

Demande DARI 2020 – projet 0292

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

Description du projet de recherche

Camille Risi

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

L.M.D. - février 2021

Demande sur Jean-Zay à l'IDRIS :

- 1154 000 heures CPU,
- 29 Tera-octets.

Demande sur Irène au TGCC :

- 170 000 heures CPU sur Irène NKL,
- 90 000 heures CPU sur Irène-Rome,
- 6 Tera-octets

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Vue d'ensemble et lien avec les autres projets	2
1.2	Les modèles utilisés	2
2	Estimation des ressources consommées par les diverses configurations	4
2.1	LMDZ	4
2.2	ORCHIDEE	5
2.3	SAM-iso	5
2.4	Espace de stockage	5
3	Étude des processus atmosphériques ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ	6
3.1	Étude de l'effet de l'organisation spatiale de la convection hors équateur sur la zone de convergence intertropical	6
3.2	Stratosphère et «ondes gravité lentes»	6
3.3	Vers l'amélioration de la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans LMDZ	7
3.4	Climats polaires	9
3.4.1	Paramétrisations des nuages froids	9
3.4.2	Paramétrisation du manteau neigeux sur les calottes	10
4	Interactions océan-atmosphère	12
4.1	Océan de surface et flux de CO_2 (OSCO2)	12

5	Évaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE	12
5.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE	13
5.2	Amélioration de l'hydrologie continentale, impact sur le climat récent et futur	13
5.2.1	Rôle des nappes, des plaines d'inondations et de l'irrigation	13
5.2.2	Calibration du modèle ORCHIDEE en France	15
6	Isotopes de l'eau	16
6.1	Isotopes dans LMDZ6 et applications régionales	16
6.1.1	Maintenance des isotopes dans LMDZ6	16
6.1.2	Applications régionales	16
6.2	Isotopes dans des simulations résolvant explicitement la convection	17
6.2.1	Comment la composition isotopique varie-t-elle au sein des systèmes organisés?	17
6.2.2	Comment le type d'organisation affecte-t-il la composition isotopique de la vapeur d'eau à grande échelle?	20
7	Méthode	22
7.1	Le modèle LMDZ	22
7.2	Le modèle ORCHIDEE	22
7.3	Le modèle SAM-iso	23

1 Introduction

1.1 Vue d'ensemble et lien avec les autres projets

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, dont on détaille les demandes en temps de calcul et en espace de stockage dans le tableau 1.

Ce projet est très lié aux projets :

- **01 239** (rces), qui utilise LMDZ pour des études de climats régionaux.
- **genCMIP6**, consacré à la mise au point et le réglage de la prochaine version de LMDZ, LMDZ6.
- **gen10314**, consacré à l'étude de l'organisation de la convection avec le modèle haute-résolution SAM. C'est ce même modèle qui est utilisé dans notre projet pour l'étude de l'effet de la convection sur les isotopes de l'eau.

Cette année, une partie des activités liées aux rétroactions surfaces continentales-atmosphère et aux impacts régionaux du changement climatique, traditionnellement faites dans le cadre de ce projet, est migrée vers les projets genCMIP6 et rces.

1.2 Les modèles utilisés

Ce projet utilise et contribue à développer 2 modèles :

1. **LMDZ**, modèle de circulation général atmosphérique développé au LMD. Il constitue la composante atmosphérique du modèle couplé de l'IPSL et est un outil d'étude de l'atmosphère et du climat pour plusieurs équipes en France et à l'étranger.

thème	calcul CPU sur Jean- Zay (k heures CPU)	stockage sur Jean- Zay (To)	calcul CPU sur Irène KNL (k heures CPU)	calcul CPU sur Irène Rome (k heures CPU)	stockage sur Irène (To)
Total	1154	29	170	90	6
1) Étude des processus atmosphériques ; evaluation et amélioration du modèle LMDZ	157	25			
dont entretien					
dont organisation de la convection	15	1			
dont stratosphère et ondes de gravité lentes	45	15			
dont convection	49	3			
dont climats polaires	48	6			
2) Interactions océan-atmosphère				90	5
Océan de Surface et flux de CO_2				90	5
3) Étude des processus hydrologiques continentaux et de leur couplage avec l'atmosphère ; évaluation et amélioration du modèle LMDZ-ORCHIDEE	953	27			
dont suivi des versions	43	5			
dont hydrologie continentale	910	22			
4) Isotopes de l'eau	44	4	170		1
dont isotopes dans LMDZ6	44	4			
dont SAM-iso			170		1

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

2. **ORCHIDEE**, modèle de surface continentale développé à l'IPSL. Il constitue la composante continentale du modèle couplé de l'IPSL. Il est utilisé seul ou couplé à LMDZ pour la compréhension des processus hydrologiques continentaux et des couplages sol-atmosphère.

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. Ce modèle couplé est utilisé pour les simulations de changement climatique des programmes internationaux CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), dont l'analyse alimente les rapports d'évaluation du GIEC. Il est utilisé ici pour l'étude des interactions atmosphère-océan.
2. **SAM**, modèle haute résolution résolvant les mouvements dans les systèmes convectifs.

Les informations techniques associées à ces modèles sont détaillées en section 7.

2 Estimation des ressources consommées par les diverses configurations

2.1 LMDZ

L'essentiel du temps calcul de ce projet est consommé par des simulations avec le modèle atmosphérique LMDZ. Des optimisations récentes dans les paramétrisations physiques de LMDZ ont permis de faire baisser significativement les ressources consommées pour une configuration donnée par rapport aux années précédentes.

Deux versions de LMDZ sont utilisées dans ce projet :

- **LMDZ5A** est l'une des versions utilisées pour le projet d'intercomparaison CMIP5. Elle est proche de LMDZ4 ([Hourdin et al., 2006]), utilisé pour CMIP3.
- **LMDZ6** est la version qui est utilisée pour CMIP6. Elle inclue de nombreuses améliorations dans les paramétrisations de la convection et de nuages, ainsi qu'un nouveau réglage ([Hourdin et al., 2019]).

Les ressources consommées dépendent de la résolution horizontale et verticale de la simulation.

- La **résolution horizontale** est définie par la grille : par exemple, une grille 144x142 signifie qu'il y a 144 points en longitude (2.5° de résolution), 142 points en latitude (1.25° de résolution). Les résolutions standard sont VLR (very low resolution, 95x96), LR (low resolution, 144x142) ou MR (medium resolution, 280x280).
- La **résolution verticale** est définie par le nombre de points sur la verticale : typiquement, 39 pour LMDZ5A et 79 pour LMDZ6.

Les ressources consommées dépendent aussi de la configuration dans laquelle LMDZ est utilisé :

- Dans les simulations les plus courantes, LMDZ est **couplé à ORCHIDEE** (LMDZ-OR).
- Dans certaines études idéalisées, LMDZ est utilisé seul, en **aqua-planète** en équilibre radiatif-convectif. Le temps d'exécution est allégé.
- La grille peut être étirée afin de **zoomer** sur une région donnée. Les configurations zoomées sont généralement légèrement plus coûteuses.
- LMDZ peut être **guidé** par des réanalyses météorologiques afin de simuler la véritable évolution des conditions météorologiques sur une période donnée. Il faut alors ajouter 10% de consommation.
- Enfin, LMDZ peut être utilisé couplé à la fois à ORCHIDEE et à NEMO, dans le cadre du modèle couplé atmosphère-continent-océan **IPSL-CM6**. Le temps de calcul est alors double par rapport à LMDZ-OR.

Modèle	Grille horizontale	Grille verticale	Configuration	Thème où cette configuration est utilisé	Temps de calcul CPU par an
LMDZ5A	280x280 (MR)	39	aqua-planète	Organisation de la convection	500 h
LMDZ6	144x142 (LR)	79	couplé à ORCHIDEE	Stratosphère ; Pluies tropicales ; Climats polaires ; Hydrologie continentale	750 h
LMDZ6	95x96 (VLR)	39	couplé à ORCHIDEE	Climats polaires	450 h
LMDZ6	144x142 (LR)	79	couplé à ORCHIDEE, zoom sur la France + guidage	Hydrologie continentale	900 h
IPSL-CM6	R144x142 (LR)	79	modèle couplé complet	Intéractions océan-atmosphère	1 500 h (sur Irène)

TABLE 2 – Temps de calcul, en heures CPU par an, que prennent les différentes versions de LMDZ pour différentes résolutions horizontales et verticales et différentes configurations prévues dans cette demande.

Le tableau 2 résume les ressources consommées pour différentes configurations utilisées dans ce projet.

2.2 ORCHIDEE

- Quand ORCHIDEE est utilisé offline, le temps de calcul pour environ 10 000 points continentaux, avec 2 nœuds de 32 cœurs, est d'environ 10h/an.

2.3 SAM-iso

Nous réalisons des simulations en équilibre radiatif-convectif sur océan. Nous avons constaté que 50 jours de simulations suffisent pour atteindre cet équilibre et avoir suffisamment d'instantants à analyser. Pour une simulation typique sur un domaine de 128x128x96 points de grille, avec 128 processeur, la simulation prend environ 10 000 heures CPU et 2 Go de stockage sur Irène KNL.

Nous avons constaté qu'au premier ordre, quand on double le nombre de points dans une dimension horizontale, on double le temps de calcul.

2.4 Espace de stockage

L'espace de stockage nécessaire dépend de la fréquence et de la quantité des sorties que chacun souhaite. C'est donc très variable d'une étude à l'autre.

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

3.1 Étude de l'effet de l'organisation spatiale de la convection hors équateur sur la zone de convergence intertropicale

Max Popp et Sandrine Bony

Dans nos travaux précédents, nous avons démontré que l'organisation zonale le 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, Popp et al., 2020b]). Des liens statistiques robustes entre l'organisation zonale suivant l'équateur de la convection profonde et plusieurs aspects de la ITCZ existent également dans les observations ([Popp and Bony, 2019]) et dans les simulations multi-modél en configurations réalistes AMIP ([Popp et al., 2020a]), ce qui confirme les résultats des simulations en configuration idéalisées. 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 boréal. Nous voulons donc étudier l'impact de l'organisation spatiale de la convection profonde sur la ITCZ 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 (voir rapport). 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 la période de décomptage actuelle. Cependant il est fortement possible que des simulations de sensibilité seront nécessaires et nous demandons donc 10 simulations de 3 ans chacune avec le modèle LMDZ5A-MR en plus.

*⇒ Demande : 10 simulations × 3 an × 500 h = 15 000 h sur Jean-Zay
Stockage : 1 To sur Jean-Zay*

3.2 Stratosphère et «ondes gravité lentes»

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

En 2020, nous comptons aborder le problème des erreurs sur la QBO dans les basses couches de la stratosphère équatoriale soulignée dans le rapport. Nous pensons que ces erreurs sont dues au fait que trop peu d’ondes «lentes» interagissent avec l’écoulement moyen dans ces régions. En terme d’ondes de gravité, il faut adapter le formalisme que nous avons développé pour les ondes issues des fronts (Ribstein et al. 2020) aux ondes issues de la convection. En particulier la mise en pratique de cette idée que les ondes de gravité sont issues d’une multitude de couche dans l’atmosphère doit nous permettre de rendre plus actif la partie lente du spectre (voir Figure 1). La difficulté est d’adapter ce formalisme aux ondes issues de la convection, et de veiller à ce que la paramétrisation mise à jour ne dégrade pas le modèle.

⇒ Pour le développement de la paramétrisation des ondes lentes issues de la convection et l’analyse de leur impact sur la QBO dans LMDZ, nous demandons 50 ans de simulation avec LMDZ6 à la résolution 144x142x79.

Les questions des interactions entre la QBO et les moyennes latitudes, et/ou de la QBO et de la troposphère vont rester au centre de nos préoccupations. On sait en particulier que dans les observations la QBO module en partie la propagation de l’impact de l’ENSO vers les moyennes latitude, mais aussi que l’ENSO a un impact sur la QBO, par exemple en modulant l’amplitude des ondes (de petites et grandes échelles) issues de la convection. Ces thèmes seront abordés toujours dans le cadre du consortium QBOi, et via des simulations avec la phase de l’ENSO imposée. Il nous faudra fournir, avec LMDz, 2 simulations de 50ans, (Nino versus Nina), qui alimenteront la base de données QBOi et continuerons d’inscrire LMDz et l’IPSL dans ce consortium international.

⇒ Nous demandons donc 2×50 ans de simulation avec LMDZ6 à la résolution 144x142x79.

⇒ *Demande :*

150 ans × 750 h = 45 000 h sur Jean-Zay

Stockage : 15 To

3.3 Vers l’amélioration de la distribution et la variabilité des précipitations tropicales dans LMDZ

Catherine Rio, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix, Florent Brient

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.

L’effet des derniers développements de paramétrisation sur la représentation de la distribution et de la variabilité des pluies tropicales sera exploré en réalisant un ensemble de tests de sensibilité avec le modèle LMDZ en mode global :

1. introduction d’une densité pronostique pour les poches froides,
2. modification de la largeur de la distribution de l’eau dans le schéma de condensation grande-échelle
3. modification de l’évaporation de la pluie dans et sous les nuages.

La représentation des nuages hauts associés à la convection profonde sera également évaluée dans ce cadre.

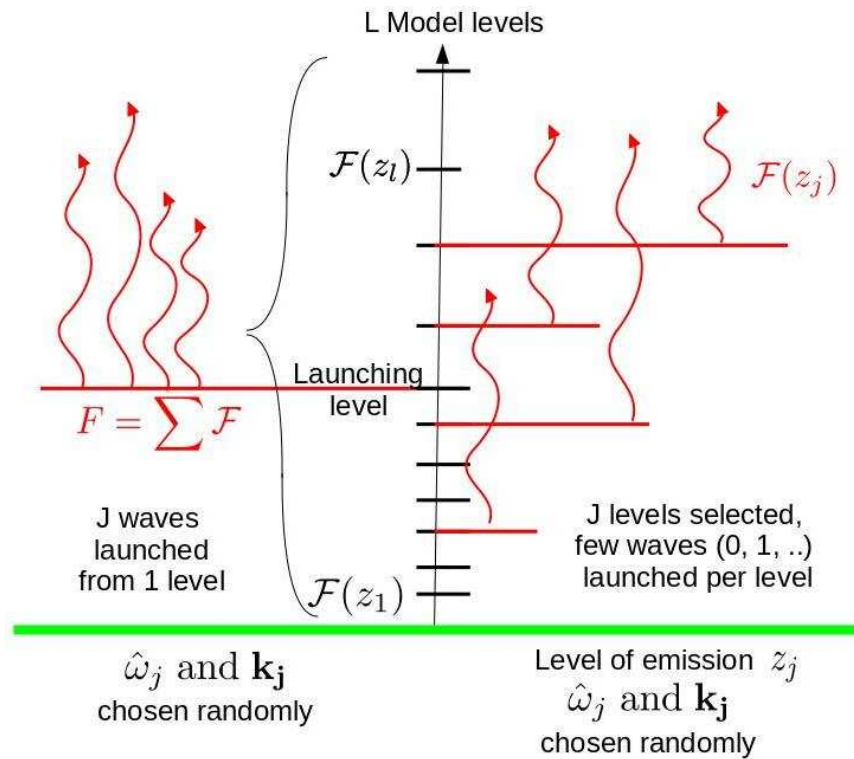


FIGURE 1 – Dans la paramétrisation actuelle des ondes issues des fronts, toutes les ondes ont leurs propriétés choisies stochastiquement (partie gauche du schéma), mais elles sont « lancées » depuis un niveau unique, localisé autour de la tropopause. Nous sommes en train d’adapter cela pour lancer des ondes depuis une multitude de niveaux (partie droite du schéma). Nous proposons de faire la même chose pour les ondes issues de la convection.

Pour les points (2) et (3), nous envisageons de réaliser une quinzaine de tests de sensibilité aux processus physiques, sur des périodes de 3 ans, avec LMDZ6 en 144x142x79.

Pour le point (1), qui est plus exploratoire, nous comptons travailler plutôt par simulations d’une année pour tester diverses hypothèses concernant la capacité des poches froides à régénérer la convection ; une vingtaine de simulations devrait convenir.

Pour cela, nous envisageons de réaliser une quinzaine de tests de sensibilité aux processus physiques, sur des périodes de 3 ans, avec LMDZ6 en 144x142x79.

*⇒ Demande : 15 simulations × 3 ans × 750 h = 34 000 heures,
20 simulations d’un an = 15 000 heures.
Total : 49 000 heures.
Stockage : 3 To sur Jean-zay*

3.4 Climats polaires

E. Vignon, J.-B. Madeleine, C. Agosta, Hajar El Habchi El Fenniri (stage M2)

Les régions polaires connaissent un véritable bouleversement climatique, comme en témoignent le retrait accéléré de la banquise arctique ou les taux de fonte préoccupants dans certains secteurs du Groenland et de l’Antarctique. L’avenir du niveau marin à l’échelle du globe est suspendu à l’évolution du bilan de masse des deux grandes calottes.

En septembre 2022 commencera le projet ERC Synergy “AWACA” (Atmospheric WATER Cycle in Antarctica), co-piloté par deux chercheurs du LMD (Christophe Genthon et Thomas Dubos) et auquel nous participons activement. Ce projet vise à mieux comprendre les processus atmosphériques qui gouvernent le bilan de masse de surface de la calotte Antarctique et à mieux contraindre l’évolution passée et future de ce dernier en utilisant le modèle LMDZ. Dans la phase initiale du projet, nous souhaiterions travailler sur l’amélioration de deux paramétrisations clés du modèle.

3.4.1 Paramétrisations des nuages froids

Les nuages jouent un rôle majeur dans le cycle de l’eau aux hautes latitudes. Ils sont par ailleurs à l’origine de biais radiatifs dans les modèles de climat au dessus de l’Océan Arctique, de l’Antarctique et de l’Océan Austral et ont été identifiés comme une priorité de développement du modèle LMDZ pour les prochaines années ([Madeleine et al., 2020]). Les nuages polaires sont pour la plupart en phase glace ou en phase mixte (co-existence de gouttelettes liquide et de cristaux de glace). Leur structure et leurs propriétés dépendent d’interactions complexes entre turbulence, microphysique et rayonnement ce qui rend leur paramétrisation dans les modèles délicate.

Nous revisitons actuellement la paramétrisation des nuage dans LMDZ avec comme premiers objectifs une meilleure représentation des sursaturations par rapport à la glace (fréquentes en Antarctique et à haute altitude mais absentes dans la version actuelle du modèle, voir figure 2) et des nuages de phase mixte. Les développements seront principalement évalués dans des configurations légères 1D (unicolonne) ou 3D zoomées-guidées sur quelques semaines, mais des tests 3D en grille régulière et sur des périodes de plusieurs années seraient également nécessaires.

*⇒ Demande : 5 × 2 ans de simulations en R96x95x39 :
5 × 2 × 450h = 9 000 h ;
Stockage 2To*

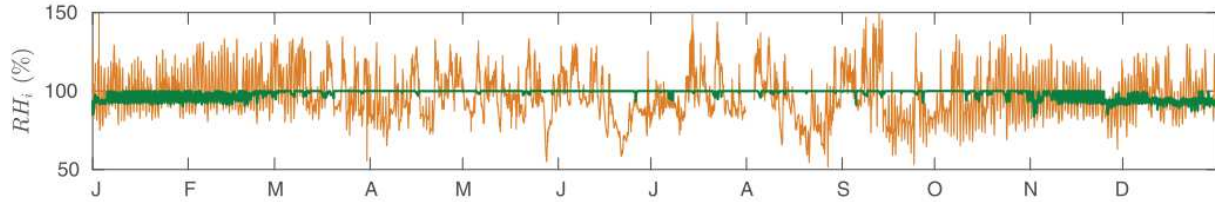


FIGURE 2 – Série temporelle de l’humidité relative par rapport à la glace (RH_i) à Dôme C (Plateau Antarctique) dans des observations in situ (orange) et une simulation LMDZ (vert) sur l’année 2015. On note l’incapacité de LMDZ à reproduire les variations de RH_i et en particulier les sursaturations (valeurs supérieures à 100%). Adaptée de Vignon et al. (2018).

3.4.2 Paramétrisation du manteau neigeux sur les calottes

Outre les nuages et les précipitations, le climat de l’Antarctique et le bilan de masse de surface de la calotte dépendent fortement du couplage entre l’atmosphère et le manteau neigeux. Alors que des travaux sur les processus de couche limite ont conduit à des améliorations des performances de LMDZ aux hautes latitudes sud, la représentation du manteau neigeux au-dessus des surfaces englacées restent très rudimentaire dans le modèle ([Vignon et al., 2018]). Certains processus critiques pour la représentation du bilan d’énergie de surface (comme la dépendance de l’albédo à l’angle zénithal, l’évolution de la densité avec la profondeur et le temps, le métamorphisme de la neige ...) et du bilan de masse (regel de l’eau de fonte et impacts sur l’albédo, percolation ...) y sont même absents. Pour pallier ces manques, une initiative récente propose de coupler LMDZ au module de neige de SISVAT, composante “surface” du Modèle Atmosphérique Régional ([Agosta et al., 2019, Amory et al., 2020]) réputé pour ses très bonnes performances dans les régions polaires. Ce couplage s’appuie sur des travaux déjà initiés il y a plusieurs années ([Punge et al., 2012]) et des résultats prometteurs ont été obtenus en configuration 1D (voir figure 3).

L’évaluation de ce nouveau couplage dans des simulations avec le modèle 3D que nous souhaiterions effectuer prochainement est au cœur du stage de master 2 d’Hajar El Habchi El Fenniri commençant fin février 2021. Hajar procèdera à l’évaluation de simulations LMDZ-SISVAT (zoomées-guidées sur quelques mois dans un premier temps, puis en grille régulière $95 \times 96 \times 39$ et $144 \times 142 \times 79$ sur plusieurs années dans un second temps) avec des observations de rayonnement, d’albédo, de densité de neige et de température dans le névé au Dôme C sur le plateau antarctique (en collaboration avec des chercheurs de l’Institut des Géosciences de l’Environnement à Grenoble).

=> *Demande :*

Pour l’initialisation (phase de “spin-up”) du manteau neigeux :

- 2 simulations $R_{144 \times 142 \times 79}$ sur 10 ans : $2 \times 10 \times 750h = 15\ 000h$
- 2 simulations $R_{96 \times 95 \times 39}$ sur 10 ans : $2 \times 10 \times 450h = 9\ 000h$

Tests de sensibilité (10×2 ans en $R_{96 \times 95 \times 39}$ et 4×2 ans en $144 \times 142 \times 79$) : $10 \times 2 \times 450h + 4 \times 2 \times 750h = 15\ 000h$

Total : 39 000 h. Stockage 4To

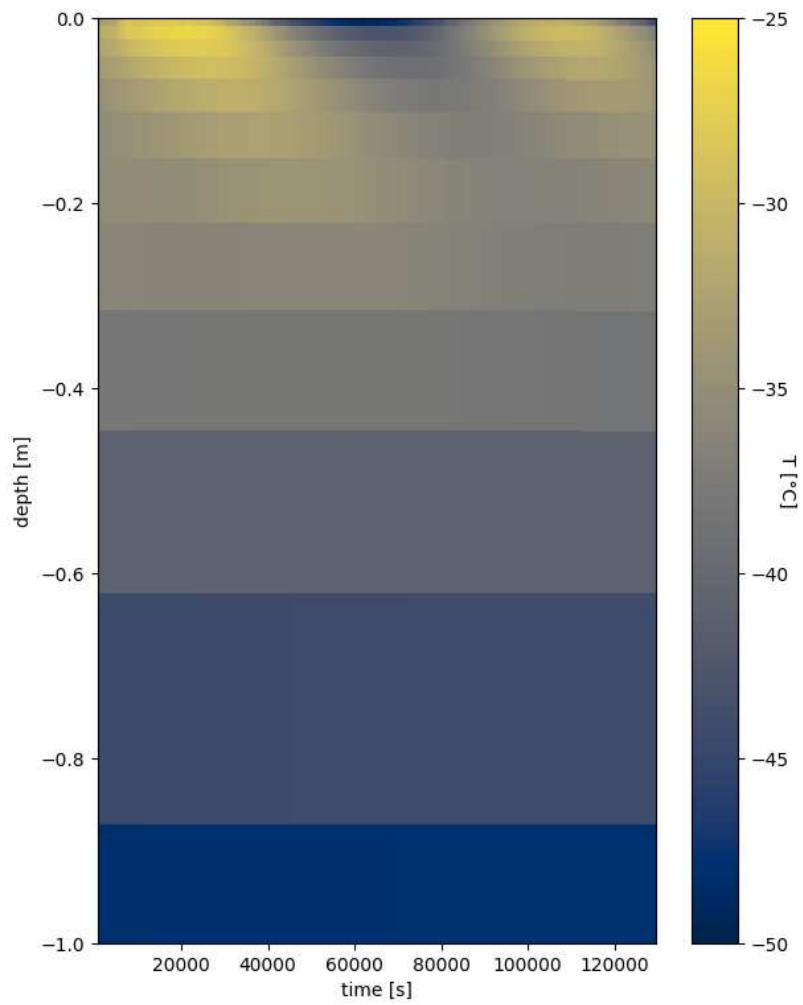


FIGURE 3 – Pénétration de l'onde thermique dans le manteau neigeux pendant un cycle diurne estival au Dôme C, plateau Antarctique, dans une simulation 1D avec LMDZ-SISVAT.

4 Interactions océan-atmosphère

4.1 Océan de surface et flux de CO_2 (OSCO2)

H. Bellenger, L. Bopp, C. Ethé, S. Flavoni, D. Ho (U. Hawaii), X. Perrot, J. P. Duvel, L. Guez, Laetitia Parc (M2 WAPE/MOCIS 2021)

Le projet OSCO2 vise à une meilleure compréhension des processus contrôlant les échanges de CO_2 à l'interface océan-atmosphère pour améliorer leur représentation dans les modèles de climat. L'océan est un puits majeur de carbone anthropique, il absorbe environ 25% du CO_2 émis par les activités humaines. Cependant, les mesures de ces échanges air-mer sont rares et localisées alors que les processus à l'œuvre sont caractérisés par une grande variabilité depuis les échelles les plus fines (celles de la turbulence, de la diffusion) aux plus grandes comme celles, globales, des modes de la variabilité climatique (par exemple El Niño). C'est le cas, en particulier, de la pluie.

La pluie peut augmenter le taux d'échange de CO_2 en créant de la turbulence à l'interface océanique. Elle absorbe également le CO_2 atmosphérique lors de sa chute et l'injecte directement dans l'océan. Enfin, elle modifie la solubilité du CO_2 à l'interface par dilution (diminution de la salinité, de l'alcalinité et du carbone inorganique dissous) et par refroidissement de celle-ci. La résultante globale de ces effets sur le puits de carbone océanique est, à ce jour, très incertaine et débattue.

Ce projet s'appuiera sur l'utilisation du modèle de climat de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), au développement duquel participe le LMD. Ce modèle est en particulier capable de représenter les cycles biogéochimiques (dont celui du carbone) couplés à la physique du système climatique. L'implémentation récente de la paramétrisation de l'océan de surface proposée par [Bellenger et al., 2017] permet pour la première fois d'étudier les questions scientifiques précitées au moyen de la modélisation numérique globale.

Nous compléterons la prise en compte des effets de la pluie sur les flux océan-atmosphère de CO_2 dans le modèle de l'IPSL et quantifierons leurs impacts moyen et sur la variabilité interannuel du puits de carbone océanique au moyen de simulations de 30 ans sur le modèle avec la nouvelle implémentation de la skin et les effets de la pluie sur le coefficient de transfert et le dépôt direct de carbone dans l'océan. L'analyse de ces simulations se fera dans le cadre d'un stage de recherche de Master 2.

*⇒ Demande : 2 simulations \times 30 ans \times 1 500 h = 90 000 h sur Irène-Rome
Stockage : 5 To sur Irène*

5 Évaluation, amélioration et utilisation du modèle LMDZ-ORCHIDEE

Le modèle ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est aussi un outil adapté pour comprendre et prévoir l'évolution des ressources en eau, de la biomasse continentale, et des flux d'eau et de chaleur entre les continents et l'atmosphère, en conditions historiques ou futures. Cette action porte sur l'effet couplé des nappes souterraines, des plaines d'inondation et de l'irrigation d'autre part, et vise aussi à calibrer le modèle ORCHIDEE en France en vue d'études d'impact du changement climatique.

5.1 Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE

Josefine Ghattas, Vladislav Bastrikov

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

– Simulations forcées :

5 000 heures CPU et 4 To sur Jean-Zay

– Simulations couplées LMDZ6-OR :

40 ans \times 750h + 5 000 heures pour le débogage = 38 000h sur Jean-Zay, 1 To sur Jean-Zay

\implies *Demande : 43 000 heures CPU sur Ada, 5 To sur Jean-Zay*

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

Agnès Ducharne, Frédérique Cheruy, Josefine Ghattas, Lucia Rinchuso (post-doc), Pedro Arboleda (doctorant)

5.2.1 Rôle des nappes, des plaines d'inondations et de l'irrigation

L'objectif est d'explorer l'effet sur le climat (passé et futur) de trois facteurs de contrôle importants des rétroactions surface-atmosphère, à savoir les nappes souterraines (qui alimentent de nombreuses zones humides), les plaines d'inondation et l'irrigation. Ces trois facteurs, tous liés à l'eau, sont susceptibles d'augmenter l'humidité des sols, donc l'évaporation, ce qui rafraîchit l'atmosphère et favorise les précipitations (localement ou sous le vent). On peut ainsi supposer qu'ils constituent une sorte de "climatiseur" du climat, notamment l'été, en atténuant certains événements extrêmes (sécheresses et vagues de chaleurs), comme illustré en Figure 4 à partir de simulations couplées avec le modèle LMDZ6-OR sur la période 1980-2100 ([Ducharne et al., 2020a]).

Nous nous focaliserons cette année sur les influences croisées de deux facteurs seulement, eaux souterraines et irrigation, dans le cadre de la thèse de Pedro Arboleda et de deux projets de recherche (l'un financé par le programme PIREN-Seine, et l'autre soumis en septembre 2020 au Belmont Forum). En effet, un des impacts important du réchauffement climatique est d'intensifier les sécheresses ([Padrón et al., 2020]), ce qui devrait conduire à augmenter le recours à l'irrigation ([Hurtt et al., 2020]), qui est alimentée à l'heure actuelle à 38% par les eaux souterraines ([Siebert et al., 2010]). Une question importante est donc de savoir si ces ressources en eau resteront suffisantes pour abonder cette demande accrue pour l'irrigation, voire même quand les ressources en eau (des nappes et des cours d'eau) deviendront insuffisantes pour alimenter irrigation et zones humides, avec des effets potentiels sur le climat (réchauffement local accru), la production agricole, et les écosystèmes naturels.

En période A10, nous voulons réaliser six simulations transitoires du changement climatique avec le modèle LMDZ6-OR (dans la version utilisée pour CMIP6, en résolution 144x142x79, cf. [Cheruy et al., 2020]), en croisant :

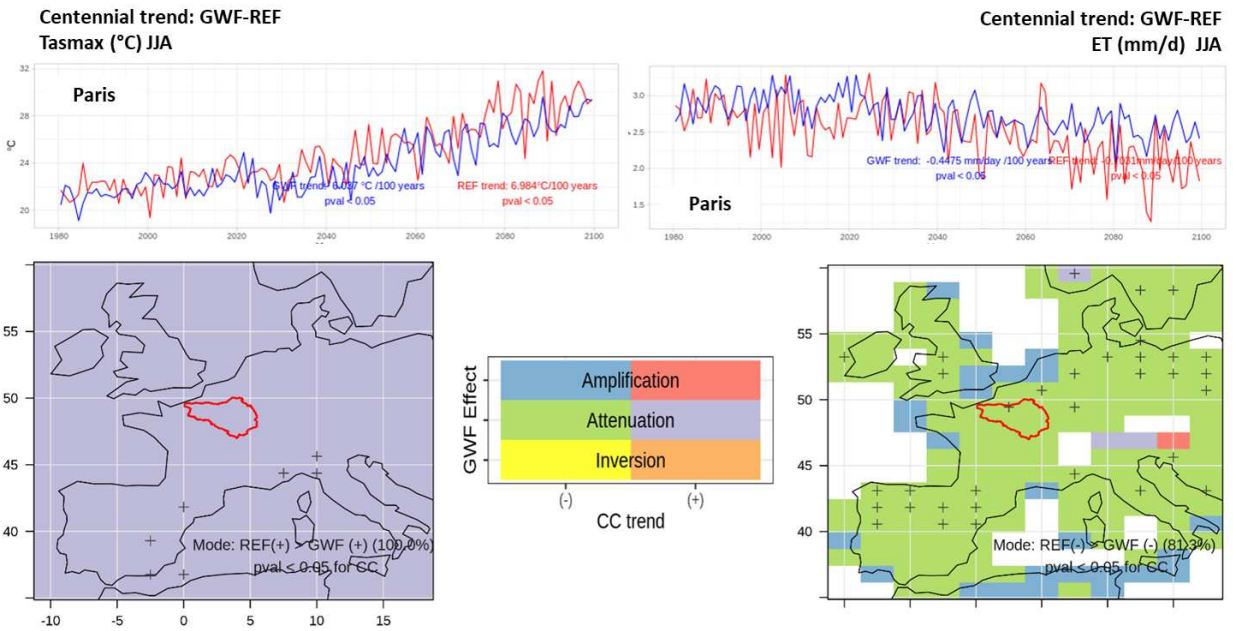


FIGURE 4 – Modification des tendances associées au changement climatique sur 1980-2100 par l’humectation des sols par les nappes, pour les moyennes estivales : des maxima journaliers de température atmosphérique (à gauche), et d’évapotranspiration (à droite). Les courbes du haut montrent l’évolution des moyennes estivales à Paris, dans une simulation sans humectation par les nappes (en rouge) vs. avec (en bleu). Dans les deux cas, l’humectation par les nappes (en bleu) atténue le changement climatique (moins d’augmentation pour la température maximale, et moins de baisse pour l’évapotranspiration). Les cartes du bas généralisent ce type d’analyse à toute l’Europe de l’Ouest. Le code couleur indique d’une part si l’effet du changement climatique est une augmentation/diminution de la variable (axe des x) dans la simulation sans nappes, et d’autre part si cet effet est amplifié (tendance plus forte), atténué (tendance plus faible), ou inversé (changement de signe de la tendance) dans la simulation avec humectation (axe des y). Les croix montrent les points où la modulation de tendance est significative à 5%. Adapté d’après [Ducharne et al., 2020a].

Simulations LMDZ6-OR 144x143x79 sous forçage radiatif SSP5-8.5	Grille régulière	Zoom en France + guidage
Période simulée	1901-2100	1951-2100
Durée	200 ans	150 ans
Consommation par an	750 h	900 h
Consommation pour une simulation	150 000 h	135 000 h
Consommation pour trois simulations REF, GW-noIRR, GW-IRR	5400 000 h	405 000 h
Stockage pour 3 simulations	12 To	9 To

TABLE 3 – Résumé des six simulations LMDZOR prévues en période A10 pour les projets PIREN-Seine et Belmont Forum.

- trois versions de l’hydrologie continentale : une version de référence sans nappes et sans irrigation (REF), comme dans [Cheruy et al., 2020]; une version avec seulement les nappes (GW-noIRR) selon [Ducharne et al., 2020b, Ducharne et al., 2020a]; et une version avec nappes et irrigation (GW-IRR), cette dernière selon [Yin et al., 2020], cf. rapport d’activité A8;
- deux configurations du modèle LMDZOR, toutes les deux sous scénario de forçage radiatif pessimiste pour le futur jusqu’en 2100 (SSP5-8.5, [O’Neill et al., 2016]) : (1) une configuration «classique» à résolution 144x142x79 sur 1901-2100 (200 ans), et (2) une configuration zoomée-guidée, avec le même nombre de points de grille, mais resserrés en France pour obtenir une résolution horizontale de 30 km, à quoi s’ajoute une correction de biais par guidage pendant la simulation, selon la technique développée récemment par [Krinner et al., 2019]. Cette deuxième configuration vise à fournir des projections plus facilement exploitables par des non scientifiques, notamment les gestionnaires des ressources en eau impliqués dans le programme PIREN-Seine et notre projet Belmont. Dans les deux configurations, les températures de surface de la mer seront issues d’une simulation faite avec le modèle climatique complet de l’IPSL (IPSL-CM6-LR) sous scénario SSP5-8.5, après correction de biais par rapports aux observations de la période 1979-2015.

Ces deux configurations sont détaillées dans le tableau 3, sachant qu’en termes de temps de calcul, il faut compter 20% de plus avec zoom et guidage. Pour compenser, les simulations zoomées-guidées couvriront une période plus courte, celle qui montre les changements les plus importants (1951-2100, soit seulement 150 ans). En termes de stockage, nous estimons que 50 ans de simulation demande un archivage de 1 To, vu le nombre de variables nécessaires pour nos analyses, y compris des sorties journalières pour l’analyse fréquentielle des événements extrêmes, et des sorties 3D pour comprendre les processus atmosphériques en jeu dans les rétroactions surface-atmosphère, notamment autour de la convection. En rajoutant 5 % pour le débogage et les erreurs (43 000 h), on arrive à la consommation suivante :

$$\Rightarrow 450\ 000\ h + 405\ 000\ h + 43\ 000\ h = 898\ 000\ h$$

Stockage : 21 To sur Jean-Zay

5.2.2 Calibration du modèle ORCHIDEE en France

L’objectif de ce travail, qui va débuter en avril 2021 dans le cadre du post-doc de Lucia Rinchuso, est d’améliorer les simulations du débit des cours d’eau et de l’évapotranspiration par le modèle ORCHIDEE en France. ORCHIDEE est ici utilisé offline. Le travail se basera sur le meilleur forçage météorologique actuellement disponible, le forçage SAFRAN ([Vidal et al., 2010]) proposé

par Météo-France à la résolution horizontale de 8 km. Le nombre de points de grille continentaux est de presque 10,000, soit seulement deux fois moins que pour une simulation globale à 1° de résolution. On peut donc estimer qu'un an de simulation SAFRAN demandera 10h/an avec 2 nœuds de 32 cœurs. L'amélioration du modèle va passer par des tests de différentes cartes de sol et d'occupation des sols (végétation et cultures, irrigation), et par des tests sur certains des paramètres qui contrôlent la phénologie des plantes, les bilans d'eau (ruissellement, infiltration, drainage), et le transfert de l'eau dans les cours d'eau et les nappes. Le choix des paramètres modifiés et de la gamme de valeurs explorées reposera sur des études de sensibilité préalables, e.g [Dantec-Nédélec et al., 2017, Wang et al., 2018, Tafasca et al., 2020, Ducharne et al., 2020b]. Nous estimons qu'une vingtaine de simulations sera réalisée sur la période A10, chacune de 60 ans (1958-2018) pour pouvoir choisir les jeux de cartes/paramètres qui permettent de restituer au mieux l'évolution des débits et l'évapotranspiration sur la période.

⇒ 20 simulations × 60 × 10 h = 12 000 h
Stockage : 1 To sur Jean-Zay

6 Isotopes de l'eau

6.1 Isotopes dans LMDZ6 et applications régionales

Camille Risi, S. Nguyen

6.1.1 Maintenance des isotopes dans LMDZ6

La maintenance des isotopes dans les versions successives de LMDZ est un enjeu important depuis 15 ans.

- Les travaux de maintenance des isotopes de l'eau dans LMDZ6 vont se poursuivre. Il me reste encore à implémenter les isotopes dans la thermodynamique de la glace pour pouvoir faire des simulations avec exactement la même physique que dans le modèle IPSL-CM6.
- En vue d'une possible introduction dans le trunk, des travaux de réécriture de certaines parties du code isotopique vont débiter, pour les rendre moins encombrants. Des discussions sont en cours avec F. Hourdin.
- Dans l'optique d'une pérennisation, des tests automatiques seront mis en place. S. Nguyen, ingénieur recruté au LSCE, sera en renfort sur cette tâche.

Pour ces travaux, nous réaliserons des simulations de débogage et de tests de quelques jours à mois, pour l'équivalent d'environ 10 ans de simulation.

⇒ Demande : 10 ans × 750h × 3 (facteur lié aux isotopes) = 22 000 h sur Jean-Zay
Stockage : 2 To sur Jean-Zay

6.1.2 Applications régionales

Camille Risi, Di Wang (thèse)

Pour la première fois, des données de composition isotopique dans la vapeur d'eau et des hydrométéores ont été collectées dans et autour de nuages par drone, par la doctorante Di Wang

(Université de Yunnan, Chine). Ces données inédites permettront de documenter les variations isotopiques verticales et horizontales à fine échelle, permettant de mieux comprendre comment les processus nuageux impactent la composition isotopique de la vapeur d'eau et des pluies. Di va venir passer 2 ans de sa thèse au LMD, dans le cadre d'une co-tutelle, pour utiliser LMDZ-iso pour placer ses données dans un contexte plus grande échelle et mieux les interpréter. Une simulation zoomée guidée sur la Chine sera réalisée pour comparer à ces données

*. \implies Demande : 10 ans \times 750h \times 3 (facteur lié aux isotopes) = 22 000 h sur Jean-Zay
Stockage : 2 To sur Jean-Zay*

6.2 Isotopes dans des simulations résolvant explicitement la convection

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.

Dans le rapport, nous décrivons la compréhension du lien entre convection et composition isotopique de la vapeur d'eau que nous avons acquise grâce aux simulations SAM-iso ([Risi et al., 2020, Risi et al., 2021]). Mais ces résultats 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. Comment l'organisation de la convection affecte-t-elle la sensibilité de la vapeur d'eau à la convection? Cette question a des applications notamment en paléo-tempestologie, où les enregistrements isotopiques dans diverses archives sont par exemple utilisées pour reconstituer la fréquence passée des cyclones ([Lawrence and Gedzelman, 2003, Frappier et al., 2007, Medina-Elizalde and Rohling, 2012, Baldini et al., 2016]).

6.2.1 Comment la composition isotopique varie-t-elle au sein des systèmes organisés ?

Pour répondre à cette question, nous avons simulé des cyclones tropicaux en ajoutant de la rotation ([Khairoutdinov and Emanuel, 2013]), et des lignes de grain en ajoutant du cisaillement de vent ([Robe and Emanuel, 2001]). Les variations de composition isotopique au sein des cyclones et lignes de grain présentent des similitudes avec celles observées ([Fudeyasu et al., 2008, Risi et al., 2010, Tremoy et al., 2014]) (figure 5b, vert). Toutefois, les simulations ont du mal à simuler les nuages stratiformes associés à ces lignes de grain (figure 5a), et le pic secondaire de précipitation qui y est associé (figure 5b, noir). Réduire l'évaporation des hydrométéores, affiner la résolution ou encore allonger le domaine dans le sens perpendiculaire à la ligne pourraient aider à mieux simuler les nuages stratiformes ([Bryan and Morrison, 2012]).

Nous souhaitons donc réaliser (tableau 4) :

- 2 simulations de sensibilité à l'évaporation en domaine 128x128 : *20 000 h*
- 1 simulation de sensibilité à la résolution en domaine 128x128 : *10 000 h*
- 1 simulation en domaine allongé : 512x128 : *40 000 h*

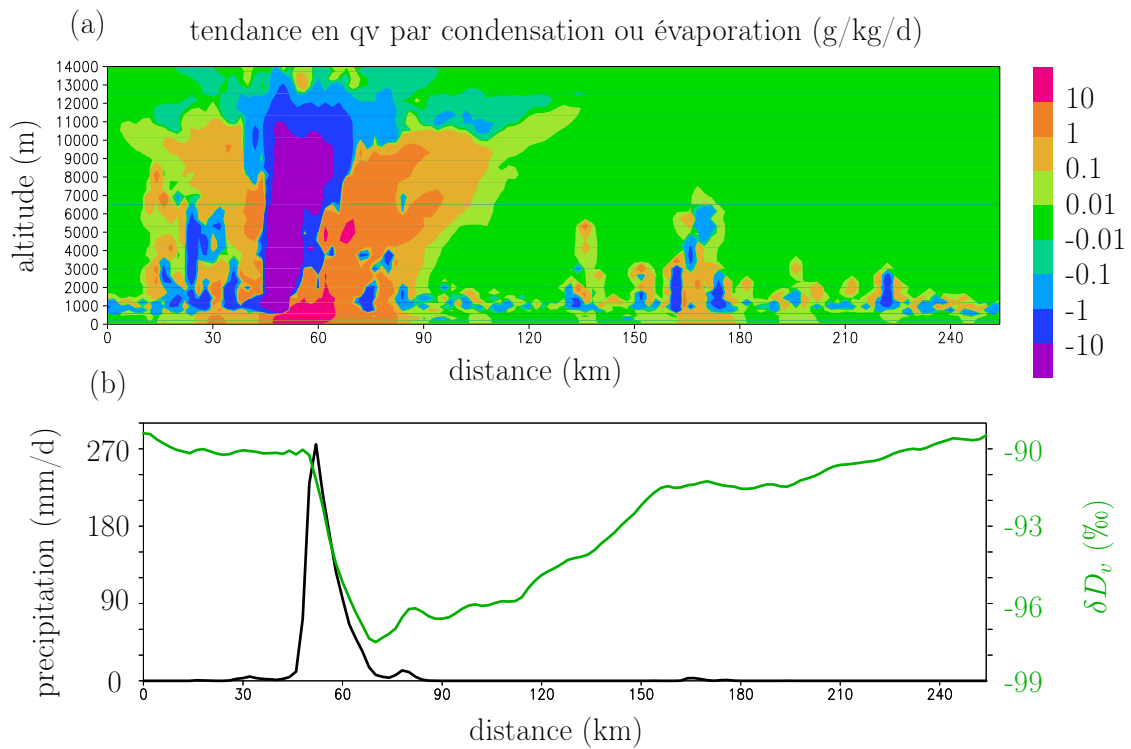


Figure 5: Structure de la ligne de grain simulée par SAM-iso. Plusieurs coupes selon x ont été composées, en posant arbitrairement le front de la ligne en $x=5$ km. (a) taux de condensation et d'évaporation (b) Évolution du taux de précipitation (noir) et du δD_v près de la surface (vert).

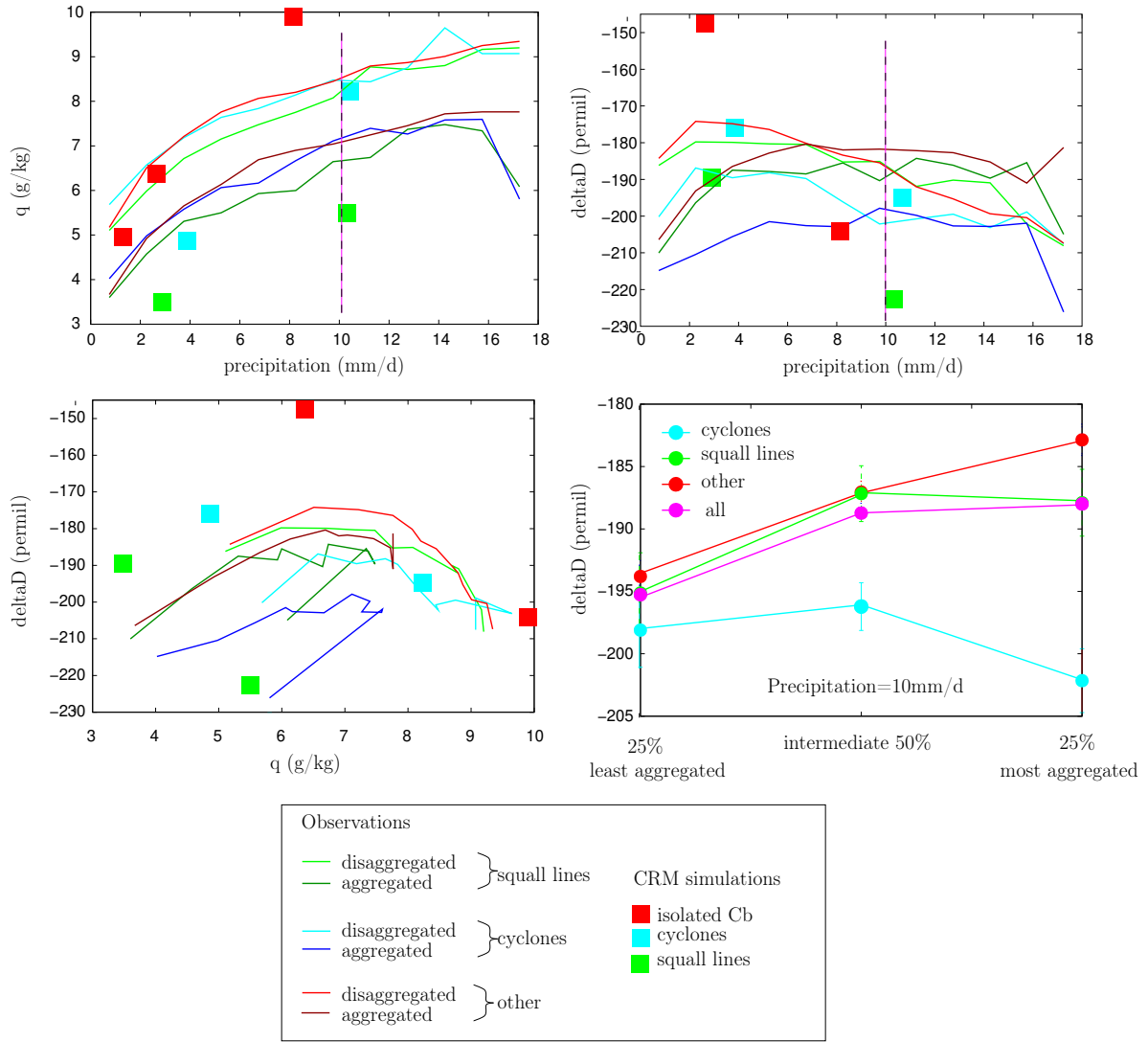


Figure 6: Humidité spécifique q et δD de la vapeur d'eau à 600 hPa observée par les données AIRS (lignes) et simulées par le modèle SAM (carrés), en fonction du taux de précipitation TRMM, de l'agrégation de la convection (selon l'index I_{org} de [Tompkins and Semie, 2017]) et du type de systèmes convectifs (d'après la base de données CACATOES issue de l'algorithme de traçage de systèmes convectifs de [Fioleau and Roca, 2013]). Pour les observations, tout est moyenné sur des domaines de $10^\circ \times 10^\circ$. (a) q en fonction du taux de précipitation, (b) δD en fonction du taux de précipitation, (c) δD en fonction de q et (d) δD en fonction du degré d'agrégation pour une précipitation de 10 mm/d.

6.2.2 Comment le type d'organisation affecte-t-il la composition isotopique de la vapeur d'eau à grande échelle ?

Pour répondre à cette question, nous avons tout d'abord mené une analyse observationnelle, en co-localisant des observations isotopiques satellitaires dans la vapeur ([Worden et al., 2019]) avec la précipitation observée par TRMM, des mesures du degré d'organisation de la convection ([Tobin et al., 2012]) et avec la base de donnée CACATOES répertoriant les différents systèmes convectifs à méso-échelle ([Fioleau and Roca, 2013]). Les résultats sont encore préliminaires, mais ils suggèrent que 1) les cyclones sont associés à des vapeurs d'eau plus appauvries que les autres cas, de manière cohérente avec les observations in-situ, 2) les lignes de grain sont associées à des vapeurs d'eau de composition comparable aux autres types de systèmes et 3) pour les régimes de fortes pluies, quand la convection est plus agrégée, la vapeur d'eau est plus enrichie (figure 6).

On aimerait utiliser nos simulations avec SAM-iso pour interpréter ces résultats observationnels. Toutefois, on remarque que nos simulations de cyclone ont une vapeur d'eau en moyenne sur le domaine anormalement enrichie, et nos simulations de lignes de grains sont anormalement appauvries et sèches. Il est possible qu'il soit difficile de comparer des observations journalières avec une convection qui varie de manière continue, à des simulations en équilibre radiatif-convectif. Nous souhaitons donc réaliser des simulations transitoires dans lesquelles la convection s'organise à partir d'une simulation déjà bien équilibrée isotopiquement, mais désagrégée (protocole similaire à [Muller and Romps, 2018]). Nous souhaitons donc réaliser :

- une simulation de cyclone, avec 50 jours sans rotation puis 20 jours avec.
- une simulation de ligne de grain, avec 50 jours sans cisaillement puis 20 jours avec.

D'autre part, nous souhaitons réaliser des simulations avec des anomalies chaudes en surface de forme circulaires (« hot spots »), à différents régimes de circulation de grande échelle, pour regarder un 3e type d'organisation de la convection ([Shamekh et al., 2020]).

*⇒ Demande : Le détail du calcul est donné dans le tableau 4 :
170 000 heures sur Irène KNL ;
Stockage : 34 Go*

Simulation	durée	domaine	nombre de simulations	facteur multiplicatif du nombre d'heures par rapport à une simulation 128x128 de 50 jours	nombre d'heures	stockage
ligne de grain : sensibilité à l'évaporation	50 jours	128x128	2	2	20 000 h	4 Go
ligne de grain : sensibilité à la résolution	50 jours	128x128	1	1	10 000 h	2 Go
ligne de grain : domaine allongé	50 jours	512x128	1	4	40 000 h	8 Go
cyclone transitoire	70 jours	256x256	1	2x2x1.4	56 000 h	11 Go
ligne de grain transitoire	70 jours	128x128	1	1.4	14 000 h	3 Go
hot spots	50 jours	128x128	3	3	30 000 h	6 Go
Total					170 000 h	34 Go

TABLE 4 – Estimation des heures de calcul pour les simulations SAM-iso. On rappelle qu'une simulation 128x128 prend environ 10 000h CPU sur Irène KNL et 2 Go de stockage.

7 Méthode

La majeure partie de notre demande en ressources de calcul porte sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ et du modèle de surface continentale ORCHIDEE.

7.1 Le modèle LMDZ

Site web LMDZ : <http://LMDZ.lmd.jussieu.fr>

Le modèle de circulation générale LMDZ est divisé en deux parties :

1. une partie dynamique qui consiste en une résolution par différences finies des équations tridimensionnelle de la météorologie dans l'approximation hydrostatique ;
2. une partie physique qui consiste en une résolution de modèles unidimensionnels (les paramétrisations physiques) représentant les divers processus d'échanges verticaux à échelle sous-maille (échanges radiatifs, processus de couche limite, convection profonde, effet de l'orographie).

Configurations Dans le présent projet, le modèle est utilisé dans différentes configurations :

1. configuration climatique, où les seules forçages sont les températures de surface des océans (SST = Sea Surface Temperature) et le forçage solaire, la grille étant régulière ou zoomée sur une région particulière, l'Afrique de l'Ouest ou la Méditerranée dans notre cas ;
2. configuration guidée, dans laquelle certains champs dynamiques ou thermodynamiques sont rappelés vers les valeurs données par des analyses ou réanalyses. On pourra ainsi guider le modèle vers les analyses du Centre Européen ou du NCEP.

Le code de LMDZ Le code est conçu de façon modulaire. Les constantes physiques sont passées par Common Fortran. Toutes les autres variables sont passées en argument, ce qui permet de changer aisément les modules des paramétrisations physiques. Cette facilité est essentielle à la vie d'un modèle climatique, puisque les paramétrisations utilisées ont des origines très variées et font l'objet d'échanges permanents entre laboratoires.

Optimisation du code Le bénéficie d'une version parallèle MPI/OpenMP : (1) le découpage du domaine en bandes de latitude est géré par MPI ; (2) le découpage vertical est géré par OpenMP.

7.2 Le modèle ORCHIDEE

Site web ORCHIDEE : <https://orchidee.ipsl.fr/>

Le modèle de surface continentale ORCHIDEE est le couplage de 3 modèles :

1. Le modèle SECHIBA simule le bilan hydrique et énergétique de la surface
2. Le modèle STOMATE simule la phénoménologie de la végétation et les transferts bio-géochimiques
3. Le modèle LPJ simule l'évolution dynamique de la végétation

Le modèle ORCHIDEE peut être utilisé soit seul (offline) ou couplé à LMDZ.

Le code d'ORCHIDEE et son optimisation Le code est conçu de manière modulaire en fortran 90. La version officielle d'ORCHIDEE est parallélisée MPI-OpenMP.

7.3 Le modèle SAM-iso

Site web : <http://rossby.msrc.sunysb.edu/~marat/SAM.html>

Le modèle SAM ([Khairoutdinov and Randall, 2003]) est un modèle permettant de faire des simulations résolvant les nuages (résolution horizontale de quelques kilomètres) ou les gros tourbillons (résolutions horizontale de quelques dizaines à centaines de mètres).

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

Avec 96 niveaux verticaux, la résolution verticale sera d’environ 50 m dans les basses couches, et augmentera jusqu’à 500 m dans la troposphère libre. Le sommet du domaine (tiers supérieur) comporte une couche d’éponge pour absorber les ondes de gravité, qui sinon rempliraient le domaine de façon irréaliste. Il est ici utilisé dans sa version isotopique (SAM-iso) ([Blossey et al., 2010, Moore et al., 2014]).

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

Références

- [Agosta et al., 2019] Agosta, C., Amory, C., Kittel, C., Orsi, A., Favier, V., Gallée, H., Broeke, M. R., Lenaerts, J., Wessem, J. M. v., Berg, W. J. v. d., et al. (2019). Estimation of the antarctic surface mass balance using the regional climate model mar (1979–2015) and identification of dominant processes. *The Cryosphere*, 13(1) :281–296.
- [Amory et al., 2020] Amory, C., Kittel, C., Le Toumelin, L., Agosta, C., Delhasse, A., Favier, V., and Fettweis, X. (2020). Performance of mar (v3. 11) in simulating the drifting-snow climate and surface mass balance of adelie land, east antarctica. *Geoscientific Model Development Discussions*, pages 1–35.
- [Baldini et al., 2016] Baldini, L. M., Baldini, J. U., McElwaine, J. N., Frappier, A. B., Asmerom, Y., Liu, K.-b., Pruber, K. M., Ridley, H. E., Polyak, V., Kennett, D. J., et al. (2016). Persistent northward north atlantic tropical cyclone track migration over the past five centuries. *Scientific reports*, 6 :37522.
- [Bellenger et al., 2017] Bellenger, H., Drushka, K., Asher, W., Reverdin, G., Katsumata, M., and Watanabe, M. (2017). Extension of the prognostic model of sea surface temperature to rain-induced cool and fresh lenses. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 122(1) :484–507.
- [Blossey et al., 2010] Blossey, P. N., Kuang, Z., and Romps, D. M. (2010). Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation. *J. Geophys. Res.*, 115 :D24309, doi :10.1029/2010JD014554.
- [Bryan and Morrison, 2012] Bryan, G. H. and Morrison, H. (2012). Sensitivity of a simulated squall line to horizontal resolution and parameterization of microphysics. *Monthly Weather Review*, 140(1) :202–225.
- [Cheruy et al., 2020] Cheruy, F., Ducharne, A., Hourdin, F., Musat, I., Vignon, E., and Gastineau, G. and Bastrikov, V. (2020). Improved near surface continental climate in IPSL-CM6 by combined evolutions of atmospheric and land surface physics. *JAMES*, 12 :e2019MS002005.
- [Dantec-Nédélec et al., 2017] Dantec-Nédélec, S., Ottlé, C., Wang, T., Guglielmo, F., Maignan, F., Delbart, N., Valdayskikh, V., Radchenko, T., Nekrasova, O., Zakharov, V., et al. (2017). Testing the capability of orchidee land surface model to simulate arctic ecosystems : Sensitivity analysis and site-level model calibration. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(2) :1212–1230.

- [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.
- [Fiolleau and Roca, 2013] Fiolleau, T. and Roca, R. (2013). An algorithm for the detection and tracking of tropical mesoscale convective systems using infrared images from geostationary satellite. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(7) :4302–4315.
- [Frappier et al., 2007] Frappier, A. B., Sahagian, D., Carpenter, S. J., González, L. A., and Frappier, B. R. (2007). Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events. *Geology*, 35(2) :111–114.
- [Fudeyasu et al., 2008] Fudeyasu, H., Ichianagi, K., Sugimoto, A., Yoshimura, K., Ueta, A., Yamanaka, M. D., , and Ozawa, K. (2008). Isotope ratios of precipitation and water vapor observed in Typhoon Shanshan. *J. Geophys. Res.*, 113 :D12113, doi :10.1029/2007JD009313.
- [Hourdin et al., 2019] Hourdin, F., Jam, A., Rio, C., Couvreux, F., Sandu, I., Lefebvre, M.-P., Brient, F., and Idelkadi, A. (2019). Unified parameterization of convective boundary layer transport and clouds with the thermal plume model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(9) :2910–2933.
- [Hourdin et al., 2006] Hourdin, F., Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron, F., Dufresne, J.-L., Fairhead, L., Filiberti, M.-A., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Krinner, G., Levan, P., Li, Z.-X., and Lott, F. (2006). The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim. Dyn.*, 27 :787–813.
- [Hurtt et al., 2020] Hurtt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., Frohling, S., Boudris, B. L., Calvin, K., Doelman, J. C., Fisk, J., Fujimori, S., Klein Goldewijk, K., et al. (2020). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (luh2) for cmip6. *Geoscientific Model Development*, 13(11) :5425–5464.
- [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.
- [Khairoutdinov and Randall, 2003] Khairoutdinov, M. F. and Randall, D. A. (2003). Cloud resolving modeling of the arm summer 1997 iop : Model formulation, results, uncertainties, and sensitivities. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(4) :607–625.
- [Krinner et al., 2019] Krinner, G., Beaumet, J., Favier, V., Déqué, M., and Brutel-Vuilmet, C. (2019). Empirical run-time bias correction for antarctic regional climate projections with a stretched-grid agcm. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(1) :64–82.
- [Lawrence and Gedzelman, 2003] Lawrence, J. and Gedzelman, S. (2003). Tropical ice core isotopes : Do they reflect changes in storm activity? *Geophys. Res. Lett.*, 30 :44–1.
- [Madeleine et al., 2020] Madeleine, J.-b., Hourdin, F., Grandpeix, J.-y., Rio, C., Dufresne, J.-L., Vignon, E., Boucher, O., Konsta, D., Cheruy, F., Musat, I., et al. (2020). Improved representation of clouds in the atmospheric component lmdz6a of the ipsl-cm6a earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10) :e2020MS002046.
- [Medina-Elizalde and Rohling, 2012] Medina-Elizalde, M. and Rohling, E. J. (2012). Collapse of classic maya civilization related to modest reduction in precipitation. *Science*, 335(6071) :956–959.

- [Moore et al., 2014] Moore, M., Kuang, Z., and Blossey, P. N. (2014). A moisture budget perspective of the amount effect. *Geophys. Res. Lett.*, 41 :1329–1335, doi :10.1002/2013GL058302.
- [Muller and Romps, 2018] Muller, C. J. and Romps, D. M. (2018). Acceleration of tropical cyclogenesis by self-aggregation feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201719967.
- [O’Neill et al., 2016] O’Neill, B. C., Tebaldi, C., Vuuren, D. P. v., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., et al. (2016). The scenario model intercomparison project (scenariomip) for cmip6. *Geoscientific Model Development*, 9(9) :3461–3482.
- [Padrón et al., 2020] Padrón, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., Peano, D., Krinner, G., Kim, H., and Seneviratne, S. I. (2020). Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience*, 13(7) :477–481.
- [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>.
- [Popp et al., 2020a] Popp, M., Lutsko, N. J., and Bony, S. (2020a). The relationship between convective clustering and mean tropical climate in aquaplanet simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(8) :e2020MS002070.
- [Popp et al., 2020b] Popp, M., Lutsko, N. J., and Bony, S. (2020b). Weaker links between zonal convective clustering and itcz width in climate models than in observations. *Geophysical research letters*, 47(22) :e2020GL090479.
- [Punge et al., 2012] Punge, H., Gallée, H., Kageyama, M., and Krinner, G. (2012). Modelling snow accumulation on greenland in eemian, glacial inception, and modern climates in a gcm. *Climate of the Past*, 8(6) :1801–1819.
- [Risi et al., 2010] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Chong, M., and Descroix, L. (2010). Evolution of the water stable isotopic composition of the rain sampled along Sahelian squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136 (S1) :227 – 242.
- [Risi et al., 2021] Risi, C., Muller, C., and Blossey, P. N. (2021). 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. Model. Earth Sci.*, submitted.
- [Risi et al., 2020] Risi, C., Muller, C., and N, B. P. (2020). What controls the water vapor isotopic composition near the surface of tropical oceans? results from an analytical model constrained by large-eddy simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*.
- [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.
- [Shamekh et al., 2020] Shamekh, S., Muller, C., Duvel, J.-P., and d’Andrea, F. (2020). How do ocean warm anomalies favor the aggregation of deep convective clouds? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(11) :3733–3745.
- [Siebert et al., 2010] Siebert, S., Burke, J., Faures, J.-M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., and Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and earth system sciences*, 14(10) :1863–1880.

- [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.
- [Tobin et al., 2012] Tobin, I., Bony, S., and Roca, R. (2012). Observational evidence for relationships between the degree of aggregation of deep convection, water vapor, surface fluxes and radiation. *Journal of Climate*.
- [Tompkins and Semie, 2017] Tompkins, A. M. and Semie, A. G. (2017). Organization of tropical convection in low vertical wind shears : Role of updraft entrainment. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(2) :1046–1068.
- [Tremoy et al., 2014] Tremoy, G., Vimeux, F., Soumana, S., Souley, I., Risi, C., Cattani, O., Favreau, G., and Oi, M. (2014). Clustering mesoscale convective systems with laser-based water vapor delta18O monitoring in Niamey (Niger). *J. Geophys. Res.*, 119(9) :5079–5103, DOI : 10.1002/2013JD020968.
- [Vidal et al., 2010] Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., and Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over france with the safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11) :1627–1644.
- [Vignon et al., 2018] Vignon, E., Hourdin, F., Genthon, C., Van de Wiel, B. J., Gallee, H., Madeleine, J.-B., and Beaumet, J. (2018). Modeling the dynamics of the atmospheric boundary layer over the antarctic plateau with a general circulation model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(1) :98–125.
- [Wang et al., 2018] Wang, F., Polcher, J., Peylin, P., and Bastrikov, V. (2018). Assimilation of river discharge in a land surface model to improve estimates of the continental water cycles. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7) :3863–3882.
- [Worden et al., 2019] Worden, J. R., Kulawik, S. S., Fu, D., Payne, V. H., Lipton, A. E., Polonsky, I., He, Y., Cady-Pereira, K., Moncet, J.-L., Herman, R. L., et al. (2019). Characterization and evaluation of airs-based estimates of the deuterium content of water vapor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(4) :2331–2339.
- [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.