

BILAN 2006-2009

TITRE DU PROJET : Modélisation Intégrée du Système Terre (MISSTERRE)

Projet commencé en (*septembre 2006*) – **Durée du projet soutenu par LEFE** (*3 ans*)

Nom du porteur du projet : Pascale Braconnot et Serge Planton

Liste des laboratoires impliqués

CNRM (Toulouse), CERFACS (Toulouse), IPSL/LMD (Paris), IPSL/LOCEAN (Paris), IPSL/LSCE (Saclay), LGGE (Grenoble, identifié sous IPSL), UCL (Louvain la neuve, Belgique) (identifié sous IPSL)

Objectifs et principales réalisations

L'objectif principal du projet MISSTERRE est de rassembler l'ensemble des actions de modélisation du climat permettant d'assurer la contribution de la communauté française au GIEC et, au-delà, des recherches dans le domaine de l'étude de la variabilité climatique. Le projet concerne donc la réalisation et l'exploitation scientifique dans le cadre de l'action ESCRIME (Etude des scénarios climatiques réalisés à l'IPSL et Météo-France) de ces simulations, l'études des interactions entre climat et cycles-biogéochimiques, l'évaluation des modèles et l'étude des biais systématiques, les simulations régionales, la préparation des prochaines versions des modèles en considérant les développements de la physique de l'atmosphère (action physique commune entre l'ISPL et Météo-France), les nouveaux couplages et les différents aspects liés à l'optimisation des modèles et des environnements de modélisation sur les supercalculateurs.

Le bilan des 3 années montre que projet MISSTERRE a favorisé la forte implication des équipes françaises dans la réalisation et l'exploitation des simulations CMIP3 qui ont servi de support au dernier rapport du GIEC (2007). Il a servi de catalyseur pour se préparer au prochain exercice et pour développer les prochaines générations de modèles. Plusieurs autres projets lui ont été associés. C'est le cas du projet européen ENSEMBLES qui s'achève en novembre 2009 et qui implique les groupes de modélisation européens pour étudier les différentes facettes du climat entre l'échelle globale et les études d'impact. Le projet CICLE de l'ANR calcul intensif s'est focalisé sur le développement des versions parallèles du coupleur et du modèle de l'IPSL, ainsi qu'une régionalisation interactive du bassin méditerranéen dans le modèle du CNRM. A ces projets s'ajoutent des projets scientifiques contribuant à l'objectif global, mais rassemblant un nombre limité de participants au projet MISSTERRE.

Le bilan fait une rapide synthèse des principales actions en suivant le plan de la demande 2007. La première partie présente les simulations de référence et les projets d'analyse. La deuxième partie montre les principales évolutions de l'activité de régionalisation qui devient incontournable pour étudier de nombreux aspects du changement climatique en lien avec d'autres communautés. Les priorités de développement pour les versions des modèles qui seront utilisées pour le prochain grand ensemble de simulations (CMIP5) en vue 5^{ème} rapport du GIEC (AR5) sont détaillées dans la 3^{ème} partie qui met l'accent sur le projet de « physique commune » des modèles d'atmosphère. Le climat est le fruit d'interactions entre de nombreux compartiments (atmosphère, océan, surface continentale et surfaces englacées) et avec les cycles biogéochimiques. De nombreux développement ont été effectués pour mieux

représenter le cycle du carbone, les aérosols, l'utilisation des terres et le couplage avec les calottes. Les évolutions faites pour intégrer de plus en plus d'interactions dans les modèles du CNRM et de l'IPSL sont rassemblées dans la section 4. Enfin, l'augmentation de la puissance de calcul, l'augmentation de la taille des simulations (résolution horizontale, verticale, longueur d'intégration et ensembles de simulations) demandent une constante optimisation des codes et de l'environnement informatique permettant de les lancer et de traiter les résultats. Ces développements sont présentés dans la dernière section.

Le projet MISSTERRE regroupe de nombreuses activités de modélisation en les mettant en cohérence. Il n'est pas possible de faire un bilan exhaustif des résultats obtenus dans les 3 dernières années. Nous donnons donc plutôt les grandes orientations dans le texte et renvoyons le lecteur à la liste des publications que nous avons classé par thématique pour les détails sur les différentes thématiques. La dernière réunion du projet s'est tenue les 12-13 mai 2009 à Jussieu. L'ordre du jour, le document distribués et les différentes présentations peuvent être consultés en ligne (<http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/PoleModel/Documents.html>).

Bilan du projet suivant le plan de la demande initiale

A. Simulations de référence

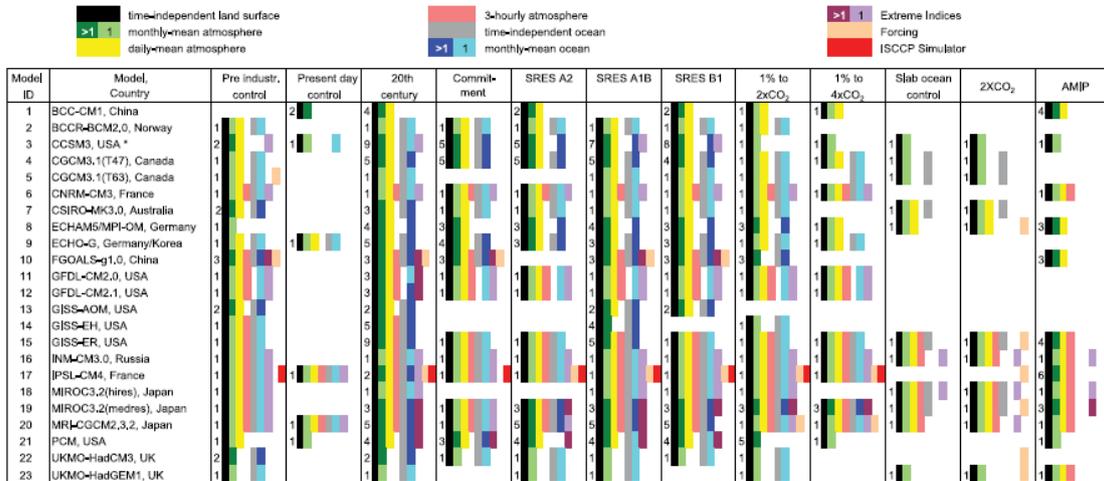
La première partie du projet regroupe les simulations ayant en commun de nécessiter des ressources de calcul et en stockage importantes et de servir de référence à de nombreuses études scientifiques. Le projet a permis de définir le cadre commun de ces expériences et de la distribution des résultats. Les différents aspects abordés dans MISSTERRE ont concerné les simulations CMIP3 réalisées pour le dernier rapport du GIEC (AR4, IPCC 2007), les simulations complémentaires pour comprendre les changements simulés ou répondre à nos questions scientifiques et des simulations des paléoclimats.

A.1 Les scénarios de référence

- Simulation du GIEC

Les simulations CMIP3 réalisée pour préparer le dernier rapport du GIEC comprenaient une simulation de référence du climat pré-industriel, des simulations de l'évolution du climat au cours du 20^{ème} siècle et plusieurs projections climatiques futures suivant différents scénarios socio-économiques. L'ensemble des simulations est référencé dans le dernier rapport du GIEC (2007) et la figure A1.1 ci-dessous indique les simulations réalisées à l'aide des deux modèles français (n°3 pour CNRM et n°17 pour IPSL). Cette figure permet de comparer l'implication des différents groupes de modélisations. On peut noter que nous avons réalisé l'ensemble des scénarios, mais que, comparé à d'autres groupes nous n'avons en général fourni qu'une réalisation des différentes expériences. Ces simulations ont servi de référence au projet MISSTERRE. Elles constituent des points de comparaison pour les simulations incluant plus de rétroaction et pour les nouvelles versions des modèles.

Table 10.4. Summary of climate change model experiments produced with AOGCMs. Numbers in each scenario column indicate how many ensemble members were produced for each model. Coloured fields indicate that some but not necessarily all variables of the specific data type (separated by climate system component and time interval) were available for download at the PCMDI to be used in this report; ISCCP is the International Satellite Cloud Climatology Project. Additional data has been submitted for some models and may subsequently become available. Where different colour shadings are given in the legend, the colour indicates whether data from a single or from multiple ensemble members is available. Details on the scenarios, variables and models can be found at the PCMDI webpage (http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php). Model IDs are the same as in Table 8.1, which provides details of the models.



* Some of the ensemble members using the CCSM3 were run on the Earth Simulator in Japan in collaboration with the Central Research Institute of Electric Power Industry (CREPI).

Figure A.1.1 : Tableau issu du chapitre 10 du dernier rapport du GIEC (IPCC, 2007) indiquant les simulations réalisées avec les différents modèles impliqués.

- Ensemble de simulations complémentaires

Pour répondre aux besoins de nos thématiques scientifiques, plusieurs autres simulations ont été réalisées. Le tableau 2 rassemble les principaux sujets abordés avec le modèle de l'IPSL et du CNRM.. A ces simulations s'ajoutent des simulations, non référencées ici, ne considérant que l'une des composantes du modèle couplé et qui permettent de compléter les analyses.

SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES IPSL	SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES CNRM
- simulations couplées climat-carbone	
- simulations couplées climat-carbone prenant en compte les aérosols sulfatés	
- simulations couplées prenant en compte l'utilisation des sols entre le climat pré-industriel et le climat actuel	- simulations couplées prenant en compte l'utilisation des sols entre le climat pré-industriel et le climat actuel
- simulations couplées avec aérosols interactifs	
- Simulations couplées prenant en compte de façon simple la fonte des calottes de glace	
- simulations permettant d'étudier l'impact du schéma de convection sur les caractéristiques du climat.	

Tableau 2. Ensemble de simulations articulée autour des simulations du GIEC pour répondre aux besoins de nos thématiques scientifiques.

Plusieurs groupes de modélisation ont maintenant réalisé des simulations couplées entre le climat et le cycle du carbone dans le cadre du projet C⁴MIP (<http://gaim.unh.edu/Structure/Future/MIPs/C4MIP.html>). Toutes ces simulations montrent

une rétroaction positive entre le climat et le cycle du carbone qui renforce le réchauffement climatique induit par la perturbation anthropique. Les simulations complémentaires réalisées à l'IPSL se sont attachées à quantifier plus précisément les différents éléments du cycle du carbone et de son interaction avec le climat. Les derniers travaux prennent aussi en compte l'effet des aérosols sulfatés dans le système. En parallèle un ensemble de simulation a été réalisé pour quantifier le rôle de l'utilisation des sols sur les caractéristiques physiques du climat, en analysant des simulations couplées incluant une végétation anthropisée ou pré-industrielle. Ces travaux ont servi de base aux simulations du stream 2 du projet ENSEMBLES dans lesquelles l'effet de l'utilisation des sols a été introduit. Le nouveau projet international LUCID lancé par IGBP/iLEAPS (http://ileaps.org/index.php?option=com_content&task=view&id=99&Itemid=200) s'appuie sur ces travaux.

L'effet des aérosols sulfatés est pris en compte dans les simulations CMIP3 en prescrivant les distributions d'aérosols dans l'atmosphère. Nous avons entrepris un couplage complet entre le modèle chimie-aérosols INCA et le modèle de climat pour pouvoir traiter les différents types d'aérosols et mieux étudier les interactions entre les aérosols et le climat. Une première simulation du climat actuel a été réalisée. Les résultats sont encourageants et montrent un refroidissement global de l'ordre de 0.8°C lorsque les aérosols sont pris en compte pour le climat actuel.

De même, les modèles utilisés pour les simulations CMIP3 ne prennent pas en compte le couplage entre le climat et les calottes de glace. Des simulations ont été réalisées au CNRM et à l'IPSL pour mieux comprendre les relations entre les changements de climat et les caractéristiques de la circulation thermohaline. Une paramétrisation simple de la fonte des calottes a été implémentée dans le modèle de l'IPSL pour tester comment la fonte du Groenland affecte la circulation thermohaline de l'océan et pour quantifier les rétroactions de cette circulation sur le climat.

De nombreuses études indiquent que la représentation des nuages dans les modèles de climat est une source majeure d'incertitude dans les projections climatiques. Nous avons testé avec le modèle de l'IPSL l'impact du passage du schéma de convection de Tiedke au schéma de convection d'Emanuel en analysant les rétroactions induites sur la représentation des upwelling équatoriaux, de la variabilité interannuelle et de la variabilité intra-saisonnière.

- Simulation des paléoclimats

IPSL	CNRM
Simulations LGM et Holocène moyen de la 2 ^{ème} phase du projet international PMIP	Simulations LGM de la 2 ^{ème} phase du projet international PMIP
Simulations des derniers mille ans	Simulations des derniers mille ans (en collaboration avec le CERFACS)
Ensemble de simulations permettant d'étudier l'évolution du climat de l'Eemien et de l'Holocène (126k, 122k, 115k, 9.5k, 4k)	Simulations permettant d'étudier l'évolution du climat de l'Eemien (126k avec et sans Groenland, 115k)
Simulation permettant de tester l'impact de flux d'eau douce en Atlantique Nord dans différents climats	

Tableau 3. Tableau synthétisant les principales simulations paléoclimatiques réalisées avec les modèles de l'IPSL et du CNRM.

Plusieurs simulations paléoclimatiques ont aussi été réalisées avec la même version du modèle couplé que celle utilisée pour les simulations CMIP3. Les simulations de l'Holocène moyen il y a 6000 ans et du dernier maximum Glaciaire suivent le protocole de la seconde phase du projet international PMIP. Les résultats ont servi de référence pour de nombreuses analyses multi-modèles (<http://pmip2.lsce.ipsl.fr/>). Les autres simulations s'intéressent à des périodes clefs du dernier cycle glaciaire-interglaciaire pour comprendre comment les variations lentes de l'ensoleillement, les fluctuations des gaz à effet de serre et les flux d'eau douce liée à la fonte des calottes affectent les caractéristiques du climat. De plus, la confrontation des résultats aux données disponibles permet de plus d'évaluer si les modèles utilisés pour les projections futures sont capables d'appréhender les différentes facettes d'un climat différent de l'actuel.

Un accent particulier est aussi mis sur le climat des derniers mille ans. Cette période climatique permet de mettre en perspective le réchauffement climatique en cours et d'étudier comment le climat répond aux éruptions volcaniques et aux fluctuations de la constante solaire. Cette activité est pilotée par le projet ANR ESCARCEL (coordinateur J. Guiot, Cerege). La figure montre les résultats obtenus pour les modèles du CNRM (forçage solaire et volcans) et IPSL (forçage solaire seul). Les grandes tendances sont capturées de façon relativement satisfaisante. En revanche les régressions sur l'Europe montrent un meilleur accord pour le modèle du CNRM.

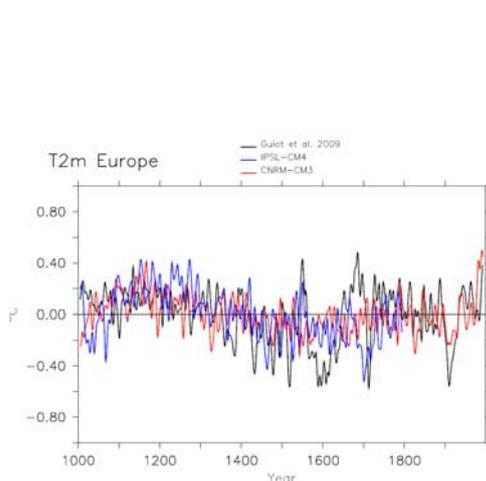


Figure A1.2 Série temporelle de la moyenne de température sur l'Europe en AMJJAS filtré avec une fréquence de coupure de 13 ans (filtre lanczos), centré sur la moyenne entre 1000 et 1800. En noir la reconstruction de Guiot et al. (2009), en rouge le modèle CNRM-CM3 et en bleu le modèle IPSL-CM4.

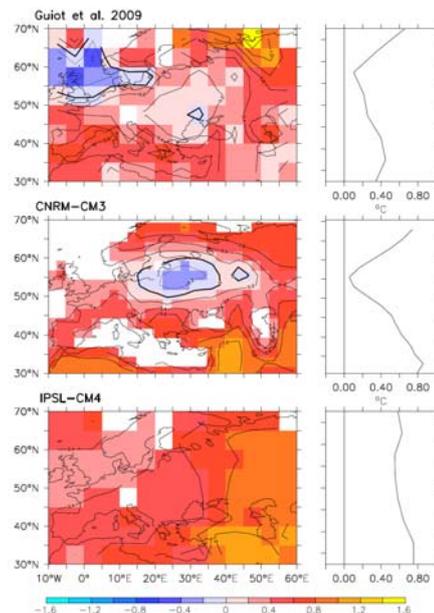


Figure A1.3 régressions de température AMJJAS sur la période 1000-1850 par rapport à l'indice de forçage radiatif global lié au changement de TSI (donc en °C/W/m²) tel que reconstruit par Bard et al. (2001).

-Simulations à plus haute résolution

IPSL	CNRM
------	------

Simulations du stream2 du projet ENSEMBLES résolution 144x142 au lieu de 96x71 pour AR4	
Ensemble de simulations permettant de tester l'impact de la résolution horizontale sur la représentation du climat actuel et la sensibilité climatique du modèle de l'IPSL	

Un accent de plus en plus fort est mis sur des simulations à plus haute résolution, ce qui devient possible avec l'augmentation des ressources calcul. Dans le cadre du projet ENSEMBLES, un ensemble de simulations du climat actuel et de 2 scénarios futurs a été réalisé. Pour le modèle de l'IPSL ces expériences ont été l'occasion de prendre en compte l'ensemble des forçages (gaz à effet de serre, variations de la constante solaire, volcanisme et l'utilisation des terres) qui ont façonné le climat du dernier siècle. Ces simulations ont également été réalisées avec une meilleure résolution horizontale, qui permet une meilleure représentation des passages dépressionnaires des moyennes latitudes.

La figure A1.3 illustre l'évolution de la température de l'air obtenue dans le stream 2 d'ENSEMBLES avec les différents modèles européens pour le scénario A1B et le scénario E1 spécialement conçu pour l'Europe. On retrouve une plus grande sensibilité du modèle de l'IPSL.

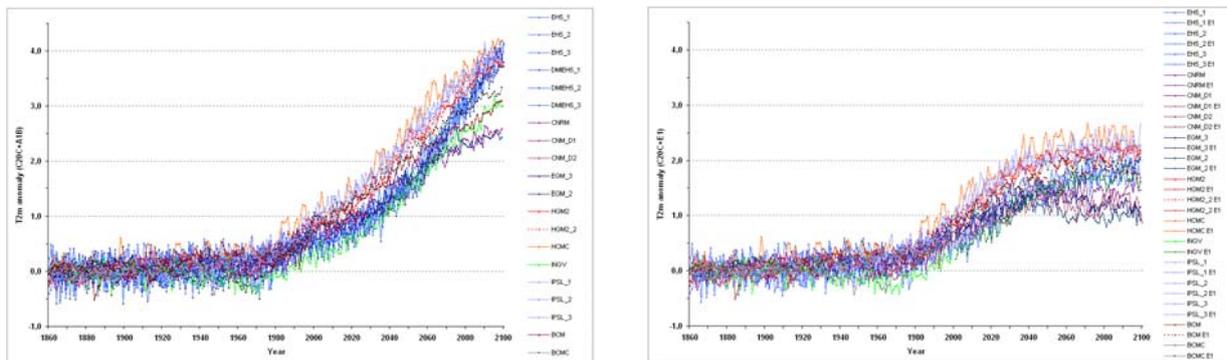


Figure A1.3 évolution de la température de l'air entre l'époque préindustrielle et l'année 2100 dans les simulations du projet européen ENSEMBLES pour les scénarios A1B et E1. Les différentes réalisations du modèle du CNRM sont en violet sombre et celles de l'IPSL en violet clair.

A ces simulations ont été associé un ensemble de simulations permettant de tester pas à pas l'impact de la résolution sur les principaux biais du modèle utilisé pour les simulations CMIP3. Ces 7 simulations ont exploré des résolutions en longitude variant de 44 points à 280 points en en latitude de 43 à 192 points. Les résultats montrent des effets sur les gradients de température de surface de la mer en l'équateur et les pôles. Pour les résolutions les plus contrastées des simulations ou le CO2 est augmenté de 1% /an ont aussi été réalisées pour déterminer l'impact de la résolution sur la sensibilité climatique du modèle. Les résultats sont en cours d'exploitation.

- Diffusion des données

Pour cet exercice les données des simulations CMIP3 ont été mises en forme, suivant la nomenclature, les formats et les meta-données dans base de données du PCMDI. Dans chacun des deux groupes un relais de distribution s'est mis en place via des serverus dods dans

chacun des centres. À l'IPSL, toute l'information est centralisée sur des pages dédiées (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr/>). Un sous-ensemble de données est directement hébergé à l'IPSL, les autres sont soit stockées près des ordinateurs ou elles ont été réalisées sur les centres de l'IDRIS ou du CCRT. Les résultats des simulations du CNRM sont également accessibles sur un serveur (<http://www.cnrm.meteo.fr/dods/dodscm3.html>)

A.2 Projets d'analyse des simulations du GIEC

- *Les projets d'analyse*

Le projet ESCRIME (Etude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et Météo-France) a été créé pour fédérer les analyses scientifiques effectuées sur les très nombreuses simulations climatiques réalisées par la communauté française dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC. De façon plus large, ce projet sert maintenant de porte d'entrée entre la communauté de modélisateurs du changement climatique et les autres communautés ou utilisateurs. C'est sous la bannière ESCRIME que nous avons réalisé de nombreuses actions de communication autour des simulations du GIEC et des principaux résultats et que nous travaillons avec l'« Institut du Développement Durable et des relations internationales » dans le projet INVULNERABLE dont l'objectif est de définir des indices climatiques pertinents pour les industriels.

Le projet MISSTERRE a permis d'organiser une réunion de synthèse les 9 et 10 octobre 2006, rassemblant les personnes ayant participé aux analyses ainsi que des représentants de nos institutions, de l'ONERC et de l'IDDRI. L'ensemble de l'activité a été regroupée selon 8 thèmes principaux : 1. Scénarios globaux, 2. Sensibilité climatique, 3. Modes de variabilité, 4. Régionalisation et extrêmes, 5. Cycle hydrologique, 6. Régions polaires et cryosphère, 7. Cycle du carbone, 8. Détection et attribution. Les responsables des différents thèmes étaient invités à présenter la synthèse des résultats pour le thème. Les formes écrites de ces synthèses ont constitué la trame du livre blanc ESCRIME diffusé en 2007 (<http://escrime.ipsl.jussieu.fr/>) et dont la traduction anglaise a été effectuée par l'IDDRI (<http://www.iddri.org/Publications/Ouvrages-en-partenariat/Escrime-White-Paper>). Les différentes contributions ont fait l'objet de publications dans le journal La météorologie (<http://www.smf.asso.fr/lameteo.html>) et sont reprises dans un livre publié par Météo-France dont la parution est imminente.

Ces journées de synthèse et les résultats des différents projets d'analyse ont alimenté la plaquette sur les activités françaises autour du climat préparée par l'INSU et qui a été diffusée lors de la réunion du groupe 1 du GIEC à Paris (29 janvier-1^{er} février 2006).

- *l'Évaluation des modèles*

Les différents exercices d'intercomparaison et les résultats des simulations réalisées par les différents groupes pour l'AR4 montrent tous que les modèles ont énormément progressé, mais qu'ils souffrent encore de biais importants. L'évaluation concerne à la fois les composantes individuelles et les composantes couplées. Nous n'avons pas encore abouti à une démarche commune de l'évaluation. Une des raisons vient de la difficulté d'établir les critères qui dépendent pour certains des thématiques scientifiques abordées. Cependant, les travaux ont progressé suivant les différentes directions annoncées. Les différentes contributions permettent d'identifier et d'implémenter des diagnostics permettant une synthèse multi-critères de la qualité des modèles par rapport aux observations, de développer une stratégie incrémentale se basant sur différentes configurations des modèles et permettant de comprendre l'origine des biais et une focalisation sur les questions scientifiques. Les

principales avancées ont concerné les nuages, le cycle hydrologique continental, la variabilité tropicale et le cycle du carbone.

Nuages et sensibilité climatique

La représentation des nuages est critique pour la prédiction du climat à toutes les échelles de temps et d'espace. Cela provient des fortes interactions des nuages avec le bilan radiatif de la Terre, l'équilibre énergétique local, la circulation atmosphérique et le cycle hydrologique. La représentation des nuages dans les modèles constitue ainsi une composante clé de la prédiction de la sensibilité climatique, de la variabilité climatique et des événements extrêmes. Les travaux menés à l'IPSL sur cette thématique se sont situés dans le cadre du projet CFMIP (Cloud Feedback Model Intercomparison Project). L'analyse des nuages en régimes de circulation atmosphérique a été un bon indicateur pour mettre en évidence des biais systématiques à l'échelle interannuelle dans la sensibilité du forçage radiatif des nuages aux changements de SST (Bony et Dufresne 2005). Le développement d'un simulateur d'observations CALIPSO-PARASOL pour l'évaluation de la distribution 3D des nuages dans les modèles numériques (Chepfer et al. 2008) a permis de montrer le grand potentiel des données satellites pour étudier les défauts systématiques des modèles (e.g. compensations en les erreurs sur la fraction nuageuse et sur l'épaisseur optique des nuages) et des nuages de couche limite qui sont beaucoup mieux observés qu'il n'était prévu. Ce simulateur a été intégré à COSP (CFMIP Observations Simulator Package), un outil communautaire développé par le Hadley, le LMD/IPSL, LLNL, CSU et l'Université de Washington pour faciliter l'évaluation des modèles par comparaison à différentes observations spatiales (ISCCP, CloudSat, CALIPSO-PARASOL, MISR). Les groupes participants à l'exercice CMIP5 sont invités à implémenter ce simulateur dans leurs simulations. Ces études ont servi de base pour la définition du projet européen EUCLIPSE (EU Cloud Intercomparison, Process Study and Evaluation project) qui vient d'être accepté pour travailler sur ces différents sujets et dans lequel se retrouveront les équipes de l'IPSL et de Météo-France.

Isotopes de l'eau

Un autre volet très prometteur concerne l'utilisation des isotopes de l'eau. Une version du modèle LMDz incluant les isotopes de l'eau est disponible. L'étude et la modélisation des isotopes de l'eau dans les régions tropicales a montré que des données de la composition isotopique de l'eau dans la haute troposphère / basse stratosphère nous permettraient de contraindre efficacement certains paramètres microphysiques du schéma de convection (e.g. efficacité de précipitation), alors que les données de la composition isotopique de l'eau dans la précipitation ou la vapeur d'eau près de la surface nous permettraient d'évaluer efficacement les processus de réévaporation de la précipitation au cours de sa chute et l'intensité des descentes précipitantes qui en résultent (Bony et al. 2008).

Hydrologie continentale

Une validation globale de l'hydrologie continentale mise en œuvre au CNRM (modèle de surface ISBA) a été effectuée en mode « off-line » grâce au forçage atmosphérique à 1° de l'Université de Princeton. Ce forçage couvre la période 1950-2006 et permet notamment d'évaluer les variations de stock simulées à la surface des continents à partir des données gravimétriques de la mission GRACE (lancée en 2002). Ces données spatiales viennent compléter la validation indirecte du bilan hydrique à partir des mesures in situ des débits des grands bassins. Les simulations montrent un bon accord entre les variations de stock observées et simulées, à condition de prendre en compte non seulement le contenu en eau des sols et la neige, mais aussi le réservoir fluvial. C'est donc non seulement le modèle de surface ISBA, mais aussi le modèle de routage TRIP, qui est ainsi testé.

ENSO

La grande diversité de représentation des événements El-Niño dans les modèles de climat conduit à une large incertitude de leur évolution sous l'influence de l'activité humaine. Les différentes analyses faites à partir de la base CMIP3, de simulations couplées avec différents schémas de convection et des simulations de l'Holocène et du dernier maximum glaciaire offrent de nouveaux diagnostics pour comparer les résultats des différents modèles. Les principales avancées concernent la validation du rôle du couplage dynamique et thermodynamique dans le développement des événements, ainsi que le développement de métriques inspirées d'études théoriques et mécanistiques. Une généralisation des diagnostics et en cours d'élaboration et servira de références pour l'analyse des simulations CMIP5 (http://www.locean-ipsl.upmc.fr/~ENSO_metrics/index.html).

Cycle du carbone

Les résultats du projet C4MIP et l'analyse des différentes simulations couplées climat-carbone montrent la grande diversité de réponses de ces modèles. Une attention particulière a été portée à l'évaluation du cycle du carbone simulé, en analysant le cycle saisonnier, la variabilité interannuelle et les tendances des flux de carbones à partir des stations de flux disponibles. Les analyses portent également sur l'intensité du couplage entre le climat et le cycle du carbone et les rôles respectifs des composantes océaniques et continentales. Ces analyses ont débouché sur la proposition d'une métrique qui servira également de référence pour les prochaines simulations.

Cyclogénèse tropicale

Une étude des cyclones tropicaux dans les simulations climatiques a été effectuée par inter-comparaison des indices de cyclogénèse dans quinze modèles de l'AR4, ainsi que leurs projections (Royer et Chauvin, 2009). Les résultats de cette étude s'inscrivent tout à fait dans les conclusions du 4ème rapport du GIEC, soulignant le manque de consensus entre les modèles. Afin de mesurer la part relative des anomalies de température de surface de la mer (TSM) calculées par les différents modèles couplés dans cette dispersion des réponses, des simulations complémentaires avec ont été réalisées en forçant ARPEGE-Climat avec des structures moyennes d'anomalies de TSM provenant de ces modèles. Bien qu'ARPEGE ne reproduise pas toujours la même réponse que celle produite par les modèles ayant fourni les TSM, la diversité des réponses est aussi grande, et parfois plus importante que celle qui avait été diagnostiquée antérieurement. Ceci confirme que la structure spatiale des anomalies de TSM conditionne largement la réponse de la cyclogénèse.

Incertitudes en Europe

Un travail important sur les incertitudes associées aux projections climatiques a été réalisé au CERFACS, en particulier pour la saison d'été et sur la région Atlantique Nord-Europe. L'idée toute simple est d'analyser la dispersion des projections climatiques futures en essayant d'identifier le ou les processus physiques responsables de cette dispersion. La deuxième étape consiste à rechercher et à établir un lien entre la dispersion des projections et la représentation du (ou des) processus responsable(s) dans les simulations du climat actuel. Cette méthodologie a été appliquée aux changements simulés de l'évapotranspiration (ETP) en Europe pour la saison d'été. L'analyse montre que la dispersion très importante des projections CMIP3 sur l'ETP est liée à la corrélation (estimée sur le climat présent) entre l'humidité des sols et le rayonnement incident en surface. Il est ensuite possible d'utiliser des méthodologies utilisant des observations pour fournir une estimation de cette corrélation pour

une région donnée (ici la France) afin de discriminer les modèles suivant leur aptitude à reproduire le signe et l'amplitude de la corrélation observée (Boé et Terray 2008). Une étude un peu similaire a également été réalisée sur le rôle des changements de circulation atmosphérique sur les projections des précipitations en Europe (Boé et al 2009).

B. Simulations régionales (Serge)

En s'appuyant sur des simulations régionales réalisées la plupart du temps dans d'autres projets nationaux (MEDUP, CICLE) ou internationaux (ENSEMBLES, CECILIA, CIRCE, CLAVIER), le projet MISSTERRE se proposait de répondre aux 3 questions et de le faire de manière coordonnée entre les deux centres français de recherche (LMD et CNRM) réalisant des simulations régionales pour le domaine Europe-Méditerranée:

1. la stabilité du climat présent et de la réponse régionale au changement climatique vis à vis d'un changement de résolution spatiale (notion de "bonne" résolution spatiale pour un climat donné)
2. la robustesse de la réponse régionale au changement climatique vis à vis du type de modèle régional: modèle global étiré, modèle à aire limitée. La question de l'impact de la taille du domaine des modèles à aire limitée sera également abordée.
3. la robustesse de la réponse régionale au changement climatique vis à vis du couplage régional océan-atmosphère.

Les deux premières questions ont été traitées de différentes manières en utilisant soit des simulations ARPEGE-Climat globales et homogènes à différentes résolutions (TL63, TL159, TL359), soit des modèles pilotés aux bords d'une zone libre (ARPEGE-Climat étiré et piloté ; ALADIN-Climat modèle à aire limitée, LMDZ zoomé et piloté) avec des résolutions de 50 km, 20-30 km puis 10 km. En climat présent, on conclut que la haute résolution apporte une valeur ajoutée sur la simulation des flux d'eau pour la mer Méditerranée (Elguindi et al. 2009), les extrêmes de précipitations (Déqué and Somot, 2009) et les vents sur terre (Salameh, 2008) et dans le domaine côtier (M.Herrmann, en préparation). La taille et la position du domaine dans le cas des modèles pilotés aux bords peut être importante sur la simulation du climat moyen (Farda et al. 2009) mais assez peu pour les extrêmes de précipitations mais cette sensibilité est éliminée par l'utilisation de la méthode du pilotage spectral à l'intérieur du domaine (Radu et al. 2008, Colin et al., en préparation). Il faut noter que le projet MISSTERRE a vu arriver à maturité deux nouvelles techniques de régionalisation pour les laboratoires français : tout d'abord le pilotage des modèles régionaux globaux, zoomés (LMDZ et ARPEGE-Climat) par des techniques points de grille ou spectrales (Herrmann and Somot 2008). L'autre technique est la mise en place d'un modèle à aire limitée ALADIN-Climat (Radu et al. 2008) qui a contribué avec succès à deux projets européens (ENSEMBLES et CECILIA) et que l'on peut considérer à maturité en 2009 dans sa version 5. Le troisième point innovant dans MISSTERRE consiste à expérimenter une nouvelle technique de two-way nesting entre la version régionale du LMDZ et sa version globale. Cette technique, encore en cours de validation, apportera un cadre adéquat pour étudier les interactions entre l'échelle régionale et l'échelle globale.

Concernant les scénarios du 21^{ème} siècle, LMDZ-régional est utilisé avec succès dans la régionalisation (pour l'Europe de l'Est et pour le bassin méditerranéen) de deux scénarios (A1B et B1) du modèle couplé global IPSL pour la période de 1951 à 2050. Mais l'apport d'une résolution plus haute que 50 km est pour le moment difficile à évaluer même si les outils et les simulations sont en place. On peut voir tout de même les premiers résultats dans Elguindi et al. 2009 ou Sanchez-Gomez et al. 2009. L'impact du passage à 10 km avec ALADIN-Climat pour les scénarios de changement est à l'étude.

La troisième question reste encore grandement ouverte mais on peut dire que la communauté française a commencé à défricher le terrain pour la région Méditerranée et est maintenant suivie par de nombreux autres centres de modélisation en Europe dans le cadre des projets CIRCE et bientôt HYMEX. Le CNRM et le LMD restent actuellement leaders dans ce type d'études. Il est particulièrement difficile de prouver la valeur ajoutée des modèles couplés régionaux en climat présent car les différences obtenues entre un modèle régional forcé par des températures de surface de la mer (TSM) et le même modèle régional couplé à l'océan sont le plus souvent dues à des différences de TSM pas forcément liées au couplage. Deux techniques de comparaison propres ont été mises en place : réaliser la simulation couplée puis utiliser les TSM obtenues pour forcer le modèle régional atmosphérique (déjà utilisé avant MISSTERRE dans Somot 2005) ou appliquer une correction de flux homogène en espace et en temps (Somot et al. 2008). Les résultats montrent qu'en climat présent (après s'être affranchi des différences de TSM), le couplage n'apporte pas de modifications de l'état moyen du climat, pas de modifications significatives de la variabilité sur terre mais a un impact significatif sur les bilans hydrique et thermique de la mer Méditerranée, sur la variabilité interannuelle des flux air-mer, de la TSM et des variables océaniques en Méditerranée. L'impact sur la simulation des extrêmes (pluie, température, vent) est à l'étude et font l'objet de projets à part (CYPRIM, ANR-MEDUP). Certains de ces résultats sont présentés dans Li et al. (2006) et Somot et al. (2008), mais beaucoup restent encore non publiés et font l'objet de deux thèses (A. Casado au LMD et J. Colin au CNRM).

Concernant les scénarios, la valeur ajoutée des modèles couplés régionaux est plus nette. Elle résout des problèmes méthodologiques de fond comme la résolution spatio-temporelle de la TSM en mer Méditerranée au cours du 21^{ème} siècle et le fait que dans un scénario de réchauffement climatique, le réchauffement vient de l'atmosphère et se propage vers l'océan et pas l'inverse comme le sous-tendent les modèles forcés. Le premier scénario régional du bassin méditerranéen en mode couplé régional a été publié au cours du projet MISSTERRE (Somot et al. 2008). Les scénarios suivants ont été réalisés dans le cadre de projets européens dans lesquels collaborent le LMD et le CNRM (CIRCE, CANTICO). Pour le prochain rapport du GIEC, on espère que l'exercice CORDEX du WCRP (intercomparaison des modèles régionaux sur diverses régions du globe suivant les nouveaux scénarios RCPX.Y) aura une déclinaison méditerranéenne en mode couplé.

C Vers une nouvelle version des modèles physiques

De nombreux développements ont été effectués dans les différentes composantes (atmosphère, océan, surface continentales, surfaces englacées, ..). Les développements considérés dans MISSTERRE ont tous en commun d'améliorer la climatologie du modèle couplé et la représentation des phénomènes importants pour le couplage entre le climat et les cycles biogéochimiques.

C.1 Le projet physique commune

Le projet « Physique Commune » est issu d'une volonté commune de Météo-France (CNRM/GMGEC) et de l'IPSL (LMD) de « développer une bibliothèque commune de paramétrisations physiques » compatible avec les deux modèles ARPEGE-Climat et LMDz, dans le but d'échanger les schémas de paramétrisations et d'avoir une stratégie commune de développement. L'outil de base est le modèle Arpege-1D (et sa bibliothèque de cas 1D) dans lequel on a inclus « en bloc » la physique du modèle LMDz. Trois grands groupes de paramétrisations ont été identifiés : couche limite/convection/nuages, rayonnement et

orographie/ondes. En cours de projet les équipes du CNRM/GMAP et du LGGE se sont jointes au groupe de travail. Signalons aussi le départ de P.Marquet en 2008, remplacé par I.Beau début 2009. Deux réunions de travail sont organisées chaque année, l'une d'elle étant couplée aux Ateliers de Modélisation à Toulouse.

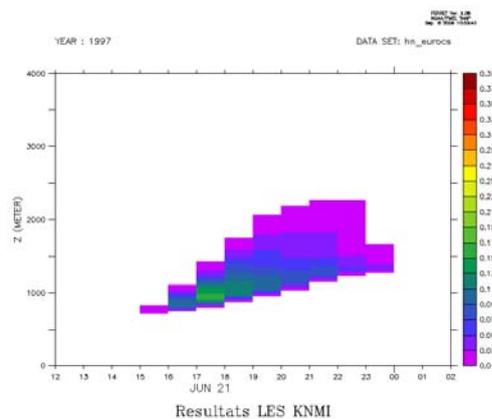
Concernant le rayonnement, les deux modèles utilisent les mêmes codes issus du CEPMMT. Le projet Physique Commune s'est traduit notamment par la participation fin 2004 à un exercice d'intercomparaison des codes de rayonnement RTMIP et le portage du code RRTM cycle 32t0 dans LMDz.

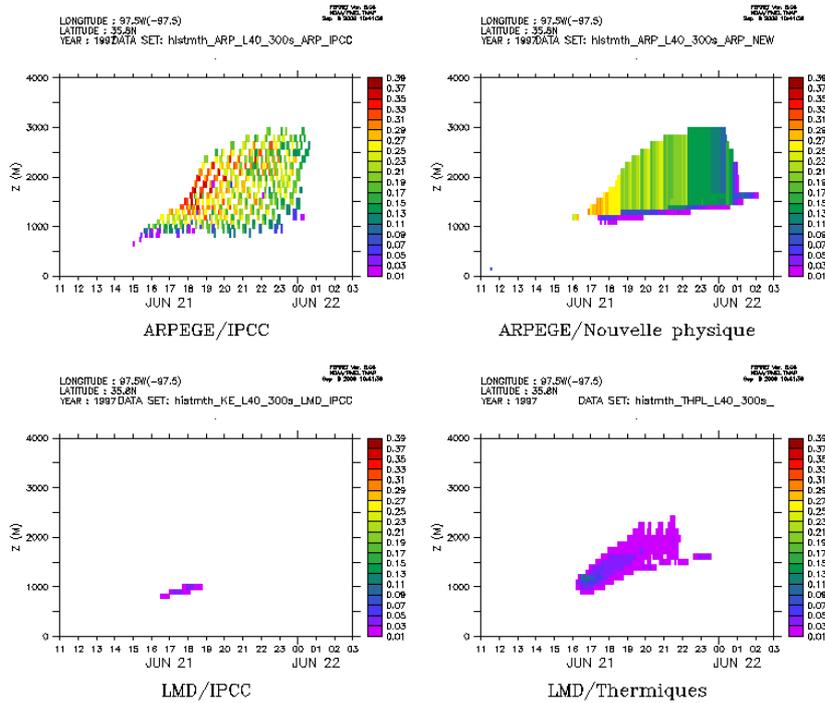
Le bloc couche limite/convection/nuages a donné lieu à plus de développements autour des cas tels que Eurocs, Bomex, Toga_Coare et Rico. En 2007/2008, ces travaux ont abouti à des évolutions communes des deux modèles qui sont passés d'une version diagnostique (celui utilisé pour les runs IPCC/AR4) à une version pronostique.

En ce qui concerne ARPEGE-Climat, on note des changements dans les schémas de turbulence (Mellor & Yamada/diag.au profit de Cuxart-Bougeault-Redelsperger/prog.), de microphysique (Kessler/diag au profit de Lopez/prog), de convection profonde et peu profonde (flux de masse Bougeault au profit flux de masse/CAPE Guérémy), et de l'entraînement en sommet de couche limite (Grenier & Bretherton).

Pour LMDz, les simulations de l'AR4 ont été effectuées avec une version dans laquelle la turbulence de couche limite est représentée par le schéma diagnostique de Louis/Laval et la convection profonde par le schéma d'Emanuel. Désormais, une nouvelle paramétrisation de la couche limite convective est disponible en combinant un schéma en flux de masse prenant en compte l'existence de thermiques (Hourdin & al, 2002) couplé avec un schéma de nuages (Bony & al, 2001) et le schéma de turbulence pronostique de Mellor & Yamada. Développé initialement pour une couche limite convective sèche, le modèle du thermique a été adapté aux cas nuageux par l'ajout des processus de condensation dans l'ascendance et des processus de mélange entre le thermique et l'environnement (Rio & al, 2007).

Les deux figures ci-dessous illustrent d'une part les résultats du cas Eurocs concernant la nébulosité, obtenus avec le LES du KNMI, puis les résultats des deux physiques ARPEGE-Climat (figures du haut) et des deux physiques LMDz (figures du bas). Pour ARPEGE-Climat, on observe une représentation moins « bruitée » et pour LMDz. On obtient une meilleure représentation des nuages grâce au mélange du panache des thermiques avec l'environnement.





Cette comparaison des différentes physiques a été étendue en 3D dans le cadre d'AMMA-MIP. La campagne AMMA a par ailleurs donné lieu à la création d'un cas 1D de développement de convection humide dans un environnement semi-aride (Golden case du 10/7/2006 défini par C.Rio).

Afin de maintenir et renforcer une dynamique nationale autour du rôle des processus atmosphériques, le projet Physique Commune sera suivi par le projet DEPHY (Développement et Evaluation Physiques des modèles atmosphériques, qui fait l'objet d'une demande LEFE).

C.2 Préparation des nouvelles versions des modèles pour le 5^{ème} rapport du GIEC

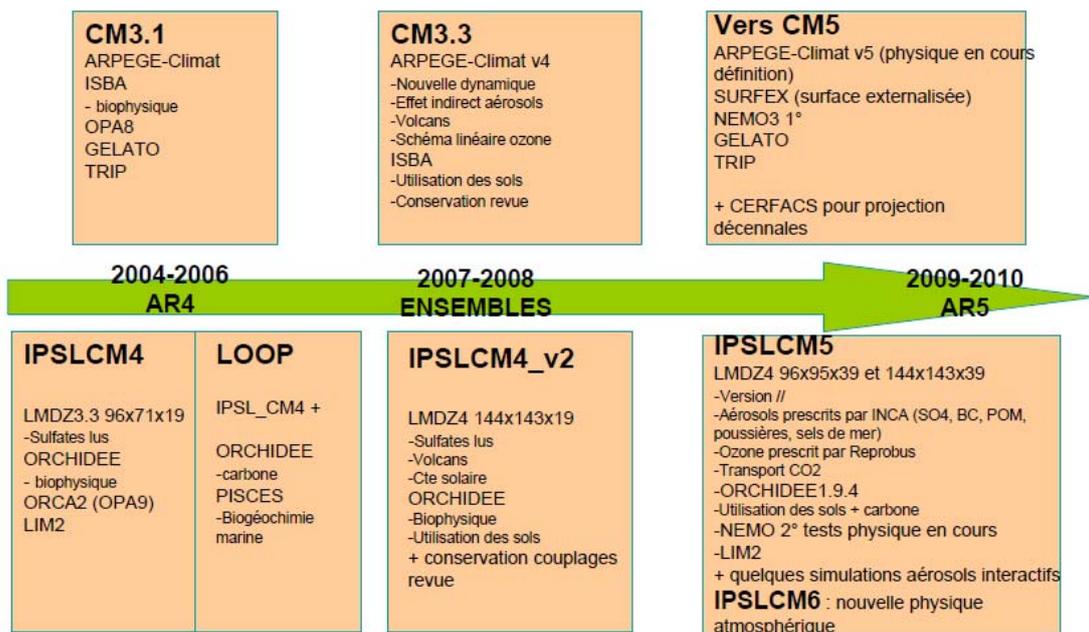


Figure C.2.1 Figure montrant les principales évolutions des modèles du CNRM et de l'IPSL entre les simulations CMIP3 de l'AR4, les simulations du stream2 du projet européen ENSEMBLES et les simulations CMIP5 qui démarreront à l'automne 2009.

Le modèle de climat a évolué de la version IPSLCM4 utilisée pour l'AR4, vers IPSLCM5, pour lequel toutes les composantes ont subi des modifications. Du côté de modèle d'atmosphère LMDZ la physique est proche à celle utilisée pour l'AR4. Les modifications concernent la parallélisation, la convergence entre les versions utilisées pour le climat et le couplage avec la chimie et les aérosols, la convergence avec la version stratosphère et la réécriture de certains modules et la révision champs figurant dans les fichiers résultats. Le modèle d'océan NEMO/OPA9 a remplacé la version OPA8, ce qui a demandé de revoir l'interface dans l'océan et des étapes d'ajustement. Enfin la composante ORCHIDEE a été revue pour mieux représenter l'hydrologie continentale et mettre en phase les versions « carbone » et « utilisation des terres » du modèle. Un ensemble de tests avec les versions des modèles forcés et les versions couplées a été réalisé pour suivre pas à pas les différentes évolutions. Cette version servira de base à la version incluant le cycle du carbone et l'utilisation des sols pour réaliser le cœur des simulations CMIP5. Dans un premier temps la résolution sera de 96 points en longitude, 95 points en latitude et 39 niveaux verticaux. Une version utilisant la résolution horizontale des simulations du stream 2 ENSEMBLES permettra de compléter le jeu de simulations pour certains scénarios et pour étudier plus finement le cycle de l'eau, les nuages et les événements extrêmes.

Les principaux développements réalisés sur la convection dans LMDZ seront prochainement utilisés pour les simulations climatiques. Cette nouvelle version du modèle d'atmosphère sera associée à la mise en place de la version IPSL-CM6 du modèle de l'IPSL avec laquelle nous espérons réaliser un sous-ensemble de simulations CMIP5 en 2010.

Le système couplé climatique du CNRM-CM a connu deux phases de développement entre le GIEC-AR4 (CMIP3) et CMIP5, qui servira de base au GIEC-AR5.

Au cours de la première phase de développement du modèle, qui a conduit à CM3.3, la composante atmosphérique du système couplé a été modifiée de manière à prendre en compte la nouvelle version 4 d'ARPEGE-Climat. Cette nouvelle version comportait une nouvelle dynamique, mais pas d'importantes modifications de la physique. En revanche, le forçage lié au premier effet indirect, qui était absent dans la version CM3.1 (version GIEC-AR4), a été ajouté, l'effet des éruptions volcaniques a été pris en compte en modifiant les concentrations des aérosols présents dans la stratosphère. Par ailleurs, une vérification poussée de la conservativité des couplages océan-atmosphère et océan-glace a amené à modifier la formulation de ces interfaces. Cela a permis d'améliorer nettement la température moyenne modélisée et de réduire sa dérive, sans toutefois réduire les biais climatiques régionaux. La nouvelle version CM3.3 du modèle couplé du CNRM a été notamment utilisée pour réaliser l'ensemble des simulations demandées dans le cadre du projet FP6/ENSEMBLES.

La seconde phase des développements a débuté fin 2008, en collaboration avec le CERFACS, notamment pour ce qui concerne le choix de la version de NEMO utilisée et la mise au point des interpolations entre les différentes grilles du modèle couplé. Cela a donné lieu à la mise en place de la version préliminaire CM4 de résolution horizontale 2° (NEMO v2, ARPEGE-Climat v4). La génération CM5 quant à elle repose sur le couplage NEMOv3 1° avec ARPEGE-Climat v5 (grille 256x128, 31 niveaux verticaux). Dans cette version la surface est externalisée (SURFEX), ce qui permet de prendre en compte de nombreux développements récemment effectués, en particulier en matière d'hydrologie et de formulation de flux turbulents océan-atmosphère (Bulks ECUME). Le premier effet indirect des aérosols sulfatés

et l'impact des éruptions volcaniques est mieux pris en compte que dans les versions précédentes, sur la base d'une comparaison poussée avec des observations. Comme les versions précédentes, CM5.1 comporte la physique diagnostique. Au cours de l'automne 2010, nous espérons mettre au point la version CM5.2, comprenant la nouvelle physique pronostique d'ARPEGE-Climat v5. Les premières simulations longues prévues pour CMIP5 débiteront en janvier 2010 au CNRM, avec CM5.2 ou à défaut CM5.1. Dans le même temps, le CERFACS démarrera la production de prévisions décennales en utilisant les réanalyses océaniques réalisées en collaboration avec le centre européen à l'aide du logiciel d'assimilation variationnelle NEMOVAR.

C.3 Evolution de la composante océanique

La version du modèle d'océan implémentée dans IPSL-CM5 comprend de nombreuses améliorations par rapport à la version OPA8 utilisée pour CMIP3. Le schéma TKE paramétrant la turbulence verticale a été amélioré. Le mélange du à la marée est maintenant pris en compte. La profondeur de pénétration du rayonnement solaire dépend maintenant de la turbidité de l'eau. Les couches de mélanges sont mieux représentées dans l'hémisphère d'été, ce qui améliore la représentation de la température de surface de la mer (Figure C3.1). En particulier le biais froid des moyennes latitudes de l'hémisphère nord est très réduit. Nous sommes actuellement en train d'étudier de façon plus complète les effets de ces modifications dans le système couplé.

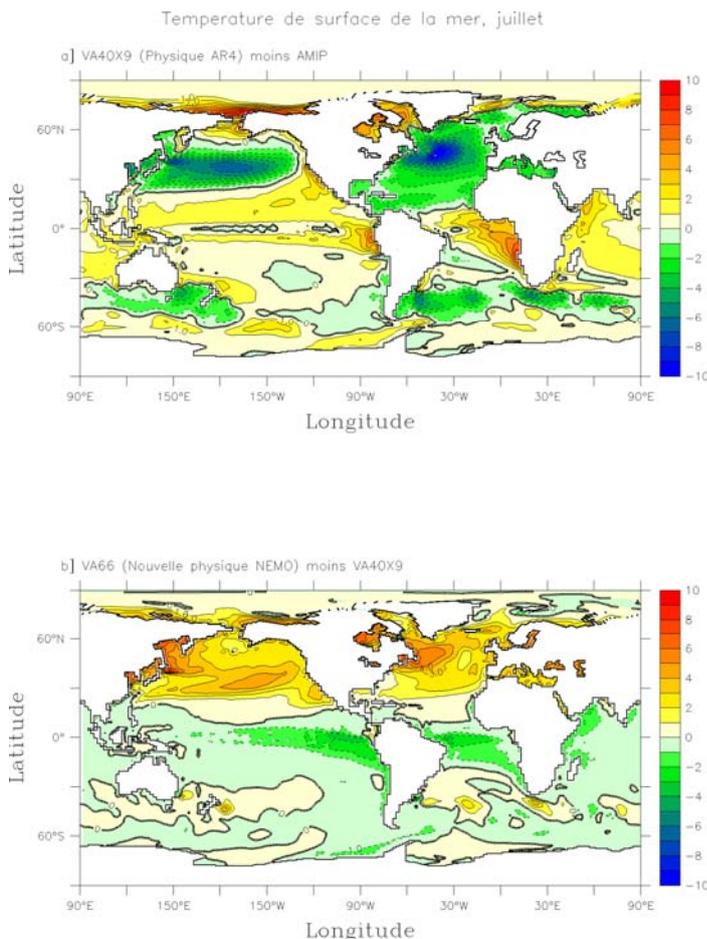


Figure C.3.1. Température de surface de la mer au mois de juillet (°C) simulées par le modèle couplé de l'IPSL. a) Différence entre la température simulée et les données AMIP. Les moyennes latitudes de l'hémisphère nord sont très froides. b) Différence entre une simulation avec la nouvelle physique NEMO, et une simulation avec la

physique des simulations AR4. Le biais froid des moyennes latitudes est très fortement réduit. Les upwellings tropicaux sont aussi mieux représentés.

C.4 Couplages

Dans la composante atmosphérique LMDZ, la couche limite et l'interface de couplage ont été entièrement réécrites de façon très modulaire. Coté OPA, le nouveau module de surface offre lui aussi une grande modularité, avec plusieurs choix possibles sur la physique du couplage. Ces développements nous ont permis de tester plusieurs améliorations dans le couplage. Ainsi, un schéma temporel amélioré permet d'assurer complètement la conservation en énergie et en eau dans le système couplé. Dans le calcul des échanges de quantité de mouvement entre océan et atmosphère, le courant de surface est maintenant pris en compte.

Plusieurs modifications ont également été faites dans le couplage entre l'atmosphère et la surface continentale pour mieux prendre en compte la température et l'humidité relative dans le calcul de la résistance stomatale.

D. Vers un modèle du système Terre

D.1 Couplage avec les cycles biogéochimiques

De nombreux aspects des changements climatiques font intervenir des modifications des cycles biogéochimiques. Pour mieux les appréhender et évaluer leur impact sur le climat, il est nécessaire de considérer les interactions entre le climat et les cycles biogéochimiques. L'une des orientations des développements des modèles de climat consiste à développer des modèles « système terre » où ces interactions sont intégrées petit à petit. Les niveaux de complexité sont différents entre les modèles de l'IPSL et du CNRM. Les éléments rassemblés ci-dessous pour les deux modèles seront introduits dans les futures versions des modèles et permettront de réaliser des tests de sensibilité autour des simulations CMIP5.

- cycle du carbone, du méthane et de l'azote

Plusieurs développements ont été réalisés dans le modèle de l'IPSL pour mieux intégrer le climat et le cycle du carbone. Dans les premières simulations couplées climat-carbone les flux de CO₂ étaient seulement considérés en moyenne globale. Une nouvelle version permet de transporter le CO₂ dans l'atmosphère. Cette version a été utilisée pour les comparaisons entre les résultats du modèle couplé climat-carbone et les sites de mesures.

Les nouvelles paramétrisations permettant de traiter les zones inondées ou les feux ont bien progressé dans le modèle ORCHIDEE. Il est encore prématuré de les inclure dans les versions standards des modèles. Néanmoins, de premiers tests démarreront prochainement dans des simulations couplées.

Le codage de ISBA-CC (cycle du carbone continental) dans SURFEX (nouvelle interface de surface externalisée d'ARPEGE-Climat) est désormais terminé. Les premiers tests de validation sur plusieurs sites FLUXNET ont été réalisés, de manière à vérifier que les résultats dans ce nouveau cadre SURFEX sont cohérents avec ceux qui avaient été obtenus par le biais de l'ancien schéma de surface. L'objectif est maintenant de réaliser un premier test de simulation couplée climat-carbone, moyennant notamment l'activation d'une formulation simple de la biogéochimie marine dans NEMO.

- Chimie et aérosols

Plusieurs actions ont été entreprises à l'IPSL pour pouvoir considérer les différents types d'aérosols et pas seulement les aérosols sulfatés dans les projections climatiques. Pour cela, le couplage entre le modèle LMDZ et le modèle de chimie-aérosols INCA a été réalisé de façon

à ce que les aérosols soient entièrement interactifs avec le rayonnement et le cycle hydrologique du modèle d'atmosphère. Ces développements permettent actuellement de préparer les distributions tri-dimensionnelles des champs d'aérosols qui seront imposées dans les simulations CMIP5, à partir des émissions fournies pour les différents scénarios

Une version simplifiée de la version aérosols du modèle a également été développée pour pouvoir réaliser les simulations entièrement interactives entre les aérosols et le climat. C'est avec cette version qu'a été réalisée la première simulation couplée climat-aérosols répertoriée dans la section A1.

Le couplage en mode interactif entre le modèle LMDZ et le modèle de chimie stratosphérique REPROBUS a été réalisé. Le module radiatif prend en compte les distributions de O₃, H₂O, CH₄, N₂O and CFCs calculées par le modèle. De longues (1960-2008) simulations interactives chimie-climat sous forçages solaires et volcaniques ont été évaluées par des comparaisons avec des jeux de données satellites et sol, et avec des réanalyses météorologiques. Une longue simulation passée-future (1960-2100) forcée selon le scénario standard AR4 a déjà été réalisée pour produire des champs d'ozone stratosphérique en évolution pour le forçage des simulations CMIP5. De nouvelles simulations forcées selon les derniers scénarios CMIP5 sont prévues.

D.2 Couplage avec l'hydrologie continentale

De nombreux tests en forcé et en couplé ont été effectués avec le modèle de surface continentale ORCHIDEE pour améliorer la représentation de l'évaporation et de l'hydrologie du sol. En particulier une instabilité du sol perturbe fortement l'hydrologie des forêts tropicales et des régions arides. La nouvelle version représente mieux les précipitations des forêts tropicales. L'autre axe du travail a consisté à mettre ensemble les versions utilisées pour étudier le rôle de l'utilisation des sols sur le climat et le cycle du carbone. Cette nouvelle version a été introduite dans la dernière version du modèle couplé et est en cours de test.

Le couplage du modèle Arpège-Climat avec la plateforme SURFEX permet d'envisager l'activation dans les simulations climatiques couplées d'options plus ou moins récentes du schéma de surface ISBA : 3^{ème} couche hydrologique sous la zone racinaire, paramétrisation du ruissellement sous-maille, nouveau schéma de neige (après codage d'une version implicite) et de gel du sol, paramétrisation des zones inondées. A plus long-terme, la version à diffusion explicite du schéma ISBA pourra être testée et permettre le couplage avec un modèle de permafrost. Le couplage avec le modèle de routage TRIP, déjà mis en oeuvre pour la paramétrisation des zones inondées, permet également d'envisager une représentation simplifiée des aquifères.

D.3 Couplage avec les calottes

La réflexion sur le couplage des modèles de calotte dans les modèles de climat s'est effectuée dans le projet LEFE-CASTOR (coordinatrice S. Charbit, LSCE). Le projet ENSEMBLES a permis d'aborder les développements nécessaires pour coupler la calotte au modèle d'océan. Les moyens supplémentaires apportés par le projet européen COMBINE permettront de reprendre ces travaux. Les tests de sensibilité effectués avec les modèles du CNRM et de l'IPSL pour comprendre la circulation thermohaline de l'océan et le rôle de flux d'eau douce provenant d'une fonte du Groenland indiquent que la fonte de la calotte peut avoir un impact non négligeable sur l'amplification du changement climatique aux hautes latitudes et sur les fluctuations de la zone de convergence intertropicale dès le siècle prochain.

E. Environnement de travail

E.1 Environnement informatique

La réflexion sur les environnements informatiques a continué à se faire dans chacun des groupes : CERFACS, IPSL et Météo-France. A l'IPSL, l'environnement des simulations est maintenant modularisé grâce à libGCM qui permet de gérer différentes configurations du modèle couplé. Au niveau européen, le soutien aux réseaux ENES et PRISM a permis la mise en place de deux projets européens FP7 phares dans le domaine des infrastructures de modélisation du climat : le projet METAFOR de standardisation des métadonnées (données qui décrivent les données, les modèles et les expériences), en particulier pour CMIP5 (2008-2011, 2.2 M€, 11 partenaires, coordonné par E. Guilyardi) et le projet IS-ENES qui couvre l'ensemble des autres aspects de l'infrastructure logicielle des modèles de climat, de la configuration au stockage de leur résultats et leur validation en passant par leur assemblage et en particulier le développement du coupleur OASIS4 (2009-2013, 7.5 M€, 20 partenaires, coordination Sylvie Joussaume).

E.2 Parallélisation et adaptation à différents types de calculateur

Avec l'aide de l'ANR (projet CICLE), nous avons parallélisé le modèle de climat. Les modèles d'atmosphère LMDZ, de surface continentale ORCHIDEE et de chimie aérosols INCA bénéficient maintenant d'une parallélisation hybride mémoire distribuée (MPI) / mémoire partagée (OpenMP) qui permet d'utiliser efficacement plusieurs dizaines à centaines de processeurs (selon la résolution). Les versions parallèles d'OPA9 (océan) et LIM (glace de mer) ont été utilisées pour assembler un modèle de climat parallèle.

Pour préparer l'AR5, nous avons optimisé le modèle de climat pour tourner sur machine vectorielle/parallèle (type NEC SX9), sur O(10) processeurs. Cette version est maintenant distribuée aux utilisateurs, et largement utilisée. Une version de développement, non distribuée, nous permet de tester des machines massivement parallèles. L'efficacité sur O(100) est très bonne. Nous constatons cependant que faire tourner un système de modélisation couplant plusieurs codes parallèles n'est pas possible sur tous les calculateurs, certains n'ayant pas un environnement adapté.

Il nous reste des étapes à franchir pour aller plus loin, et pouvoir utiliser O(1000) processeurs et plus. Il nous faut tout d'abord passer du coupleur OASIS 3 au coupleur OASIS 4. Il nous faut ensuite refondre complètement le système d'entrée-sortie, qui est actuellement inadapté au parallélisme massif. Les développements sur ces deux points ont déjà démarré, et se poursuivront avec en particulier le soutien du projet européen IS-ENES (FP7).