion), sur quelques jours ([Kuang and Bretherton, 2006], figure 1). Pour résoudre la convection peu profonde, une simulation des gros tourbillons, avec une résolution de l'ordre de 100m, est nécessaire. Nous pouvons nous contenter de domaines plus petits, 25-50km, ce qui donnerait 512 points en x et 512 points en y comme au dessus. Etant donné la résolution plus fine, un pas de temps plus fin est nécessaire pour satisfaire la condition de stabilité numérique. Par conséquent, ces simulations coûteraient de l'ordre de 8 000 h CPU chacune. De nouveau, des tests de sensibilité sont à prévoir pour mettre au point la simulation :

*⇒ 10 simulations × 8 000h = 80 000 heures*

*Stockage : 10 × 100 Go = 1 To*

## Compréhension des processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau dans des simulations idéalisées

Le but est de comprendre les processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau troposphérique, en analysant des simulations idéalisées d'équilibre radiatif dans lesquelles un profil de vitesse verticale de grande échelle est prescrit, et l'intensité de la convection varie selon la vitesse verticale de grande échelle. Les propriétés des panaches ascendants et descendants seront étudiés en détail. Un bilan de la vapeur d'eau dans la couche sous-nuageuse, tenant compte des différents types de panaches et de l'évaporation de la pluie, sera établi. Enfin, un modèle analytique simple, inspiré de ce qu'on aura appris de l'étude des processus dans les simulations SAM-iso, sera développé pour prédire la composition isotopique de la vapeur d'eau de la couche sous-nuageuse et comparé aux observations disponibles.

Nous réaliserons des simulations du même type que celles de [Moore et al., 2014] et de Peter Blossey (figure 2), avec une résolution de 750m et un domaine modeste, ce qui donnerait des simulations plus légères que les précédentes : 128 points en x, 128 points en y et 64 niveaux verticaux. Pour atteindre l'équilibre radiatif-convectif, 100 jours sont nécessaires. Nous prévoyons plusieurs tests pour mettre au point la configuration, puis une série de tests de sensibilité à la vitesse verticale de grande échelle :

*⇒ 20 simulations × 500h = 20 000 heures*

*Stockage : 20 × 10 Go ≈ 1 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-indices des champs. Les performances obtenues étaient de l'ordre de 3 Gflops sur NEC SX8.

Le code existe maintenant en version parallèle MPI/OpenMP : (1) le découpage du domaine en bandes de latitude est géré par MPI ; (2) le découpage vertical est géré par OpenMP. Des tests ont été effectués avec succès sur IBM SP6 utilisant 96 processeurs.

### 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.

### 4.3 Le modèle SAM-iso

Pour la première fois dans ce projet, le modèle SAM ([Khairoutdinov and Randall, 2003]) va être utilisé. Le modèle SAM est un modèle permettant de faire des simulations résolvant les nuages (résolution horizontale de quelques kilomètres) ou les gros tourbillons (résolutions horizontale de quelques dizaines à centaines de mètres).

Il résout les équations de conservation anélastique de la quantité de mouvement et de l'humidité (vapeur d'eau, liquide de nuage, glace de nuage, liquide de précipitation, neige et agrégats). Nous utiliseront des domaines doublement périodiques avec des résolutions et tailles de domaine variables.

Avec 64 niveaux verticaux, la résolution verticale sera d'environ 50 m dans les basses couches, et augmentera jusqu'à 500 m dans la troposphère libre. Le sommet du domaine (tiers supérieur) comporte une couche d'éponge pour absorber les ondes de gravité, qui sinon rempliraient le domaine de façon irréaliste.

SAM est déjà utilisé par Caroline Muller dans le projet gen10314 sur Irène. Il est ici utilisé dans sa version isotopique (SAM-iso) ([Blossey et al., 2010, Moore et al., 2014]). Nous avons vérifié que SAM-iso tourne bien sur Irène et estimé approximativement les coûts de calcul.

Le code peut être parallélisé en openMP ou MPI, mais sur Irène, nous utilisons MPI sur 128 processeurs.

## 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.
- [Blossey et al., 2010] Blossey, P. N., Kuang, Z., and Romps, D. M. (2010). Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation. *J. Geophys. Res.*, 115 :D24309, doi :10.1029/2010JD014554.
- [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.
- [Cheruy et al., 2017] Cheruy, F., Dufresne, J., Ducharne, A., Passy, P., Magand, C., and J.Ghattas (2017). Diagnostics of the soil moisture-atmosphere coupling in numerical simulations and in global datasets derived from in-situ or satellite passive and active remote sensing. Technical report, ESA- Phase 1 CMUG.
- [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.
- [Galewsky, 2018a] Galewsky, J. (2018a). Relationships between inversion strength, lower-tropospheric moistening, and low-cloud fraction in the subtropical southeast pacific derived from stable isotopologues of water vapor. *Geophysical Research Letters*, 45(15) :7701–7710.

- [Galewsky, 2018b] Galewsky, J. (2018b). Using stable isotopes in water vapor to diagnose relationships between lower-tropospheric stability, mixing, and low-cloud cover near the island of hawaii. *Geophysical Research Letters*, 45(1) :297–305.
- [Galewsky and Rabanus, 2016] Galewsky, J. and Rabanus, D. (2016). A stochastic model for diagnosing subtropical humidity dynamics with stable isotopologues of water vapor. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(4) :1741–1753.
- [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.
- [Khairoutdinov and Randall, 2003] Khairoutdinov, M. F. and Randall, D. A. (2003). Cloud resolving modeling of the arm summer 1997 iop : Model formulation, results, uncertainties, and sensitivities. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(4) :607–625.
- [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.
- [Kuang and Bretherton, 2006] Kuang, Z. and Bretherton, C. S. (2006). A mass-flux scheme view of a high-resolution simulation of a transition from shallow to deep cumulus convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(7) :1895–1909.
- [Lawrence et al., 2004] Lawrence, J. R., Gedzelman, S. D., Dexheimer, D., Cho, H.-K., Carrie, G. D., Gasparini, R., Anderson, C. R., Bowman, K. P., and Biggerstaff, M. I. (2004). Stable isotopic composition of water vapor in the tropics. *J. Geophys. Res.*, 109 :D06115, doi :10.1029/2003JD004046.
- [Moore et al., 2014] Moore, M., Kuang, Z., and Blossey, P. N. (2014). A moisture budget perspective of the amount effect. *Geophys. Res. Lett.*, 41 :1329–1335, doi :10.1002/2013GL058302.
- [Muller and Bony, 2015] Muller, C. and Bony, S. (2015). What favors convective aggregation and why? *Geophys. Res. Lett.*, 42 :5626–5634.
- [Muller and Held, 2012] Muller, C. J. and Held, I. M. (2012). Detailed investigation of the self-aggregation of convection in cloud-resolving simulations. *J. Atmos. Sci.*, 69 :2551–2565, doi : <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-11-0257.1>.
- [Muller and Romps, 2018] Muller, C. J. and Romps, D. M. (2018). Acceleration of tropical cyclogenesis by self-aggregation feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201719967.
- [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.
- [Swales et al., 2018] Swales, D. J., Pincus, R., and Bodas-Salcedo, A. (2018). The cloud feedback model intercomparison project observational simulator package : Version 2. *Geoscientific Model Development*, 11(1) :77–81.
- [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*.
- [Tremoy et al., 2014] Tremoy, G., Vimeux, F., Soumana, S., Souley, I., Risi, C., Cattani, O., Favreau, G., and Oi, M. (2014). Clustering mesoscale convective systems with laser-based water vapor delta18O monitoring in Niamey (Niger). *J. Geophys. Res.*, 119(9) :5079–5103, DOI : 10.1002/2013JD020968.
- [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.