

# SIMULATION DE L'EVOLUTION DU CLIMAT AUX ECHELLES GLOBALES ET REGIONALES

## *Climate change at global and regional scale*

**Jean-Louis Dufresne**

Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD-IPSL), CNRS-UPMC

**Jean-François Royer**

Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo-France

*Dans le cadre de la préparation du 4<sup>e</sup> rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) qui doit paraître début 2007, les principales équipes de modélisation du climat de part le monde ont réalisé un important exercice coordonné de simulation de l'évolution du climat au cours du 20<sup>e</sup> et du 21<sup>e</sup> siècle. Nous présentons ici les résultats obtenus par les modèles du CNRM et de l'IPSL, en évoquant les progrès réalisés depuis le précédent rapport du GIEC. Nous replacerons également nos résultats par rapport à ceux des autres modèles, et indiquerons les résultats qui sont communs à l'ensemble des modèles et ceux qui peuvent être différents.*

*In support of the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) that should appear in early 2007, modelling groups world-wide have performed a huge coordinated exercise of climate change runs for the 20th and 21st century. In this paper we present the results of the two french climate models, from CNRM and IPSL. In particular we emphasise the progress made since the previous IPCC report and we identify which results are comparable among models and which strongly differ.*

## I INTRODUCTION

### I.1 Contexte

Les deux modèles climatiques français, celui du CNRM et celui de l'IPSL, ont participé à l'effort international de réalisation de nouveaux scénarios climatiques couplés qui constitue la base scientifique du 4-ème rapport d'évaluation du GIEC devant être publié en 2007. Les résultats obtenus avec les deux modèles français sont très représentatifs de ceux obtenus avec les autres modèles climatiques, et les différences entre ces deux modèles sont souvent une bonne illustration des différences les plus marquantes que l'on peut obtenir avec un ensemble plus large de modèles. Nous présentons ici sous forme résumée les principales caractéristiques de ces deux modèles, les expériences réalisées, et quelques résultats sur la réponse globale en terme de température et de précipitation en surface, pour illustrer les différences provenant des modèles et des scénarios. Le lecteur pourra trouver une présentation plus détaillée dans (Dufresne et al, 2006).

### I.2 Les deux modèles couplés

Les simulations du GIEC ont été réalisées avec des versions couplées des modèles de circulation de l'atmosphère, de l'océan et de la banquise qui ont été développées au cours des dernières années à l'IPSL et au CNRM, et dont la stabilité a été vérifiée par des simulations de contrôle de plusieurs siècles dans les conditions préindustrielles correspondant à l'année 1860 dans le but d'établir l'équilibre naturel du climat correspondant à chacun des modèles.

Les deux modèles utilisent le même modèle de circulation océanique développé au LODYC, le modèle OPA8 (Madec et al, 1998). Ce modèle est couplé à deux modèles de banquise différents, le modèle LIM (Goosse et Fichet, 1999) à l'IPSL, et le modèle GELATO (Salas y Melia, 2002) au CNRM. Le couplage entre les modèles atmosphériques et océaniques est effectué par le coupleur OASIS développé au CERFACS (Terray et al, 1998; Valcke et al, 2004).

La différence majeure entre les deux modèles provient de leur dynamique atmosphérique. Le modèle de l'IPSL utilise une dynamique explicite traitée par différences finies en point de grille LMDZ-4 (Hourdin et al, 2006), tandis que le modèle du CNRM utilise une dynamique semi-Lagrangienne semi-implicite traitée

par méthode spectrale (ARPEGE-Climat version 3). A l'exception du transfert radiatif, les calculs de la physique des deux modèles sont basés sur des paramétrisations différentes, notamment pour les processus nuageux et la convection. Pour les processus en surface le modèle de l'IPSL utilise ORCHIDEE (Krinner et al, 2005), tandis que le modèle du CNRM utilise le modèle ISBA (Mahfouf et al, 1995).

## II LES SIMULATIONS DU GIEC

Les simulations recommandées par le GIEC (<http://www.ipcc.ch>) pour son 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation (AR4) s'appuient sur des scénarios d'émission des gaz à effet de serre et de particules (aérosols) liés aux activités humaines qui couvrent l'ensemble des 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles. Elles ont pour but de simuler l'évolution récente du climat son évolution future suivant plusieurs scénarios de développement économique ou de scénarios plus académiques, ainsi que des études de stabilisation.

### II.1 Evolution récente du climat :

L'objectif de ces simulations de 1860 à 2000 est triple:

- comparer l'évolution du climat simulé par les modèles à celle observée depuis 140 ans
- comparer les caractéristiques du climat simulé à celui observé ces dernières années
- fournir un état initial pour les simulations de changement climatique futurs selon différents scénarios.

Afin de démarrer ces simulations sans choc ou dérive, on a choisi de les initialiser à partir d'une condition initiale équilibrée extraite de la simulation de contrôle, qui est une simulation du climat du milieu du 19<sup>ème</sup> siècle avec des concentrations fixes pour les gaz à effet de serre, correspondant à des conditions proches du pré-industriel. A partir de cet état initial, les simulations ont été réalisées sur la période 1860-2000 en utilisant l'évolution observée annuellement de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols. L'évolution de la concentration des gaz à effet de serre est bien connue car mesurée directement dans l'air depuis 40 ans environ, et mesurée dans les bulles d'air renfermées dans les glaciers pour les périodes antérieures. La concentration des aérosols sulfatés n'est pas mesurée, mais a été estimée à partir de leurs sources d'émission au moyen de modèles de chimie-transport.

Une simulation supplémentaire a été réalisée en introduisant également les forçages naturels provenant de la variabilité solaire et des éruptions volcaniques. Ce scénario est destiné à comprendre comment les différents facteurs (gaz à effet de serre, aérosols sulfatés, modification de la constante solaire et volcanisme) ont contribué à l'évolution du climat sur cette période. Il servira de support aux études de détection du changement climatique dans les observations récentes et à la détermination de la part des évolutions attribuable aux activités humaines.

### II.2 Evolution future du climat.

Différents scénarios socio-économiques d'évolution des activités humaines ont été établis par des économistes dans le cadre du GIEC en utilisant plusieurs modèles d'impact intégré. Ces scénarios couvrent une période d'un siècle et permettent d'estimer les émissions des principaux gaz qui ont un impact climatique important : les gaz à effet de serre, parmi lesquels le CO<sub>2</sub> est le principal contributeur. Pour les simulations climatiques, 3 scénarios ont été retenus par le GIEC: le scénario SRES-A2 pour lequel les émissions de CO<sub>2</sub> continuent de croître jusqu'en 2100; le scénario SRES-A1B pour lequel les émissions de CO<sub>2</sub> continuent de croître jusqu'en 2050 puis décroissent; enfin le scénario SRES-B1 pour lequel les émissions de CO<sub>2</sub> sont presque stabilisées dès l'année 2000, puis décroissent à partir de 2050. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont principalement pour origine la combustion de « combustibles fossiles » (pétrole, charbon, gaz...) et les émissions de SO<sub>2</sub> proviennent du soufre présent dans ces combustibles. Pour des raisons sanitaires et de protection de l'environnement (le SO<sub>2</sub> étant notamment à l'origine des « pluies acides »), les combustibles sont de plus en plus épurés de leur soufre avant utilisation, ce qui fait que dans presque tous les scénarios, les émissions de SO<sub>2</sub> croissent moins vite (ou diminuent plus vite) que celle de CO<sub>2</sub>. A partir des émissions des différents gaz, des modèles du cycle du carbone, du méthane... calculent l'évolution de leur concentration . Pour les aérosols sulfatés qui ont pour origine les émissions de SO<sub>2</sub>, nous utilisons les résultats de [Pham et al. 2005]

### III PRINCIPAUX RESULTATS D'UNE ANALYSE GLOBALE

Une description des simulations réalisées à l'IPSL et au CNRM et une présentation de certains de leurs principaux résultats ont d'abord été faites dans des articles séparés par Dufresne et al (2005) et Salas y Melia et al. (2005). Récemment une synthèse et une intercomparaison de ces deux simulations a été publiée dans la revue La Météorologie (Dufresne et al, 2006). Dans ce paragraphe nous reprenons quelques éléments de cette intercomparaison pour illustrer les résultats et montrer les différences entre les deux modèles en terme de température et de précipitations.

#### III.1 Biais systématiques

Les différents exercices d'intercomparaison et les résultats des simulations réalisées par les différents groupes pour le GIEC montrent tous que les modèles ont énormément progressé, mais qu'ils souffrent encore de biais importants. Ces biais sont en partie à l'origine des différences de comportement entre les modèles. Pour le CNRM, il y a un biais froid relativement uniforme, un peu plus prononcé sur l'Afrique, avec un biais chaud dans le sud de l'océan austral. Pour l'IPSL, la température simulée est proche de celle observée dans les régions équatoriales et sub-tropicales, mais par contre il y a un fort biais froid dans les moyennes latitudes, notamment dans l'hémisphère nord. Pour réaliser des études régionales de changement climatique, il est en général nécessaire de corriger ces défauts régionaux, et pour cela on ne considère en général que les anomalies dues au changement climatique (c'est à dire la différence avec la simulation de référence).

#### III.2 Réponse globale des températures

Comme illustré sur la figure 1, au cours de la période 1860-2000, les deux modèles simulent un accroissement de la température moyenne du globe a peu près conforme aux observations. L'accroissement est cependant un peu sur-estimé, surtout pour le CNRM. Pour les deux modèles, l'accroissement de température depuis les années 1960 est bien simulé, ce qui est satisfaisant, car c'est au cours de ces dernières décennies que l'accroissement des perturbations dues aux activités humaines est devenu particulièrement fort.

Le réchauffement climatique simulé pour le 21e siècle dépend à la fois du modèle utilisé et du scénario d'évolution des rejets de gaz à effet de serre en fonction des hypothèses sur le développement économique choisi. Bien que les deux modèles aient des sensibilités climatiques différentes, le modèle de Meteo France simulant un réchauffement un peu plus faible que celui de l'IPSL, ils montrent tout deux que le choix d'un scénario de développement économique réduisant les émissions de gaz à effet de serre (scénario B1) permet de limiter le réchauffement par rapport à des scénarios plus polluants (A2 et A1B). Pour le scénario A2 (fortes émissions) l'accroissement de température est presque identique dans les deux modèles : 3,5°C par rapport à la température actuelle. Pour le scénario SRES-B1, avec des émissions plus faibles, le réchauffement est réduit de moitié environ.

La distribution géographique de l'accroissement de température est à peu près similaire pour les différents scénarios, et nous l'avons tracé, sur la figure 2, pour le scénario A2. Le réchauffement affecte l'ensemble du globe, mais il est amplifié sur l'hémisphère nord, particulièrement aux hautes latitudes et à l'intérieur des masses continentales, tandis que les océans, en raison de leur inertie thermique, ont une réponse plus modérée. Ce sont là des résultats assez classiques: l'accroissement de température est plus élevé sur les continents que sur les océans, et il est particulièrement fort dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord. L'accroissement de température plus important sur les continents que sur les océans s'explique en partie par les changements d'évaporation. Sur océan la quantité d'eau disponible pour l'évaporation n'est pas limitée alors qu'elle l'est sur continent où l'on ne peut pas évaporer plus d'eau qu'il n'y en a dans le sol, donc qu'il n'en pleut. Comme l'évaporation refroidit la surface, ce refroidissement n'est pas limité par l'eau disponible sur océans alors qu'il l'est sur continent. Des phénomènes autres que l'évaporation, tel le changement de couverture nuageuse ou le changement de circulation, jouent également un rôle dans le différentiel de réchauffement océan-continent.

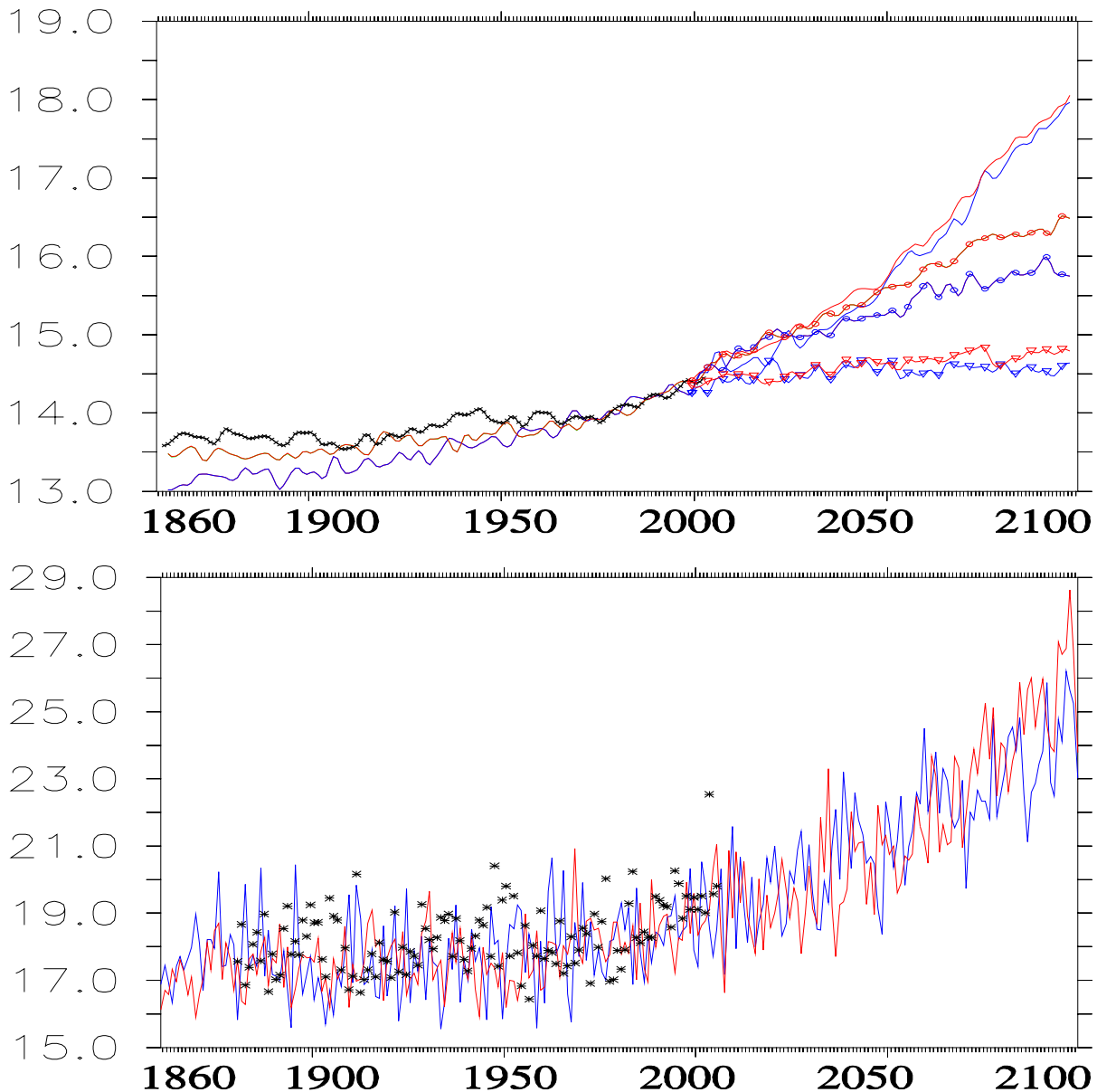


Figure 1: **En haut**: Evolution de la température moyenne de surface du globe (°C) observée (en noir, de 1860 à 2004), et simulée par les modèle du CNRM (en bleu) et de l'IPSL (en rouge). Après l'an 2000, on utilise soit le scénario SRES-A2 (trait continu), soit le scénario SRES-B1 (trait avec cercle), soit on maintient la concentration de CO2 constante (trait avec triangle). Les observations sont celles compilées par le CRU [Jones et Moberg, 2003]. **En bas** : Evolution de la température moyenne (°C) durant les 3 mois d'été (juin à août) en France métropolitaine observée (en noir, de 1880 à 2005), et simulée par les modèle du CNRM (en bleu) et de l'IPSL (en rouge). Après l'an 2000, on utilise le scénario SRES-A2. L'été 2003 est bien visible. Les observations proviennent de Météo France (Moisselin et al, 2002).

Dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord, l'augmentation importante de la température est partiellement due à la rétroaction "albédo-température". L'augmentation de température est accompagnée d'une diminution importante de l'enneigement et de l'extension de la glace de mer en été, ce qui réduit la réflexion du rayonnement solaire en surface, augmente la quantité de rayonnement absorbé, et tend ainsi à amplifier l'augmentation initiale de la température. Une autre cause de cette forte augmentation de température dans les hautes latitudes Nord est l'augmentation du transport de vapeur d'eau vers ces régions par la circulation atmosphérique.

Dans les régions australes, la faible augmentation de température est due à l'inertie thermique de l'océan. En effet, les vents étant très forts, l'agitation de l'océan est élevée, ce qui favorise la pénétration de chaleur dans l'océan. Pour que la température de la surface de l'océan augmente, il faut donc réchauffer une masse importante d'eau.

Aux environs du Groenland, on peut remarquer que l'accroissement de température est localement faible, voir négatif. Ceci est particulièrement marqué pour le modèle du CNRM. La raison en est que dans ces régions la densité de l'eau diminue à cause de l'accroissement de température ou de l'accroissement des précipitations. La densité étant réduite, cela réduit la plongée des eaux profondes, le transport de chaleur par l'océan, et donc finalement de la température.

### III.3 Réponse des précipitations

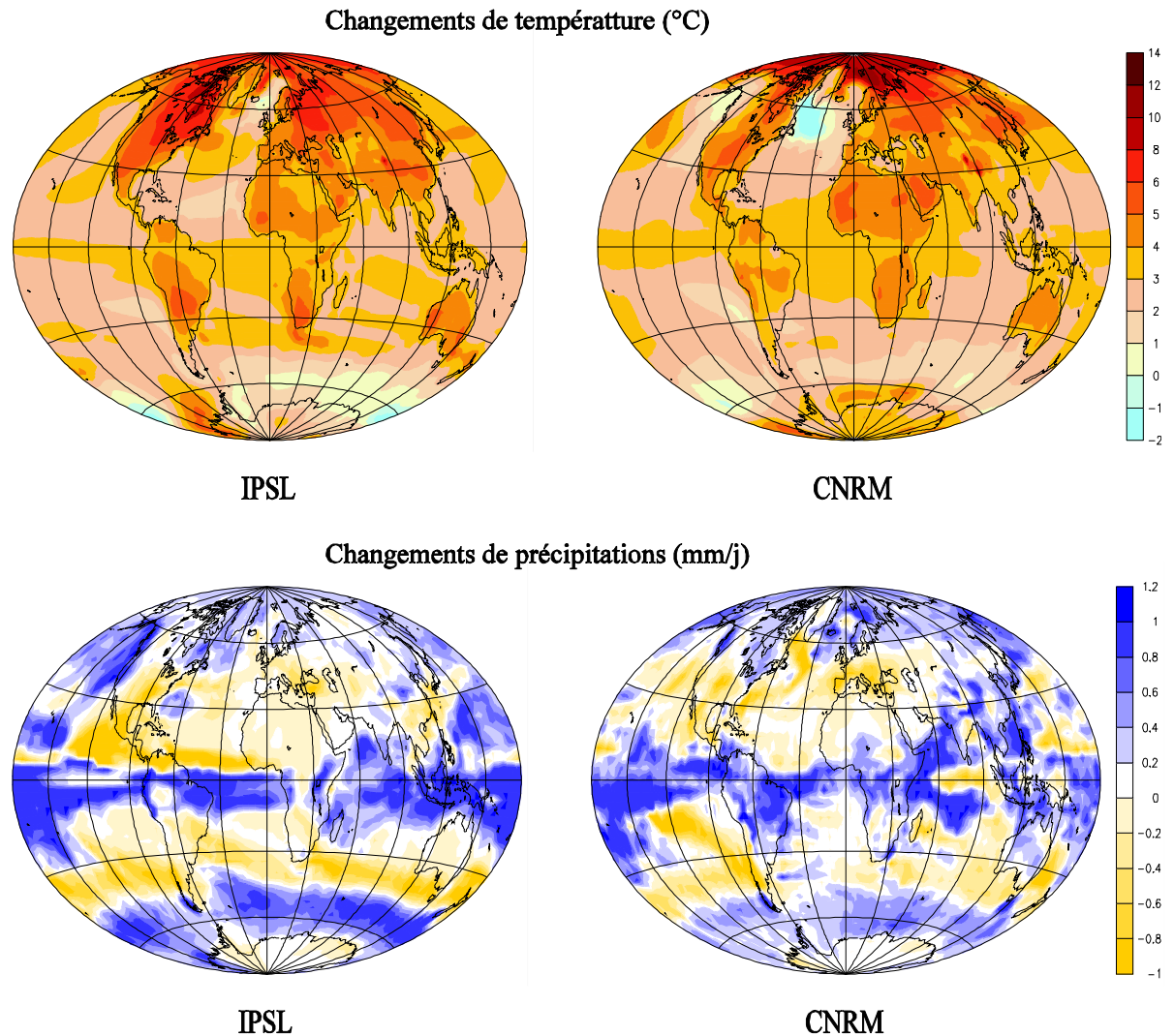


Figure 2: Distribution géographique du changement de température (°C, en haut) et du changement de précipitations (mm/jour, en bas), entre la fin du 21e et la fin du 20e siècle, avec le scénario SRES-A2 et calculée avec le modèle de l'IPSL (à gauche) et du CNRM (à droite).

Les simulations montrent une évolution importante du régime des précipitations. Dans leur ensemble, les modèles climatiques prévoient -mais avec une forte dispersion- une augmentation du total des précipitations avec la température. Pour le scénario SRES-A2, le modèle du CNRM simule un accroissement moyen de 5% en 2100 et celui de l'IPSL de 8%, mais ces changements des précipitations sont accompagnés d'une très forte variabilité inter-annuelle (Dufresne et al, 2006). La réponse des précipitations est beaucoup plus complexe et variable que la réponse des températures et n'est pas homogène dans l'espace: certaines régions voient leur précipitations augmenter, d'autres diminuer. Une augmentation de précipitation est simulée dans la zone de convergence intertropicale au voisinage de l'équateur, et dans les zones de dépression des moyennes et hautes latitudes, tandis qu'une diminution est prévue dans les zones subtropicales, en particulier autour de la Méditerranée (figure 2). Dans la région européenne, les deux modèles simulent une augmentation des

précipitations dans le Nord, et inversement, un assèchement autour du bassin méditerranéen. Ces résultats sont également obtenus par de nombreux autres modèles, la limite entre des deux zones variant d'un modèle à l'autre.

Les deux modèles s'accordent sur les grandes lignes de cette répartition, mais peuvent différer sur l'extension précise de cette réponse dans des régions particulières, ce qui illustre l'incertitude actuelle de la réponse régionale. Les changements de précipitations simulés par les deux modèles peuvent ainsi être très différents sur certaines régions, comme par exemple au-dessus de l'Amérique du Sud, de l'Afrique de l'ouest et de l'ouest de l'Inde. Dans ces régions, le modèle de l'IPSL simule une diminution des précipitations tandis que celui du CNRM simule une augmentation. Si on considère un plus grand ensemble de modèles climatiques, on obtient également des résultats très contrastés dans ces trois régions [GIEC, 2001]. Il reste encore à comprendre les mécanismes qui expliquent ces différences, à établir les liens éventuels entre les variations inter-annuelles et celles à plus grandes échelles de temps.

#### IV CONCLUSION

L'ensemble de simulations cohérentes réalisées pour le GIEC, qui couvrent les périodes du 20ème et du 21ème siècles, permet de mieux caractériser le changement climatique. Ce sont les simulations longues du climat actuel ou pré-industriel, les projections climatiques futures selon les recommandations du GIEC auxquelles s'ajoutent quelques périodes clés dans le passé. Ces simulations ont en commun de demander des ressources importantes en calcul et de servir de référence pour de nombreuses études scientifiques. A titre d'exemple, les simulations du GIEC représentent 80000 heures de calcul, 60To de stockage, et sont exploitées par les scientifiques du monde entier au travers de plus de 550 sous-projets d'analyse répertoriés sur le site du PCMDI ([http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)). Elles offrent également un support à de nombreuses études de sensibilité ou des éléments particuliers (paramétrisations, couplage, effet d'un paramètre) sont étudiés. Par rapport au précédent rapport du GIEC, en 2001, les modèles climatiques ont bien progressé et leurs caractéristiques climatiques se sont améliorées aussi bien en terme d'état moyen que de variabilité. Il n'en demeure pas moins qu'au niveau régional l'écart aux observations peut être important, aussi bien pour les champs dynamiques, que pour la température ou les précipitations. Pour les changements futurs, la distribution géographique du changement de température est assez cohérente entre les différents modèles, ce qui n'est pas le cas pour les précipitations. Dans certaines régions les résultats des différents modèles sont cohérents tandis que dans d'autres régions les résultats peuvent être très différents, voir opposés. Ceci ne veut pas dire qu'il n'y aura pas de changements dans le futur, mais plutôt que dans l'état actuel des connaissances, il faut anticiper la possibilité de changements très différents.

#### V RÉFÉRENCES :

- Dufresne J.-L., D. Salas y Melia, S. Denvil, S. Tyteca, O. Arzel, S. Bony, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Chauvin, M. Deque, H. Douville, L. Fairhead, T. Fichet, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, J.-F. Guérémy, F. Hourdin, A. Idelkadi, C. Levy, G. Madec, P. Marquet, O. Marti, I. Musat, S. Planton, and J.-F. Royer (2006).- Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*. n° 55, Nov. 2006 : 45-59
- Dufresne J.-L., J. Quaas, O. Boucher, S. Denvil and L. Fairhead (2005).- Contrasts in the effects on climate of anthropogenic sulfate aerosols between the 20th and the 21st century. *Geophys. Res. Lett.* **32** (21), L21703, doi: 10.1029/2005GL023619
- Goosse, H., and T. Fichet (1999): Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study, *J. Geophys. Res.* **104**, 23,337-23,355.
- Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, G. Krinner, P. LeVan, Z.-X. Li and F. Lott. (2006).- The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics* **19**(15): 3445-3482, DOI: 10.1007/s00382-006-0158-0, August 2006

- Jones, P.D. and A. Moberg (2003).- Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *J. Climate*, **16**: 206-223.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch and I. C. Prentice (2005).- A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1), GB1015.
- Madec G., Delecluse P., Imbard M., Lévy C. (1998).- OPA version 8.1 *Ocean General Circulation Model Reference Manual*, Notes du Pôle de Modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace, n°11, 91 pp [Available from Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie, Université Paris VI, Paris 75252, France.]
- Mahfouf, J.-F. et al. (1995).- The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. Part I: Implementation and preliminary results. *J. Climate* **8**: 2039-2057
- Moisselin J.-M., M. Schneider, C. Canellas et O. Mestre (2002).- Les changements climatiques en France au XXe siècle –Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie* n°28 : 45-56
- Salas y Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F., Tyteca S. ; (2005).- *Description and validation of CNRM-CM3 global coupled climate model*, Note de Centre du GMGEC N°103, décembre 2005. (available from: [http://www.cnrm.meteo.fr/scenario2004/paper\\_cm3.pdf](http://www.cnrm.meteo.fr/scenario2004/paper_cm3.pdf))
- Salas-Mélia, D. (2002).- A global coupled sea ice-ocean model. *Ocean Modelling* **4**: 137-172
- Terray, L., Valcke, S. and Piacentini, A. (1998).- *OASIS 2.2 User's Guide and Reference Manual*, TR/CMGC/98-05
- Valcke S., A. Caubel, R. Vogelsang, D. Declat. (2004).- *OASIS3 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil User's Guide* Technical Report TR/CMGC/04/68, CERFACS, Toulouse, France