

AO INSU 2010

Section « Océan-Atmosphère »

Dossier scientifique

Référence du projet : AO2010-517926 - Dephy

Nom des porteurs du projet : Frédéric Hourdin (LMD/IPSL), François Bouyssel (Météo-France/CNRM/GAME), et Marie-Pierre Lefebvre (Météo-France/IPSL)

Titre du projet : Développement et Evaluation PHYSIQUES des modèles atmosphériques

Intérêt scientifique et état de l'art

Le contexte du changement climatique

Le projet Dephy est motivé en premier lieu par le questionnement sur le changement climatique. Le dernier exercice CMIP¹ (réalisation de projections du changement climatique pour alimenter le rapport du GIEC²) a montré l'arrivée à maturité d'un certain nombre d'outils de modélisation du climat, mais a souligné en même temps les progrès qui restent à faire dans la représentation des processus atmosphériques au travers de « paramétrisations ». Les défauts de ces paramétrisations sont à l'origine d'importants biais dans les simulations climat actuel, mais également de la très grande dispersion dans les projections du changement climatique, aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle régionale. L'objectif, affiché partout, de réaliser des prévisions décennales utilisables pour anticiper les changements des climats sur les différentes régions habitées du globe ne prendra son sens que si on se donne les moyens d'améliorer le réalisme des modèles de climat.

La bonne représentation des couplages entre atmosphère, océan, bio-géochimie, surfaces continentales, aérosols, etc. repose aussi pour une grande part sur la capacité des paramétrisations atmosphériques à représenter correctement l'effet sur la circulation grande échelle des processus physiques de petite échelle comme la pluie, les couvertures nuageuses essentielles pour les flux de surface, le transport turbulent dans la couche limite, la convection sèche ou nuageuse. Les variables de petites échelles en question, dont une description simplifiée ou idéalisée est souvent à la base des paramétrisations, sont enfin souvent celles qui sont pertinentes en entrée des modèles d'hydrologie ou d'agriculture utilisés pour traduire dans les études d'impact les simulations du changement climatique.

Des contraintes nouvelles

Ces exigences nouvelles font peser un poids très important sur les équipes qui développent les modèles physiques, un enjeu qui a certainement été sous-évalué dans le passé. En même temps, ces exigences fournissent de nouvelles formes d'évaluation. C'est le cas par exemple de la nécessaire représentation du transport vertical des traceurs (aérosols, espèces chimiques, radio-éléments, isotopes ou traceurs idéalisés) par le mélange turbulent ou la convection qui donne en retour de nouveaux outils pour contraindre et améliorer les paramétrisations concernées. C'est le cas également du concept de « prévision sans couture », traduction du « seamless prediction » anglais, très en vogue dans les programmes internationaux et qui consiste à tester les mêmes modèles ou paramétrisations physiques dans des simulations numériques allant de la prévision du temps jusqu'au changement climatique. Si les « scores » de la prévision du temps dépendent pour beaucoup de la dimension du système d'observation et de la capacité des modèles à ingérer ces informations au travers de l'assimilation des données, on sait que la qualité des prévisions météorologiques

¹ CMIP: Climate Model Intercomparison Program

² GIEC: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

classiques est également conditionnée par la qualité de la représentation des processus physiques sous maille, même dans des modèles à quelques kilomètres de résolution. Cela est particulièrement vrai dans le contexte tropical où les processus diabatiques jouent un rôle majeur même aux courtes échelles de temps, résultat qui a été souligné dans le contexte de la campagne AMMA³. Le fait de tester les mêmes paramétrisations depuis les échelles climatiques jusqu'aux courtes échelles de temps dans un cadre plus proche de la météorologie – prévisions opérationnelles ou simulations « guidées » par les analyses météorologiques – est une façon de progresser vers l'accroissement du réalisme des modèles de climat.

Des avancées dans l'étude des processus atmosphériques

Or il y a eu un désinvestissement sur ces sujets dans la communauté de la modélisation du climat. Les appels d'offre nationaux ou européens ont davantage mis l'accent sur la complexification des modèles et leur utilisation, que sur l'amélioration de leur contenu physique. Des progrès importants ont cependant été réalisés en parallèle sur la compréhension des processus physiques sous-jacents et leur paramétrisation au travers de programmes internationaux comme Eucrem⁴, Eurocs⁵ ou GCSS⁶. Dans ce cadre notamment, une stratégie a émergé qui constitue aujourd'hui un des socles du développement et de l'évaluation des paramétrisations. Il s'agit de réaliser, sur des domaines ayant la taille typique d'une maille horizontale de modèle de climat, des simulations tri-dimensionnelles avec des modèles non hydrostatiques dits des grands tourbillons (LES⁷ avec des mailles d'une centaine de mètres de côté) ou avec des modèles explicites de nuages (CRM⁸). Ces simulations, souvent validées par rapport à des campagnes de terrain, sont ensuite utilisées pour développer et évaluer les paramétrisations dans des versions unidimensionnelles des modèles de climat. De nombreuses campagnes de terrain ont ainsi été déployées en vue de documenter certains processus clé en physique atmosphérique. Ces travaux ont cependant souvent été développés dans des communautés relativement disjointes de celles de la modélisation du climat, avec donc peu de retour sur l'évolution effective des modèles atmosphériques.

Ce domaine d'activité est actuellement à un virage, et il est essentiel pour la crédibilité de nos disciplines qu'un cap soit franchi dans les années qui viennent. D'abord, comme on l'a dit, les outils à la fois de modélisation complexe du climat, et les modèles méso-échelle utilisés pour réaliser les études de cas sont arrivés à un degré de maturité suffisant pour pouvoir investir à nouveau sur le contenu physique des modèles. D'autre part, une nouvelle génération de satellites (MSG, Constellation A-Train et bientôt Megha Tropiques) et le déploiement d'observations sur site (Sirta) commencent à donner des contraintes observationnelles directes sur certaines variables internes de paramétrisations, qui étaient difficilement accessibles jusqu'alors. Tout est donc réuni pour pouvoir réaliser des progrès importants en la matière dans les années qui viennent. Au niveau international, cette perspective s'est traduite par le rapprochement des programmes GCSS et CFMIP⁹.

Une extension du « projet physique commune »

Au niveau de la communauté nationale, des liens ont commencé à se tisser entre les communautés « processus » et « paramétrisations », d'abord au travers des projets Eucrem/Eurocs/GCSS puis, plus récemment, dans le cadre des projets nationaux « physique commune » et du projet AMMA (ce dernier programme a prévu dès son commencement de créer un lien fort entre campagne de terrain et modélisation du climat). Le projet « Physique Commune » est issu d'une volonté de Météo France (CNRM-GAME/GMGEC) et de l'IPSL (LMD) d'échanger des schémas de paramétrisations et d'avoir une *stratégie commune de développement* (et non pas une seule physique pour les deux modèles, comme cette expression pourrait le laisser croire) pour les modèles de climat de l'IPSL et du CNRM-GAME (Planton et Le Treut,

³ AMMA: Analyse Multi-disciplinaire de la Mousson Africaine

⁴ Eucrem: European Cloud Resolving Model project

⁵ Eurocs: EUROpean project On Cloud Systems

⁶ GCSS: GEWEX Cloud System Study

⁷ LES: Large Eddy Simulation

⁸ CRM: Cloud Resolving Model

⁹ CFMIP: Cloud Feedback Model Intercomparison Project

2002). Cette activité était au cours des trois dernières années partie intégrante du projet Lefe-Missterre¹⁰. Le projet Dephy est en partie une continuation et surtout une extension du projet « physique commune » tel qu'il était prévu à l'origine.

En termes d'extension, nous pensons notamment à l'étude des processus en amont des paramétrisations, à la prévision numérique du temps (cet aspect avait commencé à prendre corps aux réunions "physique commune"), aux régions polaires (avec le LGGE) ou encore au lien avec le transport des traceurs et des espèces chimiques, à la fois comme finalité mais également comme mode d'investigation (en impliquant notamment le LA et le CEA/DAM).

Objectifs

Le projet a pour but 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. La mise sur pied d'un tel projet nous semble essentielle si on veut pouvoir exploiter sur le long terme et répercuter en termes d'amélioration effective des modèles les investissements très lourds mis en œuvre dans le cadre de campagnes de terrain comme AMMA et d'observations satellites ou sur site. Ce projet doit aussi permettre de réduire les biais des modèles appliqués à la prévision numérique du temps ou aux simulations climatiques de moyenne ou longue échéance (dans ce dernier cas en liaison avec le projet Missterre). Dephy permettra également à terme d'orienter la communauté sur les campagnes de terrain ou les stratégies d'observation pertinentes pour l'amélioration de ces modèles. Dans une première phase, le projet se concentrera pour sa partie thématique sur la turbulence, la convection (peu profonde et profonde) et les nuages, dans la continuité des travaux réalisés dans le projet "Physique Commune" et de recherches amont développées depuis plusieurs années dans la communauté. Un des objectifs sera bien sûr par la suite d'explorer de nouvelles approches pour les paramétrisations de ces processus et d'effectuer une veille sur les travaux développés dans ce domaine au niveau international. Une extension du projet à d'autres thématiques (rayonnement, ondes, microphysique,) sera également discutée au cours de cette première année lors des deux réunions nationales.

Au niveau national, le projet Dephy a des liens forts avec le projet Missterre de modélisation du système Terre (qui chapeautait le projet « physique commune »), avec le projet AMMA pour l'amélioration de la modélisation du climat en Afrique de l'Ouest et avec le projet « Développement de simulateurs d'observables spatiales et utilisation pour l'évaluation des nuages et des aérosols simulés par les modèles » porté par Hélène Chepfer, tous trois des projets LEFE. **Au plan international**, Dephy a des liens forts avec les projets GCSS, CMIP, CFMIP et avec le projet européen Euclipse¹¹ pour l'évaluation physique et l'amélioration des modèles de climat.

La demande financière a pour but :

1. 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.
2. Le soutien aux équipes sur des thématiques difficiles à faire financer dans le cadre de projets sur Appel d'offre type projets Européens ou ANR.

Elle est demandée conjointement aux programmes **EVE et IDAO** de LEFE.

¹⁰ Missterre: Modélisation Intégrée du Système Terre

¹¹ Euclipse: EU Cloud Intercomparison, Process Study and Evaluation project

Plan de recherche, résultats attendus et calendrier de réalisation

Le plan de recherche s'articule en trois volets méthodologiques et trois volets thématiques.

A) Outils et méthodologie

- A.1) Simulations explicites tri-dimensionnelles pour la construction de cas 1D p.4
- A.2) Utilisation des observatoires atmosphériques pour l'évaluation des modèles p.5
- A.3) Stratégies d'évaluation croisée des modèles de prévision et de climat p.7

B) Amélioration des schémas existants et développements de nouveaux schémas

- B.1) Couches limites stables p.9
- B.2) Couches limites convectives p.10
- B.3) Convection profonde p.11

Pour chacun d'eux, on décrit à la fois les grands enjeux et les objectifs et résultats attendus pour 2010.

A) Outils et méthodologie

A.1) Simulations explicites tri-dimensionnelles pour la construction de cas 1D

Coordinateur : M.-P. Lefebvre

Le projet « physique commune » a permis dans un premier temps de converger vers l'utilisation d'un outil de modélisation 1D commun, intégrant en parallèle la physique « en bloc » soit de LMDZ soit d'ARPEGE-Climat. Trois grands groupes de paramétrisations ont été identifiés : couche limite/convection/nuages, rayonnement et orographie/ondes. Le bloc couche limite/convection/nuages a donné lieu aux plus importants développements. Ces travaux ont abouti à des évolutions communes des deux modèles qui sont passés d'une version diagnostique (utilisée pour les simulations IPCC/AR4) à une version dite pronostique. Dans les deux modèles, une nouvelle paramétrisation de la couche limite convective et des cumulus, combinant un schéma en flux de masse et un schéma de turbulence (soit Mellor & Yamada, soit Cuxart et al), a été développée (Hourdin et al, 2002, Rio et al, 2008 et Pergaud et al 2009).

Pour poursuivre ces améliorations, on s'appuiera sur des simulations à haute résolution, LES pour la couche limite ou CRM pour la convection profonde, qui résolvent explicitement les circulations dans la couche limite ou dans les cellules convectives. Comme ces modèles disposent en plus de paramétrisations de la microphysique nuageuse et du rayonnement, ils permettent une étude détaillée des processus nuageux associés à ces mouvements turbulents ou convectifs. Par rapport aux observations, les simulations numériques ont l'avantage de fournir des champs 3D simultanés de différentes variables et de représenter ainsi la variabilité spatio-temporelle. Ces simulations sont devenues par ailleurs de plus en plus accessibles grâce à l'accroissement des capacités de calcul. Dans l'objectif de développer des modèles les plus physiques possibles et d'augmenter ainsi la confiance dans les prévisions (du temps ou du changement climatique), ces simulations explicites sont ainsi un outil essentiel.

Cette partie s'articule autour des axes suivants :

- l'étude et la détermination des processus clés à représenter par les paramétrisations physiques des modèles de grande échelle en s'appuyant sur la complémentarité observations/LES.
- la détermination de diagnostics élaborés basés sur des simulations explicites permettant une évaluation extensive des paramétrisations physiques. Ces diagnostics sont souvent déduits du point précédent et visent à mettre en évidence la représentation des processus clés identifiés. Il s'agit en particulier de caractériser dans les simulations explicites tri-dimensionnelles l'équivalent des variables internes des paramétrisations comme les flux de masse convectifs, les vitesses verticales moyennes dans les ascendances, les moments de distributions sous-mailles de certaines variables, etc.
- la mise en place d'une base commune de cas d'étude pertinents et représentatifs, qui fournira les forçages et profils initiaux nécessaires pour effectuer des simulations 1D, ainsi que l'automatisation de la comparaison des résultats des simulations 1D aux sorties des simulations LES/CRM et observations nécessaires pour les évaluer
- la génération de cas 1D et éventuellement LES non idéalisés à partir de forçages extraits des modèles 3D afin d'analyser le comportement des paramétrisations dans leur environnement

« naturel » .

- le test de différentes méthodologies pour prescrire les forçages à grande échelle comme l'approximation des faibles gradients horizontaux de température, valide dans les tropiques, et qui permet de paramétriser la dynamique verticale dans un modèle 1D (Sobel et Bretherton, 2000). Cette paramétrisation permet d'étudier les rétroactions entre la physique des modèles et la dynamique au premier ordre. Ce cadre de travail peut servir à l'intercomparaison de modèles (Sobel et Bellon, 2009), et il servira à comparer la réponse de la convection à un changement de température de surface ou de transport d'humidité dans LMDZ et ARPEGE.
- le développement d'un cadre de simulations 1D et l'échange de paramétrisations.
- la mise en place de cas d'étude pour évaluer la représentation du cycle diurne par les paramétrisations.

Travail prévu en 2010 :

- Le transport asymétrique du bas vers le haut ou du haut vers le bas dans la couche limite convective sera étudié à l'aide de traceurs, émis à la surface et juste au-dessus de la couche limite, qui seront mis en place dans des simulations LES. D'autre part, les processus qui contrôlent les transitions stratocumulus marins-cumulus seront étudiés à l'aide de deux cas d'études.
- Une collaboration entre LMD et le CNRM-GAME a déjà donné lieu à un travail permettant de définir, à partir de tels traceurs, un nouveau diagnostic pour sélectionner les structures cohérentes de la couche limite, qui est actuellement en cours de valorisation. Ce diagnostic est utilisé pour évaluer la paramétrisation en flux de masse (Rio et al, 2008) de manière détaillée. Il a ainsi permis de mettre en évidence des limites de la définition des taux d'entraînement et de déentraînement (cf. B2). Ces travaux seront poursuivis, notamment en ce qui concerne la représentation de la distribution sous-maille de l'eau et les schémas de nuage.
- Dans le cadre des exercices internationaux de comparaison de modèles, une riche base de cas d'étude des couches limites convectives va être mise en place : IHOP (couche limite convective en ciel clair), BOMEX (cumulus d'alizés), ARM (cycle diurne continental petits cumulus et convection profonde), RICO (cumulus précipitants), FIRE (cycle diurne des stratocumulus). De plus, deux nouveaux cas de transitions stratocumulus marins-cumulus d'alizés sont actuellement développés dans le cadre de GCSS. Pour cet ensemble de cas, la liste des forçages et profils initiaux sera archivée ainsi que certains champs issus des simulations explicites de ces cas. Pour certains cas, un jeu d'observations mises en forme pour l'évaluation des paramétrisations pourrait également être inclus. Notons qu'on profitera par ailleurs du cadre de ce projet pour coordonner la participation française aux exercices d'intercomparaisons 1D de GCSS ainsi que pour les cas prévus dans le projet Euclipse.
- Evaluation des nouvelles paramétrisations de couche limite utilisées dans LMDZ et ARPEGE (schémas de turbulence en ECT¹² et de convection peu profonde en flux de masse) sur plusieurs cas 1D: IHOP, BOMEX, ARM, FIRE
- Le LMD souhaite faire migrer sa physique vers la plate-forme MUSC¹³ développée par le CNRM-GAME (modèle pseudo-1D composé de 4 colonnes identiques et sur lequel sont déjà testées différentes physiques). Cette plate-forme permettra d'évaluer les évolutions et variantes des schémas de paramétrisations des modèles ARPEGE et LMDZ de façon cohérente et complémentaire avec les évaluations réalisées en 3D.
- Développement de la paramétrisation de la dynamique en approximation de gradients horizontaux de température comme option de la "physique commune".

A.2) Utilisation des observatoires atmosphériques pour l'évaluation des modèles

Coordinateur : F. Cheruy

L'évaluation des simulations par confrontation à des observations de routine ou issues de longues campagnes de mesure effectuées sur des observatoires atmosphériques permet de tester nos modèles sur des échelles synoptique, saisonnière, inter-annuelle voire climatique à faible coût numérique à partir de jeux de données existants. Cette évaluation est complémentaire des « études de cas » effectuées avec les versions 1D des

¹² ECT: Energie Cinétique Turbulente

¹³ MUSC: Modèle Unifié Simple Colonne

modèles et des CRM ou LES à l'occasion de campagnes de mesures focalisées (typiquement 2 ou 3 situations très documentées – approche GCSS, cf. A1) car la possibilité de suivi continu qu'elle offre lui assure une plus grande représentativité. Elle doit permettre:

- d'identifier les insuffisances des paramétrisations physiques des modèles,
- d'identifier des causes possibles pour ces faiblesses,
- d'évaluer l'impact des modifications effectuées dans les paramétrisations,
- de confronter le comportement de différents modèles sur différents observatoires qui fournissent les mêmes paramètres.

Du côté de la modélisation, deux approches seront retenues. Dans la première, on utilisera des modèles tri-dimensionnels complets. On utilisera en particulier le modèle LMDZ avec une grille fortement zoomée sur la zone cible ce qui permet d'atteindre une résolution suffisamment fine à moindre coût et avec certaines variables d'état du modèle (température, vent, éventuellement l'humidité) rappelées vers les analyses opérationnelles afin de s'affranchir des sources d'erreur dues à la dynamique de grande échelle (Coindreau et al., 2007, Cheruy et al., 2009). De même, la validation au Sirta des prévisions numériques du temps effectuées par MétéoFrance avait été entreprise dans le cadre du projet CloudNet (Bouniol et al., 2009) et pourrait être reprise dans le cadre de Dephy avec les modèles ARPEGE et AROME. Une idée en projet serait également d'effectuer également des simulations avec le modèle régional WRF¹⁴, soit forcé par les analyses météorologiques, soit « niché » dans LMDZ. Notons que le modèle WRF tourne déjà en temps réel au Sirta pour calculer les entrées météorologiques pour le modèle de pollution CHIMERE. L'utilisation conjointe d'un modèle de climat zoomé et d'un modèle à maille kilométrique permettrait en particulier d'aborder les questions d'échelles et de représentativité du site du Sirta (Haeffelin et al., 2005).

Le couplage avec la surface est un élément déterminant des simulations 3D sur un site continental comme le Sirta. Un effort particulier sera donc réalisé dans ce cadre pour valider les schémas de surface et leur couplage avec les paramétrisations de la couche limite atmosphérique. Pour cette étude des couplages avec la surface, le côté multi-varié des observations au Sirta est essentiel. Le Sirta permet en effet de contraindre simultanément les flux radiatifs, latents et sensibles en surface, la hauteur de couche limite, les température et humidité au dessus de la surface et dans le sol, et de contraindre ainsi séparément les différentes composantes du système.

La seconde approche consiste à utiliser une version uni-dimensionnelle des modèles. Des analyses météorologiques peuvent permettre de déduire au jour le jour les tendances dynamiques de grandes échelles (Neggers et Siebesma 2008, Catarino et al., 2009). Cette opération est délicate car il faut éviter d'introduire des incohérences entre la dynamique et la physique, ces dernières pouvant masquer les sources réelles de désaccord avec les observations. Un travail d'évaluation de la qualité des forçages est nécessaire.

Du point de vue des observations au Sirta, un effort important sera réalisé pour assurer la plus grande continuité possible dans les mesures d'un grand nombre de paramètres significatifs et pour documenter leur qualité (Dupont et al., 2008). La représentativité (spatiale et temporelle) des mesures à l'échelle d'une maille et des pas de temps du modèle doit être évaluée. Des campagnes de mesure ponctuelles apportant des moyens d'observation supplémentaires à ceux présents de façon pérenne sur les super sites instrumentés pourront être nécessaires dans ce cadre. On s'intéressera également dans le cadre de Dephy à l'observatoire de Cabauw qui développe le même type de travaux. On commencera enfin à exploiter les données du « CLAEA¹⁵ » qui déploie des instruments pour la mesure de la couche limite côtière (couches limites catabatiques) et sur le plateau (couche limites ultra-stables) du continent glacé. L'objet de ces observations est l'étude du bilan d'énergie à la surface, de la dynamique de la neige soufflée, des flux turbulents hydriques (bilan de masse de surface de la calotte), des échanges verticaux de chaleur, de quantité de mouvement et de constituants mineurs dans ces couches limites très particulières, et enfin l'évaluation de la capacité des modèles de climat à reproduire ces phénomènes.

Enfin, les observations de la station ARM-Niamey d'avril à décembre 2006 seront utilisées pour évaluer la représentation des couches limites et nuages dans un environnement semi-aride.

¹⁴ WRF: Weather Research and Forecasting model

¹⁵ CLAEA: Couches Limites Atmosphériques Extrêmes en Antarctique, futur atelier d'observation de l'OSU de Grenoble

Travail prévu en 2010:

- évaluation au Sirta des modifications apportées aux paramétrisations physiques du modèle LMDZ (Rio et al., 2008, 2009, Grandpeix et al., 2010 a & b) et qui seront utilisées dans les prochaines simulations pour CMIP5. Echelles de temps: synoptique, saisonnier, inter-annuel,
- analyse du couplage surface continentale-atmosphère au Sirta avec LMDZ et différentes configurations du modèle de sol Sechiba (composante physique du modèle Orchidee) en tirant parti des nouvelles mesures (forçage radiatif, flux de surface, humidité et température du sol) . Des tests préliminaires semblent montrer que le couplage au schéma de surface Sechiba à 11 couches permet de supprimer les biais chauds et secs qui apparaissaient en été dans les moyennes latitudes,
- documentation systématique de la base de données Sirta ; extraction des données brutes converties en données géophysiques; échantillonnage temporel cohérent avec les pas de temps du modèle, caractérisation des incertitudes,
- la comparaison de certains jeux de données Sirta avec des mesures effectuées en région parisienne (température, humidité, vents issus des réseaux de mesures opérationnels Météo-France et IGN) permettront de quantifier la représentativité spatiale des observations Sirta,
- faisabilité de génération automatique de cas 1D sur les sites instrumentés (tests sur océan en cours). Possible collaboration avec le KNMI¹⁶ (Cabauw),
- étude de faisabilité d'une approche type CloudNet: simulations en mode prévision météorologique confrontées à des observations de lidar-nuage, radar-nuage et radiomètre micro-ondes, une fois les incertitudes des instruments de mesures prises en compte dans les simulations,
- la tour instrumentée de 45 m située au Dôme C sur le plateau Antarctique sera entretenue, et de nouveaux thermo-hygromètres seront déployés. Des profilages par cerf-volants jusqu'à des hauteurs de 300 m seront réalisés. Un mât instrumenté de 8 mètres et des instruments de mesure de la neige soufflée seront déployés en zone catabatique, de la côte jusqu'à 100 km vers l'intérieur,
- la capacité du modèle régional MAR et des analyses météorologiques du CEPMMT à reproduire les séries d'observation sera évaluée.

A.3) Stratégies d'évaluation croisée des modèles de prévision et de climat

Coordinateur : I. Beau.

Les besoins opérationnels et les enjeux scientifiques multiples associés à la prévision du temps et à la compréhension du climat nécessitent l'exploitation de modèles numériques dans des configurations extrêmement variées. Il existe par exemple plusieurs ordres de grandeur en matière de résolution horizontale ou de période simulée entre un modèle régional météorologique et un modèle global de climat. Des modèles numériques distincts sont ainsi généralement utilisés pour la prévision du temps et les simulations climatiques, même si certains éléments de ces modèles peuvent être communs, comme la dynamique ou certaines paramétrisations physiques. Néanmoins, on assiste ces dernières années à un rapprochement des deux communautés et à une convergence des caractéristiques mêmes des modèles, paramétrisations physiques notamment, pour les raisons suivantes :

- les besoins de la PNT¹⁷ et du Climat se recouvrent maintenant en partie en terme de résolution spatiale, avec une résolution typique de 100km pour un système de prévision d'ensemble global et de quelques dizaines de kilomètres pour un modèle régional de simulation climatique. Le développement de la prévision saisonnière a comblé le fossé existant anciennement en matière de période simulée entre PNT et Climat. Il apparaît ainsi de plus en plus clairement la nécessité de disposer de modèles numériques utilisables sur une très large gamme d'échelles spatio-temporelles (« seamless prediction »).
- la problématique de la modélisation des processus physiques présente de nombreuses similitudes dans un modèle de prévision du temps ou de climat et le bénéfice potentiel d'une synergie plus grande entre ces communautés est important comme cela a été mis en évidence dans le cadre de nombreux projets internationaux (GCSS, AMMA, etc).

¹⁶ KNMI: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

¹⁷ PNT: Prévision Numérique du Temps

Dans ce volet, on essaiera de tirer profit du fait d'avoir dans la communauté une variété de configurations de modèles, utilisées en mode climatique, PNT ou guidés. Les méthodes de validation utilisées en PNT et en Climat sont complémentaires. L'évaluation météorologique des modèles (prévisions à courte ou moyenne échéance initialisées par des analyses) permet de diagnostiquer les erreurs à croissance rapide dans un contexte de grande échelle correct. Les simulations utilisant un rappel vers les grandes échelles (« nudging ») sont souvent préférées pour une évaluation similaire des modèles de climat car elles réduisent la phase transitoire (« spin-up ») en début de prévision. Les simulations climatiques sont beaucoup moins contraintes et sont potentiellement affectées par tous les types d'erreur de modélisation, y compris celles à croissance lente, qui interagissent sur des échelles spatiales et temporelles multiples. Les simulations climatiques sont elles-mêmes contraintes à des degrés variables (SST¹⁸ forcée, couplage modèle océanique, couplage modèle de banquise, végétation interactive ou climatologique, etc). Compte tenu de cette complémentarité, les modèles sont maintenant validés dans de multiples configurations et il devient de plus en plus fréquent de réaliser des simulations mensuelles ou annuelles avec des modèles météorologiques et inversement des prévisions météorologiques avec des modèles de climat.

Dans cette partie, on s'attachera également à valider les modèles de climat et les modèles de PNT sur des bases physiques, en utilisant notamment 1) des jeux de données issus de campagnes et donnant lieu souvent à des exercices d'inter-comparaison et 2) les jeux récents d'observations satellites de l'A-train ou de MSG et bientôt Megha-Tropiques, pour tenter de contraindre directement la structure tri-dimensionnelle des nuages notamment, en utilisant en particulier le simulateur d'observation Cosp¹⁹ présenté dans un autre projet LEFE coordonné par Hélène Chepfer (« Développement de simulateurs d'observables spatiales et utilisation pour l'évaluation des nuages et des aérosols simulés par les modèles »).

Travail prévu pour 2010 :

- évaluation des nouvelles paramétrisations physiques dans différents contextes 3D avec les modèles ARPEGE (global) et ALADIN (aire limitée) « nudgés », forcés, couplés, Il s'agira notamment de poursuivre la validation de la physique pronostique (Lopez 2002, Bechtold et al. 2001, Cuxart et al. 2000) utilisée actuellement pour la prévision opérationnelle du temps et dans ARPEGE-Climat V5. Le nouveau schéma de convection peu profonde (sèche et humide) développé dans Meso-NH (Pergaud et al. 2009), utilisé dans AROME, et le schéma de convection profonde « 3MT » (Piriou et al. 2007, Gérard et al 2009) développé pour toute la gamme de méso-échelles (y compris « zone grise ») seront évalués de la même manière,
- poursuite des échanges de paramétrisations: échange du schéma de convection/poches froides du LMD pour le CNRM-GAME et schéma microphysique d'ARPEGE pour le LMD,
- participation à l'exercice GPCI sur le transect Pacifique défini dans le cadre du projet GCSS avec différentes configurations du modèle LMDZ, étude focalisée sur la transition entre strato-cumulus et cumulus d'alizés,
- participation à l'exercice Vocals sur le Pacifique Austral avec une version fortement zoomée (maille d'une vingtaine de km) du modèle LMDZ en vue d'étudier spécifiquement la couche limite nuageuse dans la région de l'upwelling péruvien,
- participation à l'exercice AMMA-MIP de comparaison sur l'Afrique de l'Ouest (rappelée pour mémoire mais développée dans le cadre du projet AMMA phase 2),
- installation du simulateur COSP en sortie du modèle ARPEGE. La représentation des nuages simulés par le modèle global ARPEGE sera évaluée en mettant en oeuvre dans un premier temps une comparaison des réflectivités radar observées par le satellite CloudSat et des réflectivités simulées par le modèle. Par la suite une évaluation reposant sur les observations lidar du satellite CALIPSO sera étudiée. Des diagnostics appropriés à la validation tridimensionnelle des nuages simulés seront produits. Des tests de sensibilité à la méthodologie employée (paramètres du simulateur) seront réalisés. La sensibilité aux conditions initiales, aux paramétrisations physiques et à la résolution horizontale du modèle sera explorée.

¹⁸ SST: Sea Surface Temperature

¹⁹ Cosp: CFMIP Observational Simulator Package

B) Amélioration des schémas existants et développements de nouveaux schémas

B.1) Couches limites stables

Coordinateur : C. Genthon

Les couches limites stables ont été souvent relativement négligées dans le passé dans les modèles de climat. On s'intéressera ici à la fois aux couches limites des régions polaires et aux couches limites nocturnes des moyennes latitudes et à la formation des nuages associés.

En régions polaires, la couche limite atmosphérique de surface est souvent stable. Cela résulte d'un bilan radiatif de la surface négatif, du fait d'un albédo élevé, d'une forte émissivité de la neige et de la glace, et d'un faible « effet de serre » du fait d'une faible humidité atmosphérique. Les couches limites les plus stables et les plus durablement stables se trouvent sur le plateau et les plates-formes de glace Antarctiques, où en hiver des inversions de près de 1°C par mètre en surface ne sont pas rares. Les observations réalisées sur le plateau Antarctique indiquent que des modèles trouvent leurs limites dans ces conditions (Genthon et al. 2009). Les inversions sont par ailleurs le moteur des vents catabatiques qui balaient les marges de la calotte, dépassant parfois 300 km/h sur des épaisseurs de quelques centaines de mètres. Reconstituer ces aspects dans un modèle dont la résolution verticale est limitée à quelques dizaines de mètres près de la surface est un challenge. L'amélioration et l'ajustement des paramétrisations généralement développées dans d'autres contextes est d'une part un enjeu important pour la prise en compte des régions polaires dans ces modèles, d'autre part une meilleure garantie de robustesse de ces paramétrisations.

Il s'agit en particulier des paramétrisations de la turbulence et des flux turbulents en conditions stables (nombre de Richardson, fonctions de similarité, etc), de l'érosion par le vent des particules en surface (neige: Genthon et al. 2007), et de l'effet en retour de stabilisation de l'atmosphère par ces particules (Gallée et al. 2001). Très peu de modèles prennent en considération ces particules soufflées et leur impact sur la dynamique atmosphérique et sur l'accumulation de la neige en surface. La neige déposée elle-même, sa nature et ses propriétés (propriétés structurales et densité, résistance à l'érosion, albédo) constitue un point faible des modèles en régions polaires. Le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) du LGGE simule ces différents processus sur la base de paramétrisations avancées, validées seulement à partir de mesures annuelles du bilan de masse en surface (Gallée et al. 2005). Une validation plus détaillée par de nouvelles observations en cours permettra de « calibrer » les autres modèles et leurs paramétrisations, et d'anticiper le transfert des paramétrisations de MAR dans les modèles globaux du climat. MAR dispose également d'un traitement avancé de la micro-physique nuageuse pour les nuages froids. La transition entre phase liquide et phase solide dans ces nuages a un impact majeur sur l'interaction nuages – rayonnement et in fine sur le bilan de l'énergie et la température en surface (Gallée et al. 2008). La difficulté des modèles climatiques à reproduire les caractéristiques des nuages polaires pourrait être à l'origine de leur incapacité à simuler la débâcle rapide de la banquise arctique. A nouveau, vérifié et calibré par les observations de surface (SHEBA²⁰, BSRN²¹), MAR pourra servir de référence à grande échelle pour les modèles globaux, et le transfert de performances à travers une « physique commune » pourra être envisagé.

Sous nos latitudes également, les couches limites nocturne (stables) et la formation des brouillards posent des problèmes pour la modélisation numérique, et, là aussi, la résolution verticale et la microphysique sont invoquées comme causes probables des difficultés rencontrées. Afin de traiter assez finement les interactions entre les différents processus physiques se produisant au sein d'une couche de brouillard, il est en effet nécessaire d'utiliser une résolution verticale très fine et actuellement hors de portée des modèles opérationnels de prévision (Tardif, 2007). Une des spécificités de la couche limite nocturne et du brouillard est l'existence de gradients verticaux très forts pour des couches atmosphériques très fines. Pour traiter ce problème, une voie possible serait de concevoir des paramétrisations traitant ces gradients verticaux sous-maille. Un problème supplémentaire est lié à la présence d'eau nuageuse sur des couches atmosphériques très fines, dont il est nécessaire de prévoir l'évolution à une échelle verticale inférieure à la maille du modèle.

²⁰ SHEBA: Surface HEat Budget of the Arctic ocean project

²¹ BSRN: Baseline Surface Radiation Network

Un travail est également nécessaire afin de prendre en compte la spécificité granulométrique des gouttelettes de brouillard (sursaturations très faible, entraînant des gouttes d'un rayon proche de 1 micron). De plus, des études s'appuyant sur les campagnes de mesures ParisFog et ToulouseFog ont montré une dépendance complexe entre le nombre de particules d'aérosols et le nombre de gouttelettes de brouillard (Rangognio et al., 2009). Il conviendra donc d'essayer de paramétrer simplement ces interactions aérosols-gouttelettes nuageuses. L'étude des processus pilotant le cycle de vie des brouillards et plus largement des nuages stratiformes peut être menée grâce à la co-localisation spatiale et temporelle d'une forte synergie instrumentale comme celle implantée au Sirta. Celle-ci offre la possibilité de documenter finement les différents processus concurrentiels affectant les phases de formation, persistance et dissipation des nuages. Les mesures pérennes effectuées sur le Sirta et plus spécifiquement la base de données de la campagne de mesures ParisFog permettront d'analyser et de comprendre les multiples facteurs dynamiques, radiatifs et microphysiques régulant le cycle de vie des brouillards et nuages stratiformes. Le couplage simulations numériques / observations Sirta sera mis à profit pour étudier le rôle des processus dynamiques (champ de vent, flux turbulent de surface, énergie cinétique turbulente) sur la phase de formation des brouillards et nuages stratiformes.

Travail effectué en 2010:

- caractérisation du modèle MAR, en particulier des routines de basse couche limite et de traitement de la neige soufflée, à partir des mesures de la première campagne CALVA en zone côtière Antarctique (cf. A-2),
- sensibilité à la résolution verticale du modèle, évaluation des paramètres de diffusion turbulente en fonction de la résolution, en région catabatique et sur le plateau,
- étude en mode LES à l'aide du modèle mesoNH des processus sous-maille se produisant au sein d'une couche de brouillard,
- prise en compte simplifiée du nombre d'aérosols dans la paramétrisation microphysique,
- analyse de l'impact potentiel des processus dynamiques sur le cycle de vie (1) des brouillards à partir de la campagne ParisFog (Bergot et al., 2008) sous forme d'études de cas et (2) des nuages stratiformes à partir des mesures pérennes Sirta (Haeffelin et al., 2005) sous forme d'études statistiques.

B.2) Couches limites convectives

Coordinateur : F. Couvreux

La couche limite atmosphérique joue un rôle clé dans le système climatique, de par ses interactions directes avec la surface, et de par la turbulence dont elle est le siège, influant sur le transport des espèces chimiques et la formation des nuages. De nombreux biais systématiques des modèles couplés sont étroitement liés à la représentation des processus physiques au sein de la couche limite convective, que ce soit à l'échelle diurne (cycle diurne des précipitations), saisonnière (sous-estimation des nuages bas), intra-saisonnière (oscillation de Madden Julian) ou inter-annuelle (ENSO²²). De plus, la représentation des nuages de couche limite marine (cumulus et stratocumulus) constitue la principale source de dispersion dans les projections du changement climatique (Bony & al., 2006).

Ces dernières années, des paramétrisations basées sur les processus physiques sont venues remplacer les schémas plus empiriques basés sur des relations de similitude ou de contre-gradients. Plus particulièrement, les approches combinant diffusion turbulente et schéma en flux de masse pour le transport non local ont connu un franc succès pour la représentation du cycle diurne de la convection sèche et des cumulus de couche limite. D'un autre côté, les schémas de nuages basés sur des distributions à priori de variables comme l'eau totale ou la température se sont étendus, même s'ils restent pour l'instant dépendants du type de nuage considéré. Enfin, le rôle de la couche limite dans le pré-conditionnement et le développement de la convection profonde est au centre des débats sur la faisabilité des schémas unifiés de convection.

L'objectif de cette partie est d'évaluer et d'améliorer les paramétrisations de turbulence locale et non-locale, ainsi que les schémas de nuages, en s'appuyant sur tous les outils développés plus haut : exploration systématique d'une batterie de cas LES avec des simulations 1D, validation en mode tri-dimensionnel en utilisant en particulier le simulateur Cosp pour évaluer la représentation de la distribution tri-dimensionnelle des nuages, participation aux exercices GPCI ou Vocals, test des nouvelles approches de couches limite

²² ENSO: El Nino-Southern Oscillation

utilisant des schémas en flux de masse en parallèle dans des modèles climatique et en PNT. Par la suite, des cas d'étude pourront être développés spécifiquement pour étudier : 1) le couplage entre la couche limite et la surface, notamment pour l'étude de la répartition des flux de chaleur latente et sensible, en réponse aux tensions de vent ou aux précipitations, et les interactions entre surface et convection ; 2) le lien entre couche limite et flux de surface océaniques au travers notamment des tensions de vent ou 3), la question du soulèvement des poussières en lien avec la description des fluctuations turbulentes du vent. La communauté française dispose d'une variété de schémas de turbulence, de nuages et de surface qui constitue une base solide pour aborder les différents aspects encore problématiques de la représentation des processus de couche limite convective dans les modèles de climat.

Le cycle de vie des nuages de convection peu profonde est fortement couplé à la dynamique de la couche limite atmosphérique. Or, l'observation continue des champs de vent / turbulence de la surface jusqu'au sommet de la couche limite offre une information complète et robuste des interactions pilotant les phases de formation et de dissipation de ces nuages cumuliformes. Les mesures de télédétection passive (radiomètres) et surtout active (radar, sodar, lidar) fournissent depuis plusieurs années sur le Sirta un ensemble de données exploitables pour identifier et quantifier le poids des flux turbulents locaux (flux de chaleur sensible et de chaleur latente de surface, profils de dissipation turbulente, champs de vent) sur les différentes phases du cycle de vie des nuages de convection peu profonde.

Travail prévu en 2010:

- paramétrisation des processus de mélange dans le modèle du thermique nuageux, schéma en flux de masse de LMDZ (Rio et al. 2008): en particulier, une formulation plus physique des processus de mélange entre un thermique, sec ou nuageux, et son environnement sera testée sur différents cas d'étude 1D à l'aide de simulations haute résolution incluant des traceurs (cf. A.1.),
- amélioration des schémas de nuages: les schémas de nuages existants ont généralement été développés pour un type particulier de nuages. L'objectif est de rendre ces schémas utilisables à la fois pour les stratocumulus, les cumulus et les cumulonimbus. Par exemple, pour la convection peu profonde, des développements en cours visent à faire dépendre la largeur de la distribution de l'eau totale utilisée des caractéristiques des thermiques de couche limite. Une attention toute particulière sera portée sur la représentation des stratocumulus océaniques. Des simulations LES de plusieurs cas bien documentés de stratocumulus marins (cf. A1) seront utilisées pour tester ces développements. La question de la représentation par les schémas de nuages de la transition stratocumulus-cumulus pourra également être abordée (cf. A1, nouveau cas GCSS),
- étude du rôle de la couche limite dans le développement de la convection profonde : les modèles seront testés sur un nouveau cas de développement de convection profonde en conditions semi-arides, issu des observations de la campagne AMMA. Ce cas, très différent des cas simulés précédemment aux moyennes latitudes, permettra de mettre en évidence des facteurs clés de la phase de transition puis du développement de la convection profonde non pris en compte dans les modèles. Des développements seront mis en œuvre afin de représenter au mieux le cycle diurne des précipitations, à la fois aux moyennes latitudes et dans les tropiques. Sur ce cas d'étude, on pourra chercher à diagnostiquer les puissances de soulèvement (ALP) et énergies de soulèvement (ALE) introduites dans la paramétrisation de la convection par Grandpeix et Lafore (2010),
- analyse des champs de vent obtenus par mesures radar, sodar et lidar pour des cas d'études : identification des phases de formation et dissipation et diagnostic de signaux caractéristiques,
- étude statistique sur les flux de surface (flux de chaleur sensible et latente, flux radiatifs) pour des différents échantillons de nuages.

B.3) Convection profonde

Coordinateur : J.-Y. Grandpeix

L'amélioration de la représentation de la convection profonde dans les modèles de climat et de prévision du temps reste une question centrale pour la simulation atmosphérique globale. Parmi les défauts citons par exemple les décalages importants des cycles diurnes de la convection profonde simulés sur continent relativement aux observations, l'absence de représentation de la propagation des systèmes convectifs, la

mauvaise répartition spatiale des pluies convectives ou la difficulté à simuler les oscillations de grande échelle comme l'oscillation de Madden et Julian. La réponse à ces questions doit être apportée par des modèles numériques aptes à fonctionner sur une très large gamme d'échelles spatio-temporelles.

Les développements récents, portant sur les processus de couche limite et de convection profonde ont permis d'avancer sur la simulation du cycle diurne de la convection continentale et d'ouvrir une voie vers la représentation de l'organisation et de la propagation de la convection (Grandpeix et al., 2010 : paramétrisations des courantes de densité, couplage du schéma convectif avec les processus sous-nuageux par l'intermédiaire de l'énergie (ALE) et de la puissance (ALP) de soulèvement). Des avancées importantes ont été réalisées en matière de représentation multi-échelles de la convection (Gérard et al., 2009 : paramétrisation 3MT « Modular Multiscale Microphysics and Transport » construite autour d'une microphysique unique séparée du transport, gérant de façon cohérente la résolution partielle des mouvements convectifs par la dynamique).

Ces développements permettent maintenant d'aborder les thématiques de répartition spatiale, d'organisation, de propagation de la convection et de simulations multi-échelles de la convection. Les études concernant le cycle diurne de la convection continentale seront menées dans le cadre du projet AMMA.

Simulation des variabilités spatiales et temporelles de la convection profonde

Un objectif important est d'obtenir une simulation correcte des cartes de précipitation mensuelle sur l'océan Atlantique tropical. L'effort va porter sur l'analyse et l'amélioration du couplage des schémas représentant les thermiques et les poches froides avec celui de convection profonde.

On explorera également les couplages entre convection, humidité troposphérique et flux turbulents, et on abordera explicitement la question de l'agrégation de la convection. On s'appuiera pour cela sur la comparaison avec des simulations CRM et des observations pour identifier les mécanismes menant à l'agrégation en gros systèmes convectifs. De nouveaux développements de paramétrisations seront nécessaires concernant aussi bien la dynamique des poches froides que leur couplage avec l'initiation et l'intensité de la convection (rôle du cisaillement).

L'oscillation de Madden et Julian est en général assez mal représentée dans les modèles de climat (Zhang, 2005; Xavier et al, 2009). Cela pourrait en particulier être lié à un manque d'organisation de la convection tropicale empêchant la mise en place de la réponse dynamique nécessaire au déclenchement puis à l'évolution d'un événement intrasaisonnier (Bellenger et al., 2009). Les mécanismes gouvernant la profondeur de la convection peuvent aussi jouer un rôle important.

La représentation du cycle de vie des systèmes convectifs et de leur propagation est aussi un objectif central de ce projet. L'un des enjeux est que ces développements commencent à être opérationnels au même moment que Megha-Tropique, afin que la synergie entre observations et modèles puisse jouer pleinement. La paramétrisation des poches froides est un premier pas dans cette direction. Mais il reste à traiter le passage des poches d'une maille du modèle à une autre. Ces développements de modèle vont s'appuyer sur les simulations CRM et en particulier sur le cas HAPEX²³ 92 déjà utilisé pour la mise au point du modèle de poches froides.

Modélisation du transport des espèces trace

La convection profonde joue un rôle important dans la distribution verticale des aérosols, des traceurs chimiques et des isotopes de l'eau. Réciproquement, les observations des concentrations des espèces trace dans l'atmosphère vont fournir des informations clés sur le processus convectif lui-même.

Les isotopes stables de l'eau ont été introduits dans la paramétrisation de convection d'Emanuel (Bony et al. 2008), puis dans LMDZ4 (modèle LMDZiso), et les premières évaluations des résultats sont très encourageantes (Risi et al. 2009, soumis). Dans les prochaines années, nous poursuivrons l'analyse du potentiel des isotopes de l'eau pour l'évaluation des paramétrisations du modèle (microphysique de la précipitation et de sa réévaporation, transport convectif de l'eau dans la haute troposphère tropicale, paramétrisation de la fraction de sol nu et du drainage dans le sol, etc). Les simulations LMDZiso sont comparées aux observations dans le cadre des projets "Tropopause", ISOvap et AMMA présentées au LEFE. Dans le projet Dephy, nous prévoyons surtout d'analyser la sensibilité des simulations aux paramétrisations de convection et de processus de surface.

²³ HAPEX: Hydological Atmospheric Pilot EXperiment

En ce qui concerne les couplages chimie-climat, la composition de l'atmosphère au dessus de 5 km semble jouer un rôle crucial. Or les résultats de travaux d'intercomparaison de modèles (Textor et al., 2006; Brenner et al. 2003) montrent toujours une grande dispersion quant aux concentrations d'espèces chimiques simulées dans la troposphère libre. Il manque encore aujourd'hui une approche systématique pour démêler l'importance relative des processus en jeu parmi a) le transport vertical par le vent de grande échelle et par la convection, b) l'interaction du transport vertical avec le transport horizontal de grande échelle, c) l'élimination des aérosols et des espèces chimiques gazeuses par les dépôts sec et humide et d) les échanges entre la stratosphère et la troposphère. L'objectif dans ce projet commun est de se focaliser sur le rôle de la convection et du dépôt humide, qui sont des processus clés pour comprendre la variabilité inter-modèles observée (Jacob et al, 1997; Rash et al., 2000). L'enjeu est de fournir de nouveaux diagnostics du transport issus de la modélisation à haute résolution aux modèles globaux.

D'autre part, dans le cadre du Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires, le Département Analyse et Surveillance de l'Environnement du CEA s'appuie sur un réseau mondial d'une soixantaine de stations détectant des radionucléides sous forme de particules. Parmi ceux-ci, ont été choisis pour la qualité de leurs données, 3 radionucléides naturels (^{212}Pb , ^{210}Pb et ^7Be), dont les sources sont connues et introduites dans LMDZ. Les radionucléides ^{210}Pb et ^{212}Pb , dont les périodes radioactives sont de 22,3 ans et de 10 heures, sont issus de la décroissance du gaz radon, produit dans le sol. Le ^7Be , dont la période radioactive est de 53 jours, est produit dans la stratosphère et dans la haute troposphère. Ces 3 radionucléides sont transportés et éliminés de la même façon que les aérosols auxquels ils sont liés : transport à grande échelle par la circulation générale atmosphérique, mélange vertical par convection, mélange par diffusion turbulente dans la couche limite, dépôt sec par gravité et dépôt humide (ou lessivage) par incorporation des aérosols dans les gouttelettes d'eau. En raison de leur origine différente, le transport du couple (^{210}Pb , ^7Be) permet de caractériser les échanges entre la haute troposphère et la troposphère ainsi que le lessivage dans les processus de convection profonde. Le ^{212}Pb du fait de sa période radioactive de 10h, est un indicateur du caractère local ou non de la mesure réalisée. On utilisera ces radionucléides pour améliorer et développer de nouveaux modèles de lessivage dans le schéma de convection d'Emanuel.

Convection profonde et mécanismes climatiques

Finalement, les modèles LMDZ et ARPEGE 1D vont être utilisés pour des études plus académiques.

La première d'entre elles porte sur le couplage convection surface, en soutien à l'étude qui est faite dans le cadre du programme AMMA (Work Package 1.3). D'une part des développements de paramétrisation sont nécessaires pour représenter l'action de la surface sur la convection (effet des hétérogénéités de surface, orographie ou taches humides, sur le déclenchement de la convection) et de la convection sur la surface (hétérogénéités engendrées par les pluies convectives). D'autre part des études plus fondamentales vont porter sur la boucle de rétroaction convection-surface. Ces diverses actions utilisent les modèles unicolonnes confrontés à des simulations effectuées par des CRM.

La seconde étude utilise l'approximation des faibles gradients horizontaux de température dans les modèles unicolonnes. De telles simulations ont permis de mettre en évidence des équilibres multiples des colonnes atmosphériques : deux équilibres stables ont pu être identifiés, l'un précipitant et l'autre sec, à la fois dans des modèles où la convection est paramétrée (Sobel et al., 2007) et dans un CRM (Sessions et al, 2009). Ces équilibres multiples unicolonnes semblent pouvoir dégénérer en équilibres multiples de la circulation de Hadley (Bellon et Sobel, 2010) et présentent par conséquent non seulement un intérêt théorique mais des perspectives d'une meilleure compréhension des mécanismes qui déterminent la position de la zone de convergence intertropicale. Le rôle des différents processus qui participent à l'émergence de ces équilibres multiples ne sont pas encore connus : les rôles du forçage radiatif des nuages, des flux de surface et de la convection peu profonde sont mal compris. L'objectif principal de notre étude sera de comprendre le rôle de ces processus dans LMDZ et ARPEGE 1D, afin de déterminer les résultats robustes inter-modèle. Comprendre la sensibilité de la convection modélisée aux downdrafts et à l'entraînement d'air ambiant dans la troposphère libre sera un second objectif, pour comprendre l'interaction entre convection et humidité de la troposphère libre.

Travail prévu en 2010 :

Sur la variabilité de la convection :

- Enrichissement du modèle de poches froides (représentation du rôle du cisaillement ; traitement différencié de la couche limite à l'intérieur et à l'extérieur des poches froides).
- Exploration des aspects multi-échelles de la convection, interactions entre convection peu-profonde et profonde, recherche et développement d'un schéma multi-modal et entièrement pronostique (FP-MT²⁴)
- Mise en place du cas 5 de GCSS pour l'étude des phases de convection inhibées pendant Toga-Coare²⁵ et simulations 3D de la campagne Toga-Coare.
- Tests de sensibilité de la variabilité inter-diurne et intra-saisonnière à des perturbations imposées de l'énergie de soulèvement ALE.
- Test de sensibilité des précipitations atlantiques tropicales au couplage thermiques-convection

Sur le transport des espèces traces :

- Estimation de l'efficacité du transport de traceurs passifs par des systèmes convectifs de méso-échelle pendant la campagne AMMA 2006 (SOP2_a2) en fonction de leur solubilité. Méthodologie basée sur des simulations à haute résolution, comparaison avec des mesures aéroportées (CO, H₂O₂, O₃, ...).
- Définition de diagnostics pour les traceurs sur le modèle des sources apparentes de chaleur (Q1) et de puits d'humidité (Q2).
- Simulation du cas d'étude avec la version 1D du modèle LMDZ .
- Simulations d'épisodes où des pics de concentrations sont enregistrés par des stations tropicales et sont non reproduits par la version LMDZ incluant le schéma d'Emanuel. Pour ces épisodes, études de sensibilité sur la résolution spatiale, la paramétrisation du lessivage et de la convection. Simulation du transport des radionucléides naturels sur une période de 6 ans (2004-2009), en réalisant des études de sensibilité sur la paramétrisation du lessivage.

Pour les mécanismes climatiques :

- Etude des équilibres multiples de LMDZ et ARPEGE 1D.

²⁴ FP-MT: Fully Prognostic-Microphysics and Transport

²⁵ TOGA-COARE: Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment

Moyens nécessaires à la réalisation du projet

1. Soutien pour l'organisation de **deux réunions annuelles de la communauté Dephy**. La première en janvier au CNRM à l'occasion des Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère et la seconde à Paris à l'automne. Cela représente 50 missions nationales de deux jours soit environ $60 \times 700\text{€} = 42\ 000\text{€}$.
2. Fonctionnement : **Soutien aux équipes impliquées dans le projets Dephy**, à la fois pour les publications, les missions pour les collaborations nationales dans le cadre de Dephy et la participation à des conférences internationales. Nous souhaitons que cette partie de la demande soit évaluée en termes d'Equivalents Temps Plein (ETP), avec un montant forfaitaire sur ces ETP. Budget total : $13\ \text{ETP} \times 2000\text{€} = 26\ 000\text{€}$.

Montant total demandé : 68 000€

En pratique, le budget sera réparti entre le CNRM-GAME et le LMD qui se chargeront d'organiser les réunions et de redistribuer les crédits correspondants aux ETP sur les autres laboratoires.

Liste des contributeurs et ETP:

Nom	Courriel	A1	A2	A3	B1	B2	B3	%Temps
CNRM-GAME								
Eric BAZILE	Eric.bazile@meteo.fr	x			x			20
Isabelle BEAU	isabelle.beau@meteo.fr	x		x				50
Gilles BELLON	bellon@cnrm.meteo.fr						x	15
Thierry BERGOT	Thierry.bergot@meteo.fr				x			25
Dominique BOUNIOL	dominique.bouniol@meteo.fr		x	x				10
Yves BOUTELOUP	Yves.bouteloup@meteo.fr	x				x		20
François BOUYSSSEL	francois.bouyssel@meteo.fr		x	x				30
Sylvain CHAUMONT	Sylvain.chaumont@meteo.fr				x			50
Fleur COUVREUX	fleur.couvreux@meteo.fr	x	x			x		20
Alain DABAS	alain.dabas@meteo.fr		x					5
J-F GUEREMY	jean-francois.gueremy@meteo.fr	x		x			x	15
J-F GELEYN	Jean-Francois.Geelyn@meteo.fr						x	5
Françoise GUICHARD	Francoise.guichard@meteo.fr	x	x					10
Amanda GOUNOU	Amanda.gounou@meteo.fr	x						10
Rachel HONNERT	Rachel.honnert@meteo.fr					x		50
Jean-Philippe LAFORE	jean-philippe.lafore@meteo.fr						x	10
Valery MASSON	valery.masson@meteo.fr					x		25
Emilie PERRAUD	Emilie.perraud@meteo.fr					x		50
Jean-Marcel PIRIOU	Jean-marcel.piriou@meteo.fr	x				x	x	30
David POLLACK	David.pollack@meteo.fr			x				20
J-L REDELSPERGER	Jean-luc.redelsperger@meteo.fr	x			x			5
Romain ROEHRIG	Romain.roehrig@meteo.fr						x	10
Irina SANDU	irina.sandu@zmaw.de	x				x		20
Yann SEITY	Yann.seity@meteo.fr	x						10

Nom	Courriel	A1	A2	A3	B1	B2	B3	%Temps
LMD								
Hugo BELLENGER	Hugo.bellenger@lmd.ens.fr						x	50
Sandrine BONY	Sandrine.bony@lmd.jussieu.fr			x		x	x	10
Frédérique CHERUY	Frederique.Cheruy@lmd.jussieu.fr	x	x	x				50
Thomas DUBOS	dubos@lmd.polytechnique.fr		x		x	x		20
Jean-Louis DUFRESNE	jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr			x				10
Jean-Philippe DUVEL	Jean-philippe.duvel@lmd.ens.fr						x	10
Jean-Yves GRANDPEIX	grandpeix@lmd.jussieu.fr						x	50
Frédéric HOURDIN	Frederic.Hourdin@lmd.jussieu.fr	x	x	x		x	x	50
Arnaud JAM	Arnaud.jam@lmd.jussieu.fr					x		50
Marie-Pierre LEFEBVRE	Lefebvre@lmd.jussieu.fr	x						90
Catherine RIO	catherine.rio@lmd.jussieu.fr	x				x		20
Nicolas ROCHETIN	Nicolas.rochetin@lmd.jussieu.fr	x					x	50
Isabelle TOBIN	Isabelle.tobin@lmd.jussieu.fr	x					x	100
LOCEAN								
Alban LAZAR	Alban.lazar@locean-ipsl.upmc.fr						x	10
IPSL/SIRTA								
Martial HAEFFELIN	Martial.haeffelin@ipsl.polytechnique.fr		x		x			10
Jean-Charles DUPONT	jean-charles.dupont@lmd.polytechnique.fr		x		x	x		20
CEA/DAM								
Philippe HEINRICH	Philippe.Heinrich@cea.fr						x	10
Romain PILON	Romain.pilon@cea.fr						x	75
LGGE								
Christophe GENTHON	genthon@lgge.obs.ujf-grenoble.fr				x			20
Gerhard KRINNER	krinner@lgge.obs.ujf-grenoble.fr				x			10
A. TROUVILLIEZ	trouvilliez@lgge.obs.ujf-grenoble.fr				x			100
Hubert GALLEE	gallee@lgge.obs.ujf-grenoble.fr				x			20
LA								
Céline MARI	marc@aero.obs-mip.fr						x	20
LSCE								
Pascale BRACONNOT	Pascale.braconnot@lsce.ipsl.fr				x			10
LATMOS								
Sophie BASTIN	sophie.bastin@aero.jussieu.fr		x					15
SISYPHE								
Aurélien CAMPOY	campoy91@hotmail.com		x			x		50
Agnès DUCHARNE	Agnès.Ducharne@ccr.jussieu.fr		x					10

Références de l'équipe proposante sur la thématique du projet Dephy :

1. Bastin S., Chen, F., Drobinski, P., Flamant, C., Kiemle, C., Pelon, J., D. Josset, 2009 : Impact of land surface on the horizontal heterogeneity of water vapor in the convective boundary layer during the IHOP_2002 29 May case. /Mon. Wea. Rev., /in revision.
2. Bastin S., Taylor C., Boone A., Parker D., 2008: Analysis of the impact of soil moisture patterns on atmospheric dynamics on 1 August 2006 AMMA case based on high resolution numerical simulations performed with Meso-NH./ EGU General Assembly 2008./ Vienna, Austria.
3. Bechtold, P., E. Bazile, F. Guichard, P. Mascart and E. Richard, 2001: A Mass flux convection scheme for regional and global models. Quart. J.Roy. Meteor. Soc., 127, 869-886.
4. Bellenger H., J.-P. Duvel, M. Lengaigne, and Phu Levan, 2009: Impact of organized intraseasonal convective perturbations on the tropical circulation. Geophysical Research Letters, 36: L16703, doi:10.1029/2009GL039584
5. Bony, S., R. Colman, V.M. Kattsov, R.P. Allan, C.S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M.M. Holland, W. Ingram, D.A. Randall, D.J. Soden, G. Tselioudis, and M.J. Webb, 2006: How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, 19, 3445-3482, doi:10.1175/JCLI3819.1.
6. Bony S, C Risi and F Vimeux, 2008: Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{D}$) of precipitation and water vapor in the tropics: Part I. Radiative-convective equilibrium and TOGA-COARE simulations. *J. Geophys. Res.*, 113, D19305, doi:10.1029/2008JD009942.
7. Bouniol D. and coauthors, Using continuous ground-based radar and lidar measurements for evaluating the representation of clouds in four operational models, 2009, en révision au JAMC.
8. P. Braconnot, F. Hourdin, S. Bony, J.-L. Dufresne, J.-Y. Grandpeix and O. Marti., Impact of different convective cloud schemes on the simulation of the tropical seasonal cycle in a coupled ocean-atmosphere model, *Climate Dynamics* 2007 , 29 : 501-520
9. Catarino A., F. Cheruy. F. Hourdin: Confronting LES and Single column simulations of marine boundary layer clouds in a 3D GCM framework., CFMIP-GCSS meeting, June 2009 Vancouver
10. Cheruy F. ,J.C,Dupont, F. Hourdin, M. Haeffelin, 2009: Analyse du couplage atmosphère-surface continentale à l'aide des mesures du Sirta et d'un modèle de climat zoomé et guidé. *Journé Scientifique Sirta*, 29 Avril 2009, Palaiseau
11. 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
12. Couvreux,F., F. Hourdin and C. Rio, 2009, Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part I: a parametrization-oriented conditional sampling in Large-Eddy Simulations, in revision for *Bound.-Layer Meteorology*
13. Dupont J, Haeffelin M,Long CN (2008) Evaluation of cloudless-sky periods detected by shortwave and longwave algorithms using lidar measurements. *Geophysical Research Letters* 35(10): L10815
14. Gallée, H., G. Guyomarc'h, and E. Brun, 2001. Impact of the snow drift on the Antarctic ice sheet surface mass balance: possible sensitivity study to snow surface properties. *Boundary Layer Meteorology* 99, 1-19
15. Gallée, H., V. Peyaud and I. Goodwin, 2005. Temporal and spatial variability of the Antarctic Ice Sheet Surface Mass Balance assessed from a comparison between snow stakes measurements and regional climate modeling. *Annals of Glaciology* 41, 17-22.
16. Gallée, H., and I. Gorodetskaya, 2008. Validation of a Limited Area Model over Dome C, Antarctic Plateau, during Winter. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-008-0499-y.
17. Genthon C., P. Lardeux, et G. Krinner, 2007. The surface accumulation and ablation of a blue ice area near Cap Prudhomme, Adélie Land, Antarctica, *J. Glaciol.* 53, Vol. 183, 635-645.
18. Genthon C., M. Town, D. Six, V. Favier, S. Argentinì, A. Pellegrini, 2009. Meteorological atmospheric boundary layer measurements and ECMWF Analyses during summer at Dome C, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, sous presse.
19. Gerard L and Piriou JM and Brozkova R and Geleyn JF and Banciu D (2009) Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma scale operational weather prediction model, *MWR* in press
20. Grandpeix J.Y, and J.P. Lafore: A density current parameterization coupled with Emanuel's convection scheme. Part I : The models, *JAS* accepté
21. Grandpeix J.Y, J.P. Lafore and F. Cheruy A density current parameterization coupled with Emanuel's convection scheme, Part II: 1D simulations (in revision)
22. Haeffelin, M.; Barthès, L.; Bock, O.; Boitel, C.; Bony, S.; Bouniol, D.; Chepfer, H.; Chiriaco, M.; Cuesta, J.; Delanoë, J.; Drobinski, P.; Dufresne, J.-L.; Flamant, C.; Grall, M.; Hodzic, A.; Hourdin, F.; Lapouge, F.; Lemaître, Y.; Mathieu, A.; Morille, Y.; Naud, C.; Noël, V.; O'Hirok, W.; Pelon, J.; Pietras, C.; Protat, A.; Romand, B.; Scialom, G.; Vautard, R., Sirta, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research, *Anales Geophysicae* 2005 , 23 : 253-275
23. Heinrich P, Coindreau O., Grillon Y., Blanchard X., Gross P. Simulation of the atmospheric concentrations of ^{210}Pb and ^7Be and comparison with daily observations at three surface sites, *Atmospheric environment* (41) 2007 6610-6621
24. Heinrich P, Blanchard X. simulation of atmospheric circulation over Tahiti and of local effects on the transport of ^{210}Pb *Monthly Weather Review* volume 137,issue 6 1863-1880
25. F. Hourdin, I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, G. Krinner, P. LeVan, Z.-X. Li et F. Lott The LMDZ4 general circulation model : climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, *Climate Dynamics* 2006 , 27 : 787-813
26. F. Hourdin, F. Couvreux et L. Menut, Parameterization of the dry convective boundary layer based on a mass flux representation of thermals, *J. Atmosph. Sci.* 2002
27. Pergaud, J., V. Masson, S. Malardel, F. Couvreux, 2009: A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction, *BLM*, 132, 83-106
28. Piriou J.-M. and Redelsperger J.-L. and Geleyn J.-F. and Lafore J.-P. and Guichard F. , An approach for convective

- parameterization with memory: separating microphysics and transport in grid-scale equations, *J. Atmos. Sci.* 2007, vol 64, 11, 4127-4139
29. Rangognio J., P. Tulet, T. Bergot, L. Gomes, O. Thouron, M; Leriche, 2009 "Influence of aerosols on the formation and development of radiation fog" *ATmos. Chem. Phys. Disc.*, 9, 17963-18019
 30. Rio C., and F. Hourdin, 2008, A thermal plume model for the convective boundary layer: representation of cumulus clouds, *J. Atmos. Sci.*, 65, 407-425
 31. Rio, C., F. Hourdin, J.-Y. Grandpeix, and J.-P. Lafore, Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land, *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 65, in press.
 32. Risi C, S Bony, F Vimeux and J Jouzel : Water stable isotopes in the LMDZ4 General Circulation Model: model evaluation for present day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records. *J. Geophys. Res.* (soumis, 2009)
 33. Sandu I, Stevens B and Pincus R, On the transitions in marine boundary layer cloudiness, soumis a ACP, 2009
 34. Sobel, A. H., G. Bellon and J. T. Bacmeister 2007: Multiple equilibria in a single-column model of the tropical atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 34, L22804, doi:10.1029/2007GL031320.
 35. Sobel, A. H. and G. Bellon 2009: The effect of imposed drying on parameterized deep convection, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66, 2085-2096.

Autres références :

36. Cuxart, J., Bougeault, Ph. and Redelsperger, J-L., 2000 : A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *QJRMS*, 126, p.1-30
37. Jacob DJ, Prather MJ, Rasch PJ, et al. Evaluation and intercomparison of global atmospheric transport models using Rn-222 and other short-lived tracers, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES* Volume: 102 Issue: D5 Pages: 5953-5970 Published: MAR 20 1997
38. Lopez, P., 2002 : Implementation and validation on a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data-assimilation purposes. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 128, p.229-257
39. Neggers R. and P. Siebesma: The Cabauw parameterization testbed. pan-GCSS, Toulouse, 2-6 June 2008 (<http://www.knmi.nl/~neggers/KPT/>)
40. Planton, S., et H. Le Treut, 2002 : Physique des modèles de climats. Rapport de mission rédigé à la demande de l'INSU, 6 septembre 2002.
41. Rasch PJ, Feichter J, Law K, et al. A comparison of scavenging and deposition processes in global models: results from the WCRP Cambridge Workshop of 1995, *TELLUS SERIES B-CHEMICAL AND PHYSICAL METEOROLOGY* Volume: 52 Issue: 4 Pages: 1025-1056 Published: AUG 2000
42. Sobel, A. H. and C. S. Bretherton 2000: Modeling tropical precipitation in a single column. *Journal of Climate*, 13, 4378-4392.
43. Tardif, R., 2007: The impact of vertical resolution in the explicit numerical forecasting of radiation fog: A case study. *Pure Appl. Geophys.* , 164, 1221-1240.
44. Textor C, Schulz M, Guibert S, et al. Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS* Volume: 6 Pages: 1777-1813 Published: MAY 29 2006
45. Wild O, Modelling the global tropospheric ozone budget: exploring the variability in current models, *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS* Volume: 7 Issue: 10 Pages: 2643-2660 Published: 2007
46. Zhang, C. , 2005: Madden-Julian Oscillation, *Rev. Geophys.*, 43, RG2003, doi:10.1029/2004RG000158.