

Bilan du projet Lefe DEPHY

Développement et Evaluation des « **PHY**siques » des modèles de climat et prévision du temps

Introduction:

Un projet axé sur l'amélioration des modèles de climat

Le projet Dephy est né d'une volonté partagée dans plusieurs équipes au niveau français de coordonner les efforts concernant les développements et l'évaluation des paramétrisations des processus atmosphériques, plus particulièrement ceux de la physique dite humide (convection/nuages) dans les modèles de climat et de prévision du temps. Le projet faisait suite au projet « Physique commune » dont le but était de rapprocher les développements faits au CNRM et à l'IPSL en termes de paramétrisations des modèles de climat. La conjonction de ce projet « physique commune » et d'une dynamique de travail interne au CNRM avait conduit à un rapprochement avec la prévision numérique du temps. Le projet Dephy était cependant motivé en premier lieu par les enjeux relatifs aux anticipations des changements climatiques futurs et à l'importance de la représentation des processus atmosphériques, notamment nuageux et convectifs, tant pour la réponse globale et les rétroactions associées, que pour la traduction régionale de ces changements climatiques. Le projet est arrivé également à un moment de mûrissement d'un certain nombre de développements et outils dans la communauté. C'est le cas tout d'abord de l'utilisation de plus en plus facile des modèles, que ce soit les modèles de climat dans des configurations diverses (depuis les modèles du système terre tournant sur des centres de calculs nationaux, jusqu'à des versions légères 3D zoomées et guidées, ou des versions uni-colonnes des mêmes modèles tournant sur des ordinateurs portables) ou que ce soit les modèles explicites de nuages convectifs (Cloud Resolving Models) ou LES (Large-Eddy Simulations).

L'objectif affiché du projet était de « **regrouper et coordonner des efforts de différentes natures (observation, modélisation méso-échelle, etc) développés dans des communautés parfois disjointes autour d'un même et unique objectif : l'amélioration des paramétrisations physiques des modèles atmosphériques.** Il doit permettre d'asseoir dans le temps des développements de modèles souvent « vendus » dans des programmes d'observations sur quelques années, mais qui nécessitent un travail de fond sur des échelles de temps plus longues. »

Une animation scientifique au niveau national

Avec son financement modeste mais récurrent, le projet Dephy a permis de maintenir une animation scientifique au niveau national, en renforçant souvent des dynamiques de travail pré-existantes ou en en créant de nouvelles. En pratique, le financement a été beaucoup utilisé pour des missions entre Paris, Toulouse et Grenoble. Les Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère organisés tous les ans à Toulouse sur différents thèmes sont devenus le principal rendez vous de la communauté Dephy, une partie des ateliers étant maintenant consacrée de façon récurrente aux problématiques du projet. En plus de cette réunion générale, le financement a servi à payer les missions pour une à deux réunions thématiques et des échanges plus ponctuels. Ces réunions ont été également l'occasion de discuter et coordonner la participation à des projets comme les projets européens Euclipse et Embrace, qui présentent un assez fort recouvrement avec les problématiques mises en avant dans le cadre de Dephy.

Des résultats scientifiques marquants :

Les travaux de développement et d'évaluation croisés des différentes paramétrisations sont basés en grande partie sur la comparaison des résultats de simulations explicites des processus sur des cas tests avec MesoNH et de tests des paramétrisations physiques en mode uni-colonne selon un

protocole promu par le passé dans le cadre des projets Eucrem/Eurocs, aujourd'hui au cœur des travaux du programme international GASS/GCSS. Des avancées méthodologiques importantes ont été obtenues pour ces comparaisons comme la systématisation de l'utilisation des traceurs pour caractériser les structures convectives dans les simulations explicites. Des formats communs d'entrée et de sorties ont été définis pour rationaliser l'utilisation des cas d'étude et favoriser leur disponibilité dans les différents modèles et les intercomparaisons. Le projet Dephy a été également l'occasion de promouvoir des stratégies d'évaluation intermédiaires, entre modèles uni-colonne et modèles climatiques complets, comme l'utilisation des modèles de climat en mode prévision du temps ou l'utilisation de modèles zoomés et guidés autour de site d'observations. Le projet Dephy a également abouti à des rapprochements concernant les paramétrisations utilisées à l'IPSL et au CNRM, en ce qui concerne la paramétrisation de la couche limite, alliant formulation en diffusion turbulente et schémas en flux de masse de la couche limite convective. Des résultats importants ont été obtenus également concernant la convection profonde avec côté CNRM le développement d'un nouveau schéma incluant un traitement pronostique de la vitesse verticale et des hydrométéores convectifs, et côté LMD (en collaboration avec Moana), l'aboutissement du modèle de poches froides (créées sous la convection par ré-évaporation des pluies orageuses) jusqu'à son utilisation dans les simulations CMIP5 et la proposition d'une nouvelle formulation stochastique pour le déclenchement de la convection. Notons enfin que les couches limites stables, notamment polaires, ont pris une place grandissante dans le projet, avec en projet la définition d'un nouveau cas de référence autour des observations pilotées par le LGGE à Dôme C en Antarctique.

Le projet était organisé autour de 3 axes méthodologiques (A1 à A3) et 3 axes thématiques (B1 à B3). Le bilan pour chacun de ces axes est détaillé ci-dessous, suivi d'un bilan de l'utilisation des financements et d'une liste des publications liées au projet.

A1/ Simulations explicites 3D pour la construction de cas 1D (MP Lefebvre)

Comme on l'a expliqué plus haut, les avancées réalisées dans le cadre du projet Dephy reposent pour une bonne part sur l'inter-comparaison de résultats de simulations 3D explicites des processus nuageux et convectifs (simulations LES et CRM) avec des résultats de paramétrisations mises en œuvre dans des versions dites uni-colonne des modèles climatiques ou de prévision du temps. Suivant les cas, on s'est appuyé sur des simulations explicites réalisées par le passé dans les équipes du projet ou ailleurs. Mais pour les cas nouveaux, ou parce qu'on voulait affiner les simulations (comme on l'explique plus loin), un certain nombre de simulations explicites ont été réalisées spécifiquement pour le projet.

1) Liste des cas 1D utilisés dans DEPHY:

Plusieurs cas 1D, réalistes ou idéalisés, ont été réalisés afin d'aborder différentes questions relatives aux processus turbulents et nuageux utilisés pour tester les paramétrisations. Pour la plupart des cas 1D listés ci-dessous, des simulations ont été effectuées aussi bien avec LMDZ1d qu'avec Musc, ce qui a donné l'occasion de nombreuses comparaisons, discussions et jusqu'à des convergences entre les approches développées dans les deux équipes comme on l'explique plus loin.

1.1 Cas de cumulus:

Beaucoup de travaux ont porté sur le raffinement des schémas de couche limite convectives. On s'est appuyé en particulier sur les cas océaniques Bomex et Rico et sur le cas ARM-Cumulus de cycle diurne de couche limite continental avec cumulus (cf. Jam et al., 2010 ; Rio et al. 2010 ;

Hourdin et al., 2011).

BOMEX¹ est un cas quasi-stationnaire de cumulus marins tiré de la campagne de mesure du même nom (Caraïbes, mai-juin 1969). Le cas ARM-cumulus est basé sur des observations réalisées sur le site ARM des grandes plaines de l'Oklahoma le 21 juin 1997. C'est un cas typique de convection peu profonde sur terre avec des flux de surface prescrits évoluant au cours de la journée.

Le cas RICO² est le plus récent et est construit à partir des données d'une campagne qui s'est déroulée sur les îles de Barbuda et Antigua (Caraïbes) entre novembre 2004 et janvier 2005. L'objectif de cette campagne est l'étude des précipitations dans les petits cumulus marins.

1.2 Transition stratocumulus/cumulus :

Afin d'améliorer la représentation de la transition entre les stratocumulus marins et les cumulus, deux cas lagrangiens de transition ont été proposés dans le cadre du projet européen Euclipse³. Le premier cas est repris du cas ASTEX⁴ défini à partir de la campagne du même nom et permet d'évaluer les modèles à partir des observations. Ce cas a déjà fait l'objet d'une intercomparaison entre modèles unicolonne par le passé.

Le second cas est basé sur un jeu de trois transitions composites issues d'observations de nuages de couche limite (Sandu et al., 2010). Ce cas constitue un cadre plus idéalisé pour évaluer les modèles et permet de les comparer à une plus grande variété de transitions. Il comprend un cas « de référence » et deux variantes rapide et lente de variation de la température de la mer. MUSC, le modèle unicolonne du CNRM, a fourni des résultats pour ces deux cas. LMDZ1d (la version unicolonne de LMDZ) en a fourni pour le second.

1.3 Convection profonde sur océan :

Les études sur la convection nuageuse profonde océanique se sont basées notamment sur le désormais classique cas de 4 mois (de novembre 1992 à février 1993) issu de la campagne TOGA-COARE⁵. Ce cas, forcé en vent sur toute la hauteur de la troposphère, n'est cependant pas le mieux adapté pour étudier les processus de couche limite et leurs interactions avec la convection profonde. La campagne TWP-ICE⁶, qui s'est déroulée dans la région de Darwin, en Australie, du 17 janvier au 10 février 2006, a permis de définir un nouveau cas de convection nuageuse océanique, pour lequel une intercomparaison de modèles explicites de nuages (CRMs⁷) a été réalisée, avec une attention plus particulière sur la microphysique des nuages (Fridlind et al., 2012). Le cas permet d'étudier la succession d'une phase active de convection constituée de trois événements successifs intenses avec une phase dite "suppressed" de plusieurs jours, pendant laquelle l'advection d'air sec dans la troposphère libre inhibe le développement de convection très profonde. Ce cas a notamment été utilisé afin de tester et d'améliorer le couplage entre les thermiques, la convection et les poches froides dans le modèle LMDZ (Rio et al., 2012) et d'étudier la structure des systèmes convectifs tropicaux telle que simulée dans différents CRMs (Mrowiec et al., 2012).

1.4 Déclenchement de la convection en région semi-aride:

Un cas d'initiation de la convection profonde en zone semi-aride a été identifié. Ce cas est très bien

¹ BOMEX : Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment)

² RICO : Rain In Cumulus over the Ocean

³ Euclipse: European Union Cloud Intercomparison, Process Study & Evaluation

⁴ Astex: Atlantic Stratocumulus to Cumulus Transition Experiment

⁵ TOGA-COARE : Tropical Ocean and Global Atmosphere – Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment

⁶ TWP-ICE : Tropical Warm Pool – International Cloud Experiment

⁷ CRM : Cloud Resolving Model

documenté (Lothon et al., 2010) par les nombreuses observations (ARM mobile facility, radar MIT, sondages, ...) de la campagne AMMA. Un cadre de modélisation pour ce cas (définition des conditions initiales, des forçages) a été défini. Et une simulation LES a été réalisée (Couvreur et al., 2012). Cette simulation représente correctement le développement important de la couche limite puis de cumulus jusqu'à l'initiation de convection profonde. Ce cas est en cours d'utilisation dans le cadre du projet EMBRACE pour évaluer les différentes paramétrisations de couche limite et de convection profonde des modèles LMDZ et modèles du CNRM (cf. fig.1). Il a permis, comparé au cas de cycle diurne de la convection profonde continentale (Guichard et al., 2004), de regarder la sensibilité de l'initiation de la convection aux caractéristiques de la couche limite (plus sèche et profonde dans le cas AMMA)

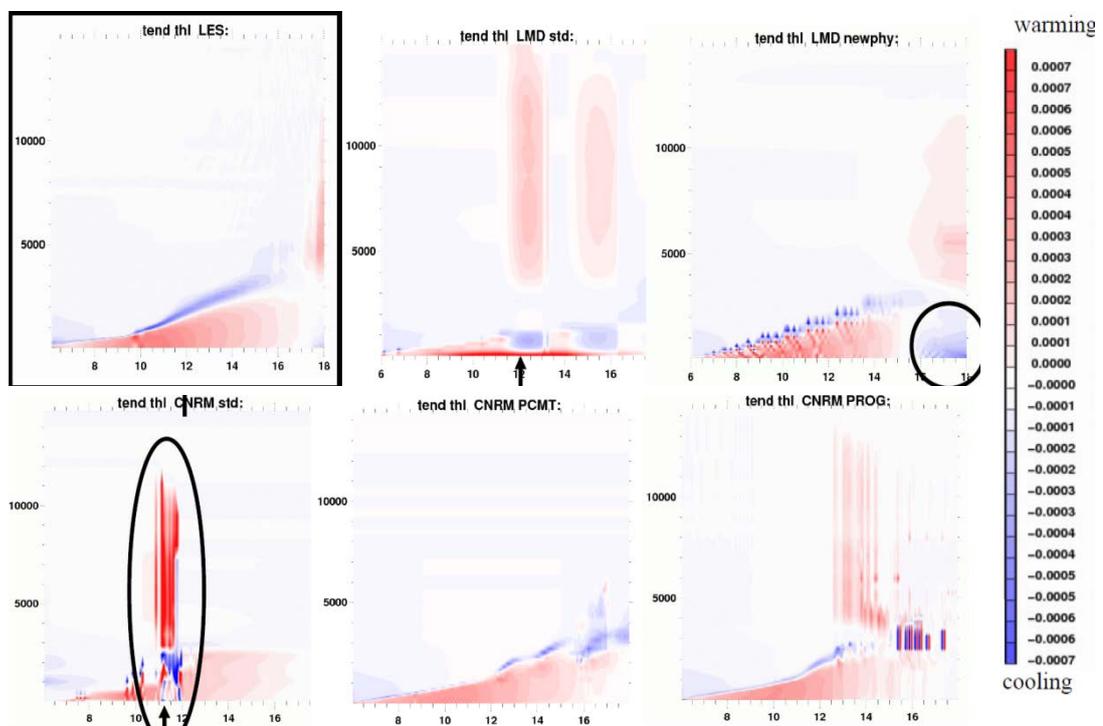


Figure 1 : Evolution sur une journée du profil vertical du chauffage convectif (K/s) pour le cas AMMA : en haut pour meso-NH et les deux versions de la physique LMDZ (standard et nouvelle) et en bas pour les trois versions de la physique Arpege (standard, PCMT et pronostique).

1.5 Couche limite stable:

La mise en place d'un cas d'étude 1D à partir des observations du Dôme C est en cours.

1.6 Approximation des faibles gradients :

En parallèle de l'utilisation de cas d'étude basés plus ou moins directement sur des observations, des configurations plus académiques ont été utilisées pour étudier la convection de façon plus théorique.

L'approximation des faibles gradients de température a été implémentée dans les modèles uni-colonnes LMDZ1d et MUSC. Doté de cette approximation, LMDZ1d s'est révélé capable de reproduire la relation entre la température de la mer, les précipitations et la vitesse verticale du modèle 3D. Notamment, certains aspects des changements rapides de circulations documentés dans les simulations AMIP et aquaplanète de CMIP5 avec quadruplement de CO₂ ont pu être expliqués: dans les régions océaniques subsidentes, le forçage radiatif local du CO₂ diminue la subsidence, alors que, dans les régions océaniques ascendantes, l'effet de l'augmentation de la stabilité statique de la basse troposphère, qui réduit la convection et donc l'ascendance, domine l'effet radiatif local (Bony et al. 2012).

Dans MUSC doté de l'approximation des faibles gradients, les résultats sont moins satisfaisants car dans les régimes convectifs, la paramétrisation de la circulation verticale produit des profils de vitesses composés de modes baroclines d'ordre élevés plutôt que suivant les premiers modes baroclines. Ceci est très certainement lié au schéma de convection qui utilise des critères locaux de déclenchement et de fermeture plutôt qu'intégrés sur la verticale. Des solutions à ce problème sont à l'étude, qui passent par le filtrage des modes baroclines d'ordre élevés (supérieurs à deux ou trois) ou par l'implémentation d'une autre paramétrisation de la dynamique verticale, celle des faibles gradients de pression qui produit de meilleurs résultats que l'implémentation actuelle de l'approximation des faibles gradients dans les modèles de simulation explicite de la convection (Romps 2012a et b).

1.7 L'équilibre radiatif-convectif :

Un cas d'étude d'équilibre radiatif-convectif sur continent a été mis au point. Le sol est représenté par un simple modèle de diffusion de la chaleur. L'évaporation est déterminée en fixant le rapport de l'évaporation à l'évaporation potentielle. La température à une profondeur d'environ 10 cm est rappelée vers une valeur fixe, ce qui permet de simuler un cycle diurne de la température de surface. Ce cas permet d'étudier la réponse des schémas de convection profonde et de couche limite au déséquilibre engendré par les échanges radiatifs et l'évaporation à la surface. Il a été utilisé pour analyser la dépendance de la profondeur de la convection aux conditions de surface (Prigent et al., 2011).

1.8 : Rayonnement:

Toujours dans le cadre du projet Euclipse, une intercomparaison a été organisée pour déterminer si les schémas radiatifs des différents GCM sont capables de représenter correctement les propriétés radiatives des stratocumulus. Seul le schéma radiatif est activé sur un pas de temps et pour 17 valeurs du contenu intégré en eau liquide. Des tests de sensibilité sur les variables internes de la microphysique (rayon effectif des gouttes ou concentration des gouttes d'eau imposés) et sur la discrétisation verticale ont été effectués.

2) Forçages et diagnostics communs:

Dans le projet DEPHY initial, le LMD avait affiché son souhait de faire migrer sa physique vers la plate-forme MUSC⁸ développée par le CNRM-GAME (modèle pseudo-1D composé de 4 colonnes identiques et sur lequel sont déjà testées différentes physiques). Plutôt que de réaliser d'emblée le portage complet d'une physique sur une plate-forme encore en phase de prise en main dans certaines équipes de Météo-France, il a finalement semblé préférable dans un premier temps de viser une interopérabilité des conditions initiales, des forçages et des post-traitements entre les deux modèles

⁸ MUSC: Modèle Unifié Simple Colonne

1D du LMD et du CNRM-GAME (cf. réunion sur la modélisation 1D du 11/1/2011). Un groupe de travail s'est constitué pour définir les formats communs de forçages et de sorties ainsi que partager des outils de validation sur des simulations de références (LES, CRM) et/ou des observations.

Dans la bibliothèque de cas disponibles, on a choisi de commencer par le cas ARM-cumulus implémenté sur MUSC avec différentes physiques (Arpège prévi, Arpege climat et AROME) et sur LMDZ1d. Le format des fichiers de sorties communs, les fichiers de forçages communs et les profils initiaux sont ceux définis dans le cadre du projet Embrace. A noter que le couplage de la physique du LMD avec Arpege (et donc Musc) a finalement été entrepris au printemps 2012 par Romain Roehrig au CNRM.

Les fichiers de données du cas ARM-cumulus ont été notamment utilisés pour comparer les variables internes des schémas de couche limite: thermiques de LMDZ et schéma EDKF⁹ d'Arpege.

3) Simulations explicites 3D et utilisation des traceurs:

Dans l'utilisation qui est faite des simulations explicites dites LES de la couche limite convective, une question importante est de savoir isoler les structures cohérentes (panaches thermiques, rouleaux cellules) que les modèles en flux de masse cherchent à représenter. La proposition d'utiliser systématiquement des traceurs émis près de la surface pour échantillonner dans les résultats des simulations les régions associées aux structures ascendantes a constitué un saut méthodologique important (Couvreur et al., 2010). Plusieurs simulations LES de cas de convection de couche limite ont été re-simulées pour inclure ces traceurs.

Simulations LES effectuées avec MesoNH dans le cadre de Dephy.

Un certain nombre de simulations de cas tests réalisées dans différentes équipes internationales sont maintenant disponibles sur le réseau, et notamment les cas labélisés dans le cadre du projet GCSS¹⁰/GASS. Un certain nombre de simulations LES ont cependant été effectuées spécifiquement dans le cadre de Dephy soit parce que les cas étaient nouveaux, soit pour raffiner le maillage, soit pour inclure des traceurs:

- Cas ARM-cumulus et Bomex, afin d'ajouter les traceurs.
- Cas ARM cycle diurne de Françoise Guichard : une simulation LES 3D a été réalisée pour ce cas qui avait été étudié en 2004 avec une version 2D CRM de MesoNH. Les résultats récents font apparaître des différences qui nécessitent de nouvelles investigations.
- Cas Fire: évolution diurne de stratocumulus marins
- Les nouveaux cas : Cas RICO, AMMA ...

A2/ Utilisation des observatoires atmosphériques pour l'évaluation des modèles (F.Chery)

1) Données disponibles :

1.1 Exploitation des mesures de la campagne AMMA:

Un travail systématique a été entrepris pour documenter l'occurrence nuageuse, le cycle diurne et l'impact radiatif des différents types de nuages rencontrés à Niamey et en Afrique de l'Ouest à l'aide des données collectées par la station mobile ARM à Niamey en 2006 et des observations satellitales Cloudsat et Calipso (Bouniol et al. JAMC 2012). Ces données ont

⁹ EDKF: Eddy Diffusivity Kain Fritsch

¹⁰ GCSS/GASS : Gewex Cloud System Study/Global Atmospheric System Study

ensuite été utilisées pour évaluer la représentation des nuages dans les modèles de climat, notamment les modèles de l'IPSL et du CNRM (Roehrig et al., Jcli 2012).

Les différents régimes de couche limite observés en Afrique de l'Ouest pendant la campagne AMMA ont été documentés. Un outil a été élaboré pour évaluer la capacité des modèles à reproduire les différents cycles diurnes et la représentation des processus sous-jacents qui les pilotent de façon conjointe. (Gounou et al., BLM, 2012).

1.2 Observations des sites instrumentés SIRTA, Cabauw et Chibolton.

Depuis de nombreuses années les observatoires tels le SIRTA, Cabauw et Chibolton, ont collecté une grande quantité de mesures dans le but (entre autres) d'évaluer les paramétrisations des modèles. Une partie de ces observations a été rassemblée dans une base de données au format netcdf. Les travaux sur l'évaluation de LMDZ-zoomé à partir des observations SIRTA ont permis de définir plus précisément le développement de la base de données long terme horaire harmonisée SCTD¹¹ (Cheruy et al, 2012). Ces travaux ont permis de développer une méthode pour évaluer la représentativité spatiale du SIRTA, d'évaluer les biais d'échantillonnage dans les observations, d'améliorer la fermeture du bilan énergétique à la surface dans les observations (étude approfondie des mesures de température et humidité dans le sol), d'identifier des "bugs" dans les premières versions des fichiers SCTD. Ces travaux ont permis d'aboutir à une version aboutie de SCTD qui est maintenant utilisée dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison de modèles CMIP-5.

Quatre fichiers existent désormais, trois sur la période Janvier 2008 - Avril 2010 pour chacun des sites et un nombre restreint de variables, un autre pour le SIRTA sur la période 2002-2010 pour un nombre plus important de variables (fichier SCTD). Ce dernier pourra être étendu dans le temps en fonction des ressources disponibles. Les données sont archivées en moyenne horaire avec un « flag » de qualité et une estimation de l'incertitude fondée sur la variance spatio-temporelle des mesures.

Pour pouvoir exploiter valablement les mesures d'humidité du sol effectuées au SIRTA, une campagne d'exploration géophysique du sous-sol du SIRTA a été organisée en collaboration avec Polytech-Paris-UPMC. Une nappe d'eau, influençant significativement les flux de chaleur latente a ainsi été localisée à faible profondeur.

1.3 Dôme C :

Les observations de profilage de la couche limite de surface le long de la tour de 45 m ont été poursuivies (cf. B1 « couches limite stables »). La comparaison avec des échantillons d'été et d'hiver avec le modèle MAR du LGGE et les analyses météorologiques du CEPMMT est très favorable au premier modèle (cf. fig.3), pourtant contraint à ses frontières par les analyses. Cela résulte d'une bien meilleure résolution verticale (seulement 2 niveaux dans les premiers 45 m dans les analyses), mais aussi probablement d'une paramétrisation de la couche limite (E-ε) mieux adaptée au traitement des couches limites très stables.

¹¹ SCTD : SIRTA Climate Testbed

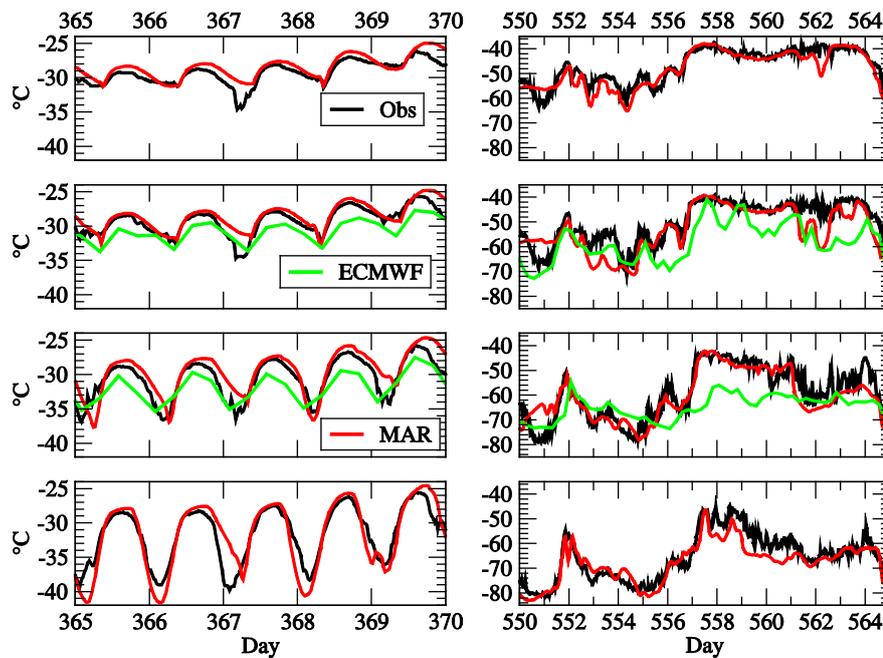


Figure 3 : comparaison sur quelques jours en été (gauche) et en hiver (droite) des observations sur 4 des 6 niveaux d'observation (de bas en haut : 3.3, 8.8, 25.3 et 41.9m) avec les analyses météorologiques opérationnelles (vert) et le modèle régional MAR (rouge).

2) Approche méthodologique pour évaluer les modèles:

2.1 L'approche zoomée guidée:

L'approche zoomée guidée (Coindreau et al. 2007) a été systématiquement appliquée sur le site instrumenté du SIRTA. On a montré que cette approche permettait d'identifier les causes de biais présents dans les simulations climatiques à l'échelle locale et Européenne (fig. 2) . Outre le rôle de la couverture nuageuse et de son impact radiatif au sol, le rôle non négligeable de l'hydrodynamique du sol et la nécessité d'en améliorer la représentation dans les modèles de climat a été mis en évidence (Cheruy et al. 2012). Un nouveau modèle d'hydrologie permettant une description physique des flux d'eau dans le sol et testé pour la première fois dans ce contexte, est désormais en cours d'intégration dans l'ESM¹² de l'IPSL. L'introduction d'un facteur modulant la condition limite au fond du modèle de sol entre le drainage gravitaire (hypothèse par défaut de la plupart des modèles de sol) et un fond imperméable a permis de prendre en compte la nappe peu profonde détectée au SIRTA et d'améliorer le réalisme des simulations zoomée-guidées au SIRTA (Campoy et al., en préparation). La sensibilité des flux de surface à cette condition de drainage libre peut désormais être testée dans l'ESM de l'IPSL.

¹² ESM : Earth System Model

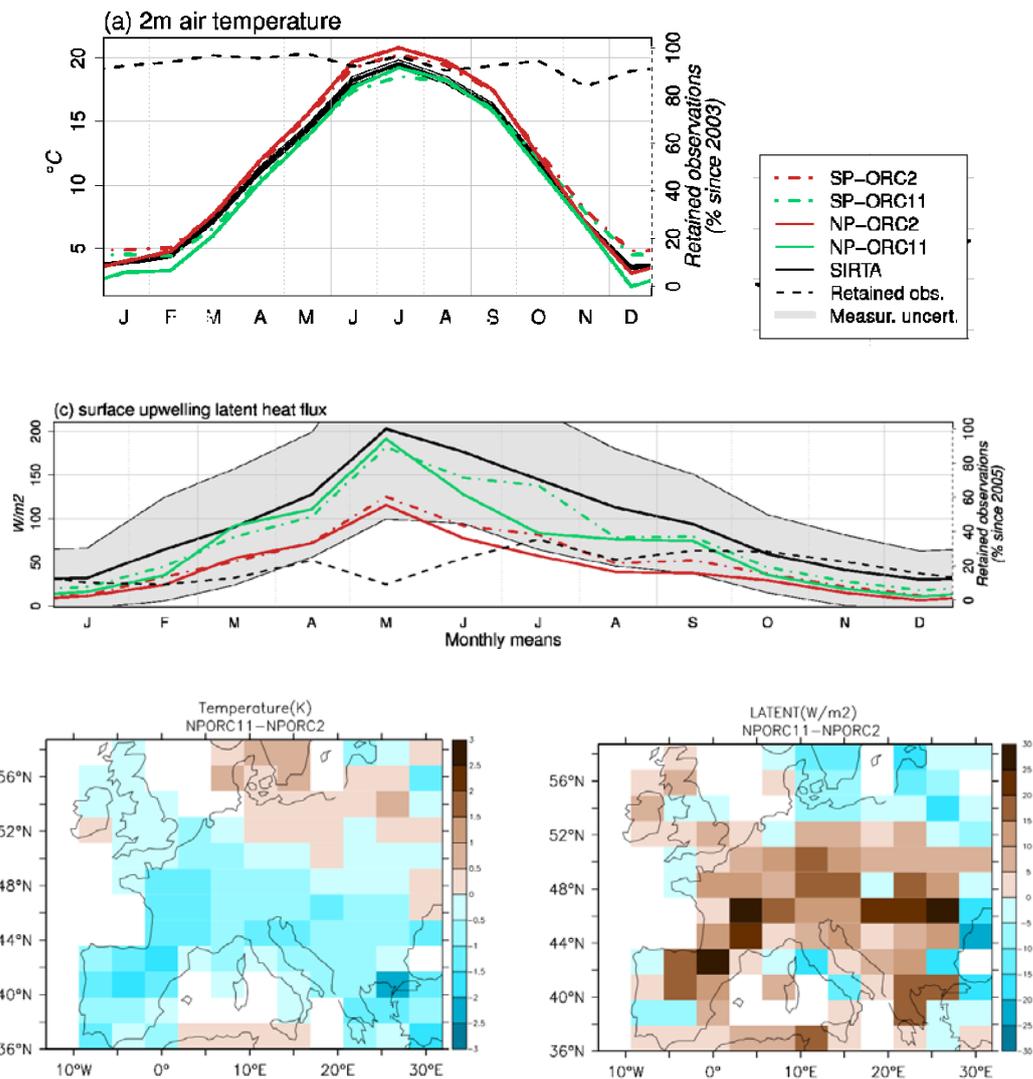


Figure 2 : On présente ci-dessus les résultats de 4 simulations 3D avec deux types de physiques atmosphériques - physique standard (SP) et nouvelle (NP)- et avec deux modèles de sol différents -Orchidee 2 couches (ORC2) et Orchidee 11 couches (ORC11)-. Les figures a et c représentent le cycle saisonnier moyen sur 10 ans de la température à 2m et du flux latent, mesurés au SIRTA et simulés avec les 4 jeux de paramétrisations décrits ci-dessus. En bas, deux cartes de différence de température et de flux latent (en été sur l'Europe, sur 10 ans) entre les simulations climatiques globales effectuées avec SST forcées (AMIP) avec les configurations "NP-OR2" et "NP-OR11" du modèle LMDZ. Les résultats obtenus au SIRTA sont retrouvés à l'échelle continentale et en mode climatique: le nouveau modèle d'hydrologie ORC11 permet d'augmenter l'évaporation en été et de refroidir la température au voisinage du sol. La comparaison avec des observations (non présentée ici) indique que l'on réduit un biais récurrent dans le modèle.

2.2 Approche 1D pour les sites d'observations :

En réponse à la demande de différents développeurs de paramétrisations qui souhaitent pouvoir utiliser cet outil pour des tests préliminaires sur les surfaces continentales, une version 1D de LMDZ fonctionnant sur les sites du SIRTA et sur Cabauw avec les forçages de grande échelle générés par le modèle RACMO (collaboration avec le KNMI) est en cours d'installation. Actuellement, elle fonctionne en mode forcé à la surface, mais la possibilité de la faire fonctionner en mode couplé avec le modèle de sol devrait être disponible rapidement.

2.3 Approche 3D (CMIP5):

Des sorties haute fréquence ont été extraites sur 119 sites des simulations préparées pour le prochains rapport du GIEC. Le but est de permettre l'analyse et la comparaison des simulations CMIP5 au niveau des processus (tendances, variables d'état sur des points de grille incluant des sites instrumentés). Dans ce cadre, des diagnostics aux échelles diurne, saisonnière et annuelle ont été mis en place et les simulations CMIP5 sur les différents points du transect africain, les sites continentaux (SGP¹³) et tropicaux (Darwin) comparées avec les mesures in-situ sur ces sites: occurrence, distribution des fractions nuageuses, distribution des taux de pluie, composante du bilan énergétique en surface, humidité et température au voisinage du sol.

A3/ Stratégie d'évaluation croisée des modèles de prévision et de climat (L.Beau)

L'exploration du comportement des schémas de paramétrisations peut s'effectuer dans divers contextes, plus ou moins contraints, depuis les cadres unicolonnes déjà cités dans ce rapport (A.1) jusqu'au modèle global couplé avec des modèles d'océan et de banquise, en passant par les simulations avec des modèles à aire limitée sur des études de cas, les simulations type prévision du temps (type Transpose-Amip) et les simulations climatiques avec températures de la mer imposées.

1) Convergence climat/PNT¹⁴ :

La convergence des paramétrisations physiques s'est poursuivie dans le cadre du développement d'une physique « grande échelle » adaptée aux résolutions hydrostatiques pour la prévision du temps et les simulations climatiques avec le modèle ARPEGE. Les schémas de turbulence en énergie cinétique turbulente pronostique « CBR¹⁵ », de convection peu profonde en flux de masse « KFB¹⁶ » et de microphysique pronostique « Lopez¹⁷ » ont été validés pour une utilisation opérationnelle en prévision du temps et dans la perspective d'une inclusion dans la prochaine version du modèle couplé CNRM-CM utilisé pour le prochain exercice de simulation CMIP. Le schéma de turbulence « CBR » est maintenant validé sur une très large gamme d'échelles spatio-temporelles, dans ARPEGE/AROME/MESO-NH, comme le sont également le schéma de rayonnement « RRTM/FM » et le modèle de surface « SURFEX ». Un schéma statistique a été développé pour la sédimentation des hydrométéores dans ARPEGE, puis implémenté dans le modèle AROME/MESO-NH. Le schéma de convection peu profonde « EDKF¹⁸ » utilisé dans AROME/MESO-NH a été implémenté dans ARPEGE. La validation multi-environnement du nouveau schéma de convection « PCMT¹⁹ » (cf. B3) a débuté.

Dans le cadre du projet européen Euclipse, des simulations de type prévision du temps ont été effectués avec la version CMIP5 du modèle ARPEGE-CLIMAT et du modèle de l'IPSL. Certains biais du modèle de climat (biais de précipitation par exemple) se mettant en place très rapidement,

¹³ SGP : Southern Great Plains

¹⁴ PNT : Prévision Numérique du Temps

¹⁵ Cuxart, Bougeault, Redelsperger, 2000: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. QJRMS, 126, 1-30.

¹⁶ Bechtold, Bazile, Guichard, Mascart, Richard, 2001: A mass flux convection scheme for regional and global models. QJRMS, 127, 869-886.

¹⁷ Lopez, 2002: Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data-assimilation purposes. QJRMS, 128, 229-257.

¹⁸ EDKF : Eddy Diffusion Kain Fritsch

¹⁹ PCMT : Prognostic Condensates Microphysics and Transport

ils peuvent donc être observés et analysés dans des simulations courtes de ce type.

2) Cas d'étude 3D :

Le modèle à aire limitée Aladin du CNRM a été utilisé pour simuler des cas observés sur l'Afrique de l'ouest (cas issus des campagnes AMMA et Hapex-Sahel). Le modèle utilise différentes résolutions horizontales, de 300 km environ à 10 km. Divers schémas de paramétrisation de la convection et/ou de la turbulence sont testés (Physique atmosphérique de CMIP5, physique utilisée en mode prévision numérique, schémas en cours de développement). Ces résultats sont confrontés à ceux du modèle MésO-NH, initialisé et forcé par les mêmes analyses et dans lequel la convection est représentée de manière explicite. Les derniers tests effectués mettent en évidence l'apport du nouveau schéma de convection profonde/peu profonde en terme de propagation (cf. fig.4).

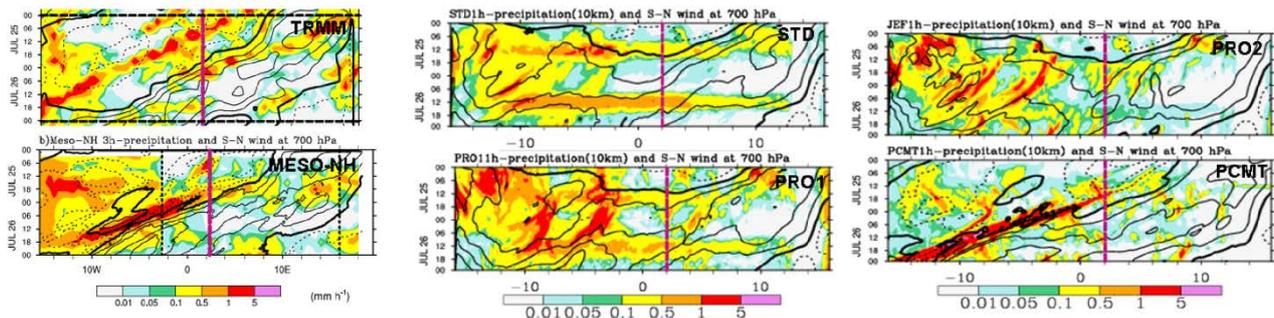


Figure 4 :

TRMM: diagramme Hovmoller des précipitations TRMM et du vent méridien ERA40 à 700hPa sur la période 25-26 juillet 2006 (cas AMMA). Les précipitations (couleurs) et vents (lignes, continues pour les vents de sud) sont moyennés entre 8° et 15° nord. En rose, la longitude de Niamey.

MESO-NH: Diagramme Hovmoller pour les précipitations et les vents simulés par MésO-NH.

STD: physique diagnostique type AR5

PRO1: physique pronostique type physique PNT ARPEGE

PRO2: physique pronostique Guérémy (Tellus, 2011)

PCMT: physique pronostique avec schéma de convection PCMT

3) Simulateurs d'observables :

Enfin, les simulateurs radar CloudSat, lidar Calipso et nuages ISCCP ont été regroupés dans le logiciel COSP, implantés dans les modèles ARPEGE et LMDZ et utilisés dans les simulations type AMIP. Ce simulateur a été activé systématiquement dans un certain nombre de simulations CMIP5 au CNRM et à l'IPSL. COSP a été utilisé notamment pendant les phases d'ajustement et d'évaluation des versions Physique Standard IPSL-CM5A (Hourdin et al., 2012a) et Nouvelle Physique IPSL-CM5B (Hourdin et al., 2012b) du modèle de l'IPSL.

B1/ Couches limites stables (C.Genthon)

1) Observations et modélisation à Dôme C :

Les observations en 2 sites de couche limite extrême Antarctique ont été poursuivies. On dispose maintenant de façon quasi-continue d'observations sur 2 années au site D17 en Terre Adélie (profilage sur 7 m, vents catabatiques fréquents dépassant 200 km/h), et sur 3 années au site du Dôme C (profilage sur 45 m, températures descendant parfois sous -80°C en hiver).

Au Dôme C, les années 2009 et 2010 ont été très contrastées (figure 5). Les données d'une station météorologique de surface indiquent que l'hiver 2009 était le plus chaud de la décennie, 2010 le plus froid. Ceci se retrouve dans les analyses météorologiques du Centre de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) et dans les simulations du modèle régional du LGGE, MAR, forcé aux limites par les analyses du CEPMMT. Avec une résolution moindre, et probablement aussi une paramétrisation de la turbulence en condition très stable moins performante, les analyses météorologiques du CEPMMT reproduisent beaucoup moins bien les inversions hivernales extrêmes observées au Dôme C que le modèle MAR (figure 3). En été, les caractéristiques de turbulence (i.e. cycle diurne et profil vertical de l'énergie cinétique turbulente) observées par thermoanémomètres soniques sont effectivement assez bien reproduites par le modèle MAR.

En région catabatique, l'énergie disponible limitée sur site et l'occurrence fréquente de neige soufflée ne permettent pas l'utilisation d'instruments soniques pour une mesure directe à haute fréquence de la turbulence. Toutefois, même limité à 1 Hz, le spectre d'énergie cinétique turbulente est en accord avec la cascade de Kolmogorov. Au-delà des aspects de turbulence pure, le profilage dans cette région est surtout destiné à vérifier les caractéristiques dynamiques du modèle MAR au cours d'épisodes de neige soufflée : u^* critique au déclenchement d'un épisode, rugosité au cours de l'événement, etc. Le modèle reproduit effectivement bien de tels événements (Gallée et al. 2012) mais présente des degrés de liberté qu'il convient de caler. Le profilage en zone catabatique fait en effet partie d'un système d'observation de la neige soufflée en Terre Adélie (Genthon et al. 2011). Les simulations récentes du modèle MAR suggèrent que ce phénomène détermine une part importante du bilan de masse de surface de la calotte. La validation du modèle par comparaison à ces observations est en cours.

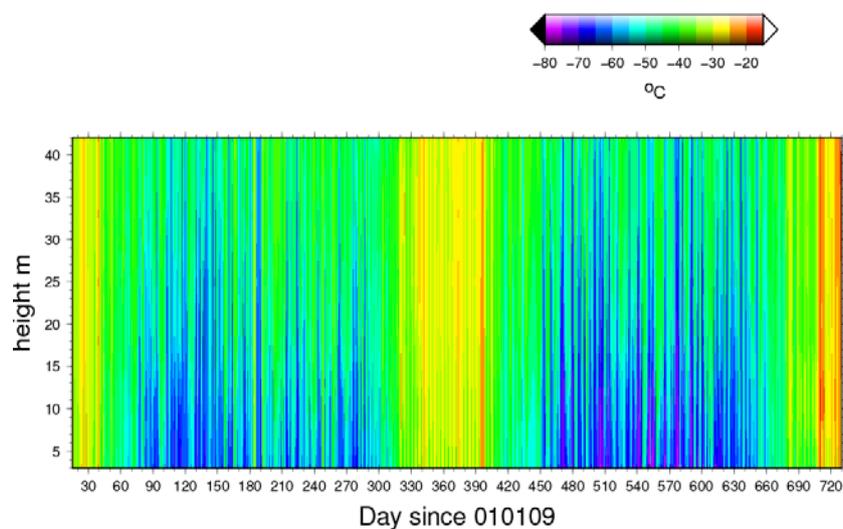


Figure 5 : Série temporelle de la température mesurée sur le mât de Dôme C pour les années 2009 et 2010 : deux années très contrastées (2009 et 2010 l'hiver le plus chaud/froid (respectivement) dans la décennie).

2) Amélioration de la compréhension du brouillard et de sa prévision à méso-échelle :

L'amélioration de la compréhension du brouillard et de sa prévision à méso-échelle constituent deux axes de recherche prioritaires.

Les études de processus se sont intéressées aux structures dynamiques des brouillards radiatifs. Pour cela, une étude s'appuyant sur des LES à très fine résolution avec Méso-NH a été réalisée (Bergot,

2012). La résolution choisie est de 2.5m sur l'horizontale et de 1m sur la verticale pour les couches atmosphériques dans les 50 premiers mètres, pour une grille de 200x200pts et 128 niveaux. Malgré des mesures incomplètes ne permettant pas en particulier de déterminer finement les advections de moyenne échelle, les caractéristiques principales de la couche de brouillard sont bien représentées par le modèle. Le brouillard radiatif se forme dans une couche limite stable. Durant la phase de formation, on note la présence de petits rouleaux au milieu de la couche de brouillard qui sont la signature d'instabilité de Kelvin-Helmoltz. Ces ondes sont associées à un pic d'énergie cinétique turbulente (TKE) qui aide à la destruction de la couche d'inversion. Durant la phase de développement, la dynamique de la couche de brouillard change significativement. Le maximum de variance se déplace vers le sommet de la couche de brouillard, où des rouleaux de grande amplitude apparaissent. Ces rouleaux sont centrés au sommet moyen de la couche de brouillard et ont une longueur d'onde d'environ 1/3 de la hauteur moyenne de la couche de brouillard. Ceci conduit à un maximum de TKE et à une dispersion très importante du contenu en eau nuageuse au sommet du brouillard. La turbulence au sein de la couche du brouillard est caractéristique d'une turbulence 3D homogène, alors qu'elle est caractérisée par une turbulence 2D au sommet du brouillard. La dissipation du brouillard en surface est très hétérogène entre les différents points et prend plus de 2h, malgré des conditions de surface homogènes. L'évolution en couche de stratus est caractérisée par un sommet relativement homogène alors que la base présente une dispersion typique de l'épaisseur de la couche du nuage.

Concernant l'amélioration de la prévision du brouillard à méso-échelle, il s'agissait dans un premier temps d'évaluer le potentiel de Méso-NH 1D/AROME-1D (les modèles étant équivalents en 1D) par rapport au modèle 1D opérationnel COBEL. Les modèles s'avèrent équivalents moyennant une résolution verticale très fine dans les basses couches, notamment près de la surface, et une initialisation assimilant les données de surface. Dans un second temps, il s'agissait d'évaluer l'intérêt d'introduire une variabilité spatio-temporelle du nombre de gouttelettes (N_c) dans le schéma microphysique à un moment actuel d'AROME pour la prévision du brouillard. Des concentrations faibles de grosses gouttelettes diminuent l'extension verticale et le contenu en eau du fait de la sédimentation, alors que de fortes concentrations de petites gouttelettes favorisent le développement vertical et l'épaisseur optique du brouillard. Il s'avère pertinent de prendre en compte la variabilité de N_c dans le schéma microphysique et dans le calcul des propriétés radiatives, mais la difficulté la plus grande, si l'on veut mettre en place cette modification, sera de pouvoir initialiser correctement ce champ.

B2/ Couches limites convectives (F.Couvreux)

1) Amélioration des schémas en flux de masse:

1.1 Taux de mélange entre les thermiques et l'environnement :

Un diagnostic basé sur un traceur émis en surface a été développé permettant de déterminer, à partir de simulations à haute résolution (LES), les caractéristiques des thermiques (Couvreux et al., 2010). Ce diagnostic a permis de développer et d'évaluer une nouvelle formulation des taux d'entraînement et de déentraînement (Rio et al. 2010) introduite dans le schéma en flux de masse de LMDZ, le modèle des thermiques (Rio and Hourdin, 2008). Ces taux de mélange sont reliés à la divergence de la vitesse verticale dans le thermique pour l'entraînement et à la vitesse verticale, la flottabilité du thermique et le contraste en humidité entre le thermique et l'environnement pour le déentraînement. La figure 6 présente un exemple de validation à partir du diagnostic traceur de la formulation proposée dans la paramétrisation.

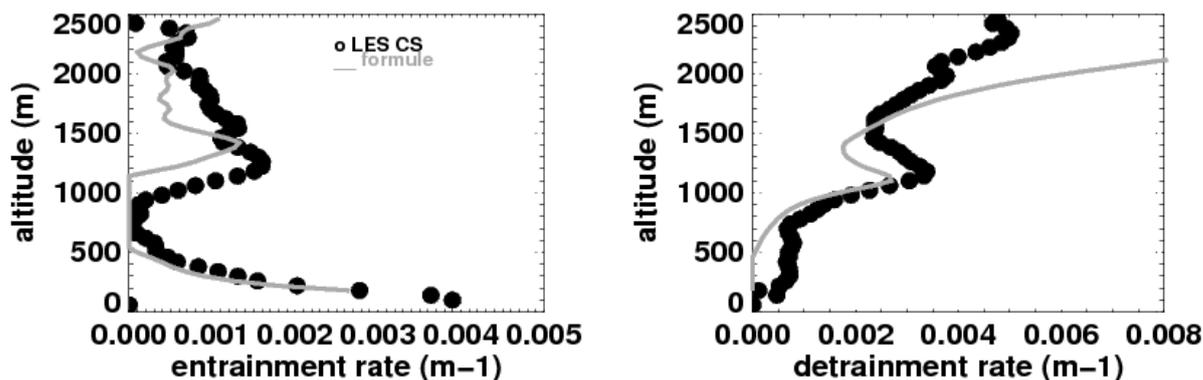


Figure 6 : Profils verticaux des taux d'entraînement (gauche) et déentraînement (droite) latéral dans les panaches thermiques dérivés du diagnostic de traceurs (ronds) et obtenus d'après la formulation introduite dans la paramétrisation (ligne grise).

Ce schéma en flux de masse et celui (EDKF) développé au CNRM ont été inter-comparés finement sur le cas ARM de petits cumulus. L'inter-comparaison a montré que si les flux verticaux de chaleur et d'humidité simulés par les deux schémas sont assez cohérents entre eux, le schéma EDKF surestime le flux de masse et la vitesse verticale dans les panaches alors que le modèle du thermique surestime l'excès de chaleur et d'humidité dans les panaches. Cela résulte en une surestimation des flux de chaleur et d'humidité simulés par les deux schémas en comparaison avec la LES. La fermeture et les taux de mélange du modèle des thermiques sont en train d'être testés dans le schéma EDKF afin de mieux comprendre les différences entre les deux modèles.

A noter que des avancées ont également été réalisées concernant le traitement numérique des paramétrisations de la couche limite convective. Une résolution implicite conjointe du flux de masse et de la diffusion a été mise en œuvre au CNRM pour stabiliser ce schéma aux pas de temps longs.

1.2 Adaptation des schémas en flux de masse aux stratocumulus :

Le modèle du thermique, développé pour les cumulus, ne permettait pas de représenter les stratocumulus. Cela viendrait du mélange en sommet de couche nuageuse non représenté explicitement dans le modèle qui ne prend en compte que le mélange latéral. Pour remédier à cela, le calcul des taux de mélange a été légèrement modifié, afin de prendre en compte le fait que l'air nuageux à un niveau donné ne se mélange pas avec l'air environnant provenant du même niveau mais avec l'air environnant provenant d'une centaine de mètres au-dessus. Ceci est une façon de prendre en compte l'effet des "subsiding shell" autour des cumulus mis en avant par Heus et Jonker, et permet l'entraînement d'air au sommet des couches nuageuses. Cette modification améliore nettement la représentation des stratocumulus sans affecter celle des cumulus.

1.3 Le modèle du thermique martien :

Le modèle du thermique a été implémenté dans le GCM martien développé au LMD. Pour cela, certaines modifications du schéma, et notamment des paramètres libres, ont été nécessaires. L'évaluation du modèle du thermique dans les conditions martiennes pour lesquelles la hauteur de la couche limite peut atteindre 10km a permis de mettre en avant l'importance du couplage à la surface et du rayonnement sur une planète dans laquelle les poussières jouent un grand rôle sur le rayonnement, le rôle sur le transport vertical potentiellement plus important que sur Terre des "dry

intrusions”, ces intrusions d'air sec en sommet de couche limite, la nécessité de « retuner » certains paramètres du modèle, notamment ceux de l'équation de la vitesse verticale et des taux de mélange, la difficulté à représenter l'inversion à cause de la résolution verticale trop grossière en sommet de couche limite (à 10km).

2) Amélioration des schémas de nuages pour la représentation des nuages de couche limite :

2.1 Analyse des pdf de l'eau dans les LES :

L'analyse détaillée de simulations LES a d'abord permis de montrer que dans les cas de cumulus et de stratocumulus les distributions d'eau totale (ou de déficit de saturation) étaient bi-gaussienne (Perraud et al. 2010). Ces travaux ont aussi montré l'importance d'utiliser le déficit de saturation comme variable du schéma de nuage afin de ne pas négliger la variabilité de la température.

2.2 Développement des schémas de nuages :

Un nouveau schéma de nuage sous-maille a été proposé afin de tenir compte de cette bi-gaussianité. Ce schéma est couplé au schéma des thermiques et permet de représenter les cumulus (Jam et al, 2012). L'utilisation du diagnostic traceur a permis de montrer qu'une des gaussiennes était associée aux thermiques alors que l'autre représentait l'environnement. La formulation des écart-types de chacune des gaussiennes dans la paramétrisation dépend de la fraction couverte par les thermiques et de l'écart de déficit de saturation entre les thermiques et l'environnement. La figure 7 illustre, pour les différentes heures de deux simulations de cumulus (un cas océanique, BOMEX et un cas continental ARM), la validation de la formulation proposée par rapport à la valeur déduite du diagnostic traceur.

2.3 Implantation dans les modèles 3D :

Ce schéma a été introduit dans la version globale du LMDZ. L'évaluation de la nouvelle physique (incluant les améliorations du schéma des thermiques et du schéma de nuage mais également des développements sur la paramétrisation de la convection profonde cf B3) du LMD dans le GCM 3D a été réalisée (Hourdin et al., 2012). Un autre schéma de type bi-gaussien proposé par Perraud et al. (2010) est également en cours d'implémentation dans le modèle opérationnel AROME de Météo-France.

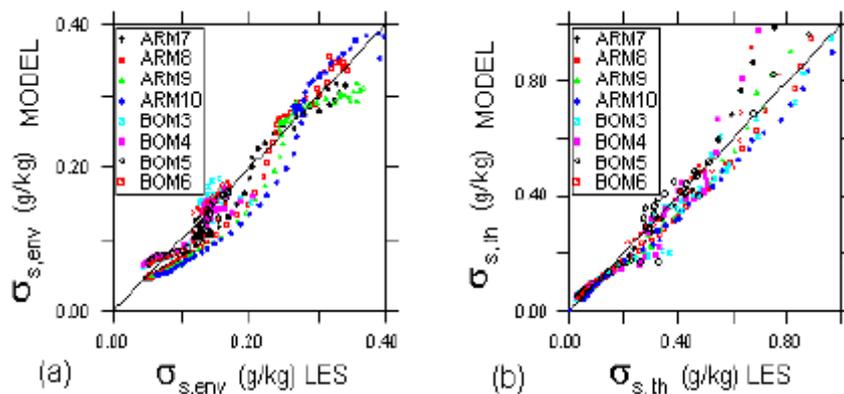


Figure 7 : diagrammes de dispersion des écarts-types de la gaussienne de l'environnement (gauche) et des thermiques (droite) traçant la formulation en fonction de la valeur déterminée à partir du diagnostic traceur. Chaque point représente une heure et un niveau vertical pour les simulations ARM (cumulus continentaux) et BOMEX (cumulus océaniques).

3) Travail sur la paramétrisation des processus de couche limite en zone grise :

Un diagnostic permettant de quantifier la partition d'énergie cinétique entre partie sous-maille et partie résolue à une résolution donnée a été développé. Les différentes paramétrisations (et paramètres) de couche limite dans Méso-NH ont été évaluées grâce à ce diagnostic (Honnert et al., 2012). Une adaptation de l'analyse conditionnelle a été proposée permettant d'évaluer les différentes hypothèses des schémas en flux de masse à l'échelle kilométrique.

B3/ Convection profonde (JY Grandpeix)

1) Schéma PCMT

1.1 Developpement de la paramétrisation :

Depuis le début de l'année 2011, il a été entrepris au CNRM de développer une nouvelle paramétrisation de la convection, commune aux modèles de grande échelle utilisés en Prévision Numérique du Temps (PNT) et en simulation climatique. Un premier code commun appelé PCMT a été produit à la fin de l'année 2011. Ce code, basé sur un concept en flux de masse unique représentant un ensemble d'événements convectifs, reprend les développements scientifiques du schéma de convection décrit dans Guérémy (2011) en ce qui concerne le profil vertical de l'ensemble convectif, les conditions de déclenchement et de fermeture, complétés par une formulation en changement de phase –transport des tendances convectives décrite dans Piriou (2007) et par une microphysique convective pronostique développée par JM Piriou. Le nouveau code a été conçu afin d'accueillir d'éventuels développements futurs concernant par exemple l'entraînement-déentraînement, les courants descendants, les conditions de déclenchement et de fermeture.

1.2 Tests unicolonnes : sensibilité à l'humidité troposphérique :

Durant l'année 2012, ce nouveau schéma a été réglé et évalué dans un cadre multi-environnement à contraintes décroissantes partant de simulations colonnes courtes aux simulations climatiques couplées (en passant notamment par des simulations courtes sur domaine limité (cf. A3) et par les scores de PNT). La figure 8 présente les profils verticaux de $Q1^{20}$ et $Q2^{21}$ du cas EUROCS sur la sensibilité à l'humidité de l'environnement (Derbyshire et al., 2004). Cette figure montre la forte sensibilité de la convection paramétrée (semblable à celle des simulations explicites de la convection référencées dans l'article cité) avec un nuage limité à 4 km à 25% d'humidité et qui culmine à 9 km à 70%. Ce comportement réaliste est dû à la prise en compte de l'humidité de l'environnement dans l'entraînement-déentraînement grâce au concept de tri par flottabilité (Guérémy, 2011): la flottabilité du mélange air nuageux et environnemental sera plus faible en air sec, le déentraînement plus important donnant lieu à une forte humidification de l'environnement entre 2 et 4 km (cf. fig. 1) limitant ainsi l'extension verticale du nuage.

²⁰ Q1 : source de chaleur

²¹ Q2 : puits d'humidité

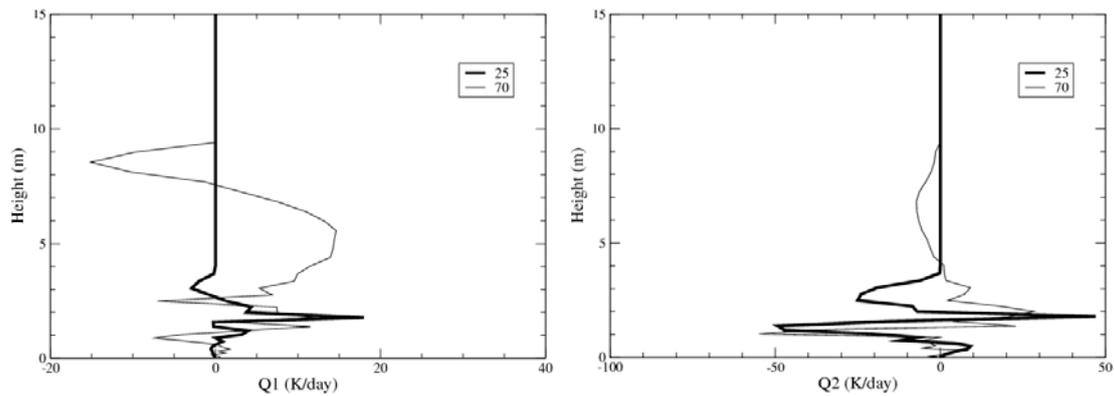


figure 8: profils verticaux de Q1 et Q2 du cas EUROCS sur la sensibilité à l'humidité de l'environnement (trait épais: 25%, trait fin: 70%).

1.3 Modèle 3D :

A l'autre bout du spectre de l'évaluation multi-environnement, la figure 9 présente 2 diagrammes spectraux de variance spatio-temporelle de l'infrarouge sortant dans une bande tropicale en hiver sur une dizaine d'années, le premier pour les observations le second pour une simulation climatique globale forcée par les températures de surface de la mer observées (comme dans Guérémy, 2001). Les nombres d'onde positifs (resp. négatifs) correspondent aux ondes d'ouest (resp. d'est), les courbes au trait fin représentant les relation de dispersion des ondes de Kelvin (resp. Rossby). La simulation présente de la variance dans le domaine des ondes de Kelvin et notamment le signal de l'oscillation de Madden-Julian centré sur une fréquence de 2 (60 jours de période) et un nombre d'onde de 2, comme les observations.

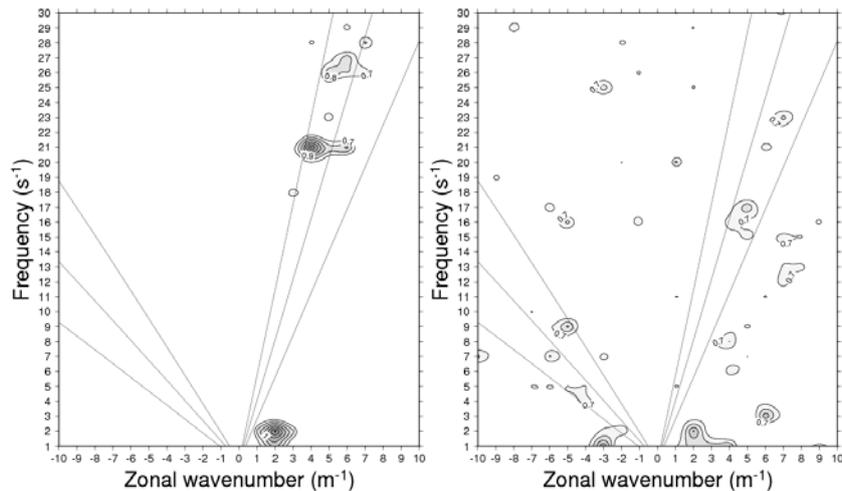


figure 9: spectres de variance spatio-temporelle de l'infrarouge sortant dans une bande tropicale en hiver sur une dizaine d'années, le premier pour les observations le second pour une simulation climatique globale forcée par les températures de surface de la mer observées.

2) Contrôle de la convection profonde par les processus sous-nuageux

Le mode de couplage du schéma de convection profonde avec les processus sous-nuageux via

l'énergie ALE²² et la puissance ALP²³ a été mis en œuvre systématiquement dans la "Nouvelle Physique" de LMDZ et dans le modèle couplé IPSL-CM5B. Il a permis de faire fonctionner conjointement le schéma d'Emanuel pour la convection profonde, le schéma des thermiques pour la couche limite et le schéma des wakes pour les courants de densité. Le déclenchement de la convection profonde est maintenant donné par ALE (la convection est active lorsque $ALE > CIN$ ²⁴) et son intensité par ALP (le flux de masse à la base du nuage est proportionnel à ALP). Les paramétrisations des thermiques et des courants de densité contribuent à la détermination de ces deux variables : ALE est la plus grande des deux énergies de soulèvement et ALP est la somme des deux puissances de soulèvement.

Différents aspects des schémas de convection ont été abordés et ont donné lieu à des développements de paramétrisations, des tests unicolonne voire en 3D pour certains.

2.1 Wakes

La paramétrisation des courants de densité ("wakes" en anglais), développée par le LMD et le CNRM (Grandpeix et Lafore, 2010) a été mise en œuvre dans le GCM LMDZ. La convection profonde y acquiert ainsi une certaine autonomie, le schéma convectif maintenant les courants de densité grâce au refroidissement dû à l'évaporation des précipitations, et le schéma des wakes maintenant la convection en fournissant l'énergie et la puissance de soulèvement nécessaires. Ce comportement auto-entretenu de la convection profonde a des conséquences particulièrement visibles sur continent puisqu'il permet au maximum d'intensité convective d'être distinct du maximum de flux solaire. Cependant pour aboutir à un réglage unique des paramétrisations, valable aussi bien sur continent que sur océan, il a fallu modifier la fermeture de la convection profonde.

2.2 Nouvelle fermeture pour la convection profonde

Le coefficient de proportionnalité entre la puissance ALP et le flux de masse à la base du nuage dépend de la vitesse de l'ascendance convective au niveau de convection libre (LFC). Ce paramètre était fixe dans les premières versions de la nouvelle physique, rendant impossible le réglage simultané des intensités convectives sur océan et sur continent. En le rendant fonction croissante de l'altitude du LFC, nous avons obtenu des intensités convectives correctes à la fois dans les cas 1D continentaux et océaniques (Rio et al., 2012).

Dans le modèle 3D, le cycle diurne de la convection continentale est décalé vers le milieu de l'après-midi, en bien meilleur accord avec les observations (cf. fig.8). En outre, la variabilité interdiurne de la convection profonde sur les océans tropicaux qui était trop faible d'un ordre de grandeur auparavant est maintenant beaucoup plus proche des observations.

²² ALE : Available Lifting Energy

²³ ALP : Available Lifting Power

²⁴ CIN : Convective INhibition

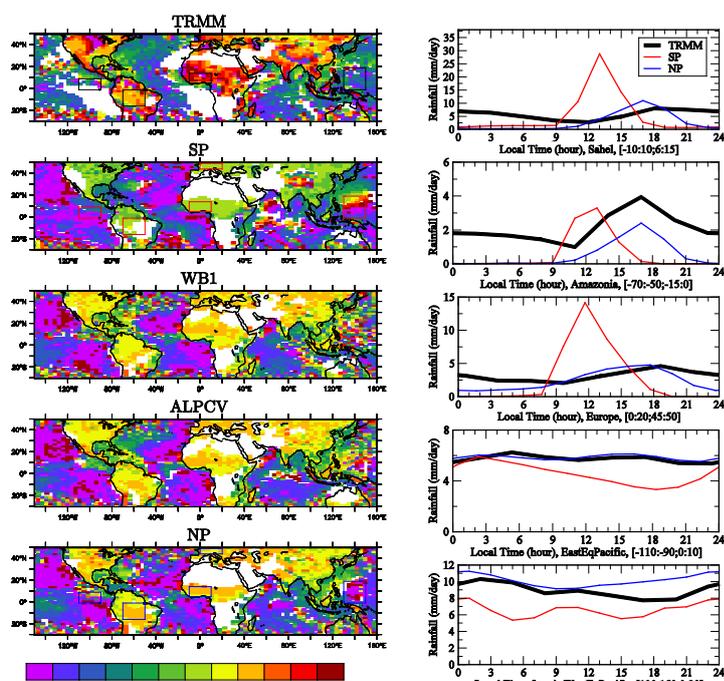


Figure 10 : colonne de gauche : heure locale du maximum de la première harmonique du cycle diurne des précipitations telle qu'observée par TRMM et simulée par LMDZ3D forcé : pour la physique standard (SP), deux physiques intermédiaires (WB1, ALPCV) et la nouvelle physique (NP). Colonne de droite : le cycle diurne moyen des précipitations sur 5 régions spécifiques (Sahel, Amazonie, Europe, Pacifique équatorial est et ouest) pour les données TRMM et les versions SP et NP du modèle.

2.3 Nouveau déclenchement pour la convection profonde :

Plus récemment, un développement concernant le déclenchement du schéma de convection profonde a été réalisé (Rochetin et al. (2012)) aboutissant à une paramétrisation stochastique du déclenchement de la convection profonde. Outre la condition que l'énergie ALE doit être supérieure à la CIN le nouveau déclenchement impose une condition portant sur la taille des cumulus. Cette dernière condition est traitée stochastiquement : la paramétrisation détermine, à partir de la PDF des tailles de cumulus, une probabilité de déclenchement ; le déclenchement lui-même est alors donné par un tirage au hasard. Cette procédure permet de retarder le déclenchement en représentant explicitement une phase de transition entre la convection peu profonde et profonde ; elle a été développée à partir d'une analyse géométrique de la population de nuages dans une simulation haute résolution.

3) Schéma convectif d'Emanuel

3.1 Thermodynamique de la glace

La prise en compte de la thermodynamique de la glace dans le schéma de convection profonde, telle que l'a développée Arnaud Jam, est en cours de test dans des cas 1D. L'évaluation dans le GCM est encore à venir.

3.2 Transport des traceurs

La paramétrisation du lessivage des aérosols par la convection profonde est maintenant au point. Elle est surtout testée pour le lessivage du Be7 et du Pb210 sur le cas TOGA-COARE long (quatre mois). Les concentrations au sol sont comparables à des observations réalisées sur des îles proches du site de l'expérience TOGA. Pour avoir une appréciation plus quantitative des résultats nous préparons une comparaison avec une simulation haute résolution sur le cas Eurocs de convection profonde.

Bilan financier:

Le détail des dotations pour chaque année est le suivant:

- 2010: 15000€
- 2011: 25000€
- 2012: 25000€
- 2013: 10000€, versée en mai 2012

Chaque année, la dotation était perçue par le LMD et la moitié de la somme reversée au CNRM-GAME.

La demande financière était utilisée pour :

- La réunion de l'ensemble de la communauté Dephy deux fois par an, pour discuter des avancées scientifiques dans le domaine, de l'évolution et de l'organisation du projet.
- Le soutien à la marge des équipes sur des thématiques difficiles à faire financer dans le cadre de projets sur Appel d'offre type projets Européens ou ANR.

Une session spéciale DEPHY suivie d'une réunion de travail a été organisée lors des Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère (CIC Toulouse) en 2010, 2011 et 2012. D'autre part, des réunions thématiques ont été organisées à l'automne à Paris sur les thèmes suivants: « la modélisation 1D » en janvier 2011 et les « schémas EDKF et thermiques » en novembre 2011.

Des missions internationales ont également été financées pour des réunions en liaison avec les projets Euclips (KNMI), GCSS (Metoffice, Exeter), Pan-GCSS (Boulder, Co) ou GABLS (Reading).

Enfin, les crédits ont aussi été utilisés pour des achats de matériel, principalement des ordinateurs portables ou le renouvellement d'un serveur.

On trouvera ci-dessous, un tableau récapitulant ces trois types de dépenses par année.

	Missions France (€)	Missions étranger (€)	Matériel (€)
2010	6469	3378	1325
2011	7817	10004	2487
2012	6017	4463	1000

Publications faites entre 2010 et 2012, par les contributeurs du projet DEPHY :

Bergot T., 2012 : "Small scale structures of radiation fog : a large-eddy simulations study" Quart. J. Roy. Meteor. sous presse

Bouteloup, Y., Seity, Y. and Bazile, E. (2011), Description of the sedimentation scheme used operationally in all Météo-France NWP models. *Tellus A*, 63: 300–311. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00484.x

Bazile, E., P. Marquet, Y. Bouteloup, and F. Bouyssel (2011), The Turbulent Kinetic Energy (TKE) scheme in the NWP models at Météo France. Proceedings of the ECMWF/GABLS Workshop on Diurnal cycles and the stable atmospheric boundary layer, 7-10 November 2011. Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2-9AX.

Bony, S., G. Bellon, D. Klocke, S. Fermepin, S. Sherwood, et S. Denvil, 2012: Direct effect of carbon dioxide on tropical atmospheric circulation and regional rainfall, *Nature Geoscience*, soumis.

Bouniol, Dominique, Fleur Couvreur, Pierre-Honoré Kamsu-Tamo, Madeleine Leplay, Françoise Guichard, Florence Favot, Ewan J. O'Connor, 2012: Diurnal and Seasonal Cycles of Cloud Occurrences, Types, and Radiative Impact over West Africa. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 534–553. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-11-051.1>

A. Campoy, A. Ducharne, F. Cheruy, F. Hourdin. Influence of the drainage boundary condition and prescribed water table on land surface fluxes in a general circulation model (a soumettre à JGR).

F. Cheruy, A. Campoy, J-C Dupont, A. Ducharne, F. Hourdin, M. Haeffelin, M.Chiriaco, A. Idelkadi 2012 Combined influence of atmospheric physics and soil hydrology on the simulated meteorology at the SIRTa atmospheric observatory. (accepté le 20 Juillet 2012, *Climate dynamics*) DOI 10.1007/s00382-012-1469-y

Couvreur, F., F. Hourdin and C. Rio, 2010: Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part I: a parametrization-oriented conditional sampling in large-eddy simulations. *Boundary Layer Meteorology*. **134**, Iss 3, 441-458 DOI 10.1007/s10546-009-9456-5

Couvreur F, C. Rio, F. Guichard, M. Lothon, G. Canut, D. Bouniol, A. Gounou, 2012: Initiation of daytime local convection in a semi-arid region analyzed with Large-Eddy Simulations and AMMA observations, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **138**, 56-71, DOI:10.1002/qj.903

Gallée H., Trouvilliez A., Agosta C., Genthon C., Favier V., and Naaim-Bouvet F., 2012. Transport of snow by the wind: a comparison between observations made in Adélie Land, Antarctica, and simulations made with the Regional Climate Model MAR, *Bound. Layer. Met.*, sous presse.

Genthon C., A. Trouvilliez, H. Gallée, H. Bellot, F. Naaim, et V. Favier, 2011. Blizzard, très blizzard, *La Météorologie*, 75, 83-89.

Genthon, Six, Gallée, Grigioni, Pellegrini: Two years of atmospheric boundary layer observation on a 45-m tower at Dome C on the Antarctic plateau, en révision pour JGR.

Gounou et al. 2012: Observations of Diurnal Cycles Over a West African Meridional Transect: PreMonsoon and FullMonsoon Seasons. *Boundary Layer Meteorol.* doi 10.1007/s1054601297238

Grandpeix J.-Y. and J.P. Lafore (2010) A density current parametrization coupled to Emanuel's convection scheme. Part I: The models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **67**, 4, 881-897,.

Grandpeix J.-Y., J.P. Lafore and F. Cheruy (2010) A density current parametrization coupled to Emanuel's convection scheme. Part II: 1D simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **67**, 4, 898-922.

Guérémy, J. F. (2011), A continuous buoyancy based convection scheme: one- and three-dimensional validation. *Tellus A*, 63: 687–706. doi: 10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x

Hourdin F., M-A Foujols, F. Codron, V. Guemas, J-L Dufresne, S. Bony, S. Denvil, L.Guez, F. Lott, J. Ghattas, P. Braconnot, O. Marti, Y. Meurdesoif, L. Bopp, 2012, Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model, *Clim. Dyn.*, accepted for publication

Hourdin, F., J.-Y. Grandpeix, C. Rio, S. Bony, A. Jam, F. Cheruy, N. Rochetin, L. Fairhead, A. Idelkadi, I. Musat, J.-L. Dufresne, A. Lahellec, M.-P. Lefebvre, and R. Roehrig , 2012, LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection, *Clim. Dyn.*, 79, 2012. doi:10.1007/s00382-012-1343-y

Honnert, R., V. Masson and F. Couvreux , 2011: Which turbulence in atmospheric models at 1 kilometer resolution? *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 68, 12. 3112-3131. DOI: 10.1175/JAS-D-11-061.1

Jam A., F. Hourdin, C. Rio and F. Couvreux, 2012: Resolved Versus Parametrized Boundary-Layer Plumes. Part III: A diagnostic boundary-layer Cloud parameterization derived from Large Eddy Simulations En revision *Boun.-Lay. Meteorol.*

Lothon M., B. Campistron, M. Chong, F. Couvreux, F. Guichard, C. Rio, E. Williams, Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a C-band radar in West Africa, *Mon. Wea. Rev.*, Vol 139, 1370-1388

Perraud, E., F. Couvreux, S. Malardel, C. Lac, V. Masson, O. Thouron, 2011: Evaluation of statistical distributions for the parameterization of subgrid boundary-layer clouds, *Boun-Lay Meteorol*, **140**, Iss 2, 263-294, DOI: 10.1007/s10546-011-9607-3

Piriou, Jean-Marcel, Jean-Luc Redelsperger, Jean-François Geleyn, Jean-Philippe Lafore, Françoise Guichard, 2007: An approach for convective parameterization with memory: separating microphysics and transport in grid-scale equations. *J. Atmos. Sci.*, 64, 4127–4139. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007JAS2144.1>

Prigent, C., N. Rochetin, F. Aires, E. Defer, J.Y. Grandpeix, C. Jimenez et F. Papa (2011): Impact of the inundation occurrence on the deep convection at continental scale from satellite observations and modeling experiments. *Journal of Geophysical Research*, 116, D24, D24118.

Rio, C., F. Hourdin, F. Couvreux and A. Jam, 2010 : Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part II: Continuous formulation of mixing rates for mass-flux schemes. *Boundary Layer Meteorology*. **135**, Iss 3, 469-483 DOI 10.1007/s10546-010-9478-z

C. Rio, J.-Y. Grandpeix, F. Hourdin, F. Guichard, F. Couvreux, J.-P. Lafore, A. Fridlind, A. Mrowiec, R. Roehrig, N. Rochetin, M.-P. Lefebvre, A. Idelkadi : Control of deep convection by sub-cloud lifting processes: the ALP closure in the LMDZ5B general circulation model. Accepted in *Climate Dynamics* 2012.

Rio, C., F. Hourdin, and A. Chédin (2010): Numerical simulation of tropospheric injection of biomass burning products by pyro-thermal plumes. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3463-3478, doi:10.5194/acp-10-3463-2010.

Roehrig, R., D. Bouniol, F. Guichard, F. Hourdin and J.-L. Redelsperger, 2012: The present and future of the West African monsoon: a process-oriented assessment of CMIP5 simulations along the AMMA transect. Submitted to *Journal of Climate*.

Publications faites dans le cadre du projet DEPHY et en préparation :

Rochetin N., F. Couvreux, J.-Y. Grandpeix and C. Rio (2012) : Deep convection triggering by boundary layer thermals. Part I: LES analysis and stochastic triggering formulation.

Pilon, R., Grandpeix, J-Y, Heinrich, P., Representation of transport and scavenging of trace particles in the Emanuel convection scheme. *QJRMS*.

Autres publications :

Coindreau O, Hourdin F, Haeffelin M, Mathieu A, Rio C (2007) Assessment of physical parameterizations using a global climate model with stretchable grid and nudging. *Monthly weather review* 135(4):1474-1489

Fridlind AS, A M Ackerman, Chaboureau JP, Fan J, Grabowski WW, Hill A, Jones TR, Khaiyer MM, Liu G, Minnis P, Morrison H, Nguyen L, Park S, Petch JC, Pinty JP, Schumacher C, Shipway B, Varble AC, Wu X, Xie S, Zhang M (2012): A Comparison of TWP-ICE Observational Data with Cloud-Resolving Model Results. *J Geophys Res* 117:D05,204

Mrowiec A., Rio C., Fridlind A. M., Ackerman A. S., Del Genio A. D., Paulius O. M., Varble A. C. and Fan J.: Analysis of cloud-resolving simulations of a tropical mesoscale convective system observed during TWP-ICE: Vertical fluxes and draft properties in convective and stratiform regions, sous presse pour *Journal of Geophysical Research*.

Pergaud, J., V. Masson, S. Malardel, F. Couvreux, 2009 : A parameterization of Dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-Layer Meteorology*. 132, 83-106. DOI 10.1007/s10546-009-9388-0

Rio, C., Hourdin, F., Grandpeix, JY., Lafore, JP., 2009 : Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land, *J Geophys. Res. Lett.*, Vol 36, 5, doi: _10.1029/2008GL036779

Romps, D. M., 2012a: Numerical tests of the weak pressure gradient approximation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, sous presse.

Romps, D. M., 2012b: Weak pressure gradient approximation and its analytical solutions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, sous presse.