

## Rapport d'activité DARI 2015 – projet 0292

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

#### Rapport d'activité

Camille Risi

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

L.M.D. - Octobre 2014

De janvier à octobre 2014, nous avons consommé 92% de notre allocation sur Ada après 2 demandes de rallonge, c'est-à-dire 749 000 heures. Nous avons consommé dans une moindre mesure sur Curie (11 000 et 48 000 heures sur Curie noeuds larges et fins respectivement). Les tableaux 1 et 2 résument notre consommation par groupe de travail.

Depuis des années, ce projet est consacré à l'évaluation et au développement du modèle de circulation générale atmosphérique LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique Zoom) et du modèle de surface continental ORCHIDEE (ORganising Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms), ainsi que de leur utilisation pour mieux comprendre des processus climatiques.

En 2014, la majeure partie (68%) de la consommation sur Ada a été utilisée pour la mise au point de la version de référence du modèle LMDZ (tableau 1), qui sera utilisée pour les simulations de l'exercice d'intercomparaison CMIP6. Cette partie étant très volumineuse (à la fois en temps de calcul et en résultats obtenus) et transverse à plusieurs projets, nous avons décidé de rédiger un rapport d'activité spécifique pour ce thème. Celui-ci est joint en annexe. Dorénavant, cette partie fera l'objet d'une demande spécifique. Ce projet se concentre à présent uniquement sur l'étude des processus atmosphériques et hydrologiques et sur les travaux en amont liés à la représentation de ces processus dans LMDZ et dans ORCHIDEE.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Evolution et validation de la version de référence du modèle LMDZ</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Etude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat</b>	<b>3</b>
2.1	Utilisation de LMDZ en configuration RCE pour l'étude du changement climatique .	3
2.2	Convection, Montagnes, stratosphère, variabilité équatoriale . . . . .	4
2.3	Microphysique des nuages de glace et des traînées de condensation des avions . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Variabilité des températures en Atlantique tropical</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Evolution, validation et utilisations du modèle ORCHIDEE</b>	<b>9</b>
4.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE . . . . .	9
4.2	Couplage LMDZ-ORCHIDEE : interactions surface atmosphère . . . . .	10

4.2.1	Evaluation du modèle couplé LMDZOR avec différentes configurations de la physique atmosphérique et de l'hydrologie. . . . .	10
4.2.2	Rôle du couplage humidité des sols / atmosphère dans les projections climatiques. . . . .	12
4.3	Influence des eaux souterraines sur le couplage surface/atmosphère . . . . .	12
4.4	Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Isotopes de l'eau</b>	<b>14</b>
5.1	Implémentation du cycle du Tritium . . . . .	14
5.2	Evaluation des processus convectifs et nuageux . . . . .	17
5.3	Applications paléo-climatiques et régionales . . . . .	19
5.4	LMDZ au Cénozoïque . . . . .	19

thème	heures allouées suite aux deux sessions (k heures CPU)	heures consommées au 13 aout 2014 (k heures CPU)	% de consommation par rapport à l'allocation
Mise au point de LMDZ6	396	511	129%
Étude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat	152	95	63%
Étude des interactions océan-atmosphère lors des évènements ENSO	10	2	20%
Évolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE	156	60	38%
Isotopes de l'eau	100	87	87%
<b>Total</b>	<b>814</b>	<b>756</b>	<b>93%</b>

TAB. 1 – Tableau comparant les heures de calcul demandées, allouées et consommées sur Ada au 9 octobre 2014.

thème	heures demandées (k heures CPU)	heures allouées (k heures CPU)	heures consommées (k heures CPU)	% de consommation par rapport à l'allocation
Nœuds larges	30	30	11	36%
Nœuds fins	100	120	51	40%

TAB. 2 – Tableau comparant les heures de calcul demandées, allouées et consommées sur Curie au 9 octobre 2014. Seul le groupe sur l'évolution et la validation du modèle LMDZ est concerné par Curie.

# 1 Evolution et validation de la version de référence du modèle LMDZ

Sandrine Bony, Jean-Louis Dufresne, Laurent Fairhead, Marie-Alice Foujols, Jean-Yves Grandpeix, Frédéric Hourdin, Abderrahmane Idelkadi, Ionela Musat, Jan Polcher, Catherine Rio, Olivier Boucher

*Consommation : 507 000 heures CPU Ada.*

*47 000 heures CPU Curie noeuds fins, 11 000 heures CPU sur Curie noeuds larges*

Un rapport spécifique est joint en annexe.

## 2 Etude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat

### 2.1 Utilisation de LMDZ en configuration RCE pour l'étude du changement climatique

Sandrine Bony, Aiko Voigt, David Coppin

*Consommation : 38 200h CPU sur Ada*

(Notons qu'il est prévu d'utiliser environ 60 000 heures de plus d'ici décembre)

Plusieurs articles sur le rôle radiatif des nuages dans la circulation générale et dans l'organisation de la convection, qui utilisaient des simulations réalisées à l'IDRIS ces dernières années, ont été publiés (Bony et al 2013, Fermepin et al 2014, Ma et al 2014, Williams et al 2013, Voigt et al 2014, Voigt et al en révision, Bony et al soumis).

Nos travaux en 2014 ont surtout porté l'étude de l'organisation de la convection dans des configurations très idéalisées de LMDZ. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent la circulation générale de l'atmosphère (notamment le rôle des nuages et de la vapeur d'eau) et sa réponse à un réchauffement global. Pour cela, nous nous plaçons dans un cadre très idéalisé : celui d'une aqua-planète en équilibre radiatif-convectif (les conditions aux limites - par exemple l'ensoleillement et la température de surface océanique - sont parfaitement uniformes sur l'ensemble de la planète ; pas de rotation). Un nombre croissant d'études réalisées avec des GCMs (e.g. [Popke et al., 2013]) ou des Cloud-Resolving Models (e.g.[Bretherton et al., 2005, Muller and Held, 2012]) indiquent que dans certaines conditions l'équilibre radiatif-convectif peut être instable et donner lieu à l'émergence d'une circulation atmosphérique de grande échelle et à une organisation de la convection, un phénomène dénommé «auto-aggrégation». Ce phénomène suscite un grand intérêt dans la communauté scientifique (c'est par exemple l'une des quatre questions du WCRP Grand Challenge on Clouds, Circulation and Climate Sensitivity, Bony et al. en preparation) car il est susceptible d'apporter un regard nouveau sur les mécanismes qui contrôlent la circulation atmosphérique tropicale, l'émergence de modes de variabilité tels que l'Oscillation de Madden-Julian (qui pourrait être une manifestation à grande échelle du phénomène d'auto-aggrégation) et la sensibilité climatique (car l'état d'aggrégation de la convection peut moduler significativement le bilan radiatif global de la Terre).

Au cours de l'année passée, nous avons utilisé LMDZ5A en configuration RCE et avons étudié :

1. la dépendance à la température de surface du phénomène d'instabilité RCE
2. sa dépendance à la représentation des phénomènes humides et diabatiques dans le modèle (tests de sensibilité à la représentation de la convection et des nuages en utilisant le modèle

LMDZ5B, tests de sensibilité avec LMDZ5A à la représentation des interactions entre nuages et rayonnement).

Pour étudier la dépendance à la température de surface, nous avons effectué des expériences avec des températures de surface fixées allant de 290K à 310K sur LMDZ5A. Ces simulations ont mis en évidence une organisation différente de l'organisation de la convection selon la température de surface océanique (figure 1, courbe bleue de la figure 2). Les mêmes simulations ont été réalisées sur une ancienne version de LMDZ5B. Bien qu'il y ait des résultats intéressants, l'observation de problèmes anciens corrigés dans les nouvelles versions de LMDZ5B fait que nous n'avons pas continué le travail sur cette version. Nous avons fait le choix de nous focaliser sur LMDZ5A cette année avant d'étudier une version plus récente de LMDZ5B et LMDZ6 au cours de l'année 2015.

A la suite de ces tests de sensibilité aux températures de surface, l'importance des effets radiatifs des nuages dans ces simulations a été examinée. Il en ressort que les effets radiatifs des nuages sont primordiaux pour l'organisation de la convection. Quand ils sont désactivés, la convection est désorganisée (courbe rouge de la figure 2).

Pour mieux comprendre les conditions menant à l'instabilité RCE, nous avons étudié l'influence des conditions initiales, en imposant par exemple des profils moyens de température, d'humidité ou de vent partout sur le globe. Les résultats montrent que l'initiation de la convection est très sensible à l'humidité et aux flux de surface. Nous prévoyons dans l'avenir d'étudier ce phénomène plus en profondeur en cherchant quels mécanismes précis entrent en jeu. En les désactivant alternativement et en regardant dans quelles simulations la convection reste désorganisée, on sera en mesure de voir quels mécanismes sont indispensables à l'initiation de l'auto-aggrégation. On pourra ensuite procéder de la même façon pour étudier les mécanismes à l'origine du maintien dans le temps de cette organisation.

## 2.2 Convection, Montagnes, stratosphère, variabilité équatoriale

F Lott, JP Duvel, L. Guez, A. Camara Illescas, S. Mailler, M. Remaud, C. Rio et JY Grandpeix

*Consommation : 50 000 heures CPU sur Ada*

Nous utilisons LMDZ pour identifier les processus dynamiques fondamentaux qui contribuent à la variabilité du climat aux grandes échelles d'espace et de temps. Nous étudions en particulier l'influence des montagnes sur le climat, l'influence de la stratosphère sur le climat, ainsi que l'influence de la représentation de la convection profonde sur la variabilité du climat tropicale, en particulier l'oscillation de Madden-Julian (MJO) et les systèmes dépressionnaires.

**Montagnes** Nous avons montré que dans le modèle LMDZ, le développement des gouttes froides (zones où l'air est froid) en aval des montagnes était précédé par un fort couple équatorial, comme cela se produit dans les observations. Nous avons aussi montré que la contribution à ce couple des forces paramétrées, comme la friction de la couche limite et les effets de blocage par les montagnes d'échelles sous maille étaient significatifs (Mailler et Lott 2014). Même si le développement des gouttes froides n'est pas profondément affecté par ces forces paramétrées (ce qui est une bonne nouvelle pour le modélisateur), l'effet non négligeable décrit montre que l'on peut valider la manière dont un modèle de climat représente les montagnes du point de vue de systèmes synoptiques. Par ailleurs, notre travail sur la validation des paramétrisations des montagnes d'échelles sous maille par des techniques d'assimilation variationnelle est maintenant publié (Tandéo et al. 2014).

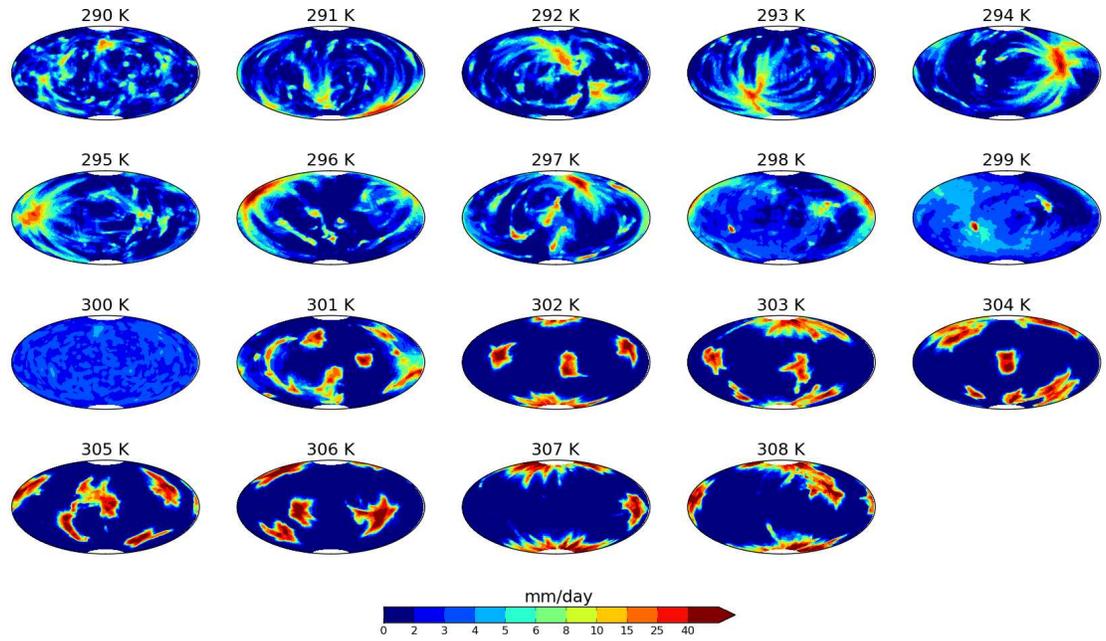


FIG. 1 – Carte des précipitations, moyennées sur 2 mois, simulées par LMDZ5A en équilibre radiatif-convectif lorsque la température de surface de l’océan (SST) varie de 290K à 308K. On voit que la convection s’agrège à grande échelle surtout pour les SSTs supérieures à 301K.

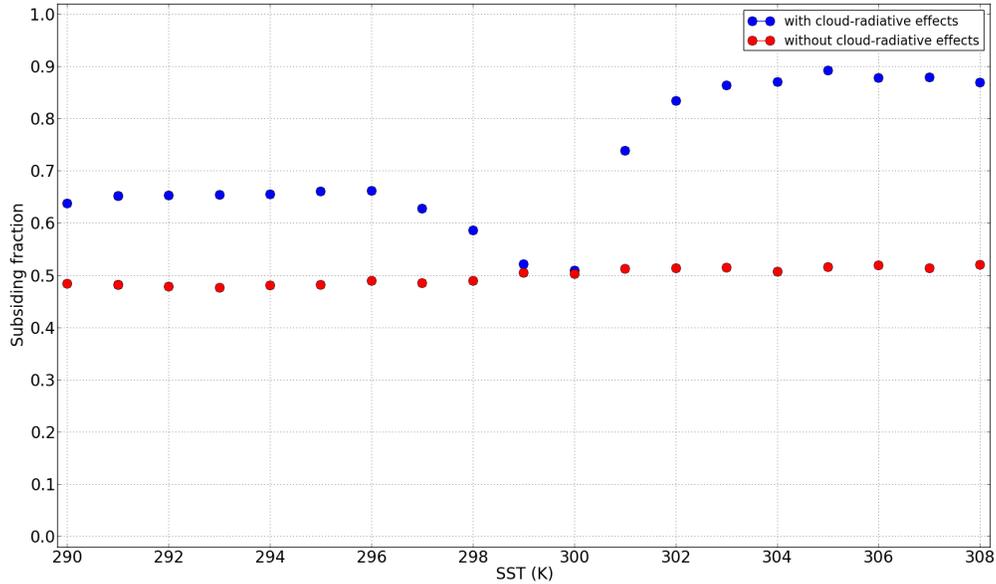


FIG. 2 – Evolution de l’organisation de la convection en fonction des températures de surface de la mer pour des simulations LMDZ5A avec (en bleu) et sans (en rouge) effets radiatifs des nuages. L’organisation de la convection est caractérisée par la fraction subsidente : la proportion du globe où il n’y a pas de convection profonde. En effet, l’auto-aggrégation de la convection fait que la convection se concentre en de petites zones très fortement convectives, augmentant ainsi, via l’équilibre radiatif-convectif, la fraction du domaine qui subside. Sur cette figure, on voit donc qu’en fonction des températures de surface, l’organisation de la convection est différente. Pour les températures inférieures à 298K, la fraction subsidente à 0,65 correspond à une convection peu organisée. Pour celles supérieures à 301K, la fraction subsidente atteint un plateau plus élevé à 0,9 qui correspond à une convection très agrégée. Entre les deux, pour des températures typiques des océans tropicaux, on semble se trouver dans un régime de transition où la convection est désagrégée : fraction subsidente de 0,5. Quand on enlève les effets radiatifs des nuages (courbe rouge), la convection est désorganisée : fraction subsidente de 0,5, quelle que soit la température de surface.

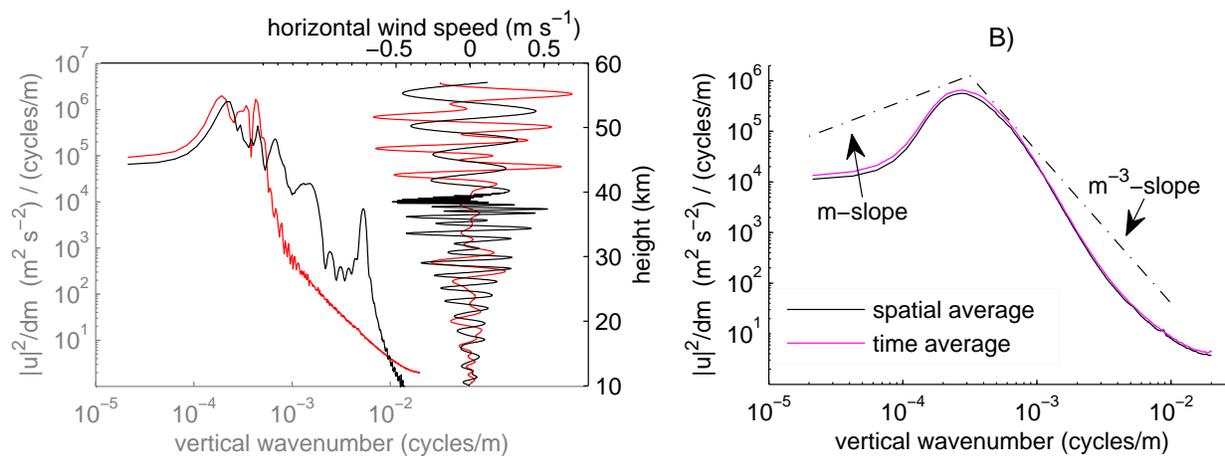


FIG. 3 – (à gauche) Profil vertical caractéristique de 2 ondes de gravités paramétrées dans LMDZ (les axes horizontaux sont pour les vitesses horizontales produites). (à droite) Spectre vertical produit par un grand ensemble de réalisations tels que celles produites à gauche (Alvaro et al. 2014)

**Stratosphère** En ce qui concerne la stratosphère, nous avons validé la paramétrisation des ondes de gravité dues à la convection dans LMDZ (figure 3) en utilisant des données issues de campagne ballon (De la Camara et al. 2014). Cette paramétrisation sera intégrée dans LMDZ6. Plus de détails sur ce sujet sont disponibles dans le rapport spécifique à LMDZ6, en annexe. Les articles relatifs à la variabilité du climat dans la stratosphère équatoriale du modèle LMDZ sont maintenant publiés (Lott and Guez 2013, Maury and Lott 2014, Lott et al. 2014).

**Convection** Le but était de tester l’impact de différents types d’inhibition de la convection sur l’organisation de grande échelle des perturbations intrasaisonniers de type MJO. Nous avons pour cela poursuivi l’analyse de l’impact de différents types de fermeture et d’entraînement sur les perturbations engendrées par le schéma de convection profonde. L’accent a été mis sur l’interprétation des résultats de simulations réalisées avec le modèle LMDZ uni-colonne et sur les implications que l’on peut en déduire pour les simulations 3D.

## 2.3 Microphysique des nuages de glace et des traînées de condensation des avions

Olivier Boucher, Marie Nguyen, Marine Bonazzola

*Consommation : 5 000 heures CPU sur Ada*

L’accès aux moyens de calcul de l’IDRIS pendant l’année 2014 nous a permis de réaliser des simulations numériques dans le cadre du projet IMPACT qui cherche à estimer l’impact de l’aviation sur le climat. Le deuxième livrable a été produit mais le projet a pris un peu de retard en raison du congé maternité de Marie Nguyen. En conséquence, une partie du travail et des simulations prévues pour 2014 sont repoussées à 2015.

Afin d’étudier la microphysique des nuages de glace et des traînées de condensation des avions, nous avons introduit une nouvelle paramétrisation des variations sous-maille de la vapeur d’eau dans le modèle LMDZ. Cette paramétrisation permet de tenir compte de la sursaturation, qui est essentielle pour modéliser les traînées d’avion. La probabilité de formation d’une traînée d’avion est

calculée à partir de la probabilité théorique de formation (fonction de l’humidité et de la température) et d’un inventaire des vols d’avion fourni par la Direction Générale de l’Aviation Civile.

Nous avons utilisé le modèle LMDZ avec une configuration de 48 points en latitude, 32 points en longitude et 39 niveaux verticaux pour valider cette paramétrisation. Les paramétrisations de la physique du modèle ayant évoluées fortement récemment, nous avons répété nos simulations plusieurs fois. Ces simulations sont zoomées sur SIRTA et nudgées par le vent issu des analyses du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Les paramétrisations physiques du modèle sont libres de répondre et gouvernent l’évolution de l’humidité. L’utilisation d’une simulation zoomée et guidée est donc un bon moyen pour évaluer ces paramétrisations dans le cadre d’une météorologie forcée.

Notre paramétrisation pour les traînées linéaires est validée en utilisant les données d’une caméra qui a été implantée au Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique (SIRTA) à Palaiseau, environ 25 km au sud de Paris. Localisée à la latitude de 48,713°N et la longitude de 2.208°E, cette caméra pointe verticalement au ciel et son rayon d’observation à une altitude de 10 km est d’environ 50 km. Cette caméra permet de visualiser les traînées pendant la journée et en l’absence de nuages, mais pas la nuit ou en présence de nuage. Nous nous focalisons sur le mois de juillet 2011 sur une tranche horaire de 3h30 à 20h30 UTC chaque jour. La traînée ne pourra pas être observée si l’atmosphère en dessous est nuageuse.

La fréquence d’occurrence des traînées d’avion observée pour le mois de juillet est de 0.0607. La version préliminaire de notre paramétrisation prédit une fréquence d’occurrence des traînées qui est beaucoup trop élevée. On voit cependant que le modèle différencie bien les cas et sans observations de traînées (figure 4) mais les prévisions de traînées sont bien trop fréquentes. Lorsque la fréquence des prévisions est diminuée par un ajustement adhoc de la zone sursaturée, nous perdons dans le contraste des probabilités même si cela améliore le score statistique de Brier que nous utilisons.

Nous avons montré la faisabilité de la prévision de formation des traînées de condensation et de son évaluation en utilisant les observations du SIRTA. Il nous reste maintenant à optimiser la paramétrisation de manière à avoir le meilleur score possible. L’occurrence de la sursaturation ayant peut-être un caractère non déterministe, nous envisageons aussi une approche stochastique dès lors que nous avons un prédicteur qui nous donne une condition nécessaire. Nous pourrions alors passer en 2015 à des simulations globales non zoomées et non guidées pour estimer le forçage des traînées d’avion.

### 3 Variabilité des températures en Atlantique tropical

Marta Martin del Rey, Malick Wade, Alban Lazar

*Consommation : 1 674 h CPU sur Ada*

Nous analysons l’évolution des événements Niños de l’Atlantique avant et après les années 1970, en termes de processus océaniques et atmosphériques. Des études antérieures ont démontré que deux types différents de Niños-Atlantique apparaissent comme premier et second mode (EOF) de la variabilité interannuelle des SST du bassin. Le premier mode présente des anomalies de SST de même signe dans l’ensemble du bassin, tandis que la phase positive du second mode est associée à une langue chaude dans l’est de l’Océan Atlantique équatorial et des anomalies froides dans le Nord et le Sud (Figure 5a-b). Le but de ce travail a été d’analyser l’évolution de ces deux phénomènes, en particulier via l’utilisation des diagnostics de budget de chaleur intégrés au modèle d’océan NEMO. Une simulation a été exécutée pour la période 1960-2011, et elle reproduit les deux modes de SST.

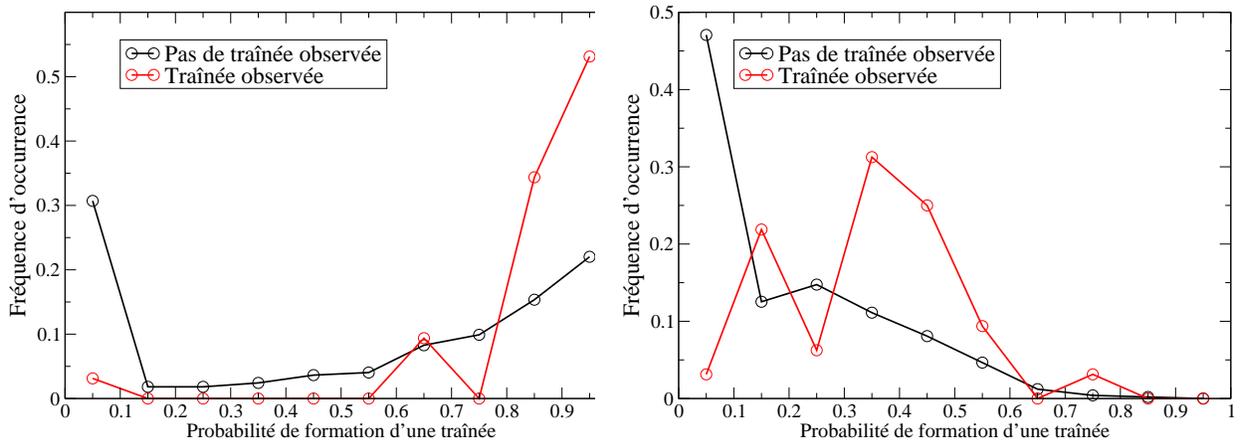


FIG. 4 – Histogramme des probabilités de formation de traînée pour les cas où une traînée a été observée et n’a pas été observée pour le modèle préliminaire non ajusté (à gauche) , et un modèle avec un ajustement adhoc (à droite).

L’analyse du budget de chaleur pour deux événements Niño Atlantique (1966 et 1981, comparables aux deux modes EOF1 et EOF2 respectivement) révèle que (figure) 6 :

- Un réchauffement anormal est situé dans la partie orientale de l’Atlantique tropical pour le Niño Atlantique de 1981, alors qu’un réchauffement étendu couvrant la totalité de la bande équatoriale et tropicale de l’Atlantique sud est visible dans le Niño Atlantique de 1966.
- L’anomalie subtropicale de température est principalement associée au flux net de chaleur atmosphérique pour le Niño Atlantique de 1966, tandis qu’apparaît une contribution supplémentaire importante des termes verticales pour le Niño Atlantique de 1981.
- Le développement de l’anomalie équatoriale de température est principalement due aux termes océaniques verticaux durant le Niño Atlantique de 1966, alors qu’en 1981 on constate également un rôle important du flux net de chaleur atmosphérique dans l’Atlantique ouest équatorial.

Deux publications sont en préparation (Martín-Rey et al et Lazar et al).

## 4 Evolution, validation et utilisations du modèle ORCHIDEE

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

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

Josefine Ghattas

*Consommation : 5 000 heures CPU sur Ada*

Un batterie des tests automatiques a été mise en place pour vérifier les versions sucesives du modèle ORCHIDEE et assurer son bon fonctionnement sur Ada. Le modèle est testé avec différents niveaux de compilations et différents nombres de tache MPI pour détecter d’éventuelles erreurs introduites involontairement dans le code. Differentes configurations du modèle (ORCHIDEE seul ou couplé à LMDZ) sont lancées pour couvrir les diverses possibilités d’utilisation d’ORCHIDEE.

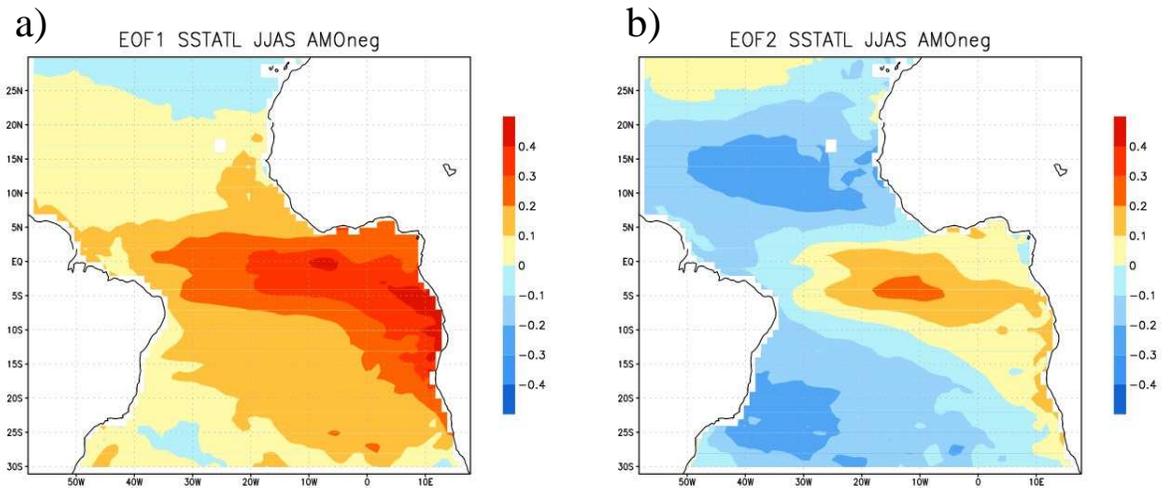


FIG. 5 – Résultats de l’analyse en composantes principales de la variabilité inter-annuelle de la SST de l’Atlantique tropical pendant Juin-juillet-aout-septembre pour la période 1965-1995. La figure montre les premier (à gauche) et deuxième (à droite) modes de variabilité.

Cette batterie de tests a été lancée environ 80 fois en 2014, ce qui correspond en moyenne à deux fois par semaine, soit un ou deux lancement par nouvelle version du modèle.

## 4.2 Couplage LMDZ-ORCHIDEE : interactions surface atmosphère

S. Ait Mesbah (doctorante), F. Cheruy, A. Ducharne, J.L. Dufresne, J. Ghattas, F. Wang (post-doc), L. Fairhead

*Consommation : 54 000 heures CPU sur Ada*

### 4.2.1 Evaluation du modèle couplé LMDZOR avec différentes configurations de la physique atmosphérique et de l’hydrologie.

Dans le cadre de la thèse de S. Ait Mesbah, nous avons poursuivi l’évaluation de LMDZOR en mode global. Des simulations en mode zoomé et guidé ont été effectuées sur l’Afrique de l’Ouest. L’étude de l’impact du schéma stochastique de la convection sur le réalisme du couplage avec le sol a été freinée par la présence de « tempêtes en point de grille », rendant difficile l’analyse et la comparaison aux observations. La physique atmosphérique est dans une phase de développement intensif en liaison avec le prochain exercice CMIP6. Cela devrait permettre d’atténuer ou de régler ces problèmes et de reprendre l’analyse. Toutefois ces simulations ont permis de mettre en évidence le rôle significatif de la paramétrisation du transfert de chaleur dans le sol et plus précisément de la paramétrisation des propriétés thermiques en fonction de l’humidité du sol sur l’amplitude du cycle diurne de la température (fig. 7) et éventuellement sur certains biais. L’importance du schéma de diffusion verticale dans la couche limite a également été souligné.

Dans le cadre du post-doc de F. Wang, le schéma de couplage entre la couche limite et la surface a également été remis à plat avec une attention particulière sur la conservation de l’énergie,

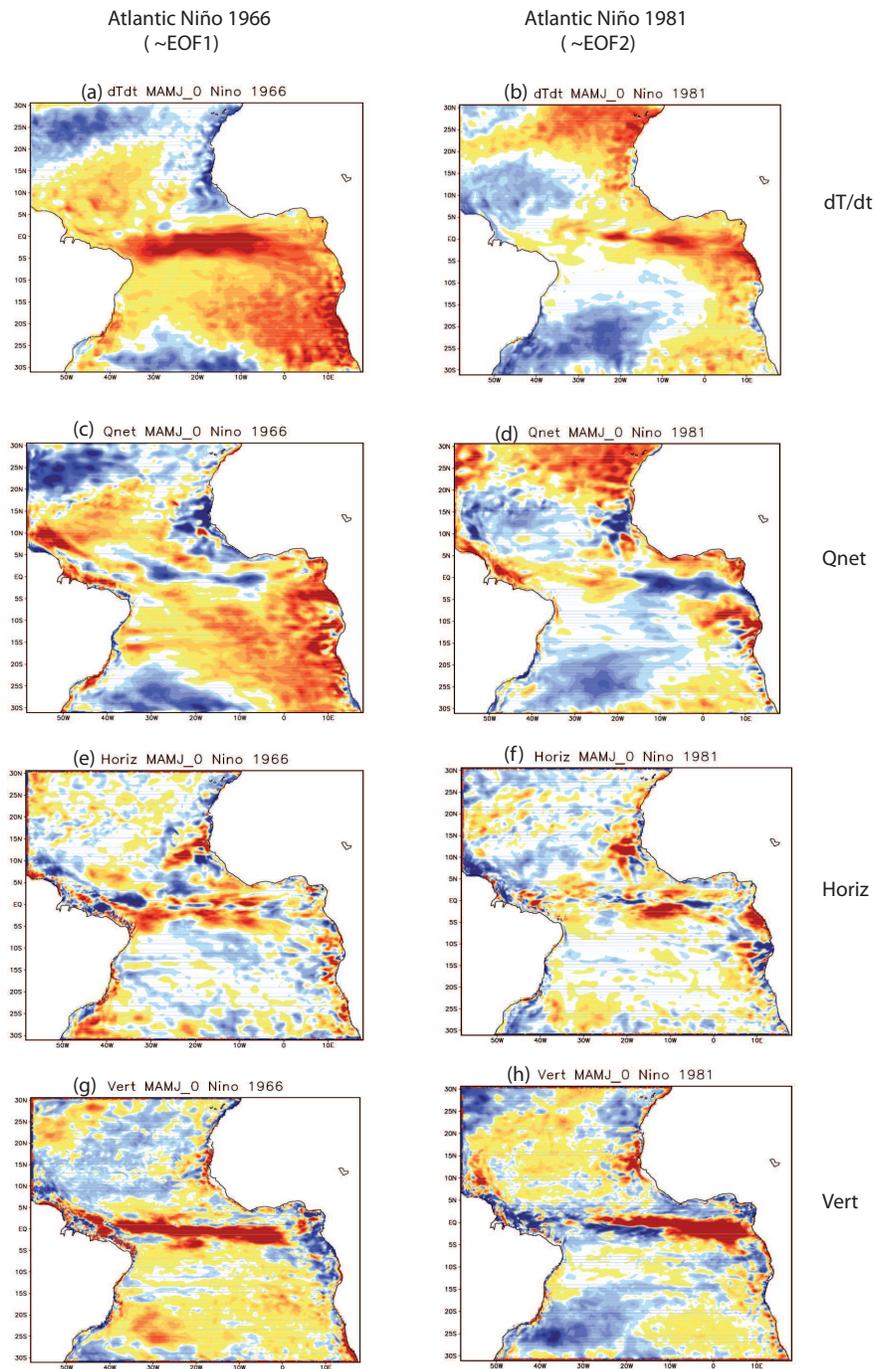


FIG. 6 – Anomalies saisonnières des termes du budget de chaleur dans la couche mélangée pour l’El Niño atlantique de 1966 (gauche) et pour celui de 1981 (droite). Les termes sont : tendance totale en température ( $dT/dt$ ), flux de chaleur nets (Qnet), termes horizontaux (Horiz) et termes verticaux (Vert). Les unités sont des  $^{\circ}\text{C}/\text{mois}$ .

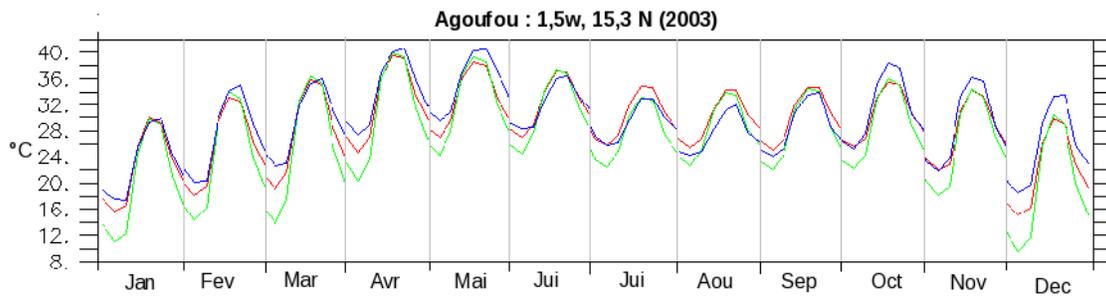


FIG. 7 – Impact de la dépendance des propriétés thermiques du sol à l’humidité sur le cycle diurne de la température au voisinage du sol (Bleu : observation, rouge : inertie thermique forte, vert : inertie thermique faible).

essentielle pour la qualité des simulations climatiques. Ce dernier aspect a conduit à introduire un terme de transport d’énergie par l’eau liquide dans le sol, à revoir la discrétisation verticale du schéma d’hydrologie et à améliorer la description des propriétés thermiques du sol. Ce nouveau schéma impacte la température de surface essentiellement dans les zones sèches (Fig. 8).

#### 4.2.2 Rôle du couplage humidité des sols / atmosphère dans les projections climatiques.

L’exploitation des simulations effectuées dans le cadre de GLACE-CMIP5 s’est poursuivie. Elle a donné lieu à une publication (Berg et al. 2014) sur le rôle des interactions sol/atmosphère dans les corrélations négatives observées entre la pluie et la température au voisinage de la surface. Une conséquence est la modulation par la réponse des précipitations au changement climatique du réchauffement au voisinage de la surface. Nous avons également analysé le rôle des nuages et du couplage sol-atmosphère dans le biais chaud présent aux moyennes latitudes en été et ses conséquences sur l’amplification du réchauffement climatique l’échelle régionale. Ces travaux ont donné lieu à une publication (Cheruy et al. 2014).

#### 4.3 Influence des eaux souterraines sur le couplage surface/atmosphère

Ana Schneider (doctorante), Agnès Ducharne, Anne Jost, Frédérique Cheruy, Jan Polcher

*Consommation : 0 heures CPU sur Ada ; 0 To sur Ergon*

Le travail a été retardé par le traitement des données amont (topographie à haute résolution, données hydrogéologiques), et aucune simulation n’a été réalisée à ce jour.

Par ailleurs, un projet a été déposé à l’ANR qui reprend et étend ce sous-thème. Il s’agit du projet I-GEM "Impact of Groundwater in Earth system Models", coordonné par Agnès Ducharne, et qui vient d’être retenu pour financement. Comme demandé par l’ANR, une demande DARI avait été déposée en parallèle en mai 2014, pour la durée de 4 ans du projet, avec une évaluation favorable du GENCI.

Ce sous-thème "eaux souterraines et climat" sera donc désormais géré par un autre projet.

#### 4.4 Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique

Matthieu Guimberteau, Agnès Ducharne, Philippe Ciais

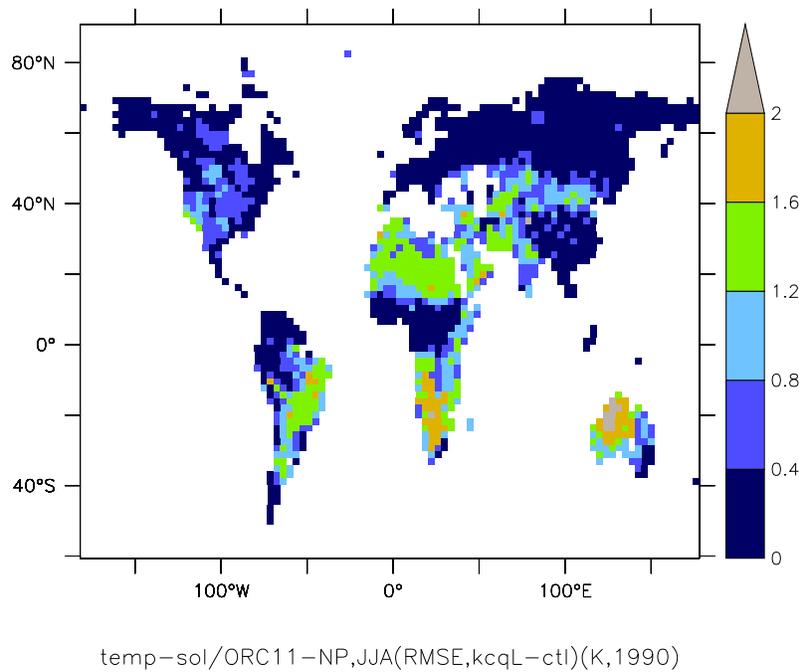


FIG. 8 – Déviation standard moyenne de la température de surface (JJA) entre la simulation de référence et la simulation intégrant les nouveaux développements pour le transfert d’énergie dans le sol. Les simulations sont guidées en vent. Les régions dont la température de surface est potentiellement impactée se distinguent par une déviation standard élevée.

*Consommation : 858 heures CPU sur Ada*

L’utilisation des ressources allouées par les machines de l’IDRIS a permis de mener à bien quatre études (3 publications) dont deux projets d’intercomparaison de modèles. Toutes ces études ont été faites dans le cadre du projet EU-FP7 AMAZALERT (Raising the alert about critical feedbacks between climate and long-term land use change in the Amazon, <http://www.eu-amazalert.org/home>) qui s’achèvera en novembre 2014.

**Bilan d’eau sur le bassin amazonien** Le modèle ORCHIDEE a participé à une intercomparaison de modèle de surface en vue d’estimer le bilan d’eau sur le bassin amazonien et sur deux grands sous-bassins que sont le Rio Negro et le Rio Madeira (Getirana et al., 2014). Pour cela, 2 types de modèles de sol d’ORCHIDEE ont été utilisés : le modèle de sol conceptuel à 2 couches (2L) et le modèle de sol diffusif à 11 couches (11L). La comparaison des deux types de modèles de sol a d’ailleurs fait l’objet d’une publication (Guimberteau et al., 2014). Chacun des 14 modèles de surface ont été couplés à un même module de routage (Hydrological Modeling and Analysis Platform (HyMAP)) et forcés par les mêmes données météorologiques.

Trois ensembles de simulations ont été réalisés en modifiant les données de précipitations (GPCP, GPCC et HYBAM). L’utilisation de HYBAM a donné la meilleure évaluation du bilan d’eau par les modèles et notamment celle de l’évapotranspiration.

Les résultats de modèles ont été comparés à des données de télédétection et in-situ. 165 stations de débits ont été utilisées pour évaluer les débits simulés par les modèles. La faible corrélation entre les pluies et l’évaporation indique que celle-ci ne dépend pas de la disponibilité en eau dans les sols sur la plupart du bassin amazonien. La variation des stocks d’eau totaux sur le bassin amazonien est

simulée de manière satisfaisante pour la plupart des modèles lors de la comparaison avec le produit satellitaire GRACE.

**Impact du changement climatique et de l'utilisation des terres sur l'hydrologie du bassin amazonien** La deuxième intercomparaison de modèles, à laquelle ORCHIDEE a participé, a pour objectif de quantifier les incertitudes de l'impact du changement climatique et celles de l'effet du changement d'utilisation des terres (LUC) sur l'hydrologie du bassin amazonien. Pour cela, quatre modèles ont été forcés par 3 scénarios de LUC avec un degré de déforestation différent pour chacun.

ORCHIDEE simule une diminution de l'évapotranspiration sur le bassin versant très déforesté qu'est le Tapajos alors que le modèle INLAND ne simule aucun effet du LUC sur l'évapotranspiration (Figure 9). On remarque la bonne corrélation entre les deux cycles saisonniers des modèles. D'autres résultats sont à venir car les simulations viennent tout juste d'être effectuées.

**Impact de l'intensité de pluies sur l'hydrologie de surface** Enfin, une étude de sensibilité a été faite sur l'impact des intensités de pluies sur l'hydrologie de surface (Guimberteau et al., soumis). Trois simulations ont été réalisées en modifiant l'intensité de pluies c'est à dire en répartissant une même quantité de pluies de 3 heures sur différents pas de temps du modèle. Les pluies intenses tendent à limiter l'infiltration et par conséquent à assécher les sols avant la saison sèche dans la région sud du bassin amazonien, le Mato Grosso, en comparaison avec la simulation où la pluie tombe de manière uniforme. L'évapotranspiration est alors diminuée en saison sèche (Figure 10). Elle l'est d'autant plus que la couverture foliaire (LAI) et la photosynthèse (GPP) diminue à cause de la fraction du sol nu qui augmente.

## 5 Isotopes de l'eau

Camille Risi, You He (thèse), Francesca Guglielmo (post-doc), Victor Gryazin (post-doc), Obbe Tuinenbourg (post-doc), Alexandre Cauquoïn (post-doc), Pierre Sepulchre, Yannick Donnadieu, Svetlana Betsyun

*Consommation : 86 000 heures CPU sur Ada*

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

### 5.1 Implémentation du cycle du Tritium

En plus des isotopes stables de l'eau, le tritium sous sa forme HTO, a également été implémenté dans LMDZ. C'est un traceur des intrusions des masses d'air stratosphériques dans la basse troposphère. Le tritium est un nucléide cosmogénique produit par l'interaction des radiations cosmiques avec la haute atmosphère. De grandes quantités de tritium thermonucléaire ont également été injectées dans la haute troposphère et la stratosphère durant les années 1950s-1960s (environ 525 kg sous la forme HTO, IAEA). En présence d'oxygène, le tritium s'oxyde et produit de l'eau tritiée HTO qui rentre dans le cycle hydrologique. Le temps de demi-vie de cet isotope radioactif est de  $12,32 \pm 0,02$  ans.

Nous nous sommes concentrés pour le moment sur le tritium « naturel » afin d'évaluer le modèle et de pouvoir étudier les effets climatiques et les liens avec les entrées d'air stratosphériques sans l'effet masquant des grosses quantités de tritium anthropique. L'implémentation du tritium

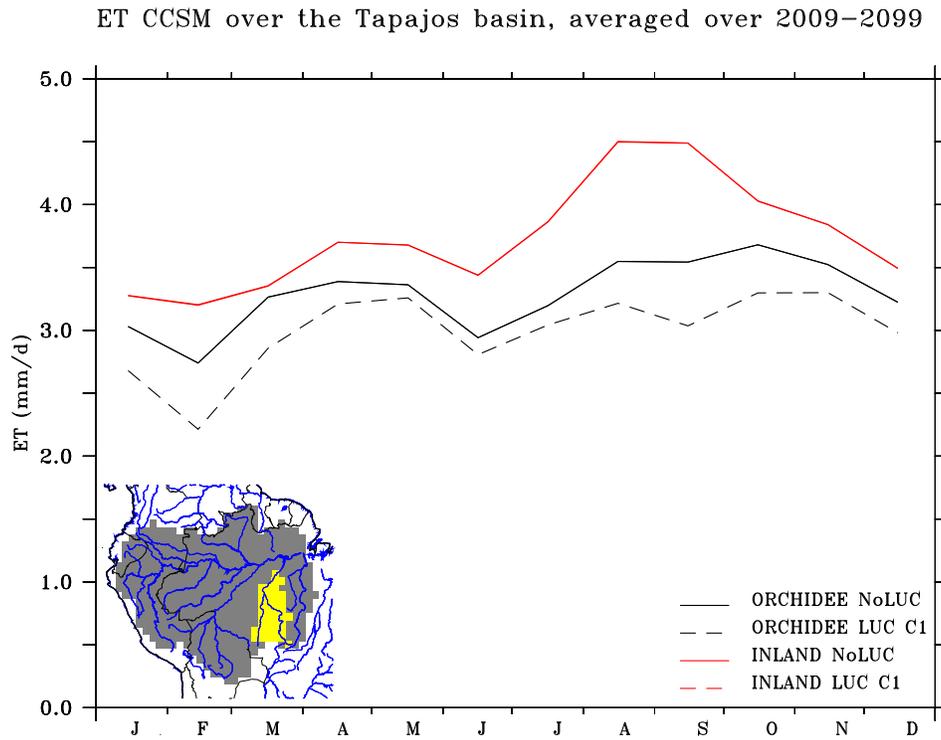
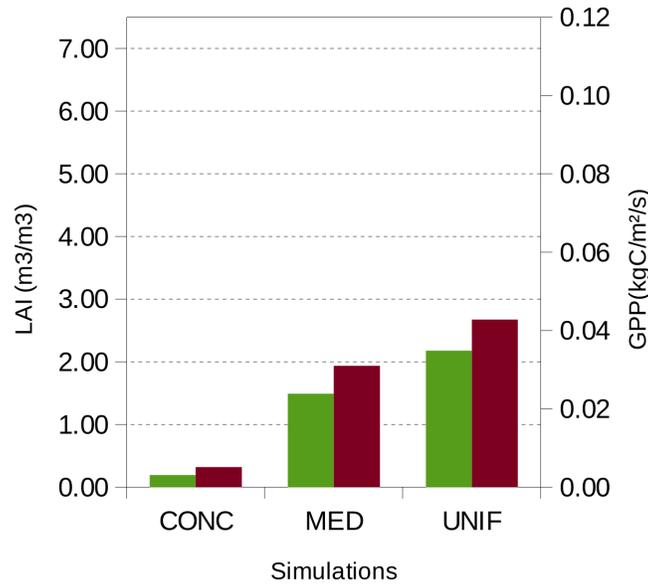


FIG. 9 – Cycle saisonnier de l'évapo-transpiration (ET) sur le bassin Tapajos au Brésil, en moyenne sur la période 2009-2099. Deux scénarios sont comparés : avec (pointillés) ou sans (traits pleins) la prise en compte du changement d'utilisation des terres. Deux modèles sont comparés : ORCHIDEE (noir) et INLAND (rouge).



(f) LAI & GPP of grassland, MT grid-point

FIG. 10 – Sensibilité du LAI (couverture foliaire, vert) et du GPP (production primaire brute, rouge) à la répartition temporelle de la pluie au sein d'un pas de temps. La figure montre les moyennes annuelles sur le Mato Grosso au Brésil. Dans la simulation CONC, on suppose que sur chaque pas de temps de forçage de 3h, toute la pluie n'est répartie que sur une période de 30 minutes. Il en résulte des pluies très intenses. Au contraire, dans la simulation UNIF, on suppose que sur chaque pas de temps de forçage de 3h, la pluie est répartie uniformément. Il en résulte des pluies régulières et faibles, de type « crachin breton ». La simulation MED est intermédiaire : sur chaque pas de temps de forçage de 3h, la pluie est répartie sur une période d'1h30. On voit que plus la pluie est intense, plus la photosynthèse est faible, car la pluie a du mal à s'infiltrer et à recharger les sols en eau.

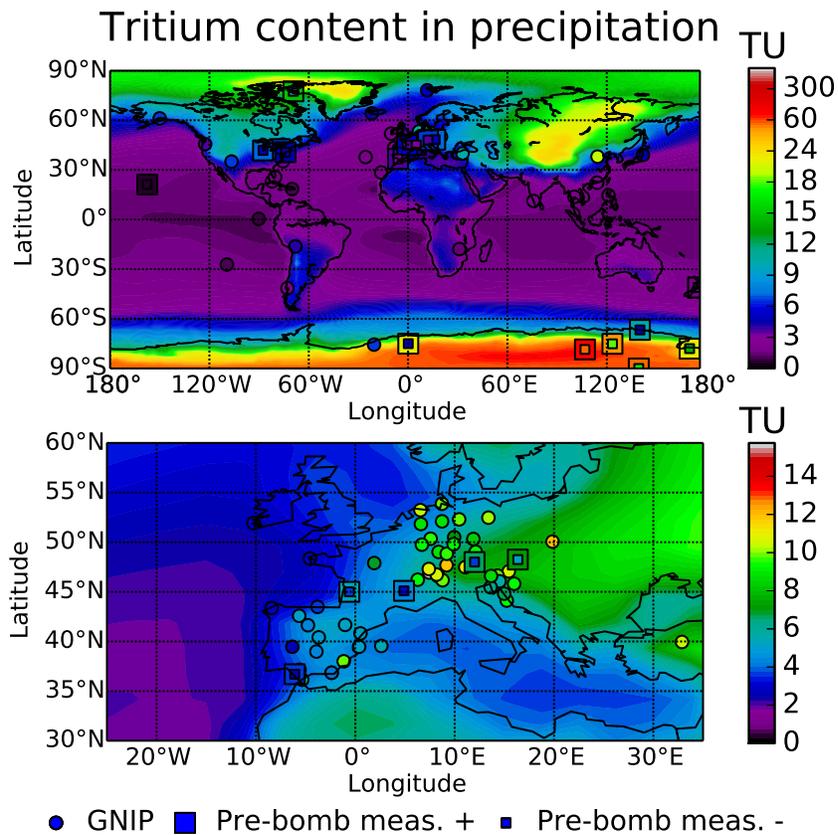


FIG. 11 – Distribution spatiale du contenu en Tritium des précipitations, simulé par LMDZ et observé dans les données GNIP de l’IAEA. (a) carte globale, (b) zoom sur l’Europe. On voit que LMDZ se compare bien aux données, en particulier aux données « pré-bombes » (carrés). Les données GNIP de l’IAEA sont légèrement plus enrichies par les essais nucléaires.

utilise la même architecture de modèle que pour les autres isotopes de l’eau. Une description de la production cosmogénique a été rajoutée (d’après les calculs de [Masarik and Beer, 2009]) pour des conditions actuelles ainsi qu’une décroissance radioactive. Les travaux nécessaires pour le développement, les tests, la mise en équilibre du système (plus de 3 temps de demi-vie, soit environ 40 ans) et la réalisation de la simulation de référence (sur la période 1990-2008) ont été réalisés. La comparaison avec des données de l’IAEA, des mesures pré-bombes (avant 1953) et 2 traverses en Antarctique ([Proposito et al., 2002, Becagli et al., 2004]) donnent des résultats encourageants. Les effets continentaux (liés à la dilution du tritium par l’océan) et latitudinaux (dus à la production naturelle de tritium) sont convenablement reproduits par le modèle. Un article à Geoscientific Model Development est en cours d’écriture sur ce sujet. Ce travail se fait en collaboration avec le LSCE (Amaelle Landais, Philippe Jean-Baptiste, Élise Fourré).

## 5.2 Evaluation des processus convectifs et nuageux

Dans le cadre du projet ANR CONV-ISO, nous essayons d’utiliser la composition isotopique de la vapeur d’eau pour mieux comprendre les processus humidifiants et asséchants la troposphère. En effet, le  $\delta D$  de la vapeur d’eau est affectée à la fois par les changements de phase (les isotopes lourds se concentrent dans la phase liquide ou solide) et les processus de transport et de mélange.

En conséquence, chaque processus humidifiant ou asséchant a une signature isotopique qui lui est propre ([Risi et al., 2012]). De nos jours, des instruments satellitaires permettent de restituer la composition isotopique de la vapeur d'eau troposphérique. Les données TES permettent d'obtenir des profils verticaux, mais avec une couverture spatio-temporelle limitée, tandis que les données IASI permettent d'obtenir une couverture globale deux fois par jour, mais sans résolution verticale.

Dans quelle mesure la composition isotopique de la vapeur d'eau permet d'évaluer dans les modèles de climat :

1. la contribution du déentraînement convectif à l'humidification de la troposphère ?
2. les rôles relatifs de la convection profonde, de la convection peu profonde et de la condensation de grande échelle dans la production de la précipitation tropicale et dans les mélanges verticaux dans la troposphère ?
3. la séquence des différents processus convectifs et nuageux aux cours de variations intra-saisonnières ? En particulier, la MJO (oscillation de Madden-Julian, [Madden and Julian, 1972]) est le principal mode de variabilité à l'échelle intra-saisonnière dans les tropiques, mais les modèles de circulation générale (GCMs) ont des difficultés persistantes à simuler ce phénomène ([Lin and Coauthors, 2006]).

Avec ces buts en tête, plusieurs simulations avec LMDZ ont été réalisées avec différentes versions de la physique et différents paramètres. Elles sont réalisées avec des configurations très légères (R96x71x39) pour économiser le temps de calcul. Nous supposons que la résolution horizontale n'est pas le facteur le plus limitant pour le réalisme de la représentation des processus convectifs et nuageux. Certaines de ces simulations sont guidées par des réanalyses pour pouvoir analyser les effets des processus convectifs et nuageux pour une dynamique imposée et réaliste. Cela permet aussi de comparer individuellement chaque événements MJO simulé par LMDZ aux observations. D'autres simulations sont non guidées : cela permet d'étudier les retroactions des processus convectifs, nuageux et radiatifs sur la dynamique atmosphérique.

Nous avons obtenus des résultats intéressants pour chacune des 3 questions ci-dessus.

1. Le déentraînement convectif a une signature isotopique fortement enrichie. Dans la haute troposphère, un événement pluvieux aura un effet enrichissant s'il est associé à de la convection profonde, tandis qu'il aura un effet appauvrissant s'il est associé à de la condensation de grande échelle. Ce résultat a été montré dans plusieurs conférence et un article est en cours de préparation.
2. Dans la basse et moyenne troposphère, la convection profonde associée à une ascendance de grande échelle concentrée dans la moyenne ou haute troposphère a un effet appauvrissant sur la vapeur d'eau. Au contraire, la convection peu profonde a un effet enrichissant sur la vapeur d'eau. Cela ouvre la perspective d'utiliser les mesures isotopiques pour contraindre la profondeur et l'intensité du mélange convectif, qui a été par ailleurs pointé comme responsable de la dispersion dans la sensibilité climatique des modèles de climat ([Sherwood et al., 2014])
3. L'évolution conjointe de l'humidité et de la composition isotopique au cours d'un événement MJO reflète la séquence des processus convectifs et nuageux. Au cours de la période 2010-2012 dans l'océan indien (à 80°E), 7 événements MJO ont été observés par IASI (figure 12a-b). A 500hPa la plupart montre une évolution "horaire" dans le diagramme  $q-\delta D$ , avec un minimum de  $\delta D$  après le maximum de  $q$ . LMDZ est capable de simuler correctement cette évolution pour 3 de ces événements (figure 12c). L'analyse détaillée LMDZ montre la séquence suivante de processus : convergence de grande échelle, convection profonde, condensation de grande échelle, puis advection de grande échelle (figure 13a). Pour les 4 autres événements MJO que LMDZ simule moins bien, on remarque qu'ils ont une forme plus "oblique", avec le minimum

de  $\delta D$  coïncidant avec le maximum de  $q$  (figure 12d). le phasage relatif de la convection, de la condensation de grande échelle et des advections de grande-échelle est différent par rapport aux événements bien simulés. En particulier, il semble que la convection profonde se déclenche plus tôt (figure 13b). Un déclenchement de la convection profonde trop précoce pourrait gêner la simulation de la MJO dans LMDZ, comme déjà suggéré par [Kim et al., 2012]

### 5.3 Applications paléo-climatiques et régionales

L'une des applications majeures de la version isotopique d'LMDZ est l'interprétation des archives paléo-climatiques. Une collaboration avec l'Institut du Plateau Tibétain à Pékin a pour but de mieux comprendre les facteurs contrôlant la composition isotopique enregistrée dans les glaciers tibétains. Comme première étape, le doctorant You He a travaillé sur l'analyse de ces facteurs à l'échelle journalière. En combinant simulations avec LMDZ et données satellitaires et au sol, il a conclu que la composition isotopique dans le Sud du Plateau Tibétain était modulée à l'échelle intra-saisonnière principalement par la convection dans le Nord de l'Inde (figure 14). La convection dans le Nord de l'Inde de l'Inde appauvrit la vapeur d'eau qui est ensuite transportée vers le Tibet. Cet appauvrissement est de plus amplifié lors des précipitations orographiques sur les premiers relief. Un article à ce sujet est en cours de révision (He et al en révision).

D'autre part, dans le cadre d'une collaboration avec Aradhna Tripathi à l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), nous utilisons LMDZ-iso pour mieux comprendre différents enregistrements paléo-climatiques. Cette collaboration est fructueuse car elle a déjà donné lieu à un article dans PNAS en 2013. Cette étude utilisait les premières simulations paléo-climatiques à haute-résolution réalisées avec des isotopes de l'eau. LMDZ avait alors été appliqué en mode zoomé sur le plateau Tibétain, et ce à la fois pour le présent et le dernier maximum glaciaire (-21 000 ans). Nous appliquons maintenant le même type de configuration sur deux autres régions :

1. L'Indonésie et la Papouasie. De nombreuses archives paléo-climatiques sont disponibles dans cette région. L'avantage est que cette région est principalement océanique, tout en ayant des reliefs importants sur certaines îles. Ceci permet d'essayer de reconstituer la structure verticale de l'atmosphère au dernier maximum glaciaire. En particulier, quel est le rôle des processus convectifs dans les changements de structure verticale de température ?
2. Le Sud-Ouest des Etats-Unis. De nombreuses archives paléo-climatiques y sont aussi disponibles et témoignent des sécheresses passées. Quels est le rôle de la circulation de grande échelle, du climat global et du recyclage continental dans l'évolution de l'intensité et de la fréquence des sécheresses ?

Ces simulations zoomées avec une grille 144x142x39 sont lourdes et ont consommé la majeure partie des heures pour ce thème. Elles sont en cours d'analyse et les résultats seront disponibles l'année prochaine.

Enfin, des collaborations variées utilisant les simulations à l'IDRIS ont donné lieu à des publications, dont une dans Nature (Day et al soumis, Liu et al 2014, Pommier et al 2014, Ortega et al 2014, Bonne et al 2014, Butzin et al 2014, Gryazin et al 2014, Steen-Larsen et al 2014).

### 5.4 LMDZ au Cénozoïque

Mesuré dans les carbonates des sols, l'enrichissement en  $^{18}O$  ( $\delta^{18}O$ ) sert, via différentes méthodes de calibration basées sur des relations empiriques actuelles, de paléo-altimètre aux géochimistes.

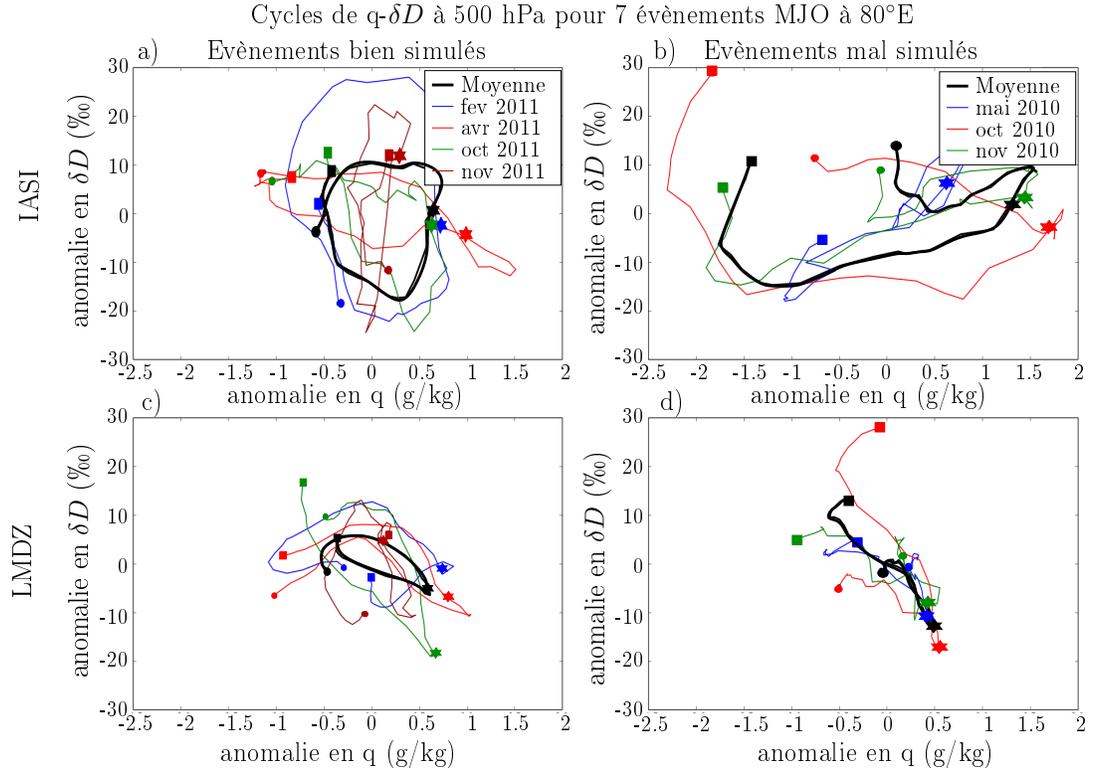


FIG. 12 – a-b) Évolution conjointe de l’humidité spécifique ( $q$ ) et du  $\delta D$  au cours de 7 évènements MJO observés par IASI dans l’océan indien, à 80°E. c-d) Même chose dans LMDZ. A gauche : 4 évènements dont LMDZ simule assez bien l’évolution isotopique. A droite 3 évènements pour lesquels l’évolution isotopique montre une forme trop “oblique”. La courbe noire montre la moyenne entre les différents évènements. Les étoiles représentent le maximum de précipitation, les cercles représentent ce qui se passe 17 jours avant ce maximum, et les carrés 17 jours après ce maximum. La date (mois et année) du début de chaque évènement est indiquée dans la légende. Le  $\delta D$  mesure l’enrichissement de l’eau en  $HDO$  par rapport à l’eau de mer en ‰.

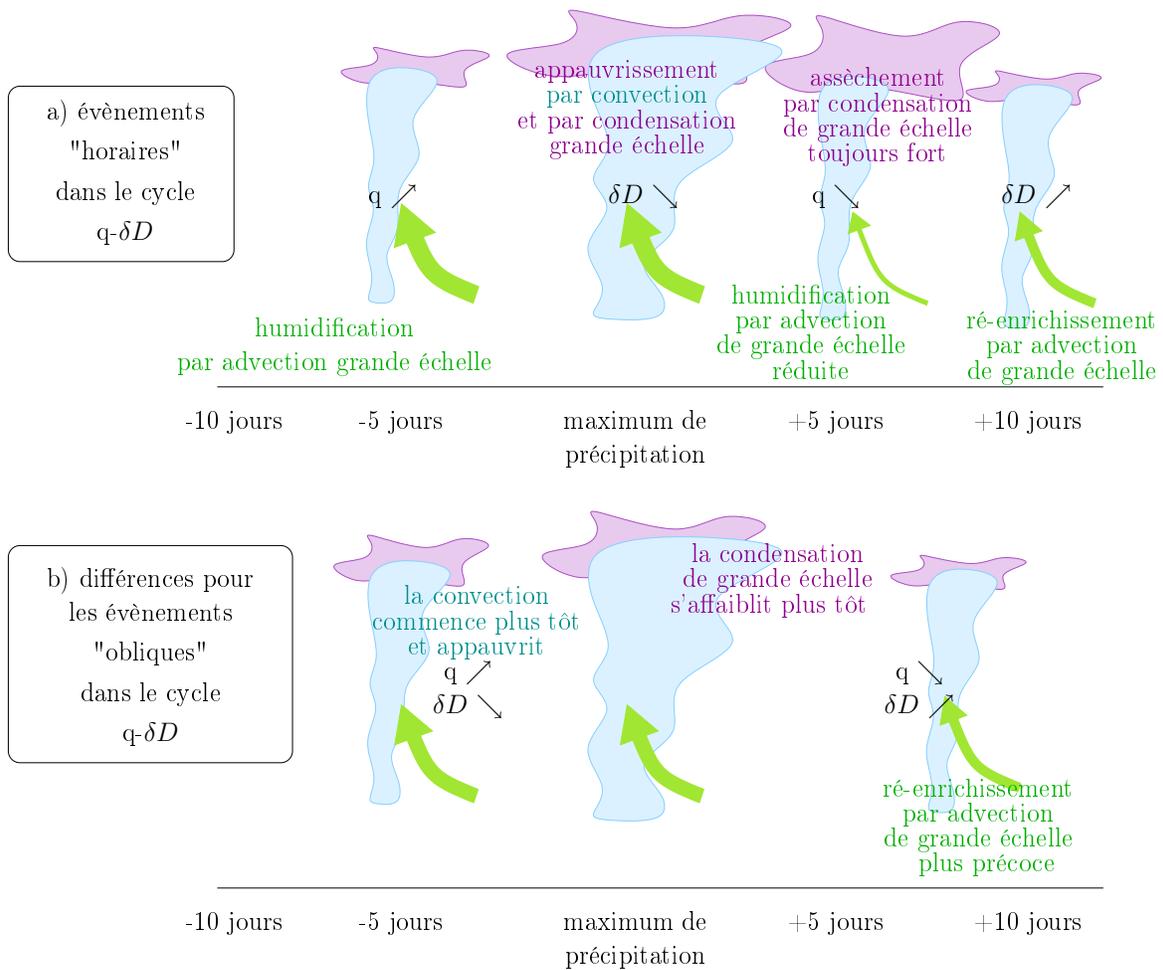


FIG. 13 – a) Schéma illustrant la séquence de processus humidifiants et asséchants lors des différentes phases de la MJO, pour les évènements montrant une évolution "horaire" dans le diagramme  $q-\delta D$ , d'après une analyse des tendances de LMDZ. Les nuages bleus et mauves représentent la convection profonde et la condensation grande-échelle respectivement, les flèches vertes représentent l'advection de grande échelle. b) Différence pour les évènements montrant une évolution "oblique" dans le diagramme  $q-\delta D$ .

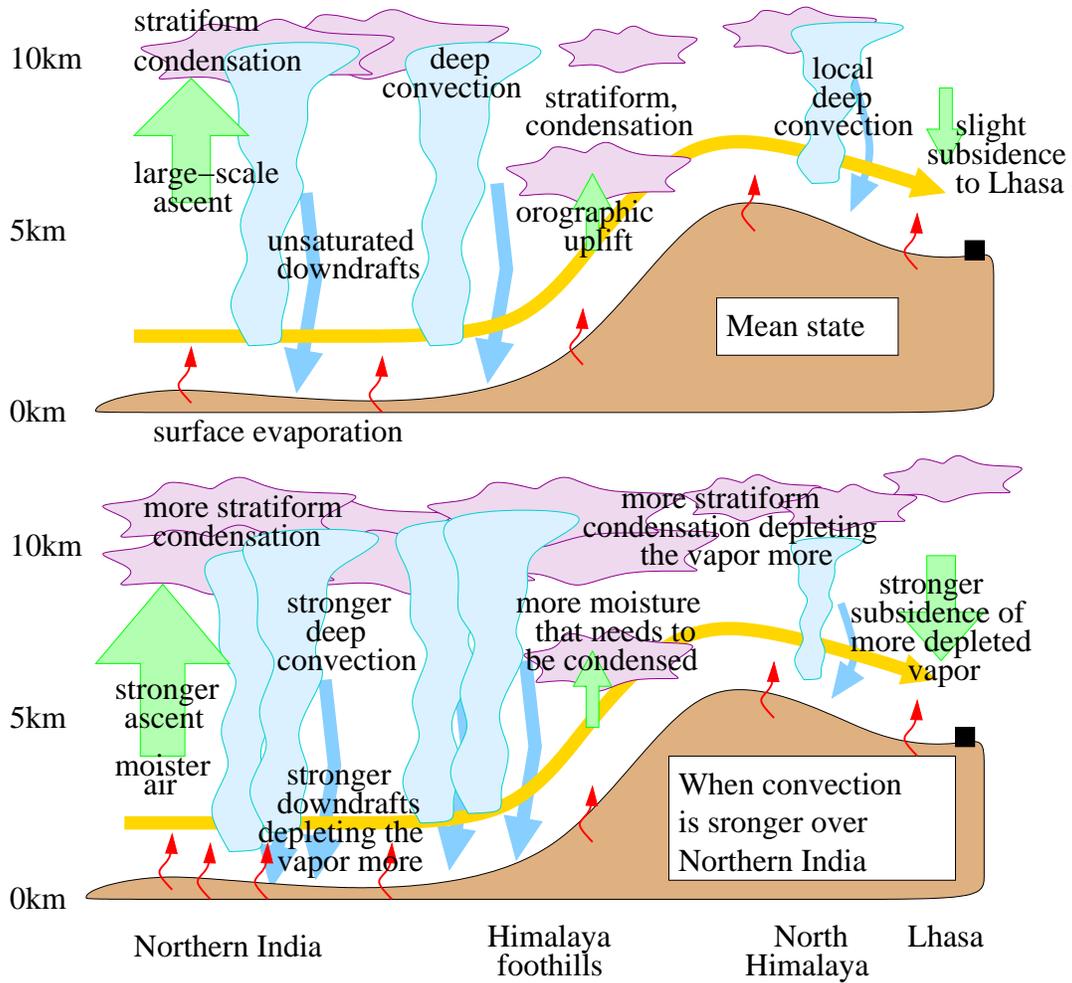


FIG. 14 – Schéma expliquant comment la convection sur le Nord de l’Inde se traduit par un appauvrissement de la précipitation à Lhasa, dans le Sud du Tibet. Cette figure est issue d’un article en révision, He et al.

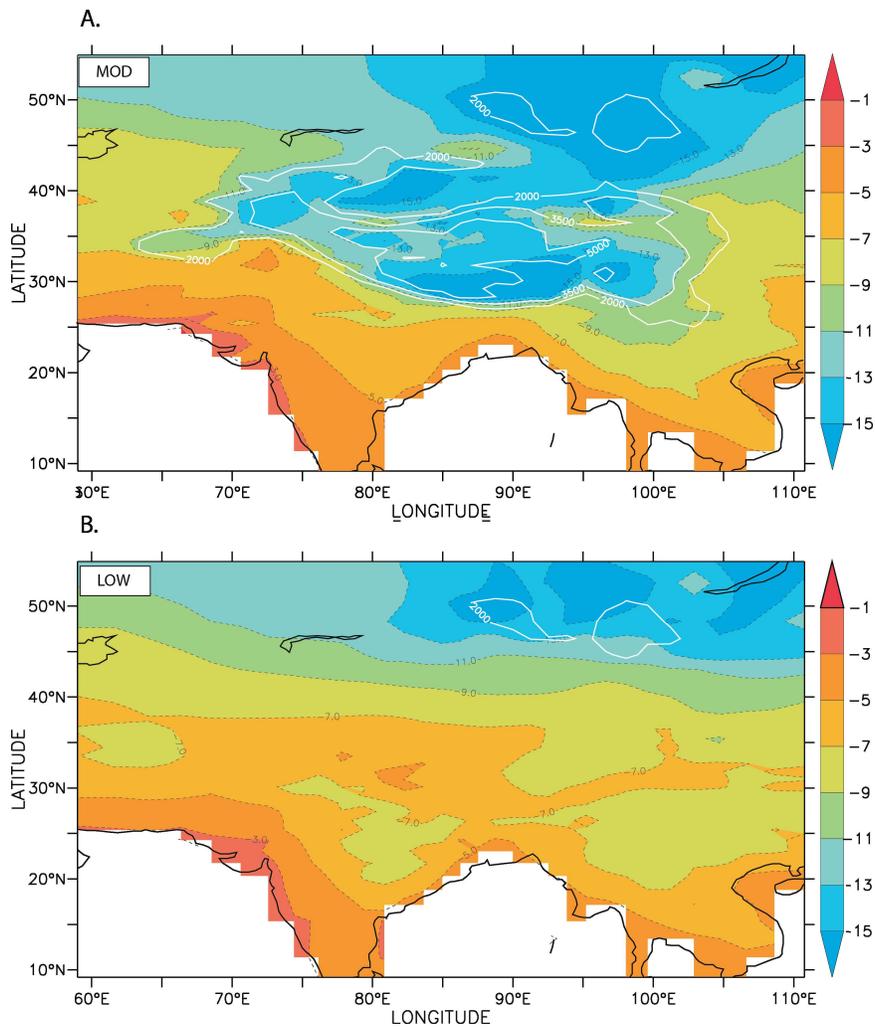


FIG. 15 – Moyenne annuelle du  $\delta^{18}O$  des précipitations simulé par LMDZ-iso avec un plateau tibétain à sa taille actuelle (a), et réduit à 250m (b).

Ainsi, de nombreuses études s'appuient sur de telles mesures pour contraindre l'évolution temporelle d'orogènes importants, notamment la chaîne himalayenne et le plateau tibétain. Depuis quelques années, ces méthodes de calibration ont été remises en question et des études de modélisation suggèrent que le  $\delta^{18}O$  des précipitations varie non seulement avec l'altitude mais aussi avec différents paramètres paléo-climatiques.

Dans le cadre de sa thèse, Svetlana Botsyun a mis en place une stratégie de modélisation basée sur l'utilisation du modèle LMDz-iso dans un cadre paléoclimatique. La première étape consiste en l'analyse de simulations dites de «sensibilité» à la topographie tibétaine, dans lesquelles cette dernière a été réduite de moitié puis totalement, alors que le reste des conditions sont fixées à l'actuel. L'analyse de ces simulations a permis de quantifier les conséquences de la topographie, sur les régimes de mousson, sur l'origine des masses d'eau atteignant le plateau tibétain, et sur le  $\delta^{18}O$  simulé dans les eaux de pluie (figure 15, article en préparation).

## Publications récentes liées au projet

1. Ait Mesbah, S, F. Cheruy, J.L. Dufresne, F. Hourdin. Impact of coupling processes on the diurnal cycle of the temperature in dry areas. **En préparation** (déjà présenté à la conférence GEWEX à la Haye en 2014).
2. Berg A ; B Lintner ; K. Findell ; S. I. Seneviratne ; B. van den Hurk ; A. Ducharne ; F. Chéruy ; S. Hagemann ; D. Lawrence ; S. Malyshev ; A. Meier ; P. Gentine, 2014 : Interannual coupling between summertime surface temperature and precipitation over land : processes and implications for climate change, *J. Clim.* **sous presse**.
3. Bonne, J-L, V Masson-Delmotte, O Cattani, M Delmotte, C Risi, H Sodemann, HC Steen-Larsen. **2014** The isotopic composition of water vapour and precipitation in Ivittuut, Greenland. *Atm. Chem. Phys.*
4. Bony S, D. Coppin, A. Voigt, T. Beckmann and B. Stevens : Self-aggregation of convection in General Circulation Models. **En preparation** pour *Geophys. Res. Lett.*
5. Bony S., G. Bellon, D. Klocke, S. Sherwood, S. Fermepin, and S. Denvil, **2013** : Robust direct effect of carbon dioxide on tropical circulation and regional precipitation, *Nature Geoscience*, 6, 447-451, doi :10.1038/ngeo1799.
6. Botsyun, S, P Sepulchre, Y Donnadieu, C Risi. Impact of Himalayas and Tibetan Plateau uplift on paleoaltimetry estimates through changing of Asian climate.
7. M. Butzin, M. Werner, C. Frankenberg, J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, C. Risi, and V. I. Zakharov. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years. **Accepté**, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 29263-29301, 2013. doi :10.5194/acpd-13-29263-2013
8. Campoy A, Ducharne A, Chéruy F, Hourdin F, Polcher J, Dupont JC (2013). Response of land surface fluxes and precipitation to different soil bottom hydrological conditions in a general circulation model. *JGR-Atmospheres*. **Sous presse**.
9. Cauquoin, A, Landais, A, Jean-Baptiste, P, Fourré, E, Risi, C. Implementation of tritied water in LMDZ. **En préparation** pour *Geosci. Model Dev* (déjà présenté au congrès de l'EGU à Vienne en 2014)
10. Cheruy F., J.L. Dufresne, F. Hourdin, A. Ducharne, **2014** : Role of clouds and land-atmosphere coupling in midlatitude continental summer warm biases and climate change amplification in CMIP5 simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi :10.1002/2014GL061145.
11. Day, J, Fung, I and Risi, C. Weak Coupling of July-August Precipitation between India and East Asia. **Soumis** to *J. Clim.*
12. De la Camara, A., F. Lott and A. Hertzog, 2014 : Intermittency in a stochastic parameterization of non-orographic gravity waves, **Accepté** par *J. Geophys. Res.*
13. Fermepin, S. and S. Bony, **2014** : Influence of low-cloud radiative effects on tropical circulation and precipitation. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 06, doi :10.1002/2013MS000288.
14. Gao, J., Masson-Delmotte, V., Risi, C., He, Y., & Yao, T., **2013**. What controls precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  in the southern Tibetan Plateau at seasonal and intra-seasonal scales? A case study at Lhasa and Nyalam. *Tellus B*, 65.
15. Getirana A., Dutra E., Guimberteau M., Kam J., Li H.-Y., Decharme B., Zhang Z., Ducharne A., Boone A., Balsamo G., Rodell M., Toure A. M., Xue Y., Peters-Lidard C., Kumar S., Arsenault K., Drapeau G., Leung L. R., Ronchail J., Sheffield J., **2014** : Water balance in the

- Amazon basin from a land surface model ensemble, *J. Hydrometeorol.*, doi :10.1175/JHM-D-14-0068.1
16. Guimberteau M.,\_Ducharne A.,\_Ciais P., Boisier J.P., Peng S., De Weirdt M. and Verbeeck H. (2014) : Testing conceptual and physically based soil hydrology schemes against observations for the Amazon Basin, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1115-1136, doi :10.5194/gmd-7-1115-2014, **2014**
  17. Guimberteau M.,\_Ciais P.,\_Ducharne A. : Influence of rainfall rate on the surface hydrology and vegetation of Mato Grosso, Amazonia, **soumis** à *Geophys. Res. Lett.*
  18. Y. He, C. Risi, J. Gao, V. Masson-Delmotte, T. Yao, J. Worden, C. Frankenberg, G. Cesana. Impact of atmospheric convection on the isotopic composition of Tibetan precipitation using a combination of satellite data and atmospheric general circulation modeling. **Soumis** à *J. Geophys. Res.*
  19. Jouzel, J, Delaygue, G, Landais, A, Masson-Delmotte, V, Risi, C, Vimeux, F. Water isotopes as tools to document oceanic sources of continental precipitation. **soumis** à *Water Resources Res.*
  20. Lazar A., M. Wade, A.C. Peter, C. Deltel. Thermal impacts of coast ally trapped planetary waves along african coasts at intra-seasonal scale. **En préparation.**
  21. Liu, Z., Yoshimura, K., Bowen, G. J., Buenning, N. H., Risi, C., Welker, J. M., and Yuan, F., **2014**. Paired oxygen isotope records reveal modern North American atmospheric dynamics during the Holocene. *Nature communications*, 5. doi :10.1038/ncomms4701
  22. Lott, F. and L. Guez **2013** : A stochastic parameterization of the gravity waves due to convection and impact on the equatorial stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 118, 16, 8897-8909. DOI : 10.1002/jgrd.50705
  23. Lott, F. S. Denvil , N. Butchart, C. Cagnazzo , M. Giorgetta, S. Hardiman, E. Manzini, T. T. Krishmer , J.-P. Duvel, P. Maury, J. Scinocca, S. Watanabe, S. Yukimoto, **2014** : Kelvin and Rossby gravity wave packets in the lower stratosphere of some high-top CMIP5 models, *J. Geophys. Res.*, 119, 5, 2156-2173, DOI : 10.1002/2013JD020797.
  24. Ma, H.-Y., S. Xie, S. A. Klein, K. D. Williams, J. S. Boyle, S. Bony, H. Douville, S. Fermepin, B. Medeiros, S. Tyteca, M. Watanabe, and D. Williamson, **2014** : On the correspondence between mean forecast errors and climate errors in CMIP5 models. *J. Climate*, 27(4), 1781-1798.
  25. M. Martín-Rey, I. Polo, B. Rodríguez-Fonseca, A. Lazar. On the influence of the Subtropical Highs in the development of Atlantic Niños. **En préparation.**
  26. Maury, P. and F. Lott, **2014**, On the presence of equatorial waves in the lower stratosphere of a general circulation model, *Atmospheric Chemistry Physics*, 14, 1869-1880, doi :10.5194/acp-14-1869-2014
  27. Maury, P. , F. Lott, L. Guez, and J.-P. Duvel, **2013** : Tropical variability and stratospheric equatorial waves in the IPSLCM5 model, *Climate Dynamics*, 40 : 2332-2344, 11-14.DOI 10.1007/s00382-011-1273-0.
  28. Nguyen, M. and O. Boucher. Evaluation of a subgrid-scale parametrisation for water vapour in the upper troposphere through ground-based observation of contrail occurrence at the SIRTAsite. **En préparation** pour *Atmospheric Chemistry and Physics*.
  29. P. Ortega, D. Swingedouw, V. Masson-Delmotte, C. Risi, B. Vinther, P. Yiou, R. Vautard, K. Yoshimura. Quantifying atmospheric signals in Greenland ice cores : insights from the weather regime approach. **2014**, *J. Geophys. Res.*

30. M Pommier, J-L Lacour, C. Risi, F-M. Bréon, C. Clerbaux, P-F. Coheur, K. Gribanov, D. Hurtmans, J. Jouzel, V. Zakharov. Observation of lowermost tropospheric D by IASI over the Western Siberia : Comparison with a GCM. **2014**, *Atm. Chem. Phys.*
31. Risi, C, Bony, S, Vimeux, F, Yoshimura, K, Buening, N. What controls the isotopic composition of precipitation recorded in tropical archives? **En préparation** pour *Clim. Past.* (déjà présenté dans de multiples conférences)
32. Risi, C, Worden, J, Lacour, J-L, Tuinenburg, O, Rio, C. Evaluating the relative roles of deep convection, shallow convection and large-scale condensation parameterizations in climate models using water isotopic measurements. **En préparation** pour *Atm. Chem. Phys.*, déjà présenté dans de multiples conférences.
33. Steen-Larsen, H. C., Masson-Delmotte, V., Hirabayashi, M., Winkler, R., Satow, K., Prié, F., Bayou, N., Brun, E., Cuffey, K. M., Dahl-Jensen, D., Dumont, M., Guillevic, M., Kipfstuhl, S., Landais, A., Popp, T., Risi, C., Steffen, K., Stenni, B., and Sveinbjörnsdóttir, A. E. What controls the isotopic composition of Greenland surface snow? **2014**, *Clim. Past*, 10, 377-392, 2014, doi:10.5194/cp-10-377-2014
34. Tandéo P., M. Pulido, and F. Lott, **2014** : Offline parameter estimation using EnKF and maximum likelihood error covariance estimates : Application to a subgrid-scale orography parameterization, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, online, DOI : 10.1002/qj.2357
35. Tuinenburg, O.A., C.Risi, J.L. Lacour, M. Schneider, N. Kurita. MJO q-dD signals diagnosed from IASI satellite retrievals. **En préparation**, déjà présenté dans de plusieurs conférences.
36. Tuinenburg, O.A., C.Risi, J.L. Lacour, M. Schneider, C. Rio, J-Y. Grandpeix. Stable Water Isotopes to Improve MJO Convective Processes in GCM. **En préparation**, déjà présenté dans de plusieurs conférences.
37. Voigt, A., S. Bony, J.-L. Dufresne, and B. Stevens, **2014**, The radiative impact of clouds on the shift of the Intertropical Convergence Zone, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi :10.1002/2014GL060354.
38. Voigt, A., S. Bony, J.-L. Dufresne, and B. Stevens : Robust partitioning of inter-hemispheric atmospheric energy transport in comprehensive climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **en révision**
39. Wang, F, Dufresne, J-L, Cheruy, F. The effect of modelling water transport in soil on the flux at the atmosphere/land interface of a climate model. **En préparation** (déjà présenté à la conférence GEWEX à la Haye en 2014).
40. Williams, K...., S. Fermepin,...et al, **2013**: The Transpose-AMIP II experiments and its application to the understanding of Southern Ocean cloud biases in climate models. *J. Climate*, 26, 3258–3274.
41. T. Yao, V. Masson-Delmotte, J. Gao, L. Tian, W. Yu, X. Yang, C. Risi, C. Sturm, N. Kurita, Y. He, C Shi and S. Hou. A Review of Stable Isotope Studies in precipitation from observation stations and Ice Cores in Tibetan Plateau and surrounding regions. **2014** *Rev. Geophysics*

## Autres références

## Références

- [Becagli et al., 2004] Becagli, S., Proposito, M., Benassai, S., Flora, O., Genoni, L., Gragnani, R., Largiuni, O., Pili, S. L., Severi, M., Stenni, B., Traversi, Rita ; Udisti, R., and Frezzotti, M. (2004). Chemical and isotopic snow variability in east antarctica along the 2001/02 itase traverse. *Annals of Glaciology*, 39 (1) :473–482.
- [Bretherton et al., 2005] Bretherton, C. S., Blossey, P. N., and Khairoutdinov, M. (2005). An Energy-Balance Analysis of Deep Convective Self-Aggregation above Uniform SST. *J. Atmos. Sci.*, 62 :4273–4292.
- [Kim et al., 2012] Kim, D., Sobel, A. H., Genio, A. D. D., Chen, Y., Camargo, S. J., Yao, M.-S., Kelley, M., and Nazarenko, L. (2012). The tropical subseasonal variability simulated in the nasa giss general circulation model. *J. Clim.*, 25.
- [Lin and Coauthors, 2006] Lin, J.-L. and Coauthors (2006). Tropical intraseasonal variability in 14 ipcc ar4 climate models. part i : Convective signals. *J. Climate*, 19 :2665–2690. doi : <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3735.1>.
- [Madden and Julian, 1972] Madden, R. A. and Julian, P. R. (1972). Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period,. *J. Atmos. Sci.*, 29 :1109–1123.
- [Masarik and Beer, 2009] Masarik, J. and Beer, J. (2009). An updated simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the earth’s atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 114 :D11103, doi :10.1029/2008JD010557.
- [Muller and Held, 2012] Muller, C. J. and Held, I. M. (2012). Detailed investigation of the self-aggregation of convection in cloud-resolving simulations. *J. Atmos. Sci.*, 69 :2551–2565, doi : <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-11-0257.1>.
- [Popke et al., 2013] Popke, D., Stevens, B., and Voigt, A. (2013). Climate and climate change in a radiative-convective equilibrium version of ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(1) :1–14.
- [Proposito et al., 2002] Proposito, M., Becagli, S., Castellano, E., Flora, O., Genoni, L., Gragnani, R., Stenni, B., Traversi, R., Udisti, R., and Frezzotti, M. (2002). Chemical and isotopic snow variability along the 1998 itase traverse from terra nova bay to dome c, east antarctica. *Annals of Glaciology*, 35 :187–194.
- [Risi et al., 2012] Risi, C., Noone, D., Worden, J., Frankenberg, C., Stiller, G., Kiefer, M., Funke, B., Walker, K., Bernath, P., Schneider, M., Wunch, D., Sherlock, V., Deutscher, N., Griffith, D., Wernberg, P., Bony, S., Lee, J., Brown, D., Uemura, R., and Sturm, C. (2012). Process-evaluation of tropical and subtropical tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations. Part 2 : an isotopic diagnostic of the mid and upper tropospheric moist bias. *J. Geophys. Res.*, 117 :D05304.
- [Sherwood et al., 2014] Sherwood, S., Bony, S., and Dufresne, J.-L. (2014). Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, 505 :37–42, doi :10.1038/nature12829.