

Rapport d'activité DARI 2020 – projet 0292

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

Rapport d'activité

Camille Risi

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

L.M.D. - février 2021

Table des matières

1	Vue d'ensemble du projet et bilan de notre consommation	2
1.1	Vue d'ensemble	2
1.2	Bilan de notre consommation	2
1.2.1	A l'IDRIS	2
1.2.2	Au TGCC	3
2	Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	4
2.1	Entretien d'une version distribuable de LMDZ	4
2.2	Organisation spatiale de la convection	4
2.2.1	Étude de l'effet de l'organisation spatiale de la convection hors équateur sur la zone de convergence intertropical	4
2.2.2	Participation au « Radiative-Convective Equilibrium Model Intercomparison Project » (RCEMIP)	5
2.3	Arctique et montagnes	5
2.3.1	Le programme QBOi	5
2.3.2	Ondes de gravité lentes	7
2.4	Vers l'amélioration de la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans LMDZ	9
3	Interactions océan-atmosphère	10
3.1	Couches de réchauffements diurne en Arctique	10
3.2	Effet des stratifications de surface sur les flux de CO_2	10
4	Évaluation, amélioration et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	11
4.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE	11
4.2	Amélioration de l'hydrologie continentale, impact sur le climat récent et futur	11
4.2.1	Rôle des propriétés du sol	12
4.2.2	Rôle des nappes, des plaines d'inondation et de l'irrigation	14
4.3	Couplage surfaces continentales - atmosphère	15

4.3.1	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 . . .	16
4.3.2	Modélisation du cycle hydrologique au Maroc dans le contexte du changement climatique	16
5	Isotopes de l'eau	16
5.1	Isotopes dans LMDZ	16
5.1.1	Isotopes dans LMDZ6	16
5.1.2	Applications régionales	17
5.2	Isotopes dans des simulations résolvant explicitement la convection	18
5.2.1	Compréhension des processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau	18
5.2.2	Distribution isotopique lors de cyclones tropicaux et de lignes de grain	18

1 Vue d'ensemble du projet et bilan de notre consommation

1.1 Vue d'ensemble

Ce projet regroupe différentes études liées à la modélisation du climat, au cycle de l'eau et à la variabilité climatique. Le but est de mieux comprendre et de mieux modéliser les processus atmosphériques et d'interactions avec les surfaces continentales et les océans. Il est organisé en 4 grands thèmes (tableau 1). Il utilise et contribue à développer 2 modèles :

1. LMDZ, modèle de circulation général atmosphérique développé au LMD
2. ORCHIDEE, modèle de surface continentale développé à l'IPSL.

En outre, ce projet utilise 2 autres modèles :

1. IPSL-CM, modèle couplé développé à l'IPSL qui couple LMDZ, ORCHIDEE et NEMO, modèle d'océan développé au LOCEAN.
2. SAM, modèle haute résolution résolvant les mouvements dans les systèmes convectifs.

1.2 Bilan de notre consommation

1.2.1 A l'IDRIS

Pour l'allocation A8, au 28 janvier 2021, sur Jean-Zay, nous avons consommé 249 000 heures, soit 35% des heures demandées. Cette sous-consommation s'explique en partie par la crise sanitaire, et en partie par le fait que certaines simulations prévues dans le cadre de cette allocation ont finalement été lancées sur d'autres projet, en particulier :

- genCMIP6, consacré à la mise au point et le réglage de la prochaine version de LMDZ, LMDZ6.
- rces, consacré aux études de climats régionaux.

thème	heures demandées (k heures CPU)	heures consommées au 28 janvier 2021 (k heures CPU)	% de consommation par rapport à l'allocation demandée
Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	377	48	13%
Intéactions océan-atmosphère	75	0	0%
Etude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	264	72	27%
Isotopes de l'eau	5	128	2560%
Total	721	249	35%

TABLE 1 – Tableau comparant les heures de calcul initialement allouées et consommées sur Irène au 28 janvier 2021.

1.2.2 Au TGCC

Sur Irène KNL et Rome, les heures ont été consommées à 37% et 215% de la demande pour les thèmes des isotopes de l'eau et des interactions océan-atmosphère. Les heures sur les autres machines du TGCC et pour les autres thèmes n'ont pas été utilisées, et ne feront plus l'objet de demandes pour l'allocation A10.

thème	machine	heures demandées (k heures CPU)	heures consommées au 28 janvier 2021 (k heures CPU)	% de consommation par rapport à l'allocation demandée
Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	Irène SKL	190	0	0%
Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	Irène KNL	50	0	0%
Etude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	Irène Rome	50	0	0%
Intéactions océan-atmosphère	Irène Rome	60	129	215%
Isotopes de l'eau	Irène KNL	450	165	37%

TABLE 2 – Tableau comparant les heures de calcul initialement allouées et consommées sur Irène au 28 janvier 2021.

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

2.1 Entretien d’une version distribuable de LMDZ

Laurent Fairhead, Ionela Musat

*Demande = 50 000 h. Consommation = 18 000 h CPU sur Jean-Zay ;
Demandes = 50 000 h sur Irène KNL, SKL et GPU et sur Jean-Zay GPU ; Consommation 0 h.*

Des simulations routinières de 1 mois sont lancées sur Jean-Zay 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.

2.2 Organisation spatiale de la convection

Max Popp, Sandrine Bony

Demande = 150 000 h. Consommation = 20 000 h CPU sur Jean-Zay

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.

2.2.1 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 (ITCZ) dans des simulations d’aquaplanètes que nous avons fait sur Ada ([Popp and Bony, 2019]). Nous avons confirmé cela dans un nouvel article (Popp et al. 2020). 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 et dans les simulations multi-modèles en configurations réalistes AMIP, ce qui confirme les résultats des simulations en configuration idéalisées. Ceci a aussi fait l’objet d’un article (Popp et al. 2020b).

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 avons mis en place des configurations du modèle de circulation générale LMDZ5A-MR en mode aquaplanète dans lesquelles la ZCIT se positionne hors équateur en imposant une distribution de la température qui est asymétrique par rapport à l’équateur.

Nous avons dans un second temps commencé à perturber les simulations en imposant des champs zonaux d’évaporation pour créer différentes organisations zonales de la convection profonde. Des premiers résultats montrent que hors de l’équateur, tout comme à l’équateur, l’ITCZ est plus étendue en direction méridienne et les précipitations au cœur de l’ITCZ moins intense quand la convection est plus agrégée en direction zonale (Figure 1). De plus, les résultats suggèrent que la distribution des précipitations tropicales se déplace vers l’équateur quand la convection est plus agrégée en direction

zonale, suggérant ainsi que l'agrégation zonale de la convection pousse l'ITCZ vers l'équateur. Nous anticipons terminer les simulations à ce sujet avant la fin de l'allocation A8.

2.2.2 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).

Nous avons participé à cet effort en ayant réalisé les simulations proposées par RCEMIP avec le modèle LMDZ6-LR. Un papier présentant les simulations RCEMIP, dont celles réalisés avec LMDZ6-LR, et des premiers résultats a été publié (Wing et al. 2020). Ces résultats montrent entre autre que le modèle LMDZ6-LR atteint rapidement un état agrégé en équilibre radiatif-convectif (Figure 2), tout comme la plupart des modèles de climat, et qu'un état agrégé est généralement associé à un assèchement et un chauffage de la troposphère libre ainsi qu'à une diminution de nuages hauts.

2.3 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)

*Demande = 83 000 h. Consommation = 0 h CPU sur Jean-Zay
(les simulations ont été lancées sur le projet genCMIP6 au lieu du projet 0292, un problème qui sera dorénavant corrigé.)*

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.

2.3.1 Le programme QBOi

Dans le rapport de l'an dernier, nous avons déjà souligné certains résultats importants issus du projet international QBOi (Quasi Biennial Oscillation Initiative) et qui avait mobilisé beaucoup d'heures de calcul IDRIS. Les études publiées associées montrent, entre autre, que les modèles ont

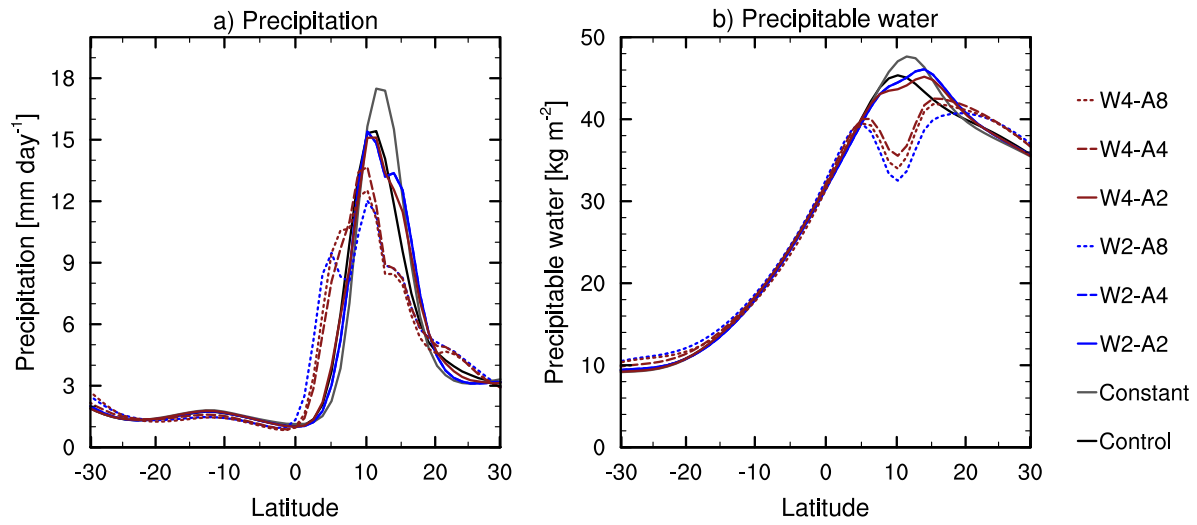


FIGURE 1 – Moyenne zonale de la précipitation (a) et de l'eau précipitable (b) en équilibre dans les différentes simulations. Des états avec des facteurs d'A large ainsi que des facteurs de W petit sont plus agrégés.

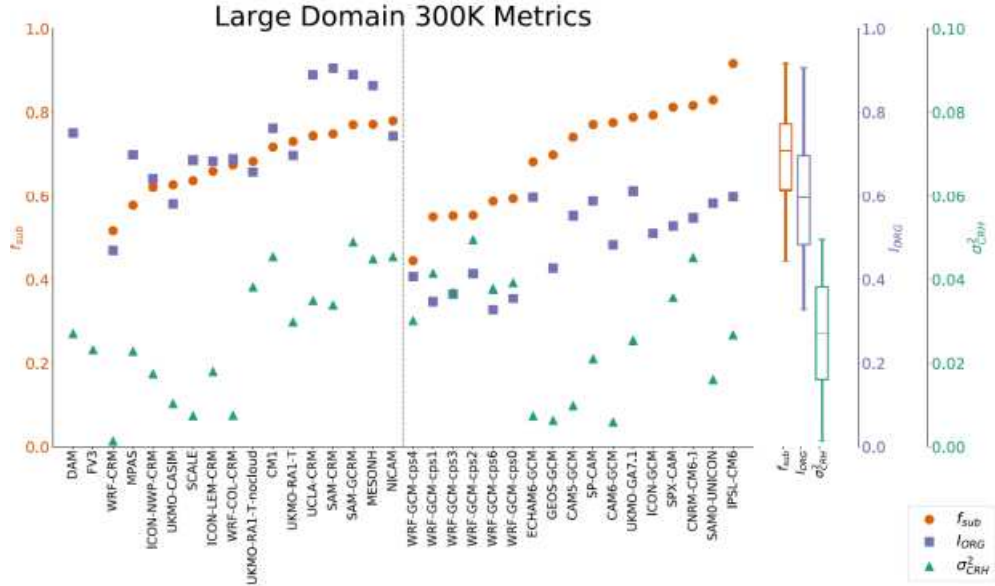


FIGURE 2 – Degré d’agrégation dans les simulations RCEMIP avec différents modèles de climat selon trois métriques différentes (f_{sub} , I_{ORG} et σ_{CRH}^2). Le modèle LMDZ6-LR est tout à droite (indiqué comme IPSL-CM6). Figure adaptée d’après Wing et al. 2020.

du mal à simuler la descente de l’oscillation jusqu’au sommet de la troposphère (100hPa-70hPa, Bushell et al. 2020), et que les prévisions du futur de la QBO, dans un climat qui change sont très diverses (Richter et al 2020). Dans certains modèles elle accélère, dans d’autres elle ralentit voir disparaît (c’est le cas du modèle atmosphérique de l’IPSL, LMDZ6).

Dans tout les modèles, la QBO résulte d’une combinaison d’ondes paramétrées et d’ondes équatoriales simulées explicitement (Holt et al. 2020). Dans le domaine des ondes paramétrées LMDZ6 se distingue car il relie aujourd’hui directement les ondes de gravités à leurs source dans la troposphères. Un résultat marquant est que les relations entre l’oscillation quasi-biennale et la météorologie des moyennes latitudes est moins forte dans les modèles que dans les observations. Cela est du au fait que dans les observations, cette relation implique surtout la partie basse de la QBO, c’est à dire la partie la plus mal représentée dans les modèles. Un modèle, WACCM, présente une bonne corrélation entre l’oscillation arctique et la QBO dans les basses couches de la stratosphère (autour de 50hPa, voir Figure 3), c’est aussi celui qui a le plus fort signal de QBO autour de 50hPa.

2.3.2 Ondes de gravité lentes

En terme de développement, nous avons par ailleurs commencer à développer des paramétrisations d’ondes de gravité lentes (Ribstein et al. 2020), celles ci ne concernent pour l’instant que les ondes de gravité issues des fronts et de l’ajustement géostrophique qui s’y produit. En ce qui concerne l’effet des montagnes, nous avons montré que l’ajustement de la paramétrisation de l’orographie sous-maille dans LMDZ et dans le modèle couplé de l’IPSL pouvait permettre de réduire des biais sur la couverture en glace arctique (Gastineau et al. 2020).

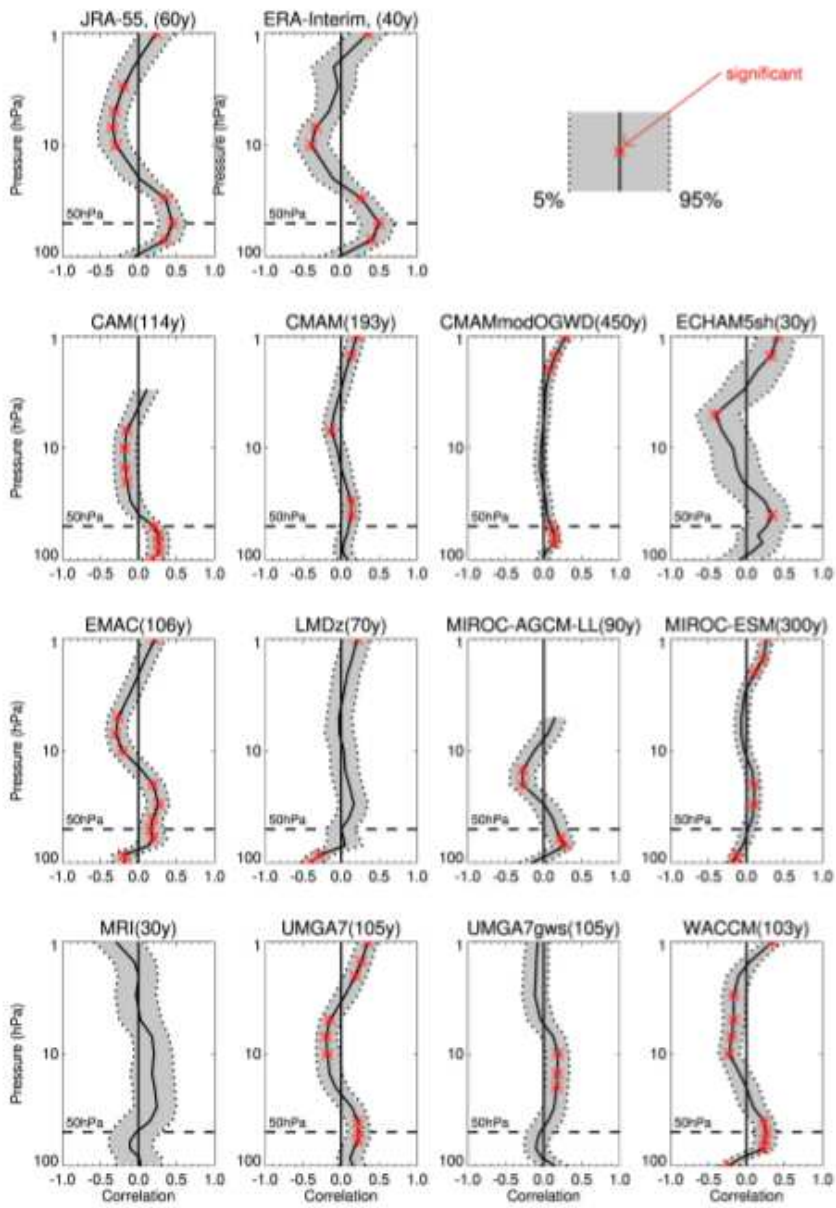


FIGURE 3 – Corrélation entre le vortex polaire (moyenne zonal du vent zonal à 10hPOa, 60°N) et la moyenne zonale vent zonal dans la basse stratosphère équatoriale. (Anstey et al. 2020).

2.4 Vers l'amélioration de la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans LMDZ

Catherine Rio, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix

Demande = 68 000 h. Consommation = 10 000 h CPU sur Jean-Zay

La représentation de la distribution et de la variabilité des précipitations tropicales reste un enjeu majeur pour le modèle LMDZ. Si la représentation des pluies continentales a été améliorée suite au passage de LMDZ5B à LMDZ6A (notamment sur l'Afrique), celle des pluies océaniques a été dégradée, en particulier sur l'océan indien, la warm pool et le continent maritime. En lien avec ce constat, plusieurs développements sont en cours dans le modèle LMDZ :

1. un nouveau schéma pronostique de la densité de poches froides,
2. une nouvelle formulation de la largeur de la distribution de l'eau sous-maille tenant en compte les caractéristiques de la convection profonde et des poches froides,
3. la modification du traitement de l'évaporation des pluies sous les nuages dans le schéma de condensation grande-échelle utilisé pour les nuages bas et les nuages stratiformes.

En 2020, ces développements ont été largement testés dans la version uni-colonne du modèle LMDZ, comparés à des simulations haute résolution de type LES ou CRM sur des cas d'étude réels et idéalisés. Le contexte particulier de l'année 2020 nous a en effet contraint à revoir certains objectifs. Aussi, la plupart des simulations globales initialement prévues pour tester l'effet des nouveaux développements sur la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans la version globale du modèle LMDZ n'ont pour la plupart pas encore été réalisées. Elles le seront dans le cadre de la prochaine allocation (voir demande).

Les développements autour du traitement de l'éjection des précipitations liquides de l'ascendance adiabatique du schéma de convection profonde ont tout de même été testés en mode global, et leurs effets sur les flux de précipitations liquide et solide sont illustrés sur la figure 4. Dans la version du modèle LMDZ utilisée pour les simulations CMIP6 le schéma de convection profonde forme la majorité de ses précipitations en phase glacée : le flux de précipitations solides (courbe noire dans la figure) atteint 2.2 kg/m²/d, alors que le flux total de précipitation, après fusion de la glace, atteint 4.1 kg/m²/d (courbe rouge représentant le flux de précipitation liquide). Cette proportion élevée de précipitations formées en phase froide est en contradiction avec les estimations expérimentales qui donnent plutôt une formation en phase froide minoritaire. Ce défaut est la conséquence d'une caractéristique du schéma convectif de LMDZ : tous les hydrométéores sont soulevés dans les ascendances convectives, quelles que soient leurs tailles et leurs phases. Ainsi, les gros hydrométéores liquides sont le plus souvent soulevés jusqu'à leur niveau de congélation et au-delà. Ce comportement n'est pas conforme aux observations : les gros hydrométéores liquides ont des vitesses de chute de plusieurs mètres par seconde et tombent donc dès leur formation. Nous avons donc développé une nouvelle modélisation de l'ascendance adiabatique du schéma convectif dans laquelle les précipitations liquides (c'est-à-dire les gros hydrométéores) sont éjectées de l'ascendance dès leur formation. Le résultat de cette nouvelle paramétrisation est représenté par les courbes verte (précipitation solide) et bleue (précipitation liquide). Maintenant le flux de précipitation solide culmine à 1.1 kg/m²/d alors que le flux liquide culmine à 4.2 kg/m²/d : les précipitations formées en phase froide sont maintenant minoritaires, en meilleur accord avec les estimations expérimentales.

Cette amélioration est sur le point d'être introduite dans la version standard de LMDZ6.

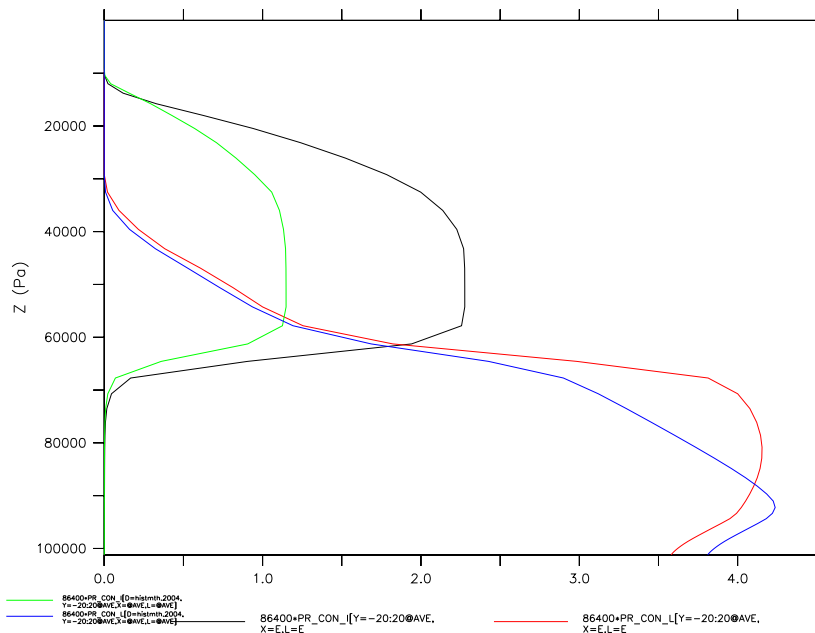


FIGURE 4 – Profils verticaux annuels moyens dans la bande [10S, 10N] des précipitations glacées et liquides (en kg/m²/d). Paramétrisation standard : noir pour la glace et rouge pour le liquide. Nouvelle paramétrisation : vert pour la glace et bleu pour le liquide

3 Interactions océan-atmosphère

3.1 Couches de réchauffements diurne en Arctique

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

Demande = 75 000 h sur Jean-Zay; consommation : 0 h

La crise sanitaire a eu un impact fort sur ce nouveau projet, les simulations n'ont pu être préparées. Le démarrage de ce projet est pour l'heure différé.

3.2 Effet des stratifications de surface sur les flux de CO₂

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

Demande = 60 000 h sur Jean-Zay; consommation : 129 000 h

Nous avons procédé à une première implémentation dans le couplé de l'IPSL de la paramétrisation des variations de température et de salinité dans la couche limite diffusive océanique, couche de

moins d'1mm à l'interface de l'océan contrôlée par la diffusion moléculaire, et des gradients dans la première couche du modèle d'océan NEMO ([Bellenger et al., 2017]). Cette paramétrisation corrige les flux turbulents et infrarouge calculés par LMDZ (au pas de temps de la physique de LMDZ) et les flux de CO_2 calculés par NEMO (au pas de temps du couplage, soit 1h30). Nous avons effectué des simulations piControl en calculant le flux de CO_2 en tenant compte de façon diagnostic ou non de cette correction.

L'effet de la prise en compte de la couche diffusive, caractérisée par une diminution de 0.2-0.3K et une augmentation de ~ 0.1 psu en moyenne globale du fait du flux infrarouge et de l'évaporation, tend à renforcer le puits océanique de carbone. Cet effet est global (Fig. 5) à l'exception du Pacifique équatorial où les couches de réchauffement diurnes renforcent légèrement le dégazage vers l'atmosphère. Cet effet est relativement modeste, un ordre de grandeur en dessous de celui du flux moyen, mais il varie peu et sa résultante produit un renforcement notable du flux annuel global de CO_2 vers l'océan, qui dans notre simulation, passe ainsi de $-0.09 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (écart type de $0.14 \text{ Pg C yr}^{-1}$) à $-0.25 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (écart type $0.13 \text{ Pg C yr}^{-1}$).

Cet effet est principalement dû au gradient de salinité dans la couche diffusive, et, sur les 10 ans de simulations effectuées, il est en moyenne globale constant. Cependant, il existe une variabilité interannuelle régionale des flux en particulier aux basses latitudes. Cette variabilité est illustrée sur la figure 2a par deux années : en rouge une année de type La Niña et en bleue, une année El Niño. Les variations de flux à l'Equateurs et dans les sub-tropiques correspondent principalement à des variations du gradient de salinité dans la couche diffusive (Fig. 6b) par le vent de surface et la pluie.

Il y a plusieurs limites à cette étude :

- L'implémentation actuelle dans le modèle sous-estime certainement l'effet de la peau océanique sur les échanges de CO_2 . De plus, un certains nombres de diagnostics supplémentaires doivent être écrits à chaque pas de temps du couplage (1h30) afin d'étudier précisément l'origine des différences constatées.
- La variabilité interne est encore forte sur 10 ans pour que l'effet moyen de la paramétrisation soit évident aux hautes latitudes.

Il est donc nécessaire d'effectuer des simulations plus longues. Nous profiterons de la correction de la paramétrisation pour ajouter la prise en compte de nouveaux effets de la pluie (voire demande).

4 Évaluation, 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, Vladislav Bastrikov

Demande = 43 000 h. Consommation = 2 000 h CPU sur Jean-Zay

Peu d'heures ont été consommées en raison du congé maternité de Josefine.

4.2 Amélioration de l'hydrologie continentale, impact sur le climat récent et futur

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

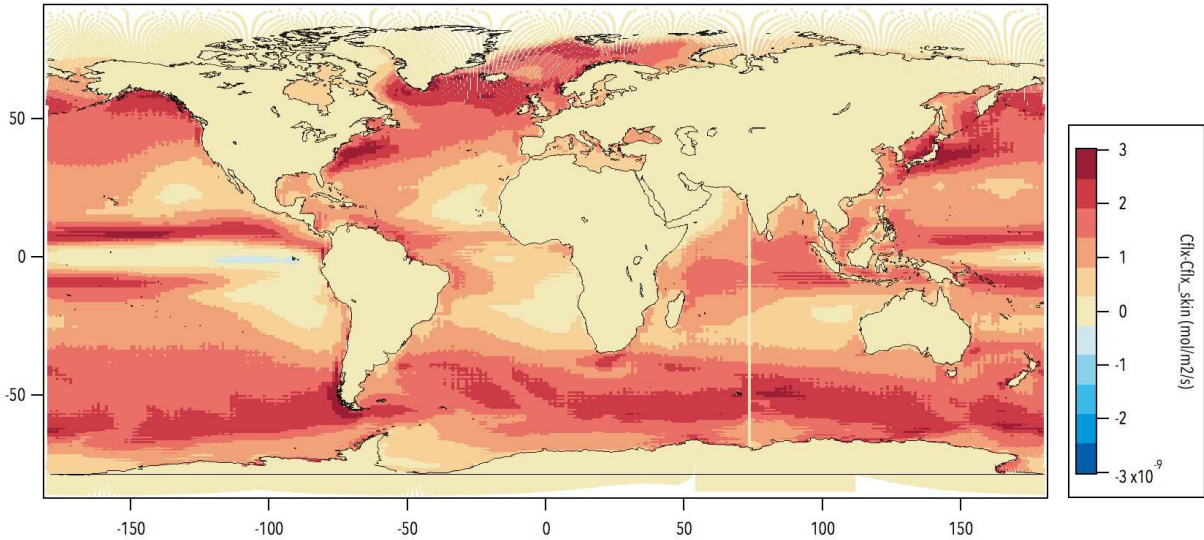


FIGURE 5 – Différence moyenne (positive vers l’océan) sur 10 ans de simulations des flux de CO_2 ($10^{-9} mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) calculés à partir des température et salinité de la première couche du modèle d’océan (CFLX) et calculés à partir des température et salinité de l’interface (CFLX_SKIN).

4.2.1 Rôle des propriétés du sol

Demande = 75 000 h. Consommation = 40 000 h CPU sur Jean-Zay

Ce travail s’inscrit dans le cadre de la thèse Salma Tafasca, soutenue le 13 novembre 2020. L’objectif général en était de mieux comprendre l’impact des propriétés du sol sur le bilan d’eau des surfaces continentales. Après avoir montré précédemment que la texture des sols avait une influence modeste sur les bilans d’eau hormis à très petite échelle ([Tafasca et al., 2020]), l’essentiel de la demande A8 portait sur l’impact climatique de la porosité du sol, sous-estimée dans le modèle ORCHIDEE dans les zones boréales où le modèle climatique associé, LMDZOR, montre de forts biais chauds. Nous avons donc prévu deux simulations de 50 ans avec ce modèle climatique pour tester si l’augmentation de la porosité pouvait réduire ces biais chauds, selon l’hypothèse qu’un sol plus poreux pouvait retenir plus d’humidité, et soutenir plus d’évapotranspiration dont l’effet refroidissant est bien reconnu. Cependant, les tests réalisés au préalable en forcé ont montré que la sensibilité de l’évapotranspiration à la porosité était faible dans les zones boréales, où l’évapotranspiration est bien davantage limitée par le rayonnement incident que par le déficit en eau.

Les simulations couplées n’ont donc pas été faites, et remplacées par un grand nombre de simulations forcées, moins couteuses en temps de calcul, pour comprendre quelles propriétés des sols ont une influence significative, et comment les représenter au mieux dans le modèle ORCHIDEE. Nous avons notamment démontré qu’il était important de distinguer la structure de certains sols argileux très communs dans les zones tropicales (les Oxisols, en bleu cyan en Figure 7a) par rapport aux sols argileux tempérés (les Vertisols, en bleu foncé en Figure 7a), seuls représentés jusqu’alors dans le modèle ORCHIDEE (Tafasca et al, soumis).

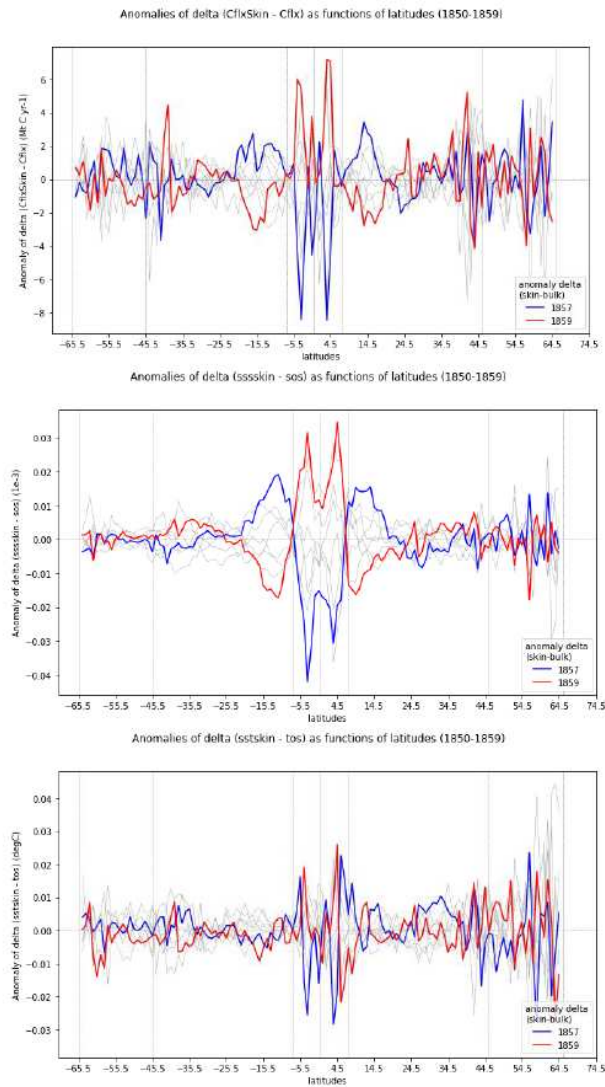


FIGURE 6 – Moyennes annuelles zonales des différences entre l’interface et le premier niveau du modèle d’océan des flux de CO₂ (haut) de la Température (centre) et de la salinité (bas). L’année en leu correspond à des conditions El Nino, l ‘année en rouge, à des conditions La Nina.

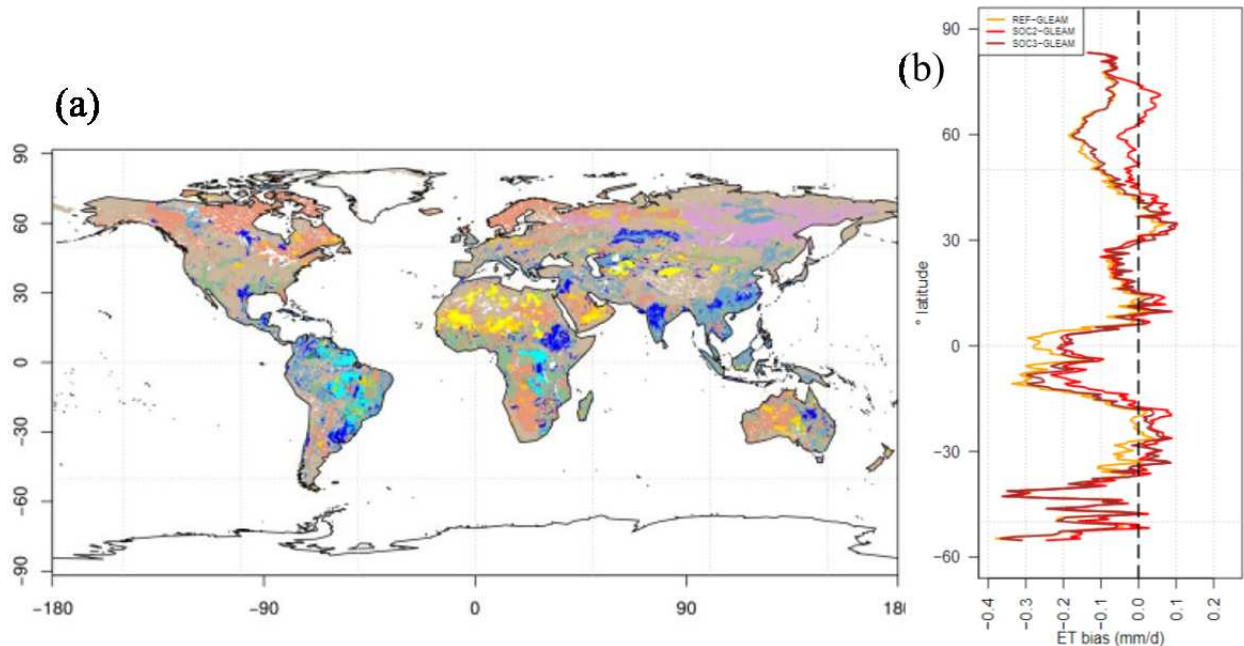


FIGURE 7 – (a) Carte des sols modifiée à partir de la carte de Reynolds et al (2020) pour introduire une nouvelle classe de sol argileux tropicaux (les Oxisols, en bleu cyan). (b) Moyenne zonale du biais de l'évapotranspiration simulée sous forçage météo GSWP3 ([Van den Hurk et al., 2016]) par rapport au produit GLEAM ([Martens et al., 2017]) sur la période 1980-2010, pour trois simulations : REF en jaune sans prise en compte de la matière organique, SOC3 en brun selon [Guimberteau et al., 2018], et SOC2 en rouge selon [Zhang et al., 2018].

Par ailleurs, un contrôle majeur de la structure est la teneur en matière organique du sol, qui influence fortement la porosité et l'ensemble des propriétés hydrauliques du sol. Nous avons comparé trois approches pour rendre compte de cette influence (appelées SOC1, SOC2, SOC3), en dupliquant les simulations avec deux forçages météorologiques, afin de pouvoir extraire les impacts significatifs de la matière organique sur les flux simulés de l'incertitude importante causée par les différences de forçages météorologiques. Ce travail nous a permis de montrer que : (i) l'approche la plus simple (SOC1) n'a presque aucun effet sur les erreurs du modèle; (ii) les deux autres les réduisent de manière similaire dans les tropiques; mais (iii) seule SOC2, qui intègre des informations sur la densité apparente ([Zhang et al., 2018]), permet de réduire les biais des zones boréales (Figure 7b). Ce travail est publié dans la thèse de [Tafasca, 2020] et fait l'objet d'un article en préparation.

4.2.2 Rôle des nappes, des plaines d'inondation et de l'irrigation

Demande = 77 000 h. Consommation = 3 000 h CPU sur Jean-Zay

L'objectif est ici 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 rafraichit l'at-

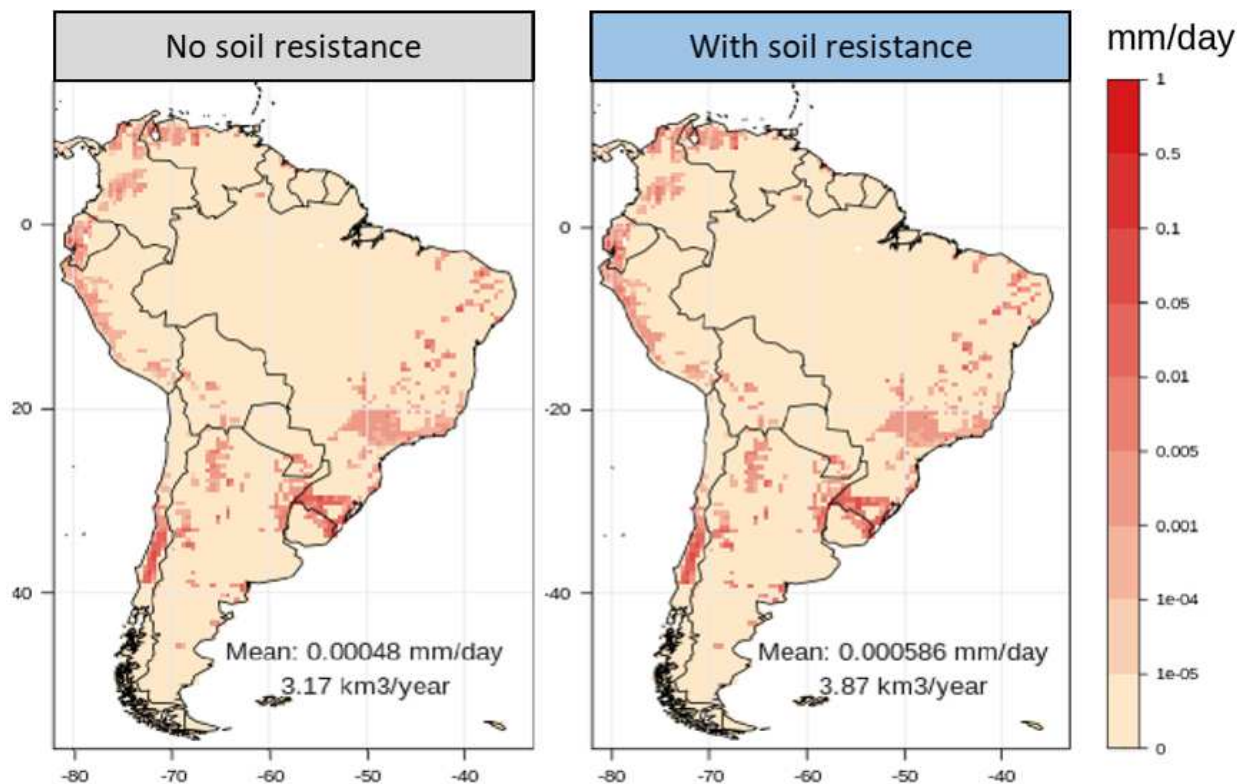


FIGURE 8 – Cartes des demandes en irrigation moyenne annuelle simulée en Amérique du Sud par ORCHIDEE sur la période 1980-2010 sous forçage GSWP3 ([Van den Hurk et al., 2016]) : (gauche) simulation de référence ; (droite) simulation avec activation d'une résistance à l'évaporation du sol.

mosphère 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).

L'essentiel de notre demande A8 portait sur deux simulations de 50 ans avec le modèle climatique LMDZOR, avec et sans irrigation, dans une configuration analogue à celle déjà validée pour évaluer l'effet des nappes souterraines sur le climat historique ([Ducharne et al., 2020b, Ducharne et al., 2020a]). Cependant, les tests réalisés au préalable en forcé ont montré que le module d'irrigation d'ORCHIDEE ne fonctionnait pas comme attendu. En particulier, en activant une résistance à l'évapotranspiration, qui fait baisser cette dernière et augmenter l'humidité du sol, on obtient paradoxalement une augmentation du besoin d'irrigation (Figure 8). Nous sommes en train de revoir le fonctionnement du module d'irrigation et de l'adapter aux changements effectués sur la paramétrisation des flux d'eau dans le sol ([Ducharne, 2017]) depuis les premières études avec ce module ([Guimberteau et al., 2012, De Rosnay et al., 2003]), en nous inspirant des travaux de [Yin et al., 2020]. Nous espérons donc pouvoir lancer les simulations prévues d'ici la fin de l'allocation A8 fin avril.

4.3 Couplage surfaces continentales - atmosphère

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

4.3.1 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

Demande = 14 000 h. Consommation = 0 000 h CPU sur Jean-Zay

Cette partie a pris du retard, et la doctorante qui a commencé sa thèse dessus en octobre 2020 s'est contentée du méso-centre IPSL pour commencer. A l'avenir, les heures concernant la sensibilité paramétrique à la surface, les simulations zoomées guidées et lien avec les observations vont être traitées dans le projet genCMIP6 en lien avec les questions de réglage du modèle global.

4.3.2 Modélisation du cycle hydrologique au Maroc dans le contexte du changement climatique

Demande = 55 000 h. Consommation = 27 000 h CPU sur Jean-Zay

Cette partie a aussi pris du retard, le séjour du doctorant S. Balhane en France ayant eu lieu uniquement pendant la période du premier confinement.

Une configuration zoomée à 20 km a néanmoins été mise en place avec l'aide d'A. Idelkadi. L'accroissement de résolution permet de capturer les précipitations sur l'Atlas Marocain, mais il s'accompagne dans toutes les configurations d'une surrestimation des précipitations hivernales en cours d'investigation (figure 9).

Ce travail est fait dans le cadre d'un projet collaboratif avec l'Université Mohammed 6 Polytechnique au Maroc qui a pour ambition de développer un centre de modélisation climatique au Maroc (avec comme principal outil le modèle IPSL-CM) dans l'objectif de réaliser des scénarios climatiques et hydrologiques régionaux fiables pour le Maghreb pour aider à la gestion et à l'adaptation des ressources en eau et de l'agriculture au Maroc et en Afrique du Nord dans le contexte du changement climatique. Ce travail s'accompagnera d'un questionnement sur les méthodologie de descente de descente d'échelle pour lequel des ressources de calcul sont demandé dans la demande DARI rces (A0080100239), qui regroupe les études régionales.

5 Isotopes de l'eau

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 Isotopes dans LMDZ

Demande = 5 000h. Consommation : 128 000 heures CPU sur Jean-Zay

5.1.1 Isotopes dans LMDZ6

David Cugnet, Camille Risi

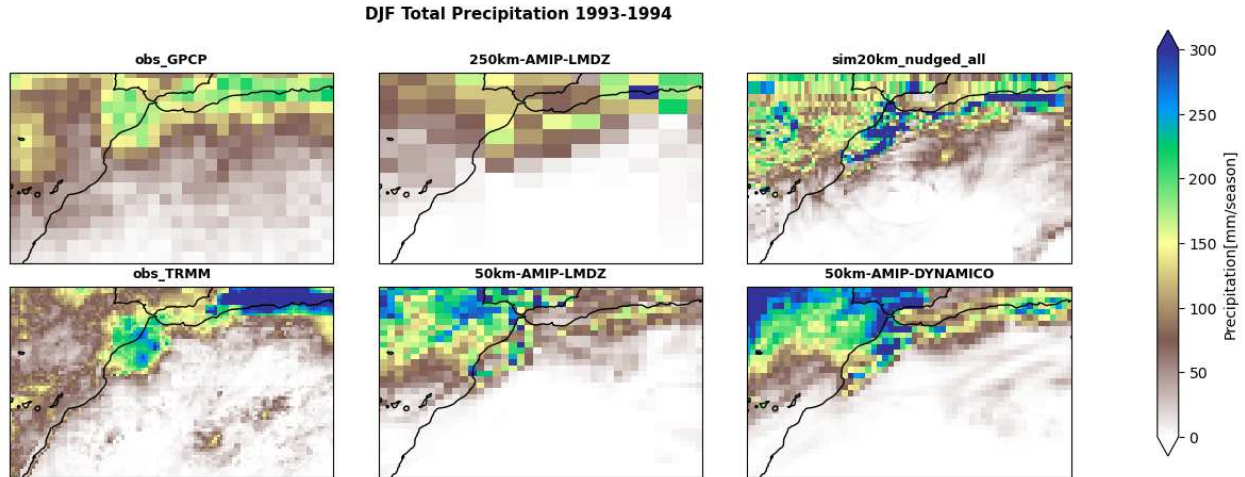


FIGURE 9 – Répartition géographique des précipitations hivernales sur le Maroc telle que restituées par les observations GPCP et TRMM, et différentes configurations du modèle LMDZOR :

- sim20km_nudged_all : simulation zoomée guidée (en vent ERA5) partant d’une grille globale de 160×90 vers une résolution fine d’à peu près 20km sur le Maroc.
- amip_nudged : simulation amip guidée (en vent ERAI) sur la grille régulière utilisée pour les simulations CMIP6 (env. 250 km).
- LMDZ-AMIP (grille de 50km, avec le coeur dynamique en grille latitude-longitude)
- DYNAMICO-AMIP (grille de 50km, avec le nouveau coeur dynamique DYNAMICO et la physique de LMDZ).

Les isotopes ont été implémentés dans LMDZ6, à la fois dans l’ancienne et la nouvelle physique, mise à part dans les développements récents liés à la thermodynamique de la glace. Ils fonctionnent sur Jean-Zay aussi bien en MPI et en open-MP. Le traçage de l’eau fonctionne aussi de nouveau. Des corrections ont été apportées à dyn3dmem.

Une simulation de type AMIP guidée a été réalisée sur la période 2015-2020, permettant la comparaison des simulations à des mesures isotopiques lors de campagnes récentes (ex : EUREC4A, [Bony et al., 2017]). Cette simulation imprévue explique notre sur-consommation.

5.1.2 Applications régionales

Camille Risi, Xiaoyi Shi (doctorante)

- Des simulations avec LMDZ-iso réalisées lors de l’allocation A6 ont été comparées à des observations isotopiques in-situ et par satellite sur la Chine, dans le cadre de la thèse de Xiaoyi Shi. Un article a été publié dans J. Geophys. Res (Shi et al 2020). On y montre que LMDZ représente bien les processus de grande échelle contrôlant la variabilité saisonnière de la composition isotopique en vapeur d’eau, mais a plus de mal à représenter les processus locaux en jeu dans la variabilité à l’échelle journalière.
- Des simulations avec LMDZ couplé avec un modèle de slab océanique réalisées lors de l’allocation A6 ont permis d’étudier le rôle de l’atmosphère dans la variabilité de la surface de banquise, dans le cadre d’une collaboration avec Z. Liu (Tongji University, Chine) et Francis

Codron. Les résultats ont été publiés dans Nature Communications (Liu et al 2020).

5.2 Isotopes dans des simulations résolvant explicitement la convection

Demande : 450 000h. Consommation : 165 000 heures CPU sur Irène

Camille Risi, Caroline Muller, Françoise Vimeux

Depuis quelques années, nous utilisons le modèle SAM (System for Atmospheric Modeling) résolvant explicitement la convection pour mieux comprendre comment la convection affecte la composition isotopique de la vapeur d'eau. Pour simplifier le problème, nous réalisons des simulations en équilibre radiatif-convectif sur un océan à température de surface uniforme. Les résolutions horizontales varient entre 200 m et 4 km.

5.2.1 Compréhension des processus contrôlant la composition isotopique de la vapeur d'eau

Le premier article présentant les simulations SAM avec isotopes a été publié dans JAMES (Risi et al 2020). Les résultats avaient déjà été présentés dans le précédent rapport. En bref, en réalisant des bilans d'eau et d'isotopes dans la couche limite, on trouve que le principal mécanisme asséchant l'air et appauvrissant la vapeur d'eau près de la surface des océans est le fait que les ascendances se concentrent préférentiellement dans des zones du domaine où l'air est plus humide et plus riche. Cet effet appauvrissant dépend des gradients verticaux de composition isotopique de la vapeur d'eau.

Pour comprendre ce qui contrôle ces gradients verticaux, nous avons complété notre ensemble de simulations comme prévu dans la demande précédente et l'avons comparé à des observations. Nous trouvons que les simulations sur-estiment les variations d'humidité et de composition isotopique de la vapeur d'eau en fonction de la précipitation, (figure 10a-b) probablement à cause de la négligence des effets d'advection horizontale et de l'organisation à méso-échelle des systèmes convectifs. Mais elles simulent correctement la co-variation de l'humidité et de la composition isotopique (figure 10c). Pour interpréter ces variations, nous avons développé un modèle analytique à 2 colonnes utilisant les sorties des simulations SAM comme paramètres d'entrée. Nous trouvons que les processus d'entraînement, d'évaporation de la pluie et de fonte de la neige sont essentiels, et aboutissons à un schéma conceptuel pour l'effet de la convection sur la composition isotopique de la vapeur d'eau (figure 11). Cette étude est en révision pour JAMES.

5.2.2 Distribution isotopique lors de cyclones tropicaux et de lignes de grain

Les études mentionnées ci-dessous ne s'appliquent qu'aux cas de convection désorganisée, avec des nuages d'orage isolés qui naissent aléatoirement dans le domaine et se dissipent en quelques heures. En réalité, la convection peut aussi s'organiser. Les cyclones tropicaux et les lignes de grain sont des exemples de convection organisée. Pour comprendre comment l'organisation de la convection impacte la composition isotopique de l'eau, nous avons réalisés comme prévu dans la demande précédente avec des simulations de cyclones (en ajoutant de la rotation, [Khairoutdinov and Emanuel, 2013]) et de lignes de grain (en ajoutant un cisaillement de vent, [Robe and Emanuel, 2001]). Des simulations avec ou sans ascendance de grande échelle sont comparées pour chaque type d'organisation, pour comparer des régimes de précipitation différents (figure 12).

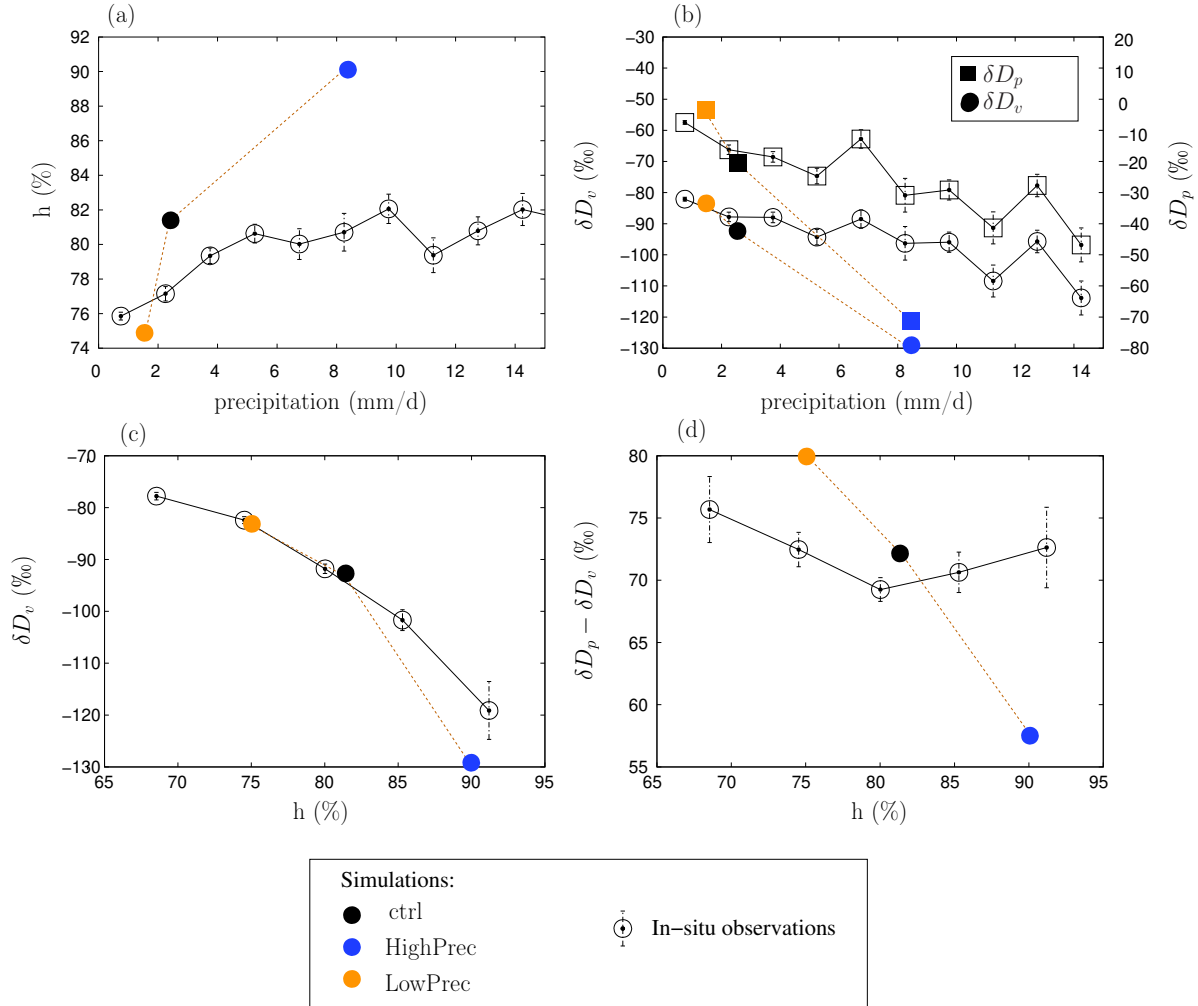


Figure 10: (a) Humidité relative près de la surface en moyenne sur le domaine, h , en fonction du taux de précipitation en moyenne sur le domaine, pour les simulations SAM-iso (symboles pleins) et les observations (symboles avec barres d'erreurs). (b) Même chose pour le δD de la vapeur d'eau près de la surface (δD_v , cercles) et de la précipitation (δD_p carrés) en fonction du taux de précipitation moyen. (c) Même chose pour le δD_v en fonction de h . (d) Même chose pour la différence $\delta D_p - \delta D_v$ en fonction de h . Pour les observations, le domaine est de $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, la précipitation est de TRMM et les données de surface sont de [Kurita, 2013]. Figure issue de l'article en révision Risi et al.

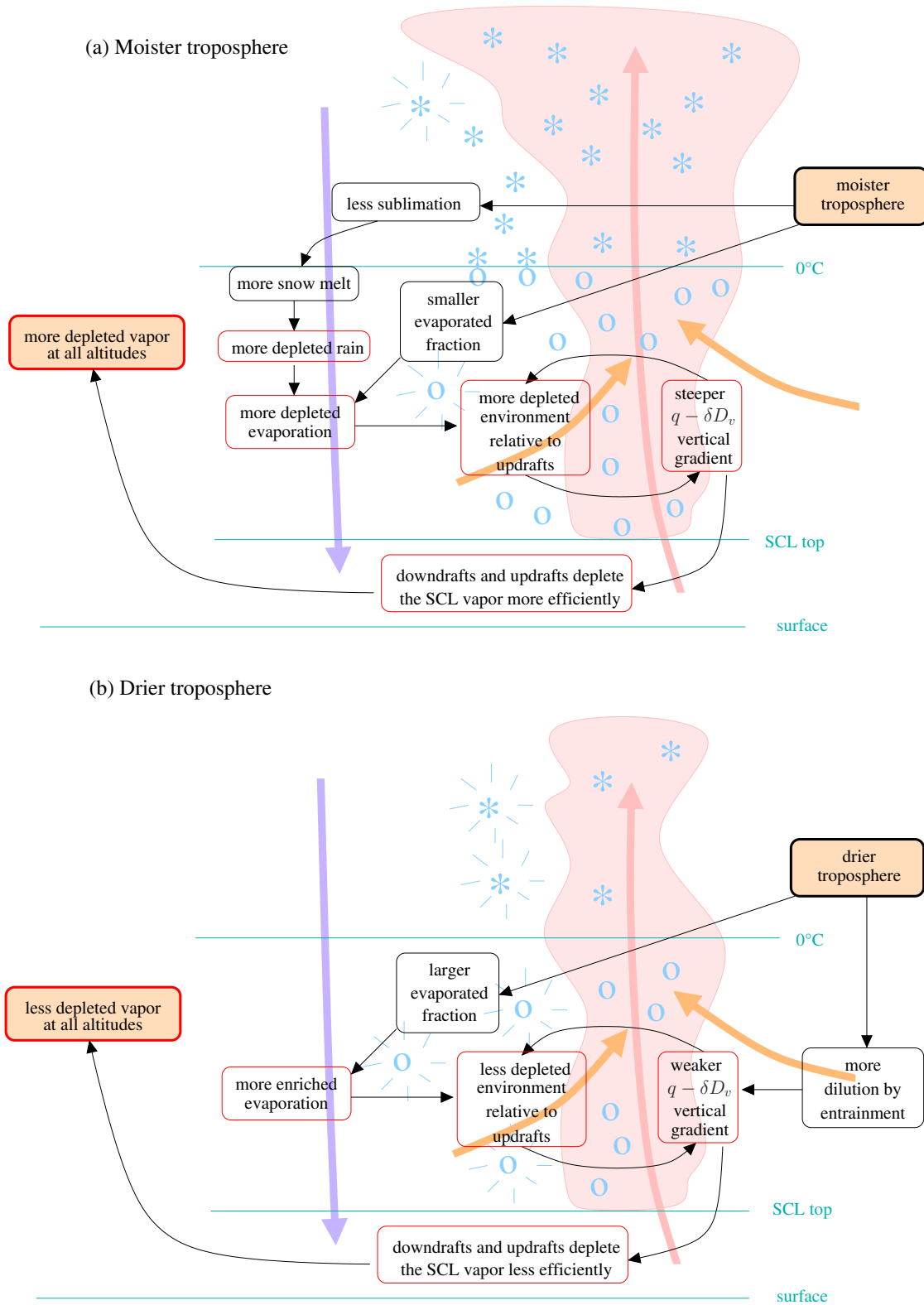


Figure 11: Schéma résumant comment une troposphère plus humide conduit à une vapeur d'eau plus appauvrie dans la troposphère (a), et comment une troposphère plus sèche conduit à une vapeur d'eau plus enrichie (b). Figure issue de l'article en révision Risi et al

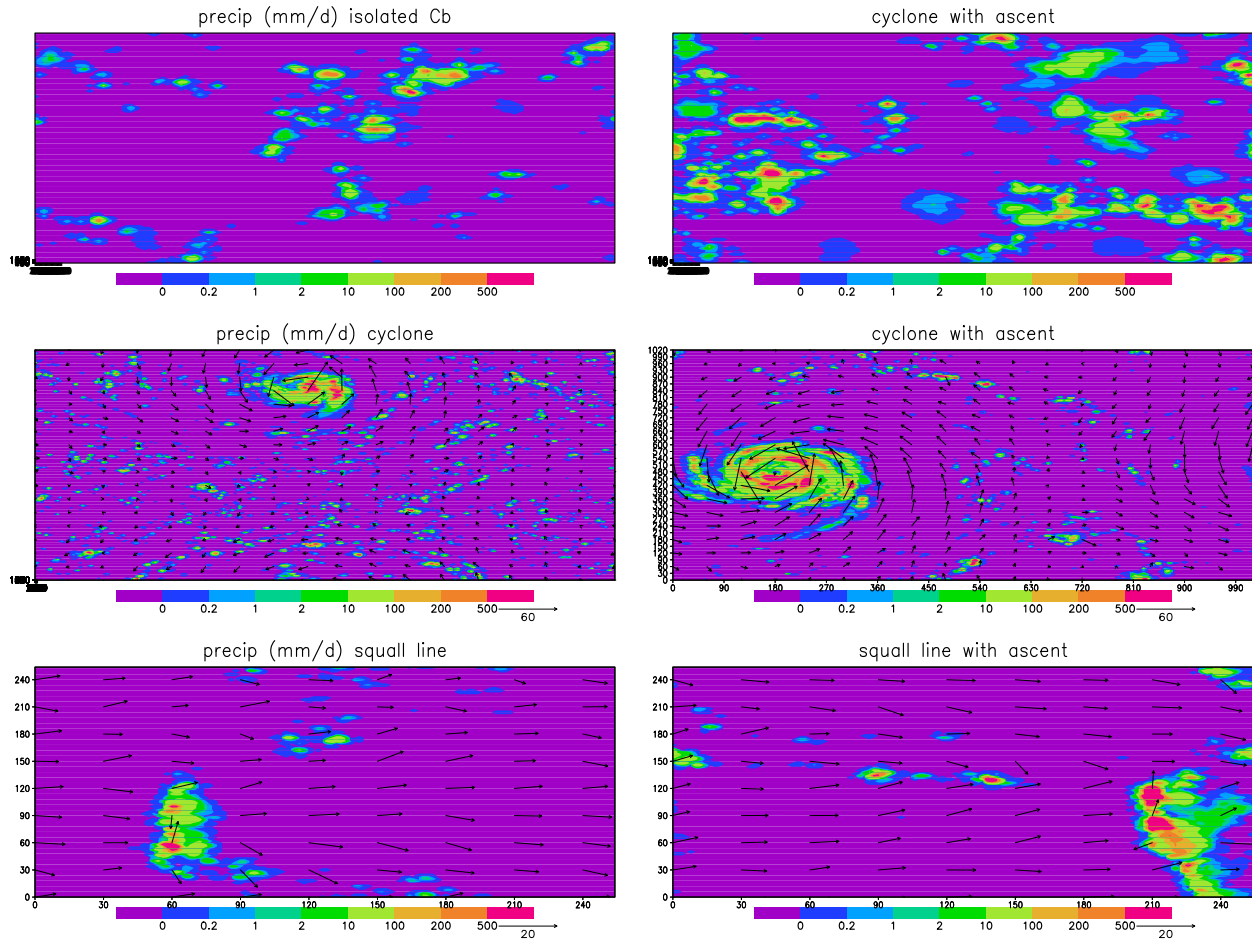


FIGURE 12 – Snapshots de 6 simulations avec SAM-iso montrant le champ de précipitation en surface : Cumulonimbus isolés sans (a) et avec (b) ascendance de grande échelle, cyclones tropicaux sans (c) et avec (d) ascendance de grande échelle, et lignes de grains sans (e) et avec (f) ascendance de grande échelle. L’ascendance de grande échelle est prescrite avec un minimum de -60 hPa/d à 500 hPa. Les couleurs indiquent le taux de précipitation en surface et les flèches indiquent le vent en surface.

Nous trouvons que les cyclones sont plus gros, plus intense et ont un œil mieux formé dans les cas d’ascendance de grande échelle. Les lignes de grain ont aussi des zones stratiformes mieux formées, même si elles restent anormalement petites. Tandis que les simulations de convection désorganisée montraient des composition isotopique de la vapeur d’eau relativement uniformes horizontalement, les simulations de cyclones tropicaux et de lignes de grain montrent de fortes variations isotopiques à méso-échelles. Celles-ci sont cohérentes avec celles observées dans des études observationnelles précédentes, et nous montrons qu’elles sont principalement causées par l’évaporation de la pluie.

Cette étude fait l’objet d’un article en préparation.

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.

1. J. A. Anstey , I. R. Simpson, J.W. Richter, H. Naoe, M. Taguchi, F. Serva, L.J. Gray, N. Butchart, K. Hamilton, S. Osprey, O. Bellprat, P. Braesicke, A.C. Bushell, C. Cagnazzo, C.-C. Chen, H.-Y. Chun, R.R. Gracia, L. Holt, Y. Kawatani, T. Kerzenmacher, Y.-H. Kim, F. Lott, C. McLandress, J. Scinocca, T.N. Stockdale, S. Versick, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (2020) : Teleconnections of the quasi-biennial oscillation in a multi-model ensemble of QBO-resolving models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, In press.
2. B. Ayarzagüena, A. J. Charlton-Perez, A. H. Butler, P. Hitchcock, I. R. Simpson, L. M. Polvani, N. Butchart, E. P. Gerber, L. Gray, B. Hassler, P. Lin, F. Lott, E. Manzini, R. Mizuta, C. Orbe, S. Osprey, D. Saint-Martin, M. Sigmond, M.Taguchi, E. M. Volodin, S. Watanabe (2020) : Uncertainty in the response of sudden stratospheric warmings and stratosphere- troposphere coupling to quadrupled CO2 concentrations in CMIP6 models, *J. Geophys. Res. : Atmos.*, 125, e2019JD032345. <https://doi.org/10.1029/2019JD032345>
3. Botsyun S., Sepulchre P., Donnadiou Y., Risi C., Licht, A and Caves, J. (2019) Revisited Palealtimetry Data Show Low Tibetan Plateau Elevation during the Eocene. *Science*.
4. 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, A. K. Smith, T. N. Stockdale, S. Versick, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (2020), Evaluation of the Quasi-Biennial Oscillation in global climate models for the SPARC QBO-initiative, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2020 ;1–31. <https://doi.org/10.1002/qj.3765>.
5. Ducharne A, Arboledo-Obando P, Cheruy F (2020a). Effets de l'humectation des sols par les nappes sur la trajectoire du changement climatique dans le bassin de la Seine et en Europe. Rapport du programme PIREN-Seine Phase 8, 17 pp. https://www.piren-seine.fr/sites/default/files/PIREN_et-al_ReprEVAP_PIREN_2020_VF.pdf
6. Ducharne A, Cheruy F, Decharme B, Colin J, Jost A. (2020b). Impact of Groundwater in Earth-System Models. Compte rendu final à l'ANR, 79 pp.
7. G. Gastineau, G., F. Lott , J. Mignot, and F. Hourdin (2020) : Alleviation of an Arctic Sea Ice Bias in a Coupled Model through Modifications in the Subgrid-scale Orographic Parameterization, *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, 12, e2020MS002111. <https://doi.org/10.1029/2020MS002111>.
8. L. A. Holt, F. Lott, R. R. Garcia, G. N. Kiladis, J. A. Anstey, P. Braesicke, A. C. Bushell, N. Butchart, C. Cagnazzo, C.-C. Chen, H.-Y. Chun, Y. Kawatani, T. Kerzenmacher, Y.-H. Kim, C. McLandress, H. Nao, S. Osprey, J. H. Richter, A. A. Scaife, J. Scinocca, F. Serva, S. Versick, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (2020) : An evaluation of tropical waves and wave forcing of the QBO in the QBOi models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi :10.1002/qj.3827.
9. Lott, F., Deremble, B., & Soufflet, C. (2020). Mountain Waves Produced by a Stratified Boundary Layer Flow. Part I : Hydrostatic Case. *J. Atmos. Sci.*, 77(5), 1683-1697.
10. Popp, M., N. J. Lutsko and S. Bony (2020a) : Weaker links between zonal convective clustering and ITCZ width in climate models than in observations, *Geophys. Res. Lett.*, 14, e2020GL090479
11. Popp, M., N. J. Lutsko and S. Bony (2020b) : The Relationship Between Convective Clustering and Mean Tropical Climate in Aquaplanet Simulations, *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, 12, e2020MS002070

12. Riboldi, J., Lott, F., d'Andrea, F., & Rivière, G. (2020). On the Linkage Between Rossby Wave Phase Speed, Atmospheric Blocking, and Arctic Amplification. *Geophys. Res. Lett.*, 47(19), e2020GL087796.
13. B. Ribstein , C. Millet , F. Lott, and A. de la Camara (**soumis**) : Can we improve gravity wave parameterizations by imposing sources at all altitudes in the atmosphere? *J. Adv. Modeling Earth Syst.*
14. Richter, J.H, N. Butchart, Y. Kawatani, A. C. Bushell, L. Holt, F. Serva, J. Anstey, 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. McLandress, H. Naoe, J. Scinocca, T. N. Stockdale, S. Versick, S. Watanabe, K. Yoshida, S. Yukimoto (2020) : Response of the quasi-biennial oscillation to a warming climate in global climate models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2020 ; 1–29. : <https://doi.org/10.1002/qj.3749>.
15. Risi, C, Muller, C, Blossey, P. (2020). Controls on the water vapor isotopic composition near the surface of tropical oceans: results from large-eddy simulations, *J. Adv. Modeling Earth Syst.* 2(8), e2020MS002106.
16. Risi, C, Muller, C, Blossey, P. (**in revision**). Rain evaporation, snow melt and entrainment at the heart of water vapor isotopic variations in the tropical troposphere, according to large-eddy simulations and a two-column model. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*
17. Shi, X, Risi, C, Pu, T, Lacour, J.-L., Kong, Y, Wang,K, He, Y, Xia, D. (2020). Variability of isotope composition of precipitation in the Southeastern Tibetan Plateau from the synoptic to seasonal time scale, *J. Geophys. Res.* 125(6), e2019JD031751
18. A.K. Smith, L.A. Holt , R.R. Garcia, J.A. Anstey, F. Serva, N. Butchart, S. Osprey, A.C. Bushell, Y. Kawatani , Y-H Kim, F. Lott, P. Braesicke, C. Cagnazzo, C-C Chen, H-Y Chun, L. Gray , T Kerzenmacher, H Naoe, J Richter, S Versick , V Schenzinger, S Watanabe 8 , K Yoshida, 2019: The equatorial stratospheric semiannual oscillation and time-mean winds in QBOi models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, .2020;1–17. <https://doi.org/10.1002/qj.3690>.
19. Stockdale T.N, Y-H Kim, J. A. Anstey, F. Palmeiro, N. Butchart, A.A. Scaife, M. Andrews, A.C. Bushell, Mikhail Dobrynin, J. Garcia-Serrano, K. Hamilton, Y. Kawatani, F. Lott, C. McLandress, H. Naoe, S. Osprey, H. Pohlmann, J. Scinocca, S. Watanabe, K. Yoshida and S. Yukimoto (2020) : Prediction of the quasi-biennial oscillation with a multi-model ensemble of QBO-resolving models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, <https://doi.org/10.1002/qj.3919>.
20. Tafasca S (2020). Evaluation de l'impact des propriétés du sol sur l'hydrologie simulée dans le modèle ORCHIDEE. *Thèse de Sorbonne Université*, 175 pp. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03110807/document>
21. Tafasca S, Ducharne A, Valentin C (2020). Weak sensitivity of the terrestrial water budget to global soil texture maps in the ORCHIDEE land surface model. *HESS*, 24, 3753–3774, <https://doi.org/10.5194/hess-24-3753-2020>
22. Tafasca S, Ducharne A, Valentin C (**soumis**). Accounting for soil structure in pedo-transfer functions : swelling vs non swelling clays. Soumis à *Geophys. Res. Lett.*.
23. Wing A. A. and Co-Authors (including S. Bony and M. Popp) (2020) : Clouds and Convective Self-Aggregation in a Multi-Model Ensemble of Radiative-Convective Equilibrium Simulation, *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, 12, e2020MS002138

Références

- [Bellenger et al., 2017] Bellenger, H., Drushka, K., Asher, W., Reverdin, G., Katsumata, M., and Watanabe, M. (2017). Extension of the prognostic model of sea surface temperature to rain-induced cool and fresh lenses. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 122(1) :484–507.
- [Bony et al., 2017] Bony, S., Stevens, B., Ament, F., Bigorre, S., Chazette, P., Crewell, S., Delanoë, J., Emanuel, K., Farrell, D., Flamant, C., Gross, S., Hirsch, L., Karstensen, J., Mayer, B., Nuijens, L., Ruppert Jr, J. H., Sandu, I., Pier Siebesma, S. S., Szczap, F., Totems, J., Vogel, R., Wendisch, M., and Wirth, M. (2017). Eurec4a : a field campaign to elucidate the couplings between clouds, convection and circulation. *Surveys in Geophysics*, 38 :1529–1568, <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9428-0>.
- [De Rosnay et al., 2003] De Rosnay, P., Polcher, J., Laval, K., and Sabre, M. (2003). Integrated parameterization of irrigation in the land surface model orchidee. validation over indian peninsula. *Geophysical Research Letters*, 30(19).
- [Ducharne, 2017] Ducharne (2017). The hydrol module of ORCHIDEE : scientifique documentation. Technical report, IPSL. Available on http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/attachment/wiki/Documentation/UserGuide/eqs_hydrol.pdf.
- [Ducharne et al., 2020a] Ducharne, A., Arboledo-Obando, P., and Cheruy, F. (2020a). Effets de l’humectation des sols par les nappes sur la trajectoire du changement climatique dans le bassin de la Seine et en Europe. Technical report, Rapport du programme PIREN-Seine Phase 8.
- [Ducharne et al., 2020b] Ducharne, A., Cheruy, F., Decharme, B., Colin, J., and Jost, A. (2020b). Impact of Groundwater in Earth-System Models. . Technical report, Compte rendu final à l’ANR. 79 pp.
- [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.
- [Guimberteau et al., 2012] Guimberteau, M., Laval, K., Perrier, A., and Polcher, J. (2012). Global effect of irrigation and its impact on the onset of the Indian summer monsoon. *Climate Dynamics*, 39(6) :1329–1348.
- [Guimberteau et al., 2018] Guimberteau, M., Zhu, D., Maignan, F., Huang, Y., Yue, C., 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) :121–163.
- [Khairoutdinov and Emanuel, 2013] Khairoutdinov, M. and Emanuel, K. (2013). Rotating radiative-convective equilibrium simulated by a cloud-resolving model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(4) :816–825.
- [Kurita, 2013] Kurita, N. (2013). Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean. *Journal of Geophysical Research*, 118(18) :10–376.
- [Martens et al., 2017] Martens, B., Miralles, D. G., Lievens, H., Schalie, R. v. d., De Jeu, R. A., Fernández-Prieto, D., Beck, H. E., Dorigo, W. A., and Verhoest, N. E. (2017). Gleaf v3 : Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 10(5) :1903–1925.
- [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>.

- [Robe and Emanuel, 2001] Robe, F. R. and Emanuel, K. A. (2001). The effect of vertical wind shear on radiative–convective equilibrium states. *Journal of the atmospheric sciences*, 58(11) :1427–1445.
- [Tafasca, 2020] Tafasca, S. (2020). *Evaluation de l’impact des propriétés du sol sur l’hydrologie simulée dans le modèle ORCHIDEE*. PhD thesis. Available on <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03110807/document>.
- [Tafasca et al., 2020] Tafasca, S., Ducharne, A., and Valentin, C. (2020). Weak sensitivity of the terrestrial water budget to global soil texture maps in the orchidee land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 :3753–3774.
- [Van den Hurk et al., 2016] Van den Hurk, B., Kim, H., Krinner, G., Seneviratne, S., Derksen, C., Oki, T., Douville, H., Colin, J., Ducharne, A., Cheruy, F., et al. (2016). LS3MIP (v1. 0) contribution to CMIP6 : the Land Surface, Snow and Soil moisture Model Intercomparison Project—aims, setup and expected outcome. *Geosci. Model Dev.*, 9 :2809–2832.
- [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.
- [Yin et al., 2020] Yin, Z., Wang, X., Ottlé, C., Zhou, F., Guimberteau, M., Polcher, J., Peng, S., Piao, S., Li, L., Bo, Y., et al. (2020). Improvement of the irrigation scheme in the orchidee land surface model and impacts of irrigation on regional water budgets over china. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(4) :e2019MS001770.
- [Zhang et al., 2018] Zhang, Y., Schaap, M. G., and Zha, Y. (2018). A high-resolution global map of soil hydraulic properties produced by a hierarchical parameterization of a physically based water retention model. *Water Resources Research*, 54(12) :9774–9790.