

Projet LEFE/INSU
Section "Océan-Atmosphère"
Rapport 2014-2016

Référence du projet: AO2014-863318-DEPHY2

Noms des porteurs du projet: Catherine Rio (LMD/IPSL), Isabelle Beau (Météo-France/CNRM/GAME), Marie-Pierre Lefebvre (Météo-France/IPSL)

Titre du projet: Développement et Evaluation des PHYsiques atmosphériques (DEPHY2)

Introduction

Le projet DEPHY2 est un projet d'animation et de coordination de la communauté nationale autour du développement des paramétrisations physiques mises en œuvre dans les modèles français de prévision du temps et de modélisation du climat. Il regroupe une cinquantaine de participants de neuf laboratoires différents (CNRM, LMD, LGGE, LA, LSCE, GET, LEGOS, METIS, LATMOS) des communautés de la modélisation de la grande à la petite échelle et de l'observation. La réunion de lancement du projet a lieu à Banyuls du 8 au 10 septembre 2014. Le rendez-vous annuel de toute la communauté DEPHY2 a lieu aux Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère à Toulouse pour une journée d'exposés et une journée de discussions. Des réunions plus ciblées thématiquement ont également été organisées par axe du projet : une réunion internationale sur les cas d'étude de couche limite stable GABLS4 et DICE en mai 2015 à Toulouse, une réunion sur la convection et les flux de surface océaniques en novembre 2015 à Toulouse et une réunion sur la paramétrisation des nuages et des précipitations en juin 2016 à Paris. Des groupes de travail plus petits se sont également constitués autour de la définition de forçages communs pour les versions unicolonne des modèles, l'intercomparaison des paramétrisations de microphysique à l'œuvre dans les modèles et l'utilisation du cadre 1D/LES pour le tuning des paramètres.

Le projet DEPHY2 est avant tout un forum de discussions où les gens viennent échanger des bonnes pratiques, des questionnements et des solutions. C'est également un cadre d'où naissent de nouvelles rencontres et collaborations entre les communautés des observations, de l'étude des processus à partir de modèles haute résolution, de la prévision numérique du temps et de la modélisation du climat. Ces dernières années, cela a mené à des améliorations concrètes des paramétrisations physiques employées dans les modèles, que ce soit pour la représentation de l'hydrologie du sol, de la longueur de mélange et de la rugosité pour la représentation de la couche limite stable, la représentation du déclenchement et de l'intensité de la convection profonde précipitante ou la représentation de la couverture nuageuse. Un pas important a été franchi en implémentant les développements initiés en mode unicolonne pendant DEPHY et DEPHY2 dans les versions opérationnelles des modèles, avec pour effet une diminution de certains biais systématiques des modèles : phasage du cycle diurne des pluies continentales, augmentation de la couverture nuageuse basse, réduction du biais chaud continental aux moyennes latitudes et du biais chaud de SST sur les bords est des océans. Le projet DEPHY2 a également permis le partage d'outils entre différentes équipes, par la mise en place d'un format de forçages commun pour les versions unicolonne des modèles, la mise en place de comparaisons systématiques entre les sorties de modèles et les observations sur sites, ou encore l'échange de paramétrisations entre différents modèles. Les discussions lors des réunions DEPHY2 ont également mené à la rédaction de plusieurs projets ANR qui ont été récemment acceptés : APRES3 (sur les précipitations en Antarctique), COCOA (sur les flux air-mer), HIGH-TUNE (sur l'amélioration de la représentation des nuages de couche limite). Le nouveau cas d'intercomparaison GASS (GEWEX Atmospheric System Studies) GABLS4 qui repose sur les observations de Dôme C est piloté au niveau français et issu de discussions de DEPHY.

Ce rapport revient en détails sur les réalisations concrètes en lien avec le projet DEPHY2 dans les quatre axes du projet :

- A. Outils/Méthodologies/Algorithmie
- B. Paramétrisation des nuages et des précipitations
- C. Couplage atmosphère/surface
- D. Paramétrisation vers circulation – Upscaling

Nous distinguons quatre étapes essentielles au développement de paramétrisations : l'étude de processus à partir de modèles haute résolution et d'observations afin de mieux comprendre les processus que l'on cherche à paramétriser ; le développement des paramétrisations lui-même ; l'évaluation des nouveaux développements à partir d'observations ou de modèles de référence; et enfin la compréhension de l'effet des développements sur le climat ou le temps simulés par le modèle dans lequel ils sont implémentés. De plus, nous en profitons pour mettre en avant les collaborations initiées dans le cadre du projet, les difficultés qui ont pu être rencontrées ou encore les besoins ou les manques ressentis. En vue d'amorcer les réflexions sur la phase 3 du projet DEPHY nous identifions également les thèmes qui méritent d'être approfondis et ceux qui émergent des dernières activités et discussions.

A. Outils/Méthodologies/Algorithmie

Coordination : Frédéric Hourdin, Hubert Gallée

Les enjeux identifiés dans cet axe concernent:

- Le partage des outils
- La généralisation de l'approche 1D/LES et la mise en place d'outils automatiques pour l'optimisation des paramètres
- Les comparaisons modèles/données sur sites pour l'évaluation et le développement de paramétrisations
- Le développement de nouvelles méthodologies pour l'étude des interactions entre paramétrisations et circulation résolue.

1. Les avancées scientifiques

1.1 Les études de processus pour le développement des paramétrisations

Les études de processus se sont essentiellement faites à l'aide de simulations haute résolution de scènes sèches ou nuageuse, dans lesquelles les structures que l'on cherche à paramétriser sont échantillonnées. On peut noter :

- La mise à disposition de simulations LES/CRM sur de nouveaux cas d'étude (GABLS4 pour l'étude des couches limites stables en Antarctique, Hector pour l'étude de la convection tropicale très profonde, Ayotte pour l'étude des couches limites sèches, AMMA pour l'étude de la transition entre convection peu profonde et profonde au Sahel...)
- L'application de différentes méthodes d'échantillonnage dans ces simulations pour l'étude des structures : utilisation de traceurs pour suivre le transport par les thermiques de couche limite, application d'un outil de tracking pour suivre le cycle de vie des poches froides convectives, algorithme de détection 3D des ascendances dans les systèmes convectifs.

1.2 Les développements de paramétrisations

Le développement de paramétrisations souvent réalisé dans la version unicolonne des modèles a bénéficié de nouveaux cas d'études :

- Des cas 1D construits à partir d'observations: GABLS4 (Antarctique), Cindy-Dynamo (Océan Indien), DICE (grandes plaines américaines).
- Les cas 1D continentaux sont forcés ou couplés à un schéma de sol pour les études des interactions atmosphère/surface.
- Des cas 1D en configurations idéalisées: simulations à l'équilibre radiatif/convectif (RCE continental et océanique), hypothèse du faible gradient de température horizontale dans les Tropiques (WTG) pour la paramétrisation des vitesses verticales de grande-échelle.
- Un format de forçage commun a été mis en place et est appliqué progressivement à tous les cas 1D disponibles.
- Des paramétrisations ont pu être échangées et testées dans ce cadre 1D: tests des hypothèses du modèle du thermique de LMDZ dans le schéma de convection peu profonde d'AROME (EDKF), couplage de la paramétrisation des poches froides de LMDZ avec le schéma de convection profonde d'ARPEGE (PCMT).

1.3 L'évaluation

L'évaluation des développements de paramétrisations passe par l'utilisation de différentes approches :

- Des comparaisons entre les simulations 1D et des simulations haute résolution LES/CRM sur les mêmes cas d'étude.
- Sur certains de ces cas, tous les modèles français ont été inter-comparés (AMMA, GABLS4).
- Un format de sortie commun a été défini pour permettre de faciliter les intercomparaisons systématiques des modèles. Il a été appliqué sur le cas RICO et doit être étendu aux autres cas.
- Les comparaisons modèles/données sur sites ont connu un bel essor avec le développement d'outils de comparaisons systématiques des sorties de modèles avec les données de différents sites (extraction de la colonne d'ARPEGE sur les sites du SIRTA, Cabauw, Toulouse, Lindenberg, Lannemezan et DomeC au format netcdf pour les profils verticaux et ascci pour les séries temporelles ; extraction de la colonne d'AROME sur les sites SIRTA, Cabauw, Lindenberg, Col de Porte, Lac Blanc depuis 2015 puis de 16 points autour de Sodankyla, SIRTA, Toulouse, Cabauw, Lannemezan ; extraction de la colonne de LMDZ sur le SIRTA).
- Dans le cadre des comparaisons modèles/données sur site, une configuration de LMDZ guidée vers les vents des réanalyses a démontré sa pertinence pour les comparaisons en Afrique de l'Ouest où le régime de pluie simulé impacte au premier ordre les performances du modèle pour la simulations des variables de surface (sites AMMA-Catch).
- L'évaluation des nuages dans le modèle global est réalisée à l'aide de simulateurs d'observables permettant de simuler les nuages que verrait le satellite si il volait au-dessus des modèles (simulateurs COSP, IASI).
- La mise en place de certains biais dans les modèles de climat a été analysée par la réalisation de simulations initialisées (Transpose-AMIP).

1.4 Impact sur les performances des modèles

L'étude de l'impact des nouveaux développements sur les performances des modèles a été quantifiée via différentes approches :

- La première étape consiste à implémenter les nouveaux développements dans les versions CMIP6 des modèles de climat et opérationnelles d'ARPEGE-PNT.
- La physique du modèle régional MAR a également été implémentée dans l'architecture du modèle LMDZ.
- Des tests de sensibilité en configurations zoomées guidées ont été réalisées pour évaluer l'effet de différentes paramétrisations sur la représentation de la mousson et de la MJO.
- Un modèle méridien-vertical sec forcé par les sources apparentes de chauffage et de quantité de mouvement des GCMs (Q1 et Q3) a été développé pour comprendre l'origine des biais de circulation de la mousson ouest-africaine. Il est également utilisé pour comprendre le rôle du cycle diurne sur l'état moyen de la mousson africaine.
- Un modèle 2D humide de mousson est également utilisé pour identifier les processus clés dans la circulation de mousson.
- Les sources apparentes de chauffage et d'humidification simulés par les GCM (Q1, Q2) ont été intercomparées sur l'Afrique de l'Ouest.
- Par ailleurs, un modèle conceptuel a été développé pour l'étude des interactions rayonnement/turbulence dans la couche limite.

2. Coordination de la communauté dephy

2.1 Les collaborations

De nombreuses collaborations se sont renforcées ou ont vu le jour entre les communautés du climat, de la prévision numérique du temps, des simulations haute résolution et des observations :

- Entre groupes de modélisation et d'observations dans le cadre des comparaisons systématiques des modèles avec les données des observatoires (LMDZ, ARPEGE, AROME, SIRT, METEOPOLE-flux, AMMA-Catch...)
- Entre modélisateurs et observateurs dans le cadre de discussions autour de la microphysique des nuages (LMD, CNRM, LATMOS, LAMP)
- Entre des modélisateurs de l'atmosphère, des statisticiens et des spécialistes du rayonnement dans le cadre du projet ANR High-Tune.
- Entre des modélisateurs du climat et des numériciens dans le cadre de l'ANR COCOA.

2.2 Les difficultés rencontrées

Les principales difficultés rencontrées dans les interactions entre différentes communautés concernent :

- La question de la représentativité des sites d'observations à l'échelle d'une maille de modèle. Pour documenter cette question, des observations supplémentaires sont prévues en 2017 pour documenter l'hétérogénéité spatiale sur le site de Meteopole-Flux à Toulouse.
- L'exploitation de giga-LES et de CRM grand domaine pour l'étude fine des processus.
- Par ailleurs, les échanges au niveau des développements de paramétrisations eux-mêmes se situent d'avantage du côté des discussions que de développements en commun.

2.3 Les besoins

Pour favoriser les interactions, se ressent le besoin notamment :

- d'une campagne de mesures fédératrice, par exemple dédiée à l'étude des couches limites stables à partir des données des différents sites.
- de pouvoir échanger simplement des bouts de code et de paramétrisations.

3. Vers dephy3

3.1 Les thèmes à approfondir

Dans le futur, il apparaît nécessaire :

- de développer des outils de comparaisons systématiques entre modèles 1D et simulations LES/CRM sur tous les cas disponibles,
- de refaire des simulations haute résolution des cas avec traceurs pour l'étude du transport,
- de pérenniser et d'exploiter les comparaisons entre modèles et observations sur sites.

3.2 Les thèmes émergents

Il serait souhaitable d'aller plus loin dans le cadre 1D/LES pour :

- exploiter d'avantage les approches idéalisées en RCE/WTG pour le développement des paramétrisations,
- utiliser d'avantage les cas 1D avec surface interactive (océan, continent),

- développer des outils de tuning automatique des paramètres à l'échelle des processus,
- appliquer des codes radiatifs sophistiqués sur des nuages simulés par LES pour évaluer l'importance des effets 3D.

3.3 Propositions d'évolution pour dephy3

Les aspects développement d'outils et de méthodologies pour le développement de paramétrisations et la compréhension de leurs effets dans les modèles 3D restent au cœur des activités de DEPHY. Concrètement se pose la question de conserver un axe « Méthodologies » séparé ou de les rapprocher des questions scientifiques qu'elles permettent d'aborder.

B. Paramétrisation des nuages et des précipitations

Coordination : Yves Bouteloup, Jean-Baptiste Madeleine

Les objectifs, enjeux et réalisations autour de ce thème s'articulent principalement autour de 3 axes :

- la représentation dans les modèles **des fractions et propriétés radiatives des nuages**
- l'amélioration de la **microphysique** des nuages
- la représentation de la **précipitation** liquide et solide

Les avancées de ces trois dernières années sont par la suite résumées, en ayant toujours ces 3 axes en toile de fond.

1. Les avancées scientifiques

1.1 Les études de processus pour le développement des paramétrisations

L'axe B a vu l'émergence de plusieurs dynamiques en vue de mieux contraindre les processus :

- L'exploitation accrue des LES de nuages de couche limite (ARM, RICO, BOMEX) en vue de l'extraction de meilleurs PDF et statistiques sous-maille. Ce travail a été réalisé notamment dans le cadre des ateliers de microphysique des nuages, de la thèse de Jean Jouhaud (LMD), et plus récemment de l'ANR High-Tune (initiée au sein de DEPHY2, débutée en Janvier 2017) et de la thèse de Najda Villefranque (CNRM). L'impact radiatif 3D de la distribution sous-maille des nuages et des hypothèses de recouvrement est également revisité depuis le début du projet ANR High-Tune.
- La mise en évidence de l'augmentation de l'hétérogénéité horizontale associée à des circulations de basses couches dans AROME lors de l'utilisation d'une très forte résolution verticale sur des cas de brouillard radiatif (Philip et al 2016).
- La mise en évidence dans AROME de l'absence d'un processus important près du sol dans les brouillards conduisant à de trop fortes valeurs du contenu en eau liquide.
- La collaboration entre Météo-France, le LMD et le LGGE (maintenant Institut des Géosciences de l'Environnement ou IGE) au sein de DEPHY2 a motivé la meilleure exploitation des mesures réalisées à Dôme C (Antarctique) pour l'amélioration des paramétrisations de microphysique froide, notamment par l'analyse des données de sursaturation (Genthon et al. 2017) et de précipitation.
- La comparaison des précipitations simulées par MAR et LMDz aux mesures à Dumont D'Urville d'un radar polarimétrique développé par l'équipe du LTE (Laboratoire de Télédétection Environnementale, EPF de Lausanne, Suisse) dans le cadre de l'ANR APRES3 (Antarctic Precipitation : Remote Sensing from Surface and Space, débutée en Septembre 2015). Cela permet notamment d'améliorer les paramétrisations de conversion en précipitation solide et sublimation.

1.2 Les développements de paramétrisations

Plusieurs développements ont été réalisés et discutés au sein de DEPHY2 avec :

- L'implémentation et la validation du schéma diagnostique basé sur une bi-gaussienne du déficit à la saturation pour les nuages de couche limite (Jam et al., 2013).
- La prise en compte du mélange au sommet des thermiques pour la représentation des stratocumulus (Jam et al., en préparation).
- Le développement d'une nouvelle paramétrisation pour la représentation de la variabilité sous-maille verticale de la couverture nuageuse (thèse de Jean Jouhaud).
- Une plage de température de la phase mixte mise à jour dans LMDz et unifiée pour le rayonnement et la physique.
- La prise en compte de la thermodynamique de la glace dans la convection et la condensation grande-échelle du modèle LMDz.
- L'implémentation d'un ajustement à la saturation dans le schéma de CLS CANOPY dans le but de paramétrer une forte résolution verticale sous le dernier niveau du modèle AROME, afin d'améliorer la prévision des brouillards radiatifs.
- L'implémentation du schéma LIMA à deux moments (Vié et al. 2016) dans le modèle AROME, premiers tests avec aérosols prescrits puis issus du modèle de chimie MOCAGE.

- La refonte assez profonde de l'algorithmique du schéma ICE3/4 afin de réduire sa dépendance au pas de temps. Les processus simulés en sont profondément modifiés. Ceci a été possible notamment par le développement d'un cadre 0D puis 2D (dans Méso-NH) pour revisiter les formulations de processus particuliers et de modifier l'algorithme agrégeant les contributions de tous les processus. Le travail se poursuit avec l'adaptation à AROME et l'évaluation sur des cas réels (études de cas et scores). Suite à cette évaluation, les modifications pourront être reportées dans LIMA qui est construit sur le même modèle.
- Premiers tests de la mise en place d'un processus de dépôt sur le sol et la végétation dans les schémas de microphysique afin de corriger le problème des trop fortes valeurs du contenu en eau liquide près de la surface.
- Évolution du schéma microphysique très simple d'ARPEGE afin de mieux prendre en compte les processus de fonte/regel des précipitations ⇒ Production de pluie verglaçante et de « graupel ».

1.3 L'évaluation

Plusieurs évaluations des nuages, de la microphysique et de la précipitation se sont faites à plusieurs échelles avec :

- L'utilisation accrue des données de l'A-Train pour la validation de la fraction nuageuse et des réflectances simulées par les modèles globaux.
- La meilleure exploitation des données de IASI, avec l'implémentation d'un simulateur IASI dans LMDz permettant notamment d'analyser le cycle de vie des systèmes convectifs.
- La comparaisons des modèles avec les données sur site : SIRTA (nuages bas, brouillard), Dôme C (nuages et précipitations).
- La comparaison des microphysiques de LMDz, ARPEGE, AROME et Meso-NH sur le cas RICO et la définition d'un format commun de sorties.
- L'étude statistique de l'impact d'une résolution verticale élevée sur la prévision du brouillard par AROME sur la plateforme de Roissy (Philip et al 2016).
- La mise en évidence d'une très grande difficulté pour AROME à prévoir les brouillards d'affaissement de stratus (Philip et al 2016).
- L'étude d'un cas de nuage bas sur le nord de la France et des comparaisons aux mesures du SIRTA, et des tests des nombreuses formulations de la paramétrisation de la convection peu profonde disponibles dans le modèle AROME.
- L'étude d'un cas de stratus hivernal sur la Hongrie en collaboration avec des collègues Hongrois.
- La mise en place de nombreux « petits » AROME, scientifiquement équivalents à l'opérationnel, autour de sites instrumentés (SIRTA, Cabauw, Sodankyla, ...) afin de produire plus de diagnostics.
- La comparaison de LMDz au modèle MAR en Antarctique ainsi que la comparaison de la précipitation simulée aux données du CPR de CloudSat (thèse de Florentin Lemonnier dans le cadre de l'ANR APRES3).

1.4 Impact sur les performances des modèles

Les développements ont permis :

- L'amélioration de la représentation de la couverture nuageuse basse, notamment dans les régions de stratocumulus, dont l'altitude et la réflectance sont nettement améliorés par le schéma statistique en distribution bi-gaussienne. Notons cependant une tendance persistante à générer des cumulus d'alizée de trop forte réflectance (problème du « too few too bright »).
- De grands progrès dans les méthodes de tuning des paramètres nuageux.
- Des problèmes persistent cependant dans la représentation des nuages d'enclume tropicaux.

2. Coordination de la communauté dephy

2.1 Les collaborations

- Entre communauté du développement 1D et celle des modèles LES pour l'étude des PDFs.
- Entre modélisateurs et observateurs pour les comparaisons aux données sur sites.
- Entre les équipes de modélisation pour les discussions autour des schémas microphysiques.
- Entre plusieurs laboratoires français à l'occasion de la réunion DEPHY2 « Nuages et précipitations » de juin 2016 à Paris, qui a regroupé 44 participants (LMD, CNRM, LA, LOA, LAMP, IPSL, LGGE, LOCEAN).

2.2 Les difficultés rencontrées

- Un manque d'un cadre propre pour comparer les schémas de microphysique indépendamment des schémas de transport.
- Un manque d'observations et de cadre de référence pour évaluer les schémas de microphysique.
- Une difficulté à échanger des modules ou des bouts de paramétrisations.

2.3 Les besoins

- Besoin d'utiliser d'avantage les comparaisons aux données sur sites pour l'évaluation des nuages et des flux de surface.
- Besoin d'utiliser mieux les observations pour trouver des contraintes pour les schémas de microphysique à l'échelle des processus.
- Besoin d'outils plus idéalisés pour l'intercomparaison de nos paramétrisations macrophysiques et microphysiques (modèles 0D, 1D idéalisés...).
- Besoin d'une approche par objets (colonnes convectives, thermiques, poches froides) avec compositage d'observations pour se rapprocher des processus.
- Besoin de générer de l'information sous-maille à partir des observations (proportion sous-maille liquide/glace, PDF d'eau nuageuse sous-maille...).

3. Vers DEPHY3

3.1 Les thèmes à approfondir

- Hypothèses de recouvrement utilisées, méthodes de recouvrement basées sur des modèles de représentation sous-maille des nuages plus réalistes (McIca).
- Améliorer la synergie entre les schémas de microphysique et les propriétés radiatives des nuages, en particulier avec l'utilisation de schémas de microphysique à deux moments.
- Représentation des nuages hauts issus de la convection, sursaturations par rapport à la glace.
- Mieux comprendre les interactions avec la surface et la turbulence afin de résoudre les problèmes de prévisions des nuages bas, et en particulier la difficulté à prévoir les affaissements de stratus.
- Mieux utiliser les données de précipitation (liquide et solide, au sol et en profil) comme validation des paramétrisations de conversion en précipitation et réévaporation.

3.2 Les thèmes émergents

- Importance des effets 3D pour le rayonnement (application d'un code radiatif sophistiqué aux sorties de LES dans le cadre de l'ANR High-Tune).
- Importance du tuning et mise en place d'outils de tuning automatique 1D/LES.
- Nécessité de trouver le meilleur compromis pour la fréquence d'appel au rayonnement pour un coût en temps de calcul donné.
- Nécessité de dégager une complexité intermédiaire pour une microphysique adaptée aux simulations globales.

3.3 Propositions d'évolution pour DEPHY3

- Un axe ciblé davantage sur « Nuages et rayonnement ».
- Une dynamique autour de la bonne représentation dans nos modèles des phases dans les régions froides de l'atmosphère (eau surfondue, congélation des gouttelettes, conversion en précipitation solide).

C. Couplages atmosphère/surface

Coordination: Fleur Couvreur/Frédérique Cheruy

Pour rappel, quatre enjeux avaient été identifiés dans cette thématique à savoir :

- la représentation de la couche limite stable,
- la prise en compte des bourrasques de vents et notamment leur impact sur les flux de surface,
- une réflexion sur la formulation des flux de surface,
- l'amélioration des schémas de sol.

1. Les avancées scientifiques :

1.1 Les études de processus pour le développement des paramétrisations :

Interactions surface/atmosphère :

- Nous avons montré que dans les régions où l'évaporation est faible ou bien fortement variable l'inertie thermique du sol et la stabilité de la couche limite contrôlent l'intensité du refroidissement nocturne et donc la température moyenne et sa variabilité haute fréquence. Cela nous a conduit à mettre en évidence une rétro-action positive de l'humidité du sol sur la température de surface; cette dernière est particulièrement active dans les régions de transition entre les zones où l'évaporation est contrôlée par l'humidité du sol et celles où elle est contrôlée par le rayonnement. Combinée à l'analyse de biais en température dans les régions boréales et une étude des couches limites très stables en Antarctique, ces travaux mettent en évidence la nécessité d'améliorer la représentation des couches limite nocturnes stables dans le

modèle et d'être attentif à la représentation des propriétés thermiques des sols et de façon plus générale au bilan d'énergie en surface.

- Une étude de sensibilité du climat à des nappes prescrites à différentes profondeurs du sol confirme que le degré d'humidité des sols module les climats régionaux dans les régions arides et semi-arides (moussons, grandes Plaines des US, bassin méditerranéen) mais aussi aux Tropiques. Elle permet de souligner la nécessité de coupler les nappes au système climatique pour assurer une représentation plus réaliste du bilan d'eau.
- Le choix des longueurs de rugosité utilisées a un impact significatif sur la simulation de la mousson africaine.
- L'étude du nombre de Lewis turbulent à partir des observations de campagne (CATCH, FETCH, EQUALANT et POMME) pour l'océan et des observations de Météopole-Flux et Cabauw et d'une simulation LES (IHOP) pour le continent, a mis en évidence des valeurs différentes de l'unité et a souligné un meilleur ajustement pour le coefficient bulk « Ch » pour la « chaleur » si on l'exprime à l'aide de la température potentielle liée à l'entropie, « theta_s »

Couches limites stables :

- L'intercomparaison GABLS4 a montré une forte dispersion des flux de surface dans les simulations uni-colonne (13 modèles) et les simulations LES (10 modèles). On note cependant un meilleur accord entre LES mais il est nécessaire de mieux comprendre l'origine de cette dispersion.
- La manière de paramétrer le transport turbulent est clé en situation stable dans les couches basses de l'atmosphère et on a analysé son rôle dans les biais de température du modèle sur les calottes ou aux hautes latitudes en hiver
- L'analyse des observations de Dome C a mis en évidence deux régimes différents de turbulence selon l'intensité du vent.
- Différentes études soulignent la sensibilité à la résolution verticale pour les cas stables (GABLS4 + cas aéroport de Roissy).

Vagues de chaleur :

- Un diagnostic pour détecter séparément les vagues caractérisées par des températures maximales élevées ou températures minimales élevées a été mis au point. Il est indépendant de l'évolution saisonnière et décennale.
- Un cas d'étude de vague de chaleur au Sahel (Avril 2010) a été plus particulièrement étudié. Il a été souligné la dégradation des simulations par une activation inopinée du schéma de convection profonde et le rôle de l'humidité dans les variations de la température minimale à l'aide d'un petit modèle conceptuel pour représenter les effets du rayonnement et de la turbulence sur le bilan de température

Autres :

- Le rôle des hétérogénéités de surface pour l'initiation de la convection profonde a été analysé soulignant les interactions entre thermiques, brises et vent synoptique
- La caractérisation de l'évolution de la turbulence pendant la phase de transition de la couche limite convective vers la couche limite stable (BLLAST) a souligné deux phases, une phase quasi-stationnaire et une autre phase de variations plus rapides.
- Le rôle de la convergence de basse couche et des courants de densité pour la genèse de la convection très profonde a été montré.
- Des nouveaux diagnostics, variable « theta_s » qui est synonyme de l'entropie de l'air humide et tourbillon potentiel associé –ont été codés dans Meso-NH

1.2 Les développements de paramétrisations :

- Un nouveau schéma de surface qui revisite l'interface végétation dans ISBA et tient compte de la litière a été développé (MEB). La version diffusivité d'ISBA a été mise en œuvre dans ARPEGE-Climat avec une prise en compte des inondations et des aquifères
- Les paramètres de surface ont été mis à jour dans ORCHIDEE (albédos de sol nu à partir des observations MODIS) et dans SURFEX (notamment albédo). Les coefficients intervenant dans l'évaporation du sol nu et le stress hydrique de la végétation ont été réglés. Une nouvelle formulation de la longueur de rugosité a été introduite.
- Un nouveau schéma de neige et gel du sol a été introduit dans ARPEGE-Climat et LMDZ. La version 1D du modèle de banquise GELATO a été introduit dans ARPEGE-Climat (en version AMIP) et permet d'améliorer les températures de surface sur banquise.
- Une paramétrisation pour les vents forts avec une prise en compte de l'état de la mer a été testée dans le cadre du modèle IFS et une réflexion est en cours pour le rendre pré-opérationnel dans le modèle AROME.
- Une réflexion a été menée sur la formulation mathématique des formulations de type 'bulk' pour les flux de surface avec la possible des méthodes de Schwarz. L'interaction couche limite atmosphérique/océan et son alimentation en eau en fonction des formulations ont été analysées: importance relative du drag, des gradients thermodynamiques ou du vent.
- Une modification de la longueur de mélange tenant compte de la contribution du cisaillement a été proposée et testée sur des cas stables (GABLS1 + sensibilité à la résolution), un cas neutre et des cas convectif (IHOP & AYOTTE).
- Une paramétrisation de la distribution du vent offline pour l'arrachement des poussières a été proposée.

- Des formulations modifiées dépendant de la résolution pour la fermeture et entrainement/détrainement sont en cours de test afin d'adapter le schéma en flux de masse de couche limite à la zone grise

1.3 L'évaluation :

- Les modèles AROME, ARPEGE, LMDZ ont été évalués à partir des observations de différentes campagnes de mesures (BLLAST avec en particulier un focus sur l'énergie cinétique turbulente, PASSY-2015 avec la mise en évidence d'un biais chaud dans AROME) ou de différents observatoires (SIRTA avec des diagnostics utilisant la télédétection active, simulateur lidar pour les nuages, analyse du bilan d'énergie et de l'évolution de la température, au Sahel et à Dome C).
- Les différentes paramétrisations de flux de surface sur océan dans CNRM-CM ont été évaluées mais ont souligné le besoin d'avoir plus de diagnostics pour comprendre les différences.
- Les biais systématiques sur les bords Est des Océans ont été étudiés avec des biais similaires en couplé et en forcé qui sont liés au rayonnement et aux flux de surface.
- Une intercomparaison des modèles de grande échelle a eu lieu sur le biais chaud des Grandes plaines américaines (GASS-CAUSES).
- L'évaluation des éléments du bilan d'énergie à la surface par comparaison aux climatologie existante a été systématisée avec le développement de diagnostics dédiés la phase de développement du modèle pour CMIP6.
- Le cas DICE a été utilisé pour explorer le couplage sol/atmosphère dans des cas stables et sans nuages (couplage simplifié avec un β fixe).

1.4 Impact sur les performances des modèles

- Les biais sur bords Est des océans ont été réduits grâce à la présence des thermiques qui modifie l'humidité relative proche de la surface.
- Les biais de température continentaux ont été cartographiés (Calottes, moyennes latitudes en hiver).
- La représentation du cycle diurne a été améliorée dans les Tropiques et en Antarctique.

2. Coordination de la communauté DEPHY

2.1 les collaborations :

De nouvelles collaborations ont vu le jour au cours de cette phase du projet :

- organisation d'une journée sur le tuning,
- collaboration avec des statisticiens et des spécialistes du rayonnement (HIGH-TUNE),
- collaboration avec des numériciens (COCOA) : 2 projets ANR issus de DEPHY2,
- collaborations internationales autour du cas GABLS4 (intercomparaison de différents types de modèles sur un cas extrêmement stable) : participation de 10 modèles LES et 13 modèles SCM,
- comparaisons systématiques entre modèles et observations sur sites.

2.2 Les difficultés rencontrées :

A travers ce projet, nous avons réalisé une synthèse des paramètres de surface utilisés dans les différents modèles grâce à une forte motivation qui n'a malheureusement pas été suivie par de nombreuses actions.

L'interaction avec la communauté des observateurs a été notablement augmentée par rapport à la première phase du projet et il est nécessaire de soutenir cette interaction.

2.3 Les besoins

- Nous avons besoin d'utiliser d'autres cas 1D/LES particulièrement focalisés sur l'aspect du couplage avec la surface. On peut penser à un cas vague de chaleur pour les aspects continentaux et au cas CINDY-DYNAMO pour les aspects océaniques.
- Nous avons également besoin de climatologies globales d'observations sur site.
- Se pose la question de réaliser une campagne de mesures pour les questions d'interactions avec la surface (rugosité, rayonnement) particulièrement en conditions stables.

3. Vers DEPHY3

3.1 les thèmes à approfondir :

- Concernant la représentation de la couche de surface :

- sur continent : il est important de mieux représenter le frottement par la surface, le stress induit par les ondes de gravité sur l'énergie cinétique turbulente et l'impact de la végétation haute ; l'interaction avec la surface pourrait être améliorée via la prise en compte de nappes interactives.

- sur océan : il faudrait réaliser des comparaisons des formulations bulk utilisées dans les différents modèles pour calculer les flux de surface et mener une réflexion sur les choix à privilégier, revisiter la paramétrisation des rafales convectives (et turbulentes? ou juste convectives?), analyser le rôle des couches d'eau chaude et de leur représentation dans les modèles, mieux prendre en compte la houle pour le calcul des flux de surface.

- Il faudra aussi continuer les travaux engagés pour améliorer la représentation des couches limites stables (prise en compte de l'anisotropie, effet de la nouvelle longueur de mélange, revisite des hypothèses sur le rapport dissipation / énergie cinétique turbulente) et celle des nuages bas (dynamique, schéma de nuage et rayonnement).

- Nous chercherons à identifier la représentativité spatiale des sites de mesures et à tirer partie de la comparaison systématique sur sites des modèles (3 sites ACTRIS en France + autres sites dans le Monde + DomeC). On pourra aussi essayer de mieux tirer partie des observations de la télédétection active.

- La représentation des nuages bas dans les modèles de grande échelle et de leur effets radiatifs (HIGH-TUNE, campagne EURECA)

- L'analyse des couplages à l'œuvre lors d'évènements extrêmes est à continuer.

3.2 Les thèmes émergents

Un nouveau thème qui semble fédérer plusieurs communautés concerne le rayonnement (bilan d'énergie à la surface, effets radiatifs des nuages, modification des paramétrisations de rayonnement, interactions avec les aérosols)

3.3 Propositions d'évolution pour DEPHY3

Il serait bien d'avoir une partie dédiée au rayonnement : amélioration des paramétrisations, bilan d'énergie à la surface, impacts radiatifs des nuages, liens avec les schémas microphysiques.

D. Convection vers circulation - Upscaling

Coordination : R. Roehrig/C. Rio/J.-Y. Grandpeix

L'objectif majeur de ce groupe vise à parvenir à une représentation pertinente dans les modèles (de ~10 à ~100 km) du cycle de vie de la convection et de ses interactions avec la circulation grande échelle. Les enjeux identifiés concernent :

- L'amélioration des paramétrisations de la convection,
- L'évaluation de la représentation du caractère multi-échelle de la convection,
- La meilleure compréhension des interactions entre convection et circulation.

1. Les avancées scientifiques

1.1 Les études de processus pour le développement des paramétrisations

- Étude des échanges entre troposphère et stratosphère liés à la convection très profonde, à l'aide d'une simulation LES (Giga LES) de *Hector the convecter*. Par exemple, l'étude des ascendances les plus fortes, notamment à l'aide d'une analyse isentropique, met en évidence l'importance du dégagement de chaleur latente liée à la formation de la glace dans les plus grandes ascendances (Dauhut et al. 2016, 2017).

- Étude des systèmes convectifs de méso-échelle (MCS) en Afrique de l'Ouest, grâce à une simulation CRM grande domaine d'une quinzaine de jours. Ces MCSs contribuent à 70 % des pluies. Les MCS simulés sous-estiment cependant la pluie la nuit et ont une propagation un peu trop zonale (Thèse de I. Reinares-Martinez).

- Étude du rôle des processus d'échelle synoptique et convective et de leurs interactions dans la MJO, grâce à des simulations CRM sur l'océan indien et le continent maritime de deux épisodes MJO (thèse de D. Kunetsova).

- Signature isotopique des processus convectifs et nuageux au cours des évènements MJO dans les observations et dans LMDZ (Tuinenburg et al 2015).

- Analyse des processus contribuant à l'amplification et à la propagation d'anomalies de précipitation dans l'océan indien, à partir de simulations guidées et d'hindcasts avec LMDZ pour des cas de MJO (C. Risi).

- Analyse des processus menant à l'agrégation de la convection dans un GCM en équilibre radiatif/convectif (thèse de D. Coppin).

- Analyse du rôle des hétérogénéités de surface sur l'initiation de la convection profonde, interactions entre thermiques, circulations de brise et vent synoptique (Rochetin et al., 2016).

- Caractérisations des poches froides sur le cas du 10 juillet 2006 dans une simulation LES (stage N. Villefranque).

- Etude et amélioration de la représentation de la turbulence au sein et au bord des nuages convectifs dans Meso-NH pour les échelles hectométriques.

1.2 Les développements de paramétrisations

Paramétrisation de la convection peu profonde :

- Modification de la formulation du déentraînement dans le modèle du thermique de LMDZ de pour prendre en compte le mélange au sommet des stratocumulus (Jam et al., en préparation).
- Test des hypothèses de mélange et de fermeture du modèle du thermique de LMDZ dans le schéma de Pergaud et al. (2009) d'AROME.

Paramétrisation de la convection :

- Développement et mise en œuvre d'une paramétrisation stochastique du déclenchement du schéma de convection profonde dans LMDZ, basée sur un calcul de probabilité qu'un thermique dans la maille dépasse une taille seuil à la base des nuages (Rochetin et al., 2014a et b).
- Prise en compte de l'effet thermodynamique de la glace dans les ascendances et les descentes convectives du schéma d'Emanuel (LMDZ).
- Revisite de la formulation du mélange convectif dans le schéma d'Emanuel (épluchage de l'ascendance adiabatique fonction de B/w^2 au lieu de w) pour favoriser l'entraînement à la base des cumulonimbus plutôt qu'à leur sommet.
- Tests sur la formulation de l'efficacité de précipitation dans LMDZ et ARPEGE.
- Mise en œuvre d'une implication combinée turbulence-convection dans ARPEGE pour la résolution du transport convectif.
- Augmentation de la turbulence minimale en présence d'enclumes convectives afin de réduire la fraction nuageuse associée.
- Développement d'un *toy model* à deux colonnes pour une meilleure prise en compte des effets non-hydrostatiques et des effets d'entraînement dans l'équation de la vitesse verticale des schémas de convection (thèse de J. Léger).

Paramétrisation des poches froides :

- Développement d'une équation pronostique de la densité de poches froides
- Partitionnement de la couche limite diffuse et des thermiques dans et hors des poches.
- Développement d'un couplage non-hydrostatique entre ascendances et downdrafts convectifs dans PCMT
- Couplage de la paramétrisation des poches froides utilisée dans LMDZ au schéma de convection PCMT.

1.3 L'évaluation

- Intercomparaison sur le cas AMMA du 10 juillet 2006 (Couvreur et al., 2015)
- Utilisation du cadre 1D en équilibre radiatif/convectif pour caractériser les paramétrisations mises en œuvre dans LMDZ dans différents environnements. Utilisation notamment pour reproduire les situations de plantages du modèle 3D et corriger des comportements pathologiques et des bugs du modèle.
- Nouveaux cas 1D : Cindy-Dynamo, cas cévennois
- Cycle de vie de la convection dans Cindy-Dynamo (Thèse A.-L. Ahmat Younous)
- Observations : Comparaisons LMDZ/ARPEGE avec les données SAPHIR (Megha-Tropiques) pendant Cindy-Dynamo

1.4 Impact sur les performances des modèles

- Mise en œuvre des développements de paramétrisations dans les versions CMIP6 des modèles climat et opérationnelles des modèles de PNT.
- L'activation du modèle des thermiques de LMDZ dans les régions d'alizés puis plus récemment de stratocumulus permet d'assécher la couche limite, de renforcer l'évaporation et de réduire les biais chauds sur les bords est des océans dans les modèles couplés (Hourdin et al. 2016).
- La modification du mélange convectif de LMDZ5A à LMDZ5B domine la forte augmentation de la variabilité des pluies tropicales, en lien avec une sensibilité augmentée de la convection à l'humidité troposphérique, et à une plus forte contribution des pluies de grande-échelle.
- L'activation du déclenchement stochastique de la convection profonde permet d'éviter que le schéma de convection profonde s'active trop souvent dans les régions d'alizés et permet d'y maintenir la couverture nuageuse basse simulée par les thermiques.
- Le décalage des pluies continentales du milieu à la fin d'après-midi permet d'améliorer la représentation du cycle diurne des gradients de pression entre la Côte Guinéenne et le Sahel d'une part, le Sahel et le Sahara d'autre part, favorisant la montée du flux de mousson vers le nord. Cet effet semble cependant faible par rapport à l'importance des systèmes convectifs propagatifs nocturnes et de leur couplage avec les ondes d'est (Birch et al., soumis).
- Intercomparaison des taux de chauffage et d'humidification associées à la mousson africaine tels que simulés par les GCMs, liens locaux ou à distance avec certains acteurs de la mousson (Martin et al. 2017, Chadwick et al. 2017).
- Utilisation d'un modèle 2D sec forcé par ces taux de chauffage pour analyser le lien entre processus de petite échelle et circulation, importance du rayonnement (Stages de modélisation ENM).
- L'utilisation d'un modèle 2D humide de la mousson africaine montre l'impact des différents termes du bilan d'eau à la surface (runoff, évaporation), sur la grande échelle de la mousson (Peyrillé et al. 2016).

- Intercomparaison de la variabilité intrasaisonnière tropicale simulés par les GCMs en aquaplanète avec ou sans warm pool (Leroux et al. 2016).

2. Coordination de la communauté dephy

2.1 Les collaborations

- Nombreuses discussions et échanges entre les différents groupes de modélisation autour des développements de paramétrisation de la convection.
- Organisation d'une réunion « Convection et flux de surface océaniques » en novembre 2015 à Toulouse.
- Convection et humidité troposphérique pendant Cindy-Dynamo (LMDZ, ARPEGE, SAPHIR).
- Couplage de la paramétrisation des poches froides avec PCMT (LMDZ, ARPEGE).
- Réflexions comparaisons modèles avec composites de systèmes convectifs (Bouniol et al.)

DEPHY2 et FP7-EMBRACE :

- Intercomparaison des paramétrisations sur le cas AMMA du 10 juillet 2006
- Analyse des sources de chauffage et d'humidification apparentes (Q1/Q2) sur l'Afrique de l'ouest pendant la mousson (Martin et al., 2017, Chadwick et al. 2017)
- Participation à l'intercomparaison GASS-WTG
- Convection tropicale, variabilité intrasaisonnière dans des configurations aquaplanète (Leroux et al. 2016)

2.2 Les difficultés rencontrées

- Exploitation plus systématique des simulations LES de convection pour l'étude fine des processus.
- Lien à renforcer entre modèles et observations à l'échelle des processus convectifs.

2.3 Les besoins

- Meilleure utilisation des observations pour le développement et la calibration des paramétrisations de la convection, que ce soit des données sur sites (SIRTA, Darwin, ARM) ou satellites. Observations de la vitesse verticale des ascendances verticales, des flux de masse, des taux de chauffage.

3. Vers dephy3

3.1 Les thèmes à approfondir

Continuer à améliorer la représentation du cycle de vie de la convection dans les GCMs :

- Compréhension de la transition vers la convection profonde dans différents régimes tropicaux : utilisation de LES, croisement avec climatologies satellites (e.g., Megha-Tropiques), AROME-Outremer...
- Interaction entre convection et rayonnement, rôle des enclumes
- Prise en compte des effets non-hydrostatiques dans la représentation de la vitesse verticale des ascendances convectives
- Organisation, agrégation de la convection
- Lien avec le cisaillement de vent
- Propagation des systèmes convectifs
- Sensibilité à l'humidité troposphérique
- Lien avec les flux de surface
- Liens entre la paramétrisation de la convection et les autres paramétrisations (nuages, turbulence, ondes de gravité)
- Utilisation des variables de la thermodynamique humide pour décrire les ascendances convectives.

Continuer à approfondir notre compréhension des interactions d'échelle :

- Problème de la double ITCZ, de la SPCZ, représentation de la variabilité intrasaisonnière tropicale, des moussons, convection sur l'Amazonie et sur l'Afrique équatoriale.
- Apport des approches idéalisées (RCE, WTG) pour l'évaluation et le développement des paramétrisations.
- Apport des isotopes

Lien entre convection et résolution, auto-adaptabilité.

3.2 Les thèmes émergents

- Représentation des systèmes convectifs en tant que tels, impacts sur le climat simulé et la sensibilité climatique.
- Effets des contrastes de petites échelles (relief, contraste terre-mer, autre hétérogénéités) sur la convection (déclenchement, cycle de vie, propriétés), comme sur le continent maritime

- Modélisation des événements extrêmes de précipitation, représentation de la distribution des précipitations
- Potentiel des CRMs grand domaine, simulant des périodes longues : sorties opérationnelles des AROME Outre-mer, simulations Meso-NH
- Utilisation des observations satellites, de leur synergie permettant la caractérisation du cycle de vie de la convection et de son impact à grande échelle.
- Convection et transport de quantité de mouvement.
- Convection et ondes de gravité
- Calibration statistique, « objective » des paramétrisations.

3.3 Propositions d'évolution pour dephy3

La structuration et l'approche de cette partie était nouvelle pour DEPHY2. Intéressante et riche, elle n'a malgré tout pas encore complètement porté ses fruits, faute de temps et de ressources. La finalisation et mise en œuvre des nouvelles configurations climat pour CMIP6 et PNT opérationnelles pendant ces dernières années ont en particulier représenté une charge lourde pour la communauté DEPHY2. De fait, les objectifs de DEPHY2 pour la convection profonde et l'upscaling demeurent complètement d'actualité, et nous proposons que les thèmes émergents indiqués ci-dessus soient plutôt intégrés dans la structuration actuelle plutôt que d'en redéfinir une nouvelle.

Conclusions

Sur la période 2014-2016 le projet DEPHY2 a permis de nombreuses avancées à la fois sur le développement des paramétrisations physiques des modèles, sur la compréhension des processus que l'on cherche à paramétriser, sur l'évaluation des nouveaux développements et sur la compréhension de l'effet de ces nouveaux développements dans les modèles opérationnels. Les participants au projet y trouvent l'occasion d'échanger, de partager leurs questionnements, d'initier de nouvelles collaborations et de donner un sens à une recherche de plus en plus partitionnée par ailleurs. La grande majorité des participants au projet souhaitent que le projet DEPHY puisse être soutenu dans la durée.

Or, le projet arrive à échéance et nous avons obtenu une rallonge de financement pour 2017 afin d'organiser une réunion pour réfléchir à la structuration et au contenu du projet DEPHY3 mais aussi à son mode de financement. En effet, le LEFE qui a soutenu le projet DEPHY dans ses phases 1 et 2 ne le garantit plus souhaitant soutenir l'émergence de nouveaux projets. Cette réunion aura lieu les 10-11-12 mai 2017 à l'observatoire océanologique de Banyuls-sur-mer. Nous ferons le point sur les paramétrisations physiques à l'œuvre dans les modèles français à l'issue de DEPHY2 et reviendrons sur les leçons tirées de l'implémentation de ces paramétrisations dans les modèles de climat pour CMIP6 et les modèles de prévision opérationnels. Deux demi-journées seront consacrés à des présentations et des discussions pour préparer DEPHY3 autour de deux thèmes émergents: la nécessité de transformer les améliorations de paramétrisations en réduction des biais systématiques des modèles d'une part et l'importance des interactions des paramétrisations de la turbulence, la convection et des nuages avec le rayonnement d'autre part. Les participants bénéficieront d'une autre demi-journée afin de présenter les questions et les thèmes qu'ils porteront dans les années à venir. Enfin, la réunion se terminera par une demi-journée de discussions sur la structuration et le contenu scientifique du nouveau projet. Nous aborderons également la question du financement de DEPHY3 sachant que la seule alternative connue à ce jour consiste à demander à l'INSU la création d'un GDR sur le développement des paramétrisations physiques.