

Demande DARI 2020 – 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 2020

Demande sur Jean-Zay à l'IDRIS :

- 721 000 heures CPU,
- 50 000 heures GPU,
- 229 Tera-octets.

Demande sur Irène au TGCC :

- 500 000 heures CPU sur Irène NKL,
- 250 000 heures CPU sur Irène SKL,
- 50 000 heures sur Irène GPU,
- 8 Tera-octets

Table des matières

1	Présentation générale	2
1.1	Les modèles utilisés	2
1.2	Lien avec les autres projets	3
1.3	Vue d'ensemble des 4 thèmes du projet	3
1.3.1	Étude des processus atmosphériques; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	3
1.3.2	Interactions océan-atmosphère	5
1.3.3	Étude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	5
1.3.4	Isotopes de l'eau	6
2	Estimation des ressources consommées par les diverses configurations	6
2.1	LMDZ	6
2.1.1	Les différentes versions	6
2.1.2	Les différentes résolutions	6
2.1.3	Les différentes configurations	7
2.1.4	Estimation des ressources	7
2.2	ORCHIDEE	7
2.3	SAM-iso	7

2.4	Espace de stockage	8
3	Demande détaillée	8
3.1	Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	8
3.1.1	Entretien d'une version distribuable de LMDZ	8
3.1.2	Étude de l'organisation de la convection tropicale	8
3.1.3	Arctique et montagnes	10
3.1.4	Impact de la paramétrisation de la convection sur les phénomènes tropicaux : vers l'amélioration de la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans LMDZ	11
3.1.5	Microphysique des nuages froids	11
3.2	Interactions océan-atmosphère	12
3.2.1	Couches de réchauffements diurne en Arctique	12
3.2.2	Effet des stratifications de surface sur les flux de CO_2	12
3.3	Évaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE	13
3.3.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE	13
3.3.2	Couplage surfaces continentales atmosphère	14
3.3.3	Amélioration de l'hydrologie continentale, impact sur le climat récent et futur	15
3.4	Isotopes de l'eau	16
3.4.1	Isotopes dans LMDZ6	16
3.4.2	SAM-iso	17
4	Méthode	19
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 pour étudié les interactions océan-atmosphère.

- **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 utilisons 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.

1.2 Lien avec les autres projets

Ce projet est très lié :

- au projet **01 239**, 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 de LMDZ, LMDZ6.
- au projet **gen10314**, consacré à l’étude de l’organisation de la convection avec le modèle haute-résolution SAM. C’est ce même modèle qui est utilisé dans notre projet pour l’étude de l’effet de la convection sur les isotopes de l’eau.

Ce projet est aussi dans la continuité de plusieurs projets clos cette année :

- le 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.
- le projet **100502** (groupe cps) sur l’hydrologie continentale. Les développements liés à l’hydrologie de surface et de sub-surface ont longtemps été rattachés à notre projet, s’en sont séparés pendant quelques années avec le projet 100502, et reviennent cette année.

1.3 Vue d’ensemble des 4 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 thème sont détaillées dans le tableau 1.

1.3.1 Étude des processus atmosphériques; évaluation 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) .

Étude 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).

thème	calcul CPU sur Jean- Zay (k heures CPU)	calcul GPU sur Jean- Zay (k heures GPU)	stockage sur Jean- Zay (To)	calcul CPU sur Irène KNL (k heures CPU)	calcul CPU sur Irène SKL (k heures CPU)	calcul GPU sur Irène (k heures GPU)	stockage sur Irène (To)
Total	721	50	229	500	250	50	8
1) Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	377	50	214	50	190	50	2
dont entretien	50	50	1	50	50	50	1
dont organisation de la convection	150		50		140		1
dont montagnes et Arctique	83		150				
dont convection	68		4				
dont représentation des nuages froids	26		9				
2) Interactions océan-atmosphère	75		3		60		5
dont couches de réchauffement diurne en arctique	75		3				
dont échanges de CO_2					60		5
3) Étude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	264		12				
dont suivi des versions	43		5				
dont couplages surfaces continentales - atmosphère	69		2				
dont hydrologie continentale	152		5				
4) Isotopes de l'eau	5			450			1
dont isotopes dans LMDZ6	5						
dont SAM-iso				450			1

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

Impact des montagnes et des glaces Arctiques sur le climat L'équipe « Dynamique et Physique de l'Atmosphère et de l'Océan » (DPAO), implantée à l'École 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, des montagnes, des ondes de gravité, et plus récemment des modifications en superficie des glaces Arctique. (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 Interactions océan-atmosphère

L'océan, qui couvre plus des deux tiers de la surface terrestre, est la source principale d'humidité atmosphérique à laquelle la convection est très sensible. Il est également le principal réservoir de CO_2 dont la concentration atmosphérique a un impact décisif sur l'évolution du climat global. Ce nouveau thème dans ce projet vise à mieux comprendre les processus d'échange d'eau, d'énergie et d'espèces chimiques entre l'océan et l'atmosphère. Ces échanges sont parmi les plus incertains, ce qui explique pour partie la persistance de biais importants dans les modèles de climat actuels.

1.3.3 Étude 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).

Couplage surfaces continentales atmosphère

Amélioration de l'hydrologie continentale, impact sur le climat récent et futur Le modèle ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est aussi un outil adapté pour comprendre et prévoir l'évolution des ressources en eau, de la biomasse continentale, et des flux d'eau et de chaleur entre les continents et l'atmosphère, en conditions historiques ou futures. Cette action poursuit des travaux engagés dans un autre projet DARI désormais clos (projet n°100502), et portera sur l'effet des propriétés du sol d'une part, et celle des nappes souterraines, des plaines d'inondation et de l'irrigation d'autre part (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). Depuis un an, nous utilisons aussi le modèle haute résolution SAM, qui permet 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.
- **LMDZ6** est la version qui est utilisée pour CMIP6. Elle inclue de nombreuses améliorations dans les paramétrisations de la convection et de nuages, ainsi qu'un nouveau réglage ([Hourdin et al., 2019]).

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.

configuration de LMDZ → grille horizontale ↓	LMDZ6-OR (79 niveaux verticaux)	LMDZ5A aqua-planète (39 niveaux verticaux)	IPSL-CM6 (tourne sur Irène)
R96x95 (VLR)	450 h	-	-
R144x142 (LR)	LMDZ6 : 750 h	-	1 500 h
R280x280 (MR)	-	500 h	-

TABLE 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 dans cette demande. Les cases non renseignées sont celles pour lesquelles aucune simulation n’est prévue dans cette demande.

Chacune de ces résolution 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 température de surface de l’océan observées (simulations « AMIP ») ou calculées par des modèles couplés océan-atmosphère, dans le cas de simulations paléo-climatiques. La température de surface de l’océan peut aussi être imposée constante et uniforme partout, dans le cas de simulations aqua-planète. Les vents peuvent être guidés ou non par des réanalyses.

En terme de temps de calcul, on peut classer les différentes configurations utilisées dans ce projet en 3 groupes :

- Les simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE, appelées LMDZ6-OR.
- Les simulations avec LMDZ seul, en aqua-planète en équilibre radiatif-convectif. Le temps d’exécution est allégé.
- Les simulations couplées LMDZ-ORCHIDEE-NEMO, appelées IPSL-CM6

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.

Dans le cas de simulations guidées, il faut rajouter 10% de consommation.

2.2 ORCHIDEE

- Quand ORCHIDEE est utilisé seul, le temps de calcul est de 10 h/an pour une grille de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ sur 64 cœurs.

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).

Type de simulation	domaine : $n_x \times n_y \times n_z$	résolution horizontale	durée	nombre de procs	Temps de calcul CPU par simulation	Stockage par simulation
Équilibre radiatif-convectif	$128 \times 128 \times 96$	750 m	100 jours	128	50 000 h	10 Go
Cyclone	$256 \times 256 \times 96$	3 km	100 jours	128	200 000 h	40 Go

TABLE 3 – Temps de calcul, en heures CPU par an, que prennent les différentes simulations prévues avec SAM-iso.

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 Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ

3.1.1 Entretien d'une version distribuable de LMDZ

Laurent Fairhead

Des simulations routinières de 1 mois sont lancées sur Jean-Zay 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) et sur les différentes machines. Il est parfois nécessaire de lancer une batterie de simulations pour comprendre quand le modèle ne fonctionne pas comme prévu. Nous demandons aussi pour la première fois des heures GPU pour tester ces nouvelles partitions.

⇒ Demande :

*50 000 heures CPU sur Jean-Zay,
50 000 heures GPU sur Jean-Zay,
50 000 heures CPU sur Irène KNL,
50 000 heures CPU sur Irène SKL,
50 000 heures GPU sur Irène.*

Stockage :

*1 To sur Jean-Zay,
1 To sur Irène.*

3.1.2 Étude de l'organisation de la convection tropicale

Sandrine Bony, Max Popp, Anna-Lea Albright (doctorante), Ionela Musat

Étude de l'effet de l'organisation spatiale de la convection hors équateur sur la zone de convergence intertropicale Dans nos travaux précédents, nous avons démontré que l'organisation zonale au long de l'équateur de la convection profonde a un impact important sur la zone de convergence intertropicale (ZCIT) dans des simulations d'aqua-planète que nous avons fait sur Ada ([Popp and Bony, 2019]). Des liens statistiques robustes entre l'organisation zonale suivant l'équateur de la convection profonde et plusieurs aspects de la ZCIT existent également dans les observations ([Popp and Bony, 2019]), ce qui confirme les résultats des simulations. Cependant, les zones de convection profonde intense ne se situent pas toujours dans la région équatoriale, mais se propagent avec les saisons. Elles peuvent notamment s'éloigner de plus de 20° de latitude de l'équateur lors de l'été boréale. Nous voulons donc étudier l'impact de l'organisation spatiale de la convection profonde sur la ZCIT dans des cas où cette convection profonde se situe hors de la zone équatoriale.

Pour cela nous proposons des simulations en mode aqua-planète dans lesquelles nous créons un état dans lequel la ZCIT se positionne hors équateur en imposant une distribution de la température qui est asymétrique par rapport à celui-ci. Dans un second temps nous allons perturber les simulations en imposant des champs zonaux d'évaporation pour créer différentes organisations zonales de la convection profonde. Nous réaliserons toutes ces simulations avec le modèle de circulation générale LMDZ5A-MR en configuration aqua-planète. Cela nécessitera environ 300 années de simulations.

⇒ Demande : 300 années \times 500h = 150 000 heures sur Jean-Zay

Stockage : 10 To sur Jean-Zay

Simulations pour accompagner la campagne d'observations du projet EUREC4A La campagne EUREC4A est une initiative franco-allemande qui est en train d'avoir lieu entre le 20 janvier et le 20 février 2020 à la Barbade. EUREC4A vise à faire progresser la compréhension de l'interaction entre les nuages, la convection et la circulation à grande échelle et leur rôle dans le changement climatique en s'attaquant aux questions suivantes : dans quelle mesure la quantité de cumuli peu profonds est-elle résiliente ou sensible aux variations de la force du mélange convectif, à la turbulence de surface et aux circulations à grande échelle ? Comment les effets radiatifs de la vapeur d'eau et des nuages influencent-ils les circulations peu profondes et la convection ? Quelles sont les implications pour l'organisation spatiale des nuages et de la convection sous les tropiques, et pour la sensibilité climatique ?

Pour accompagner le projet EUREC4A et évaluer la capacité du modèle LMDZ à représenter le climat à l'échelle régionale dans la zone des alizés, nous envisageons de faire un ensemble de simulations très courtes de 2 jours qui couvriront la période de la campagne. Les résultats des simulations LMDZ seront comparées avec toutes les observations EUREC4A. Nous ferons des simulations avec le modèle LMDZ seul ou couplé à ORCHIDEE en mode opérationnel (initialisé par les analyses OPERA). Nous utiliserons la capacité de zoom de LMDZ pour définir des grilles très fines (0.5° et 0.2° au centre du zoom) sur la région EUREC4A.

– LMDZ à résolution 0.5° : $2 \text{ jours} \times 30 \text{ simulation} \times 215\text{h/jour} = 12\,900\text{h}$ sur Irène SKL

– LMDZ à résolution 0.2° : $2 \text{ jours} \times 30 \text{ simulations} \times 430\text{h/jour} = 25\,800\text{h}$ sur Irène SKL

+ *Débogage : $\simeq 5\,000\text{h}$*

Des simulations seront aussi réalisées en mode guidé (forcé par les vents issus des analyses) sur tout le mois de la campagne. Des tests de sensibilité aux paramètres physiques du modèle sont aussi prévus :

⇒ Demande : $5 \text{ simulations} \times 30 \text{ jours} \times (215\text{h/jour} + 430\text{h/jour}) = 96\,750 \text{ h}$

\Rightarrow total : 12900+25800+5000+96750 \simeq 140 000 heures
Stockage : 1 To sur Irène

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 modèles 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. Les simulations auront déjà été faites mais nous aurons besoin de 40 To de stockage sur Jean Zay pour conserver les données créées.

\Rightarrow Stockage : 40 To sur Jean-Zay

3.1.3 Arctique et montagnes

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

Arctique En 2019, nous avons commencé à analyser la réponse du modèle aux pertes de glace Arctique. Nous avons aussi mis en place des diagnostics, testés pour l’instant dans les ré-analyses, et permettant de mesurer les changements de vitesse de phase des ondes de Rossby lorsque le climat change ([Riboldi et al., tted]). Nous sommes à présent en train de tester les mécanismes dans LMDZ6, et avons procédé, avant le passage à Jean-Zay, à 2 simulations de 20 ans, correspondant à l’année « neutre » 2002, et un 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, il nous manque donc 2x30ans, à la résolution LR :

\Rightarrow Demande : $2 \times 30 \text{ ans} \times 750 \text{ h} = 45 \text{ 000 h}$ sur Jean-Zay
Stockage : 100 To

Montagnes Nous sommes aussi en phase de recherche en ce qui concerne l’effet des montagnes de petites échelles horizontales (de l’ordre du km), et pour développer des paramétrisations qui réconcilient couche limite et ondes de gravité (la théorie commence à être finalisée dans [Lott et al., tted]).

Les besoins sont difficiles à chiffrer, une famille de 10 simulations de 5 ans est l’ordre de grandeur que nous utilisons pour ce genre d’étude :

\Rightarrow Demande : $10 \times 5 \text{ ans} \times 750 \text{ h} \simeq 38 \text{ 000 h}$ sur Jean-Zay
Stockage : 50 To sur Jean-Zay

3.1.4 Impact de la paramétrisation de la convection sur les phénomènes tropicaux : vers l'amélioration de la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans LMDZ

Catherine Rio, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix

La version 6A du modèle LMDZ présente des améliorations (notamment sur continent) mais aussi de fortes dégradations (sur l'océan indien, la warm pool, le continent maritime) pour la représentation de la distribution et de la variabilité des pluies tropicales. Plusieurs développements sont en cours autour du modèle du thermique, de son couplage avec le schéma de convection profonde, sur la densité des poches froides et sur la représentation des nuages convectifs. L'objectif de l'année 2020 sera de tester les nouveaux développements souvent réalisés dans la version uni-colonne du modèle régulièrement dans des simulations globales, afin de mesurer leur impact sur la simulation de la pluie tropicale, ce qui permettra d'orienter les nouveaux développements, pour permettre d'améliorer le modèle à la fois à l'échelle des processus et à l'échelle globale. On testera en particulier un nouveau schéma pronostique de la densité de poches froides, la fermeture du modèle du thermique et des modifications des distributions sous-maille utilisées pour le calcul de la fraction nuageuse. Pour cela, il sera nécessaire de réaliser des séries de simulations globales de plusieurs années.

- Une trentaine de tests de sensibilité aux processus physiques sur des périodes de 3 ans, avec LMDZ6-LR :

$\Rightarrow 30 \text{ simulations} \times 3 \text{ ans} \times 750 \text{ h} \simeq 68\,000 \text{ h sur Jean-Zay}$

Stockage : 4 To sur Jean-Zay

3.1.5 Microphysique des nuages froids

Nuages et précipitations en Antarctique

J.-B. Madeleine

En vu de l'amélioration de la physique du modèle LMDZ dans les régions polaires, et en particulier dans la région Antarctique, nous améliorons les paramétrisations à l'origine de la neige sur les côtes de l'Antarctique ainsi que la représentation de l'humidité relative sur le plateau. Pour cela, nous aurions besoin de réaliser des simulations courtes de mise au point avec LMDZ6-LR (environ 10 ans de simulation en tout) en zoomé-guidé ainsi qu'une validation sur 10 ans une fois les paramétrisations finalisées.

$\Rightarrow \text{Demande} : 20 \times 750 \text{ h} = 15\,000 \text{ h sur Jean-Zay}$

Stockage : 6 To sur Jean-Zay.

Représentation des nuages hauts

M. Bonazzola

Pour évaluer l'impact de nos nouvelles paramétrisations, nous voudrions réaliser des simulations de contrôle, et des simulations incluant les nouvelles paramétrisations des grandeurs radiatives. Les deux types de simulations seront réalisées avec et sans les paramétrisations de vitesse de sédimentation décrites dans Stubenrauch et al. 2019. Nous souhaitons donc réaliser 4 simulations de type AMIP d'environ 6 ans chacune, avec LMDZ6-LR.

$\Rightarrow 4 \text{ simulations} \times 6 \text{ ans} \times 750 \text{ h} = 11\,000 \text{ h sur Jean-Zay}$

Stockage : 3 To sur Jean-Zay

3.2 Interactions océan-atmosphère

3.2.1 Couches de réchauffements diurne en Arctique

H. Bellenger, J. P. Duvel, L. Guez et L. Abot (stage ENSTA)

Lorsque le vent est relativement faible, sous l'effet de l'absorption du flux solaire dans les premiers mètres de l'océan, il se crée une couche stable d'eau chaude en surface. Ces couches de réchauffement diurne (diurnal warm layers en anglais, DWL) peuvent correspondre à des variations de températures de surface de plusieurs degrés (6°C) pendant la journée. Elles influencent le bilan énergétique à la surface, renforcent le refroidissement de l'océan par les flux de chaleurs turbulents et le rayonnement infrarouge et renforcent les flux de CO_2 . Les WL sont observées sur l'ensemble du globe et sont particulièrement fortes et fréquentes dans les tropiques.

L'Océan Arctique est une région particulière qui peut recevoir, autour du solstice d'été, plus d'énergie solaire au cours de la journée que les régions tropicales avec un cycle diurne relativement faible. Des couches chaudes sont donc susceptibles de s'y développer et de s'y maintenir pendant plusieurs jours. Depuis leur mise en évidence par Eastwood et al. (2011), très peu d'études ont porté sur les couches chaudes dans les régions arctiques. En particulier, on ne connaît pas leur fréquence, leur durée, leur distribution spatiale, leur intensité, et leur variabilité au cours de la saison d'été ou d'une année à l'autre. Il reste aussi à étudier l'interaction de ces couches chaudes avec leur environnement, en particulier la glace de mer dont la profondeur (1-4m) est comparable à celle des DWLs, dans cette région déterminante pour le climat global qui est siège de la création d'eaux profondes et qui est extrêmement sensible au changement climatique. Ces caractéristiques seront étudiées au moyen des réanalyses ERA5 et de modèles simples.

La paramétrisation des DWL implémentée dans LMDZ et tester dans le cadre de ce projet rlmD en 2019-2020 permettra d'étudier les caractéristiques des DWL arctiques simulés en effectuant deux simulations zoomées de 20-25 ans (équivalents en temps de calcul à ce qui est nécessaire à des simulations AMIP à une résolution de LR) sur l'arctique avec ou sans représentation des DWL pour valider le modèle et diagnostiquer l'impact potentiel de ces DWL sur la glace de mer.

⇒ Demande : 2 simulations \times 50 ans \times 750 h \simeq 75 000 h sur Jean-Zay
Stockage : 3 To sur Jean-Zay

3.2.2 Effet des stratifications de surface sur les flux de CO_2

H. Bellenger, L. Bopp, L. Guez, S. Flavoni, C. Ethé et O. Martin (stage M2 WAPE)

La compréhension et la correcte représentation des échanges entre les réservoirs de dioxyde de carbone (CO_2), principal gaz à effet de serre, et en particulier des échanges océan-atmosphère, sont déterminantes pour prévoir l'évolution du réchauffement climatique et l'acidification des océans qui influence si fortement les écosystèmes marins. Or ces échanges de CO_2 sont extrêmement variables, ils dépendent fortement de l'activité biologique, et de l'état physique (salinité et température) de l'océan de surface qui est lui-même fortement perturbé par la variabilité océanique comme les vortex océaniques de méso-échelle ou les remontées d'eaux froides (upwelling). Ces flux sont de plus notablement sous-échantillonnés à l'heure actuelle.

1. Parmi les processus ayant un impact potentiel sur ces échanges et qui sont d'échelle trop fine pour être pris en compte par les modèles de climat, citons : Les stratifications en température et salinité des premières dizaines de centimètre de l'océan par vent faible sous l'effet stabilisateur

du rayonnement solaire (Diurnal Warm Layers, DWL) ou de la pluie (Cool Freshwater Lenses, CFL). L'augmentation de température due aux DWL, pouvant atteindre quelques degrés, elle tend à augmenter le flux de CO_2 de l'océan vers l'atmosphère. Au contraire, le refroidissement et la dessalure associés aux pluies peuvent localement changer une région source en une région puits de carbone. Certaines études évaluent l'impact global des précipitations comme étant une augmentation d'environ 6% de l'absorption de CO_2 par les océans.

2. La couche diffusive océanique, de moins d'un millimètre d'épaisseur, dans laquelle le transport de chaleur et la salinité sont contrôlés par la diffusion moléculaire. Cette peau correspond le plus souvent à un refroidissement par les flux de chaleur et d'évaporation à l'interface correspondant à une légère augmentation de la salinité et une diminution de la température de l'ordre de $0.3^\circ C$. Au moyen de calculs théoriques évalue l'ordre de grandeur de cet effet à $-0.34 Pg C yr^{-1}$ sur l'ensemble des océans soit une augmentation de 20% du flux global de l'atmosphère vers l'océan.

La paramétrisation proposée par [Bellenger et al., 2017] de la couche diffusive d'interface et des stratifications de surface océanique associées au DWL et aux CFL est actuellement en phase d'intégration dans le modèle de climat de l'IPSL (IPSLCM6). Dans le cadre de ce stage, il sera possible d'étudier pour la première fois dans un cadre de modélisation globale couplée (océan avec biogéochimie marine et atmosphère) l'importance de la bonne représentation de ces phénomènes pour une correcte évaluation des flux globaux air-mer de CO_2 . Une analyse plus fine de l'impact des stratifications de surface océanique sur la variabilité spatiale et temporelle des flux de CO_2 sera menée pour discuter de manière critique les résultats obtenus au niveau global.

Nous effectuerons une simulation de référence de type PiControl avec les versions des modèles NEMO et LMDZ dans lesquels la paramétrisation a été implémentée et deux simulations de 10 ans avec IPSLCM6-LR dans la configuration CMIP6 l'une avec la paramétrisation de [Bellenger et al., 2017] agissant uniquement sur les flux de chaleur et infrarouge à la surface et l'autre avec son effet sur les échanges de CO_2 pris en compte.

*⇒ Demande : 3 simulations × 10 ans × 1 500 h ≈ 45 000 h sur Irène SKL
 + 15 000 heures pour le débogage et tests préliminaire de la nouvelle paramétrisation ⇒ 60 000 h sur Irène SKL
 Stockage : 5 To sur Irène*

3.3 Évaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE

3.3.1 Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE

Joséfine Ghattas

Comme l'an dernier, Des simulations routinières sont lancées pour vérifier le fonctionnement du modèle et évaluer au jour-le-jour les configurations forcées et couplées à LMDZ. On effectue des simulations courtes mais aussi des simulations plus longues pour permettre une évaluation scientifique des modèles.

- Simulations forcées :
5 000 heures CPU et 4 To sur Jean-Zay
- Simulations couplées LMDZOR :
*40 ans × 700h + 5 000 heures pour le débogage = 38 000h sur Jean-zay, 4 To sur Jean-zay
 ⇒ Demande : 43 000 heures CPU sur Ada, 5 To sur Jean-zay*

3.3.2 Couplage surfaces continentales atmosphère

F. Cheruy, S. Balhane (thèse) , A. Ducharne, F. Hourdin, F.A. Idelkadi, I. Musat, P. Drobinski

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 et tuning du modèle : Modèle et Observation Il est désormais établi que le développement d'un modèle de climat comporte une étape essentielle d'ajustement ou de tuning des paramètres libres des paramétrisations qui, quel que soit leur degré de raffinement, ne sont qu'une représentation idéalisée et imparfaite de processus complexes ([Hourdin et al., 2017]). Le modèle de climat de l'IPSL a bénéficié d'un important effort de tuning lors de la préparation à l'exercice CMIP6 ([Hourdin et al., 2019]) dans le cadre duquel les simulations climatiques en support du prochain rapport du GIEC sont produites. Ce tuning a concerné avant tout le bilan radiatif et l'impact radiatif des nuages au sommet de l'atmosphère (variables essentielles du climat du système terre-océan-atmosphère). Moins d'effort a pu être porté sur des variables essentielles pour l'exploitation des simulations climatiques pour les études d'impact du changement climatique comme par exemple le rayonnement solaire net à la surface, la température au voisinage de la surface ([Cheruy et al., 2020]). Nous proposons de compléter le tuning du modèle en ciblant aussi l'ajustement des paramètres impliqués dans les bilans d'eau et d'énergie à la surface des continents ([Li et al., 2019]) (sans dégrader le tuning précédemment établi) et en s'appuyant sur des simulations zoomées et guidées et les observations des sites instrumentés.

A cet effet nous aurons besoin d'effectuer plusieurs séries de simulations zoomées-guidées à confronter aux métriques que constituent les observations locales du bilan d'énergie en surface. 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 (MOSAI : Model and Observation for Surface Atmosphere Interactions a été re-soumis en Octobre 2019, A. Lohou coordinatrice).

De façon préliminaire et en nous inspirant des simulations mises en place pour le tuning « atmosphérique », nous prévoyons d'effectuer 10 simulations de 2 ans pour chacun des paramètres libres à tester, avec LMDZ5-VLR. Si le projet MOSAI est accepté nous proposons de mettre en place des configurations 1D adaptés aux sites instrumentés, ce qui pourrait permettre d'éviter de répéter les simulations globales (zoomées) pour les différentes vagues nécessaires.

⇒ Demande : $10 \times 2 \text{ ans} \times 450 \text{ h}$ (+20 % supplémentaire pour le guidage et sorties haute fréquence) $\simeq 11\,000 \text{ h}$ sur Jean-Zay

+2 000 h pour le débogage $\Rightarrow 14\,000 \text{ h}$.

Stockage = 1 T sur Jean-Zay (seulement les résultats dans le zoom seront conservés)

Modélisation du cycle hydrologique au Maroc dans le contexte du changement climatique (Thèse en Co-tutelle avec Université Mohammed 6 Polytechnique)

Le travail de thèse a pour objectif d'une part une meilleure connaissance des mécanismes qui régissent le climat au Maroc et en Afrique du nord et d'autre part l'amélioration de la modélisation du cycle hydrologique dans cette région dans le contexte du changement climatique. L'objectif général est, dans un premier lieu, la compréhension des différents processus et mécanismes impliqués, et l'évaluation des changements futurs à une échelle régionale. Il s'agira aussi de disposer d'un outil qui pourra être exploité pour des analyses scientifiques du climat régional comme pour des études d'adaptation au changement climatique. Dans cette perspective, nous mettront en place

une configuration spécifique pour le Maroc et l’Afrique du Nord. Cette configuration est en cours d’élaboration : Pour une résolution de 20km sur la Maroc, une grille de 160x90x79 est nécessaire, ce qui correspond à 500h pour 1 an de calcul.

*⇒ Demande : $2 \times 50 \text{ ans} \times 500 \text{ heures} = 50\,000 \text{ heures sur Jean-Zay}$
+ 5000 h de débogage $\Rightarrow 55\,000 \text{h}$
Stockage : 1 T sur Jean-Zay*

3.3.3 Amélioration de l’hydrologie continentale, impact sur le climat récent et futur

Agnès Ducharne, Frédérique Cheruy, Josefine Ghattas, Salma Tafasca (doctorante), Pedro Arboleda (doctorant)

Rôle des propriétés du sol L’objectif du projet SP-MIP est de déterminer à quel point la dispersion entre plusieurs modèles de surface continentale (LSM pour land surface model) s’explique par les différences de leurs paramètres du sol (dont porosité, conductivité et diffusivité hydraulique). Ces paramètres contrôlent la vitesse des transferts verticaux et la capacité de rétention de l’eau dans le sol, et jouent donc sur les bilans d’eau et la partition entre évapotranspiration, ruissellement et drainage. Ils dépendent eux de la texture du sol (proportion de particules fines/argiles et grossières/sables, classifiée en 12 classes allant de 1 pour les sols les plus sableux à 12 pour les sols les plus argileux) et des lois choisies pour relier la texture aux paramètres (on parle de fonctions de pédo-transfert).

Les simulations que nous avons réalisées dans ce cadre avec le modèle ORCHIDEE (non couplé avec LMDZ) ont montré que les différentes cartes de texture du sol disponibles à l’échelle globale ont un effet assez faible sur les bilans d’eau simulés, à l’exception de quelques régions, où les cartes représentent différemment les sols argileux ([Tafasca et al., 2019]). Dans ces simulations, la porosité du sol dépend uniquement de la texture du sol, et en aucun cas ne dépasse 0.4 m³/m³, alors qu’il existe une carte globale de porosité ([Reynolds et al., 2000]) dont les valeurs sont plus réalistes, puisqu’elle tient également compte de la structure du sol et de la présence de la matière organique, qui augmentent significativement la porosité, avec des valeurs pouvant aller jusqu’à 0.8 m³/m³. Il existe une forte similitude entre les zones où la porosité est augmentée par cette carte et les zones où l’évapotranspiration est sous-estimée quand on utilise les valeurs standard de porosité, qui correspondent souvent à des biais chaud du modèle LMDZOR ([Cheruy et al., 2020]). Nous pensons donc pouvoir réduire ces biais chaud avec la nouvelle de carte porosité (l’augmentation de porosité amenant celle de l’humidité du sol, de l’évapotranspiration, ce qui baisserait la température excessive). La demande donc porte sur deux simulations LDMDZOR de 50 ans chacune, avec deux cartes de porosité différentes, avec LMDZ6-LR.

*⇒ Demande : $2 \text{ simulations} \times 50 \text{ ans} \times 750 \text{h} = 75\,000 \text{ h sur Jean-Zay}$
Stockage : 2 To sur Jean-Zay*

Rôle des nappes, des plaines d’irrigation et de l’irrigation L’objectif est d’explorer l’effet sur le climat (passé et futur) de trois facteurs de contrôle importants des rétroactions surface - atmosphère, à savoir les nappes souterraines (qui alimentent de nombreuses zones humides), les plaines d’inondation et l’irrigation. Ces trois facteurs, tous liés à l’eau, sont susceptibles d’augmenter l’humidité des sols, donc l’évaporation, ce qui rafraîchit l’atmosphère et favorise les précipitations (localement ou sous le vent). On peut ainsi supposer qu’ils constituent une sorte de "climatiseur" du climat, notamment l’été, en atténuant certains événements extrêmes (sécheresses et vagues de

chaleurs). La temporalité de ces facteurs est cependant différente, avec une inertie plus forte pour les eaux souterraines, pouvant impliquer des rétroactions complexes avec la variabilité saisonnière et pluriannuelle du climat.

Nous venons de développer une nouvelle version du modèle ORCHIDEE, appelée ORCHIDEE-GWF, qui repose sur la séparation d'une fraction potentiellement humide au sein de chaque maille. Cette fraction humide correspond aux fonds de vallées (« lowland ») et reçoit les écoulements de la fraction haute (« upland »), ce qui doit permettre de développer une nappe, dont la profondeur variera avec le climat, et qui rétroagira sur ce dernier en alimentant une évapotranspiration accrue. Dans les premières simulations couplées que nous avons réalisées (dans le cadre du projet DARI n°100502, désormais clos), l'augmentation d'évapotranspiration s'est révélée assez faible quantitativement, mais significatives dans certaines régions où l'humidité des sols est limitante, comme le pourtour méditerranéen ou le Sahel. Nous avons aussi montré que la prise en compte des interactions nappes/évapotranspiration permet d'atténuer le réchauffement anthropique, i.e. de ralentir (légèrement) ce réchauffement. Nous voulons maintenant intégrer la description des plaines d'inondations dans ce modèle, en utilisant des paramétrisations existantes ([Lauerwald et al., 2017]) et une nouvelle carte des plaines d'inondations construite avec celle des fractions humides ([Tootchi et al., 2019]). Ce travail sera préparé cette année par une dizaine de simulations test en mode forcé sur l'Amérique du Sud, avec une résolution $0.5^\circ \times 0.5^\circ$:

⇒ Demande : 10 simulations \times 20 ans \times 10 h = 2 000 h

Stockage : 1 To sur Jean-Zay

Nous voulons aussi comparer l'impact des nappes à celui de l'irrigation, sachant que les zones très irriguées sur la planète montrent des biais chauds importants dans les simulations climatiques négligeant ce processus ([Mizuochi et al., 2020]). Dans le cadre du réchauffement climatique, dont un impact important sera d'intensifier les sécheresses, conduisant sûrement à augmenter le recours à l'irrigation, une question importante est de savoir si les ressources en eau resteront suffisantes pour abonder cette demande accrue pour l'irrigation, ou plutôt quand les ressources en eau (des cours d'eau et des nappes) deviendront insuffisantes pour alimenter irrigation, zones humides et plaines d'inondations, avec des effets potentiels sur le climat (réchauffement local accru) et la production agricole. Avant d'aborder le système complet, nous voulons tester cette année l'effet de l'irrigation dans la version la plus récente du modèle LMDZOR, utilisée pour les simulations CMIP6 ([Cheruy et al., 2020]), qui montre des performances bien supérieures sur le cycle de l'eau terrestre que celle utilisée pour tester l'impact de l'irrigation sur le climat par ([Guimberteau et al., 2012]). La demande porte donc sur deux simulations LMDZOR de 50 ans chacune, avec et sans irrigation, avec LMDZ6-LR :

⇒ Demande : 2 simulations \times 50 ans \times 750h = 75 000 h sur Jean-Zay

Stockage : 2 To sur Jean-Zay

3.4 Isotopes de l'eau

3.4.1 Isotopes dans LMDZ6

David Cugnet, Camille Risi

En 2020, il est prévu de travailler sur une implémentation pérenne des isotopes dans LMDZ6, avec une remise à plat complète de la manière de les coder. Les isotopes ne seront plus traités d'une manière calquée sur celle de l'eau, donc très intriquée dans le code, mais de manière aussi légère et modulaire que possible, moyennant des routines séparées. Cet allègement des interfaces entre le code principal et la partie spécifique aux isotopes poursuit un but double : d'une part disposer

tout au long des évolutions du modèle LMDZ6, au rythme de son contenu physique et de celui des machines de calcul utilisées, d'un code isotopique fonctionnel sans recodage significatif, et d'autre part étendre le traitement à d'autres isotopes que ceux de l'eau, auxquels est pour l'instant dédié le code.

Notre demande permettra de réaliser des tests de mise au point :

⇒ Demande : 5 000 heures sur Jean-Zay.

3.4.2 SAM-iso

Camille Risi, Caroline Muller, Françoise Vimeux

Compréhension des processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau dans des simulations idéalisées Nous souhaitons continuer de comprendre les processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau troposphérique, en analysant des simulations idéalisées d'équilibre radiatif. Après avoir étudié ce qui contrôle la composition isotopique de la vapeur d'eau près de la surface, nous nous sommes rendus compte de l'importance de la composition isotopique des panaches ascendants et descendants. Nous souhaitons à présent comprendre ce qui contrôle la composition de ces panaches, en quantifiant en particulier les effets de l'évaporation en surface et de l'évaporation de la pluie. Pour cela, des simulations du même type que celles déjà réalisées seront répétées avec des coefficients de fractionnement idéalisés pour l'évaporation en surface et pour l'évaporation de la pluie. Ce sont des simulations de 100 jours, à 750 m de résolution, sur un domaine 128×128.

⇒ Demande : 5 simulations × 50 000h = 250 000 heures sur Irène KNL

Stockage : 5 × 10 Go ≈ 50 Go

Compréhension des processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau dans les cyclones tropicaux La composition isotopique de l'eau mesurée dans la précipitation ou dans la vapeur d'eau présente des variations caractéristiques lors du passage de cyclones tropicaux. De telles variations ont été mesurées par exemple ces dernières années à La Réunion de manière précise et à haute résolution temporelle (figure 1). Plusieurs hypothèses ont été avancées par le passé pour expliquer ces variations isotopiques, impliquant la circulation méso-échelle dans le cyclone, la condensation dans les panaches ascendants, les interactions entre les gouttes de pluie qui tombent et la vapeur d'eau environnante et les interactions entre la surface de l'océan et l'atmosphère. Mais ces hypothèses nécessitent d'être confrontées à des modèles simulant de manière explicite ces mécanismes.

Nous souhaitons donc étudier ces mécanismes dans une simulation à haute résolution d'un cyclone tropical. Avec une résolution de quelques km, une telle simulation résout explicitement la circulation méso-échelle du cyclone et les différents panaches convectifs (figure 2).

La signature isotopique des différentes parties du cyclone simulé sera d'abord étudiée. Ensuite, les mécanismes produisant ces signatures isotopiques seront analysés en détail et leur effet quantifié. Enfin, à la lumière de la connaissance ainsi acquise, les données isotopiques enregistrées pendant les cas cycloniques à La Réunion seront interprétées.

Nous réaliserons 1 simulation de 100 jours à 4 km de résolution, sur un domaine 256×256 :

⇒ Demande : 200 000h sur Irène KNL

Stockage : 40 Go

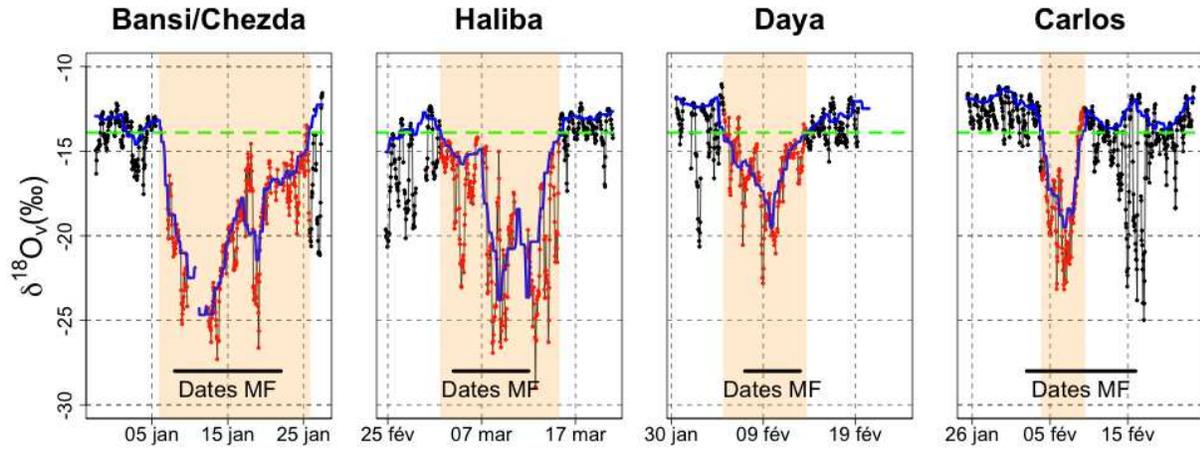


FIGURE 1 – Variations caractéristiques de la composition isotopique de la vapeur d'eau lors du passage de plusieurs cyclones en 2015, 2016 et 2017 à La Réunion ([Guilpart et al., 2017]).

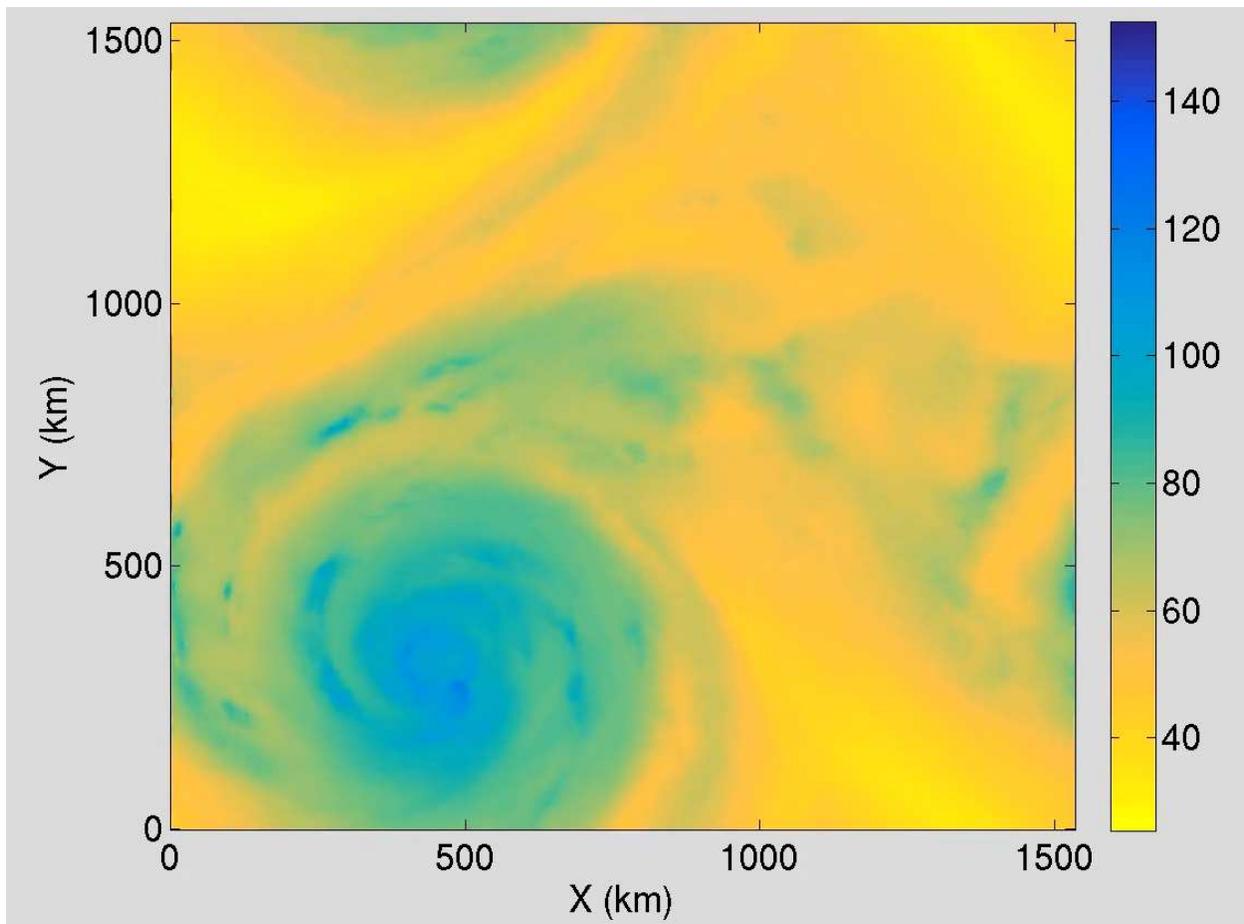


FIGURE 2 – Simulation d'un cyclone par une simulation idéalisée à haute résolution (3 km) avec le modèle SAM ([Wing et al., 2016]). Les couleurs indiquent l'eau précipitable en mm.

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 bénéficie d'une 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.

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. La version officielle d'ORCHIDEE est parallélisée MPI-OpenMP.

4.3 Le modèle SAM-iso

Pour la 2e année 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 96 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. Il est ici utilisé dans sa version isotopique (SAM-iso) ([Blossey et al., 2010, Moore et al., 2014]).

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

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.
- [Cheruy et al., 2020] Cheruy, F., Ducharne, A., Hourdin, F., Musat, I., Vignon, E., Gastineau, G., and Bastrikov, V. (2020). Improved near surface continental climate in IPSL-CM6 by combined evolutions of atmospheric and land surface physics . *JAMES*. submitted.
- [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.
- [Guilpart et al., 2017] Guilpart, E., Vimeux, F., Evan, S., Brioude, J., Metzger, J.-M., Barthe, C., Risi, C., and Cattani, O. (2017). The isotopic composition of near-surface water vapor at the maïdo observatory (reunion island, southwestern indian ocean) documents the controls of the humidity of the subtropical troposphere. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 122(18) :9628–9650.
- [Guimberteau et al., 2012] Guimberteau, M., Laval, K., Perrier, A., and J., P. (2012). Global effect of irrigation and its impact on the onset of the indian summer monsoon. *Clim. Dyn.*, 39 (6) :1329–1348, DOI : 10.1007/s00382-011-1252-5.
- [Hourdin et al., 2019] Hourdin, F., Jam, A., Rio, C., Couvreur, F., Sandu, I., Lefebvre, M.-P., Brient, F., and Idelkadi, A. (2019). Unified parameterization of convective boundary layer transport and clouds with the thermal plume model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(9) :2910–2933.
- [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., et al. (2017). The art and science of climate model tuning. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(3) :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.
- [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.
- [Lauerwald et al., 2017] Lauerwald, R., Regnier, P., Camino-Serrano, M., Guenet, B., Guimberteau, M., Ducharne, A., Polcher, J., and Ciais, P. (2017). Orchileak (revision 3875) : a new model branch to simulate carbon transfers along the terrestrial–aquatic continuum of the amazon basin. *Geophys. Model. Dev.*, 10 :3821–3859.
- [Li et al., 2019] Li, S., Rupp, D. E., Hawkins, L., Mote, P. W., McNeall, D., Sparrow, S. N., Wallom, D. C. H., Betts, R. A., and Wettstein, J. J. (2019). Reducing climate model biases by exploring parameter space with large ensembles of climate model simulations and statistical emulation. *Geoscientific Model Development*, 12(7) :3017–3043.
- [Lott et al., tted] Lott, F., Deremble, B., and Soufflet, C. (submitted). Mountain waves produced by a stratified boundary layer flow. part i : Hydrostatic case. *J Atmos Sci*.
- [Mizuochi et al., 2020] Mizuochi, H., Ducharne, A., Al-Yaari, A., Wigneron, J.-P., Peylin, P., Maignan, F., Ghattas, J., Bastrikov, V., Vuichard, N., and Cheruy, F. (2020). Multi-variable evaluation of the ORCHIDEE land surface model used in CMIP6. *GMD*. in prep.
- [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.
- [Popp and Bony, 2019] Popp, M. and Bony, S. (2019). The impact of convective clustering on the width of the tropical rain belt. *Nature Communications*, 10 :4261, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12167-9>.
- [Reynolds et al., 2000] Reynolds, C., Jackson, T., and Rawls, W. (2000). Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resources Research*, 36(12) :3653–3662.
- [Riboldi et al., tted] Riboldi, J., Lott, F., d’Andrea, F., and Rivière, G. (submitted). No trend in phase speed of rossby waves during recent decades of arctic amplification. *Nature Geoscience*.
- [Tafasca et al., 2019] Tafasca, S., Ducharne, A., and Valentin, C. (2019). Weak sensitivity of the terrestrial water budget to global soil texture maps in the orchidee land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pages 1–20.
- [Tootchi et al., 2019] Tootchi, A., Jost, A., and Ducharne, A. (2019). Multi-source global wetland maps combining surface water imagery and groundwater constraints. *Earth System Science Data*, 11 :189–220.
- [Wing et al., 2016] Wing, A. A., Camargo, S. J., and Sobel, A. H. (2016). Role of radiative–convective feedbacks in spontaneous tropical cyclogenesis in idealized numerical simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(7) :2633–2642.
- [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.*, pages 793–813.