

Demande DARI 2015 – projet 0292

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

Description du projet de recherche

Camille Risi

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

L.M.D. - Octobre 2014

Demande sur l'IDRIS : 1.991 millions d'heures CPU sur Ada, 108 Tera-octets sur Ergon.

Cette année, nous ne demandons pas d'heures sur Curie. Les utilisateurs de Curie étaient surtout ceux qui s'occupaient de l'évolution et de la mise au point de la version de référence du modèle LMDZ. Cette activité fera en 2015 l'objet d'heures spécifiques (section 1.2). Les autres utilisateurs préfèrent tirer profit de leur expérience sur Ada pour se concentrer sur la réalisation de simulations dans un environnement bien connu et sur leur exploitation scientifique.

Table des matières

1	Présentation générale	2
1.1	Les modèles utilisés	2
1.2	Lien avec les autres projets	2
1.3	Vue d'ensemble des quatre thèmes du projet	3
1.3.1	Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat	3
1.3.2	Variabilité des températures en Atlantique tropical	4
1.3.3	Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE	4
1.3.4	Isotopes de l'eau	4
2	Estimation des ressources consommées par les diverses configurations	4
3	Demande détaillée	6
3.1	Etude des processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat	6
3.1.1	Etude de l'organisation de la convection dans LMDZ en configuration d'équilibre radiatif-convectif (RCE)	6
3.1.2	Convection, Montagnes, stratosphère, variabilité équatoriale	7
3.1.3	Microphysique des nuages froids	8
3.2	Variabilité des températures en Atlantique tropical	9

3.3	Evolution, validation et utilisation du modèle ORCHIDEE	10
3.3.1	Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE	10
3.3.2	Couplage LMDZ-ORCHIDEE	11
3.3.3	Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique	12
3.4	Isotopes de l'eau	13
3.4.1	Cycle de l'eau tritiée	13
3.4.2	Evaluation des processus convectifs et nuageux	14
3.4.3	Applications paleo-climatiques et régionales	14
3.4.4	LMDZ-iso au Cénozoïque	15
4	Méthode	17
4.1	Le modèle LMDZ	17
4.2	Le modèle ORCHIDEE	17

1 Présentation générale

1.1 Les modèles utilisés

Le projet est centré sur le développement et l'utilisation du modèle de circulation générale LMDZ, du modèle de surface continentale ORCHIDEE, et du modèle d'océan NEMO. Les différents modèles peuvent chacun être utilisé seuls (offline) ou couplés entre eux.

- LMDZ est le modèle de circulation général atmosphérique développé au LMD. Il constitue la composante atmosphérique du modèle couplé de l'IPSL. Ce dernier est utilisé pour les simulations de changement climatique des programmes internationaux CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), dont l'analyse alimente les rapports d'évaluation de l'IPCC (voir projet 239). Il est un outil d'étude de l'atmosphère et du climat pour plusieurs équipes en France et à l'étranger.
- ORCHIDEE est le modèle de surface continentale développé à l'IPSL. Il constitue la composante continentale du modèle couplé de l'IPSL. Il est utilisé seul ou couplé à LMDZ pour la compréhension des processus hydrologiques continentaux et des couplages sol-atmosphère. La version dite « hydrologie à 11 couches », dont le développement a été finalisé récemment, sera la plus utilisée en 2015.
- NEMO est le modèle de circulation générale océanique développé au LOCEAN. Il constitue la composante océanique du modèle couplé de l'IPSL. Dans cette demande, il est utilisé seul pour la compréhension des processus océaniques.

Dans notre demande, la grande majorité des moyens de calcul demandés implique des simulations avec LMDZ.

1.2 Lien avec les autres projets

Ce projet est très lié :

- au projet 1167, consacré au développement et à l'utilisation de la version transport de LMDZ pour des études de chimie atmosphérique et de transport de traceurs passifs,
- au projet 239, qui utilise LMDZ comme élément du modèle couplé Océan-Atmosphère-Végétation.

Cette année, deux composantes du projet sont devenues indépendantes :

- la mise au point et le réglage de la prochaine version d'LMDZ, LMDZ6, aura des heures spécifiques liées au projet CMIP6.

thème	calcul sur Ada (k heures CPU)	stockage sur Ergon (To)
Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat	1 280	76
Etude des interactions océan-atmosphère lors des événements ENSO	4	1
Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE	245	20
Isotopes de l'eau	462	11
Total	1 991	108

TAB. 1 – Tableau résumant les demandes de temps de calcul et de stockage sur l’IDRIS et sur Curie.

– L’étude du rôle des eaux souterraines sur le couplage continent-atmosphère fait maintenant l’objet d’une demande séparée dans le cadre d’un projet ANR, qui a été accepté. Malgré tout, notre demande n’a pas diminué au contraire. Ceci est lié au raffinement croissant de la résolution du modèle LMDZ.

1.3 Vue d’ensemble des quatre thèmes du projet

Le projet porte sur 4 grands thèmes, résumés ci-dessous. Les demandes en temps de calcul et en espace de stockage par thèmes sont détaillées dans le tableau 1.

1.3.1 Etude de processus atmosphériques et de leur représentation dans les modèles de climat

Le modèle LMDZ est utilisé pour mieux comprendre certains processus atmosphériques et mieux prévoir leur évolution en changement climatique.

Etude de l’organisation de la convection dans LMDZ en configuration d’équilibre radiatif-convectif (RCE) Nous essayons de mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent la circulation générale de l’atmosphère, le rôle des nuages et de la vapeur d’eau, et sa réponse à un réchauffement global. Pour cela, nous nous plaçons dans le cadre très idéalisé d’une aqua-planète en équilibre radiatif-convectif (ensoleillement et température de surface océanique uniformes sur l’ensemble de la planète, pas de rotation) (section 3.1.1).

Montagnes, ondes de gravité et stratosphère, convection L’équipe « Dynamique et Physique de l’Atmosphère et de l’Océan » (DPAO), implantée à l’Ecole Normale Supérieure et à l’école Polytechnique, participe à l’amélioration des paramétrisations physiques du modèle LMDZ et utilise ce modèle pour identifier les processus dynamiques fondamentaux qui contribuent à la variabilité du climat aux grandes échelles d’espace et de temps. Parmi ces processus, nous étudions en particulier l’influence des montagnes sur le climat ou l’influence de la représentation de la convection profonde sur la variabilité du climat tropicale, en particulier l’oscillation de Madden-Julian et les systèmes dépressionnaires (section 3.1.2).

Microphysique des nuages froids Les traînées de condensation formées par les avions peuvent persister pendant des heures, voire se transformer en cirrus. Nous cherchons à modéliser cet effet dans LMDZ et à en quantifier le forçage radiatif (section 3.1.3).

D'autre part, des activités ont débuté pour essayer d'améliorer la représentation des nuages froids dans LMDZ, en particulier la phase mixte liquide/glace (section 3.1.3) et les brumes en Antarctique (section 3.1.3).

1.3.2 Variabilité des températures en Atlantique tropical

Nous analysons les mécanismes atmosphériques et océaniques impliqués dans le développement du mode de variabilité interannuelle équatorial de type « ENSO Atlantique » (section 3.2).

1.3.3 Evolution, validation et utilisation du modèle de surface continentale ORCHIDEE

Le couplage des processus de surface continentale avec les processus atmosphériques constitue un élément clef pour aboutir à une bonne simulation climatique. Ainsi, nous proposons de valider et d'améliorer la représentation de l'hydrologie de surface dans le modèle ORCHIDEE (section 3.3.1), et de valider son couplage avec LMDZ (section 3.3.2). Le modèle de surface continental ORCHIDEE, couplé ou non à LMDZ, est aussi un outil adapté pour les études visant à :

- mieux comprendre les processus hydrologiques sur la surface continentale dans le présent, par exemple les interactions humidité du sol-climat (section 3.3.2),
- mieux comprendre et prévoir l'évolution future du cycle hydrologiques et des ressources en eau. C'est le but des travaux proposés sur l'évolution des débits amazoniens (section 3.3.3).

1.3.4 Isotopes de l'eau

La composition isotopique de l'eau (rapport des concentrations en molécules lourdes HDO ou $H_2^{18}O$ et légères $H_2^{16}O$) est affectée par les changements de phase lors du cycle de l'eau. Depuis 2006, nous essayons d'explorer la possibilité d'utiliser les mesures de compositions isotopiques de l'eau pour mieux évaluer les modèles de climat en général, et LMDZ et ORCHIDEE en particulier.

- Nous poursuivrons nos travaux sur l'évaluation de la représentation des processus convectifs et nuageux et de leur rôle dans la variabilité intra-saisonnière (section 3.4), dans le cadre du projet ANR CONV-ISO.
- Des travaux ont débuté sur le transport d'un nouvel isotope : le Tritium (section 3.4.2), dans le cadre d'un projet ERC COMBINSO d'Amaelle Landais (LSCE).
- Des travaux sont en cours sur l'interprétation d'enregistrements isotopiques paléo-climatiques au cours de l'Holocène (section 3.4.3) et du Cénozoïque (section 3.4.4) dans des régions où la topographie nécessite une modélisation régionale avec résolution fine.

2 Estimation des ressources consommées par les diverses configurations

L'essentiel du temps calcul de ce projet est consommé par des simulations avec le modèle atmosphérique LMDZ5 couplé ou non au modèle de sol et de végétation ORCHIDEE. Le modèle complet s'appelle LMDZOR.

Il existe plusieurs versions d'LMDZ :

version de LMDZ → grille↓	LMDZ5A	LMDZ5B	LMDZ6	LMDZ5A- iso	LMDZ5B- iso
R96x71x39	-	-	-	200	300
R96x95x39	100	220	240	-	-
R144x142x39	200	670	700	-	600
R144x142x79	-	-	1780	-	-
R144x142x39 zoomé	-	-	-	1900	-

TAB. 2 – Temps de calcul, en heures CPU par an que prennent les différentes versions de LMDZ pour différentes résolutions horizontales et verticales prévues en 20145 dans cette demande. Les cases non renseignées sont celles pour lesquelles aucune simulation n'est prévue dans cette demande.

- 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.
- LMDZ5B est l'autre version utilisée pour CMIP5. Elle inclue de nombreuses améliorations dans les paramétrisations de la convection profonde, peu profonde et de leur couplage ([Rio et al., 2009, Rio et al., 2013, Hourdin et al., 2012]). LMDZ5A et LMDZ5B donnant des résultats assez différents, il est intéressant de les comparer.
- LMDZ6 est la version qui sera utilisée pour CMIP6. Elle se base sur LMDZ5B, mais inclue des améliorations supplémentaires dans les paramétrisations de la convection et de nuages, ainsi qu'un nouveau réglage.
- LMDZ-iso est la version isotopique d'LMDZ ([Risi et al., 2010]). Elle est disponible pour LMDZ5A et LMDZ5B.

La résolution horizontale et verticale est définie par la grille. Par exemple, R96x71x39 signifie qu'il y a 96 points en longitude (3.75° de résolution), 71 points en latitude (2.5° de résolution) et 39 niveaux verticaux. La plupart des simulations de notre demande seront réalisées avec l'une des grilles suivantes :

- R96x71x39 est encore plus basse que la résolution dite « basse » de CMIP5. Elle permet d'économiser du temps de calcul et n'est plus utilisée que pour la version isotopique.
- R96x95x39 est la résolution appelée « basse » dans CMIP5, maintenant appelée « très basse ». Elle permet d'économiser du temps de calcul et est utilisée quand les résultats ne sont pas crucialement sensibles à la résolution horizontale.
- R144x142x39 est la résolution dite « moyenne » dans CMIP5, maintenant appelée « basse ».
- R144x142x79, maintenant appelée « basse », sera celle utilisée par LMDZ6 dans CMIP6.
- R144x142x39-zoomé correspond à une variante irrégulière de la grille R144x142x39. Elle permet d'atteindre des résolutions aussi fines que 50km dans la région du zoom.

Les ressources consommées par les simulations réalisées avec ces diverses versions et grilles sont indiquées dans le tableau 2.

Les post-traitements se font la plupart du temps sur des noeuds dédiés sur Adapp et ne sont pas comptabilisés. Seules certaines chaînes de lancement nécessitent des post-traitements (rebuild) sur Ada. Dans ce cas, on doit rajouter 20 % pour le post-traitement par rapport au temps de calcul.

3 Demande détaillée

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

Demande totale pour le thème :

$871\ 000 + 295\ 000 + 114\ 000 = 1\ 280\ 000$ heures CPU sur Ada,

$20 + 39 + 17 = 76$ To sur Ergon

3.1.1 Etude de l'organisation de la convection dans LMDZ en configuration d'équilibre radiatif-convectif (RCE)

Sandrine Bony et David Coppin (thèse)

Demande : 871 000h CPU sur Ada, 20 To sur Ergon

En 2014, nous avons réalisé de nombreuses simulations dans le but d'étudier l'organisation à grande échelle de la convection avec LMDZ5A en configuration Equilibre Radiatif-Convectif (RCE). Le but en 2015 est d'étendre ces travaux aux modèles LMDZ5B et LMDZ6 :

- LMDZ5B a un contenu physique très différent de LMDZ5A, ce qui permet d'étudier la sensibilité de l'organisation de la convection à la représentation des processus physiques
- LMDZ6 sera la version du modèle dans laquelle les développements futurs seront implémentés. Un des objectifs de la thèse de David Coppin est d'implémenter l'organisation de la convection dans le modèle du LMD. Pour cela, on est obligé de passer par une étude approfondie sur LMDZ6 en version RCE pour comprendre comment l'organisation de la convection est contrôlée et impacte le système climatique. Notre demande d'heure très élevée reflète la brutale augmentation des coûts en calcul due à l'utilisation de LMDZ6 (pourtant en basse résolution).

Pour chacune de ces versions de modèle, de nombreux tests de sensibilité seront réalisés :

- Des tests de sensibilité à la température de surface (SST) de la mer pour des SSTs allant de 290K à 310K
- Pour chaque SST, les simulations ont été faites dans le cas de référence (avec effets radiatifs des nuages) puis en désactivant ses effets radiatifs dans la couche limite uniquement puis dans toute l'atmosphère ce qui fait un ensemble de 66 simulations pour tester la sensibilité de l'organisation de la convection à la SST et aux effets radiatifs des nuages
- Des tests de sensibilité aux conditions initiales. Afin de limiter l'utilisation des ressources, ces tests de sensibilité ont été faits uniquement pour des simulations dont la SST était fixée à 300K ou 305K. Pour chaque température, on a fait partir les simulations de deux états initiaux différents (des conditions initiales d'état organisé ou d'état désorganisé).
- Pour ces quatre types d'état initiaux (300K ou 305K, à partir d'un état organisé ou non), on a ensuite testé la sensibilité de l'organisation de la convection à différents paramètres (vent, température, humidité) en imposant à $t=0$ des profils moyennés de ces différents paramètres, un par un puis en combinant les profils moyennés. Suite à certains résultats, il a également fallu faire des tests de sensibilité sur différentes parties de la colonne atmosphérique : surface uniquement, couche limite, troposphère libre. Au total, cela fait un ensemble de $4 \times 18 = 72$ simulations pour tester les conditions initiales et leur impact sur l'organisation de la convection.
- Des tests rapides qui s'imposaient selon les résultats des tests : tests de sensibilité à certaines niveaux du modèle qui ont nécessité 10 simulations au total

Si l'on récapitule, on a donc un total de $66+72+10=148$ simulations rien que pour faire des tests de sensibilité.

Pour étudier ces processus, on procède à des modifications de la physique du modèle. On cherchera par exemple à modifier les interactions entre humidité et rayonnement en imposant un profil d'humidité constant avant le code radiatif ou tout autre processus qui a l'air important. Pour LMDZ5A, ces études de processus (qui doivent être faites pour au moins deux SSTs différentes) ont un coût évalué à 12500 heures de calcul.

Pour LMDZ5A, nous avons utilisé 42500 heures de calcul (30000 pour les tests de sensibilité et 12500 pour l'étude des processus). A durée de simulation constante, LMDZ5B et LMDZ6 prennent respectivement 2,5 fois et 18 fois plus de temps en heures de calcul. On applique ces facteurs pour estimé le temps nécessaire :

Temps de calcul : $30000 \times 2.5 + 30000 \times 18 + 12500 \times 2.5 + 12500 \times 18 \simeq 871\ 000$ heures

Espace de stockage : environ 20 To.

3.1.2 Convection, Montagnes, stratosphère, variabilité équatoriale

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

Demande : 295 000 h CPU sur Ada, 39 To sur Ergon

Paramétrisations stochastiques et ondes de gravité Nous souhaitons mesurer l'impact des paramétrisations stochastiques (déclenchement de la convection, ondes de gravité) récemment introduites dans LMDZ sur la simulation du climat. Les paramétrisations stochastiques sont une façon de représenter la variabilité naturelle et son impact sur les incertitudes des projections climatiques. Nous nous intéresserons aux variabilités lentes telles que celles associées à l'Oscillation Quasi-biennale ou les réchauffement stratosphérique soudain. Du fait de l'extrême basse fréquence des phénomènes en question, ces études vont nous demander de nombreuses simulations, avec la résolution $95 \times 96 \times 72$.

Ces simulations intégrerons aussi les études sur les effets orographiques et sur les ondes de gravité issues de fronts. En effet, en 2014 nous avons commencé à représenter les ondes issues des fronts en utilisant un formalisme théorique présenté dans une série de papiers récents ([Lott et al., 2010, Lott et al., 2012]).

Temps de calcul : $10 \text{ simulations} \times 50 \text{ ans} \times 200h = 100\ 000$ heures

Espace de stockage : 15To.

Préparation de CMIP6 D'autre part, nous serons aussi amené à faire des simulations à plus haute résolution afin de préparer l'exercice CMIP6. Pour cette préparation, le ré-équilibrage des schémas d'ondes de gravité va nécessiter un dizaine de simulations de 5 ans à la résolution $R144 \times 145 \times 80$, et une de 80ans pour documenter l'irrégularité de l'oscillation quasi-biennale. Des sorties haute fréquence sont nécessaires.

Temps de calcul : $(10 \text{ ans} \times 5 \text{ simulations} + 80 \text{ ans}) \times 1\ 200h = 150\ 000$ heures

Espace de stockage : 20 To.

Transitions "tropiques-extratropiques" des ouragans Un projet entre le LMD et le Département des sciences de la Terre et de l'environnement de l'Université de Columbia (JP Duvel et A. Sobel) démarre en 2014. Ce projet vise à étudier si les États-Unis, l'Europe ou les deux peuvent

devenir plus fréquemment ou sévèrement touchées dans l'avenir par des transitions "tropiques-extratropiques" des ouragans. Une première simulation de type AMIP a été réalisée avec LMDZ zoomé sur l'Atlantique Nord ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) et guidé à l'extérieur du zoom par les réanalyses ERA-I. Les résultats sont encourageants et on envisage maintenant d'analyser ces simulations en détail, de comparer les résultats aux réanalyses ERA-I puis de tester la sensibilité des résultats aux schémas de convection et de couche limite. Un objectif à plus long terme est d'analyser l'évolution de l'activité des cyclones et des transitions extratropicales dans un climat plus chaud. À cette fin, des simulations similaires forcées par des sorties CMIP5 seront effectuées. Des simulations d'ensemble ou sur plusieurs années seront nécessaires.

Temps de calcul : 100 ans \times 450h = 45 000 heures

Espace de stockage : 4 To.

3.1.3 Microphysique des nuages froids

Demande : 114 000 heures CPU sur Ada ; 17 To sur Ergon.

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

Olivier Boucher, Marie Nguyen (post-doc)

Nous souhaitons continuer l'étude sur les traînées de condensation des avions. Le projet financé par la Direction Générale de l'Aviation Civile a pris un peu de retard compte-tenu du congé maternité de Marie Nguyen en 2014 et reprend donc quelques éléments de la demande 2014.

Il nous reste dans un premier temps à effectuer des simulations de 3 années (2010-2012) avec le modèle LMDZ nouvelle physique en mode guidé zoomé au-dessus du SIRTa à la résolution R48x32x39. La période 2010-2012 correspond aux observations réalisées au SIRTa et au nouveau jeu de données de vol d'avions fourni par la DGAC. Les premières simulations sur le mois de juillet 2011 ont permis de régler la paramétrisation. Une approche stochastique est envisagée pour réduire la probabilité estimée de formation des traînées.

Dans un deuxième temps, nous allons effectuer des simulations climatiques non guidées et non zoomées à la résolution R96x95x39 afin de quantifier le forçage radiatif dû aux traînées linéaires à l'échelle globale. Ces simulations utiliseront les paramètres optimisés dans la première partie du travail. Cependant, des études de sensibilité aux paramètres optiques des traînées de condensation seront nécessaires ; un ensemble de 5 membres est envisagé. On testera aussi plusieurs inventaires des vols avion à l'échelle globale et cycle diurne des vols dans les différentes régions du monde (cette information étant généralement peu contrainte dans les inventaires) ; un ensemble de 6 membres est donc envisagé. Chaque simulation sera d'une durée de 3 ans de manière à éliminer la variabilité naturelle dans le calcul du forçage radiatif.

Temps de calcul :

5 simulations LMDZ5B de 3 ans chacune à la résolution R48x32x39 en mode guidé zoomé : $3 \times 5 \times 60 = 900$ heures

5 simulations LMDZ5B de 3 ans à la résolution 96x95x39 = $5 \times 3 \times 224 = 3\ 360$ heures

6 simulations LMDZ5B de 3 ans à la résolution 96x95x39 = $6 \times 3 \times 224 = 4\ 032$ heures

Avec le post-processing sur Ada, on obtient environ 8 000 heures.

Espace de stockage : 1 To

Représentation des nuages hauts et de la phase mixte (nouveau)

Jean-Baptiste Madeleine, Marine Bonazzola

L'amélioration de la représentation des nuages hauts dans les modèles climatiques est essentiel à la bonne représentation de leur forçage radiatif, notamment en contexte de changement climatique. Des efforts récents ont porté sur l'amélioration de la dépendance de la phase de l'eau à la température dans LMDZ (proportion de cristaux de glace et gouttelettes d'eau liquide en surfusion en fonction de la température) afin de rapprocher le modèle des dernières observations. L'impact sur les simulations climatiques a été évalué seulement pour la partie rayonnement du modèle. Suite à la récente prise en compte de la chaleur latente échangée lors des changements de phase de la glace, il devient possible d'étudier l'impact de cette meilleure représentation de la phase mixte non seulement pour le rayonnement mais également pour la thermodynamique. Des résultats 1D préliminaires montrent que cet impact est majeur. De nouvelles simulations 3D de sensibilité à la gamme de température utilisée pour la phase mixte permettraient donc d'améliorer la représentation des nuages hauts.

Nous aurions besoin à ce titre de trois simulations (une de référence et deux configurations à tester de la phase mixte) en basse résolution (R144x142x79) de 10 ans de type AMIP.

Temps de calcul : 10 ans \times 1780 heures \times 3 simulations \simeq 53 000 heures.

Espace de stockage : 8 To

Brumes et précipitations en Antarctique (nouveau)

Jean-Baptiste Madeleine

De nouvelles observations réalisées en Antarctique par les équipes du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (Grenoble) ainsi que dans le cadre du nouveau cas d'étude GABLS (GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study) permettent une connaissance approfondie de l'humidité relative dans les premières dizaines de mètres au dessus de la surface de Dome C, des profils de températures de la couche limite, ainsi que des mesures satellites des taux de précipitation ([Palerm et al., 2014]). Le comportement de la physique de LMDZ dans ces régions est très peu connu, et des simulations détaillées du climat de la calotte, réalisées en parallèle des améliorations de la microphysique du modèle, seraient un apport significatif. Cela permettrait de mieux comprendre les processus microphysiques froids non seulement dans la haute troposphère (projets précédents) mais aussi proche de la surface dans les conditions très différentes de la calotte Antarctique.

Ces simulations seraient réalisés également avec la physique du modèle régional MAR ([Gallée et al., 2005]) récemment implémentée dans le modèle LMDZ et conçue spécialement pour les environnements froids tels le Groenland ou l'Antarctique.

Trois simulations seraient donc réalisées : deux au cours du développement de la microphysique froide de LMDZ et une avec la physique du modèle MAR pour comparaison. Ces simulations seraient de type AMIP guidées et effectuées en basse résolution (R144x142x79) zoomée sur l'Antarctique, le tout sur une durée de 10 ans.

Temps de calcul : 10 ans \times 1780 heures \times 3 simulations \simeq 53 000 heures

Espace de stockage : 8 To

3.2 Variabilité des températures en Atlantique tropical

Malick Wade, Amadou Thierno Gaye, Marta Martin del Rey, Belen R. de Fonseca, Alban Lazar

Demande totale pour le thème :

4 000 h CPU sur Ada,

0.5 To sur Ergon

L'étape suivante consiste à détailler le rôle des anomalies interannuelles des vents de surface dans le forçage des Niños Atlantique durant la période 1945-1995, en distinguant les sous régions du bassin (notamment alisés nord ou sud, eux même décomposés en zones ouest et est). Ceci autant pour le flux net atmosphérique de chaleur que pour le forçage des ondes équatoriales et côtières ([Polo et al., 2008]). Des expériences de sensibilité basées sur le découpage géographique du forçage du vent seront effectuées. Nous analyserons les Niños et Niña Atlantique séparément pour évaluer les éventuelles non-linéarités des réponses. Ainsi, un ensemble de 10 expériences est proposé autour de la simulation de référence :

- 2 études de cas d'une année Atlantique Niño et une année Niña. Les anomalies des vents de surface seront considérées dans l'Atlantique tropical Nord seulement, et seront climatologiques ailleurs.
- 2 études équivalentes pour le Sud seulement.
- 4 études de cas Atlantique Niño et Niña avec des anomalies des vents de surface dans le Nord-Ouest seulement puis le Nord-Est seulement.
- 4 études équivalentes pour le Sud seulement.
- 2 études de cas d'une année Atlantique Niño et une année Niña avec les anomalies de vents de surface dans la bande équatoriale (5N-5S).
- 2 études complémentaires où les anomalies sont imposées partout sauf dans la bande équatoriale (5N-5S).

Les simulations dureront 3 ans chacune, de manière à introduire les perturbations progressivement, et à analyser l'événement Nino ou Nina à cheval sur 2 ans.

*Temps de calcul : 3 ans \times 80h * 16 expériences = 3840 heures.*

Espace de stockage : 1 To.

3.3 Evolution, validation et utilisation du modèle ORCHIDEE

Demande totale pour le thème :

10 000 + 108 000 + 38 000 = 156 000 heures CPU sur Ada

0.5 + 9.5 + 10 = 20 To sur Ergon

3.3.1 Suivi des versions et performances d'ORCHIDEE

Joséfine Ghattas

10 000 heures CPU sur Ada, 0.5 To sur Ergon

Comme en 2014, il s'agit de faire des simulations courtes mais récurrentes pour valider la compilation, la parallélisme (mode MPI seul et bientôt hybrid MPI-OpenMP), la reproductibilité, restartabilité et les performances dans différentes configurations. En effet, l'utilisation d'ORCHIDEE est très diversifiée avec une grande communauté d'utilisateurs. Ils existent de nombreuses configurations possibles du modèle, en forcé et en couplé avec LMDZ, qui nécessitent chacune une validation régulière.

3.3.2 Couplage LMDZ-ORCHIDEE

Frédérique Cheruy, Agnès Ducharne, Sonia Ait-Mesbah (thèse), Fuxing Wang (post-doc)

Demande : 245 000 heures sur Ada, 9.5 To sur Ergon

Evaluation de LMDZOR en mode global : Les tests d'évaluation en mode global de LMDZOR se poursuivront de façon à disposer d'une version de référence qui pourra être intégrée au modèle de climat de l'IPSL.

LMDZ5B sera utilisé avec la résolution R144x142x39 et couplé avec ORCHIDEE 11 couches.

Temps de calcul : 5 simulations \times 10 ans \times 670h = 33 500 heures de calcul sur Ada

Espace de stockage : 1.5 T.

Analyse de l'impact des propriétés thermiques du sol dans le couplage sol/atmosphère en changement climatique (thèse de Sonia Ait Mesbah). Les propriétés thermiques du sol, de par leur dépendance à l'humidité impactent de façon significative le bilan énergétique à l'interface sol/atmosphère. L'assèchement des sols induit par le changement climatique est donc susceptible d'impacter ces propriétés thermiques et par suite le bilan énergétique à la surface. Nous proposons d'effectuer et d'analyser des expériences idéalisées de sensibilité (time-slice) pour quantifier cet impact et identifier les zones susceptibles d'être majoritairement affectées.

Nous réaliserons 4 simulations (mise au point de l'expérience de sensibilité, contrôle climat présent, contrôle climat futur, climat futur avec propriétés thermique du sol en climat présent) de 30 ans avec LMDZ5B en R96x95x39.

Temps de calcul :

Temps de calcul : 4 \times 30 ans \times 220h = 26 000 heures

Espace de stockage : 2 T

Préparation d'une configuration zoomée-guidée de LMDZOR à haute résolution sur l'Europe et rôle du couplage sol/atmosphère dans les canicules en Europe). Le projet ANR SEEN s'inscrit dans la dynamique actuelle de mutualisation accrue des outils et des codes de calculs, avec une volonté de renforcer les synergies entre la communauté des impacts et celles du climat. Il exploite la possibilité qu'offre LMDZOR de resserrer la grille de calcul pour atteindre des résolutions comparables à celles des modèles climatiques régionaux sur une partie du globe tout en maintenant la cohérence de simulations globales et à un coût moindre par rapport à des simulations à haute résolution sur l'ensemble du globe. Il répond aussi à une demande d'autres communautés de pouvoir tester de nouveaux modules pensés pour des résolutions plus élevées que celles classiquement utilisées par les GCM. Enfin, on constate que les modèles de climat, régionaux comme globaux, ont des défauts communs qui rendent difficile l'utilisation des projections climatiques pour de nombreuses études d'impact. C'est par exemple le cas du biais chaud estival aux moyennes latitudes que partagent beaucoup de modèles de climat en Europe. [Cheruy et al., 2014] ont montré qu'il était fortement dépendant des interactions sol/atmosphère d'une part et que le couplage de la nouvelle hydrologie à LMDZ permettait de le corriger d'autre part. Pour toutes ces raisons, nous souhaitons effectuer et analyser des simulations zoomées guidées sur l'Europe avec une résolution de l'ordre de 50km en intégrant les développements les plus récents de la physique atmosphérique comme du modèle de surfaces continentales.

Nous réaliserons des simulations guidées en R128x118x39, couplées avec ORCHIDEE 11 couches.

Temps de calcul : 50 ans \times 700h = 35 000 heures

Espace de stockage : 2 T.

Analyse du biais chaud sur les Grandes Plaines du Sud (SGP) des Etats Unis Ceci s'intègre dans le projet CAUSES (Clouds Above the United States and Errors at the Surface).

Les analyses montrent que l'impact radiatif des nuages et l'évaporation à la surface sont trop faibles pour les modèles qui développent un biais chaud en été ([Cheruy et al., 2014]), mais les mécanismes conduisant à ces situations ne sont pas encore clairement isolés. Lorsque les modèles de climat sont utilisés avec des configurations de prévision numérique du temps, ces biais sont déjà présents au bout de 5 jours de simulations (Ma et al., 2014). La région des grandes plaines au sud des Etats-Unis est particulièrement affectée par ce biais chaud et les propriétés radiatives des nuages, le bilan d'énergie à la surface et les précipitations y ont particulièrement bien été observés pendant la campagne Mid-Latitude Continental Convective Clouds Experiment (Avril-Juin 2011, site ARM-SGP) Nous participerons avec LMDZOR à l'exercice d'intercomparaison de modèles proposé dans le cadre du projet CAUSES/GASS/GEWEX. L'expérience prévoit des simulations en mode prévision du temps (sur 5 jours tous les jours de la campagne). Ce type d'approche demande une mise en route relativement longue au départ pour initialiser correctement les couches profondes du sol, on suivra la méthodologie proposée par [Boyle et al., 2005].

Nous réaliserons 15 ans de simulation en R128x118x79 zoomée, avec LMDZ5B couplé à ORCHIDEE 11 couches.

Temps de calcul : 15 ans \times 1780h \simeq 26 500 heures

Espace de stockage : 1 To

Rôle de l'hydrologie de surface, de la végétation dans la réponse du climat au forçage anthropique Ce projet IMPULSE (H2020) a été soumis au mois de septembre. Il prévoit d'approfondir l'analyse du rôle des processus de sol dans la réponse du climat aux forçages anthropiques. S'il est retenu, les premières simulations devraient se faire dans le courant de l'année.

- Une première étape sera de disposer d'une climatologie des variables continentales (température, humidité) fondée sur l'observation et cohérente avec le modèle de sol du modèle de climat de l'IPSL. Cette climatologie sera établie en forçant le modèle de sol avec des analyses dans le cadre du programme d'intercomparaison des modèles de sols (LS3MIP). Nous réaliserons 100 ans de simulations avec ORCHIDEE 11 couches forcé en résolution 144x142. Le coût de cette simulation est mineur
- La climatologie ainsi obtenue sera ensuite utilisée pour contraindre le modèle de sol dans les simulations couplées avec l'atmosphère. Le but est de s'affranchir des erreurs induites par le modèle atmosphérique sur les variables de sol. Des tests de sensibilité seront nécessaires pour mettre au point le guidage. Nous réaliserons environ 2 simulations de 100 ans avec LMDZ6 couplé à ORCHIDEE 11 couches en résolution R144x142x79, sur 32 processeurs

Temps de calcul : 2 simulations \times 35 ans \times 1780h \simeq 124 000h.

Espace de stockage : 3 To

3.3.3 Evolution des débits sur le bassin amazonien en changement climatique

Matthieu Guimberteau, Agnès Ducharne, Philippe Ciais

Demande : 38 000 heures CPU sur Ada, 10 To sur Ergon

Les ressources allouées par les machines de l'IDRIS seront utilisées pour commencer à remplir les premiers objectifs du programme de recherche de l'Union Européenne ERC Synergy Grants

IMBALANCE-P (Effects of phosphorous limitations on Life, Earth system and Society). Ce projet réunit une équipe multidisciplinaire de chercheurs, autour de la problématique relative à l'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'azote, au phosphore et au carbone. Il permettra d'étudier les changements de bilans en carbone, phosphore et azote dans les différents écosystèmes de la planète et d'évaluer l'impact d'un déséquilibre existant entre ces trois éléments sur Terre. Le phosphore est une ressource rare mais essentielle sur la Terre. Contrairement au carbone et à l'azote, qui sont disponibles en abondance, les réserves en phosphore sont limitées dans la plupart des milieux naturels, et la tendance devrait se poursuivre au cours du siècle prochain.

Aussi, les modèles de surface se doivent de prendre en compte les cycles d'azote et de phosphore en plus de celui du carbone. C'est pourquoi, dans le cadre de ce projet, de nombreux développements sont prévus pour introduire ces cycles dans la version actuelle d'ORCHIDEE. Ces développements du code nécessiteront une batterie de tests aussi bien à l'échelle globale que sur site. Nous donnons ici les estimations de temps de calcul demandées uniquement pour les simulations globales, le temps de calcul sur site étant négligeable. Une trentaine de simulations incluant différentes paramétrisations est envisagée.

Nous utiliserons ORCHIDEE en mode global et offline avec l'hydrologie 11 couches, couplé aux modules STOMATE, de routage et éventuellement d'azote. La résolution spatiale sera de $1^\circ \times 1^\circ$. Le temps réel de base estimé pour ce type de protocole et en utilisant 32 coeurs est de 16min/an. Nous imposerons 350 ans de spinup analytique et réaliserons des simulations de 30 ans à partir de ce spinup. Notre demande est donc :

Temps de calcul : (30 simulations \times 30 ans + 10 spinups \times 350 ans) \times 32 coeurs \times 16min \simeq 38 000 heures

Espace de stockage : 10 To

3.4 Isotopes de l'eau

Camille Risi, Obbe Tuinenbourg (post-doc), Alexandre Cauquoin (post-doc), Pierre Sepulchre, Yannick Donnadiou, Svetlana Betsyun

Demande totale pour le thème :

41 000 + 23 000 + 117 + 281 = 462 000 heures CPU sur Ada,

1+9+1+1= 11 To sur Ergon

Les isotopes stables de l'eau (HDO , $H_2^{18}O$, $H_2^{17}O$) peuvent être utilisés pour mieux comprendre les processus hydrologiques atmosphériques et continentaux et mieux évaluer leur représentation dans les modèles de climat. Ils ont été implémentés dans le modèle LMDZ depuis plusieurs années, conduisant au modèle appelé LMDZ-iso.

3.4.1 Cycle de l'eau tritiée

Demande : 41 000 heures CPU sur Ada, 1 To sur Ergon

L'objectif en 2015 est d'implémenter la production de tritium anthropique par les essais nucléaires de manière la plus détaillée possible. Nous avons déjà une liste des essais nucléaires avec leur date, leur localisation ainsi que leur puissance (qui nous permet de déduire le tritium rejeté dans l'atmosphère). Nous ajouterons également un fichier de forçage pour la concentration de HTO à la surface des océans durant cette période. La simulation sera sur la période 1940-2008 avec la même résolution que précédemment (R96x71x39). Il sera intéressant de comparer la baisse de la teneur en tritium dans les précipitations depuis le milieu des années 1960 reproduite dans le modèle avec

des données de l'IAEA. Ceci nous permettra d'évaluer le modèle en particulier sur la dynamique des mélanges verticaux. Nous nous focaliserons sur la région Antarctique, une zone particulièrement sensible aux injections de masses d'air stratosphériques. Nous nous réservons la possibilité d'effectuer un test de sensibilité pour mieux comprendre les mécanismes associés.

Temps de calcul : $300h \times 69 \text{ ans} \times 2 \text{ tests} = 41\,000 \text{ heures}$

Espace de stockage : $10 \text{ Go} \times 69 \text{ ans} \times 2 \text{ tests} = 1 \text{ To}$

3.4.2 Evaluation des processus convectifs et nuageux

Demande : 23 000 heures CPU sur Ada, 8 To sur Ergon

En 2015, nous prévoyons de continuer d'étudier dans quelle mesure la composition isotopique de l'eau reflète la représentation des processus convectifs et nuageux. En particulier, dans le cadre du projet ANR CONV-ISO, nous étudierons comment LMDZ représente les processus convectifs et nuageux au cours des variations intra-saisonnières comme l'oscillation de Madden-Julian, et en évaluerons le réalisme.

- Nous continuerons à tester la sensibilité des processus convectifs et nuageux aux paramètres et paramétrisations du modèle. En particulier, nous testerons la nouvelle paramétrisation stochastique du déclenchement et testerons différents paramètres jouant sur le déclenchement et la fermeture de la convection. Pour économiser du temps de calcul, nous utiliserons LMDZ5B dans la configuration R96x71x39. Nous simulerons la période 2009-2012 pour laquelle nous disposons des données IASI, et guiderons les vents par les réanalyses. Chaque année de simulation coûte environ 300 heures.

Temps de calcul : $300h \times 4 \text{ ans} \times 5 \text{ tests} = 6\,000 \text{ h}$.

- Les simulations guidées permettent d'étudier le comportement physique du modèle (par exemple l'effet de la convection sur la température et l'humidité) lorsqu'une dynamique de grande échelle réaliste est imposée. Mais en réalité, les processus physiques rétroagissent sur la dynamique de grande échelle. Nous étudierons cette rétroaction en réalisant une série de simulations non guidées.

Temps de calcul : $300h \times 4 \text{ ans} \times 15 \text{ tests} = 18\,000 \text{ h}$.

- La plupart de nos tests sont réalisés à résolution très basse pour économiser du temps de calcul. Toutefois, la représentation de certaines dépressions tropicales pourrait être limitée par la résolution grossière. Ceci pourrait impacter la représentation de l'organisation de la convection à grande échelle et à l'échelle intra-saisonnière. Nous réaliserons donc deux simulations, une guidée et non guidée, avec une résolution plus haute R144x142x39 :

Temps de calcul : $600h \times 4 \text{ ans} \times 2 \text{ tests} \simeq 5000 \text{ h}$

Comme nous devons stocker les tendances tri-dimensionnelles à l'échelle journalière, il faut compter 100 Go/an. Au total, nous demandons donc 8 To.

3.4.3 Applications paleo-climatiques et régionales

Demande : 117 000 heures CPU sur Ada, 1 To sur Ergon

Nous comptons continuer notre collaboration avec Aradhna Tripathi à l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), dans le cadre de laquelle nous utilisons LMDZ-iso en mode zoomé sur différentes régions pour aider à l'interprétation d'enregistrements paléo-climatiques. Les simulations zoomées sont réalisées en R144x142x39, mais avec une configuration du zoom permettant d'atteindre

des résolutions de 50km. Ceci nécessite des pas de temps très fins qui rendent les simulations assez coûteuses en temps de calcul : environ 1500h/an.

- Nous continuerons l'étude du rôle des processus convectifs sur la structure verticale de l'atmosphère tropicale, à partir des simulations zoomées sur l'Indonésie pour la période actuelle et pour le dernier maximum glaciaire. Nous prolongerons notre simulation en cours de 10 ans supplémentaires pour quantifier la variabilité inter-annuelle et réaliserons un test de sensibilité de 5 ans à l'intensité du mélange convectif. La paramètre le plus pertinent à modifier sera identifié à partir de simulations uni-dimensionnelles.

Temps de calcul : 1500h × 15 ans × 2 époques = 45 000h

- Nous réaliserons des simulations zoomées sur l'Amérique du Sud pour étudier le rôle relatif des changements d'insolation et des changements d'étendue des calottes sur le climat Sud-Américain au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire.

Temps de calcul : 1500h × 6 ans × 4 époques = 36 000 h

- Nous re-lancerons les simulations zoomées sur le Sud-Ouest des Etats-Unis en incluant le traçage de l'eau. Ceci nous permettra d'étudier le rôle relatif des changements de circulation et du recyclage continental sur l'évolution de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, entre l'actuel et le dernier rmaximum glaciaire.

Temps de calcul : 1500h × 3 pour le tracage × 4 ans × 2 époques = 36 000 h

En terme d'espace de stockage, nous nous restreindrons aux sorties mensuelles, soit environ 10 Go/an. Nous demandons donc 1 To.

3.4.4 LMDZ-iso au Cénozoïque

Demande : 281 000 heures CPU sur Ada, 1 To sur Ergon

Dans le cadre de la thèse de Svetlana Botsyun, le rôle de la surrection de l'Himalaya au cours du Cénozoïque sur la circulation atmosphérique et le cycle de l'eau est étudié. Pour cela, des simulations avec LMDZ-iso sont réalisées et confrontées à des archives paléo-climatiques isotopiques de composition isotopique de l'eau.

Quatre paléogéographies reconstruites pour le Cénozoïque (50, 42, 30, 15 millions d'années avant notre ère) ont été utilisées afin de préparer des conditions aux limites et réaliser en 2015 des simulations plus «réalistes» des paléoclimats dans un contexte où topographie, températures océaniques, insolation et concentration en CO₂ atmosphérique étaient radicalement différentes de l'actuel. Ces paléogéographies sont également caractérisées par le retrait progressif de la Parathétys, ancêtre de la Méditerranée dont la présence peut avoir largement influencé les régimes de pluies sur le plateau tibétain. Pour chacune de ces paléogéographies, nous testerons plusieurs scénarios de surrection du Plateau et utiliserons les températures océaniques d'un modèle couplé (FOAM) pour quantifier leur impact sur le $\delta^{18}O$ sur la région tibétaine. Ce design expérimental nous conduira à réaliser une quinzaine de simulation LMDZ-iso, dont la moitié prendra en compte le coloriage de l'eau (temps de calcul plus élevé) pour des régions-clefs (paratethys, océan indien, plateau tibétain). La comparaison de nos résultats avec les données mesurées dans les carbonates permettra d'affiner les scénarios paléoclimatiques et paléoaltimétriques proposés par les géologues.

- Pour chacune des 5 époques du Cénozoïque, nous réaliserons 3 simulations de 10 ans. Chaque simulation zoomée prend environ 1900 heures/an.

Temps de calcul : 5 époques × 10 ans × 1900 h × 2 topographies = 190 000 heures

- Certaines de ces simulations seront re-lancées avec le traçage de l'eau, pour étudier le rôle des changement de circulation sur le transport de l'humidité et les précipitations :

Temps de calcul : 4 simulations × 3 ans × 1900 h × 4 pour le tracage = 91 000 heures

En terme de stockage, nous nous restreindrons aux sorties mensuelles, soit environ 10 Go/an. Nous demandons donc 1 To.

4 Méthode

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

4.1 Le modèle LMDZ

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

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

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

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

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

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

Optimisation du code Le modèle est optimisé pour la vectorisation. Les boucles intérieures traitent des vecteurs dont la longueur est en général la taille de la grille (7000 dans la version standard), sauf pour certains processus (comme la convection qui n'est active que sur 20% des mailles) pour lesquels on effectue un ré-indices des champs. Les performances obtenues étaient de l'ordre de 3 Gflops sur NEC SX8.

Le code existe maintenant en 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. Des tests ont été effectués avec succès sur IBM SP6 utilisant 96 processeurs. Par ailleurs LMDZ est actuellement testé sur 2000 processeurs sur la machine Curie du TGCC dans le cadre du programme PRACE.

4.2 Le modèle ORCHIDEE

Site web ORCHIDEE (en cours de finalisation) : <http://labex.ipsl.fr/orchidee>

Documentation technique : <https://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee>

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

1. Le modèle SECHIBA simule le bilan hydrique et énergétique de la surface
2. Le modèle STOMATE simule la phénoménologie de la végétation et les transferts bio-géochimiques

3. Le modèle LPJ simule l'évolution dynamique de la végétation

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

Le code d'ORCHIDEE et son optimisation Le code est conçu de manière modulaire en fortran 90. Il a été optimisé pour la vectorisation de la même manière que toutes les paramétrisations de LMDZ. La version officielle d'ORCHIDEE est parallélisée en MPI. Une version hybride MPI-OpenMP est en cours de validation.

Références

Références

- [Boyle et al., 2005] Boyle, J. S., Williamson, D., Cederwall, R., Fiorino, M., Hnilo, J., Olson, J., Phillips, T., Potter, G., and Xie, S. (2005). Diagnosis of Community Atmospheric Model 2 (CAM2) in numerical weather forecast configuration at Atmospheric Radiation Measurement sites. *J. Geophys. Res.*, D15S15 :doi :10.1029/2004JD005042.
- [Cheruy et al., 2014] Cheruy, F., Dufresne, J., Hourdin, F., and Ducharne, A. (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.
- [Gallée et al., 2005] Gallée, H., Peyaud, V., and Goodwin, I. (2005). Simulation of the net snow accumulation along the Wilkes Land transect, Antarctica, with a regional climate model. *Annals of Glaciology*, 41 :17–22, 10.3189/172756405781813230.
- [Hourdin et al., 2012] Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., Rio, C., Bony, S., Jam, A., Cheruy, F., Rochetin, N., Fairhead, L., Idelkadi, A., Musat, I., Dufresne, J.-L., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., and Roehrig, R. (2012). LMDZ5B : the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection. *Clim. Dyn.*, pages DOI 10.1007/s00382–012–1343–y.
- [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.
- [Lott et al., 2012] Lott, F., Guez, L., and Maury, P. (2012). A stochastic parameterization of non-orographic gravity waves, formalism and impact on the equatorial stratosphere. *Geophysical Res. Letters*, 39 :L06807, doi :10.1029/2012GL051001.
- [Lott et al., 2010] Lott, F., Plougonven, R., and Vanneste, J. (2010). Gravity waves generated by sheared potential-vorticity anomalies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67 :doi : http ://dx.doi.org/10.1175/2009JAS3134.1.
- [Palermo et al., 2014] Palermo, C., Kay, J., Genthon, C., L'Ecuyer, T., Wood, N., and Claud, C. (2014). How much snow falls on the Antarctic ice sheet? *The Cryosphere Discussions*, 8 :1279–1304.
- [Polo et al., 2008] Polo, I., Lazar, A., Rodriguez-Fonseca, B., and Arnault, S. (2008). Oceanic kelvin waves and tropical atlantic intraseasonal variability : 1. kelvin wave characterization. *Journal of Geophysical Research*, 113 :C07009, doi :10.1029/2007JC004495.

- [Rio et al., 2013] Rio, C., Grandpeix, J.-Y., Hourdin, F., Guichard, F., Couvreur, F., Lafore, J.-P., Fridlind, A., Mrowiec, A., Bony, S., Rochetin, N., Roehrig, R., Idelkadi, A., Lefebvre, M.-P., and Musat, I. (2013). Control of deep convection by sub-cloud lifting processes : The alp closure in the lmdz5b general circulation model. *Clim. Dyn*, 0 (9-10) :2271–2292. doi : 10.1007/s00382–012–1506–x.
- [Rio et al., 2009] Rio, C., Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., and Lafore, J.-P. (2009). Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land. *Geophys. Res. Lett.*, 36 :L07809, doi :10.1029/2008GL036779.
- [Risi et al., 2010] Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., and Jouzel, J. (2010). Water stable isotopes in the LMDZ4 General Circulation Model : model evaluation for present day and past climates and applications to climatic interpretation of tropical isotopic records. *J. Geophys. Res.*, 115, D12118 :doi :10.1029/2009JD013255.