

1

Les scénarios globaux

Jean-François Royer (1) et Jean-Louis Dufresne (2), Pascale Braconnot (3)

1 CNRM/GMGEC/UDC, Météo-France : 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01

Email : jean-francois.royer@meteo.fr

2 IPSL/LMD, CNRS/UPMC UMR 8539 : Université Paris 6, tour 45-55, 3^{ème} étage

4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Email : jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr

3 IPSL/LSCE, CEA/CNRS/UVSQ UMR 1572 : Commissariat à l'Energie Atomique-Saclay,

L'Orme des Merisiers, 91191 Gif sur Yvette, France

Email : pascale.braconnot@cea.fr

Introduction

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 qui sera 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. Ce chapitre présente sous forme résumée les principales caractéristiques de ces deux modèles, les expériences réalisées, et quelques résultats sur la réponse globale en termes de température et de précipitation en surface, pour illustrer les différences provenant des modèles et des scénarios. L'objectif est donc une présentation synthétique pouvant servir d'introduction aux analyses plus détaillées de divers processus qui seront conduites dans les chapitres suivants.

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 dont le but est 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 Fichefet, 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).

Une description plus détaillée de ces deux modèles peut être obtenue sur le site du PCMDI qui rassemble les documents de coordination des simulations du GIEC, et les bases de données rassemblant un sous-ensemble de résultats des simulations réalisées :

CNRM-CM3 :

http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/CNRM-CM3.htm

IPSL-CM4 :

http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/IPSL-CM4.htm

ainsi que sur le site

<http://mc2.ipsl.jussieu.fr/>.

Les simulations du GIEC

Les simulations recommandées par le GIEC pour son 4^e rapport 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^{ème} et 21^{ème} 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.

Évolution 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 moyennes du climat simulé à celui observé ces dernières années
- Fournir un état initial pour les simulations de changement climatique futur selon différents scénarios.

La première simulation de la période 1860 à 2000 a été réalisée avec seulement les forçages dus aux activités humaines: accroissements des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés, sans tenir compte de la variabilité naturelle induite par les fluctuations de l'activité solaire ou des éruptions volcaniques. Ce choix a été fait par les modèles participant au projet européen ENSEMBLES de façon à réaliser un scénario cohérent entre le passé et le futur pour lequel ces forçages naturels ne sont pas prévisibles.

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 référence, qui est une simulation du climat du milieu du 19^{ème} siècle avec des concentrations fixes pour les gaz à effet de serre, correspondant à des conditions proches du préindustriel. ▶

Les simulations du GIEC

Évolution récente du climat

À partir de cet état initial extrait les simulations ont été réalisées sur la période 1860-2000 en utilisant l'évolution observée 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 modèles de chimie-transport.

Une simulation supplémentaire a été récemment 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.

Évolution future du climat

Différents scénarios socio-économique 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 CO₂ est le principal contributeur (**figure 1**). Pour les simulations climatiques, 3 scénarios ont été retenus: le scénario SRES-A2 pour lequel les émissions de CO₂ continuent de croître jusqu'en 2100; le scénario SRES-A1B pour lequel les émissions de CO₂ continuent de croître jusqu'en 2050 puis décroissent; enfin le scénario SRES-B1 pour lequel les émissions de CO₂ sont presque stabilisées dès l'année 2000, puis décroissent à partir de 2050. Les émissions de CO₂ ont principalement pour origine la combustion de "combustibles fossiles" (pétrole, charbon, gaz...) et les émissions de SO₂ proviennent du soufre présent dans ces combustibles.

Pour des raisons sanitaires et de protection de l'environnement (le SO₂ 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 SO₂ croissent moins vite (ou diminuent plus vite) que celle de CO₂. 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 SO₂, nous utilisons les résultats de (Pham et al., 2005)

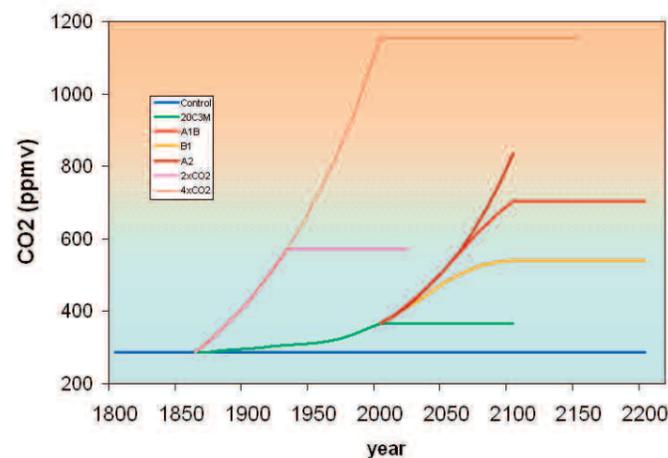


Figure 1 : Evolution des concentrations de CO₂ dans les scénarios réalisés pour le GIEC

Scénarios idéalisés

Un des inconvénients des scénarios précédents, ayant vocation à être réalistes, est la multiplicité et la variété des forçages à imposer aux modèles climatiques. Ces forçages ne sont pas tous pris en compte de la même façon par les modèles, ce qui fait que les différences entre les résultats de modèle peuvent provenir de la façon dont les phénomènes physiques sont représentés dans les modèles mais aussi de la façon dont les forçages eux-mêmes sont pris en compte. Pour les climatologues, il est donc intéressant de réaliser des simulations avec des forçages très simples à imposer, de sorte que la comparaison des simulations permette de se focaliser sur la réponse climatique des modèles. Dans ces simulations, on augmente la concentration de CO₂ de 1%/an, jusqu'à 2 fois ou 4 fois sa valeur initiale, prise comme étant celle de l'époque préindustrielle. Avec cet accroissement, la concentration de CO₂ double en 70 ans.

Stabilisation

Dans ces simulations, les forçages après avoir évolué selon différents scénarios sont maintenus constants, et le climat continue à évoluer du fait de son inertie thermique. Ces scénarios de stabilisation permettent de préfigurer des mesures de limitation des concentrations, et d'analyser l'inertie du système climatique. Ils consistent en 3 simulations portant sur une durée de 100 ans ou plus, au cours desquelles les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés restent fixées aux niveaux de la fin du 20^{ème} siècle, et de la fin du 21^{ème} siècle dans les scénarios SRES-A1B et B1.

Réalisation des simulations :

Les simulations couplées ont pu commencer seulement au milieu de 2004 lorsque tous les forçages nécessaires ont été définis et mis en place au PCMDI. Un calendrier très strict ayant été défini par le GIEC qui voulait disposer des résultats des modèles avant avril 2005 pour les premières rédactions du rapport scientifique du groupe I, une course contre la montre s'est engagée pour essayer de réaliser, dans le créneau imparti, le maximum de ces simulations qui demandaient d'énormes ressources de calcul et de stockage.

Dès le début de l'année 2005 les résultats de ces simulations ont pu commencer à être transférés sur la base de données du PCMDI, ce qui a permis l'utilisation des résultats des modèles français dans de nombreux projets d'analyse, actuellement en cours de publication, qui contribueront au 4^e rapport du GIEC.

Parallèlement des résultats complémentaires à plus haute résolution temporelle, tels que des séries quotidiennes, ont été mis en place sur des serveurs de données DODS, pour faciliter leur utilisation dans le projet d'analyse ESCRIME et dans le projet Européen ENSEMBLES. ▶

Principaux résultats 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 rédigée pour publication 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 pour la température et les précipitations.

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. La distribution géographique de la différence entre la température de surface simulée par les modèles et celle observées sont représentées sur la **figure 2**, pour faire ressortir les défauts des 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 subtropicale, mais par contre il y a un fort biais froid dans les moyennes latitudes, notamment dans l'hémisphère nord.

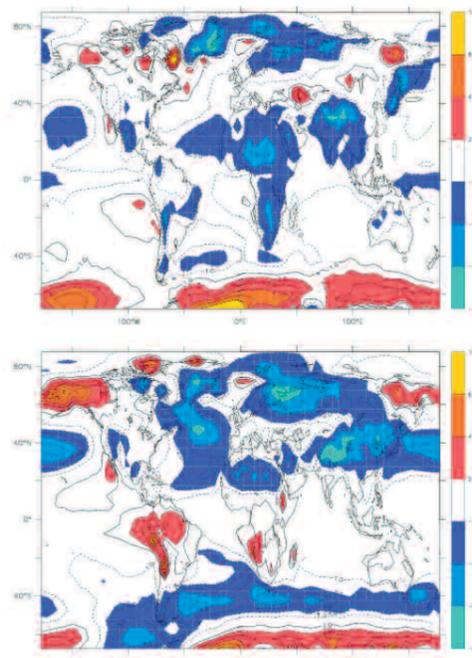


Figure 2 : Différences entre les températures annuelles de l'air près de la surface simulées par les modèles CNRM-CM3 (en haut) et IPSL-CM4 (en bas) et les températures observées (données du CRU) en moyenne sur la période 1960-1987. Les contours sont espacés d'un degré Celsius.

Réponse globale des températures

Comme illustré sur la **figure 3**, au cours de la période 1860-2000, les deux modèles simulent un accroissement de la température moyenne du globe à peu près conforme aux observations. L'accroissement est cependant un peu surestimé, 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 21^{ème} 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 Météo-France simulant un réchauffement un peu plus faible que celui de

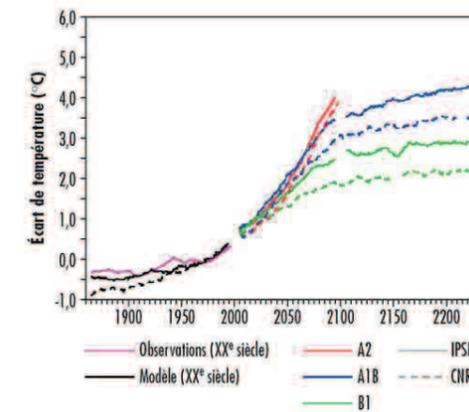


Figure 3 : Évolution de la température de l'air en surface, en moyenne globale, en prenant pour référence la moyenne des années 1961-1990. Les traits pleins et pointillés représentent respectivement les simulations de l'IPSL et du CNRM. SRES-B1, A1B et A2 représentent 3 scénarios pour le 21^{ème} siècle, faisant respectivement l'hypothèse de niveaux relativement bas, moyens ou élevés d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols.

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 (SRES-A2 et A1B). Pour le scénario SRES-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, l'accroissement de température est réduit de moitié environ.

Bien que dans ces simulations les concentrations de gaz à effet de serre cessent d'évoluer au cours du 22^{ème} siècle en restant fixées aux concentrations de 2100 (ou à partir de 2000 pour l'une des simulations), le réchauffement climatique se poursuit cependant malgré la stabilisation du forçage radiatif, par suite de l'inertie thermique du système climatique, en particulier en ce qui concerne sa partie océanique.

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 4**, pour le scénario SRES-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.

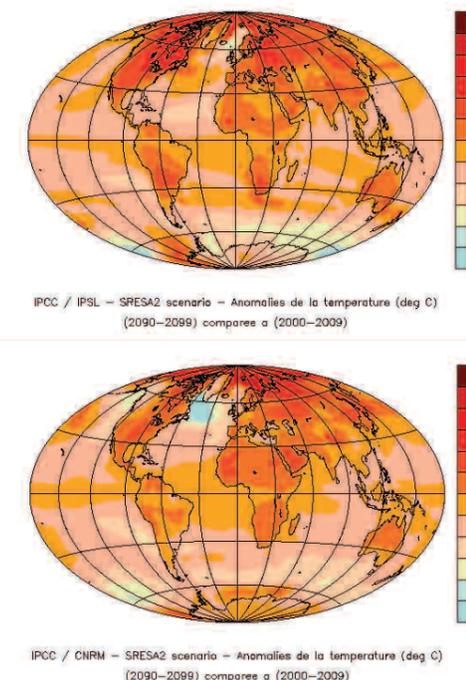


Figure 4 : Réponse de la température annuelle moyenne de l'air en surface à la fin du 21^{ème} siècle (2090-2099) par rapport au début (2000-2009) simulée par les modèles IPSL-CM4 (en haut) et CNRM-CM3 (en bas) dans le scénario SRES-A2 de fort accroissement des émissions de gaz à effet de serre.

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 par la surface du rayonnement solaire, augmente la quantité de rayonnement absorbé et tend 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 la température.

Réponse des précipitations

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 interannuelle (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 5**). Dans la région européenne, les deux modèles simulent une augmentation des précipitations dans le Nord et par contre 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 précipitation 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 climatique, 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 aux échelles de temps interannuelle et celles à plus grande échelle de temps.

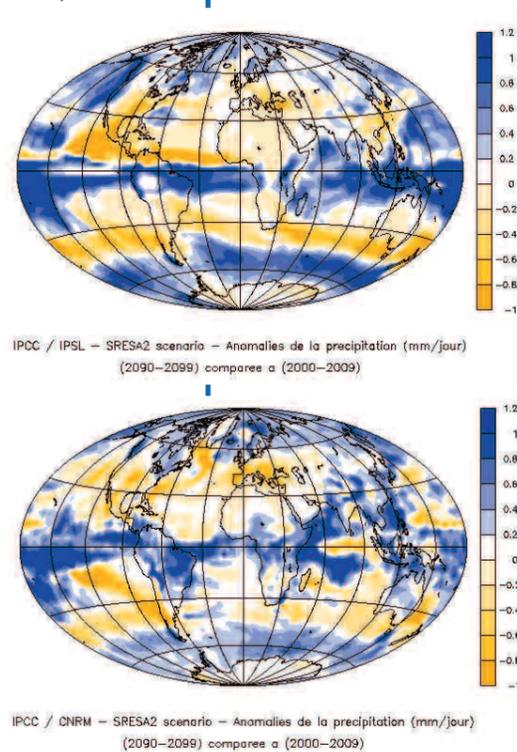


Figure 5 : Variations des précipitations annuelles moyennes à la fin du 21^{ème} siècle (2090-2099) par rapport à l'époque actuelle (2000-2009) simulées par le modèle IPSL-CM4 (en haut) et le modèle CNRM-CM3 (en bas) dans le scénario SRES-A2.

Conclusion

L'ensemble de simulations cohérentes réalisées pour le GIEC, qui couvrent les périodes du 20^{ème} et du 21^{ème} siècle, permet de mieux caractériser le changement climatique. Ce sont les simulations longues du climat actuel ou préindustriel, les projections climatiques futures selon les recommandations du GIEC auxquelles s'ajoutent quelques périodes clefs 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, 60 téraoctets de stockage et sont exploitées par les scientifiques du monde entier au travers des 240 projets scientifiques du projet CMIP. Elles offrent également un support à de nombreuses études de sensibilité où des éléments particuliers (paramétrisations, couplage, effet d'un paramètre) sont étudiés. La participation au GIEC, la diffusion des données à la communauté et la valorisation des différents résultats demandent un effort particulier pour donner l'accès aux données des différentes simulations à de nombreuses personnes et effectuer le suivi de l'information. Des bases de données de type DODS ont d'ores et déjà été mises en place à l'IPSL et au CNRM et les données ont été fournies à la base de données internationale des simulations du GIEC (maintenue par le PCMDI du Lawrence Livermore Laboratory). Ces simulations seront également utilisées pour le projet Européen ENSEMBLES. ■

Références

- Dufresne et al., 2006** : Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL. Soumis à La Météorologie
- 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, No. 21, L21703, doi: 10.1029/2005GL023619
- Goosse, H., and T. Fichefet, 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. *Clim. Dyn.*, 19, No. 15, pages 3445-3482, DOI: 10.1007/s00382-006-0158-0
- 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 Biogeochem. 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. Clim.*, 8, 2039-2057
- 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 GMGEC N°103. Submitted to *Clim. Dyn.* 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, CERFACS, Toulouse, France.
- 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