

Rapport d'activité DARI 2019 – projet 0292

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

Rapport d'activité

Camille Risi

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

L.M.D. - janvier 2019

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Vue d'ensemble du projet	2
1.2	Bilan de notre consommation	2
2	Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	4
2.1	Ajustement de paramètres libres	4
2.2	Entretien d'une version distribuable de LMDZ	4
2.2.1	Convergence LMDZ-DYNAMICO	4
2.2.2	Débuggage	4
2.2.3	Mise à jour des diagnostics COSP	5
2.3	Etude de l'organisation de la convection dans LMDZ en configuration d'équilibre radiatif-convectif	5
2.3.1	Étude de l'influence de l'organisation de la convection dans l'ITCZ sur la circulation à grande échelle	5
2.3.2	Simulations RCEMIP	7
2.3.3	Étude des mécanismes d'organisation zonale de la convection	7
2.3.4	Impact de l'agrégation sur la sensibilité climatique	7
2.4	Influence des montagnes et de la stratosphère sur le climat	11
2.4.1	Rôle de la stratosphère dans la variabilité ENSO	11
2.4.2	Oscillation Quasi-biennale	12
2.5	Paramétrisation de la convection et phénomènes tropicaux	12
2.5.1	Couches de réchauffement diurne, flux à l'interface et convection	12
2.5.2	Paramétrisation de la convection et impact sur les pluies tropicales	15
2.6	Paramétrisation des nuages bas	15
2.7	Microphysique des nuages de froids	15
2.7.1	Brumes et précipitations en Antarctique	15
2.7.2	Représentation des nuages hauts	16
3	Variabilité des températures en Atlantique tropical	18

4	Evaluation, amélioration et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	18
4.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE	18
4.2	Couplages surfaces continentales - atmosphère	18
4.2.1	Mieux comprendre les rétroactions humidité du sol température	18
4.2.2	Évaluation des composantes du bilan d'énergie à la surface en lien avec les développements des paramétrisations de la physique atmosphérique et du modèle de surface sur le site du SIRTA	19
4.3	Simulation des hautes latitudes et des cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE	20
4.3.1	Débogage et amélioration des performances du modèle ORCHIDEE-MICT	20
4.3.2	Évaluation de l'humidité des sols simulé par le modèle ORCHIDEE-MICT	20
4.3.3	Impact du changement climatique et des activités anthropiques sur les débits des fleuves en Chine	21
5	Isotopes de l'eau	23
5.1	Signature isotopique des profils verticaux de vitesse verticale de grande échelle	23
5.2	Les isotopes de l'eau comme marqueur du mélange dans les basses couches	23
5.3	LMDZ-iso au Cénozoïque	25

1 Introduction

1.1 Vue d'ensemble du projet

Le projet est centré sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ (section 2), de sa version isotopique LMDZ-iso (section 5), du modèle de surface continentale ORCHIDEE (section 4), et du modèle d'océan NEMO (section 3).

1.2 Bilan de notre consommation

Pour l'allocation A4, nous avons demandé 3 198 000 heures CPU sur Ada. Nous avons obtenu 2 000 000 heures sur Irène et le reste sur Ada. Finalement, nous n'avons consommé que 404 000 heures sur Ada (tableau 1) et 117 000 sur Irène (tableau 2) (dont 3000 sur Irène Xlarge et 114 000 sur Irène Skylake). La principale raison de cette sous-consommation inhabituelle est que les 2 000 000 heures obtenues sur Irène, dédiées à l'ajustement des paramètres libres du modèle LMDZ (section 2.1), n'ont pas du tout été utilisées.

thème	heures allouées (k heures CPU)	heures consom- mées au 1er février 2019 (k heures CPU)	% de consomma- tion par rapport à l'allocation initiale
Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	813	258	32%
dont entretien d'une version distribuable de LMDZ	0	94	∞
dont Organisation de la convection	202	98	49%
dont Montagnes et stratosphère	375	0	0%
dont Convection	152	0	0%
dont représentation des nuages bas	0	5	∞
dont Microphysique des nuages froids	84	61	73%
Variabilité des températures en Atlantique tropical	3	0	0%
Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	302	81	27%
dont suivi des versions	54	13	25%
dont couplages surfaces continentales - atmosphère	184	30	16%
dont cycles bio-géochimiques	64	38	49%
Isotopes de l'eau	80	88	110%
dont entretien et processus nuageux et applications régionales	23	88	380%
LMDZ-iso du Cénozoïque	57	0	0%
Total Ada	1 198	433	36%

TAB. 1 – Tableau comparant les heures de calcul initialement allouées et consommées sur Ada au 1er février 2018 (dont heures bonus).

thème	heures allouées (k heures CPU)	heures consom- mées au 1er février 2019 (k heures CPU)	% de consomma- tion par rapport à l'allocation initiale
Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	2 000	117	6%
dont entretien d'une version distribuable	0	117	∞
dont ajustement des paramètres	2 000	0	0%
Total Irène	2 000	117	6%

TAB. 2 – Tableau comparant les heures de calcul initialement allouées et consommées sur Irène au 1er février 2018 (dont heures bonus).

2 Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ

2.1 Ajustement de paramètres libres

Frédéric Hourdin, Ionela Musat, Laurent Fairhead

Consommation : 0 heures CPU sur Irène

Nous avons demandé 2 000 000 d'heures sur Ada, qui avaient été convertie en heures sur Irène. Ionela Musat, qui devait travailler sur le portage des simulations sur Irène et réaliser les simulations sur ce thème, a été occupée par des problèmes de mise au point des simulations CMIP6. Elle n'a donc presque pas pu travailler sur ce thème.

2.2 Entretien d'une version distribuable de LMDZ

2.2.1 Convergence LMDZ-DYNAMICO

Laurent Fairhead

Consommation : 3 000 heures CPU sur Irène Xlarge, 114 000 heures CPU sur Irène Skylake

Les travaux sur Irène concerne les tests de convergence la branche de la physique utilisée avec DYNAMICO avec la physique de référence, dans le but de les faire converger.

2.2.2 Débuggage

Ionela Musat

Consommation : 21 000 heures sur Ada

Des tests ont été réalisés avec des sorties tres haute frequence (au pas de temps de la physique) de variables intermediaires intervenant dans le calcul de la temperature a 2m, qui a été corrigé.

2.2.3 Mise à jour des diagnostics COSP

Artem Feofilov

Consommation : 47 000 heures CPU sur Ada

Le Cloud Feedback Model Intercomparison Project Observational Simulator Package (COSP, [Bodas-Salcedo et al., 2011]) rassemble une collection de simulateurs d’observables (ou « simulateurs de satellites ») qui traduisent les propriétés des nuages simulés par des modèles en observations synthétiques. Ces simulateurs d’observables sont nécessaires pour produire les diagnostics liés aux nuages de certaines simulations CMIP6 ([Eyring et al., 2016]).

Dernièrement, une nouvelle version de COSP a été développée : COSP2 ([Swales et al., 2018]), disponible sur la plateforme de développement GitHub. COSP2 a été implémentée dans LMDZ6 et est en cours de test.

2.3 Etude de l’organisation de la convection dans LMDZ en configuration d’équilibre radiatif-convectif

Sandrine Bony, Max Popp (post-doc), David Coppin (doctorant)

Consommation : 202 000 heures CPU sur Ada

L’étude de l’agrégation de la convection vise à mieux comprendre ce qui contrôle la forme que prend la convection et le lien entre cette agrégation et la circulation générale de l’atmosphère. Cette année, nous nous sommes concentrés sur l’impact de l’agrégation sur le climat et la variabilité du système climatique.

2.3.1 Étude de l’influence de l’organisation de la convection dans l’ITCZ sur la circulation à grande échelle

Les études numériques de l’équilibre radiatif-convectif (RCE) ont démontré que l’organisation spatiale de la convection profonde avait un profond impact sur l’atmosphère à grande échelle. On peut alors se demander si l’impact de l’organisation de la convection a aussi un impact sur le climat dans des configurations plus réalistes. En particulier il serait important de savoir si l’organisation spatiale de la convection dans la zone de convergence intertropicale (ITCZ) a un impact sur la circulation de grande échelle, car c’est un des « Grand Challenges » établis par le World Climate Research Programme (WCRP). Pour aborder ces questions nous avons mis au point une configuration aquaplanète du modèle de climat IPSL-CM5A-MR dans laquelle nous pouvons forcer différentes formes d’organisation zonale de la convection profonde en imposant des patterns d’évaporation dans une bande équatoriale. Sur la base d’un grand ensemble de simulations dans cette configuration, nous avons pu démontrer que plus la convection est localisée, plus la circulation à grande échelle méridionale est faible. Cela mène à une distribution méridionale de précipitation et à une ITCZ plus large avec moins de précipitation à l’équateur et plus de précipitations aux latitudes plus hautes (figure 1), et démontre l’importance de l’organisation spatiale sur l’ITCZ. Nous avons eu moins de problèmes que anticipé pour mettre en place la version du modèle, et nous n’avons pas dû répéter de simulations, donc nous avons sous-consommé par rapport aux heures demandées. Nous comptons faire quelques simulations de plus, mais nous allons probablement rester en dessous des heures demandées.

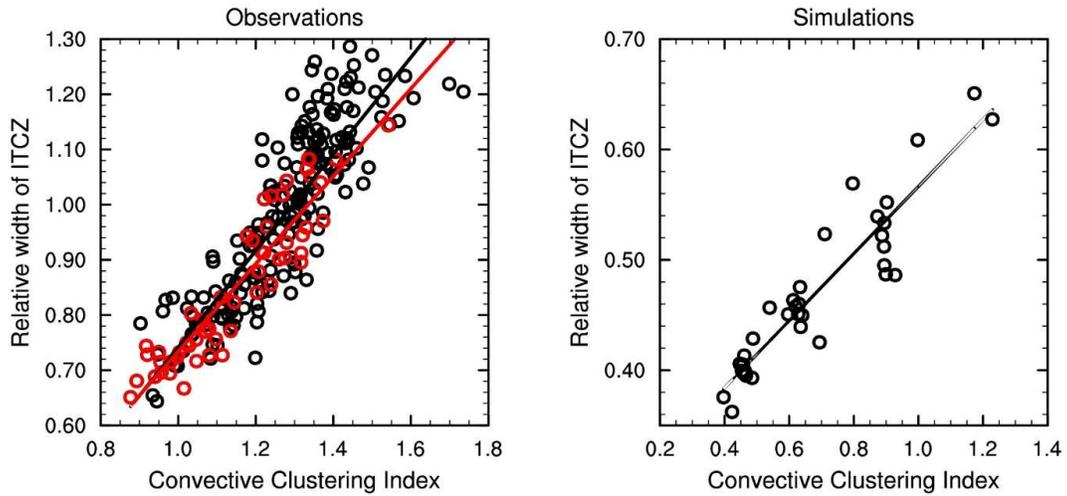


FIG. 1 – Les figures montrent la largeur de l’ITCZ en fonction de l’organisation de la convection (convective clustering index). Des valeurs plus élevées correspondent à une ITCZ plus large et à une organisation de la convection plus localisée. À gauche nous montrons les observations et à droite les simulations avec le modèle IPSL-CM5A-MR. Les cercles rouges correspondent aux mois avec une distribution de précipitation symétrique par rapport à l’équateur. (Popp et Bony, en prep.).

2.3.2 Simulations RCEMIP

RCEMIP est un projet dédié à la comparaison d'une hiérarchie de modèles atmosphériques (GCM et CRM) dans des configurations d'insolation et/ou de températures de surface spatialement uniforme et sans rotation. Ce genre de simulations permet d'étudier la physique de l'atmosphère tropicale, et notamment l'organisation spatiale de la convection. Les buts de RCEMIP sont l'évaluation de la robustesse des comportements des modèles, des feedbacks nuageux, et de l'organisation spatiale de la convection, et la dépendance de l'organisation de la convection à la température de surface. Nous avons à présent mis en place la configuration RCEMIP du modèle IPSL-CM6 et nous avons fait des tests avec cette version (figure 2). Cela nous a pris plus de temps qu'anticipé à cause de problèmes techniques. Nous devons encore implémenter les diagnostics requis avant de refaire tourner les simulations finales. Donc nous n'avons pas encore utilisé les heures demandées mais nous sommes optimistes que nous allons finaliser le projet avant la fin avril.

Des comparaisons préliminaires de la réponse des nuages au réchauffement dans la configuration RCE et dans une série d'autres configurations du même modèle IPSL-CM6 (RCE, aqua-planète avec rotation et gradients de température, AMIP, couplé océan-atmosphère) laisse entrevoir une grande robustesse de la réponse des nuages bas et des enclumes convectives à la température dans ce modèle.

2.3.3 Étude des mécanismes d'organisation zonale de la convection

Dans des simulations en équilibre radiative-convectif, la convection a tendance à s'organiser en amas et à créer ainsi des états agrégés. Cette forme d'organisation de la convection a un grand effet sur l'état moyen de l'atmosphère et entraîne des circulations spécifiques à moyenne échelle qui maintiennent l'état agrégé. Cependant, sur Terre le mode d'organisation dominant est celui d'une bande zonale, l'ITCZ. Cette organisation en bande zonale semble être liée au gradient méridien de température de surface, mais il n'est pas clair si les mécanismes qui sous-tendent l'organisation en bande de l'ITCZ sont les mêmes que ceux qui causent l'organisation en amas dans les simulations en équilibre radiatif-convectif. Pour aborder cette question, nous souhaitons réaliser des simulations idéalisées dans lesquelles le modèle est initialisé à partir d'un état agrégé de la convection avec des gradients de température et d'insolation imposés. Du fait de l'analyse approfondie des résultats des autres simulations réalisées et des problèmes techniques rencontrés avec les simulations RCE, nous n'avons pas encore commencé ces simulations. Nous espérons nous rattraper avant la fin avril, mais il est possible nous devions repousser les simulations à la prochaine période de calcul.

2.3.4 Impact de l'agrégation sur la sensibilité climatique

Nous nous concentrons ici sur l'impact de l'agrégation sur le climat et la variabilité du système climatique. Pour cela, comme précédemment, nous nous plaçons dans un cadre très idéalisé : celui d'une aqua-planète en équilibre radiatif-convectif couplé avec un modèle simplifié de couche océanique dont la température varie (Coppin et Bony 2017). L'ensoleillement est uniforme et il n'y a pas de rotation. Les heures utilisées l'ont été pour répondre à des révisions sur l'article présenté ci-dessous.

Pour cette étude, nous avons réalisé des simulations RCE couplées à une couche de mélange océanique (slab) avec une concentration en CO₂ pré-industrielle ou doublée. Les gradients de température de surface de l'océan (SST) sont soit présents, soit désactivés de façon à détecter leur impact sur l'agrégation et la sensibilité climatique. Dans ce cas-là, la SST interactive peut évoluer mais de manière uniforme. Ceci nous donne un jeu de 4 simulations. Suite à une demande lors de

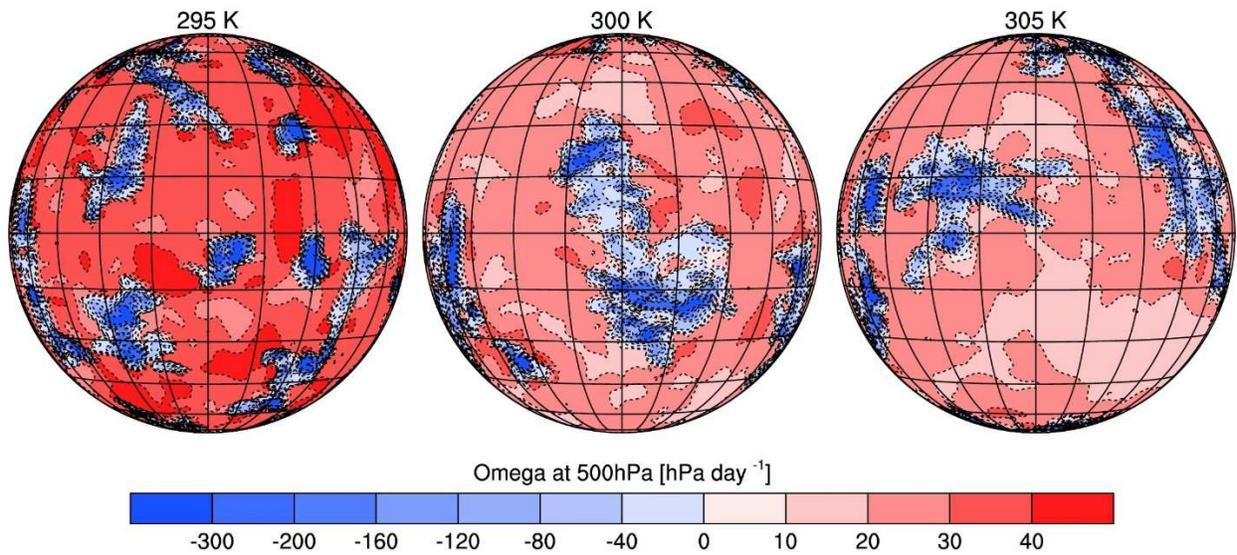


FIG. 2 – Premiers résultats des simulations RCE avec le modèle IPSL-CM6 pour trois températures de surface prescrites. Les globes montrent la vitesse verticale de grande échelle au milieu de la troposphère. Les valeurs positives indiquent les mouvements de subsidence et les valeurs négatives les vents ascendants. Les trois simulations sont dans un état agrégé, qui se manifeste par des petites régions de convection avec des vents ascendant très forts et par de grandes régions de subsidence faible.

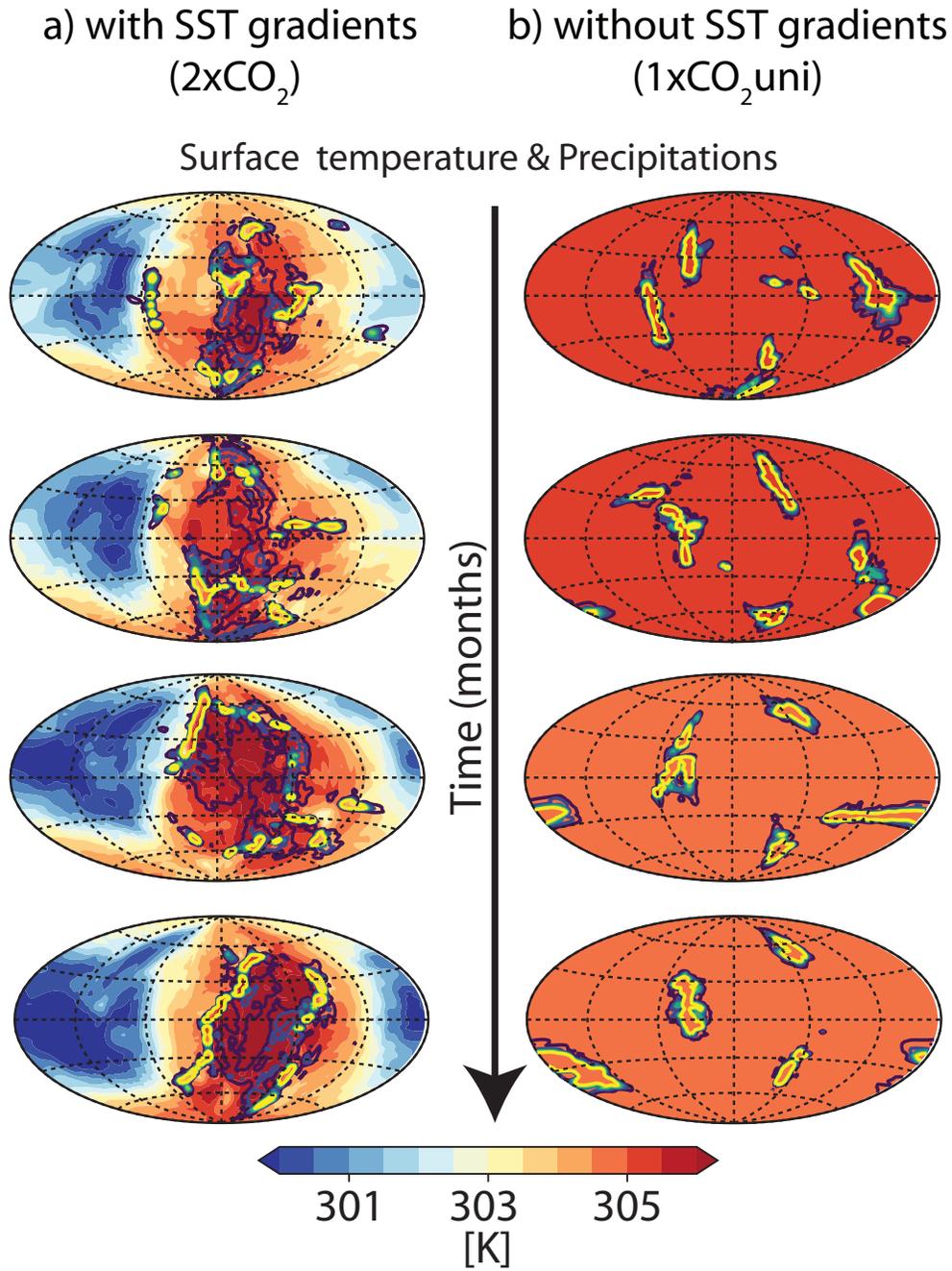


FIG. 3 – Température de surface (couleurs) et précipitations (contours) pour la simulation 2xCO₂ (avec gradients de SST) et 1xCO₂uni (sans gradients de SST). Un mois sépare chaque instantané.

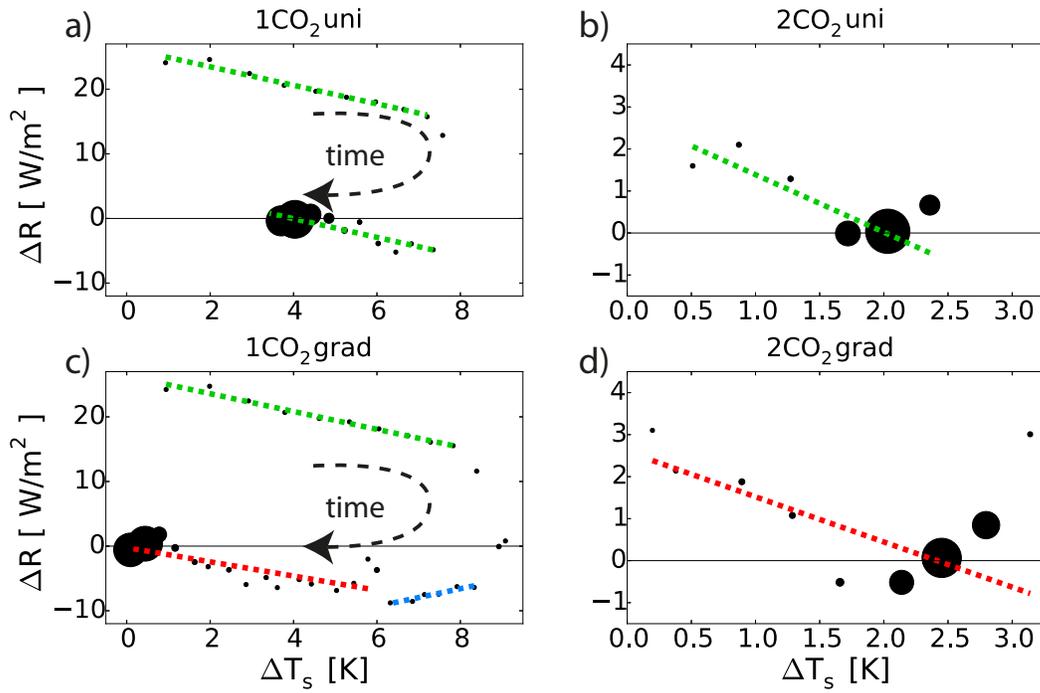


FIG. 4 – Changement radiatif net au sommet de l’atmosphère en fonction du changement de température de surface par rapport à l’équilibre avant perturbation dans les 4 simulations. Les traits pointillés de même couleur indiquent des pentes λ identiques : $-1.4 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$, $-1.2 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$ et $1.32 \text{ W.m}^2.\text{K}^{-1}$ pour les traits verts, rouges et bleus respectivement..

la révision de l'article, pour chaque simulation nous avons créé un ensemble de 4 simulations qui partent de conditions initiales légèrement différentes.

Les simulations sans gradients atteignent très rapidement une agrégation maximale que les simulations avec gradients de SST n'auront jamais, même en doublant le CO₂, ce qui met en évidence une limitation de l'agrégation par les gradients de SST. L'organisation de la convection dans les deux types de simulation est aussi très différente (figure 3). Les simulations sans gradients ressemblent aux simulations avec SST uniforme et prescrite et partagent plusieurs caractéristiques marquantes, notamment la plus forte sensibilité au CO₂ qu'à la température de surface. Celles avec gradients ont une circulation grande-échelle plus proche de configurations plus réalistes. Les comportements individuels particuliers des simulations nous permettent d'isoler l'influence de l'agrégation et des gradients de SST sur le coefficient de rétroaction total λ (figure 4).

La valeur de l'indice d'agrégation n'a par exemple pas d'influence sur λ , de même que le doublement de CO₂. Seuls les changements d'agrégation qui surviennent au cours des simulations ont un effet refroidissant significatif (ils font baisser λ). A l'inverse, les gradients de SST constituent une très forte rétroaction positive.

L'étude de la simulation 1CO₂uni où les changements d'agrégation et de gradients de SST n'ont pas lieu en même temps nous permet aussi d'estimer la valeur minimale de la rétroaction associée aux changements d'agrégation : -2.5 W/m²/K. Ainsi, si l'agrégation est la seule chose qui change lorsque le CO₂ est doublé, un petit changement d'agrégation pourrait avoir un impact très important sur la sensibilité climatique. Cependant, dans un système couplé avec l'océan où les températures de surface réagissent aux changements qui s'opèrent dans l'atmosphère, cet impact est surcompensé par l'effet des gradients de SST et des nuages bas. Dans ce cas, la sensibilité climatique augmente alors même que l'agrégation de la convection augmente, ce qui remet en question l'impact de l'agrégation sur le climat dans des simulations plus réalistes et dans la réalité.

Ces résultats font l'objet d'un article publié dans Journal of Advances in Modelling Earth Systems.

2.4 Influence des montagnes et de la stratosphère sur le climat

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

Consommation : 679 000 heures CPU sur Ada

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 et à l'effet des montagnes.

Nous n'avons pas consommé cette année car nous sommes concentrés sur l'analyse des simulations des années précédentes.

2.4.1 Rôle de la stratosphère dans la variabilité ENSO

Au cours de l'année 2018, nous avons commencé à étudier le rôle des erreurs du modèle sur notre prévision des téléconnexions entre les tropiques et les extra-tropiques. Nous avons utilisé pour cela la version de LMDZ qui constitue la composante atmosphérique de l'ESM de l'IPSL. Dans ce modèle, il s'est avéré nécessaire d'ajuster les paramètres de représentation de l'orographie sous-maille pour améliorer la représentation de l'onde planétaire stationnaire aux moyennes latitudes (cette onde est

représentée sur la Figure 5, et l’erreur du modèle sur la Figure 5. Les impacts de cette erreur étaient considérable en mode couplé, les températures anormalement froide qui lui sont associées produisant une fonte des glaces trop importante. Nous avons aussi testé comment cette correction d’erreur impacterait notre prévisions des téléconnexions entre les tropiques et les latitudes moyennes. nous avons pris pour cela le cas de l’ENSO extrême qui s’est produit en 1996-1997. On pense en effet que lors du changement climatique, ce type d’événement sera de plus en plus fréquent. Ce qui est intéressant est que la réponse à l’ENSO dans le modèle est assez réaliste (Fig. 5d-e), ce qui est une bonne chose si on veut étudier l’impact du changement climatique sur les événements extrêmes. Ce qui est plus déroutant est que la réponse du modèle à l’ENSO ressemble beaucoup à l’erreur du modèle (Figure 5b). Cela veut dire que les réponses régionales aux changement climatique se projettent énormément sur les erreurs du modèle. Il nous faut maintenant établir si ces relations sont bien linéaires, auxquels cas les études faites avec les modèles auront une certaine robustesse. Ce travail est toujours en cours, elle se font dans le cadre du projet GOTHAM financé par l’ANR pour le Belmont-Forum.

2.4.2 Oscillation Quasi-biennale

En ce qui concerne la stratosphère, nous avons terminé les expériences associées au programme international QBOi (Quasi-Biennial Oscillation initiative, [Butchart et al., 2018]) et analysé comment la QBO dans le modèle LMDZ se comporte par rapport aux autres modèles (Bushell et al. soumis). Sur bien des aspects LMDZ est réaliste, par exemple l’irrégularité de la période est bien prédite (voir Figure 6). Le modèle simule aussi des ondes équatoriales, mais cela avait été documenté dans le rapport 2018, la comparaison avec les autres modèles est décrite dans Holt et al. (soumis). Nous avons aussi analysé la réponse de la QBO au changement climatique (Richter et al. soumis) ainsi que sa prévisibilité saisonnière (Stockdale et al. soumis). Ces études ont été faites dans le cadre du programme international QBOi.

Nous avons testé des modification des paramétrisations des ondes de gravité non-orographiques, afin de les rendre plus réalistes lorsque on teste leurs impacts sur la propagation des infrasons (Cugnet et al. 2019, et programme Européen ARISE-2). Cela demande d’imposer des ondes de gravité avec des vitesses de phases plus courtes que dans le passé, une contrainte forte mais suggérée par d’autres évidences observationnelles ([Plougonven et al., 2017]). A l’heure actuelle, de telles modifications sont possibles si on émet des ondes de gravité depuis toutes les altitudes dans l’atmosphère, et non depuis la troposphère seulement comme c’est le cas à l’heure actuelle en mode opérationnel. Cette activité nous a amené a dépenser la majeure partie de notre quota d’heure l’an dernier. Ce qui nous a empêché de mener à bien d’autres expériences que nous reprendrons donc en partie dans notre demande 2019. Nous avons en fait rencontrer un verrou scientifique : faire vivre des ondes d’inertie gravité dans un modèle de circulation générale de l’atmosphère s’est avéré plus difficile que prévu.

2.5 Paramétrisation de la convection et phénomènes tropicaux

2.5.1 Couches de réchauffement diurne, flux à l’interface et convection

Jean-Philippe Duvel, Hugo Bellenger, Lionel Guez, Xavier Perrot (postdoc)

Consommation : 0 heures CPU sur Ada

Dans le cadre de l’ANR COCOA (Comprehensive Coupling Approach for the Ocean and the Atmosphere), il est prévu d’étudier la représentation des interactions océan-atmosphère dans le modèle

Extreme ENSO (97–98) and Errors in LMDz

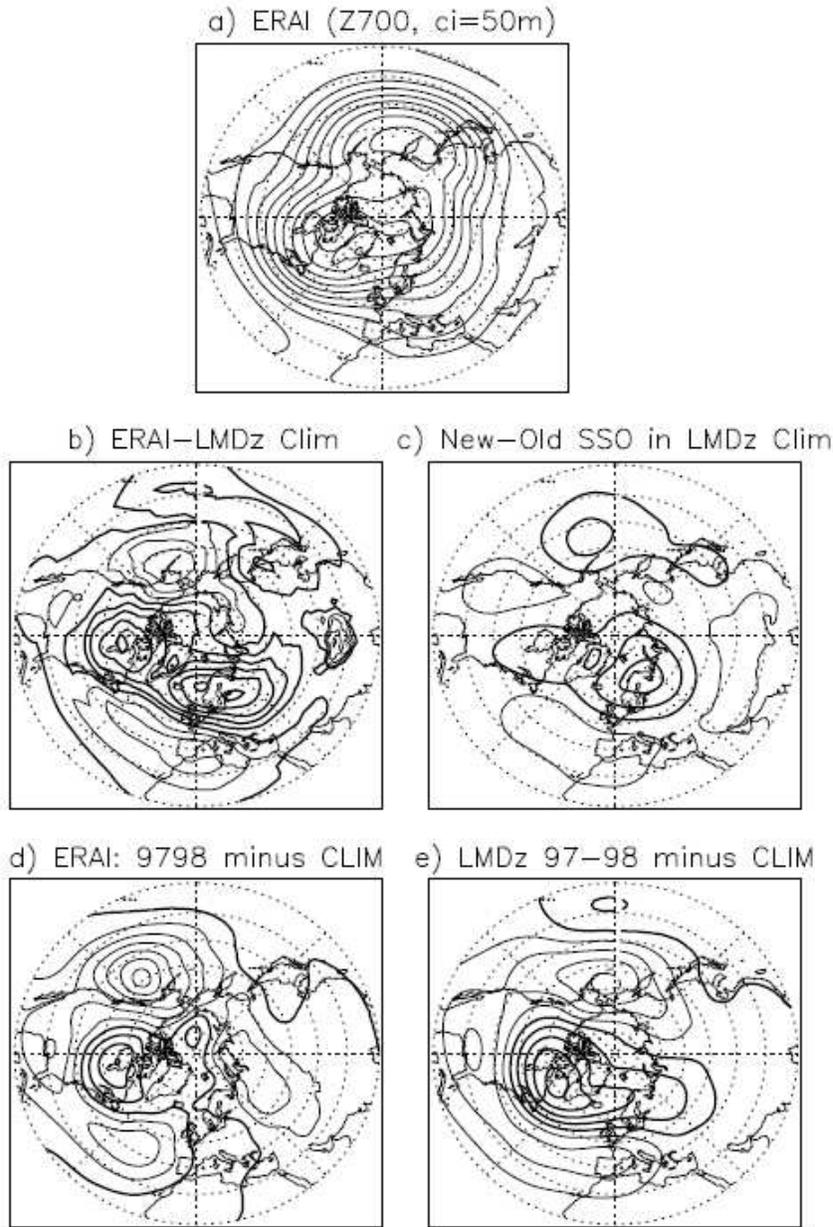


FIG. 5 – Altitude du géopotiel à 700hPa , en moyenne pendant l’hiver boréal. a) Climatologie ERAI pour la période 1979-2008 period (intervalles de contours : 50m) ; b) Difference entre l’année extrême El-Niño 1997-1998 et la climatologie ; c) Difference entre les observations et les résultats d’une simulation LMDZ de type AMIP pour la période 1979-2008. d) Difference entre une simulation LMDZ forcée par les températures de surface de l’océan de l’année 1997-1998 pendant 30 ans (évènement El-Niño extrême perpétuel) et la climatologie de LMDZ. e) Impact dans LMDZ d’un changement de l’orographie sous-maille. Pour b), c), d), e) les intervalles de contours sont de 20m).

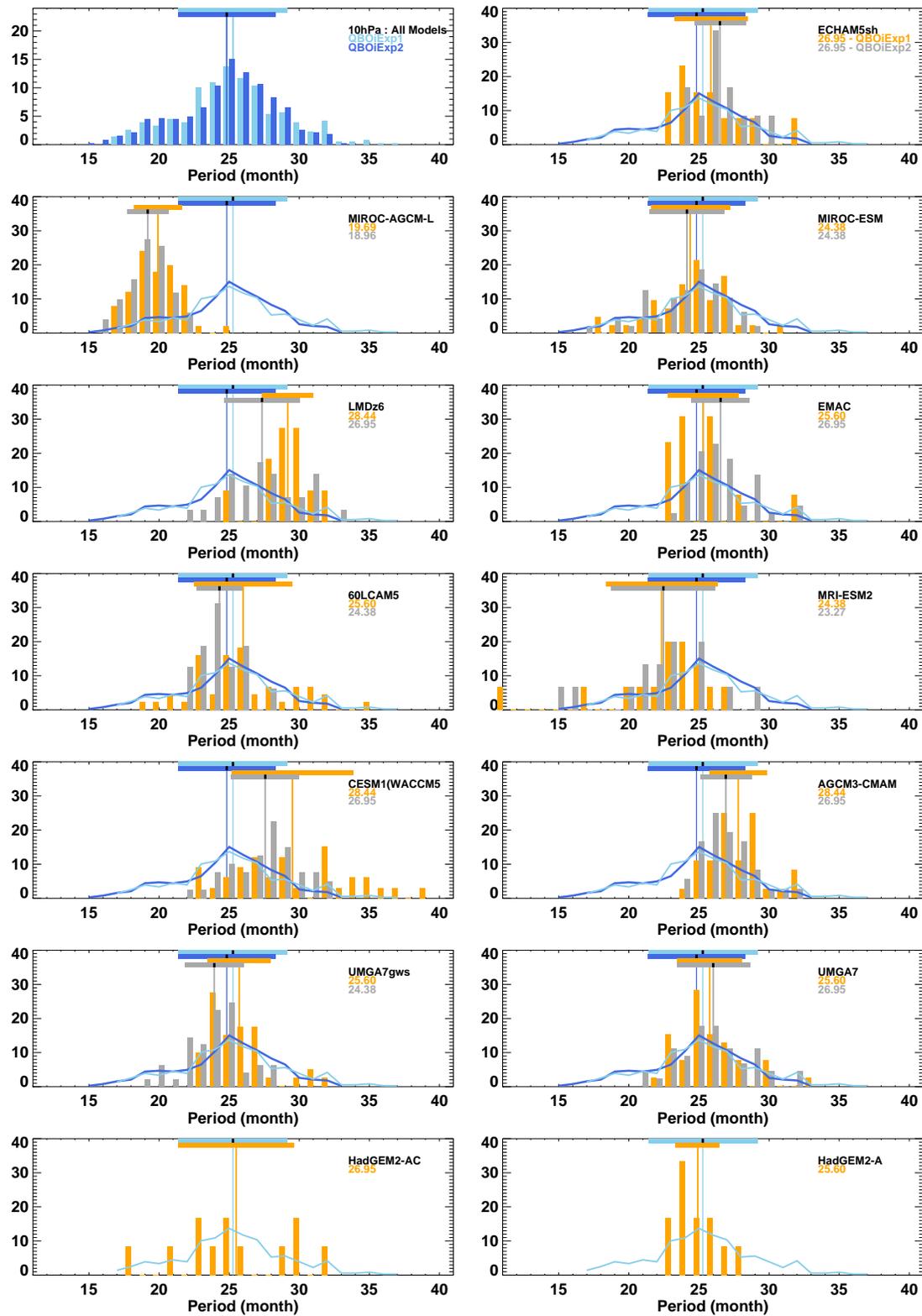


FIG. 6 – Distribution de la période de la QBO en pourcentage d'événement totaux sur la période historique (1979-2008) ainsi qu'en année 2002 perpétuelle.

LMDZ, en particulier sur l’impact des couches de réchauffement diurne (CRD) sur le déclenchement de la convection. Pour cela, une nouvelle paramétrisation des CRD a été implémentée dans LMDZ sur la base de l’étude de [Bellenger et al., 2017]. Les premiers tests ont été réalisés en 1D et en 3D. Nous prévoyons l’impact de cette nouvelle paramétrisation sur des simulations globales de type AMIP dans les mois à venir. C’est pourquoi nous n’avons pas encore consommé.

2.5.2 Paramétrisation de la convection et impact sur les pluies tropicales

Catherine Rio, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix

Consommation : 0 heures CPU sur Ada

En 2018, on a cherché à analyser et comprendre le comportement des simulations globales réalisées précédemment à l’aide de simulations uni-colonne en équilibre radiatif-convectif (RCE), c’est pourquoi nous n’avons finalement pas réalisées de nouvelles simulations globales comme initialement prévues. Dans une simulation 1D RCE, les paramétrisations de la convection s’activent pour compenser le refroidissement radiatif imposé pour une température de surface de la mer donnée. Un tel équilibre ne s’observe qu’à grande-échelle dans la réalité, c’est pourquoi nous avons comparé la sensibilité du modèle à certaines hypothèses du schéma de convection dans des simulations 1D en RCE et des simulations 3D en moyennant les résultats de simulations de 3 ans sur toute la bande tropicale.

La figure 7 illustre l’impact de différentes modifications du schéma de convection sur les profils d’humidité relative, de fraction nuageuse, de contenu en eau liquide et en glace simulés en 1D (haut) et en 3D (bas). Si certains comportements sont identiques (sensibilité de l’humidité relative sous 600hPa, sensibilité du contenu en glace), d’autres diffèrent entre modes 1D et 3D (sensibilité de la fraction nuageuse, du contenu en eau liquide et de l’humidité relative dans la moyenne troposphère), posant des limites à l’utilité du mode 1D RCE pour l’interprétation des simulations globales.

2.6 Paramétrisation des nuages bas

Jean Jouhaud (thèse), Jean-Louis Dufresne

Consommation : 5 000 heures CPU sur Ada

La thèse de Jean Jouhaud visait à étudier les processus de formation des nuages convectifs de basse altitude. Les simulations réalisées sur Ada ont permis la création et l’ajustement de deux paramétrisations permettant une meilleure représentation de ces nuages dans LMDZ6 :

1. La première concerne l’hétérogénéité verticale sous-maille des fractions nuageuses,
2. La seconde porte sur l’amélioration du schéma de recouvrement nuageux

Les couvertures nuageuses simulées par LMDZ6 avec ces nouvelles paramétrisations ont été comparées, ainsi que leurs effets radiatifs (Figure 8).

Les résultats obtenus grâce à ces heures de calcul ont participé à la publication de la thèse de Jean Jouhaud, et sont utilisés dans un papier en cours de rédaction.

2.7 Microphysique des nuages de froids

2.7.1 Brumes et précipitations en Antarctique

Jean-Baptiste Madeleine, F. Lemonnier (thèse)

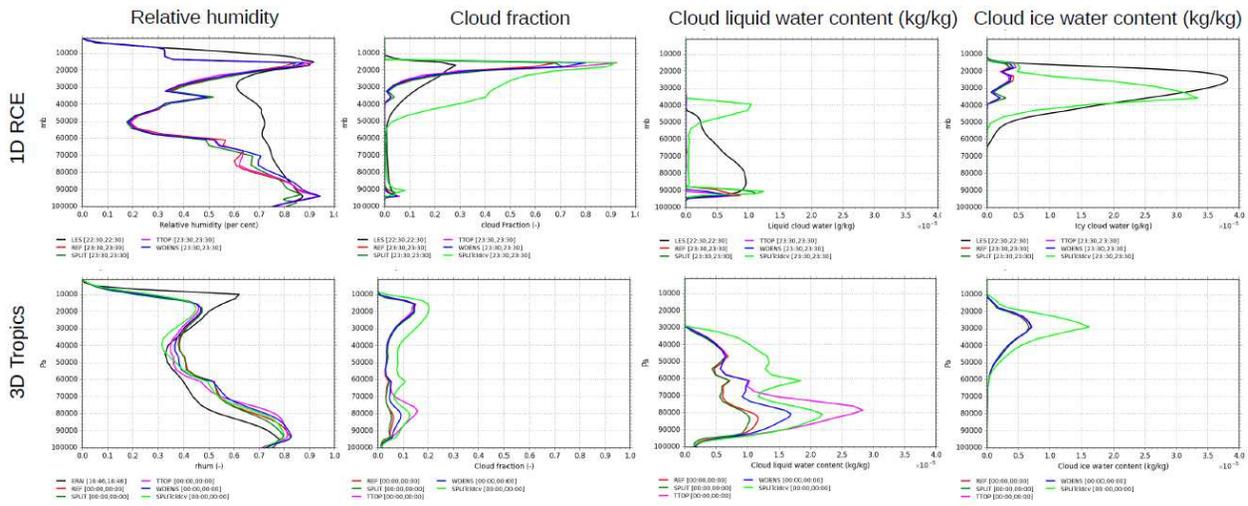


FIG. 7 – Profils d’humidité relative, de fraction nuageuse, de contenu en eau liquide et glace simulés à l’équilibre dans des simulations 1D en équilibre radiatif-convectif (haut) et des simulations globales moyennées sur la bande tropicale (bas) pour différentes versions du modèle LMDZ : version de référence (REF), avec activation du modèle du thermique en dehors des poches froides (SPLIT), avec activation d’un seuil minimum sur la hauteur de la convection profonde (TTOP) et activation d’un schéma bi-gaussien pour le calcul des nuages convectifs (SPLITcdcv).

Consommation : 0 heures CPU sur Ada

Nous avons consommé seulement 56 heures car nous prévoyons de réaliser en mars 2019 les simulations demandées dans la demande précédente.

2.7.2 Représentation des nuages hauts

Marine Bonazzola

Consommation : 61 000 heures CPU sur Ada

En 2018, nous avons comparé les systèmes de nuages hauts simulés par LMDZ à ceux restitués par les données satellitales AIRS/IASI. Nous nous sommes intéressées en particulier à des paramètres comme la taille des systèmes nuageux, leur altitude et leur émissivité. Nous avons mis au point des diagnostics nous éclairant sur les processus de formation et d’évolution de ces systèmes. Par exemple, les observations montrent que la proportion de cirrus fins dans les systèmes nuageux augmente avec leur maturité.

Nous avons montré que beaucoup de ces diagnostics sont sensibles à trois paramètres du modèle mal contraints et habituellement utilisés pour tuner le système vers l’équilibre radiatif, à savoir la vitesse de sédimentation des cristaux de glace, la fraction de condensat convectif detrainé, la variance d’eau totale à l’intérieur de la maille dans la haute troposphère. De plus, nous avons testé différentes paramétrisations de vitesse de sédimentation de cristaux de glace, dépendant de la température et/ou du contenu en glace. Nous avons aussi modifié la paramétrisation des rayons de cristaux de glace, de manière à la rendre plus cohérente avec la vitesse de sédimentation, et nous avons montré que ces changements affectent les propriétés radiatives des nuages hauts. Ce travail a donné lieu à la rédaction de 2 articles soumis dans JAMES (Stubenrauch et al).

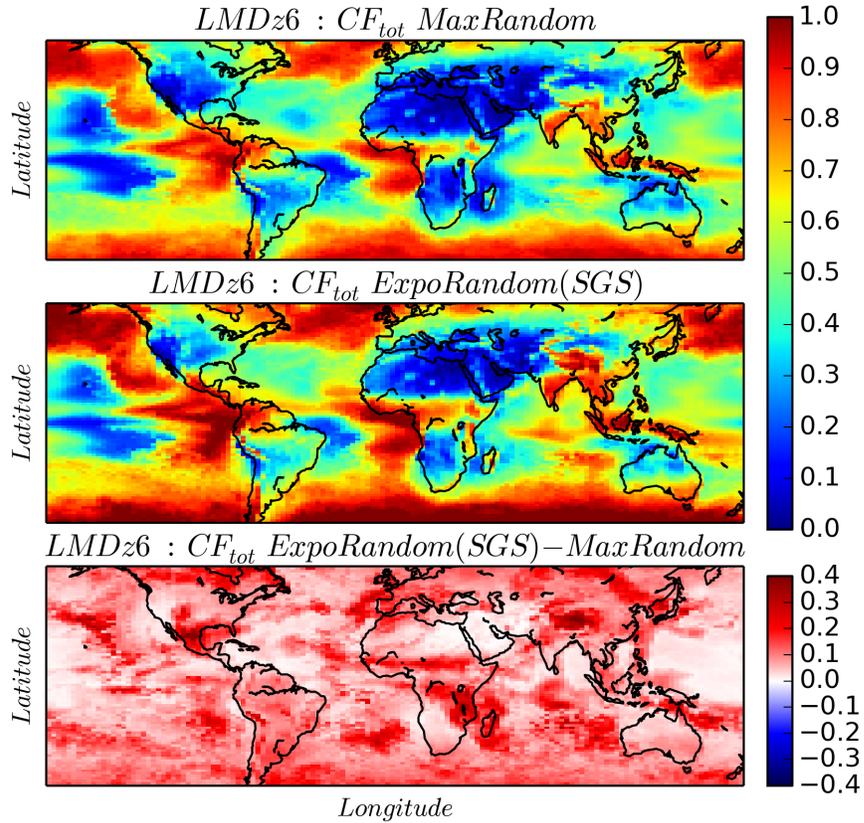


FIG. 8 – Amélioration des couvertures nuageuses dans LMDZ6 grâce aux nouvelles paramétrisations. Moyennes saisonnières (JJA) des couvertures nuageuses totales calculées par LMDZ6 dans les configurations “Référence” (sans nos paramétrisations, 1ère ligne) et avec nos deux paramétrisations (2ème ligne). La 3ème ligne représente la différence entre les deux premières. On voit que les deux paramétrisations sous-maille et inter-mailles que nous avons introduites dans cette thèse génèrent chacune des colonnes atmosphériques plus nuageuses, ce qui va dans le bon sens connaissant le biais général des GCM à sous-estimer la couverture totale de nuages bas.

3 Variabilité des températures en Atlantique tropical

Marta Martin del Rey (post-doc) et Alban Lazar

Consommation : 0 h CPU sur Ada

Le changement de poste de M. Martin del Rey (lauréate d'une bourse Marie Curie pour travailler à l'Institut des Sciences de la Mer, Conseil Supérieur des Investigations Scientifiques à Barcelone en Espagne) a arrêté momentanément le projet.

4 Evaluation, amélioration et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE

Le modèle de surface continentale ORCHIDEE est utilisé soit seul (offline), soit couplé avec LMDZ. On nomme LMDZOR la configuration couplée.

4.1 Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE

Josefine Ghattas

Consommation : 70 000 heures CPU sur Ada

Comme tous les ans, une batterie des tests automatiques permet de vérifier les versions successives du modèle ORCHIDEE et assurer son bon fonctionnement sur le calculateur ada. Le modèle est testé avec les différents niveaux de compilation et différents nombre de tâche MPI pour détecter d'éventuelle erreurs introduites involontairement dans le code. Différentes configurations sont régulièrement lancées modèle pour tester les différents modes d'utilisations d'ORCHIDEE (forcé, couplé avec LMDZ avec plusieurs physiques en mode libre et en mode guidé). Ces tests ont été effectués régulièrement pour évaluer les différentes mises à jour et amélioration du modèle de surface.

4.2 Couplages surfaces continentales - atmosphère

F. Cheruy, A. Ducharne, L. Mellul, J.L. Dufresne, J. Ghattas, L. Fairhead, Y. Zhao

Consommation : 34 000 heures CPU sur Ada

L'année 2018 a été majoritairement occupée aux réglages de la composante surface continentale-atmosphère du modèle IPSL-CM6 (compte rgzi), pour cette raison, l'étude de l'impact de la variabilité interne sur les vagues de chaleur a dû être reportée à 2019.

4.2.1 Mieux comprendre les rétroactions humidité du sol température

Nous avons utilisé conjointement des simulations LMDZOR guidées et différents jeu de données fournissant des estimations de l'évapotranspiration, du rayonnement solaire net à la surface et de l'humidité superficielle des sols pour évaluer à l'échelle régionale la réponse de l'évapotranspiration au rayonnement pour différentes classes d'humidité du sol (sec, moyennement sec, moyennement humide, humide).

Une analyse préliminaire pour une région semi-aride montre des comportements significativement différents dans les observations et le modèle. On note une sous-estimation de l'évaporation simulée en cas de rayonnement fort pour le premier quartile, et une surestimation pour les quartiles

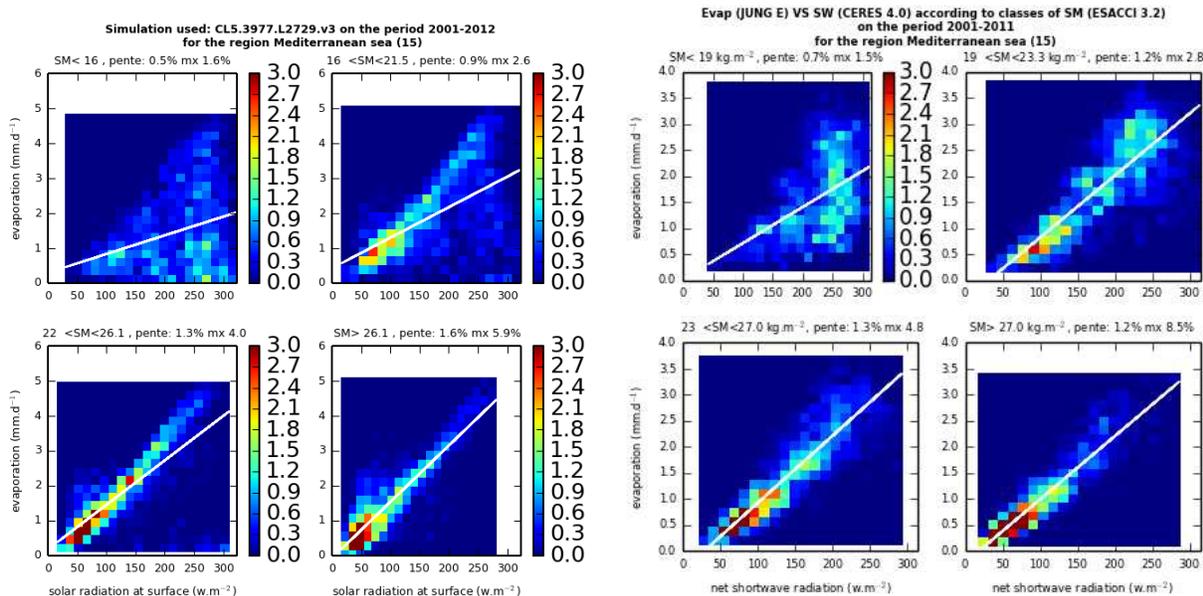


FIG. 9 – Histogramme 2D de l'évaporation en fonction du rayonnement solaire net à la surface pour 10 ans et la région méditerranéenne pour les quatre classes d'humidité du sol. Les quatre panels de gauche correspondent aux observations, ceux de droite aux simulations. Pour chaque jeu de données, les histogrammes les classes d'humidités vont de la plus sèche à la plus humide en suivant le sens des aiguilles d'une montre. .

intermédiaires. Ces travaux ont été effectués dans le cadre de la phase 1 du programme CMUG de l'ESA ([Cheruy et al., 2017]) et se poursuivront dans la phase 2 qui a débuté en Octobre 2018.

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

Le réalisme de la simulation de la canicule qui a envahi une partie de l'Europe en Juin et a été accompagnée d'une forte sécheresse dans le sud de l'Europe a été évalué. Nous avons confronté les simulations avec les observations de deux sites instrumentés français, le SIRTA et le site de la métropole près de Toulouse. L'objectif étant de juger des capacités du modèle de climat à représenter ces événements extrêmes et de détecter, le cas échéant, des comportements singuliers dans les paramétrisations. Dans la plupart des cas, la dynamique de grande échelle est le premier responsable des vagues de chaleurs ayant lieu en Europe ([Jézéquel et al., 2018]). Toutefois les couplages avec la surface peuvent également jouer. Leur importance a été particulièrement soulignée pour pour l'été 2003 en France et en Europe. Les comparaisons avec les observations du SIRTA et de Toulouse montrent que lorsque la dynamique de grande-échelle est proche de la dynamique observée, le modèle produit des anomalies de température très similaires aux observations quoique légèrement trop fortes. Le biais chaud est cohérent avec une surestimation du rayonnement solaire net à la surface, une surestimation du flux de chaleur sensible et une sous-estimation du flux de chaleur latente. Ces travaux permettent d'aborder la questions du réalisme des vagues de chaleur simulées par le modèle et de l'impact des biais (ici le biais chaud) sur ces événements extrêmes. Ils sont en cours.

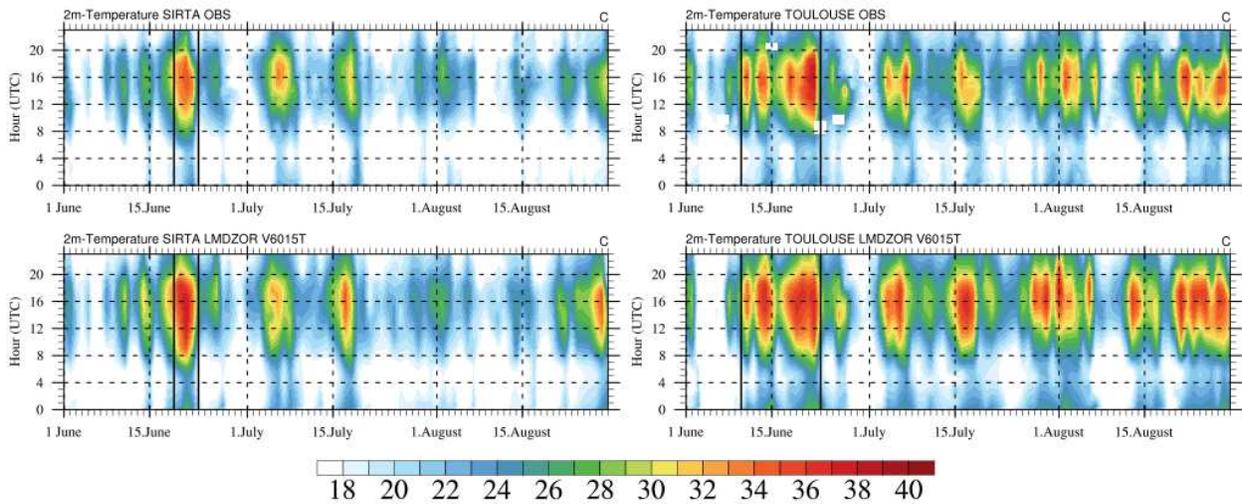


FIG. 10 – Cycle diurne de la température à 2m pendant l’été 2018 observé (en haut) et simulé (en bas), pour le point de grille contenant le site instrumenté du Sirta (à gauche) et celui contenant la météopole à Toulouse (à droite).

4.3 Simulation des hautes latitudes et des cycles bio-géochimiques dans ORCHIDEE

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

Consommation : 38 000 heures CPU sur Ada

L’utilisation des ressources allouées par les machines de l’IDRIS a permis de mener à bien plusieurs études dans des domaines de recherche très différents, valorisées par 7 publications.

4.3.1 Débogage et amélioration des performances du modèle ORCHIDEE-MICT

Les performances du modèle ORCHIDEE-MICT ([Guimberteau et al., 2018]), incluant notamment les effets des rétroactions de la concentration de carbone organique du sol sur la dynamique thermique et hydrique du sol, ont été améliorées grâce à de multiples améliorations de son code en se concentrant sur les routines les plus longues. L’analyse de la performance du code s’est faite par l’intermédiaire d’Intel VTune Amplifier (Figure 11). D’autres développements visant à améliorer la qualité du code ont aussi été entrepris. L’utilisation du débogueur Totalview a notamment été la clé pour faire face à tout type de problème technique.

4.3.2 Évaluation de l’humidité des sols simulé par le modèle ORCHIDEE-MICT

L’humidité des sols simulée par le modèle ORCHIDEE-MICT est comparée aux données in situ et satellitaires à différentes échelles spatiales et temporelles afin (1) d’estimer la capacité du modèle à représenter la dynamique de l’humidité du sol en Chine ; (2) de démontrer les données les plus appropriées pour de nouvelles études hydrologiques dans les bassins du Yangtze et du Fleuve Jaune ; et (3) de comprendre les erreurs d’humidité des sols entre les différentes simulations (Zu et al., 2018). Le modèle ORCHIDEE-MICT simule une dynamique raisonnable de l’humidité du sol en Chine,

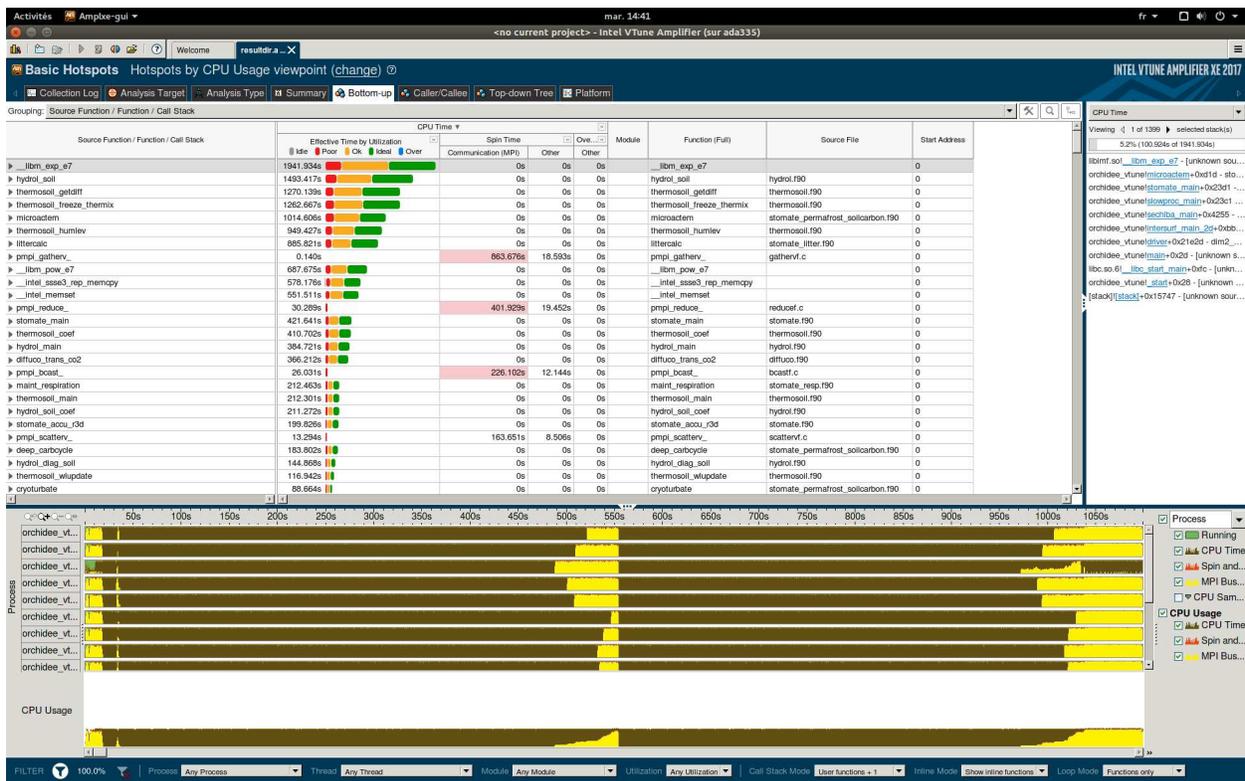


FIG. 11 – Exemple d’un profileur d’une simulation ORCHIDEE-MICT avec Intel VTune Amplifier.

même si la qualité varie selon les données du forçage atmosphérique. L’humidité du sol simulée avec le forçage GSWP3 et WFDEI montre la meilleure performance et s’avèrent être de bons choix pour de nouvelles études hydrologiques dans les deux bassins versants chinois (Figure 2). La sous-estimation de l’humidité du sol dans la plaine du nord de la Chine montre que les activités humaines comme l’irrigation peuvent avoir des impacts significatifs sur la variation de l’humidité du sol, ce qui n’a pas été pris en compte dans nos simulations. Enfin, les biais des variables météorologiques et de l’humidité du sol simulée par le modèle sont analysés parmi les quatre simulations. L’écart d’humidité du sol s’explique plus par des différences dans la fréquence des précipitations et l’humidité de l’air plutôt que par des différences dans la quantité des précipitations.

4.3.3 Impact du changement climatique et des activités anthropiques sur les débits des fleuves en Chine

Nous avons utilisé le modèle ORCHIDEE à haute résolution spatiale ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) pour simuler les contributions du changement climatique, de l’augmentation de la concentration de CO_2 dans l’atmosphère et du changement d’utilisation des terres au changement du débit naturel des rivières dans 10 bassins chinois de 1979 à 2015 (Xi et al., 2018). Le changement climatique, en particulier l’augmentation des précipitations, est responsable de plus de 90% des variations du débit naturel des rivières, tandis que la contribution directe de l’augmentation de la concentration de CO_2 et des changements dans l’utilisation des terres est de 6,3% au maximum (Figure 2). Néanmoins, l’augmentation de la concentration de CO_2 et le changement d’utilisation des terres ne peuvent être négligés dans la plupart des bassins car ces deux facteurs modifient considérablement la transpiration. De 2003 à 2015, l’augmentation de la consommation d’eau a compensé plus de 30% celle du

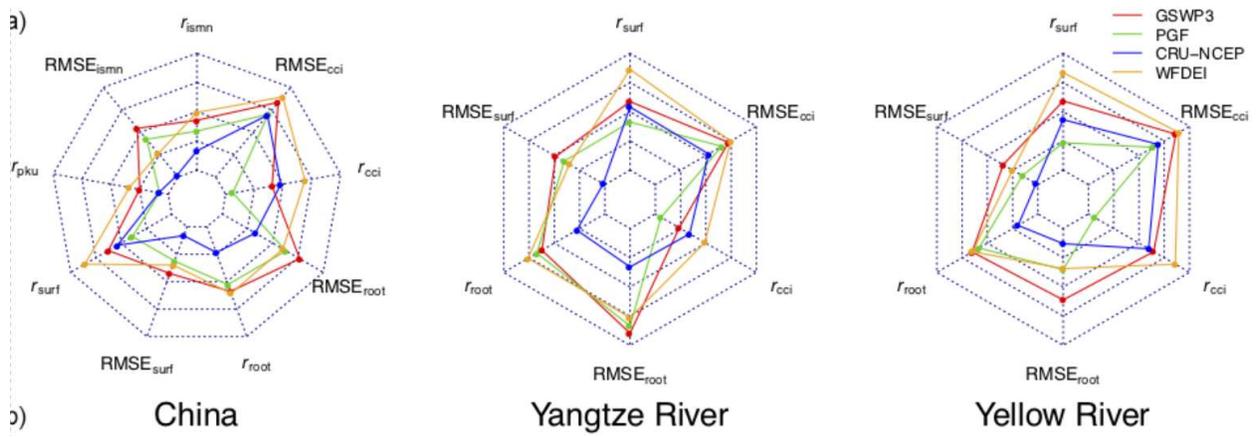


FIG. 12 – Évaluation des données de forçage pour simuler la dynamique de l'humidité des sols en Chine et sur les deux bassins versants. Le centre du graphe indique que les critères sont mauvais. Les lignes rouges, vertes, bleues et orange indiquent respectivement les forçages GSWP3, PGF, CRU-NCEP et WFDEI; "surf" et "root" indiquent respectivement l'humidité du sol dans les premières couches et celle dans la zone racinaire.

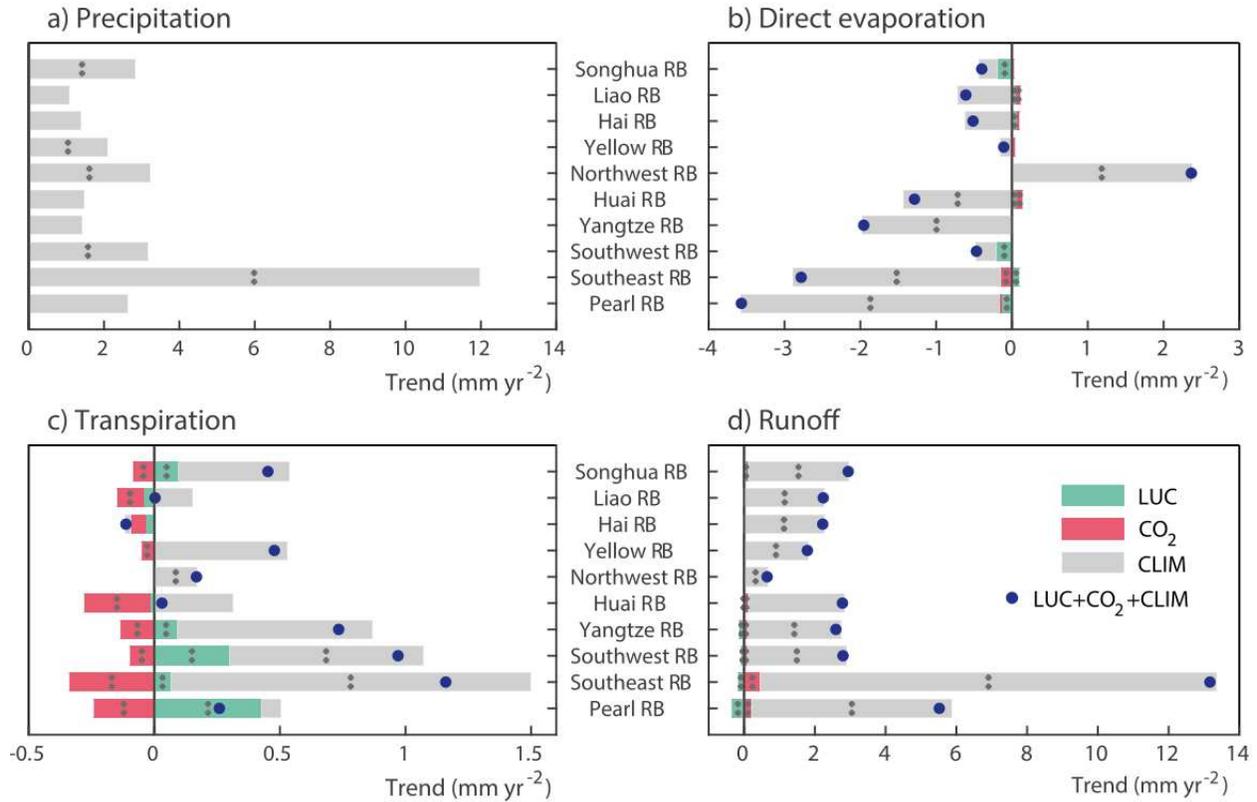


FIG. 13 – Evolution (a) des précipitations et attribution des tendances (b) de l'évaporation du sol nu, (c) de la transpiration et (d) du ruissellement dans les 10 bassins de 1979 à 2015 simulés par ORCHIDEE. Les barres grises, rouges, vertes et les points bleus indiquent respectivement les tendances induites par le changement climatique (CLIM), l'augmentation du CO₂, l'utilisation des terres (LUC) et tous facteurs confondus. Les barres marquées de deux astérisques indiquent que les tendances sont statistiquement significatives au niveau de 95 % ($p < 0,05$).

débit naturel du fleuve dans le nord de la Chine, en particulier dans le bassin du fleuve Jaune (~140 %).

5 Isotopes de l'eau

Consommation : 88 000 heures CPU sur Ada

Les isotopes stables de l'eau (HDO , $H_2^{18}O$, $H_2^{17}O$) peuvent être utilisés pour mieux comprendre les processus hydrologiques et atmosphériques et mieux évaluer leur représentation dans les modèles de climat. Ils sont implémentés dans le modèle LMDZ depuis 2008.

5.1 Signature isotopique des profils verticaux de vitesse verticale de grande échelle

Camille Risi

De nombreuses simulations de sensibilité à la physique de LMDZ ont été lancées afin d'étudier dans quelle mesure la variabilité isotopique observée par les instruments satellitaires pourrait permettre de mieux contraindre la forme des profils verticaux de vitesse verticale de grande échelle $\omega(z)$. La forme de ces profils est en effet importante pour plusieurs aspects du climat, dont la sensibilité climatique ([Sherwood et al., 2014, Brient et al., 2016]) et la variabilité intra-saisonnière ([Zhang and Mu, 2005, Benedict and Randall, 2009, Li et al., 2009, Zhang and Song, 2009] [Lappen and Schumacher, 2012]), et les estimations actuelles à partir de réanalyses météorologiques ou de modèles de climat sont entachées d'incertitudes ([Bellon et al., 2017]).

Ce travail était déjà décrit dans le rapport précédent, l'article a été soumis, mais les révisions majeurs demandaient de nouveaux tests de sensibilité, qui ont été réalisés. L'article est en révision (Risi et al en révision).

5.2 Les isotopes de l'eau comme marqueur du mélange dans les basses couches

Camille Risi, Joe Galewsky

Joe Galewsky de l'Université du Nouveau Mexique à Albuquerque travaille depuis longtemps sur les isotopes de l'eau et les informations qu'ils pourraient apporter sur le mélange atmosphérique ([Galewsky et al., 2007, Galewsky and Hurley, 2010][Galewsky and Samuels-Crow, 2014, Galewsky et al., 2016]). Récemment, il a travaillé plus particulièrement 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]). Lauréat de plusieurs bourses, il est venu passé l'année scolaire 2018-2019 au LMD pour travailler avec Camille Risi et Sandrine Bony sur ces questions, avec comme enjeu de faire le lien avec les rétro-actions nuageuses. Les rétro-actions nuageuses associées aux nuages bas sont en effet la principale source d'incertitude des projections climatiques ([Bony and Dufresne, 2005]), et leur simulation par les modèles dépend justement de la façon dont les modèles représentent le mélange vertical dans les basses couches ([Sherwood et al., 2014, Vial et al., 2016]). Dans le cadre de cette collaboration, plusieurs simulations avec LMDZ-iso ont été réalisées, incluant des simulations présentes guidées par les vents réanalysés, des simulations pré-industrielles, et des simulations avec quadruplement de CO2.

Plusieurs articles sont en cours de rédaction. Risi et al (en prep) décompose la composition isotopique de la vapeur d'eau près de la surface en plusieurs composantes, et fait apparaître l'altitude

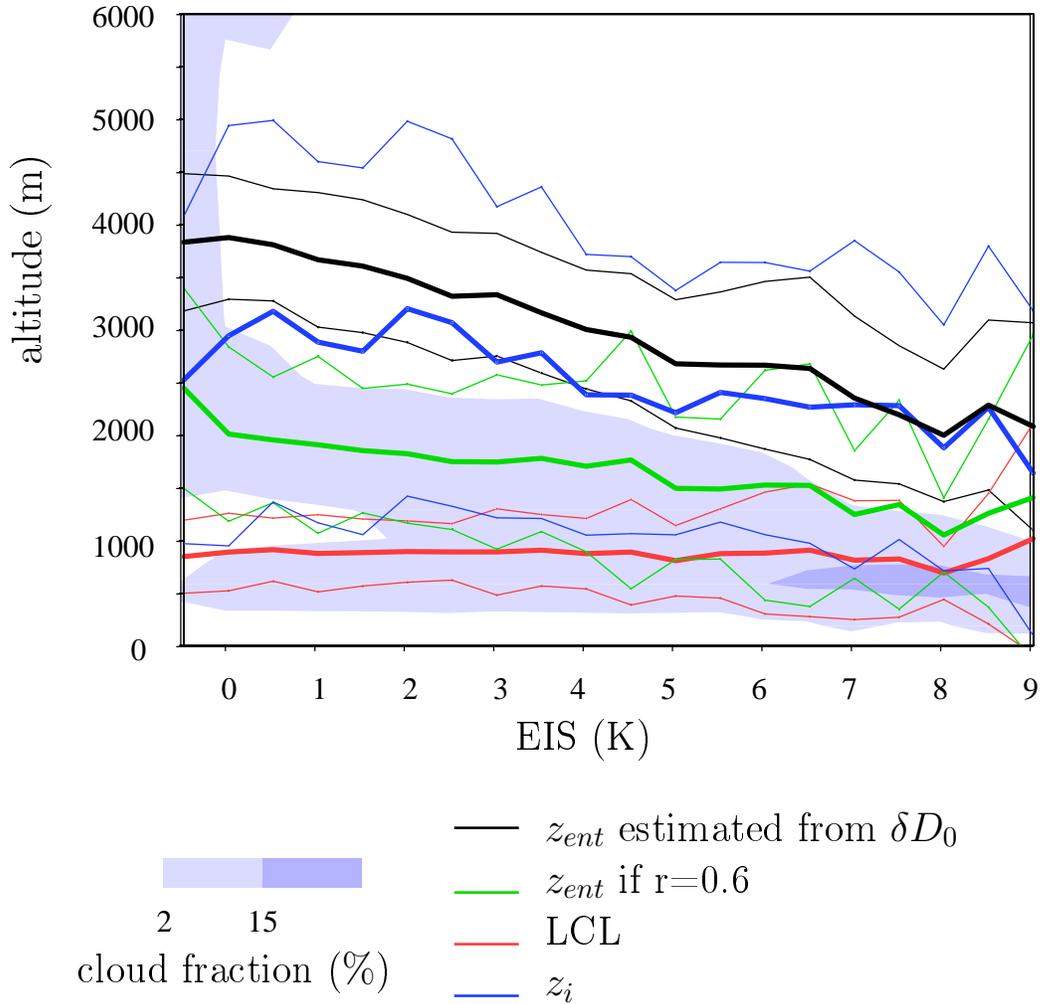


FIG. 14 – Composites en fonction de la force d’inversion (Estimated Inversion Strength EIS), qui permet de séparer selon les différents types de nuages: stratus pour les EIS les plus fortes, puis strato-cumulus, cumulus, et cumulo-nimbus pour les EIS négatives. Les teintes grisées montrent la couverture nuageuse simulée par LMDZ-iso. Les courbes rouges, bleues et vertes montrent respectivement le niveau de condensation, l’altitude d’inversion de la température et l’altitude à laquelle l’humidité spécifique est réduite de 40%. La courbe noire montre l’altitude de l’air entraîné dans la couche limite telle qu’on peut la déduire de la composition isotopique de la vapeur d’eau près de la surface. Les résultats montrent que dans les régions de strato-cumulus, l’air est entraîné depuis une altitude juste au dessus de l’inversion, cohérent avec des études précédentes ([Faloona et al., 2005, Mellado, 2017]). Dans les régions plus convectives au contraire, l’air est entraîné de plus haut, cohérent avec des structures descendantes plus profondes de type descentes insaturées ([Emanuel et al., 1994]).

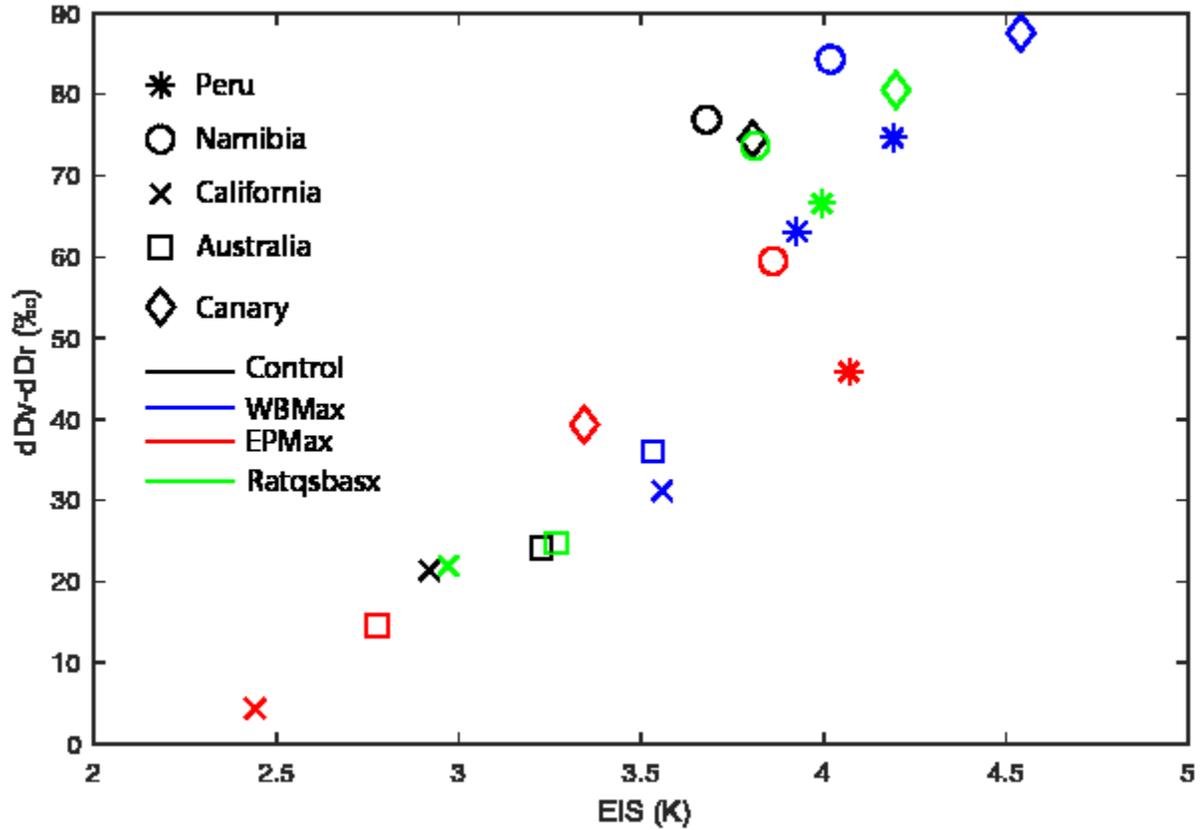


FIG. 15 – Difference entre le δD de la vapeur d’eau simulé par LMDZ à 830 hPa et ce que préditait une courbe de Rayleigh (décrivant une distillation simple) pour la même humidité (δD_r), en fonction de la force d’inversion (EIS), pour différentes régions de stratus définies par [Klein and Hartmann, 1993], et pour différents tests de sensibilité à la physique. Plus δD est proche de la courbe de Rayleigh ($\delta D - \delta D_r$), plus l’air a été humidifié par mélnage avec la couche limite marine. On voit que ce mélnage est d’autant plus fort que la force d’inversion est faible.

de l’air entrainé depuis la troposphère libre vers la surface comme un facteur majeur contrôlant la composition isotopique dans les zones subsidentes des océans tropicaux. La possibilité de contraindre cette altitude d’entrainement, et par là-même les processus de mélnage, est discutée (figure 14).

Galewsky et al (en prep) étudie le rôle de la force d’inversion (Estimated Inversion Strength EIS) dans le transport de vapeur d’eau de la couche limite marine vers la troposphère libre. Ce transport est crucial pour contrôler l’humidité de la troposphère libre, la couverture de nuages bas et le mélnage vertical dans les basses couches.

5.3 LMDZ-iso au Cénozoïque

Pierre Sepulchre, Yannick Donnadiou, Svetlana Botsyun (ancienne doctorante)

Nous avons demandé des heures pour pouvoir réviser notre article soumis à Science. Finalement, toutes les simulations ont pu être lancées avant mai 2018, et nous n’avons donc pas consommé pour ce

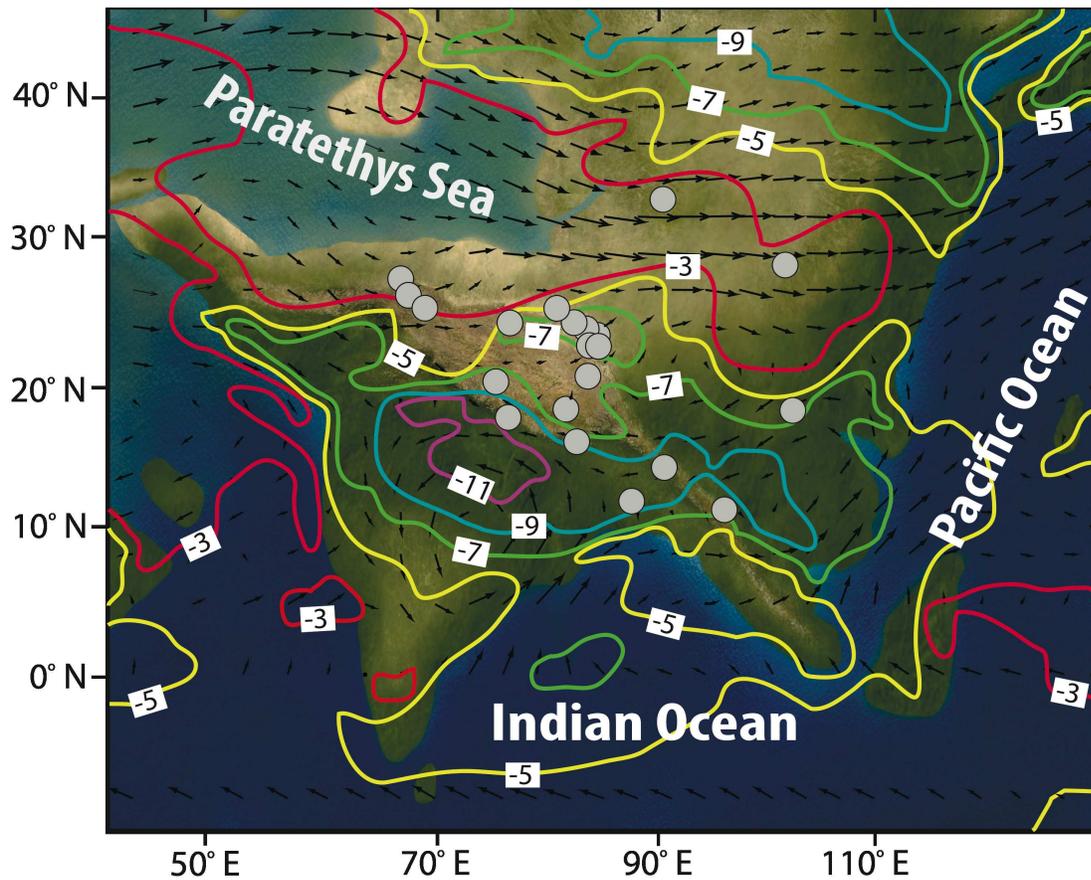


FIG. 16 – $\delta^{18}O$ des précipitations estivales simulées par LMDZ lors d’une simulation de l’Eocène. On y voit l’inversion du gradient isotopique, avec des précipitation d’autant plus riches que l’altitude est élevée. Les ronds montrent les sites d’archives paléo-climatique utilisés dans cette étude. Les flèches illustrent les vents dans les basses couches.

thème. L’article pour Science a été accepté. Le but de cet article est de contribuer aux reconstitutions paléo-altimétrique du plateau Tibétain au cours de l’Eocène (il y a 40 millions d’années). Les archives isotopiques sont typiquement employées pour reconstituer les altitudes passées, en utilisant des relations statistiques basées sur l’actuel : plus l’altitude est élevée, plus la précipitation est appauvrie en isotopes lourds. Mais ces reconstitutions sont entachées d’incertitudes, car les relations statistiques n’ont aucune raison de rester valable dans le passé.

Dans cet article, nous utilisons une série de simulations avec LMDZ dans lesquelles on fait varier la paléo-geographies, la concentration en CO_2 , l’altitude du plateau, les températures de surface de l’océan, l’albédo de surface, la configuration orbitale. Les simulations montrent qu’au cours de l’Eocène, la position plus près de l’équateur du plateau tibétain conduit à un gradient isotopique inversé, avec des précipitation d’autant plus riches que l’altitude est élevée (figure 16). Contrairement aux interprétations précédentes des archives isotopiques dans la région, nous interprétons donc les valeurs appauvries observées comme la signature d’un plateau tibétain bas (inférieur à 3000m), et non d’un plateau tibétain haut. Ceci signifierait donc que le plateau tibétain s’est sur-élevé plus récemment qu’on ne le pense.

Publications récentes liées au projet

Nous ne listons ici que les articles les plus récents, qui n'étaient pas encore dans le rapport précédent ou dont le statut a changé depuis. 26 publications récentes sont ainsi liées au projet.

1. Botsyun S., Sepulchre P., Donnadiou Y., Risi C., Licht, A and Caves, J. (2019) Revisited Paleoaltimetry Data Show Low Tibetan Plateau Elevation during the Eocene. Accepted par *Science*.
2. A. C. Bushell, J. A. Anstey, N. Butchart, Y. Kawatani, S. M. Osprey, J. H. Richter, F. Serva, P. Braesicke, C. Cagnazzo, C.-C. Chen, H.-Y. Chun, R. R. Garcia, L. J. Gray, K. Hamilton, T. Kerzenmacher, Y.-H. Kim, F. Lott, C. McLandress, H. Naoe, J. Scinocca, T. N. Stockdale, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (soumis) : The Quasi-Biennial Oscillation in global climate models : present-day conditions, soumis à *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*
3. Alexandre Cauquoin and Camille Risi (Soumis). Importance of the advection scheme for the simulation of water isotopes over Antarctica by general circulation models : a case study with LMDZ-iso (LMDZ5a revision 1750). Soumis à *Earth Planet. Sci. Lett.* <https://doi.org/10.5194/gmd-2017-178>
4. Coppin, D., & Bony, S. (2018). On the interplay between convective aggregation, surface temperature gradients, and climate sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 3123–3138. <https://doi.org/10.1029/2018MS001406>
5. Cugnet D., de la Camara A., Lott F., Millet C., Ribstein B. (2019) : Non-orographic Gravity Waves : Representation in Climate Models and Effects on Infrasound. In : Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (eds) *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer, Cham, DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_27
6. Guimberteau M., Ciais P., Ottlé C., Zhu D., Jornet A. and Kim H. (en review) : Trends of water budget components and river discharge extremes in Arctic basins, *Water Resour. Res.*
7. Holt, F. Lott, R. R. Garcia, G. N. Kiladis, J. A. Anstey, P. Braesicke, A. Bushell, N. Butchart, C. Cagnazzo, C.-C. Chen, H.-Y. Chun, K. Hamilton, Y. Kawatani, T. Kerzenmacher, Y.-H. Kim, C. McLandress, H. Naoe, S. Osprey, J. Richter, J. Scinocca, F. Serva, S. Versick, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (soumis) : An evaluation of tropical waves and wave forcing of the QBO in the QBOi models, soumis à *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*
8. Huang Y., Zhu D., Ciais P., Guenet B., Huang Y., Goll D., Guimberteau M., Jornet-Puig A., Lu X. and Luo Y. (2018) : Matrix-based sensitivity assessment of soil organic carbon storage : A case study from the ORCHIDEE-MICT model, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 10, 1790-1808, doi : 10.1029/2017MS001237
9. Joetzjer E., Maignan F., Chave J., Goll D., Poulter B., Barichivich J., Maréchaux I., Luysaert S., Guimberteau M., Naudts K., Bonal D. and Ciais P. (en review) : The importance of tree demography and root water uptake for modelling the carbon and water cycles of Amazonia, *Biogeosciences Discuss.*, doi :10.5194/bg-2018-308
10. Jouhaud, Jean (2018). Amélioration de la représentation des nuages bas dans le modèle de circulation générale LMDZ. Thèse de le Sorbonne Université réalisée au LMD encadrée par Jean-Louis Dufresne et Jean-Baptiste Madeleine.
11. C. J. Morcrette and K. Van Weverberg and H.-Y. Ma and M. Ahlgrimm and E. Bazile and L. K. Berg and A. Cheng and F. Cheruy and J. Cole and R. Forbes and W. I. Gustafson Jr and M. Huang and W.-S. Lee and Y. Liu and L. Mellul and W. Merryfield and Y. Qian and R. Roehrig and Y.-C. Wang and S. Xie and C. Zhang and S. Klein and J. Petch (en revision).

- Introduction to CAUSES : Description of weather and climate models and their near-surface temperature errors in 5-day hindcasts near the Southern Great Plains. *J. Geophys. Res.*
12. Morrison et al. (**en préparation**). Cloud response to Arctic sea ice loss and implications for feedbacks in the CESM-LE and IPSL climate models.
 13. Popp, M. and S. Bony (**en préparation**) : Large impact of convective clustering on the width of the ITCZ.
 14. Rammig A., Heinke J., Hofhansl F., Verbeeck H., Baker T., Christoffersen B., Ciais P., De Deurwaerder H., Fleischer K., Galbraith D., Guimberteau M., Huth A., Johnson M., Kruijt B., Langerwisch F., Meir P., Papastefanou P., Sampaio G., Thonicke K., von Randow C., Zang C. and Rödiger E. (**2018**) : A generic pixel-to-point comparison for simulated large-scale ecosystem properties and ground-based observations : an example from the Amazon region, *Geosci. Model Dev.*, 11, 5203-5215, 10.5194/gmd-11-5203-2018
 15. Richter, JH, N. Butchart, Y. Kawatani, A. Bushell, L. Holt, J. Anstey, F. Serva, I. R. Simpson, S. Osprey, K. Hamilton, P. Braesicke, C. Cagnazzo, C.-C. Chen, R. R. Garcia, L. J. Gray, T. Kerzenmacher, F. Lott, C. MacLandress, H. Naoe, J. Scinocca, T. N. Stockdale, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (**soumis**) : Response of the quasi-biennial oscillation to a warming climate in global climate models, soumis au *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*
 16. Risi, C, Lacour, J-L, Worden, J, Bony, S (**en révision**). Constraining the shape of large-scale vertical velocity profiles in climate models using water vapor isotopic measurements. *Geophys. Res. Lett.*
 17. Risi, Camille, Joe Galewsky, Marion Benetti, Gilles Reverdin, Florent Brient, Sandrine Bony (**en préparation**) What controls the water vapor isotopic composition near the surface of tropical oceans? Importance of entrainment altitude. En préparation pour *Journal of Geophysical Research*.
 18. Stockdale, T, Y.-H. Kim, J. A. Anstey, F. Palmeiro, N. Butchart, A. Scaife, M. Andrew, A. C. Bushell, C. Bushell, , M. Dobrynin, J.-G. Serano, K. Hamilton, Y. Kawatni, F. Lott, C. MacLandress, H. Naoe, S. Osprey, H. Pohlmann, J. Scinocca, S. Watanabe, K. Yoshida and S. Yukimoto (**soumis**) : Prediction of the quasi-biennial oscillation with a multi-model ensemble of QBO-resolving models, soumis à *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*
 19. Stubenrauch, C., J., & Bonazzola, M. (**soumis**), Constructing a coherent Bulk Ice Cloud Scheme for GCMs Part I : Review of Bulk Ice Fall Speed Parameterizations and Relation to effective Ice Crystal Diameter, soumis à *J. Advanc. Model. Earth Sys.*
 20. Stubenrauch, C., J., Bonazzola, M., Protopapadaki, S. E., & Musat, I. (**soumis**), Constructing a coherent Bulk Ice Cloud Scheme for GCMs Part II : Using a Cloud System Concept to Demonstrate its Impact in the LMDZ GCM. soumis à *J. Advanc. Model. Earth Sys.*
 21. K. Van Weverberg, C. J. Morcrette, J. Petch, S. A. Klein, H.-Y. Ma, C. Zhang, S. Xie, Q. Tang, W. Gustafson, Y. Qian, L. Berg, M. Wang, Y. Liu, M. Ahlgrimm, R. Forbes, E. Bazile, R. Roehrig, J. Cole, W. Merryfield, W.-S. Lee, F. Cheruy, L. Mellul, Y.-C. Wang and K. Johnson (**2018**). Attribution of Surface Radiation Errors near the Southern Great Plains in Numerical Weather Prediction and Climate Models, accepté dans *J. Geophys. Res.*
 22. Wang, T, Zhang, Q, Lossow, S, Chafik, L, Risi, C, Murtagh, D, Hannachi, A (**2018**). Stable water isotopologues in the stratosphere retrieved from Odin/SMR measurements. *Atmosphere Remote Sensing*, 10(2), 166 doi : 10.3390/rs10020166
 23. Wing, A. A., K. A. Reed, M. Satoh, B. Stevens, S. Bony, and T. Ohno (**2018**) Radiative-Convective Equilibrium Model Intercomparison Project. *Geosci. Mod. Dev.*, 11(2), 793–813, 10.5194/gmd-11-793-2018

24. Wu Y., Bo Y., Zhou F., Tang Q., Guimberteau M., Ciais P., Yang T., Peng S., Piao S., Zheng J., Zheng J., Dong Y., and Dai C. (2018) : Quantifying the unauthorized lake water withdrawals and their impacts on the water budget of eutrophic Lake Dianchi, China, *J. Hydrol.*, 565, 39-48, 10.1016/j.jhydrol.2018.08.017
25. Xi Y., Peng S., Ciais P., Guimberteau M., Li Y., Piao S., Wang X., Polcher J., Yu J., Zhang X., Zhou F., Bo Y., Ottlé C. and Yin Z. (2018) : Contributions of climate change, CO₂, land-use change, and human activities to changes in river flow across 10 Chinese basins, *J. Hydrometeor.*, 19, 1899–1914, doi : 10.1175/JHM-D-18-0005.1
26. Yin Z., Ottlé C., Ciais P., Guimberteau M., Wang X., Zhu D., Maignan F., Peng S., Piao S., Polcher J., Zhou F., Kim H. and other China-Trend-Stream project members (2018) : Evaluation of ORCHIDEE-MICT-simulated soil moisture over China and impacts of different atmospheric forcing data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5463-5484, doi : 10.5194/hess-22-5463-2018

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.
- [Bellon et al., 2017] Bellon, G., Reitebuch, O., and Naumann, A. K. (2017). Shallow circulations : Relevance and strategies for satellite observation. *Surveys in Geophysics*, pages 1–20.
- [Benedict and Randall, 2009] Benedict, J. J. and Randall, D. A. (2009). Structure of the Madden–Julian oscillation in the superparameterized CAM. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(11) :3277–3296.
- [Bodas-Salcedo et al., 2011] Bodas-Salcedo, A., Webb, M., Bony, S., Chepfer, H., Dufresne, J.-L., Klein, S., Zhang, Y., Marchand, R., Haynes, J., Pincus, R., et al. (2011). Cosp : Satellite simulation software for model assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(8) :1023–1043.
- [Bony and Dufresne, 2005] Bony, S. and Dufresne, J. (2005). Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, 32 :L20806, doi :10.1029/2005GL023851.
- [Brient et al., 2016] Brient, F., Schneider, T., Tan, Z., Bony, S., Qu, X., and Hall, A. (2016). Shallowness of tropical low clouds as a predictor of climate models? response to warming. *Climate dynamics*, 47(1-2) :433–449.
- [Butchart et al., 2018] Butchart, N., Anstey, J. A., Hamilton, K., Osprey, S., McLandress, C., Bushell, A. C., Kawatani, Y., Kim, Y.-H., Lott, F., Scinocca, J., et al. (2018). Overview of experiment design and comparison of models participating in phase 1 of the sparq quasi-biennial oscillation initiative (qboi). *Geoscientific Model Development*, 11(3) :1009–1032.
- [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., 1994] Emanuel, K., Neelin, D., and Bretherton, C. (1994). On large-scale circulations in convecting atmospheres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120 :1111–1143.

- [Eyring et al., 2016] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (cmip6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5) :1937–1958.
- [Faloona et al., 2005] Faloona, I., Lenschow, D. H., Campos, T., Stevens, B., Van Zanten, M., Blomquist, B., Thornton, D., Bandy, A., and Gerber, H. (2005). Observations of entrainment in eastern pacific marine stratocumulus using three conserved scalars. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(9) :3268–3285.
- [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 Hurley, 2010] Galewsky, J. and Hurley, J. V. (2010). An advection-condensation model for subtropical water vapor isotopic ratios. *J. Geophys. Res.*, 115 (D16) :D16115 , doi :10.1029/2009JD013651.
- [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.
- [Galewsky and Samuels-Crow, 2014] Galewsky, J. and Samuels-Crow, K. (2014). Water vapor isotopic composition of a stratospheric air intrusion : Measurements from the chajnantor plateau, chile. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 119(16) :9679–9691.
- [Galewsky et al., 2016] Galewsky, J., Steen-Larsen, H. C., Field, R. D., Worden, J., Risi, C., and Schneider, M. (2016). Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle. *Reviews of Geophysics*, 54(4) :809–865.
- [Galewsky et al., 2007] Galewsky, J., Strong, M., , and Sharp, Z. D. (2007). Measurements of water vapor D/H ratios from Mauna Kea, Hawaii, and implications for subtropical humidity dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, 34 :L22808, doi :10.1029/2007GL031330.
- [Guimberteau et al., 2018] Guimberteau, M., Zhu, D., Maignan, F., Huang, Y., Chao, Y., Dantec-Nédélec, S., Ottlé, C., Jornet-Puig, A., Bastos, A., Laurent, P., et al. (2018). Orchidee-mict (v8.4.1), a land surface model for the high latitudes : model description and validation. *Geoscientific Model Development*, 11(1) :121.
- [Jézéquel et al., 2018] Jézéquel, A., Yiou, P., and Radanovics, S. (2018). Role of circulation in european heatwaves using flow analogues. *Climate Dynamics*, 50(3-4) :1145–1159.
- [Klein and Hartmann, 1993] Klein, S. A. and Hartmann, D. L. (1993). The seasonal cycle of low stratiform clouds. *Journal of Climate*, 6(8) :1587–1606.
- [Lappen and Schumacher, 2012] Lappen, C.-L. and Schumacher, C. (2012). Heating in the tropical atmosphere : what level of detail is critical for accurate mjo simulations in gcms? *Climate dynamics*, 39(9-10) :2547–2568.
- [Li et al., 2009] Li, C., Jia, X., Ling, J., Zhou, W., and Zhang, C. (2009). Sensitivity of mjo simulations to diabatic heating profiles. *Climate Dynamics*, 32(2-3) :167–187.
- [Mellado, 2017] Mellado, J. P. (2017). Cloud-top entrainment in stratocumulus clouds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 49 :145–169.

- [Plougonven et al., 2017] Plougonven, R., Jewtoukoff, V., Cámara, A. d. l., Lott, F., and Hertzog, A. (2017). On the relation between gravity waves and wind speed in the lower stratosphere over the southern ocean. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74(4) :1075–1093.
- [Sherwood et al., 2014] Sherwood, S., Bony, S., and Dufresne, J.-L. (2014). Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, 505 :37–42, doi :10.1038/nature12829.
- [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.
- [Vial et al., 2016] Vial, J., Bony, S., Dufresne, J.-L., and Roehrig, R. (2016). Coupling between lower-tropospheric convective mixing and low-level clouds : Physical mechanisms and dependence on convection scheme. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(4) :1892–1911.
- [Zhang and Mu, 2005] Zhang, G. J. and Mu, M. (2005). Effects of modifications to the Zhang-McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, version 3. *J. Geophys. Res.*, 110 :10.1029/2004jd005617, D09109.
- [Zhang and Song, 2009] Zhang, G. J. and Song, X. (2009). Interaction of deep and shallow convection is key to madden-julian oscillation simulation. *Geophysical Research Letters*, 36(9).