

# AO INSU 2013

## Section « Océan-Atmosphère »

### *Dossier scientifique*

Ce dossier ne devra pas excéder **15 pages** (police : Times New Roman 12) ou 3 pages pour une Lettre d'Intention et sera à télécharger via le formulaire informatique destiné à synthétiser le projet : <http://appeldoffres2013.insu.cnrs.fr>

**Nom du porteur du projet : Pascale Braconnot (IPSL/LSCE) et Serge Planton (Météo-France)**

**Titre du projet : Modélisation Intégrée du Système Terre**

Le projet est-il - un nouveau projet ? non

- une resoumission ? si oui, en quelle année a-t-il été soumis ? non
- la continuité d'un projet financé ? Si oui, en quelle année a-t-il été retenu ? 2010

Le porteur a-t-il obtenu un financement LEFE au cours des 3 dernières années ? oui

- en réponse à quel appel d'offres : 2010
- pour quelle durée ? 3 ans
- titre du projet : **Modélisation Intégrée du Système Terre (MISSTERRE)**
- le thème scientifique de ce projet financé précédemment est-il similaire à celui soumis à cet appel d'offres 2013 ? oui. La présente demande est une demande d'extension du financement du projet à l'année 2013 pour achever le cycle d'exploitation scientifique des simulations CMIP5 dont le calendrier a été retardé d'un an. Il s'agit aussi de développer la réflexion sur de nouvelles questions scientifiques et d'organisation ayant émergé de la prospective INSU.

#### **Intérêt scientifique et état de l'art**

Le projet MISSTERRE a pour objectifs d'améliorer notre compréhension du système climatique, de se doter des moyens de réaliser les simulations servant de support au prochain rapport du GIEC et de faire progresser les modèles de climat nécessitant le couplage entre de nombreuses composantes sous les différents aspects de modélisation et d'infrastructure de modélisation. Ce projet assure ainsi la cohérence des travaux menés par les équipes françaises, en permettant de développer la colonne vertébrale scientifique et technique indispensable à de nombreuses études, mais qu'il est souvent difficile de valoriser dans la plupart des appels d'offre. Il permet aussi de donner une visibilité aux actions de recherches menées pour assurer une contribution française aux travaux du GIEC (groupe I), en particulier via l'action ESCRIME (Etude des Scénarios Réalisés par l'IPSL et Météo-France), tant auprès de nos institutions que des autres communautés de recherche, en particulier celles concernées par les impacts du changement climatique. Le projet ne prétend donc pas couvrir l'ensemble des thématiques abordées, dont certaines font aussi l'objet de projets plus spécifiques auprès de LEFE ou d'autres appels d'offre nationaux et européens.

Les pistes de recherche explorent à la fois des ensembles de simulations permettant d'étudier la réponse du climat de l'échelle globale à l'échelle régionale, des modèles de plus en plus

complexes incluant le couplage entre le climat et les cycles biogéochimiques, des simulations longues pour étudier les fluctuations naturelles et mettre en perspective la perturbation anthropique, des simulations à l'échelle décennales contraintes par le choix des conditions initiales, et une représentation de plus en plus fine des processus de petite échelle permettant aussi d'aborder des simulations à haute résolution. Le cœur du projet des trois dernières années a permis la réalisation et l'exploitation des simulations CMIP5 qui servent de base aux nombreuses publications qui seront considérées dans le prochain rapport du GIEC devant paraître en 2013.

Le calendrier international associé à l'exercice de modélisation CMIP5 a glissé d'un an, en raison d'un retard pris au départ sur la définition des protocoles expérimentaux en terme d'émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols et d'utilisation des terres, et plus récemment au retard lié à la diffusion des résultats des simulations et des analyses multi-modèle. Le projet MISSTERRE servant à accompagner ce cycle de modélisation/simulation/exploitation scientifique il paraît important que les actions prévues pour la dernière année et la valorisation associée puissent être réalisées. L'exercice CMIP5 a été extrêmement prenant pour l'ensemble des acteurs du projet pour pouvoir réaliser les simulations et les premières analyses dans les délais impartis pour pouvoir être considérées par les auteurs du prochain rapport du GIEC. Cette priorité n'a pas permis de prendre le recul nécessaire pour définir une nouvelle forme à donner au projet en fonction des nouveaux enjeux scientifiques et de coordination. L'année 2013 doit donc aussi permettre de redéfinir les contours tout en permettant de garder une cohérence et des interactions entre les différents types d'activités couvertes par le projet.

### Plan de recherche et calendrier de réalisation

Les axes scientifiques de cette proposition suivent les 3 grandes parties définies dans le projet 2010 que nous avons inséré en annexe de ce document : 1. Simulation et diffusion des résultats, 2. Evaluation, analyses et utilisation des résultats, 3. Prochaines générations de modèles (Figure 1).

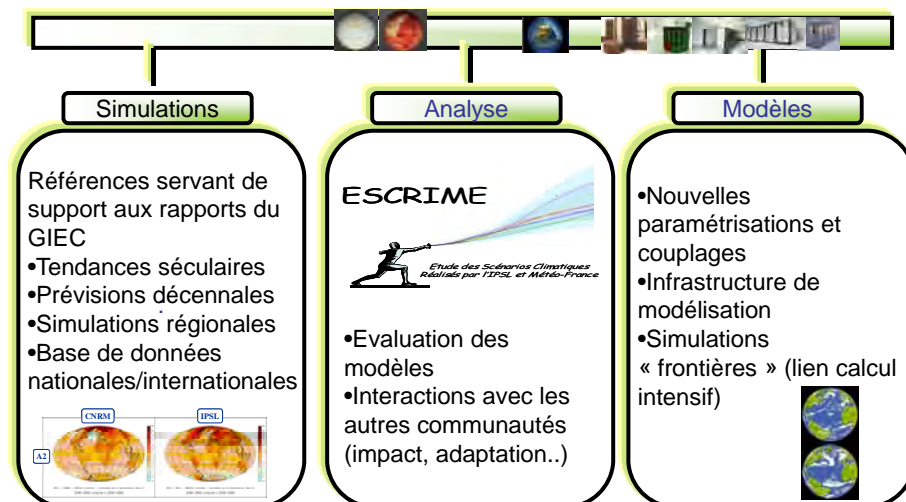


Figure 1 : Schéma synthétisant les différents points abordés dans le projet MISSTERRE

Afin de justifier le travail prévu en 2013, nous reprenons les différentes rubriques en indiquant les principaux faits marquants et le travail prévu pour 2013. Le travail directement porté par MISSTERRE concernera plus précisément

- la réalisation de simulations complémentaires pour comprendre les rétroactions et les incertitudes
- les analyses et le croisement des résultats permettant de bénéficier de la diversité d'approches et de thématiques abordées par les partenaires du projet
- l'identification des sujets devant faire l'objet de projets spécifiques à l'issue du projet actuel et la nouvelle forme à donner à la coordination nationale pour garder une forte cohésion entre les équipes.

## 1 Simulations et diffusion des résultats

Ce premier axe de MISSTERRE avait comme objectif de garantir une bonne participation des équipes française à la réalisation et la diffusion des simulations du projet CMIP (CMIP5) qui alimenteront le prochain rapport du GIEC (Assessment report 5, AR5). Les simulations réalisées couvrent une large palette d'activités scientifiques aux échelles de temps centennales et décennales ([http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment\\_design.html](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/experiment_design.html)). La régionalisation des simulations globales à l'aide de modèles régionaux s'est également développée grâce à l'initiative CORDEX ([http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RC\\_Cordex.html](http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RC_Cordex.html)).

La réalisation des simulations CMIP5 a fait l'objet d'une conférence de presse le 9 février 2012 à l'INSU, co-organisée par les services de presse du CNRS, de Météo-France, et du CEA (le dossier de presse joint en annexe de ce document illustre les simulations et les premiers résultats).

### 1.1 Simulations long terme

Le travail dans cette partie a comporté plusieurs phases :

- Test des versions des modèles utilisées pour l'exercice. Comme nous l'avons indiqué dans la demande initiale, le modèle du CNRM, CNRM-CM5, comporte de nombreuses modifications de la physique du modèle et de la résolution par rapport à la version utilisée pour l'exercice précédent (CMIP3). Pour l'IPSL deux versions de modèle et deux résolutions ont été utilisées. La première version incluant le cycle du carbone, les aérosols interactifs et l'utilisation des terres, comporte peu de modification de la physique du modèle, si ce n'est dans la composante océanique, alors que la seconde bénéficie de la nouvelle physique (couche limite/convection/nuages) du modèle du LMD.
- Simulations avec le modèle LMDZ-INCA-REPROBUS permettant de calculer les distributions tridimensionnelles des aérosols et de l'ozone stratosphérique et troposphérique utilisé en fonction des différences scénarios d'émission. Les distributions d'aérosols ont ensuite été utilisées conjointement dans les modèles du CNRM et de l'IPSL. Chaque groupe a en revanche sa propre modélisation de l'ozone.
- Réalisation des simulations. Les simulations du CNRM-CERFACS représentent l'occupation de 12 nœuds de 8 processeurs du calculateur NEC SX8 de Météo-France à plein temps pendant un an et demi et un volume de données à gérer et à stocker d'environ 400 To (400 mille milliards d'octets). Les simulations de l'IPSL représentent l'occupation de 3 nœuds de 16 processeurs du calculateur NEC SX9 de GENCI et un volume de données de 2 Po (2 millions de milliards d'octets).

Le tableau ci-dessous synthétise les principales simulations réalisées.

Type d'expérience	IPSL		CNRM	
	Simulations prévues (version modèle)	Nbr années	Simulations prévues (version modèle)	Nbr années
Simulation de contrôle	•CO2 imposé (5-BR, 5-MR, 6-BR)	3100	•CO2 imposé	850

pré-industriel	•CO2 calculé (5-BR)			
Historique (1850-2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Simulation forçage (5-BR)</li> <li>•Tous forçage (3 membres)* (5-BR, 5-MR, 6MR)</li> <li>•Chaque forçage (*3) (5-BR)</li> </ul>	3750	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Forc. anthro. (GES + aéro) x10</li> <li>•Forc. anthro (GES seuls) x 5</li> <li>•Forc. naturels + anthro. x 10</li> <li>•Forc. naturels x 5</li> </ul>	4680
Climat futur	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Simulation forçages (5-BP)</li> <li>•Scénario RCP4.5 (*3) (5-BR , 5-MR, 6-MR)</li> <li>•Scénario RCP 8.5 (*3 ) (5-BR, 5-MR, 6-MR )</li> <li>•Scénario RCP2.X (*3) (5-BR , 5-MR)</li> <li>•Scénario RCP 6 (*3) (5-BR , 5-MR)</li> </ul>	3700	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Scén. RCP 4.5 (2006-2300)</li> <li>•Scén. RCP 8.5 (2006-2300)</li> <li>•Scén. RCP 2.6 (2006-2100)</li> <li>•Scén. RCP 8.5 (2006-2100) x 4</li> </ul>	1065
Paleoclimat	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Simulation Holocène (5-BR, 5-MR, 6-MR)</li> <li>•Simulation LGM (5-BR, 5-MR)</li> <li>•Simulation dernier millénaire (5-BR, 5-R)</li> </ul>	6000	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Simulation Holocène</li> <li>•Simulation LGM</li> </ul>	850
Sensibilité climatique et étude des rétroactions	<ul style="list-style-type: none"> <li>•1% CO2/an (5-BR, 5-MR)</li> <li>•RCP4.5 pour cycle du carbone (5-BR)</li> <li>•1%/an jusqu'au quadruplement, 4CO2 brutal (5-BR, 5-MR, 6-MR)</li> </ul>	1200	<ul style="list-style-type: none"> <li>•1% CO2 (-&gt; quadruplement)</li> <li>•4 x CO2 brutal</li> </ul>	290

### Travail prévu en 2013 :

Certaines simulations longues pour le climat glaciaire ou le dernier millénaire doivent être poursuivies.

Le renforcement de l'activité de détection/attribution demande d'augmenter le nombre d'ensembles des simulations et de réaliser les simulations avec les différents forçages pris individuellement.

Les simulations ont été réalisées en imposant les distributions tri-dimensionnelles des aérosols. En lien avec les développements effectués dans la section 4.1 sur le développement des couplages une simulation avec les aérosols entièrement interactifs (IE modèle inca couplé dans LMDZ) sera effectuée, ce qui permettra de tester les hypothèses faites pour réaliser le cœur des simulations CMIP5 et aborder la question du rôle des aérosols dans la variabilité climatique.

#### **1.2 Les simulations court terme**

Les équipes françaises se sont également impliquées dans les simulations à l'échelle décennales de l'exercice CMIP5. Cette nouvelle thématique à la jonction de la prévision saisonnière et les projections climatique met l'accent sur les questions de prévisibilité et de l'initialisation des composantes lentes du système climatique. Ces simulations ont été réalisées avec les mêmes versions de modèles que celles utilisées pour les simulations centennales. Le travail s'est effectué dans le projet GIC EPIDOM (<http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/fr/projet/epidom-evaluation-de-la-previsibilite-interannuelle-decennale-partir-des-observations-et-de>) et s'étend and le projet européen SPECS. La première partie de cet exercice a consisté à mettre en place des simulations dites

initialisées, c'est à dire ou une partie des observations récentes sont injectées aux simulations dites historiques (avec uniquement un forçage externe prescrit). Dans cette optique, l'IPSL comme le CERFACS ont opté pour des techniques de guidages des simulations, c'est à dire qu'un terme de rappel est ajouté aux équations de conservations. Ce guidage n'est effectué que dans l'océan, qui est considéré comme la mémoire du système climatique et qui a priori contient le plus d'influence sur la trajectoire à court terme du système climatique. L'IPSL a choisi de rappeler ses simulations initialisées à des anomalies de SST, tandis que le CERFACS a fait le choix de rappeler à des champs complets de température et salinité issue d'une ré-analyse océanique. Ces simulations initialisées couvraient les 60 dernières années.

Des « lâchés » d'ensemble de simulations dites « hindcast » ont ensuite été effectués tous les 5 ans entre 1960 et 2005. Ces simulations ne considèrent que le forçage externe (rayonnement solaire, gaz à effet de serre, aérosols...) et plus de terme de rappel. Elles sont censées avoir des conditions initiales plus en accord avec les observations, ce qui doit leur conférer une meilleure prévisibilité à quelques années que les simulations non-initialisées. L'analyse des performances de ces expériences de hindcast en comparaison aux observations récentes, montre que c'est effectivement le cas, particulière et que les résultats les plus probants sont obtenus pour l'océan Atlantique Nord, siège d'une circulation océanique à grande échelle ayant une forte inertie. Ces premières simulations ont aussi permis de mettre en évidence des difficultés méthodologiques tant scientifique que technique et le caractère encore très expérimental de ce type de simulations.

### Travail prévu en 2013

Les prochaines étapes doivent permettre d'améliorer la robustesse statistique des résultats en considérant plus de dates de démarrage. Le nombre de membres de chaque ensemble est un paramètre important pour bien évaluer l'incertitude. De nouvelles simulations seront donc réalisées pour progresser sur ces points. Enfin une estimation de la sensibilité des résultats à la résolution du modèle de climat (avec notamment la prise en compte de la stratosphère) aux techniques d'initialisation est prévue. Dans le cadre de MISSTERRE les retombées sur les développements des modèles et l'infrastructure de modélisation seront discutés.

### **1.3 Les simulations régionales**

Le projet CORDEX a récemment été lancé par le WCRP ([http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RC\\_CordexActivities.html](http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RC_CordexActivities.html)) à partir du constat la descente d'échelle, utilisant des modèles ou des méthodes statistiques, étaient de plus en plus utilisées pour affiner les résultats des projections globales et produire des informations climatiques à une échelle pertinente pour de nombreuses études d'impact. Il s'appuie sur l'expertise acquise dans les phases successives des projets globaux (AMIP pour l'atmosphère et CMIP pour les modèles couplés), ou sur certaines régions comme l'Europe dans le cadre de projets européens comme PRUDENCE et ENSEMBLES. Il donne en particulier un cadre permettant de comparer les simulations régionalisées et doit ainsi permettre une meilleure évaluation de la capacité de la descente d'échelle dynamique (utilisant des modèles régionaux ou ayant une capacité de zoom) à produire des informations climatiques pertinentes aux échelles régionales et améliorer de quantifier les incertitudes provenant des différentes méthodologies ou modèles utilisées. Ce projet représente une opportunité pour les équipes françaises impliquées dans cette thématique et dans différents projets d'impact de renforcer les synergies et effort à ces échelles. Par rapport à la proposition initiale, les régions Europe, méditerranée, Afrique et Amérique du sud et du nord de CORDEX sont considérées. La France est aussi incluse, car

plus directement liées au besoin de simulations à haute résolution sur la France entrant dans le cadre du projet DRIAS (cf section 2.2) et devant bénéficier d'une coordination entre les acteurs français. Pour le moment le gros de l'effort a porté sur les simulations du climat actuel forcées ou rappelées sur les re-analyses ERA-interim, permettant d'évaluer les résultats des modèles régionaux aux observations. Les projections climatiques sont en cours et se poursuivront l'an prochain suite au glissement de calendrier lié à la disponibilité des simulations globales dont les résultats entrent comme conditions aux limites ou conditions aux frontières dans les simulations régionales.

REGION	MODELE REGIONAL	Résolution	GCM forcing	Evaluation 1989-2008	Control period 1951-2005	Scenario 2006-2100	Status	Groupe
EUROPE	WRF	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL+INERIS
EUROPE	WRF	50km	IPSL-CM5MR-1				Terminé 1971-2005	IPSL+INERIS
EUROPE	WRF	50km	IPSL-CM5MR-1			RCP4.5	Terminé	IPSL+INERIS
EUROPE	WRF					RCP8.5	En cours 2006-2060 actuellement	IPSL+INERIS
EUROPE	WRF	12km	ERA-Interim				Terminé	IPSL+INERIS
EUROPE	WRF	12km	IPSL-CM5AMR-1				Terminé 1971-2005	IPSL+INERIS
EUROPE	WRF	12km	IPSL-CM5AMR-1			RCP4.5	En cours 2006-2060 actuellement	IPSL+INERIS
EUROPE	ARPEGE-Climat	50km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
EUROPE	ARPEGE-Climat	12km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	WRF	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
MEDITERRANEE	WRF	20km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
MEDITERRANEE	WRF-NEMO	20km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
MEDITERRANEE	WRF	20km	IPSL-CM5AMR-1				Terminé 1989-2005	IPSL
MEDITERRANEE	WRF	20km	IPSL-CM5AMR-1				En cours fin prévue mars 2013	IPSL
MEDITERRANEE	LMDZ	35km	ERA-Interim				Terminé 30 ans	IPSL
MEDITERRANEE	LMDZ	35km	IPSL-CM5AMR-1				Terminé	IPSL
MEDITERRANEE	LMDZ	35km	IPSL-CM5AMR-1			RCP4.5	Terminé	IPSL
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	50km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	50km	CNRM-CM5				Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	50km	CNRM-CM5			RCP4.5	Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	50km	CNRM-CM5			RCP8.5	Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	12km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	12km	CNRM-CM5				Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	12km	CNRM-CM5			RCP4.5	Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat	12km	CNRM-CM5			RCP8.5	Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat couplé ocean hydro land	50km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
MEDITERRANEE	ALADIN-Climat couplé ocean hydro land	50km	ARPEGE				En test	CNRM
AFRIQUE	WRF avec nudging	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
AFRIQUE	WRF sans nudging	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
AFRIQUE	WRF	50km	IPSL-CM5AMR-1				1970-2005 En cours	IPSL
AFRIQUE	ALADIN-Climat	50km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
AFRIQUE	ALADIN-Climat	50km	CNRM-CM5				Terminé	CNRM
AFRIQUE	ALADIN-Climat	50km	CNRM-CM5			RCP4.5	Terminé	CNRM
AFRIQUE	ALADIN-Climat	50km	CNRM-CM5			RCP8.5	Terminé	CNRM
AFRIQUE	LMDZ	50km	LMDZ				Terminé	IPSL
AMERIQUE SUD	WRF	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
AMERIQUE SUD	LMDZ	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
AMERIQUE SUD	LMDZ	50km	IPSL-CM5ALR-2				Terminé	IPSL
AMERIQUE SUD	LMDZ	50km	IPSL-CM5ALR-2			RCP4.5	Terminé	IPSL
AMERIQUE SUD	LMDZ	50km	ERA-Interim				Terminé	IPSL
AMERIQUE NORD	ALADIN-Climat	50km	ERA-Interim				Terminé	CNRM
FRANCE	ALADIN-Climat	12km	ERA-Interim					CNRM
FRANCE	ALADIN-Climat	12km	ARPEGE-Climat			RCP2.6	Terminé	CNRM
FRANCE	ALADIN-Climat	12km	ARPEGE-Climat			RCP4.5	Terminé	CNRM
FRANCE	ALADIN-Climat	12km	ARPEGE-Climat			RCP8.5	Terminé	CNRM
FRANCE	LMDZ	35km	IPSL-CM5ALR-2				Terminé	IPSL
FRANCE	LMDZ	35km	IPSL-CM5ALR-2			RCP4.5	Terminé	IPSL
FRANCE	LMDZ	35km	IPSL-CM5ALR-2			RCP8.5	Terminé	IPSL

Tableau 2 : Simulations régionales réalisées dans le cadre du projet international CORDEX.

Travail prévu en 2013



En 2013 les simulations prévues seront poursuivies. Cela concerne en particulier la réalisation de scénarios régionalisés couvrant des territoires français d'outremer (Réunion et Polynésie) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, avec ALADIN-Climat à 12km de résolution. La réunion MISSTERRE-CORDEX prévue fin novembre 2012 permettra d'affiner les projets d'analyses de ces simulations. Les questions devant être abordées en commun entre les différents exercices de modélisation et la forme à donner à la coordination de cette activité régionale feront également partie des sujets abordés l'an prochain.

#### **1.4 Diffusion dans la base de données distribuée CMIP5**

La taille de l'exercice CMIP5, l'augmentation de la complexité de modèles (nombre de composantes) et l'augmentation de la résolution et le nombre de variables à distribuer a conduit une refonte complète du mode de diffusion des résultats de CMIP5 pour les analyses scientifiques par la communauté internationale. Le choix s'est porté par une distribution via une base de données distribuée (Earth System Grid). Plusieurs actions ont été lancées au travers du projet GIS-climat environnement et du projet IS-ENES et des interactions entre IPSL et CNRM pour implémenter des nœuds de distribution de données sur les sites. L'IPSL a également été actif pour tester les systèmes (en lien avec le PCMDI, US) et produire des outils permettant de faciliter l'accès et le rapatriement des données par les utilisateurs. Le projet européen Metafor (<http://metafortrac.badc.rl.ac.uk/trac/wiki/WikiStart>) a aussi permis de définir les métadonnées nécessaires pour caractériser les données suivant les variables considérées, les simulations et modèles utilisés et a donné un cadre pour la documentation des modèles. Les différentes étapes permettant de rendre ce service de distribution à la communauté sont extrêmement lourdes pour les groupes de modélisation et la réflexion sur la reconnaissance et l'organisation de ce type de service permettant de pérenniser l'accès aux données reste d'actualité.

Afin de faciliter les tâches d'analyse l'IPSL s'est également doté d'un système incluant en un même site des facilités de calcul pour les analyses, d'accès aux résultats des modèles et d'accès aux observations. L'organisation autour des résultats des modèles et des analyses multi-modèles permet d'éviter la duplication de copies des données des autres modèles par les chercheurs individuels et d'augmenter les synergies d'analyse.

#### Travail prévu pour 2013

En 2013 les simulations complémentaires seront introduites dans la base de données. Le travail de correction et de vérification des fichiers sera poursuivi, ainsi que l'amélioration du système mis en place. Une réflexion sur la distribution des données doit être poursuivie en lien avec la notion de service climatique abordée dans la section 2.2.

## **2 Evaluation, Analyse et utilisation des résultats**

### **2.1 Projet ESCRIME et évaluation des modèles**

L'exercice CMIP5 génère une forte activité scientifique autour des résultats des simulations, activité en partie coordonnée par les programmes et projets internationaux.

Nous avons légèrement modifié le plan de travail par rapport à la proposition initiale en regroupant sous la bannière ESCRIME l'ensemble des analyses prévues dans les sections 3.1 et 3.2 du projet initial (cf annexe).

Une première phase d'analyse a concerné directement nos simulations. Les analyses multi-modèles des simulations CMIP5 a démarré tardivement suite au glissement de calendrier et l'arrivée tardive de nombreuses simulations dans la base de données. Une réunion de 2 jours

organisée en visio-conférence entre Jussieu, Météo-France et Grenoble les 22 et 23 juin 2011 a permis de faire un premier point sur les résultats (<http://icmc.ipsl.fr/news/old-news/old-icmc-meetings/154-20090512-13-missterre-meeting>). La prochaine réunion pour discuter les résultats est prévue en novembre 2012.

A la fois pour mieux faire connaître à la communauté internationale les modèles du Système Terre développé par l'IPSL et le CNRM, et encourager l'analyse par notre communauté des simulations CMIP5 de ces deux modèles, nous avons proposé et organisé (pour la première fois) un Numéro Spécial du journal *Climate Dynamics*. Les articles soumis / acceptés pour publication dans ce numéro (listés ci-dessous) concernent la description des différentes composantes des modèles et leur évaluation, la présentation des différents forçages utilisés pour les expériences de changement climatique, et l'analyse du climat (variabilité, sensibilité, aspects régionaux) simulé par ces modèles. Beaucoup de ces articles ont été publiés à temps pour pouvoir être cités dans les premiers papiers d'inter-comparaison de modèles CMIP5, et par le « second order draft » du 5ème rapport du GIEC. Ils sont classés ci-dessous par thématique, montrant la diversité des questions abordées à partir des simulations CMIP5.

#### **Articles acceptés :**

##### **Model description and basic evaluation :**

- Voldoire A., E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Mélia, B. Decharme, C. Cassou, S.Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déqué, J. Deshayes, H. Douville, E. Fernandez, G. Madec, E. Maisonnave, M.-P. Moine, S. Planton, D.Saint-Martin, S. Szopa, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L.Coquart, F. Chauvin: The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation
- Hourdin F., J-Y Grandpeix, C. Rio, S. Bony, A. Jam, F. Cheruy, N. Rochetin, L. Fairhead, A. Idelkadi, I. Musat, J-L Dufresne, M-P. Lefebvre, A. Lahellec, R. Roehrig : LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection
- Hourdin F., M-A Foujols, F. Codron, V. Guemas, J-L Dufresne, S. Bony, S. Denvil, L.Guez, F. Lott, J. Ghattas, P. Braconnot, O. Marti, Y. Meurdesoif, L. Bopp : Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model
- Szopa S. A. Cozic, M. Shulz, Y. Balkanski, D. Hauglustaine. al. Aerosol and Ozone changes as forcing for Climate Evolution between 1850 and 2100
- Cheruy F., A. Campoy, J-C Dupont, A. Ducharme, F. Hourdin, M. Haeffelin, M. Chiriaco, A. Idelkadi, Combined influence of atmospheric physics and soil hydrology on the simulated meteorology at the SIRTa atmospheric observatory

##### **Climate variability and dynamical studies :**

- Duvel, J. P., H. Bellenger, G. Bellon and M. Remaud: An event-by-event assessment of tropical intraseasonal perturbations for general circulation models
- Gastineau, G., F. D'Andrea, C. Frankignoul : Atmospheric response to the North Atlantic Ocean variability on seasonal to decadal time scales
- P. Maury, F. Lott, L. Guez, and J-P. Duvel: Tropical variability and stratospheric equatorial waves in the IPSLCM5 model
- Escudier R., Mignot J. and Swingedouw D. : A 20-yr coupled ocean-sea ice-atmosphere variability mode in the North Atlantic in an AOGCM
- B. Oueslati and G. Bellon : Tropical precipitation regimes and mechanisms of regime transitions: contrasting two aquaplanet general circulation models
- Swingedouw D., Mignot J., Labetoule S., Guilyardi E., Madec G. : Initialisation and predictability of



the AMOC over the last 50 years in a climate model

- Persechino A., Mignot J., Swingedouw D., Labetoulle, S. and Guilyardi E. : Decadal predictability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Climate in the IPSLCM5A-LR model

#### **Analysis of the climate response to external forcings (anthropogenic, paleo, volcanic..) :**

- Briert F and S Bony : Interpretation of the positive low-cloud feedback predicted by a climate model under global warming
- Cattiaux, J., H. Douville, A. Ribes, F. Chauvin, and C. Plante (2012), Towards a better understanding of changes in wintertime cold extremes over Europe: A pilot study with CNRM-CM5 and IPSL-CM5 atmospheric models, *Climate Dynamics*, published online. doi:[10.1007/s00382-012-1436-7](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1436-7).

#### **Regional studies :**

- Menut L., O.P.Tripathi, A.Colette, R.Vautard, E.Flaounas, B.Bessagnet, Evaluation of regional climate simulations for air quality modelling purposes

#### **Earth-System interactions (chemistry, bio-geochemistry) :**

- Séférian R., L. Bopp, M. Gehlen, J. Orr, C. Éthé, P. Cadule, O. Aumont, D. Salas-y-Méllia, A. Voltaire, G. Madec, Skill Assessment of Three Earth System Models with Common Marine Biogeochemistry
- Guenet B, Cadule P, Zaehle S., Piao S., Peylin P., Maignan F., Ciais P., Friedlingstein P., Does the integration of dynamic nitrogen cycle in terrestrial biosphere model improve the long-term trend of the leaf area index?

#### **Articles en révision :**

##### **Model description and basic evaluation :**

- Dufresne, J-L - Foujols, M-A - Denvil, S. - Caubel, A. - Marti, O. - Aumont, O - Balkanski, Y - Bekki, S - Bellenger, H - Benshila, R - Bony, S - Bopp, L - Braconnot, P - Brockmann, P - Cadule, P - Cheruy, F - Codron, F - Cozic, A - Cugnet, D - de Noblet, N - Duvel, J-P - Ethé, C - Fairhead, L - Fichet, T - Flavoni, S - Friedlingstein, P - Grandpeix, J-Y - Guez, L - Guilyardi, E - Hauglustaine, D - Hourdin, F - Idelkadi, A - Ghattas, J - Joussaume, S - Kageyama, M - Krinner, G - Labetoulle, S - Lahellec, A - Lefebvre, M-P - Lefebvre, F - Levy, C - Li, Z. X. - Lloyd, J - Lott, F - Madec, G - Mancip, M - Marchand, M - Masson, S - Meurdesoif, Y - Mignot, J - Musat, I - Parouty, S - Polcher, J - Rio, C - Schulz, M - Swingedouw, D - Szopa, S - Talandier, C - Terray, P - Viovy, N: Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5
- Konsta D., Dufresne J.-L., Chepfer H., Idelkadi A., Cesana G. : Evaluation of clouds simulated by the LMDZ5 GCM using A-train satellite observations (CALIPSO-PARASOL-CERES)
- Rio C., J.-Y. Grandpeix, F. Hourdin, F. Guichard, F. Couvreur, J.-P. Lafore, A. Fridlind, A. Mrowiec, S. Bony, N. Rochetin, R. Roehrig, A. Idelkadi, M.-P. Lefebvre, I. Musat, Control of deep convection by sub-cloud lifting processes: The ALP closure in the LMDZ5B general circulation model

##### **Climate variability and dynamical studies**

- Kamala K., Y. Peings, P. Terray, H. Douville: ENSO-Indian monsoon teleconnection in the CNRM and IPSL historical simulations
- Vial J., Osborn T.J. : Relationship between sudden stratospheric warming and tropospheric blocking as simulated by the multi-century IPSL-CM5A coupled climate model
- Cattiaux J., B. Quesada, A. Arakelian, F. Codron, R. Vautard and P. Yiou, North-Atlantic dynamics and European temperature extremes in the IPSL model: sensitivity to atmospheric resolution.

### Analysis of the climate response to external forcings (anthropogenic, paleo, volcanic..)

- Kageyama M., Braconnot P., Bopp L., Caubel A., Foujols M.-A., Guilyardi E., Khodri M., Lloyd J., Lombard F., Mariotti V., Marti O., Roy T., Woillez M.-N., Mid-Holocene and Last Glacial Maximum climate simulations with the IPSL model: new features with the IPSL\_CM-5A version

### Regional studies

- Flaounas E., Drobinski P., Bastin S., Dynamical downscaling of IPSL-CM5 CMIP5 historical simulations over the Mediterranean: Benefits on the representation of regional cyclogenesis

Au-delà des publications pour ce numéro spécial de climate dynamics, les premiers papiers d'intercomparaison ou d'exploitation des modèles CMIP5 ont été soumis avant juillet 2012, date limite pour que les publications puissent être considérées par les auteurs du prochain rapport du GIEC. Une liste non exhaustive de ces articles figure ci-dessous :

- Arakelian, A., and F. Codron, (2012): Southern Hemisphere Jet Variability in the IPSL GCM at varying Resolutions. *In Press, Journal of Atmospheric Sciences.*
- Cattiaux, J., H. Douville, and Y. Peings, (2012), European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties, *Clim. Dyn.*, soumis
- Cesana, G, J. E. Kay, H. Chepfer, J.M. English, G. de Boe Ubiquitous low-level liquid-containing Arctic clouds: New observations and climate model constraints from CALIPSO GOCCP, GRL, submitted
- Cesana, G. and H. Chepfer : How well do climate models simulate the cloud vertical structure? – a comparison between CALIPSO-GOCCP satellite observations and CMIP5 simulations, GRL, submitted
- Chavaillaz, Y., F. Codron, and M. Kageyama, (2012): Southern westerlies in LGM and future (RCP4.5) climates. *Climate of the Past Discussions*, **8**, 3693–3717, doi:10.5194/cpd-8-3693-2012.
- Douville H., A. Ribes, B. Decharme, R. Alkama, and J. Sheffield, (2012), Anthropogenic influence on multi-decadal changes in reconstructed global evapotranspiration, *Nature Climate Change*, on line, doi 10.1038/NCLIMATE1632.
- Geoffroy O., D. Saint-Martin, D. J. L. Olivié, A. Voldoire, G. Bellon, and S. Tytéca, (2012), Transient climate response in a two-box energy-balance model. Part I : analytical solution and parameter calibration using CMIP5 AOGCM experiments, *J. of Clim.*, soumis.
- Geoffroy O., D. Saint-Martin, G. Bellon, A. Voldoire, D. J. L. Olivié, and S. Tytéca, (2012), Transient climate response in a two-box energy-balance model. Part II : representation of the efficacy of deep-ocean heat uptake and validation for CMIP5 AOGCMs, *J. Climate*, soumis.
- Joetzer E., H. Douville, and C. Delire, (2012), Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3, *Clim. Dyn.*, soumis.
- Nam, C. Nam, S. Bony, J.-L. Dufresne, and H. Chepfer : The too few, too bright tropical low-cloud problem in CMIP5 models, GRL, submitted
- Peings Y., J. Cattiaux, and H. Douville, (2012), Evaluation and response of cold spells over Western Europe in CMIP5 models, *Clim. Dyn.*, soumis.
- Seneviratne S., M. Wilhelm, T. Stanelle, B. van den Hurk, S. Hagemann, A. Berg, F. Cheruy, M. E. Higgins, A. Meier, V. Brovkin, M. Claussen, J-L Dufresne, K. Findell, D M. Lawrence, S. Malyshev, and Ben Smith: Impact of soil moisture-climate feedbacks on CMIP5 projections: First results from the GLACE-CMIP5 experiment (soumis GRL, Juillet 2012)
- Valcke, S. (2012), The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software. *Geosci. Model Dev. Discuss*, **5**, 2139-2178, doi:10.5194/gmdd-5-2139-2012.

- Vial, J, Dufresne, J.-L, and Bony, S : On the interpretation of inter-model spread in CMIP5 climate sensitivity estimates

### *Travail prévu en 2013*

Le travail prévu pour 2013 doit permettre la synthèse et la valorisation des résultats, concernant les différentes thématiques scientifiques abordées par les participants au projet. Cela concerne plus précisément :

- Les analyses multi-modèles
- Le retour d'expertise des projets d'analyse pour identifier les atouts et faiblesse des modèles et les diagnostics à pérenniser
- L'évaluation
- La compréhension des biais systématiques
- Le traitement des incertitudes des projections climatiques.

Deux réunions sont prévues autour de cette activité d'analyse. Un atelier sera également dédié à la question de l'évaluation, des biais systématiques et du traitement des incertitudes. De nombreuses méthodologies (ensembles de simulations, même modèle dans différentes configurations, simulations guidées, ensemble de métriques, diagnostics permettant de comprendre les différences modèles données, simulateurs d'observables) ont vu le jour. Malgré les progrès de modélisation certains biais des modèles restent tenaces et nécessitent la mise en place de force de travail pour mieux les comprendre et améliorer les modèles. Cet atelier permettra de définir quelques priorités de recherches pouvant faire l'objet de futurs projets coordonnés entre les partenaires de MISSTERRE.

## **2.2 Vers la mise en place d'un service de distribution et de pré-traitement des données au niveau national**

Les discussions autour de la notion de service climatique se sont amplifiées dans tous les pays ces dernières années. Nous avons engagé la réflexion au niveau national, ce qui a en particulier débouché sur une note rédigée pour AllEnvi (coord. Philippe Bougeault, Météo-France). Cette notion regroupe de nombreuses réalités. Néanmoins quelle que soit la forme que l'on donne à un service climatique, la diffusion des résultats des simulations globales et régionales de changement climatique, le calcul d'indicateurs climatiques répondant mieux aux besoins des utilisateurs que les variables couramment utilisées par les climatologues et l'accompagnement des utilisateurs dans la jungle des simulations sont déjà des tâches récurrentes effectuées par les groupes de modélisation et qu'il faut pérenniser. La mise en place des portails de diffusion des données concerne plusieurs types d'utilisateurs, recherche (impacts) ou finaux (plus variés). Pour une partie concernant les utilisateurs « recherche » réalisant des études d'impact à partir des simulations CMIP5 ou CORDEX les partenaires MISSTERRE coordonnent le workpackage du projet européen IS-ENES (<https://is.enes.org/the-project/the-workpackages/wp11-jra5-bridging-climate-research-data-and-the-needs-of-the-impact-community>) de mise à disposition des résultats et méthodes. Ce travail s'appuie en particulier sur des études d'impact menées par les partenaires, le déploiement de la base de données distribuée décrite en 1.4, le développement d'une infrastructure dédiée et une réflexion scientifique amont. En parallèle le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr>), plus orienté vers des utilisateurs finaux de données sur la France a été développé au travers d'un projet GICC et ouvert aux utilisateurs en juillet 2012. Il regroupe en particulier les résultats de simulations régionalisées sur la France. Les résultats des simulations sont d'ores et déjà accessibles non seulement au travers des portails

principaux d'accès de l'infrastructure internationale de l' « Earth System Grid » (ESG) mais aussi sur des sites nationaux dédiés ( <https://prodiguer.ipsl.fr> pour l'IPSL et <http://esg.cnrm-game-meteo.fr/thredds/catalog.html> pour le CNRM).

En parallèle le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr>), plus orienté vers des utilisateurs finaux de données de scénarios climatiques sur la France, notamment concernés par les études d'adaptation au changement climatique, a été développé au travers d'un projet GICC et ouvert aux utilisateurs en juillet 2012. Il regroupe en particulier les résultats de simulations régionalisées à plus forte résolution sur la France (jusqu'à 12km) mais basées à ce stade sur des scénarios SRES.

### *Travail prévu en 2013.*

Le déploiement des portails et la diffusion des simulations posent de nombreuses questions concernant la capacité de modèles à représenter les phénomènes de petite échelle et en particuliers les événements extrêmes, la façon de corriger les principaux biais des simulations pour aborder les questions de vulnérabilité et le traitement des multiples sources d'incertitudes. Ces différents points sont directement liés aux activités scientifiques de MISSTERRE et feront l'objet en 2013 de l'élaboration d'un document identifiant les travaux scientifiques amont et les nouvelles questions alimentant l'expertise scientifique indispensable à la diffusion des connaissances sur ces portails de diffusion de données et méthodes.

### **3 Prochaines générations de modèles**

Cet axe du projet est actuellement traité sous forme de forum de discussion pour le démarrage de nouvelles initiatives communes, la préparation des modèles de la prochaine génération et les liens avec le calcul intensif. C'est ainsi par exemple que le projet DEPHY, maintenant projet à part entière de LEFE, avait émergé de la première phase du projet MISSTERRE (2006-2009) ou que les discussions engagées sur l'avenir des cœurs dynamiques a débouché sur le développement d'une version de cœur dynamique atmosphérique en grille icosaédrique, dans le cadre du projet G8 ICOMEX. La coordination assurée par MISSTERRE permet aussi de regrouper les efforts des équipes françaises vis-à-vis de leur implication dans les projets européens et en particulier dans le projet d'infrastructure IS-ENES (coordination S. Joussaume) dont la phase 2 est en cours de négociation.

Les avancées réalisées pour les parties 4.1, 4.2 et 4.3 ont ainsi principalement fait l'objet d'autres projets et nous ne listons ci-dessous que quelques points majeurs qui serviront de base aux réflexions du projet MISSTERRE en 2013.

Les nouveaux développements des paramétrisations physiques des modèles d'atmosphère sont effectués dans le projet DEPHY et les ajustements des modèles de climats se font en concertation entre ces deux projets. Les développements de nouveaux couplages concernant les surfaces englacées (glace de mer, calotte et pergélisol) et des cycles (carbone, cycle de l'azote, méthane) ont démarrés dans le projet européen COMBINE. Le travail actuellement a principalement concerné le développement des composantes individuelles. La lourdeur de l'exercice CMIP5 a aussi retardé l'implémentation et les tests des nouvelles composantes dans les modèles couplés. Une attention croissante est portée sur le couplage avec la calotte pour mieux traiter les liens entre la fonte de la calotte, le niveau marin et la circulation thermohaline. Un groupe de travail regroupant des chercheurs de l'IPSL, du LGGE et du CNRM s'est mis en place pour traiter le couplage entre des modèles de climat de l'IPSL et du CNRM avec les modèles de calotte développés au LGGE (GRISLI et GREMLIN). Les développements aux niveaux des cycles biogéochimiques doivent permettre du côté du CNRM d'avoir un modèle avec cycle du carbone interactif et du côté de l'IPSL la

représentation interactive des cycles de l'azote et du méthane. Une représentation entièrement interactive des aérosols est maintenant disponible pour le modèle de l'IPSL.

La résolution est le calcul massivement parallèle sont aussi des aspects qui conditionnent l'évolution des modèles. Le Grand Challenge de 2010 au CINES a permis de faire tourner une version très haute résolution du modèle couplé de l'IPSL: atmosphère au  $1/3^\circ$  et océan au  $1/4^\circ$ . La scalabilité du modèle sur plusieurs milliers de processeurs a ainsi été démontrée. Deux problèmes ont été levés, et on fait l'objet de travaux spécifiques. I) Les pluies montrent une structure point de grille très marquée, révélant que la paramétrisation de la convection n'est pas bien adaptée à ces échelles. Un travail est en cours pour améliorer ce point. Ii) Les outils d'interpolations pour préparer les états initiaux et les conditions limites sont inadaptés à ces résolutions. Dans le cadre du projet G8 ICOMEX, un ingénieur a été embauché pour travailler sur des algorithmes d'interpolation performants, qui seront adaptés aux grilles anciennes comme aux nouvelles grilles icosaédriques.

La bibliothèque d'entrées/sorties XMLIO Server version 0 a été mise en service dans NEMO, composante océanique des deux modèles français. Une version 1, appelée désormais XIOS, a été développée grâce au financement IS-ENES. Cette bibliothèque d'entrée sortie simplifie la configuration des simulations via des fichiers XML. Ses performances en écriture parallèle sont aujourd'hui excellentes, et nous autorisent l'utilisation de plusieurs milliers de processeurs avec le modèle couplé. Son déploiement dans les composantes du modèle couplé va débuter fin 2012.

Une première version de cœur dynamique atmosphérique en grille icosaédrique a été développée et testée en version 2D (écoulement de Saint-Venant) puis en 3D, dans le cadre du projet G8 ICOMEX.

#### Travail prévu pour 2013.

La difficulté de mise au point d'une version du modèle climatique au niveau de l'état de l'art et la lourdeur des exercices de simulation de type CMIP obligent à démarrer dès maintenant les travaux de préparation de ce qui devrait être les prochaines versions des modèles de référence. Une synthèse des avancées listées ci-dessus permettra d'établir pour chaque modèle les versions de référence permettant d'aborder les nouvelles questions scientifiques autour du changement climatique. De même un effort important est en cours pour aborder des simulations à très haute résolution (simulations frontières) qui lèvent outre des questions de résolution, des questions sur le contenu des modèles, l'optimisation des codes et des coupages, et l'infrastructure de modélisation nécessaire pour gérer les simulations, stocker les données et exploiter les résultats. Au travers de réunions de travail, le projet MISSTERRE permettra :

- D'établir un plan de marche pour le développement des prochaines versions de référence en identifiant les parties qui bénéficieront d'un travail conjoint entre les partenaires du projet
- De recenser les grands défis scientifiques susceptibles de bénéficier des moyens de calcul PRACE (calcul haute performance européen, <http://www.prace-project.eu/?lang=en>)

### Résultats attendus

Valorisation de la participation française aux exercices CMIP5 et CORDEX (coordination nationale, projets d'analyses, publications)

Préparation de l'évolution des modèles climatiques française

### Ressources nécessaires à la réalisation du projet

**ATTENTION A CE QUE LES RESSOURCES DETAILLEES DANS CETTE RUBRIQUE SOIENT COHERENTES AVEC LES TABLEAUX REMPLIS SUR LE FORMULAIRE INFORMATIQUE**

- ♦ Equipements disponibles ou nécessaires à la réalisation du projet
- ♦ Instruments, équipements ou services d'observation nationaux sollicités  
Moyens de calcul nationaux

Budget détaillé (cf tableau inséré par commodité à la fin du document)

Note : Le budget ne concerne que la partie MISSTERRE permettant la coordination nationale, la valorisation des travaux effectués dans le projet et non couverts par les autres projets liés (européens), la pression sur la distribution des données, qui conditionne le travail de nombreuses personnes au-delà de MISSTERRE et le besoin d'espaces de travail ou d'actions collaboratives entre les partenaires du projet.

### Co-financements acquis ou soumis (hors INSU)

*Les différents projets permettant de mener à bien les actions de modélisation en lien avec les projets internationaux sont listés dans le cœur du document. Il s'agit principalement :*

- Du projet d'infrastructure IS-ENES
- Des projets européens COMBINE, EUCLIPSE, EMBRACE, CICLE)
- Des projets GICC EPIDOM, DRIAS

### Valorisation des travaux antérieurs

Références bibliographiques : Il n'a pas été possible de produire la liste complète des simulations se rapportant à MISSTERRE représentative de l'ensemble de l'activité. Nous avons donc privilégié de focaliser sur celles de l'issue spéciale est les publications récemment soumises listées dans le corps du document. La mise à jour des références est prévue pour 2013 et donnera lieu comme en 2009 à une bibliographie classée par thème représentant l'activité de modélisation, simulation et analyses des changements climatiques accompagnant le rapport final.

Liste des contrats obtenus au cours des quatre dernières années :

- titre du projet / programme / année / crédits obtenus / résumés des principaux résultats / liste des publications / base de données et accès

### Compléments

*Il appartiendra aux demandeurs de donner ici tout complément d'information utile à l'évaluation du projet, notamment l'analyse des risques associés au projet.*



## Détail du budget

Budget IPSL (inclue également LGGE et UCL) et coordination	prestation	nbre	prix unit voyage	prix unit prestation	total voyage unité	total local unité	sous total	total
<b>Missions</b>								
<i>Coordination</i>								
reunion du projet (environ 60 participants)	salle, pauses et repas, voyage pour 10 personnes entre Paris et Toulouse)	1,00	300,00	20,00	3000,00	1200,00	4200,00	
préparation issues spéciales et documents	mission Paris Toulouse pour 4 personnes	2,00	300,00	60,00	1200,00	240,00	2880,00	
atelier preparation poursuite de l'activité et projets 2013	frais journée pour 60 personnes, voyage pour 4 personnes	1,00	300,00	20,00	3000,00	1200,00	4200,00	
TOTAL MISSIONS (coordination)								11280,00
<i>IPSL</i>								
réunions sur thématiques spécifiques	missions pour 3 personnes	2,00	300,00	60,00	900,00	180,00	2160,00	
Frais de déplacement pour nos collègues de Louvain	mission 1 journée	3,00	200,00	60,00	200,00	60,00	780,00	
Frais de déplacement pour nos collègues de Grenoble	mission 1 journée	2,00	200,00	60,00	200,00	60,00	520,00	
Participation EGU	1 semaine EGU pour 3 personnes	3,00	1500,00		1500,00		4500,00	
participation colloques internationaux	1 semaine déplacement pour 2 personnes	2,00	2000,00		2000,00		4000,00	
TOTAL MISSIONS IPSL								11960,00
<b>Fonctionnement</b>								
<i>coordination</i>								
publication : synthèse avec large diffusion		1,00	6000,00				6000,00	
<i>IPSL</i>								
contribution à la redondance des machines physiques servant à indexer et à distribuer les données CMIP5: achat de disque (4KE), et d'une licence VMWare (1kE/an)		1,00	5000,00				5000,00	
stagiaires M2		1,00	2000,00				2000,00	
publication : synthèse avec large diffusion en français		1,00	3000,00				3000,00	
TOTAL FONCTIONNEMENT								16000,00
TOTAL IPSL + coordination								39240,00
<b>budget CNRM</b>								
<i>Mission</i>								
réunion sur thématique spécifiques		1,00	1080,00				1080,00	
Participation EGU		1,00	1500,00				1500,00	
Colloques ou ateliers internationaux		1,00	2000,00				2000,00	
TOTAL MISSION CNRM								4580,00
<i>petit matériel</i>								
serveur de fichier et une baie de 13To		1,00	7000,00				7000,00	
TOTAL PETIT MATERIEL CNRM								7000,00
<i>fonctionnement</i>								
stage M1 ou M2 (1 par an)		1,00	2500,00				2500,00	
TOTAL FONCTIONNEMENT CNRM								2500,00
TOTAL CNRM								14080,00
<b>budget CERFACS</b>								
<i>Missions</i>								
participation EGU		1,00	1500,00				1500,00	
participation ateliers ou colloques internationaux		1,00	2000,00				2000,00	
TOTAL MISSIONS CERFACS								3500,00
<i>fonctionnement</i>								
publications (2 par an)		1,00	1500,00				1500,00	
stagiaire M1 ou M2 (1 par an)								1500,00
TOTAL FONCTIONNEMENT CERFACS								1500,00
TOTAL CERFACS								5000,00
<b>COUT TOTAL PROJET POUR 2013</b>					<b>total général</b>		<b>58320,00</b>	
<b>financement déjà obtenu pour 2013</b>							<b>16000,00</b>	
<b>TOTAL demandé</b>							<b>42320,00</b>	

# Liste des Participants MISSTERRE pour 2013

		Simulations GIEC: long terme		Simulations GIEC: court terme		Simulations GIEC: régional	Diffusion des données : CMIP5	Evaluation et projets analyses scientifiques	Evaluation et projet analyses : des modèles	Diffusion des données : vers un service	Prochains paramètres	Prochains modèles : nouveaux couplages	Prochains modèles : nouvelles plateformes	Prochains modèles : Simulations frontalières	temps : < 10%	temps : environ 25%	temps : environ 50%	temps : environ 75%	temps : > 90%
		OK		OK															
Christophe Cassou (SUC CNRS/CERFACS)	CERFACS	OK		OK				OK	OK							OK			
Julien Boé (SUC CNRS/CERFACS)	CERFACS					OK		OK	OK									OK	
Eric Maisonnave, IR CERFACS	CERFACS											OK	OK						OK
Laurent Terray DR CERFACS	CERFACS	OK		OK				OK	OK									OK	
Sophie Valcke IR CERFACS	CERFACS	OK		OK						OK			OK					OK	
Elodie Fernandez IR SUC CNRS/CERFACS	CERFACS	OK		OK			OK	OK		OK									OK
Emilia Sanchez CR CERFACS	CERFACS			OK				OK											
Agathe Germe (Postdoc COMBINE)	CNRM			OK															
Annie Rascol (CNRM-GAME, TS)	CNRM			OK			OK			OK									
Antoinette Alias (CNRM-GAME, IT)	CNRM			OK									OK						
Aurélien Ribes (CNRM)	CNRM			OK				OK	OK										OK
Aurore Voldoire	CNRM			OK				OK	OK			(OK)	OK						OK
Catherine Rio	CNRM			OK															
Christine Delire (GAME-CNRM, CR, CNRS)	CNRM								OK			OK	OK						OK
David Saint-Martin	CNRM											(OK)	OK						OK
David Salas y Méliá (CNRM-GAME, IPC)	CNRM			OK			OK	OK	OK	OK		OK	OK	(OK)	(OK)				OK
Eric Brun (CNRM-GAME, IPC)	CNRM			OK				OK	OK										OK
Fabrice Chauvin	CNRM			OK				OK	OK										OK
Florence Sevaut (CNRM-GAME, IT)	CNRM					OK													OK
Gilles Bellon (CNRM, CR CNRS)	CNRM							(OK)	OK										OK
Hervé Douville	CNRM			OK				OK	OK										OK
Hubert Teyssedre (CNRM/CAIAC)	CNRM											(OK)	OK	(OK)					OK
Isabelle Beau (CNRM, IPC)	CNRM											OK							OK
Jacques Richon (CNRM-GAME, IT)	CNRM						OK												OK
Jean-François Guérémy (CNRM-GAME, IPC)	CNRM											OK							OK
Pierre Nabat (CNRM-GAME, IT)	CNRM					OK													OK
Martine Michou (CNRM/CAIAC)	CNRM												(OK)	(OK)					OK
Matthieu Chevallier (Thèse)	CNRM											OK							OK
Michel Déjeu	CNRM					OK													OK
Mikhal Geyer (Postdoc ANR/NEEM-CECILE)	CNRM								OK										OK
r Geoffroy (Postdoc FP7/COMBINE-EUCLIPSE)	CNRM																		OK
Clotilde Dubois (CNRM-GAME)	CNRM			OK															OK
Post-doc EUCLIPSE (CNRM-GAME)	CNRM			OK															OK
Post-doc EMBRACE (CNRM-GAME)	CNRM			OK															OK
ma (Postdoc FP7/COMBINE-ANR/CASSIOPE)	CNRM			OK															OK
Roland Séférian (Thèse MF/LSCE)	CNRM/LSCE	OK		OK				OK	OK			OK	OK						OK
Samuel Somot (CNRM/EAC)	CNRM					OK	OK	OK	OK	OK									OK
Silvana Buarque-Giordani (CNRM-GAME, IT)	CNRM												OK						OK
Sophie Tyteca (CNRM-GAME, TS)	CNRM			OK						OK									OK
Stéphane Sériani (CNRM-GAME, TS)	CNRM			OK															OK
Bertrand Decharme (GAME-CNRM, CR CNRS)	GAME-CNRM											OK	(OK)	OK	(OK)				OK
Serge Planton (MF, IGPC)	IGPC							OK	OK	OK									OK
Ashish Bhardwaj (IPSL, IE, CNRS)	IPSL							OK	OK	OK									OK
Christian Ethé (IPSL, IR, CNRS)	IPSL			OK				OK											OK
Josephine Chittas (IPSL, IR, CNRS)	IPSL							(OK)	(OK)				OK	OK					OK
Marie-Alice Foujols (IPSL, IR, CNRS)	IPSL			(OK)		(OK)							(OK)	(OK)	OK				OK
Mark Morgan (IPSL, IE, CNRS)	IPSL					OK				OK									OK
Sonia Labetoulle (IPSL, IE, CNRS)	IPSL																		OK
Patricia Cadule (IPSL, IE, CNRS)	IPSL							OK	OK			(OK)	OK						OK
Sébastien Denvil (IPSL, IR, CNRS)	IPSL			(OK)		(OK)		OK	OK				OK	OK					OK
Jérôme Raciak (IPSL, IE, CNRS)	IPSL							OK	OK										OK
Jérôme Raciak (IPSL, IE, CNRS)	IPSL							OK	OK										OK
Gerhard Kinner (LGGE)	LGGE					OK				(OK)	OK								OK
Hubert Gallée	LGGE																		OK
Isabelle Gouttevin (LGGE)	LGGE																		OK
Sushi Peng (LGGE/LSCE)	LGGE/LSCE																		OK
Tao Wang	LGGE/LSCE																		OK
Alain Lahellec (LMD, IR CNRS)	LMD							OK											OK
Camille Risi (CR CNRS LMD)	LMD							(OK)											OK
Jessica Vial (Post-doc, LMD)	LMD							OK											OK
Post-doc	LMD							OK											OK
François Codron	LMD					(OK)	(OK)	OK	(OK)			(OK)	(OK)						OK
Fridéric Hourdin (LMD, CNRS)	LMD					OK		(OK)	(OK)			OK	(OK)						OK
Fredérique CHERRY	LMD							OK	OK										OK
Hélène Chapfer (LMD, MC UPMC)	LMD							OK	OK										OK
Ionela Musat (LMD, IE, CNRS)	LMD			OK			(OK)	(OK)	OK						(OK)				OK
Jean-Louis Dufresne (LMD, DR CNRS)	LMD			OK				OK	OK										OK
Jean-Yves Grandpeix (LMD, CNRS)	LMD																		OK
Laurent Fairhead (LMD, IR, CNRS)	LMD			(OK)			OK			OK				(OK)	(OK)				OK
Laurent Li	LMD					OK		OK	OK										OK
MP Lefebvre (LMD/CNRM)	LMD																		OK
Nicolas Rochetin (Doctorant LMD)	LMD																		OK
Olivier Boucher (LMD, DR CNRS)	LMD							OK	OK										OK
Sandrine Bony (LMD, DR CNRS)	LMD							OK	OK										OK
Claire Levy LOCEAN, IR CNRS	LOCEAN					(OK)													OK
Eric Guilyardi (LOCEAN, DR CNRS)	LOCEAN						(OK)	OK	OK				(OK)	(OK)	OK				OK
Jérôme Vialard (LOCEAN, CR IRD)	LOCEAN							OK	OK										OK
Juliette Mignot (Locean, CR IRD)	LOCEAN							OK	OK										OK
Sulagna Ray (LOCEAN, post Doc EPIDOM)	LOCEAN							OK	OK										OK
Post Doc SPEOS to be hired	LOCEAN							OK	OK										OK
Pascal Terray	LOCEAN																		OK
Rachid Benshila (LOCEAN, IR CNRS)	LOCEAN																		OK
bastien Masson (LOCEAN-IPSL, Phy Adj., UVSQ)	LOCEAN																		OK
Simona Flavoni (LOCEAN, IE, CNRS)	LOCEAN																		OK
Anne Coze (LSCE, IR, CEA)	LSCE																		OK
Arnaud Carbel (LSCE, IR, CEA)	LSCE																		OK
Christophe Dumas (LSCE, IR, CEA)	LSCE																		OK
Didier Swingedouw	LSCE							OK	OK										OK
Gilles Ramstein (LSCE, CEA)	LSCE							OK	OK										OK
Jean-Yves Peterschmitt (LSCE, IR, CEA)	LSCE							OK	OK										OK
Jérôme Servonnat (LSCE)	LSCE							OK	OK										OK
Juan Pablo Boisier (LSCE)	LSCE					(OK)													OK
Juliette Lathière (LSCE, CR CNRS)	LSCE							OK	OK										OK
Laurent Bopp	LSCE							OK	OK										OK
Masa Kageyama (LSCE CR CNRS)	LSCE					(OK)	(OK)	OK	OK	(OK)	(OK)								OK
Matthieu Pavageau (ingénieur COMBINE)	LSCE																		OK
Mathieu Vrac (LSCE, CR CNRS)	LSCE					(OK)		(OK)	(OK)										OK
Nathalie de Noblet (LSCE)	LSCE					(OK)		OK	OK										OK
Olivier Marti (LSCE, DR CEA)	LSCE							OK	OK	OK									OK
Pascal Yiu (LSCE, CEA)	LSCE					(OK)		OK	OK										OK
Pascale Briacomot (LSCE, DR CEA)	LSCE							OK	OK	OK									OK
Patrick Brockmann (LSCE, IR, CEA)	LSCE							(OK)	OK										OK
Robert Vautard	LSCE							OK	OK										OK
Sophie Szopa (LSCE, CEA)	LSCE					OK		OK	OK										OK
Sylvie Charbit	LSCE					OK		OK	OK										OK
Sylvie Joussaume	LSCE					(OK)		OK	OK										OK
Yann Meurdesoif (LSCE, IR, CEA)	LSCE							OK	OK										OK
Yves Balkanski, (LSCE, DR CEA)	LSCE							OK	OK										OK
chefe et Hugues Gousses (UCL, Louvain-la-Neuve)	UCL							OK	OK										OK
Nombre		46:51	17:9:76	11:7:84	13:5:84	42:6:54	47:5:50	17:1:84	27:17:58	31:11:60	19:8:75	15:6:81	15:0:87	28:2:72	25:2:75	13:2:87	6:0:96		

ANNEXES



# CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES NOUVELLES SIMULATIONS FRANÇAISES POUR LE PROCHAIN RAPPORT DU GIEC

Conférence de presse  
Jeudi 9 février 2012, à Paris

Contact presse

Presse CNRS | Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | [priscilla.dacher@cnrs-dir.fr](mailto:priscilla.dacher@cnrs-dir.fr)

---



énergie atomique • énergies alternatives



# Sommaire

Communiqué de presse « Changement climatique : les nouvelles simulations françaises pour le prochain rapport du GIEC »

Liste des intervenants

Le GIEC : présentation, calendrier et recommandations

Une nouvelle approche pour les simulations du climat futur et pour l'élaboration de scénarios socio-économiques

Les nouvelles simulations numériques

Les résultats

- Les températures
- Les précipitations
- La couverture de glace
- Les émissions de carbone compatibles & émissions anthropiques "autorisées"

Les études de prévisibilité décennales

Des *images* d'illustration sont disponibles sur demande aux services de presse et à la photothèque du CNRS ([phototheque@cnrs-bellevue.fr](mailto:phototheque@cnrs-bellevue.fr)). Une *simulation* est également à votre disposition.



énergie atomique • énergies alternatives







www.cnrs.fr



**METEO FRANCE**  
Toujours un temps d'avance



énergie atomique • énergies alternatives

**UPMC**  
SORBONNE UNIVERSITÉS

UNIVERSITÉ DE  
VERSAILLES  
ST-QUENTIN-EN-YVELINES

COMMUNIQUE DE PRESSE | PARIS | 9 FEVRIER 2012

## Changement climatique : les nouvelles simulations françaises pour le prochain rapport du GIEC

La communauté climatique française réunissant principalement le CNRS, le CEA, Météo-France, l'UPMC et l'UVSQ (notamment à travers l'IPSL<sup>1</sup>, le CNRM<sup>2</sup> et le CERFACS<sup>3</sup>) vient de terminer un important exercice de simulations du climat passé et futur à l'échelle globale. Ces nouvelles données confirment les conclusions du dernier rapport du GIEC<sup>4</sup> (2007) sur les changements de températures et de précipitations à venir. En particulier, elles annoncent à l'horizon 2100, pour le scénario le plus sévère, une hausse de 3,5 à 5°C des températures, et pour le plus optimiste, une augmentation de 2°C. Mis à disposition de la communauté internationale, ce travail sera utilisé par le GIEC pour établir son prochain rapport, à paraître en 2013. Il donne des indications et des tendances sur le climat futur à l'horizon 2100 mais également, fait nouveau, sur les trente prochaines années.

La mission du GIEC est de recenser et de résumer toute l'information scientifique sur le changement climatique, ses impacts et les solutions pour l'atténuer ou s'y adapter. Le premier volet de son 5<sup>e</sup> rapport, publié à la mi-septembre 2013, fera ainsi un nouvel état des connaissances accumulées au cours des dernières années. Comme pour l'édition de 2007, la communauté scientifique internationale s'est mobilisée, en particulier au travers du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), pour concevoir et réaliser un exercice de simulations du climat passé et futur (CMIP-5).

Cet effort de recherche, très exigeant en termes de ressources humaines, de puissance de calcul et de stockage de données, rassemble plus d'une vingtaine de centres climatiques dans le monde ayant développé une cinquantaine de modèles numériques. En France, de nombreux organismes contribuent à ce projet, notamment à travers le CNRM, associé au CERFACS, et l'IPSL.

Le projet CMIP-5 présente un certain nombre d'innovations par rapport aux exercices précédents :

- la prise en compte de scénarios incluant des politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre
- l'utilisation de modèles plus complexes (meilleure prise en compte de différentes perturbations comme les aérosols, le cycle du carbone, ...) et plus précis (meilleure résolution)

<sup>1</sup> IPSL ou Institut Pierre-Simon Laplace regroupe six laboratoires en sciences de l'environnement dont quatre participent aux efforts de modélisation du climat : le LATMOS (CNRS / UPMC / UVSQ), le LMD (CNRS / ENS / UPMC / Ecole Polytechnique), le LOCEAN (CNRS / UPMC / MNHN / IRD) et le LSCE (CNRS / CEA / UVSQ).

<sup>2</sup> CNRM-GAME, Météo-France / CNRS

<sup>3</sup> Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CNRS / CERFACS / Total SA / Safran / EDF/ EADS / CNES / Météo-France / ONERA)

<sup>4</sup> Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat



www.cnrs.fr



énergie atomique • énergies alternatives



- une évaluation approfondie de la capacité des modèles à reproduire le climat passé et les mécanismes qui sous-tendent son évolution
- la réalisation d'une série de « prévisions rétrospectives » du climat des cinquante dernières années et d'un exercice préliminaire de prévision pour la période 2010-2035.

### Résultats des simulations françaises

En accord avec les conclusions du GIEC en 2007, une tendance à l'augmentation des températures est observée à l'horizon 2100 pour tous les scénarios. Elle est plus ou moins marquée selon le scénario considéré : la hausse est de 3,5 à 5°C pour le scénario le plus sévère, de 2°C pour le plus optimiste, qui ne peut être atteint que par l'application de politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, il apparaît que la réponse aux seuls facteurs naturels ne permet pas d'expliquer le réchauffement moyen constaté à partir de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

Une intensification du cycle hydrologique<sup>5</sup> se confirme, de même qu'une fonte rapide de la banquise Arctique qui, dans le cas du scénario le plus pessimiste, disparaît en été vers 2040 ou 2060 selon le modèle.

Les simulations réalisées en couplant le climat au cycle du carbone apportent des réponses nouvelles. Elles soulignent notamment qu'il faudrait rapidement diminuer les émissions anthropiques et atteindre des émissions « négatives » (qui correspondent à une action anthropique permettant de prélever directement du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère) d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

Les analyses de cet ensemble de simulations combiné avec les simulations des autres groupes internationaux apporteront un nouveau regard sur le lien entre les activités humaines et le climat, à la fois au cours des dernières décennies et, surtout, dans les décennies et les siècles à venir.

### Contact

Presse CNRS | Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | [priscilla.dacher@cnrs-dir.fr](mailto:priscilla.dacher@cnrs-dir.fr)

<sup>5</sup> Cela met en jeu les précipitations et l'évaporation à l'échelle planétaire



énergie atomique • énergies alternatives



## Liste des intervenants

> **Introduction** par **Jean Jouzel**, chercheur CEA au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement<sup>1</sup> et membre du bureau du GIEC

> **Une nouvelle approche pour préciser les simulations du climat futur et pour l'élaboration de scénarios socio-économiques** par **Stéphane Hallegatte**, ingénieur Météo-France, chercheur au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement<sup>2</sup>

> **Les nouvelles simulations et les nouveaux résultats des équipes françaises**

- **David Salas y Melia**, ingénieur Météo-France, chercheur au Centre national de recherches météorologiques - Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique<sup>3</sup>

- **Jean-Louis Dufresne**, responsable du Centre de modélisation du climat et directeur-adjoint de l'IPSL<sup>4</sup>, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de météorologie dynamique<sup>5</sup>

- **Christophe Cassou**, chargé de recherche CNRS au Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique<sup>6</sup>

---

<sup>1</sup> LSCE, CNRS / CEA / UVSQ

<sup>2</sup> CIRED, CNRS / École des ponts ParisTech / EHESS / AgroParisTech / CIRAD

<sup>3</sup> CNRM-GAME, Météo-France / CNRS

<sup>4</sup> IPSL ou Institut Pierre-Simon Laplace regroupe six laboratoires en sciences de l'environnement

<sup>5</sup> LMD, CNRS / ENS / UPMC / Ecole Polytechnique

<sup>6</sup> CERFACS, CNRS / CERFACS / Total SA / Safran / EDF / EADS / CNES / Météo-France / ONERA



énergie atomique • énergies alternatives

## Le GIEC : présentation, calendrier et recommandations

La question de l'effet éventuel des activités humaines sur le climat commence à préoccuper la communauté scientifique internationale dans les années 70. Dès 1979, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) met sur les rails le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Puis, en 1988, est créé le GIEC ou Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat<sup>1</sup>, sous les auspices de deux organisations dépendant de l'ONU, le Programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE) et l'OMM.

Le GIEC se compose de trois groupes de travail et d'une équipe spéciale. Le groupe I traite des éléments scientifiques de l'évolution du climat : son observation, sa compréhension et son estimation future. Le groupe II s'occupe des questions concernant la vulnérabilité des systèmes socio-économiques et naturels aux changements climatiques, les conséquences de ces changements et les mesures d'adaptation. Le groupe III s'intéresse aux mesures d'atténuation. L'équipe spéciale est en charge des inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

A ce jour, quatre rapports d'évaluation ont été publiés, le premier en 1990, le deuxième en 1995, le troisième en 2001 et le quatrième en 2007. La sortie du premier volet du 5<sup>e</sup> rapport est prévue pour l'automne 2013.

Pour établir leurs conclusions, les auteurs s'appuient notamment sur les résultats de simulations du climat dont la réalisation mobilise une large communauté scientifique internationale. Les simulations à réaliser en amont du 5<sup>e</sup> rapport du GIEC ont été définies fin 2008 par le Groupe de travail sur les modèles couplés du PMRC, dans le cadre du Projet d'intercomparaison de modèles climatiques CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project).

Le projet CMIP-5 fournit un cadre de travail précis aux équipes développant les modèles de climat et réalisant les simulations climatiques. Il vise à :

- évaluer les modèles de climat
- comprendre le fonctionnement du climat
- interpréter les changements climatiques récents ou passés
- prévoir les changements climatiques futurs
- comprendre les changements climatiques simulés par les modèles, quantifier et comprendre les différences éventuelles entre résultats de modèles.

Dans le cadre de CMIP-5, plusieurs types de simulations ont été retenus :

- des simulations « classiques » comme l'évolution du climat depuis 150 ans, des projections climatiques pour les 100 ou 300 prochaines années selon différents scénarios d'émission de gaz

---

<sup>1</sup> également connu sous le sigle IPCC : International Panel on Climate Change



energie atomique • energies alternatives



à effet de serre, des changements climatiques en réponse à des évolutions idéalisées<sup>2</sup> des gaz à effet de serre,

- des simulations nouvelles, notamment des tentatives de prévision de l'évolution du climat à l'échelle de 10 ans, des simulations couplées climat-carbone, des simulations des climats très anciens ou de nouvelles simulations idéalisées.

Un important travail pour développer les modèles de climat et réaliser les simulations climatiques a été effectué par la communauté climatique française entre 2008 et fin 2011. Les résultats de ces simulations ont été mis à disposition de la communauté internationale. Les Français ont été parmi les tous premiers à diffuser leurs données (voir la partie du dossier dédiée aux nouvelles simulations).

---

<sup>2</sup> C'est-à-dire des évolutions de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique non réalistes mais suffisamment simples pour aider à une meilleure compréhension de la réponse du système climatique



énergie atomique • énergies alternatives

## Une nouvelle approche pour les simulations du climat futur et pour l'élaboration de scénarios socio-économiques

Lors des précédents exercices, les simulations se faisaient de manière linéaire : des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre étaient d'abord établis à partir d'hypothèses sur les évolutions démographiques, sociales, économiques et technologiques à l'échelle du globe. Les projections climatiques étaient les réponses des modèles numériques à ces scénarios d'émissions.

Dans le cadre de CMIP-5, les groupes de travail internationaux ont retenu une nouvelle approche. Modélisateurs du climat et économistes ont travaillé en parallèle, les premiers pour effectuer des projections climatiques, les seconds pour élaborer des scénarios socio-économiques, à partir de « trajectoires » d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (les RCP pour « Representative Concentration Pathways »). Ces trajectoires proviennent des résultats des recherches les plus récentes menées à partir de modèles intégrant les évolutions socio-économiques et climatiques.

Cette démarche parallèle permet aux économistes d'établir des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques permettant de rendre compte de ces RCP, notamment ceux qui prennent en compte des politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette hypothèse n'avait pas été explorée lors des précédents exercices. Par ailleurs, la démarche parallèle n'impose plus de procéder à de nouvelles simulations climatiques après toute modification des scénarios socio-économiques.

Les RCP peuvent être traduits en termes de modification du bilan radiatif<sup>1</sup> de la planète, ce qui permet de les comparer avec les anciens scénarios d'émission (dits SRES<sup>2</sup>) utilisés par le GIEC dans ces deux derniers rapports (2001 et 2007). Quatre scénarios RCP de référence ont été retenus pour le projet CMIP-5 parmi plus de 300 couvrant les années 2000 à 2300. Trois d'entre eux donnent lieu à des trajectoires d'évolution de concentrations de gaz à effet de serre comparables à celles utilisées pour les deux derniers rapports du GIEC du point de vue de la perturbation du bilan énergétique terrestre (**Figure 2.1 et Tableau 2.1**). Le scénario le plus élevé (RCP8.5) est toutefois un peu plus sévère que l'ancien scénario le plus pessimiste A2. Le scénario le plus bas (RCP2.6) n'a, quant à lui, pas d'équivalent parmi les anciens scénarios. Il correspond à des comportements vertueux, très sobres en émission de gaz à effet de serre.

<sup>1</sup> Calculé comme la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge émis au sommet de la troposphère (10 à 16km d'altitude)

<sup>2</sup> Special Report on Emissions Scenarios, publié en 1999



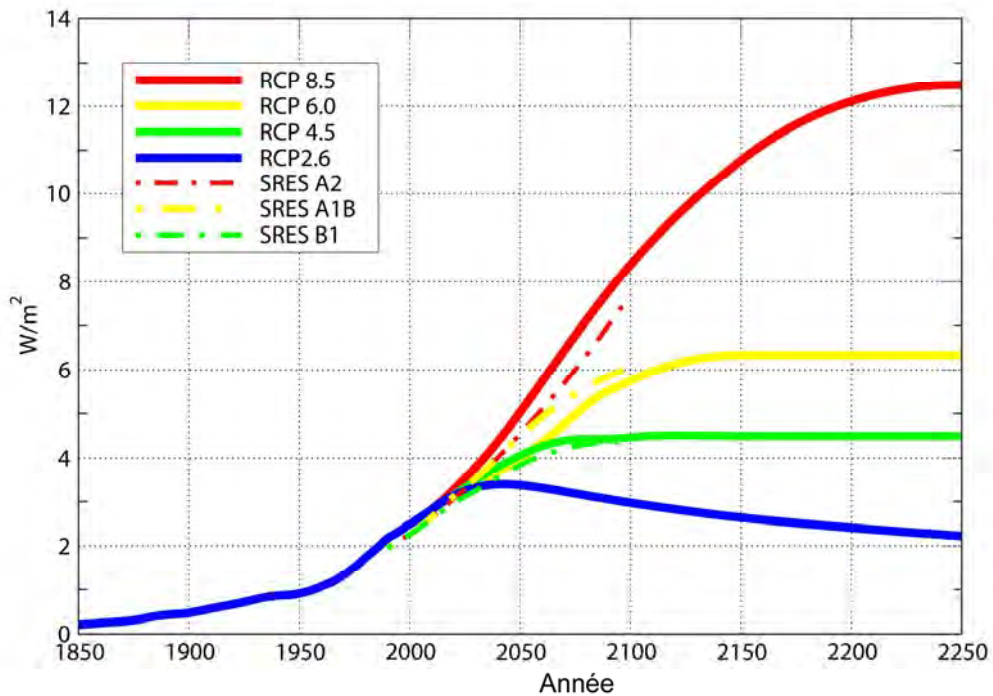


Figure 2.1 : Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif », en  $Wm^{-2}$  sur la période 1850-2250. Après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios dits « Representative Concentration Pathways » et les traits pointillés les anciens scénarios (GIEC, 2001 et 2007).

© Stéphane Senesi (CNRM-GAME, Météo-France/CNRS)

Nom	Changement du bilan radiatif (forçage radiatif)	Concentration (en partie par million)	Trajectoire
RCP8.5	$>8,5Wm^{-2}$ en 2100	$>1370$ eq- $CO_2$ en 2100	croissante
RCP6.0	$\sim 6Wm^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	$\sim 850$ eq- $CO_2$ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	$\sim 4,5Wm^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	$\sim 660$ eq- $CO_2$ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à $\sim 3Wm^{-2}$ avant 2100 puis déclin	Pic $\sim 490$ eq- $CO_2$ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

\*eq-  $CO_2$  est une abréviation pour équivalent  $CO_2$ . Il s'agit de la concentration de  $CO_2$  équivalente à la totalité des gaz à effet de serre en termes de forçage radiatif

Tableau 2.1 : Principales caractéristiques des quatre scénarios RCP



energie atomique • energies alternatives



### Les futurs scénarios socio-économiques

En France, ces scénarios sont développés au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) et devraient compléter, fin 2012, les scénarios climatiques. S'ils n'ont pas vocation à prédire l'avenir, les scénarios socio-économiques permettront d'explorer un certain nombre de futurs possibles, en fonction des transformations démographiques, sociales, culturelles, économiques et technologiques des prochaines décennies. Ils tiendront également compte des récents développements économiques, notamment de la croissance rapide des pays émergents, et des avancées technologiques de ces dernières années.

En outre, la combinaison de scénarios climatiques et socio-économiques permettra d'évaluer les conséquences de différentes politiques climatiques, y compris leur impact sur le climat, leur coût économique et leurs conséquences en termes d'usage des sols. Cela permettra par exemple aux scientifiques de se pencher sur les impacts de politiques de développement massif des agro-carburants sur la biodiversité et sur la production alimentaire.

Enfin, **grâce à la diversité des scénarios, il deviendra aussi possible de tester la vulnérabilité des politiques publiques.** Si par exemple une politique est estimée suffisante pour limiter le changement climatique avec une population mondiale stabilisée à 8 milliards d'humains et un développement rapide de l'énergie photovoltaïque, on pourra évaluer ses conséquences dans un contexte de croissance démographique plus forte et de développement technologique moins rapide que prévus. Ceci permettra de développer des politiques publiques plus robustes face aux incertitudes sur l'évolution future de nos sociétés, de nos économies et des technologies.



## Les nouvelles simulations climatiques

Dans le cadre de ce nouvel exercice, la communauté française s'est attachée à enrichir et améliorer ses simulations et les modèles qui les produisent.

Une attention particulière a notamment été portée aux interactions entre le climat et le cycle du carbone, à la façon dont les modèles simulent les nuages et à la façon dont ils simulent les changements climatiques observés dans le passé.

Ainsi, en plus des simulations « classiques » d'évolution du climat sur les deux derniers siècles et futur à l'horizon 2100 ou 2300, les climatologues ont élaboré des simulations dans des contextes climatiques différents, comme ceux qui prévalaient il y a 6 000 ou 21 000 ans et lors du dernier millénaire. Ils ont également développé et mis en œuvre dans les modèles des « simulateurs d'observations satellitales » afin de comparer plus rigoureusement les nuages simulés par les modèles à ceux observés par les satellites. Les projets CFMIP<sup>1</sup> et PMIP<sup>2</sup>, coordonnés par l'IPSL, ont fortement contribué au développement de ces nouveaux aspects.

Par ailleurs, les modèles climatiques<sup>3</sup> utilisés pour cet exercice prennent mieux en compte la complexité du système climatique, notamment grâce à :

- une **résolution horizontale ou verticale plus fine** (d'un facteur 2 sur l'horizontale pour le modèle du CNRM, d'un facteur 2 sur la verticale pour le modèle de l'IPSL)
- une **meilleure représentation de certains phénomènes physiques** clés comme la convection atmosphérique, la formation de nuages ou le mélange océanique
- la **prise en compte de différents types d'aérosols d'origine naturelle et anthropique** comme les poussières, les sulfates, les particules de suie... (dans l'exercice précédent, seuls les sulfates anthropiques étaient pris en compte)
- une **meilleure représentation de l'ozone** troposphérique et stratosphérique
- la **prise en compte de l'évolution de l'usage des sols au fil du temps**, à partir d'observations pour la période récente et de possibles évolutions pour la période future, établies par le projet international LUCID coordonné par l'IPSL.

Une autre originalité de cet exercice réside dans **l'élaboration de simulations climatiques pour le futur proche** (2010-2040), ce qui présente un fort intérêt, notamment pour les décideurs. Développer des « prévisions décennales » offrirait la possibilité de réduire l'incertitude liée à la variabilité climatique à cette échéance et de mener des études sur l'adaptation et l'atténuation à des échelles de temps qui concordent avec les calendriers classiques de planification.

Aujourd'hui sujet de recherche fondamentale, la prévision décennale nécessite encore de relever de nombreux défis. Le travail effectué dans le cadre de CMIP-5 constitue un premier stade exploratoire.

<sup>1</sup> Cloud Feedback Model Intercomparison Project (Projet d'intercomparaison de modèles sur les rétroactions des nuages)

<sup>2</sup> Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (Projet d'intercomparaison des modèles paléo-climatiques)

<sup>3</sup> Les modèles de climat représentent les circulations tridimensionnelles de l'atmosphère et de l'océan en tenant compte des interactions avec les surfaces continentales, la glace de mer et le transport de l'eau par les fleuves. Ces modèles représentent également les couplages entre la chimie atmosphérique, les aérosols, le rayonnement atmosphérique et les nuages.



énergie atomique • énergies alternatives

### Les contributions françaises

Le CNRM et le CERFACS ont réalisé les différentes simulations centennales, hors cycle du carbone, ainsi que les simulations décennales avec un modèle à haute résolution, qui comprend de nombreuses améliorations de la représentation de la physique atmosphérique, des surfaces continentales, des interactions entre l'atmosphère et les différents types de surface (océan, continent, glace), de la physique océanique et de la glace de mer.

De son côté, l'IPSL a effectué l'ensemble de l'exercice avec un modèle à plus basse résolution, très similaire du point de vue de la physique à celui qui avait servi pour le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC, mais qui inclut maintenant une représentation complète de la chimie atmosphérique (notamment celle de l'ozone), des aérosols et du cycle du carbone. L'IPSL a également réalisé un sous-ensemble de simulations avec deux autres versions de son modèle : dans l'une la résolution horizontale du modèle atmosphérique a été accrue, et dans l'autre la physique atmosphérique a été profondément modifiée afin de mieux représenter la convection, la couche limite et les nuages.

Les premiers résultats de ces simulations ont été présentés et analysés au travers d'une série d'articles scientifiques à paraître. Ces résultats ont également été mis à la disposition de la communauté internationale depuis avril 2011. Les résultats des modèles français ont été parmi les premiers à être diffusés, ce qui leur a permis de figurer dans les premières analyses effectuées par différents groupes hors métropole.

#### En chiffres...

La réalisation des simulations a mobilisé les chercheurs et ingénieurs français pendant plus de 2 ans.

Les simulations du CNRM-CERFACS représentent l'occupation de 12 nœuds de 8 processeurs du calculateur NEC SX8 de Météo-France à plein temps pendant un an et demi et un volume de données à gérer et à stocker d'environ 400 To (400 mille milliards d'octets).

Les simulations de l'IPSL représentent l'occupation de 3 nœuds de 16 processeurs du calculateur NEC SX9 de GENCI<sup>4</sup> et un volume de données de 2 Po (2 millions de milliards d'octets).

<sup>4</sup> Grand Équipement National de Calcul Intensif



energie atomique • energies alternatives

Simulations de différentes périodes climatiques passées (concentrations CO <sub>2</sub> fixées)	Projections Climatiques	Simulations pour étudier les rétroactions climat-cycle du carbone (concentrations CO <sub>2</sub> calculées)	Simulations pour les analyses et l'étude des nuages	Simulations pour les études de détection/attribution du changement climatique (période 1850-2005)
Climat pré-industriel (1850) de référence	RCP 4.5	Climat pré-industriel	1% CO <sub>2</sub>	Forçages naturels seuls (solaire, volcanisme, aérosols)
Climat récent de 1850 à 2005, modèle couplé et atmosphère seule	RCP 8.5	Climat récent	4xCO <sub>2</sub> et Température de surface de la mer climatologique avec 1x ou 4x CO <sub>2</sub>	Gaz à effet de serre uniquement
Holocène moyen (il y a 6000 ans)	RCP 2.6	RCP 8.5	Forçage CO <sub>2</sub>	Sans usage des sols
Dernier maximum glaciaire (il y a 21 000 ans)	RCP 6.0	ESM* climatologie fixée	Tous types d'aérosols	Forçages anthropiques seuls
Dernier millénaire de 850 à 2005	RCP 4.5 jusqu'en 2300	ESM* rétroactions	Aérosols sulfatés	Aérosols anthropiques seuls
	RCP 8.5 et 2.6 jusqu'en 2300		Planète océan	Pas d'ozone

\* ESM : « Earth System Model » (modèle du système climatique incluant un cycle du carbone interactif)

**Tableau 2** : Synthèse des simulations CMIP-5 pour le climat à long terme. En rose, les simulations faisant partie du cœur de l'exercice, en jaune les simulations optionnelles du premier cercle et en vert, les simulations optionnelles du second cercle. Les groupes étaient invités à réaliser les simulations cœur et à produire les autres simulations en fonction de leurs thématiques ou des groupes de travail auxquels ils participent. Chaque colonne représente une catégorie de simulations.

## Les résultats

### Les températures

La **température moyenne planétaire** est un très bon indicateur de l'évolution climatique dans la mesure où elle traduit de manière synthétique la réponse du climat à différents facteurs, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine.

#### Facteurs d'évolution de la température moyenne entre 1850 et 2005

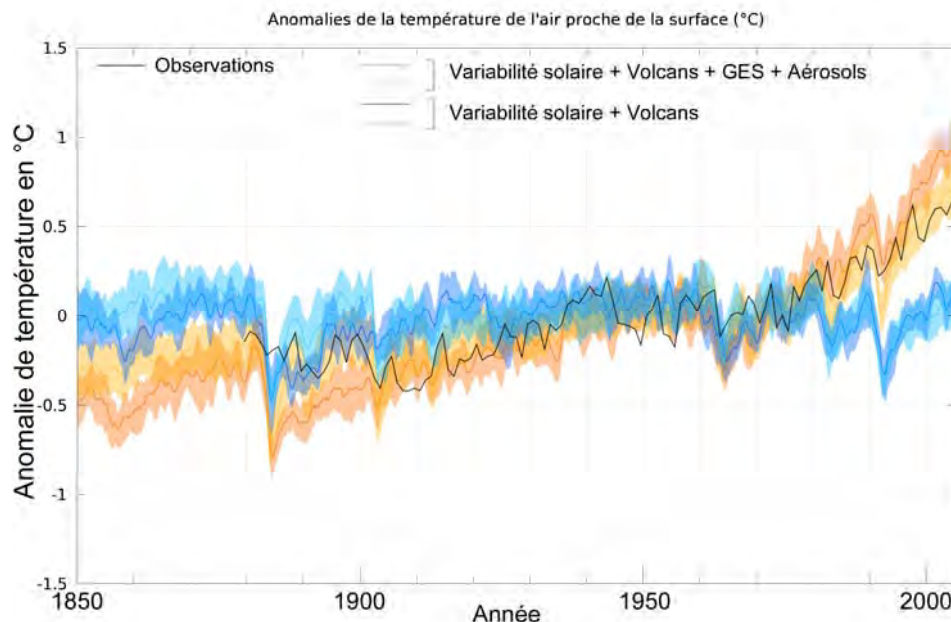
Certaines simulations additionnelles recommandées dans le cadre de CMIP-5 ont pour objectif de mener des études de détection et d'attribution du changement climatique sur la période 1850-2005.

Détecter un changement climatique, c'est répondre à la question : l'évolution climatique constatée n'est-elle due qu'à la variabilité interne de l'atmosphère interagissant avec l'océan, les surfaces continentales, ... ou bien est-elle due à un facteur externe inconnu ?

Attribuer un changement climatique, c'est évaluer l'importance relative des différents facteurs qui peuvent expliquer un changement climatique détecté dans les observations.

La **Figure 4.1** (ci-dessous) montre l'évolution de la température moyenne de la planète sur la période 1850-2005 simulée par les deux modèles climatiques en tenant compte :

- des seuls facteurs externes naturels (variabilité solaire et volcanisme), en **bleu**
- de ces facteurs auxquels s'ajoutent ceux d'origine humaine (augmentation des gaz à effet de serre, modification de la concentration des aérosols), en **orange**.



**Figure 4.1** : Evolution de la température moyenne à la surface de la Terre mesurée (courbe noire) et calculée par les modèles du CNRM-CERFACS (traits pointillés) et de l'IPSL (traits pleins). Les courbes bleues ne tiennent compte que des forçages naturels (variabilité solaire et volcan) tandis que les courbes en orange tiennent compte des forçages naturels et des forçages anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols). Pour chacune des courbes, les résultats ont été obtenus à partir d'une dizaine de simulations dont la moyenne correspond à la courbe et la variation autour de cette moyenne correspond à l'enveloppe colorée. Les différences sont calculées par rapport à la période 1901-2000 qui sert de période de référence et donc de passage par 0 pour les différentes courbes.

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)





energie atomique • energies alternatives

Des analyses poussées devront être conduites à partir de ces simulations avant d'arriver à des conclusions sur la quantification des différentes contributions. Cependant, il apparaît déjà que **la réponse aux seuls facteurs naturels ne permet pas d'expliquer le réchauffement moyen constaté à partir de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle** (voir la Figure 4.2 pour la période correspondante). Ce constat reste concordant avec les conclusions du GIEC en 2007.

#### *Evolution de la température moyenne entre 1850 et 2300*

La Figure 4.2 représente l'évolution de la température moyenne de la planète sur la période 1850-2300, telle qu'elle est simulée par les deux modèles climatiques français.

- Sur la période 1850-2005, l'ensemble des facteurs naturels et d'origine humaine ont été pris en compte et les simulations sont en bon accord avec l'évolution observée (en noir).
- A partir de 2006, les résultats **jusqu'en 2100 ou 2300 dépendent du choix du scénario RCP**.
- Le réchauffement calculé pour le scénario le plus sévère (RCP8.5) prévoit une augmentation de la température moyenne atteignant 3,5 à 5°C entre les années 1990 et 2090.
- L'une des principales nouveautés est la **simulation d'un réchauffement de 6 à 7°C supplémentaires lorsque ce scénario est prolongé jusqu'en 2300**.
- En revanche, pour le scénario le plus optimiste comme RCP2.6, qui ne peut être atteint que par l'application de politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le **réchauffement se stabilise dès 2100 à une valeur voisine de 2°C par rapport à la période pré-industrielle**.

Pour un même scénario, **les changements de température sont sensiblement différents pour les deux modèles**. Suivant le scénario, les réchauffements calculés par le modèle de l'IPSL sont environ 0,4 à 1°C plus importants en 2100 que ceux du modèle du CNRM-CERFACS.



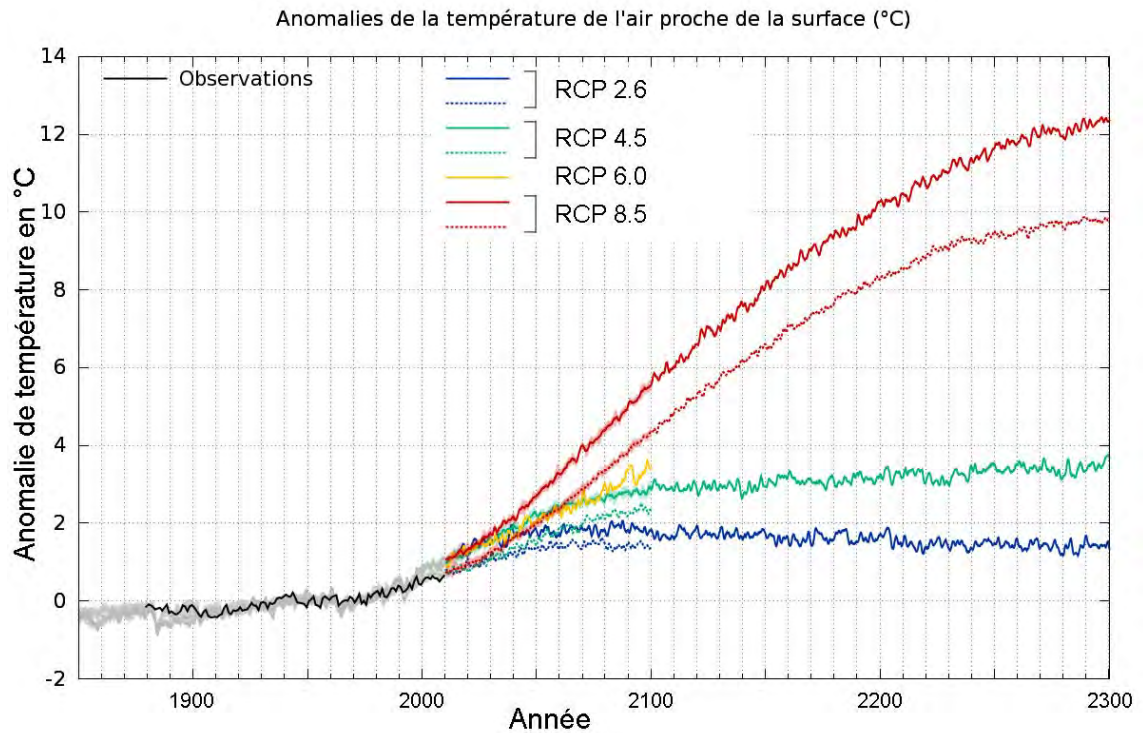


Figure 4.2 : Evolution, de 1850 à 2300, de la température moyenne (°C) à la surface de la Terre par rapport à la moyenne des années 1901-2000 mesurée (courbe noire) et calculée par les modèles du CNRM-CERFACS (traits pointillés) et de l'IPSL (traits pleins) et pour les différents scénarios RCP : RCP2.6 (le plus optimiste), RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (le plus sévère).

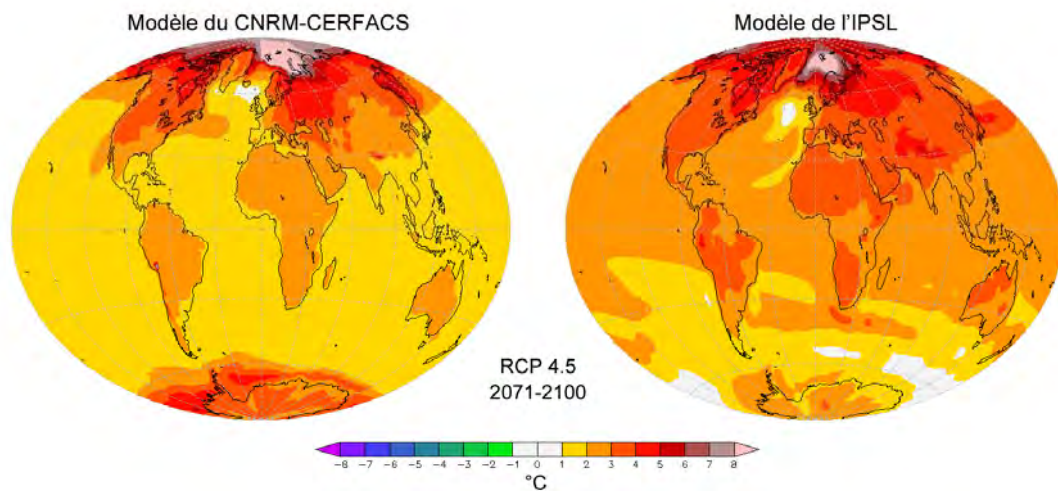
© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)

### Cartographie des évolutions de la température pour le prochain siècle

Les simulations à échéance 20-30 ans et 100 ans précisent les grandes caractéristiques des changements présentés dans le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC en 2007.

- Durant les premières décennies du 21<sup>e</sup> siècle, le réchauffement dépend peu du scénario considéré : il est relativement uniforme sauf dans les régions arctiques affectées par la fonte de la glace de mer.
- A plus longue échéance (une centaine d'années), le réchauffement est plus intense sur les continents que sur les océans et est amplifié dans les régions polaires. L'hémisphère Sud, principalement couvert d'océans, se réchauffe moins que l'hémisphère Nord.

Des analyses plus fines permettront à l'avenir de déterminer le rôle spécifique des différents types d'aérosols et de l'utilisation des sols dans les signatures régionales, en particulier sur les modifications de saisonnalité, sur la variabilité interannuelle et sur les extrêmes climatiques.



**Figure 4.3 :** Changements de la température à la surface de la Terre pour la période 2071-2100 par rapport à celle de la période 1971-2000 calculés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL<sup>1</sup> pour le scénario moyen RCP4.5

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)

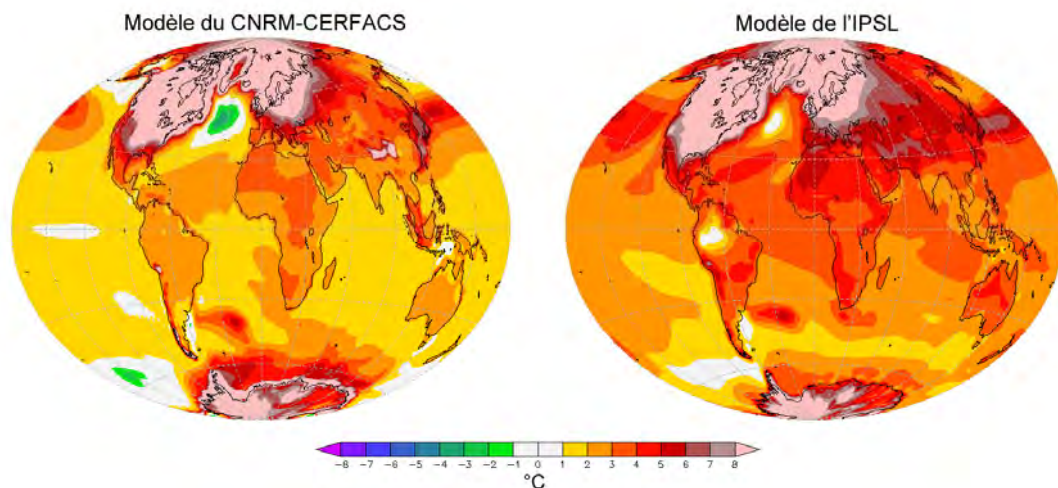
<sup>1</sup> A l'échelle des grandes régions et pour un scénario donné, le modèle de l'IPSL est plus sensible que celui du CNRM-CERFACS, c'est-à-dire que les températures augmentent davantage pour une perturbation radiative (énergétique) donnée.

### Le contexte paléoclimatique

La transition entre le climat du dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, et la période actuelle représente une augmentation de la température globale de l'ordre de 4 à 5°C. Au dernier maximum glaciaire, les continents de l'hémisphère Nord étaient recouverts de calottes de glace culminant à environ 3 000 mètres en Amérique du Nord et en Scandinavie. Avec la fonte des calottes, ces régions sont devenues des zones de très fort réchauffement (voir la **Figure 4.4**). La principale contribution à l'augmentation des températures a eu lieu sur une période d'environ 9 000 ans durant la déglaciation. Or, ce réchauffement est, à l'échelle globale, du même ordre de grandeur que ce qui est projeté pour les 100 à 150 prochaines années par le scénario moyen (RCP4.5). Ainsi, la rapidité et l'amplitude du réchauffement projeté pour le 21<sup>e</sup> siècle représentent des modifications profondes du climat.

Par ailleurs, les reconstructions paléoclimatiques<sup>2</sup> mettent en évidence, du dernier maximum glaciaire à la période pré-industrielle, un réchauffement plus important sur les continents de l'hémisphère Nord et une amplification polaire plus marquée. Ces caractéristiques sont similaires à celles des projections futures. De plus, les reconstructions indiquent que les modèles utilisés ont tendance à sous-estimer l'amplification polaire.

Des comparaisons plus complètes entre climats passés et futurs permettront une meilleure évaluation de la capacité des modèles à représenter un climat différent du climat actuel. Il s'agira en outre d'estimer les risques de dépasser des seuils critiques dans le futur.



**Figure 4.4** : Changements de la température à la surface de la Terre entre le dernier maximum glaciaire, il y a environ 21 000 ans, et la période 1971-2000 calculés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL.

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)

<sup>2</sup> obtenues à partir de différents enregistrements marins, terrestres ou bien à partir des glaces polaires



### Les précipitations

En accord avec les conclusions du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC, les deux modèles français réaffirment :

- une **augmentation** significative des précipitations annuelles aux hautes latitudes ainsi que sur l'océan Pacifique équatorial
- et une **diminution** dans les latitudes subtropicales.

Ces changements sont d'autant plus marqués que le scénario considéré anticipe une forte augmentation des concentrations des gaz à effet de serre.

Les résultats peuvent être contrastés sur certaines régions. Ces divergences sont en particulier visibles en Afrique de l'Ouest et au sud de l'Europe.

### Changement de précipitations entre 1961-1990 et 2071-2100

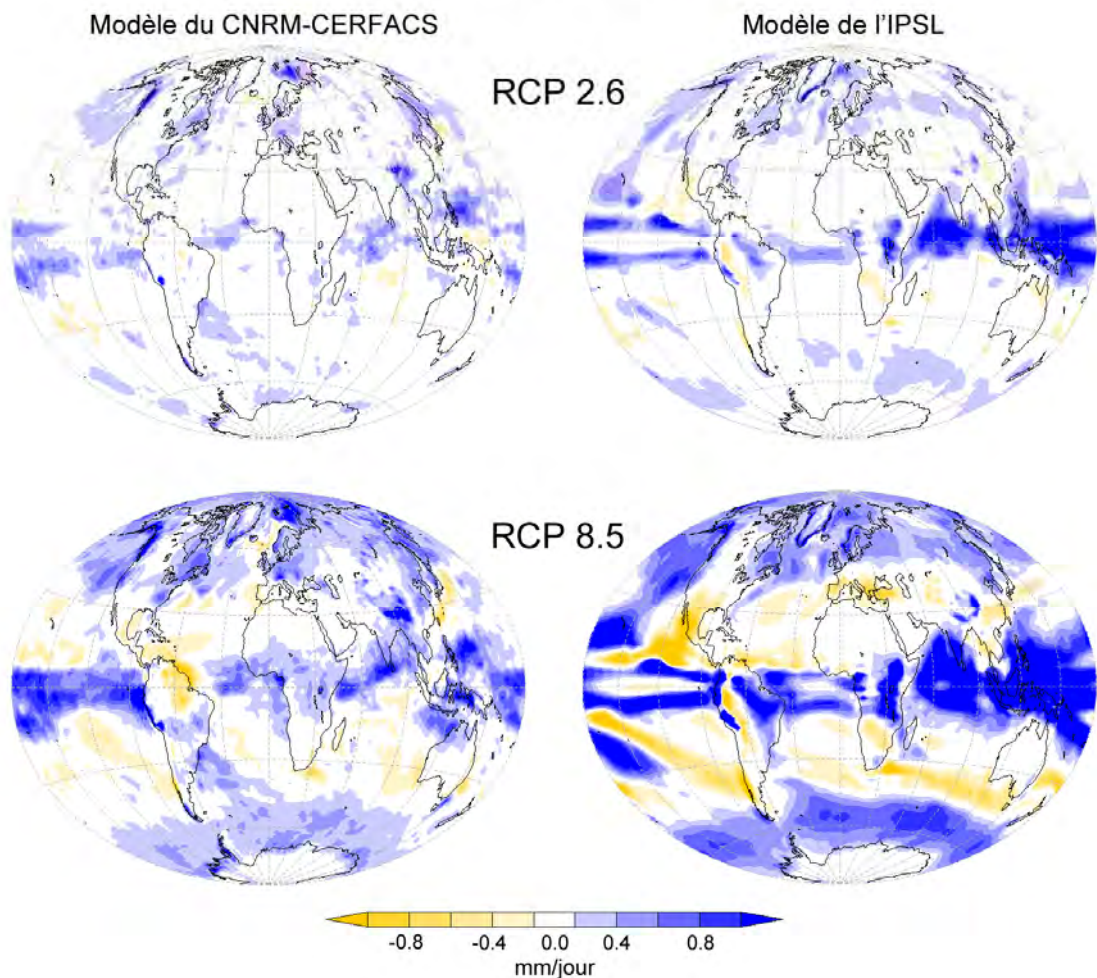


Figure 4.5 : Changements des précipitations pour la période 2071-2100 par rapport à celle de la période 1971-2000 calculés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL, pour le scénario sobre RCP2.6 et pessimiste RCP8.5.

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)



énergie atomique • énergies alternatives

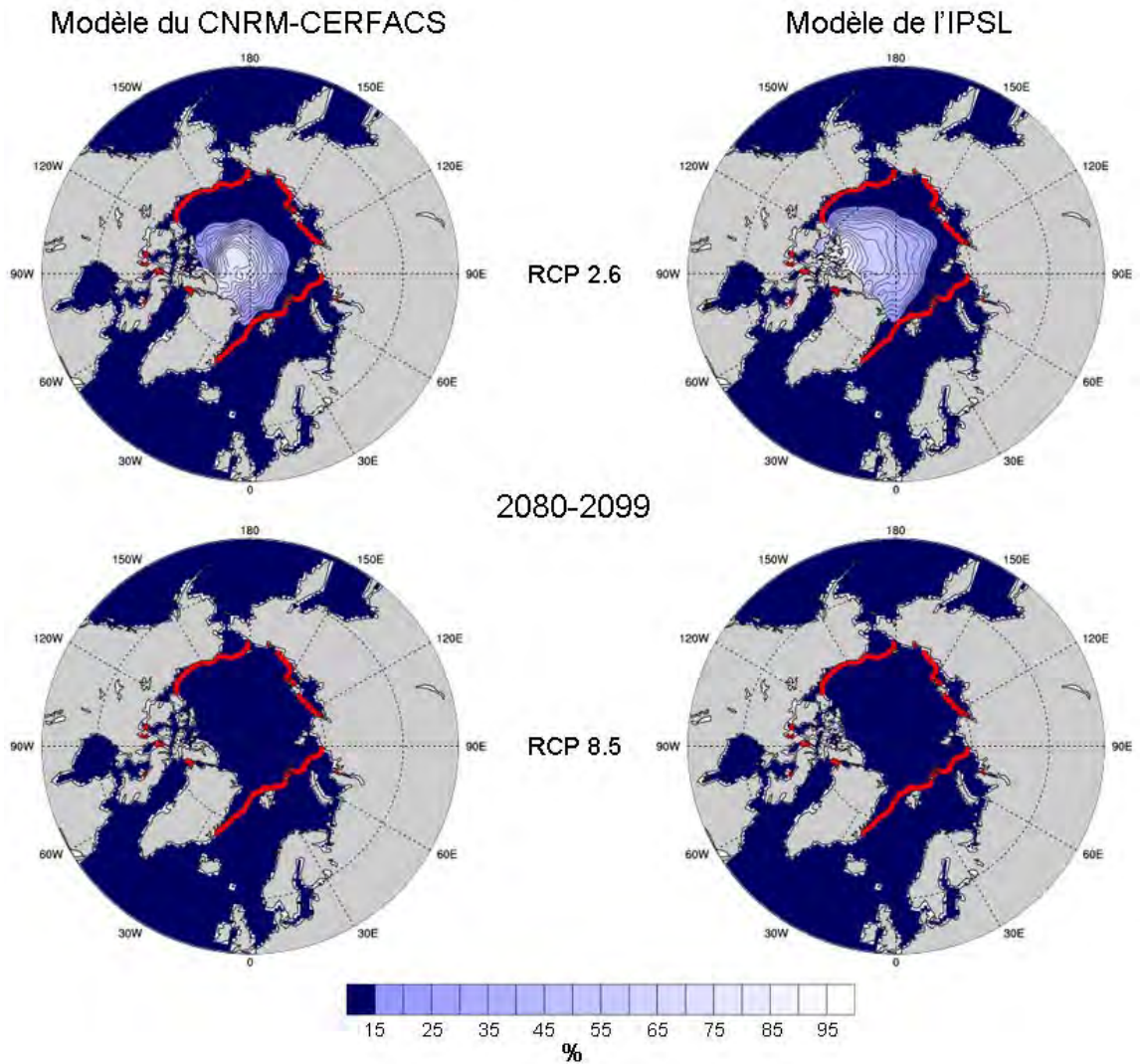
## Couverture de glace

**Fait nouveau**, la fonte de glace simulée par les deux modèles français sur la période passée est comparable aux observations, alors qu'elle était souvent sous-estimée par ces modèles dans le dernier rapport du GIEC. Cette amélioration est en partie liée à une meilleure résolution horizontale, et pour le modèle du CNRM-CERFACS, à une meilleure prise en compte de la physique du modèle de glace de mer.

Comme le montre la **Figure 4.6**, dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP8.5), les deux modèles font respectivement disparaître la glace de mer estivale en Arctique vers 2060 (modèle de l'IPSL) ou vers 2040 (modèle du CNRM-CERFACS). Dans le cas du scénario RCP2.6, plus optimiste, la glace de mer estivale se maintient tout au long du 21<sup>e</sup> siècle (modèle de l'IPSL) ou bien disparaît complètement l'été pendant quelques années entre 2060 et 2080, avant de se reformer en fin de siècle (modèle du CNRM-CERFACS).

A la fin de l'hiver de l'hémisphère Nord (en mars), quand l'extension de la banquise est maximale, la glace de mer persiste pendant tout le 21<sup>e</sup> siècle, mais semble régresser nettement au nord de la mer de Barents, et ceci d'autant plus que le scénario est pessimiste.

Pour l'Antarctique, la couverture de la glace de mer à la fin de l'hiver austral projeté par les deux modèles pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle (2080-2099) est significativement plus faible que pendant la période 1980-1999, et ce d'autant plus que le scénario d'émission est pessimiste. **Cette tendance à la régression de la couverture de glace en Antarctique n'apparaissait pas jusqu'à présent dans les projections.**



**Figure 4.6** : Pourcentage de l'océan couvert par la glace pour la banquise arctique de fin d'été (en septembre, lorsque la glace de mer est à son minimum d'extension) et pour 2080-2099. (a) et (b): scénario RCP2.6 pour les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL; (c) et (d): scénario RCP8.5 pour les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL. Le trait rouge signale l'extension moyenne actuelle de la banquise arctique pendant le mois de septembre. © David Salas y Melia (CNRM-GAME, Météo-France / CNRS)



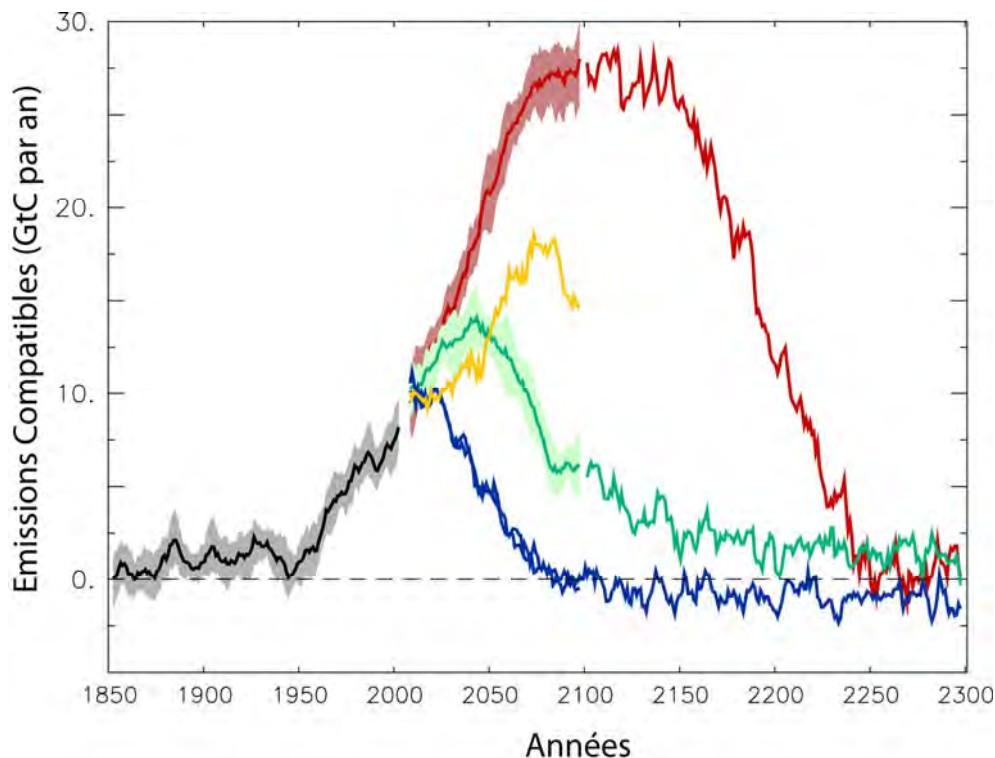
### Emissions de carbone compatibles & émissions anthropiques « autorisées »

Au cours des 10 dernières années, plusieurs études de modélisation ont montré l'existence d'une rétroaction positive (réaction amplifiant le phénomène), potentiellement importante, entre changement climatique et cycle du carbone. La quantité de CO<sub>2</sub> anthropique qui peut être absorbée par les puits de carbone naturels (océan et biosphère continentale) dépend du climat : quand le climat se réchauffe, les puits sont de moins en moins efficaces pour pomper du carbone. On ne peut donc plus simuler les évolutions du climat et du CO<sub>2</sub> atmosphérique de façon indépendante.

Dans ce nouvel exercice, certaines simulations prennent en compte le **couplage entre le climat et le cycle du carbone**. Résultat : quel que soit le scénario futur, ces puits deviennent de moins en moins efficaces. **Après 2100, les continents deviennent pour les scénarios pessimistes une source de carbone pour l'atmosphère.**

Les « émissions de carbone compatibles » pour chaque scénario correspondent aux émissions anthropiques « autorisées », permettant de reproduire l'évolution imposée du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les calculer permet d'établir des scénarios d'émissions compatibles, eux-mêmes ensuite utilisés par les modèles socio-économiques.

La **Figure 4.7** démontre par exemple que, pour suivre la trajectoire du scénario RCP2.6 (en bleu) et limiter le réchauffement à 2°C, il faudrait rapidement diminuer les émissions anthropiques, et atteindre des émissions « négatives » (qui correspondent à une action anthropique permettant de prélever directement du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère) d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle.



**Figure 4.7 :** Emissions de CO<sub>2</sub> compatibles avec les concentrations de CO<sub>2</sub> imposées soit par les données avant 2005, soit par les différents scénarios RCP sur la période 2006-2300 (du plus au moins optimiste : RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert, RCP6.0 en jaune et RCP8.5 en rouge).

© Laurent Bopp (LSCE/IPSL, CNRS/CEA/UVSQ)





## Les études de prévisibilité décennale

Dans ses rapports successifs, le GIEC émet des conclusions fortes pour le 21<sup>e</sup> siècle *via* les **projections** climatiques réalisées numériquement à partir de plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre. L'une des nouveautés et originalités du 5<sup>e</sup> rapport est de se focaliser, en complément, sur le "futur proche" correspondant aux prochaines décennies (~2010-2040) et de conduire ainsi un **exercice de prévision à l'échelle de temps décennale**.

En l'absence de variation des forçages extérieurs, le système Terre produit une variabilité à toutes les échelles de temps. Cette variabilité dite interne se superpose au changement induit principalement par les gaz à effet de serre et module ainsi l'évolution climatique, en particulier sur les deux ou trois prochaines décennies. A ces échéances, il est donc particulièrement important d'en tenir compte.

La variabilité interne du système climatique a jusqu'à aujourd'hui été simulée par les modèles sans que l'on cherche à reproduire son évolution chronologique observée. C'est d'ailleurs pourquoi le terme de **projection**, et non pas de **prévision**, était le seul utilisé pour désigner les simulations numériques du 21<sup>e</sup> siècle dans tous les précédents rapports du GIEC.

Dans le cadre de CMIP-5, les scientifiques français ont réalisé une série de **prévisions rétrospectives du climat des cinquante dernières années** puis effectué un **exercice préliminaire de prévision, au sens strict du terme, pour la période 2010-2035**. La nouveauté est que ces prévisions ont été initialisées à partir des observations océaniques en respectant la chronologie observée (les prévisions démarrant en 1960 ont utilisé comme état initial de l'océan la meilleure estimation possible de l'état océanique de 1960), l'océan étant le moteur principal de la variabilité interne décennale.

Les principaux objectifs de ces simulations sont de :

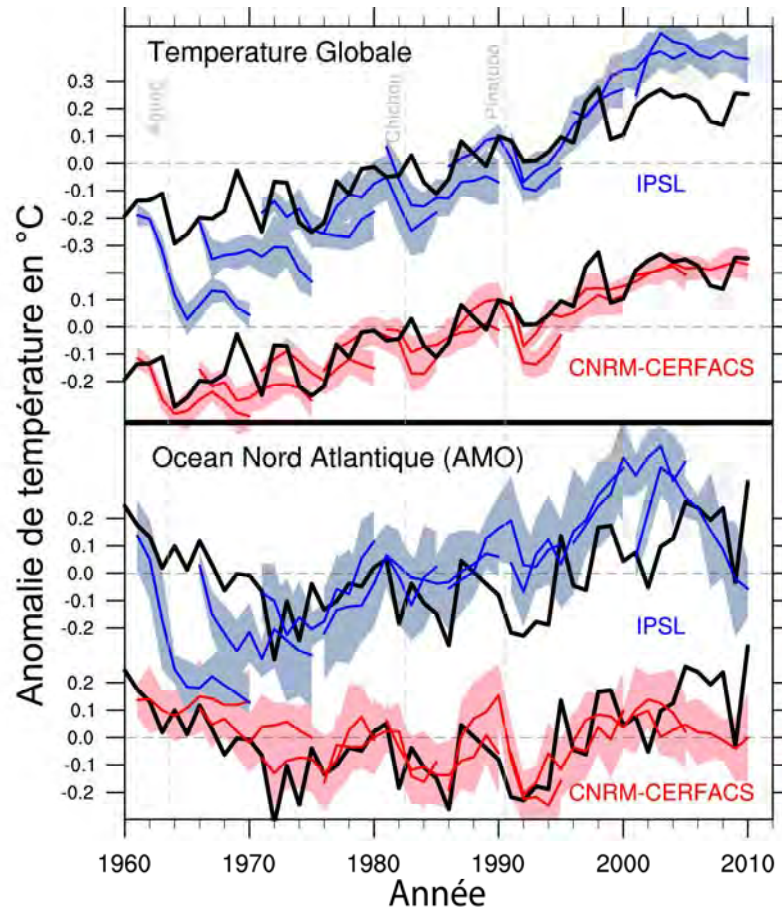
- quantifier la capacité à reproduire les fluctuations décennales observées depuis 1960
- estimer la prévisibilité du système climatique aux échelles de temps décennales.

La **Figure 4.8** reproduit deux exemples de prévision :

- L'image du haut montre que les modèles sont capables de reproduire les fluctuations observées pour la température globale de l'océan en surface avec une grande acuité. La prévisibilité de la température océanique est en grande partie expliquée par les forçages externes pris en compte dans les simulations (variabilité solaire, volcanisme, émissions des gaz à effet de serre, ...). On remarque en particulier la tendance au réchauffement et le rôle de l'activité volcanique qui la module.
- L'image du bas montre que, pour la température de surface océanique moyennée sur l'Atlantique Nord uniquement, les prévisions reproduisent une partie significative de la variabilité décennale de ce bassin océanique. L'analyse montre que cette capacité prédictive est principalement associée à l'initialisation de l'océan à partir des observations (et non aux forçages externes, comme précédemment).

D'une manière générale, la capacité à prévoir aux échelles décennales est plus faible :

- à l'échelle régionale qu'à l'échelle planétaire,
- sur les continents que sur les océans,
- au-dessus du Pacifique qu'au-dessus de l'Atlantique.



**Figure 4.8 :** Anomalies de température océanique globale (haut) et sur l'océan Atlantique Nord (bas) calculées sur la période de référence 1960-2010 pour les observations (en noir) et pour les prévisions des modèles (rouge: CNRM-CERFACS, bleu: IPSL) calculées sur la période de référence 1960-2010. Chaque « segment » en trait plein (bleu ou rouge) représente une prévision de 10 ans. Les prévisions ont été démarrées tous les 5 ans à partir de 1960 : 1960, 1965, 1970,..., 1990, 1995, 2000. Les enveloppes (gris-bleu et rose) indiquent une estimation de l'incertitude associée à chaque prévision.

© C. Cassou (CNRS/CERFACS) & J. Mignot (LOCEAN/IPSL, CNRS/UPMC/IRD/MNHN)

La prévision décennale correspond à un besoin souvent exprimé par les décideurs politiques ou économiques. Thème émergent et prometteur en termes d'applications, c'est aujourd'hui un sujet majeur de recherche qui nécessite de relever de nombreux défis. L'un d'entre eux concerne l'utilisation des observations pour initialiser les modèles : celles-ci sont très hétérogènes à la surface du globe (peu d'observations des océans de l'hémisphère Sud en particulier) et ne couvrent que les dernières décennies. Ces limitations rendent difficiles l'analyse des fluctuations décennales et l'évaluation de leur prévision. Ainsi, même si la communauté scientifique a atteint la maturité nécessaire pour aborder ces défis, ce volet « prévision décennale », inscrit dans le prochain rapport du GIEC, en est aux premières étapes, à la fois dans la méthodologie et la compréhension des processus physiques en action.

**AO INSU 2010**  
**Section « Océan-Atmosphère »**

***Dossier scientifique***

*Nota :*

- *Ce dossier ne devra pas excéder 15 pages (a priori plus court dans le cas d'une Lettre d'Intention) et sera à télécharger via le formulaire informatique destiné à synthétiser le projet : <http://appeldoffres2010.insu.cnrs.fr>*

- *Le cadrage et le contenu de l'AO sont détaillés à partir du site <http://www.insu.cnrs.fr/a3105,appels-offres-insu-2010.html>, section Océan Atmosphère*

**Référence du projet<sup>1</sup> :** AO2010- 496213 - MISSTERRE

**Nom du porteur du projet :** Pascale Braconnot (IPSL) et Serge Planton (Meteo-France)

**Titre du projet :** Modélisation Intégrée du Système Terre

**Intérêt scientifique et état de l'art**

*(Place du projet d'équipement dans le contexte régional, national, européen, international)*

Le projet MISSTERRE a été lancé en 2006 avec l'ambition de rassembler les différentes actions autour de la modélisation des changements climatiques réalisées en France. Il correspondait à un réel besoin pour la modélisation du climat qui est devenu incontournable pour de nombreuses études allant de la compréhension des interactions mises en jeu jusqu'aux études d'impact et l'aide à la décision. Le changement climatique est entré au cœur du débat de société. Les prochaines années doivent pouvoir fournir des informations pertinentes à l'échelle régionale et aux échelles décennales pour répondre aux questions liées aux impacts et à l'adaptation au changement climatique. Les interrogations majeures portent aussi sur les événements extrêmes à fort impact pour les écosystèmes, les ressources hydriques et la société. Répondre à ces questions demande en amont d'améliorer notre compréhension du système climatique, de se doter des moyens de réaliser les simulations servant de support au prochain rapport du GIEC et de faire progresser les modèles. Les pistes de recherche explorent à la fois des ensembles de simulations permettant d'étudier la réponse du climat de l'échelle globale à l'échelle régionale, des modèles de plus en plus complexes incluant le couplage entre le climat et les cycles biogéochimiques, des simulations longues pour étudier les fluctuations naturelles et mettre en perspective la perturbation anthropique, des simulations à l'échelle décennales contraintes par le choix des conditions initiales, et une représentation de plus en plus fine des processus de petite échelle permettant aussi d'aborder des simulations à haute résolution. Ces différents aspects demandent une constante évolution du contenu de modèles, de leur programmation et de l'environnement de travail associé. Il faut également être en mesure de les faire évoluer sur différents types d'ordinateurs et se préparer à aborder des problèmes nécessitant de la très haute résolution et des simulations frontières.

Dans ce contexte il paraît important que MISSTERRE continue à offrir un chapeau à différentes actions et garantisse une bonne répartition des efforts entre les différents acteurs

---

<sup>1</sup> cf formulaire informatique <http://appeldoffres.insu.cnrs.fr/>

français. Le projet ne prétend donc pas couvrir l'ensemble des thématiques abordées, dont certaines font aussi l'objet de projet plus spécifiques auprès de LEFE ou d'autres appels d'offre nationaux et européens. Ce projet assure la cohérence en permettant de développer la colonne vertébrale scientifique et technique indispensable à de nombreuses études, mais qu'il est souvent difficile de valoriser dans la plupart des appels d'offre. Il permet aussi de donner une visibilité aux actions de recherches menées pour assurer une contribution française aux travaux du GIEC (groupe I), en particulier via l'action ESCRIME (Etude des Scénarios Réalisés par l'IPSL et Météo-France), tant auprès de nos institutions que des autres communautés de recherche, en particulier celles concernées par les impacts du changement climatique..

Le projet s'intéresse aux modèles couplés utilisés pour les projections climatiques futures qui ont évolué ces dernières années, partant des modèles couplés océan-atmosphère-continent pour passer à des modèles incluant aussi de nouvelles composantes comme l'hydrologie continentale, les surfaces englacées et les cycles biogéochimiques. Le présent projet présente quelques évolutions par rapport au projet précédent. Les évolutions des composantes individuelles ne seront considérées que lors de leur intégration dans des simulations climatiques. Ainsi, le projet de physique commune entre les équipes de l'IPSL et de Météo-France est suffisamment avancé pour bénéficier d'un projet dédié au développement des nouvelles paramétrisations et à leur évaluation (projet DEPHY). D'autres initiatives seront aussi appelées à se coordonner via un projet dédié pour en développer les aspects spécifiques, en gardant des liens avec MISSTERRE pour la part qui concerne la réalisation et l'exploitation des simulations contribuant aux travaux du GIEC.

Nous avons décidé de proposer un projet pour 3 ans, ce qui permettra d'accompagner la préparation de l'AR5 (« Assessment Report 5 ») dont la voie est relativement bien tracée par l'expérience acquise au cours de l'exercice précédent. Néanmoins, nous souhaitons rester flexibles au niveau de l'organisation et sommes prêts à modifier notre stratégie en fonction des conclusions de l'exercice de prospective LEFE qui se tiendra cette année. Cela pourrait concerner en particulier la préparation de l'évolution des infrastructures de modélisation dont la réflexion peut être engagée dans le cadre de MISSTERRE mais qui impliquera peut-être de définir une action spécifique coordonnée au niveau national.

Les moyens demandés dans MISSTERRE viennent en complément de moyens obtenus dans différents projets européens dont l'activité de recherche relève pour tout ou partie de MISSTERRE. Pour les 3 prochaines années, le travail effectué dans MISSTERRE bénéficiera des projets européens COMBINE (accroissement de la complexité et travail sur l'initialisation des modèles climatiques pour les prévisions décennales), EUCLIPSE (évaluation et nuages), CIRCE (modélisation régionale), des projets de e-Infrastructure européen IS-ENES (stratégie de modélisation, développement des plateformes de modélisation et de diffusion des résultats, préfiguration de « service climatique ») et du projet d'infrastructure européen METAFOR (standardisation des métadonnées). Notons que le soutien aux actions coordonnées entre les partenaires du projet et figurant dans la présente proposition, n'est pas pris en charge dans ces projets.

## **Plan de recherche et calendrier de réalisation**

### **1 Introduction**

Le premier enjeu de MISSTERRE est de garantir une bonne participation des équipes française à la réalisation et l'exploitation scientifique des simulations prévues dans le projet

CMIP (CMIP5) qui alimentera le prochain rapport du GIEC (Assessment report 5, AR5). L'exercice international précédent ([http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)), ayant servi de support à l'AR4 (2007), a été un succès puisqu'il a généré un nombre sans précédent d'articles scientifiques (plus de 500 répertoriées sur le site CMIP). Les équipes françaises se sont largement impliquées dans la réalisation, l'analyse et la diffusion des résultats. Ces exercices dépassent le cadre de recherches individuelles. Le projet MISSTERRE a permis de coordonner les différentes actions au niveau national. Il a aussi permis de financer l'action spécifique ESCRIME (Etude des Scénarios Climatique réalisés à l'IPSL et Météo-France) qui offre une véritable interface entre nos études scientifiques et les autres communautés (chercheurs, décideurs, industriels, grand public,...). Forts de cette expérience passée, nous proposons de continuer cette mise en commun des efforts pour l'exercice CMIP5. Les différents axes du projet sont ainsi conçus pour coordonner les simulations et les différents projets d'analyse.

Le deuxième enjeu du projet MISSTERRE est de garantir la diffusion des résultats des simulations, de renforcer les interfaces vers les autres communautés, ce qui demande à la fois de définir les différents services que nous devons assurer autour des simulations, de garantir la qualité des résultats et de standardiser les diagnostics pertinents pour différentes études d'impact. Ces aspects font déjà l'objet de réflexion dans différents projets et il faut maintenant renforcer la coordination des efforts au niveau national, en abordant conjointement les aspects concernant la grande échelle et l'échelle régionale à locale. Ils s'appuient aussi sur l'expertise acquise dans les différentes thématiques et les experts impliqués dans le projet.

Enfin, le troisième enjeu de MISSTERRE est d'offrir un forum de discussions pour le démarrage de nouvelles initiatives communes autour de thématiques scientifiques, de l'infrastructure de modélisation, de la préparation des modèles de la prochaine génération, du calcul intensif et de notre implication dans les grands projets internationaux. Les sujets à venir doivent couvrir l'avenir de nos modèles et leur évolution pour pouvoir aborder les nouvelles questions ou permettre la réalisation de simulations frontières en apparaissant comme des interlocuteurs privilégiés des grands projets de supercalculateur, au niveau national ou au niveau européen.

Pour répondre à ces objectifs, le projet s'articule autour de 3 parties regroupant respectivement les simulations et leur diffusion (section 2), les analyses, l'évaluation des modèles et l'utilisation des résultats (section 3), les modèles de la prochaine génération (section 4). Le tableau des participants joint en annexe indique les personnes concernées pour chaque partie.

## **2 Simulations et diffusion des résultats**

Le prochain rapport du groupe 1 du GIEC (GIEC AR5) est prévu pour 2013. Comme pour la précédente édition la communauté internationale se mobilise pour réaliser un ensemble coordonné de simulations. Ces simulations doivent être achevées fin 2010 pour permettre à la communauté scientifique de les analyser et de publier les résultats début 2011. Elles ont pour vocation d'être analysées par des chercheurs de tous horizons, ce qui donne d'énormes contraintes sur la gestion des données et la mise à disposition dans les bases de données.

Après avoir permis d'alerter sur les risques des changements climatiques, les simulations CMIP5 ([http://dods.ipsl.jussieu.fr/igcmg/AR5/Textes/Taylor\\_CMIP5\\_dec31.pdf](http://dods.ipsl.jussieu.fr/igcmg/AR5/Textes/Taylor_CMIP5_dec31.pdf)) doivent nous permettre de mieux évaluer la confiance que l'on peut accorder aux changements simulés, de mieux les décrire pour les éviter ou s'y adapter, de mieux évaluer l'évolution des événements extrêmes et de mieux prendre en compte les interactions entre le milieu naturel et les activités humaines. Les expériences ont été définies par les différents groupes de travail



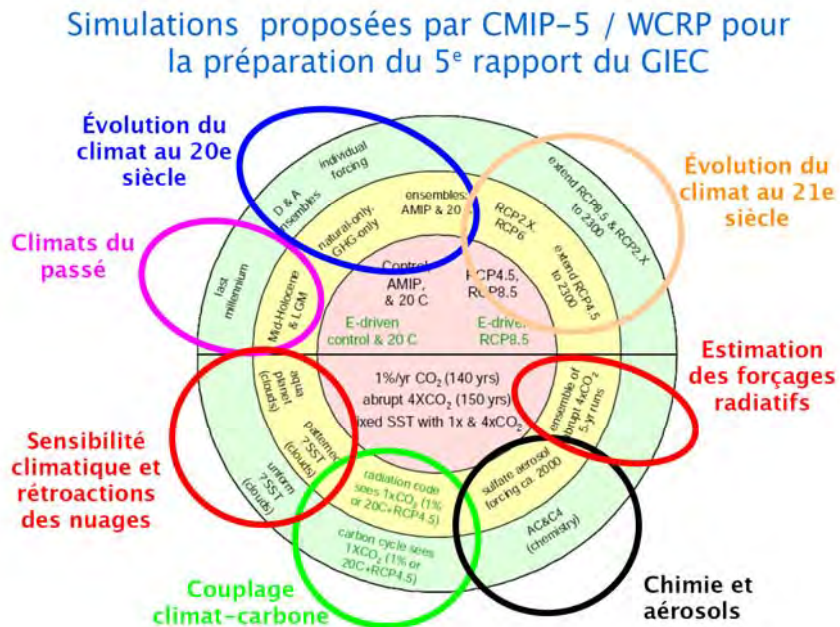
internationaux, incluant les projets C4MIP, CFMIP et PMIP dont les coordinateurs sont des chercheurs de l'IPSL. Elles comportent des simulations du climat aux échelles de temps centennales et d'autres aux échelles de temps décennales. Elles comportent également des simulations permettant de « régionaliser » les résultats des modèles globaux, en s'appuyant pour partie sur la nouvelle initiative internationale CORDEX.

## 2.1 Simulations long terme

46 participants

### Les simulations à réaliser

La figure ci-dessous résume les simulations CMIP5 long terme en faisant ressortir les différentes thématiques concernées. Le cercle central (rose) comporte les simulations minimales qui doivent être réalisées par tous les modèles climatiques. Les deux cercles suivants contiennent les autres simulations à réaliser, avec un ordre de priorité décroissant.



Ces simulations seront réalisées par des modèles incluant ou non le cycle du carbone et forcés par les concentrations en gaz à effet de serre, de façon à pouvoir comparer le climat simulé par tous les types de modèle suivant une même perturbation. Les groupes bénéficiant d'un modèle incluant le cycle du carbone sont invités à produire les flux de carbone échangés entre les différents réservoirs ainsi que des simulations complémentaires pour déterminer les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone. L'ensemble des simulations sera réalisé avec le modèle de l'IPSL pour répondre à la diversité des thématiques abordées à l'IPSL et à l'implication de nombreux chercheurs dans les projets internationaux. Côté CNRM, seule une partie des simulations sera réalisée comprenant l'ensemble des simulations minimales requises pour participer à CMIP5 (sans couplage avec le cycle du carbone), mais aussi des simulations complémentaires du climat du 20<sup>ème</sup> siècle, du dernier maximum glaciaire et en conditions idéalisées pour l'étude des rétroactions nuageuses.

### *Modèles utilisés*

Depuis les versions utilisées pour l'AR4, les modèles de climat du CNRM et de l'IPSL ont bénéficié de différentes améliorations (cf. fiche bilan).

Le pôle de modélisation de l'IPSL développe depuis plusieurs années un modèle intégré du système Terre qui permet d'aborder de façon cohérente les études du climat (précipitations, cycle hydrologique, événements météorologiques...), les études des cycles biogéochimiques (carbone, méthane, aérosols...) et leurs couplages. Ce modèle (IPSLCM5) arrive maintenant à maturité et sera notre outil de base pour les simulations à réaliser dans le cadre de CMIP5. Il couple via le coupleur OASIS3 développé au Cerfacs, la version 4 du modèle d'atmosphère LMDz avec la version NEMOv3 du modèle. La version 1.9.4 du modèle ORCHIDEE est couplée à l'atmosphère et la glace de mer LIM2 à l'océan. Pour les simulations avec cycle du carbone, le modèle PISCES de biogéochimie marine est activé, ainsi que le carbone dans ORCHIDEE. Les aérosols sont traités via le modèle INCA. Par ailleurs, nous avons également développé un modèle avec une nouvelle physique atmosphérique (cf bilan), que nous utiliserons pour réaliser un nombre limité de simulations (IPSLCM6). Au niveau de la résolution, l'ensemble des simulations sera réalisé avec un modèle de relativement basse résolution par rapport aux standards actuels (2°75 en longitude, 1,9 degrés en latitude et 39 niveaux verticaux) pour disposer assez rapidement d'un ensemble cohérent de simulations et diffuser à temps les résultats. Cette démarche permettra aussi de pouvoir réaliser des expériences de sensibilité pour mieux exploiter les résultats. Cette résolution -BR est représente néanmoins un net incrément par rapport à la résolution (3,75°x2,5° x19) utilisée pour l'AR4. Un sous-ensemble de simulations sera réalisé à plus haute résolution (-MR,2,5°x1,3°x 39)

En vue de réaliser les simulations de CMIP5, le CNRM a développé le nouveau modèle CNRM-CM5 en collaboration avec le CERFACS. La résolution horizontale de ce modèle, construit à partir du cœur couplé ARPEGE-Climat v5 (1,4°) – NEMO v3 (1°) a été doublée par rapport à celle du modèle utilisé pour l'AR4. Le nombre de niveaux verticaux passe cependant de 45 à 31. La stratosphère est donc maintenant moins bien résolue sur la verticale, mais il a été montré que cela n'est pas préjudiciable à la qualité des simulations. De plus, le gain associé en temps de calcul permet d'envisager de réaliser des ensembles de simulations du climat du 20<sup>ème</sup> siècle comportant 5 membres chacun. La nouveauté principale de ce nouveau système couplé réside dans l'externalisation du traitement des processus de surface (SURFEX) par rapport à ARPEGE-Climat. Cette opération a permis de prendre en compte de nombreuses améliorations récentes de ce traitement au sein de CNRM-CM5. Par ailleurs, la nouvelle physique d'ARPEGE-Climat, développée notamment en collaboration avec l'IPSL est actuellement en phase de test, et il semble envisageable de réaliser certaines simulations CMIP5 en l'utilisant.

Les simulations qui seront réalisées avec les différents modèles sont répertoriées dans le tableau 2.1.1. Les simulations IPSL bénéficient d'un ordinateur dédié (SX9 Genci installé au ccrt). Le groupe CNRM/CERFACS bénéficiera de près de la moitié du ordinateur SX8-R de Météo-France (environ 16 à 20 nœuds de calcul).

### *Traitement des différents forçages*

Les modèles de climat sont classiquement forcés par les concentrations en différents gaz à effet de serre, incluant l'ozone, et les aérosols. En amont des simulations des modèles de chimie atmosphérique et d'aérosols sont donc utilisés pour convertir les émissions en concentrations. L'exercice précédent ne considérait aussi que le forçage des aérosols sulfatés. Nos modèles incluent maintenant la représentation de différents types d'aérosols.



La stratégie adoptée par l'IPSL consiste à utiliser les modèles de chimie-aérosols développés à l'IPSL et couplés à la composante atmosphérique LMDZ pour fournir les distributions d'ozone et d'aérosols. Cette méthode a l'avantage de fournir des champs tri-dimensionnels en bonne adéquation avec la circulation générée par LMDZ. Ces champs seront comparés aux champs qui seront fournis au niveau international pour les groupes ne disposant pas de modèles de chimie-aérosols. Un sous-ensemble de simulations sera aussi réalisé avec les aérosols entièrement interactifs.

### Calendrier prévisionnel

Année 1 : Réalisation du cœur des simulations

Année 2 : Finalisation de l'exercice et réalisation de simulations complémentaires pour étudier les rétroactions

Année 3 : Simulations complémentaires pour étudier les rétroactions

Tableau récapitulatif des différentes simulations et nombre équivalent d'années simulées.

Type d'expérience	IPSL		CNRM	
	Simulations prévues (version modèle)	Nbr années	Simulations prévues (version modèle)	Nbr années
Simulation de contrôle pré-industriel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO2 imposé (5-BR, 5-MR, 6-BR)</li> <li>• CO2 calculé (5-BR)</li> </ul>	3100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO2 imposé</li> </ul>	1000
Historique (1850-2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation forçage (5-BR)</li> <li>• Tous forçage (3 membres)* (5-BR, 5-MR, 6MR)</li> <li>• Chaque forçage (*3) (5-BR)</li> </ul>	3750	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forc. anthro. (GES + aéro) x5</li> <li>• Forc. anthro (GES seuls) x 5</li> <li>• Forc. naturels + anthro. x 5</li> </ul>	2340
Climat futur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation forçages (5-BP)</li> <li>• Scénario RCP4.5 (*3) (5-BR, 5-MR, 6-MR)</li> <li>• Scénario RCP 8.5 (*3) (5-BR, 5-MR, 6-MR)</li> <li>• Scénario RCP2.X (*3) (5-BR, 5-MR)</li> <li>• Scénario RCP 6 (*3) (5-BR, 5-MR)</li> </ul>	3700	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scén. RCP 4.5 (2005-2300)</li> <li>• Scén. RCP 8.5 (2005-2300)</li> <li>• Scén. RCP 2.x</li> <li>• Scén. RCP 4.5 (2005-2100) x 4</li> </ul>	1065
Paleoclimat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation Holocène (5-BR, 5-MR, 6-MR)</li> <li>• Simulation LGM (5-BR, 5-MR)</li> <li>• Simulation dernier millénaire (5-BR, 5-R)</li> </ul>	6000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation LGM</li> </ul>	500
Sensibilité climatique et étude des rétroactions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1% CO2/an (5-BR, 5-MR)</li> <li>• RCP4.5 pour cycle du carbone (5-BR)</li> <li>• 1%/an jusqu'au quadruplement, 4CO2 brutal (5-BR, 5-MR, 6-MR)</li> </ul>	1200	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1% CO2 (-&gt; quadruplement)</li> <li>• 4 x CO2 brutal</li> </ul>	290

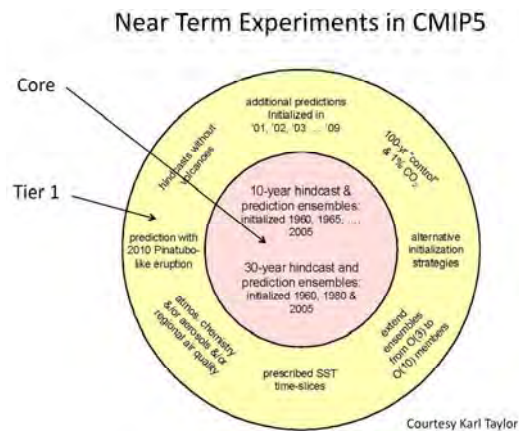
\* pour ces simulations les forçages sont le CO2 calculé ou non, naturels (solaire, volcans), GES, autres gaz, utilisation des sols (interactif ou non avec le cycle du carbone)

## 2.2 Simulations court terme

### 17 participants

La prévision décennale, thématique émergente de la recherche climatique s'attache à faire le lien entre les prévisions saisonnières à interannuelles, routinières pour ce qui est des régimes de temps sur la région nord-Atlantique – Europe (EUROSIP) ou du phénomène El Niño par exemple, et les prévisions à long terme de changement climatique. Prédire le climat 10 à 30 années en avance constitue un nouveau défi, vu notamment la pression des décideurs politiques et économiques pour mettre en place d'éventuelles mesures d'adaptation.

L'exercice CMIP5 prévoit une série d'expériences coordonnées pour l'échelle de temps décennale. Le CNRM/CERFACS et l'IPSL ont chacun décidé de participer à cet exercice.



### *Méthode d'initialisation de l'océan et simulations réalisées*

A ces échelles de temps, il semble acquis que la variabilité basse fréquence de l'océan joue un rôle important. Etant donné le manque d'observations de ce dernier notamment en subsurface, une des principales difficultés techniques de ces expériences réside dans la méthode d'initialisation du système en général et de l'océan en particulier. Plusieurs techniques sont envisagées : un rappel simple en surface vers les conditions observées (température et/ou vent), un rappel vers un état océanique ré analysé à partir d'observations disponibles ou calculé à partir d'un modèle océanique forcé, ou encore une assimilation directe des observations océaniques disponibles dans le modèle climatique couplé. Les premiers résultats de différents groupes internationaux ne permettent pas de dégager de façon évidente une méthode d'initialisation optimale. Le CNRM/CERFACS envisage de mettre à profit les études réalisées dans le cadre du projet européen ENSEMBLES puis des analyses du projet européen COMBINE, et privilégiera l'assimilation de données océaniques par des techniques variationnelles (en utilisant le système NEMOVAR développé avec le centre Européen). A l'IPSL, les études de prévision décennale se font en parallèle d'étude de prévision saisonnière à interannuelle focalisées sur les régions tropicales et pour lesquelles le rappel simple à des observations à la surface de l'océan est suffisant. Dans un second temps, des expériences plus coordonnées d'initialisation de l'océan à partir de champs océaniques à toutes les profondeurs seront exploitées pour déterminer comparer le comportement des deux modèles et les différentes techniques d'initialisation. Les simulations seront réalisées avec la version 5-MR du modèle, voire 6-MR.

Les questions scientifiques soulevées par cette thématique de la prévision climatique à l'échelle de temps décennale ne se limitent néanmoins pas seulement à la définition d'une technique d'initialisation océanique appropriée. Une fois les simulations réalisées, il s'agira d'analyser le signal climatique obtenu, de comprendre le rôle respectif des composantes atmosphériques et océaniques et d'estimer la prévisibilité éventuelle supplémentaire (en plus de celle associée aux émissions anthropiques passées et futures) liée à la mémoire associée aux modes de variabilité intrinsèque. Il faudra en particulier étudier la sensibilité de cette prévisibilité éventuelle aux échelles spatiales et temporelles considérées.. Les deux modèles utilisant des versions proches du même code océanique NEMO v3 (hors glace de mer), la communauté française dispose, comme pour les simulations à long terme, d'un ensemble d'outils adaptés pour aborder chacun de ces volets. Les diagnostics porteront d' une part sur

les questions de prévisibilité et des liens complexes entre cette dernière et les biais des modèles ou/et les erreurs sur les états initiaux. On analysera également l'impact de la technique d'initialisation sur l'état océanique mais aussi sur la réponse des modèles couplés et en particulier de leur composante atmosphérique ARPEGE-Climat et LMDZ aux échelles de temps saisonnières à décennales. La mise en œuvre de ces expériences et de ces analyses au sein de MISSTERRE est un cadre unique et indispensable pour mutualiser les efforts des deux groupes français dans cette nouvelle discipline, aussi bien pendant la phase de mise au point des simulations que pendant la phase d'analyse.

*Calendrier prévisionnel:*

mois 1-6: Mise au point des systèmes pour la prévision décennale (calendrier 365 jours,...), développement des techniques d'initialisation (nudging,...), méthodes ensemblistes

mois 6-20: Réalisation des simulations CMIP5 near term

mois 20-36: Analyse et réalisation de simulations complémentaires de sensibilité

### **2.3 Les simulations régionales**

#### **11 participants**

Le projet MISSTERRE terminé en 2009 a permis aux outils numériques de régionalisation disponibles au LMD (modèle LMDZ) et au CNRM (modèle ARPEGE-Climat zoomé et modèle à aire limitée ALADIN-Climat) d'atteindre un certain degré de maturité grâce à des développements techniques et de nombreuses études méthodologiques. Ce travail de base permet à nos deux laboratoires de participer dans de bonnes conditions à plusieurs projets européens et va leur permettre de prendre part au Chantier Méditerranée dans la partie modélisation ainsi qu'à l'exercice d'intercomparaison des modèles régionaux de climat appelé CORDEX et organisé par le WCRP dans le cadre du prochain rapport GIEC. CORDEX est le volet régional des simulations climatiques pour le futur rapport IPCC-AR5, tout comme CMIP5 pour le volet global.

Des simulations régionales en mode atmosphérique seul vont être réalisées dans un cadre déjà accepté par la communauté internationale avec des simulations hindcast (forçage par la réanalyse ERA-Interim et les SST observées sur la période 1989-2008), et des simulations scénarios (forçage par des GCMs de CMIP5 sous les scénarios RCP4.5 ou RCP8.5 sur la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et le 21<sup>ème</sup> siècle). La résolution horizontale est de 50 km et un domaine minimal est fixé pour différentes régions du globe. CORDEX met aussi en avant la mise à disposition des données pour la communauté des impacts. Sans préjugé du nombre de zones que nous pourrions couvrir au final, il est clair que le LMD et le CNRM participeront a minima à l'exercice sur l'Afrique (zone prioritaire définie par le WCRP) et sur la Méditerranée (Med-CORDEX, initiative soutenue par MedCLIVAR et réalisée de manière coordonnée avec HYMEX). Les simulations réalisées par le LMD et le CNRM seront mises à disposition des potentiels utilisateurs.

Les simulations décrites ci-dessus constituent les « CORE runs ». Cependant d'autres simulations, variantes des premières sont envisagées : forçage par ERA40 en mode hindcast, augmentation de la résolution spatiale, couplage avec d'autres composantes du système climatique, évaluation des incertitudes liées au choix du scénario. A ce titre l'exercice Med-CORDEX est intéressant car il pourra s'appuyer sur les résultats méthodologiques de MISSTERRE (résolution, couplage, diagnostics et mise à disposition des données). Pour MedCORDEX (zone Méditerranée uniquement), en plus des simulations « CORE », nous planifions des simulations atmosphériques seules à plus fine résolution (10 km sur l'ensemble

de la zone Méditerranée) et des simulations introduisant le couplage interactif océan-atmosphère puis le couplage interactif océan-atmosphère-surface-hydrologie. On obtiendra alors un modèle du système terre régional représentant les différentes composantes du cycle de l'eau du bassin versant de la mer Méditerranée. Les différentes composantes seront représentées par les modèles suivants : LMDZ-Med, ARPEGE-Climat zoomé, ALADIN-Climat pour l'atmosphère ; NEMO-MED8 et NEMO-MED12 pour l'océan ; SURFEX-ISBA ou ORCHIDEE pour les surfaces continentales incluant l'hydrologie 1D et enfin TRIP pour le ruissellement des fleuves. Quelques simulations seront également réalisées avec le modèle WRF

Grâce à ces nouvelles simulations identifiées comme appartenant aux « TIER1 » et « TIER2 » de l'exercice MedCORDEX, nous pourrons analyser la valeur ajoutée de la très haute résolution climatique (10 km versus 50 km) pour un climat tel que le climat méditerranéen. Par ailleurs, la mise en place des systèmes terre régionaux nous permettra de mesurer la valeur ajoutée apportée par la prise en compte des interactions haute fréquence et haute résolution entre les différentes composantes du système terre entrant en jeu dans le cycle de l'eau régional. Cette valeur ajoutée sera mesurée sur la simulation à grande échelle du climat méditerranéen, les bilans énergétiques et thermiques du bassin et sur les extrêmes climatiques méditerranéen (dépressions, vents forts, pluies intenses, sécheresses, canicules) en accord avec les thématiques scientifiques d'HYMEX. Les études de valeur ajoutée tireront partie de l'approche multi-modèle (LMD, CNRM, les partenaires de MedCORDEX) permettant de trier entre les résultats modèle-dépendants et les résultats scientifiquement robustes. Notons que ces nouveaux modèles pourront également contribuer à d'autres programmes du Chantier Méditerranéen comme MERMEX et CHARMEX.

#### *Calendrier*

- Année 1 : Simulations CORDEX-CORE (Afrique, Méditerranée), période ERA-Interim (50km)  
Mise en place des modèles à très haute résolution (10 km)
- Année 2 : Simulations CORDEX-CORE (Afrique, Méditerranée), scénarios du 21<sup>ème</sup> siècle, 50 km  
Simulations MedCORDEX-TIER1 à très haute résolution  
Mise en place des modèles du système terre régional
- Année 3 : Simulations MedCORDEX-TIER2 utilisant les modèles de système terre régional  
Distribution des données de l'exercice CORDEX  
Participation active au programme HYMEX et interactions avec les autres programmes du Chantier Méditerranéen

## **2.4 Diffusion dans la base de données distribuée CMIP5**

### **13 participants**

Le succès des analyses des simulations CMIP3 pour préparer le dernier rapport du GIEC est aussi dû à la centralisation des résultats dans la base de données du PCMDI (Livermore, USA) et la standardisation des formats utilisés. Le nouvel exercice est d'une plus grande ampleur et nous devons nous préparer à intégrer nos données dans une base de données distribuée. La mise en forme des données et leur diffusion a mobilisé énormément de ressources humaines lors du précédent exercice. A cause de l'augmentation de la résolution, de la complexité des modèles et les analyses prévues de plus en plus fines, le nombre de variable et le volume de données à stocker pour CMIP5 est encore plus colossal.

L'IPSL a pour objectif d'être un nœud de la base de données distribuée, ce qui ajoute des contraintes techniques et demande de travailler en forte interaction avec les centres de calcul où sont stockés les résultats. Les solutions techniques sont en cours de finalisation et de test au niveau international. Pour atteindre ces objectifs nous avons déjà lancé plusieurs actions, en particulier au travers du projet PRODIGUER soutenu par le Gis climat-Environnement, pour obtenir des moyens supplémentaires et être opérationnel à temps pour la diffusion des résultats. Le stockage des données brutes est estimé entre 600 et 1000 TB pour les simulations IPSL. Un sous-ensemble d'environ compris entre 250 et 500 TB sera distribué pour CMIP5. Les différentes actions s'appuient aussi sur les projets européens METAFOR pour la description des données et IS-ENES pour leur gestion et la diffusion. Le travail à effectuer concerne donc l'implémentation des serveurs et logiciel nécessaires pour être un nœud, les tests de mise en réseau de nos données, la transformation des résultats dans le format standard, la fourniture de diagnostics particuliers, les tests qualité des données et leur pérennisation.

Au moment de la rédaction de cette proposition, le mode de diffusion des résultats des simulations du CNRM dans la base de données distribuée n'est pas encore définitivement arrêté.

### *Calendrier*

Le calendrier est dicté par l'exercice CMIP5. Le système est en cours de test avec 7 sites pilotes dont 2 en Europe (BADC et MPI) qui serviront de relais aux groupes européens pour rassembler les variables les plus utilisées. Fin 2009 le système doit être déployé auprès de tous les groupes participants. Cette étape consiste à implémenter les ressources informatiques nécessaires et tester l'opérabilité avec les autres centres et résoudre les problèmes liés à la sécurité informatique. Les données doivent aussi pouvoir être traitées de façon automatique pour éviter les erreurs lors de leur manipulation. L'ensemble doit être opérationnel pour recevoir les résultats de modèles dès l'automne 2007. La diffusion doit rester opérationnelle pendant toute la phase d'exploitation qui s'échelonne jusqu'à la parution du prochain rapport du GIEC et certainement au-delà.

## **3 Evaluation, analyses et utilisation des résultats**

### **3.1 La poursuite d'ESCRIME**

#### **42 participants**

L'ampleur des analyses réalisées au niveau international et national à l'aide des simulations CMIP3 laisse présager d'une forte activité scientifique autour des résultats des simulations CMIP5. Une partie de ces recherches seront coordonnées par différents projets internationaux. Nous proposons de relayer à nouveau l'activité internationale par un appel à projets d'analyses des simulations françaises de façon à favoriser les échanges scientifiques au travers des différentes thématiques ESCRIME représentées par l'ensemble des participants au projet (scénarios globaux à long et court terme, sensibilité climatique, variabilité climatique, couplage climat-carbone, hydrologie, climat régional, détection/attribution des changements climatiques). Les simulations CMIP5 explorent une gamme encore plus large de sujets et au-delà des thématiques déjà abordées pour l'AR4, un éclairage sera donné sur l'analyse des forçages et de leurs incertitudes, le rôle de l'utilisation des sols, des différents types d'aérosols, et les questions de prévisibilité climatique pour les 30 prochaines années. Les simulations permettront d'aborder certains sujets comme la sensibilité climatique ou les modifications du cycle hydrologique à différentes échelles de temps, en mettant en commun des analyses des climats présent, passés et futurs. Les projets pourront également considérer

l'ensemble des modèles participant à l'exercice CMIP5, les approches multi-modèles s'avérant indispensables pour pouvoir établir si les résultats sont cohérents ou dépendent du modèle utilisé. Nous n'avons pas encore défini la forme que nous donnerons à la synthèse des résultats. Cet aspect sera traité lors d'une réunion dédiée aux analyses à mi-parcours du projet.

### *Calendrier*

Année 1 : Appel à sous projet et formation de petits groupes de travail

Année 2 : Réunion de mi-parcours pour faire le point sur les résultats obtenus

Année 2 : Publication d'articles de synthèse ou autre valorisation

## **3.2 L'évaluation des modèles**

### **47 participants**

L'évaluation des modèles et la compréhension des principaux biais des simulations climatiques et de la façon dont ils affectent les résultats est au cœur de nos préoccupations. L'évaluation est une étape importante pour déterminer les différentes sources d'incertitudes des simulations et pour mesurer les progrès entre différentes versions. Les biais reflètent l'état de notre compréhension du système climatique. En comprendre l'origine et les corriger participent à l'approfondissement de notre connaissance du climat et de ses variations. L'évaluation des modèles de climat nécessite de développer une méthodologie permettant de déterminer les éléments clefs susceptibles d'affecter les résultats des changements climatiques. Il faut être aussi en mesure de distinguer ce qui provient des composantes individuelles et la part liée aux couplages, ce qui nécessite en général de nombreuses simulations de sensibilité. L'objectif de MISSTERRE est de rassembler cette expertise, de synthétiser les différents résultats, de vérifier leur cohérence, et de proposer une mise à disposition d'un sous-ensemble de diagnostics clefs, qui sera alimenté au fur et à mesure.

Dans les différents groupes les principales actions autour de l'évaluation s'inscrivent dans la continuité et le renforcement des méthodologies développées pour les simulations AR5 ou la mise en place de nouveaux modèles (cf bilan). Le travail réalisé dans MISSTERRE débouchera sur :

- une comparaison des versions AR5 des modèles avec les versions utilisées pour AR4
- La mise au point de stratégies de validation incluant une réflexion sur les métriques et le développement de méthodologies (en particulier en liaison avec le nouveau projet LEFE-DEPHY)
- la poursuite des développements de diagnostics spécifiques permettant d'évaluer les processus et les rétroactions.
- L'organisation du retour d'expertise des projets d'analyses pour identifier les atouts et faiblesses des modèles et les diagnostics à pérenniser.

Pour atteindre ces objectifs nous bénéficierons de la participation des différents chercheurs dans les projets d'intercomparaison (CFMIP, pour les nuages, C4MIP, pour le cycle du carbone, PMIP, pour les paléoclimats, AEROCOM, pour les aérosols, CCMval, pour la chimie, et LUCID pour l'utilisation des terres), ainsi que de l'initiative développée dans les projets FP7 IS-ENES pour faciliter l'accès à et la standardisation des diagnostics. Nous avons convenu lors des journées MISSTERRE de mai d'organiser un appel à diagnostic et évaluation dès que la production des simulations CMIP5 aura démarré. Pour cet exercice nous envisageons une série d'articles présentant les deux modèles français et leurs performances vis-à-vis de différentes thématiques. Cet ensemble d'articles pourra faire l'objet d'un numéro spécial d'une revue à comité de lecture.

Du côté de l'IPSL l'accent sera mis sur l'ajustement du système couple dans les différentes configurations, la sensibilité climatique et les nuages, la variabilité climatique et ENSO, le cycle du carbone et la comparaison aux stations de flux, la circulation thermohaline, les aérosols, l'utilisation des sols.

Côté CNRM, l'évaluation des modèles portera notamment sur le cycle hydrologique, la zone de convergence inter-tropicale, certains modes de variabilité interannuels ou intrasaisonniers, et certains événements climatiques extrêmes. Une attention particulière sera portée aux rétroactions nuageuses dans le cadre du projet européen EUCLIPSE.

L'essentiel de la contribution CERFACS portera sur les questions de prévisibilité décennale, les modes de variabilité climatique et leur interaction avec le forçage anthropique, et sur les modifications des connexions tropiques-extratropiques pour un large spectre d'échelle de temps (intra-saisonnier à décennal).

Lors du précédent exercice nous avons démarré un catalogue des résultats des modèles du CNRM et de l'IPSL à partir des différentes publications. L'organisation de la base de données ne permettait pas de savoir quels modèles entraient dans les différents articles répertoriés au PCMDI, ce qui a rendu l'exercice assez fastidieux et inachevé. La base de données CMIP5 devrait permettre de mieux suivre l'utilisation des modèles. Nous souhaitons donc reprendre cette action de façon à bénéficier de façon indirecte des diagnostics mis au point par d'autres et d'identifier des diagnostics pertinents à implémenter de façon standard dans nos propres catalogues de métriques et diagnostics.

#### *Calendrier*

Année 1 : Appel à publications présentant les modèles et les développements depuis l'AR4

Année 2 : Mise en forme de publication

Réunions en petits groupes sur la stratégie d'évaluation

Année 3 : Synthèse des atouts et faiblesses des modèles IPSL et CNRM à partir des différentes analyses CMIP5

### **3.3 Vers la mise en place d'un service de distribution et de pré-traitement des données au niveau national.**

#### **17 participants**

Les utilisateurs des résultats des simulations globales ou régionales deviennent de plus en plus nombreux que ce soit pour des études d'impact ou l'aide à la décision. Les sujets couverts sont très larges. Il devient urgent de rationaliser la diffusion des données vers les autres communautés et d'offrir un véritable service aux utilisateurs. Ce service doit permettre à la fois de faciliter l'accès aux données et de garantir la qualité des différentes études réalisées à partir de ces données. La troisième conférence mondiale sur le climat qui s'est tenue à Genève du 31 août au 4 septembre 2009 a lancé un appel fort au développement des "services climatiques". Notre proposition entre dans ce cadre et concerne l'une des briques de base de ce nouveau type d'édifice.

La réflexion est engagée en France via différents projets ou réunions entre les climatologues et les utilisateurs. Des actions concrètes commencent à émerger. C'est le cas du projet Drias du GICC (coordinateur : P. Dandin, Meteo-France, [http://www.gip-ecofor.org/publi/page.php?id=413&rang=0&domain=38&lang=fr\\_FR](http://www.gip-ecofor.org/publi/page.php?id=413&rang=0&domain=38&lang=fr_FR)) pour la diffusion des simulations régionalisées sur la France. Ce projet regroupe un sous-ensemble de modélisateurs impliqués dans MISSTERRE. Il doit faciliter l'accès aux simulations et le bon emploi des scénarios à des acteurs étrangers à la modélisation climatique (équipes de



recherche, services de l'Etat, bureaux d'études) et soulager les équipes de recherche des tâches de livraison et, dans la limite du possible et raisonnable, d'une partie de l'accompagnement. En revanche, il est indispensable que les équipes de recherche soient fortement impliquées au sein des cellules d'expertise qui doivent être associées en amont des questions techniques sur la fourniture des données. Les partenaires de MISSTERRE sont aussi engagés dans le projet d'infrastructure européen IS-ENES qui comporte une partie dédiée au bon usage des simulations pour les études d'impact à partir d'exemples et de la mise à disposition des données et du savoir-faire via internet.

Nous proposons d'engager une réflexion permettant d'assurer un véritable service de distribution au niveau national dont DRIAS serait l'une des briques et qui considérerait les simulations globales et régionales, les méthodes de régionalisation et la mise à disposition systématique de variables prétraitées comme les indices climatiques. Cette réflexion devrait se concrétiser par un dépôt de dossier de labellisation.

#### *Calendrier*

Années 1 : Synthèse des actions menée dans les différents projets

Elaboration d'un document identifiant les besoins

Année 2 : Elargissement de la distribution des données CMIP5 vers les autres communautés

Proposition d'analyses spécifiques en lien avec les utilisateurs

Année 3 : Retour d'expertise des utilisateurs

Elaboration d'un cahier des charges pour déterminer la forme à donner à un service climatique et à l'articulation entre cette activité et nos activités de recherche amont.

## **4 Prochaines générations de modèles**

Nous avons regroupé dans cette partie les développements connus concernant les différents modèles et des éléments plus prospectifs. Plusieurs voies seront menées en parallèle pour faire progresser les modèles en fonction de nos questions scientifiques. Elles concernent le développement de paramétrisations, l'introduction de nouveaux couplages, la réflexion autour de nouvelles plates formes de modélisation qui permettent d'utiliser des milliers de processeurs et la préparation de configurations de très haute résolution. La question de l'avenir de nos modèles et la façon dont les différents développements s'articuleront entre Meteo-France, le CERFACS et l'IPSL est également posée. Un travail prospectif commun est prévu et MISSTERRE servira de cadre de travail.

### **4.1 Introduction de nouvelles paramétrisations physiques et de nouveaux couplages.**

#### **47 participants**

Nos modèles sont en constante évolution. Plusieurs développements en cours dans les composantes individuelles seront petits à petit introduites dans les versions standards et les versions couplées des modèles. Pour la composante atmosphérique, le travail se fera en interaction avec le projet DEPHY et l'accent sera mis sur l'apport des nouvelles paramétrisations physiques dans le système couplé. La complexité des systèmes est aussi en croissance avec l'ajout de nouveaux cycles biogéochimiques ou le couplage avec la calotte de glace. Ces derniers développements seront considérés dans le projet européen COMBINE. MISSTERRE favorisera le dialogue entre les équipes françaises.

Du côté IPSL l'accent sera mis sur la nouvelle physique atmosphérique et son utilisation pour un sous-ensemble des simulations CMIP5. Plusieurs tests de sensibilité seront réalisés pour mettre au point le modèle et comprendre les résultats. La version du modèle d'océan NEMO

utilisée pour l'AR5 comporte de nombreuses améliorations des paramétrisations physiques de l'océan. La nouvelle version du modèle de glace LIM3 est disponible, mais n'a pas encore été testée dans le couplage avec l'océan. Cette étape sera réalisée l'an prochain. Le couplage complet entre le climat, le cycle du carbone et les aérosols est également prévu à échéance de 2 ans. Les cycles seront ensuite complétés par l'ajout du cycle du méthane, incluant les zones inondées, et de l'azote. Enfin, une étape importante concerne le couplage entre les calottes de Glace développées au LGGE à Grenoble (C. Ritz) et le modèle de l'IPSL en se basant sur l'expertise acquise pour le couplage entre cette calotte et des modèles de complexité intermédiaires.

Année 1 : simulations IPSL avec nouvelle physique atmosphérique

Simulations avec aérosols interactifs

Année 2 : simulations IPSL avec nouvelle version du modèle de glace de mer

Simulations IPSL couplées climat-carbone-aérosols

Simulations préliminaires avec le modèle de calotte

Années 3. Simulations IPSL incluant le modèle de calotte.

Poursuite de l'insertion de nouvelles paramétrisations physiques permettant de mieux représenter les phénomènes météorologiques

## **4.2 Vers de nouvelles plate-formes de modélisation**

### **19 participants**

L'augmentation de la puissance de calcul et la diversité des ordinateurs nous obligent aussi à revoir constamment les performances informatiques des modèles, leur portage sur des supports variés et l'adéquation entre les modèles et leur environnement de calcul et de post-traitement. L'enjeu est aussi que les différentes composantes du modèle de climat puissent évoluer pour leurs propres applications et que, suivant les sujets abordés, les modèles tournent sur des ordinateurs de bureau ou sur les futurs supers calculateurs de classe européenne (projet PRACE), et puissent couvrir une large gamme de résolutions.

Les projets d'évolution de la plate-forme de modélisation de l'IPSL visent à remplir ces différentes contraintes. L'effort de parallélisation et le déploiement de versions parallèles sera poursuivi. Nous utilisons 4 niveaux de parallélisme : couplage multi-code, parallélisation en mémoire partagé (MPI), parallélisation en mémoire distribuée (OpenMP) et vectorisation. Cela permet la performance, mais rend les portages complexes. Le développement de la bibliothèque d'entrées/sorties parallèles sera poursuivi, en lien avec le projet IsENES (FP7). Un accent particulier sera porté à l'augmentation de la fiabilité et de la qualité de notre chaîne de modélisation. Cela passera par l'évolution de l'infrastructure de pré et post-traitement (atlas, monitoring des simulations, indicateurs et métriques, etc ...). Enfin, le lien avec les données, et leur distribution sera renforcé, en lien avec le projet PRODIGUER, et en collaboration avec EPOCA (FP7).

Au-delà de ces étapes connues, nous allons nous préparer à l'utilisation des machines pétaflopiques (10<sup>15</sup> opérations flottantes par secondes), ce qui passe par le développement et l'implémentation de nouveaux cœurs dynamiques des modèles d'atmosphère et d'océan, adaptés au calcul massivement parallèle. L'objectif est de garder la modularité des codes pour préserver l'indépendance des parties dynamique et physique et garder des possibilités d'évolution différenciées entre ces deux aspects. Du côté de l'IPSL, un premier développement consiste à implémenter un cœur dynamique basé sur un maillage icosaédrique qui permet de s'affranchir des singularités aux pôles et d'envisager une parallélisation massive. En parallèle une étude des différents cœurs dynamiques disponibles dans les autres équipes sera menée pour les codes de circulation atmosphérique et océanique, de façon à déterminer leurs qualités dynamiques et numériques et leurs performances informatiques.

Nous explorerons aussi la possibilité et l'intérêt que l'océan et l'atmosphère partagent le même noyau dynamique.

Il devient également opportun d'envisager de partager un même cœur dynamique entre les modèles de l'IPSL et du CNRM. Les discussions sont engagées pour bien comprendre les contraintes propres à chaque groupe et discuter les différentes possibilités. Le projet MISSTERRE permettra de mettre en place les réunions nécessaires et de démarrer les tests prospectifs. Cette réflexion sera aussi menée en liaison avec l'exercice de prospective du LEFE.

#### *Calendrier*

Année 1 : Poursuite de la parallélisation et du déploiement des versions parallèles du modèle de l'IPSL

Bibliothèque parallèle pour les entrées/sorties

Réunion sur l'avenir des modèles

Année 2 : Retour d'expérience de l'implémentation des différents modèles sur différents types d'ordinateurs

Premier bilan sur les cœurs dynamique et mise en place d'un plan de marche pour la suite

Année 3 : Tests de nouvelles dynamiques

### **4.3 Simulations « frontières »**

#### **15 participants**

Le calcul pétaflopique va également ouvrir des possibilités d'exploration du système climatique. Plusieurs documents ont déjà présenté les sauts attendus en fonction des nouvelles possibilités de calcul. Il est donc important de se préparer à lancer des simulations à forte retombées scientifiques et éventuellement de se partager le travail entre les différents groupes de modélisation. Ces simulations demandent de préparer dès maintenant les configurations de modèles que nous utiliserons.

Dans la suite des expériences menées au Japon autour des simulations couplées océan atmosphère il est envisagé de développer un couplage haute résolution avec l'océan NEMO ORCA025 (ou ORCA12). Ce couplage sera réalisé tout d'abord avec le modèle allemand ECHAM T319. Dans un deuxième temps, le couplage avec les modèles d'atmosphère LMDz ou Arpège sera envisagé. Ce projet fait l'objet d'une collaboration entre IPSL et CERFACS dans le cadre d'IS ENES. IL permettra de tester la faisabilité sur les futurs calculateurs européens.

Pour aller à des résolutions bien supérieures, un couplage entre NEMO et le modèle régional d'atmosphère WRF est prévu sur l'océan indien. Ces configurations s'avèrent particulièrement prometteuses pour étudier le développement des cyclones tropicaux. D'autres possibilités ont également été évoquées pour étudier finement la mousson africaine dans le cadre du projet AMMA.

D'autres projets verront certainement le jour dans les 3 années qui viennent. Afin de ne pas dupliquer les efforts, nous utiliserons le projet MISSTERRE comme catalyseur d'idées, via des forums de discussions et le lancement d'études préparatoires regroupant des personnes des différents laboratoires impliqués.

#### *Calendrier prévisionnel*

Année 1 : Préparation version haute résolution du modèle de l'IPSL

Année 2 : Identification de simulations « frontières »

Année 3 : Préparation des configurations de modèles requises pour les différentes applications.

### Résultats attendus

- Réalisation des simulations CMIP5
- Synthèse des principaux résultats des projets d'analyse
- Evaluation scientifique des modèles couvrant une large gamme de phénomènes
- Analyse des rétroactions physiques et entre le climat et les cycles biogéochimiques
- Analyse des modèles français dans l'exercice de simulation CMIP5
- Evaluation de prévisibilité à l'échelle décennale
- Publications scientifiques en particulier associant des co-auteurs des différents laboratoires partenaires
- Large diffusion des sorties des simulations et identification des services s'y rattachant
- Plan de route pour le développement des futures générations de modèles

### Moyens nécessaires à la réalisation du projet

- ♦ *Equipements disponibles ou nécessaires à la réalisation du projet*

La réalisation de ce projet s'appuie sur les moyens de calcul nationaux, les équipements informatiques des différents laboratoires et les réseaux. L'équipement informatique doit être renouvelé régulièrement pour bénéficier des avancées technologiques. Les ressources de stockage et le matériel nécessaire pour faire fonctionner les bases de données des résultats sont aussi les principaux postes de la demande.

- ♦ *Instruments, équipements ou services d'observation nationaux sollicités*

NEMO : modèle d'océan

GENCI pour le calcul scientifique : les simulations CMIP5 vont mobiliser le SX9 pendant une année pour l'IPSL

Centre de calcul de Météo-France : XXX heures vont être dédiées à CMIP5

- ♦ *Fonctionnement<sup>2</sup>*

#### IPSL

Publications (rapports ou articles) : 3\*3000=9000€

Rémunération de stage (M1 ou M2), 3 par an : 3\*4500=13500€

#### CNRM

Publications : 6000€

Stagiaires M1 ou M2 (1 par an) : 3\*2500=7500€

#### CERFACS

Publications (2 par an) : 9000€

Stagiaires M1 ou M2 (1 par an) : 3\*2500=7500€

année 1	année 2	année 3	TOTAL
---------	---------	---------	-------

---

<sup>2</sup> A détailler et justifier poste par poste<sup>2</sup> pour toute la durée du projet. Ceci inclus notamment fournitures, publications, petit équipement, ...

Coordination	0	0	0	0
IPSL	7500	7500	7500	22500
CNRM	4500	4500	4500	13500
CERFACS	5500	5500	5500	16500
Total	17500	17500	17500	52500

♦ *Missions*<sup>3</sup>

Plusieurs types de missions sont considérés dans le budget. Au niveau de la coordination du projet nous avons rassemblé les réunions du projet concernant l'ensemble des participants.

Les réunions faisant intervenir un nombre réduit de personne pour un thème particulier ou les participations aux conférences ou groupes de travail internationaux font l'objet de demandes séparées dans chacun des groupes.

Les frais de coordination seront gérés par l'IPSL. De même, le projet demande de fortes interactions avec nos collègues de Louvain la Neuve (Belgique) et de Grenoble. Ces missions son également considérées dans le budget de l'IPSL.

La répartition est la suivante :

IPSL

Coordination

Réunions du projet (environ 60 participants ) :  $2 \times 4200 = 8400 \text{€}$

- salle, les pauses café et les repas pour 2 jours ainsi que quelques voyages

Réunion pour préparer les publications de synthèse :  $2 \times 1440 = 2880 \text{€}$

Réunion avec les utilisateurs :  $1 \times 2400$

-Frais 1 journée pour 60 participants incluant quelques voyages pour invités extérieurs

Autres

Réunions sur des thématiques spécifiques (3 personnes) :  $6 \times 1080 = 6400 \text{€}$

Frais de déplacement de nos collègues de Louvain-la-Neuve :  $9 \times 260 = 2340 \text{€}$

Frais de déplacement de nos collègues de Grenoble :  $12 \times 260 = 3120 \text{€}$

Participation à l'EGU pour 4 personnes par an :  $12 \times 1500 = 18000 \text{€}$

Participation aux colloques ou atelier internationaux pour 3 personnes par an :  $9 \times 2000 = 18000 \text{€}$

CNRM

Réunions sur thématiques spécifiques :  $2 \times 1080 = 2160 \text{€}$

Participation EGU :  $6 \times 1500 = 9000 \text{€}$

Participation colloques ou ateliers internationaux :  $4 \times 2000 = 8000 \text{€}$

CERFACS

Participation EGU :  $6 \times 1500 = 9000 \text{€}$

Participation colloques ou ateliers internationaux :  $3 \times 2000 = 6000 \text{€}$

	année 1	année 2	année 3	TOTAL
Coordination	1440,00	8040,00	4200,00	13680,00

<sup>3</sup> A détailler et justifier poste par poste pour toute la durée du projet

IPSL	15980,00	15980,00	15980,00	47940,00
CNRM	6386,67	6386,67	6386,67	19160,00
CERFACS	5000,00	5000,00	5000,00	15000,00
Total	28806,67			28806,67

♦ *Petit équipement<sup>4</sup>*

Les principales demandes concernent la jouvence des postes de travail des personnes impliquées dans le projet. On compte un renouvellement par personne en moyenne tous les 3 ans. Le matériel informatique nécessaire au stockage des données et à la diffusion des résultats fait aussi parti de la demande.

La répartition est la suivante

IPSL

Petit matériel informatique pour la distribution des données = $3*200=6000€$

Jouvence station de travail pour 3 personnes/an =  $9*1500=13500€$

Augmentation de la capacité de stockage = $3*3000=9000€$

CNRM

Serveur de fichier et une baie de 7,5To =  $13000€(TTC)$

Jouvence PC :  $6*1300=7800€$

CERFACS

Jouvence Poste Linux :  $6000€$

	année 1	année 2	année 3	TOTAL
Coordination	0,00	0,00	0,00	0,00
IPSL	9500,00	9500,00	9500,00	28500,00
CNRM	6933,33	6933,33	6933,33	20800,00
CERFACS	2000,00	2000,00	2000,00	6000,00
Total	18433,33	18433,33	18433,33	55300,00

♦ *Demandes de label pour moyens complémentaires*

*xPersonnel temporaire<sup>5</sup> (doc, post-docs, cdd,...) 1 CDD valorisation pour IPSL et 1 pour météo-France*

*xTemps calcul<sup>6</sup>*

**Co-financements acquis ou soumis (hors INSU)**

Plusieurs projets soutiendront l'activité de modélisation pour les 3 prochaines années

Au niveau européen

Projet FP7 COMBINE (coord. M. Giorgetta, MPI, Allemagne) (IPSL environ 200 k€ €/an, 2,3CDD/an contribuant aux nouveaux couplages, cycle du carbone et aérosols ; CERFACS,

<sup>4</sup> Inférieur à 10-15k€

<sup>5</sup> AO spécifiques des organismes. Préciser : sujet, organisme(s) sollicité(s), durée, demandeur, références Labintel (si CNRS)

<sup>6</sup> AO IDRIS, CINES, GRILLES ...

un total de 257 k€ pour les 4 ans, contribuant au travail sur la réalisation des simulations décennales et sur l'assimilation de données océaniques pour les états initiaux)

Projet e-infrastructure FP7 IS-ENES (coord. S. Joussaume)

IPSL : environ 412 k€/an, 3 CCD/an sur le projet, contribuant partiellement à MISSTERRE ; CERFACS: 660 KEuros de 03/2009 à 02/2013, environ 4 CDD de 18mois sur le projet contribuant partiellement à MISSTERRE

Projet infrastructure FP7 METAFOR (coord. E. Guilyardi)

IPSL environ 105 k€/an ; CERFACS: 172 KEuros sur 3 ans de 03/2008 à 02/2011, 1 post-doc de 24 mois sur le projet contribuant partiellement à MISSTERRE

Projet FP7 EUCLIPSE (Coord. (Coord. P. Siebesma, KNMI) (IPSL: 450 keuros et Meteo-France: 289 keuros sur 4 ans - chiffres non encore confirmés, en attente de l'Europe)

Projet FP6-CIRCE (coord. A. Navarra, Italie, financement IPSL, 300 k€)

Projet FP7 THOR (coord. D. Quadfasel).

### **Valorisation des travaux antérieurs**

#### *Références bibliographiques*

Cf liste données en annexe

*Liste des contrats obtenus au cours des quatre dernières années :*  
cf rendu LEFE du projet MISSTERRE

Le projet européen ENSEMBLES, les ANR calcul intensif CICLE et INLOES ont été les principaux projets associés à MISSTERRE ces 3 dernières années. Les différentes personnes rattachées à MISSTERRE bénéficient aussi d'autres contrats à titre individuels que nous n'avons pas pris en compte.



