

# Climats des 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles

**Pierre Friedlingstein et Jean-Louis Dufresne**

Autres personnes impliquées ( $\geq 20\%$  dans MC<sup>2</sup>) :

- LSCE: Y. Balkanski, L. Bopp, P. Braconnot, P. Brockman, A. Caubel, E. Davin, N. deNoblet, D. Hauglustaine, J. Lathière, O. Marti, M. Schulz, P. Smith, D. Swingedouw, N. Viovy, N. Vuichard
- LMD : S. Bony, F. Codron, F. D'Andrea, J.-P. Duvel, L. Fairhead, J.-Y. Grandpeix, F. Hourdin, S. Jamili, I. Musat, R. Roca
- LODYC J.-P. Boulanger, A. Lazar, J. Leloup, P. Terray, J. Vialard
- LOA O. Boucher
- LGGE G. Krinner
- IPSL R. Benshila, P. Cadule, S. Denvil, M.-A. Filiberti, C. Senior

## 1 Contexte

Le principal objectif du groupe 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> consiste à quantifier les rôles respectifs de différentes perturbations anthropiques et d'estimer la réponse du système couplé (climat-cycle) à ces perturbations, et ce pour la période historique et pour le futur. Différents axes de recherche sont privilégiés et correspondent à des configurations particulières du modèle de climat de l'IPSL. Ils concernent :

- l'étude du changement climatique à partir de scénarios standards qui suivent les protocoles établis par le GIEC ;
- l'étude des rétroactions climatiques et de leurs incertitudes;
- l'étude des changements de variabilité et de dynamique du climat;
- l'étude du cycle hydrologique de l'océan, de la façon dont il va être modifié par la perturbation anthropique et de son rôle dans le changement de climat (rôle du sel, circulation thermohaline) ;
- le rôle de l'utilisation des sols ;
- le couplage climat-cycle du carbone ;
- la quantification de l'impact relatif des différents gaz à effet de serre et des aérosols (BC, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>).

Deux projets, initiés au cours des deux dernières années, permettent de soutenir ces activités pour les 3 à 5 années qui viennent. Le projet "MC2: Modélisation Climat-Cycle" (ACI-FNS "risques naturels et changement climatique", coordonné par P. Friedlingstein et J.-L. Dufresne) et le projet européen ENSEMBLES, coordonné par D. Griggs (Hadley Centre), qui a démarré en septembre 2004. ENSEMBLES est un projet intégré regroupant 70 partenaires, dont l'objectif est de munir l'Europe d'un système de prévision climatique couvrant les échelles de temps saisonnières à multidécennales. Ce projet intègre des simulations climatiques globales et régionales, les liens avec les modèles d'impact (agriculture, industrie), la concertation avec les économistes, et la formation.

## 2 Bilan

### 2.1 Réalisation et analyse des simulations IPCC

De très nombreuses simulations d'ajustement et de mise à l'équilibre ont été réalisées avec le modèle couplé IPSL-CM4 (cf. fiche Couplé). Ensuite, les simulations qui rentreront dans la base de donnée pour le quatrième rapport d'évaluation de l'IPCC (IPCC-AR4) ont été lancées.

Il s'agit des simulations suivantes:

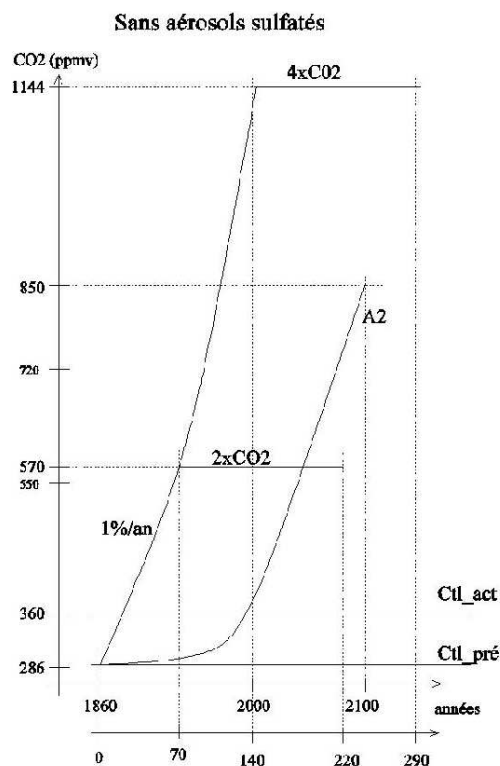
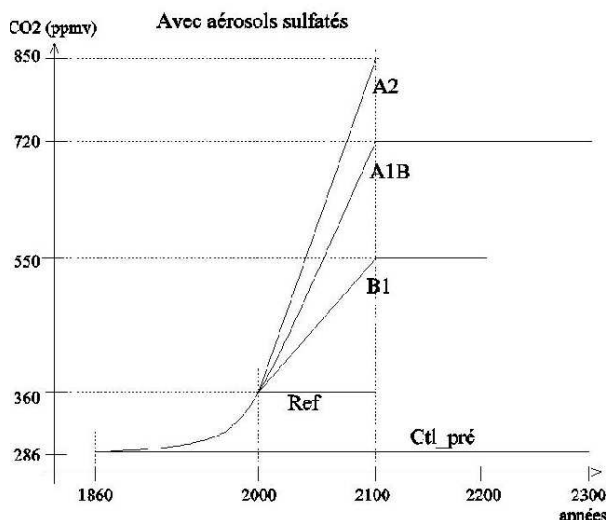
- 2L18 Simulation "historique" (1860-2000), avec les aérosols sulfatés et les concentrations observées des gaz à effet de serre.
- 2L22 Simulation "historique" (1860-2000), avec aérosols sulfatés constants (1860), et les concentrations observées des gaz à effet de serre.
- 2L20 Simulation de contrôle, avec les concentrations actuelles (1980) des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés.
- 2L24 Simulation de contrôle, avec les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés de l'époque préindustrielle (année 1860)
- 2L23 Simulations type CMIP : accroissement idéalisé de CO<sub>2</sub> et stabilisation à 2xCO<sub>2</sub> et 4xCO<sub>2</sub>

Actuellement les simulations historiques sont finies. Les simulations futures 2000-2100 qui adopteront les scénarios de concentration SRES A2, A1B et B1 sont en machine. Enfin, des stabilisations seront également effectuées après 2100 (après 2000 pour le scénario "committed climate change")

Des diagnostics sont effectués automatiquement "en ligne" tels que des séries temporelles, des moyennes saisonnière, annuelles, par décade,... ainsi que des calculs d'indices climatiques.

Les sorties de ces simulations sont disponibles par DODS via la page web du projet MC<sup>2</sup> (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr/simules.html>).

## Scenarii utilisés pour le prochain rapport du GIEC



## 2.2 Analyses de la variabilité tropicale

Atlantique Tropical: Une simulation de contrôle effectuée avec une version intermédiaire du modèle a été comparée aux observations, à des simulations océaniques forcées, à d'autres simulations couplées disponibles, et a été analysée sous l'angle des processus océaniques de transfert entre la surface et la thermocline. Les principaux résultats sont les suivants : Cette simulation s'avère avoir l'un des meilleurs cycle saisonnier en température et salinité des runs couplés (runs PREDICATE, BERGEN et SYNTEX). Elle présente tout de même les principales erreurs communes à l'ensemble des couplés dans ce bassin (upwelling équatorial dans l'ouest au lieu de l'est, et mauvaise circulation océanique et atmosphérique dans l'Est - Mousson). Les transferts surface-subsurface (upwellings/downwellings) sont mal représentés en lien avec les erreurs ci-dessus. La circulation grande échelle sous la couche de mélange océanique, ainsi que l'ensemble des champs tropicaux Nord et Sud-Ouest sont bien simulés.

Pacifique Tropical: Une classification des événements El Niño et La Niña observés par méthodes neuronales a été réalisée. Elle a mis en évidence des trajectoires significativement différentes et des centres de densité distincts entre les El Niño pré-1980 et ceux post-1980. L'analyse des relations entre état moyen et variabilité ENSO a permis d'identifier un changement significatif de l'état de base du Pacifique Sud concomitant à un changement d'état de l'océan Indien.

## 2.3 Couplage climat-carbone

L'étude des couplages entre le climat et le cycle du carbone a permis de mettre en évidence la rétroaction positive entre changement climatique et cycle du carbone [Dufresne *et al.*, 2002]. La biosphère continentale réduit fortement ses puits de carbone en cas de changement climatique futur, ce qui entraîne une augmentation plus forte de 20% du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et donc un changement climatique intensifié. Cette étude a été réalisée avec le modèle de carbone biosphérique CASA-SLAVE, nettement plus simple qu'ORCHIDEE. Par exemple, ce modèle ne prend pas en compte la dynamique de la végétation. Une étude plus récente réalisée avec ORCHIDEE, utilisant les mêmes champs de forçages que la simulation couplée climat-carbone a montré que l'adaptation liée à la dynamique de la végétation réduit la rétroaction positive.

Une comparaison entre nos résultats et ceux obtenus par le Hadley Centre souligne l'importance de la sensibilité de la biosphère continentale au changement climatique [Friedlingstein *et al.*, 2003]. Une comparaison plus large, incluant d'autres groupes, est actuellement en cours et sera intégrée dans l'IPCC-AR4

Des études préliminaires sont en cours pour activer le cycle du carbone dans la nouvelle chaîne couplée IPSL-CM4. Le cycle du carbone continental a été activé dans la version ne considérant que le couplage entre l'atmosphère et les surface continentales (LMDZOR). Le modèle simule un cycle du carbone réaliste ainsi qu'un climat comparable à celui simulé dans la version sans cycle du carbone. Pour le carbone dans l'océan, les études s'appuieront sur le modèle PISCES, qui décrit les écosystèmes marins et leurs interactions avec les grands cycles biogéochimiques de façon beaucoup plus réaliste que dans les modèles précédemment utilisés. Des simulations off-line couplant PISCES au nouveau modèle IPSL-CM4, ont déjà été menées, ceci afin de tester cette nouvelle configuration (IPSL-CM4 + PISCES) et d'amener le modèle océanique de carbone à l'équilibre.

## 2.4 Couplage climat-changement d'utilisation des sols

L'un des enjeux du projet est de quantifier l'impact de l'utilisation des sols sur l'évolution climatique passée et future et de comparer cet impact au forçage par les gaz à effet de serre.

Plusieurs étapes préliminaires ont été réalisées pour préparer les scénarios couplés climat-utilisation des sols:

- Développement et évaluation du modèle ORCHIDEE (cf fiche ORCHIDEE)
- Nous avons développé une série temporelle de la distribution des PFTs d'ORCHIDEE comprenant les changements de couvertures de cultures et de prairies et ce de 1700 à 1992.
- Nous avons élaboré une version du modèle ORCHIDEE capable de prendre en compte une évolution prescrite des surfaces de végétation, tout en conservant les bilans de carbone après conversion d'un écosystème à un autre (déforestation et mise en culture par exemple).

- Nous avons effectué une étude préliminaire de l'impact radiatif de l'utilisation. L'expérience réalisée compare le climat obtenu avec une végétation naturelle de type Holocène et le climat simulé pour une végétation actuelle, qui comprend environ 40 % de surfaces cultivées. Le fort impact radiatif régional de la végétation provient principalement des modifications de la réflectivité de la surface (albédo) et de leur impact sur l'énergie solaire absorbée en surface.

## 2.5 Couplage climat-chimie et aérosols

Différentes études ont été réalisées. D'abord, le calcul du forçage radiatif direct des composantes de l'aérosol pour la période présente, ensuite, une étude de mélanges internes et externe de l'aérosol.

Les champs aérosols soufrés d'origine anthropique ont été mis à disposition pour la période 1850-2000 et pour le 21ème siècle suivant les scénarios IPCC. Les effets directs et indirects de ces aérosols ont été introduits dans le modèle couplé dans le cadre des simulations IPCC en cours. Un article qui présente les simulations d'aérosols soufrés sur le XXIème siècle a été soumis au Journal of Geophysical Research [*Pham et al.*, 2004]. Ces simulations sont à météorologie et chimie gazeuse fixes. De nouvelles simulations sont en cours afin de préciser l'impact de la modification de la chimie gazeuse sur les aérosols soufrés (scénario A1B 2020 et A2 2100) (<http://www-loa.univ-lille1.fr/boucher/sres/index.html>).

## 2.6 Rétroactions radiatives

Les changements de nébulosité associés à un changement climatique sont au coeur de l'incertitude des projections de changement climatique. Nous proposons ici des diagnostics permettant, dans un premier temps pour les régions tropicales, (1) de mieux interpréter les différences de sensibilité climatique entre les modèles et (2) de mieux les contraindre à partir d'observations.

Les rétroactions nuageuses comportent deux composantes: l'une dynamique et l'autre thermodynamique [*Bony et al.*, 2004]. Nous avons analysé ces deux composantes dans le modèle couplé global de l'IPSL pour la simulation CMIP (2L23). De plus, nous avons analysé de longues séries d'observations spatiales (sur environ deux décennies) de nuages, de flux radiatifs et de température ainsi que différents jeux de réanalyses météorologiques.

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants:

- Dans le modèle, la circulation tropicale de Hadley-Walker s'affaiblit à mesure que le climat global se réchauffe. Toutefois, cette variation de la circulation joue un rôle minime, à l'échelle des Tropiques, dans les variations de nuages et de bilan radiatif.
- La composante thermodynamique des changements de nuages et de bilan radiatif, au contraire, domine très largement. Elle est dominée par la réponse des nuages bas des régions de faible subsidence (zones d'alizées).

- Nous avons montré que la sensibilité de ces nuages à la température de surface était très similaire aux échelles décennales et aux échelles de temps du changement climatique. Ce qui permet une évaluation par comparaison aux observations.
- A partir des observations, nous avons estimé la sensibilité à la température des nuages dans les zones de subsidence faible des Tropiques. Cette sensibilité est comparable à celle prédite par le modèle couplé de l'IPSL. Cela donne confiance dans la rétroaction nuageuse simulée par ce modèle dans le cadre d'un changement climatique.

Les résultats de ce travail ont été présentés au workshop IPCC sur la sensibilité climatique (Paris, Juillet 2004). Cette méthode d'analyse sera étendue aux autres modèles participant à l'IPCC-AR4 et contribuera à l'évaluation de la sensibilité climatique dans l'IPCC-AR4.

## 2.7 Rétroactions Hautes-Latitudes

Le rôle du gel du sol dans le climat des hautes latitudes et dans un changement climatique a été étudié. Des simulations du présent et du futur, avec et sans gel ont été réalisées au LGGE. Elle montrent que le climat et le changement climatique simulés, à l'échelle régionale, dépendent beaucoup de la prise en compte ou non du gel du sol, avec des rétroactions non triviales liées à l'hydrologie. Une analyse plus poussée de ces rétroactions et du réalisme du climat simulé est en cours.

## 2.8 Rétroactions salinité - cycle hydrologique

Les résultats du dernier rapport IPCC (2001) quant au futur de la circulation thermohaline ont montré une grande incertitude, les résultats différant fortement selon les modèles. Ceci semble trouver sa source dans la sensibilité de cette circulation aux flux d'eau douce, certains la destabilisant (précipitation locale, ruissèlement Arctique) d'autres la stabilisant (advection d'eaux salées des tropiques). Afin d'explorer la sensibilité du modèle couplé de l'IPSL, nous avons effectué des runs de sensibilité où l'on coupait différents flux d'eau douce de manière globale afin de conserver les effets antagonistes discutés précédemment: run EPR0 (aucun flux d'eau douce), run EP0 (E-P=0), et run R0 (ruissèlement =0). Des diagnostics sur la stabilité des colonnes d'eaux, et une analyse en classe de densité ont permis de mettre en avant des sensibilités différentes entre les régions classiques de production d'eaux profondes (Labrador, GIN et Irminger). La mer du Labrador est très sensible aux flux d'eaux douce locaux et aux ruissèlement de l'Arctique, tandis que la mer d'Irminger est principalement tributaire de l'advection des eaux salées du Gulf Stream. Pour les mers de GIN les influences antagonistes du Nord et du Sud se compensent. Enfin l'effet global de tous les flux d'eau douce atmosphériques est apparu être un amortisseur de la circulation thermohaline sur une échelle de 100 ans. Une comparaison de ces résultats avec des simulations similaires réalisées avec le modèle SINTEX montre que ces résultats sont robustes.

## 2.9 Circulation aux Moyennes-Latitudes

Les fondements théoriques du modèle simplifié à utiliser pour la compréhension dynamique de l'effet du changement climatique sur la variabilité atmosphérique des moyennes latitudes ont été posés.

Le modèle simplifié choisi est un modèle quasi-géostrophique barocline défini sur la sphère, déjà utilisé dans de nombreuses études de variabilité climatique [*Marshall and Molteni*, 1993; *D'Andrea and Vautard*, 2001]. Ce modèle a trois niveaux verticaux et une résolution horizontale spectrale de T21 (approximativement six degrés de latitude). Le modèle se base sur la conservation de la vorticité potentielle quasi-géostrophique, avec dissipation et un forçage empirique qui représentent les effets du forçage radiatif et des autres phénomènes non résolus.

Pour utiliser ce modèle on doit résoudre deux problèmes théoriques: (i) comment intégrer dans le forçage empirique le changement du forçage radiatif dû au changement climatique, et (ii) comment intégrer dans le modèle, qui a seulement été utilisé en configuration "sèche", l'effet de l'humidité.

Le problème (i) a été résolu et testé. On a exprimé le forçage empirique du modèle comme une relaxation sur une température de référence. Ensuite on a modifié cette température, en moyenne zonale, de manière compatible aux prévisions de changement de température prévus par la plupart des modèles scenario [*IPCC*, 2001]. Avec ce nouveaux forçage le modèle a une climatologie comparable à celle des modèles scenario, et devient donc un instrument d'étude de la variabilité dans cette nouvelle climatologie. Une analyse préliminaire semble indiquer une modification des régimes de temps dans le secteur Euro-Atlantique allant dans la direction proposée par Corti et al [2002], montrant une probabilité accrue de la phase positive de la NAO.

Le problème (ii) a été développé du point de vue théorique. En insérant l'humidité spécifique comme nouvelle variable prognostique dans le modèle, on peut, en respectant l'approximation quasi-géostrophique, définir une vorticité potentielle humide. Cette variable devrait se révéler précieuse pour l'étude de la variabilité climatique. Il reste à définir, dans la version humide du modèle, un terme de forçage empirique qui puisse tenir compte des sources d'humidité. Différentes hypothèses sur comment attaquer ce problème ont été formulées et seront testées dans les prochains mois.

## 2.10 Diffusion de l'Information Scientifique

Participation des chercheurs du LOA à la Fête de la Science 2004 à Lille

[http://ustl1.univ-lille1.fr/projetUstl/universite/fete\\\_science/FSU STL.pdf](http://ustl1.univ-lille1.fr/projetUstl/universite/fete\_science/FSU STL.pdf)

Participation des chercheurs de l'IPSL à la Fête de la Science 2004 à La Villette et à l'IPSL.

Production d'animations:

<http://www-loa.univ-lille1.fr/~boucher/vis5d.gif>

<http://www-loa.univ-lille1.fr/~boucher/2000.gif>

<http://www-loa.univ-lille1.fr/~boucher/2001.gif>

Réalisation de posters sur le climat, la modélisation numérique du climat, le changement climatique, l'effet de serre, ...

Site Web du projet MC<sup>2</sup> (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr>) qui permet d'accéder à la liste des simulations, aux sorties sous formes d'atlas, de figures standards ou directement aux données (accès dods ou ftp).



## References

- Bony, S., J.-L. Dufresne, H. L. Treut, J.-J. Morcrette, and C. Senior, On dynamic and thermodynamic components of cloud changes, *Clim. Dyn.*, *22*, 71–86, 2004.
- D’Andrea, F., and R. Vautard, Extra-tropical low frequency variability as a low dimensional problem. Part II: Stationarity and stability of large-scale equilibria, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, *128*, 1059–1073, 2001.
- Dufresne, J.-L., P. Friedlingstein, M. Berthelot, L. Bopp, P. Ciais, L. Fairhead, H. LeTreut, and P. Monfray, Effects of climate change due to CO<sub>2</sub> increase on land and ocean carbon uptake, *Geophys. Res. Lett.*, *29*, 10.1029/2001GL013777, 2002.
- Friedlingstein, P., J.-L. Dufresne, P. M. Cox, and P. Rayner, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle ?, *Tellus*, *55B*, 692–700, 2003.
- IPCC, *Climate Change 2001, The Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, New York, 2001.
- Marshall, J., and F. Molteni, Toward a dynamical understanding of planetary-scale flow regimes, *J. of Atmospheric Sciences*, *50*, 1792–1818, 1993.
- Pham, M., O. Boucher, and D. Hauglustaine, Atmospheric sulfur cycle and induced radiative forcings under IPCC SRES scenarios, *J. of Geophys. Res.*, *submitted*, 2004.