



**HAL**  
open science

## Changement climatique et cycle du carbone

Pierre Friedlingstein, Laurent Bopp, Patricia Cadule

► **To cite this version:**

Pierre Friedlingstein, Laurent Bopp, Patricia Cadule. Changement climatique et cycle du carbone. La Météorologie, 2008, 8 (58), pp.21. 10.4267/2042/18204 . insu-03249172

**HAL Id: insu-03249172**

**<https://insu.hal.science/insu-03249172>**

Submitted on 4 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Changement climatique et cycle du carbone

**Pierre Friedlingstein, Laurent Bopp et Patricia Cadule**

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE-IPSL)  
CEA-Orme des Merisiers, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
Pierre.Friedlingstein@lsce.ipsl.fr

**Ndlr** Cet article est la reprise du chapitre 7 du rapport *Escrime*, publication collective de la communauté des chercheurs français dans le domaine du changement climatique (voir la présentation dans *La Météorologie*, numéro 56, page 27).

## Résumé

Ce chapitre traite de l'influence du changement climatique sur le cycle du carbone, rétroaction réciproque qu'il est nécessaire de prendre en compte.

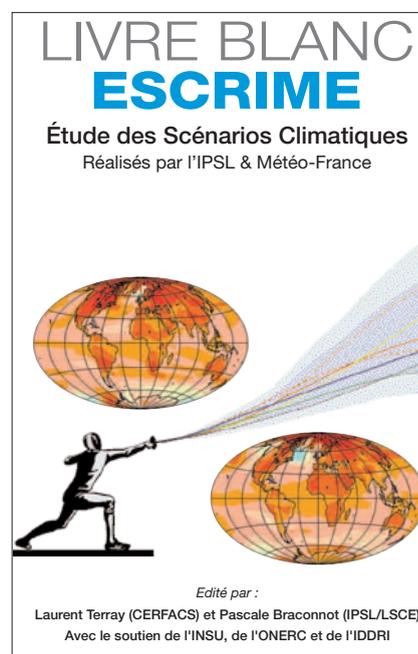
## Abstract

### Climatic change and carbon cycle

This chapter deals with the effect of climatic change on the carbon cycle, negative feedback must be considered.

La concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est un facteur clé contrôlant le changement climatique du XXI<sup>e</sup> siècle. Pour estimer l'amplitude de ce changement climatique au cours des prochaines décennies, la plupart des modèles couplés océan-atmosphère (OAGCM) sont forcés par un scénario de concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>. Cela implique que le climat simulé par ces modèles couplés ne peut influencer en retour le cycle du carbone et l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Pourtant, les flux de carbone entre atmosphère et biosphère terrestre, et entre atmosphère et océan, sont sensibles au climat. Un exemple classique de cette sensibilité est la réponse du taux de croissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'oscillation australe [Enso] (par exemple, Bousquet et al., 2002) ou à la perturbation climatique liée à l'éruption volcanique du Pinatubo (Jones et Cox, 2001 ; Lucht et al., 2002).

Les deux premières simulations utilisant un OAGCM couplé de façon interactive à un modèle du cycle du carbone



(Cox et al., 2000 ; Dufresne et al., 2002) ont montré que la rétroaction climat-carbone est une rétroaction positive (qui amplifie la perturbation externe). Par contre, l'estimation de l'amplitude de cette rétroaction est très différente entre ces deux premières études (Friedlingstein et al., 2003). Dans le cadre du projet de comparaison des modèles couplés



Les différents types de végétation sont des facteurs primordiaux dans le cycle du carbone. Ci-contre, la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie. (Photo Météo-France, Alain Lapujade)

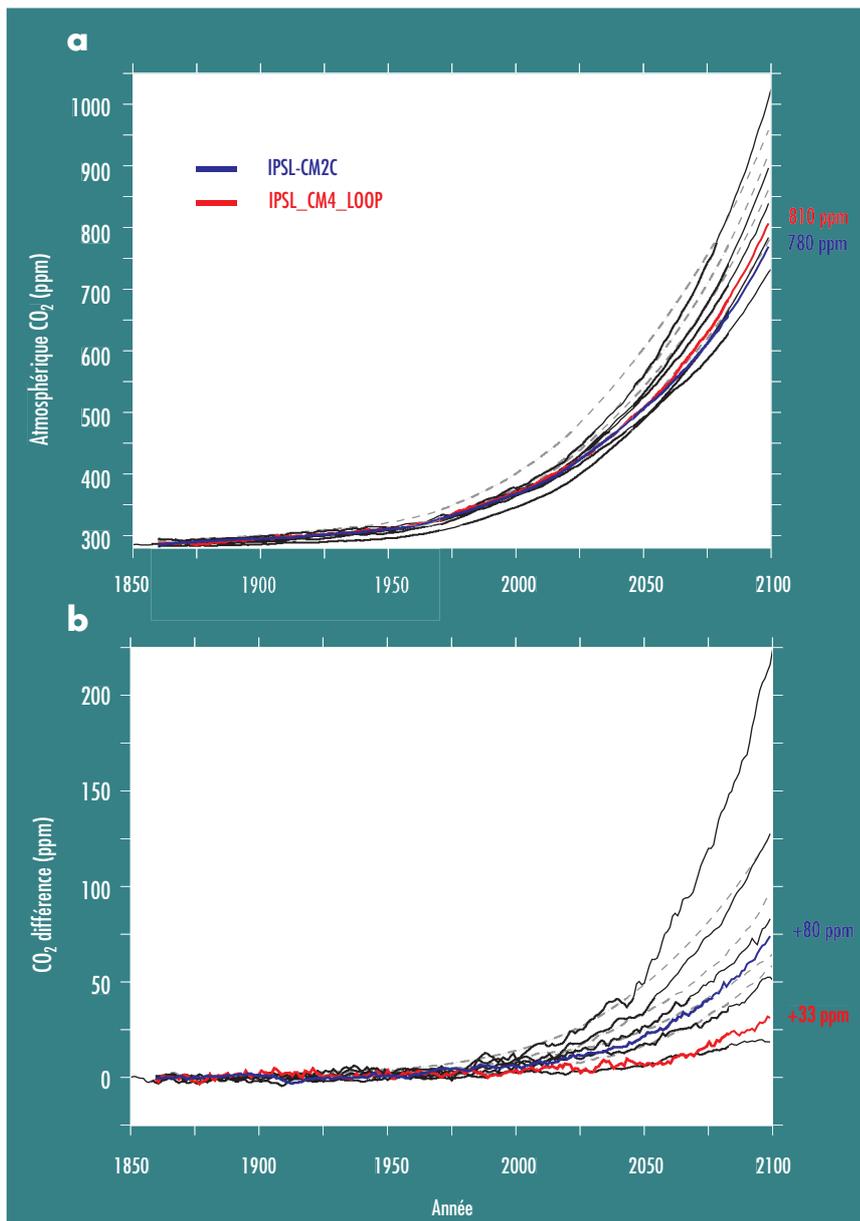


Ci-contre, la montagne française.  
(Photo Météo-France, Jean-Marc Destruel)

climat-carbone (C<sup>4</sup>MIP) et pour le prochain rapport du Giec, un nouveau modèle couplé climat-carbone a été développé à l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL\_CM4\_ Loop). Ce modèle a été utilisé pour réaliser des simulations climat-carbone sur la période historique et au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

## Le modèle couplé climat-carbone de l'IPSL

Figure 1 - a) Concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique simulée (ppm) de 1860 à 2100 par les modèles couplés climat-carbone C<sup>4</sup>MIP ; b) Impact de la rétroaction climat-carbone sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique simulé CO<sub>2</sub> (ppm). Les modèles de l'IPSL sont représentés en couleurs.



Le modèle IPSL\_CM4\_ Loop est construit à partir du modèle couplé océan-atmosphère de l'IPSL (Marti et al., 2005) utilisé pour les simulations du 4<sup>e</sup> rapport du Giec (Dufresne et al., 2005) et des modèles de carbone Orchidee (Krimmer et al., 2005) pour la biosphère terrestre et Pisces (Aumonet et Bopp, 2006) pour l'océan. Orchidee est un modèle de végétation, à l'échelle globale, qui calcule bilans énergétiques et hydrologiques, assimilation du carbone, allocation et décomposition de la matière organique pour treize types fonctionnels de plante (PFTs). Dans le sol, le modèle Orchidee tient compte de façon explicite de quatre réservoirs de litières et de trois réservoirs pour le carbone du sol (réservoirs lent, rapide et passif). Pisces est un modèle du cycle du carbone océanique, à l'échelle globale, qui représente de façon explicite quatre groupes fonctionnels phytoplanctoniques (le nanophytoplancton, les diatomées, le microzooplancton et le mésozooplancton). La limitation de la croissance du phytoplancton est fonction des concentrations de plusieurs éléments nutritifs (N, P, Si et Fe) dont les cycles biogéochimiques dans l'océan sont également représentés dans Pisces.

Ce modèle climat-carbone est forcé par des émissions de combustibles fossiles anthropiques, reconstruites à partir d'observations pour la période historique (Marland et al., 2005) et estimées par le scénario IPCC SRES-A2<sup>(1)</sup> pour 2000-2100. Le modèle tient compte des émissions de CO<sub>2</sub> associées

(1) Pour les scénarios d'émission du Giec, voir Dufresne et al., 2007. Le scénario A2 est « pessimiste ».

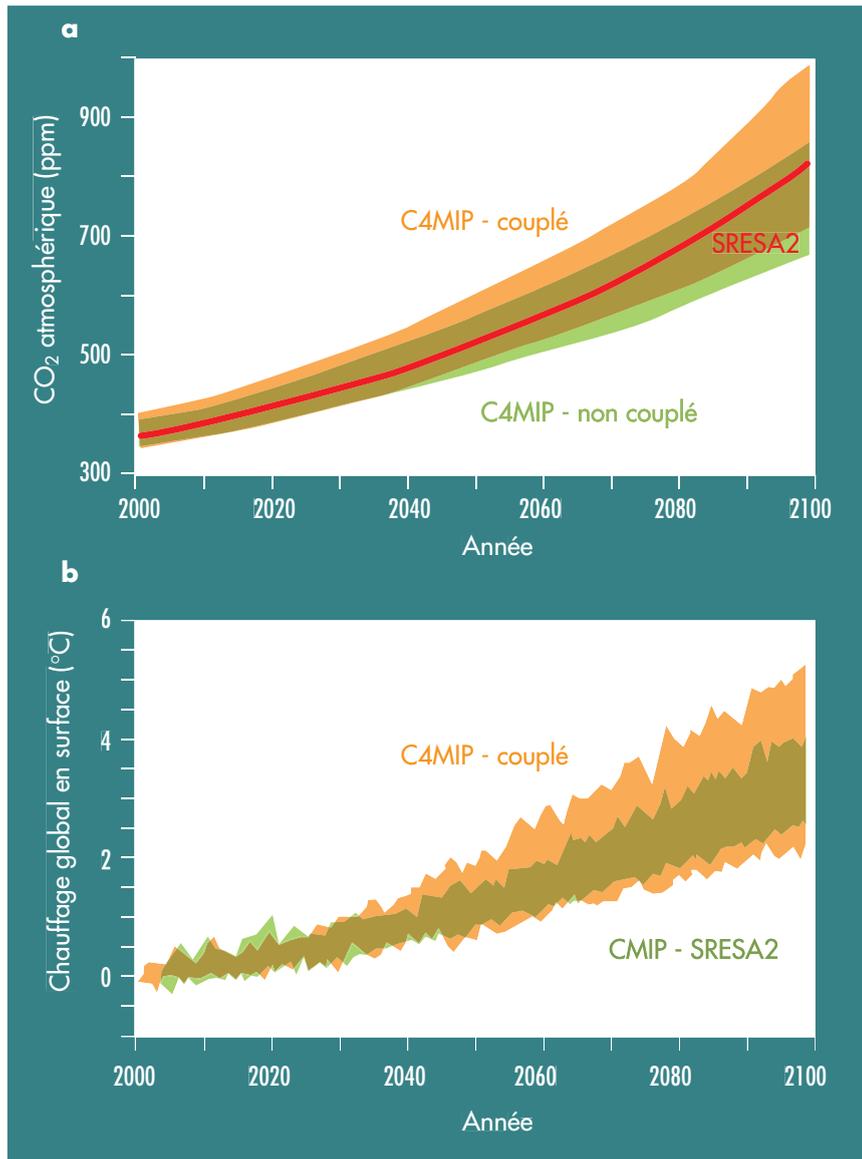


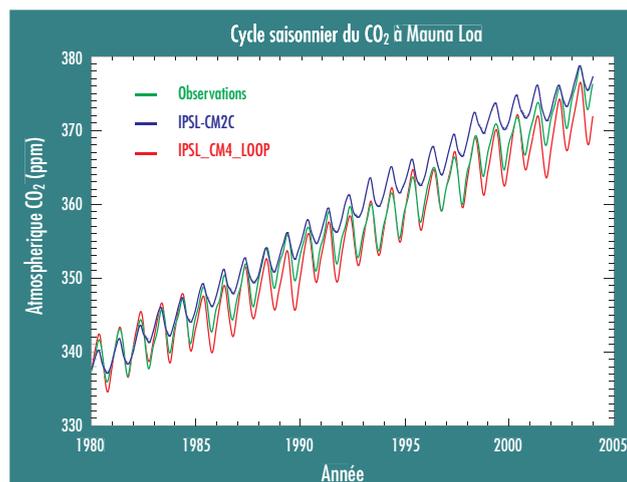
Figure 2 - a) Concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique simulée par les modèles C<sup>4</sup>MIP pour la simulation couplée (rouge) et découplée (bleu) ainsi que la concentration imposée pour les modèles standard de l'IPCC AR4 pour le scénario SRES-A2 (noir) ; b) réchauffement de surface global simulée par les modèles C4MIP pour la simulation couplée (rouge) et par les modèles standard de l'IPCC AR4 pour le scénario SRES-A2 (noir).

avec les observations sur la période historique. En 2100, la concentration est de 33 ppm plus élevée dans la simulation couplée que dans la découplée, confirmant bien que la rétroaction climat-carbone est positive (figure 1b). Une analyse de rétroaction montre que, pour notre modèle, les continents et les océans jouent un rôle comparable dans cette rétroaction. Au niveau océanique, le réchauffement et la stratification des couches de surface expliquent la réduction du puits de carbone. Au niveau continental, la réduction du puits s'explique principalement par l'augmentation de la respiration des sols due au réchauffement de la surface. Le modèle IPSL\_CM4\_Loop a une rétroaction positive qui est inférieure à la moyenne des modèles C<sup>4</sup>MIP [amplification variant de +20 à +200 ppm] (Friedlingstein et al., 2006, figure 1b). Cette amplification induit un réchauffement global additionnel variant entre 0,1 et 1,5 °C en 2100 (figure 2).

à l'utilisation des sols et calculés par Houghton et Hackler (2002) pour la période historique et par le modèle Image pour le XXI<sup>e</sup> siècle (Leemans et al., 1998). Deux simulations ont été réalisées. Dans la première de ces simulations, le changement climatique influence le cycle du carbone (simulation couplée) ; dans la deuxième, le CO<sub>2</sub> est considéré comme un gaz non radiatif (de cette façon, le cycle du carbone n'est pas influencé par le changement climatique). La différence entre ces deux simulations permet d'estimer l'amplitude de la rétroaction climat-carbone sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique.

### La rétroaction climat-carbone

Dans la simulation couplée, la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> atteint 807 ppm (parties par million) en 2100 (figure 1a) et montre un bon accord



### Vers une meilleure validation des modèles climat-carbone

Afin de réduire l'incertitude de cette rétroaction, il est nécessaire de procéder à une validation extensive des modèles. Les flux océaniques et continentaux simulés par IPSL\_CM4\_Loop ont été transportés dans l'atmosphère à l'aide du modèle LMDZ4, sur la période 1979-2003. Les concentrations de CO<sub>2</sub> simulées sont ensuite comparées aux données de la NOAA-CMDL [Climate Monitoring & Diagnostics Laboratory] (Globalview-CO<sub>2</sub>, 2006). La figure 3 montre les concentrations observées et simulées pour le modèle

Figure 3 - Comparaison de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique simulée par IPSL-CM2-C et IPSL\_CM4\_Loop à celle des observations à la station de Mauna Loa pour la période 1979-2003.

IPSL-CM2-C (Dufresne et al., 2003) et IPSL\_CM4\_Loop à la station de Mauna Loa (19,5° N ; 155,6° W). Le nouveau modèle montre un accord avec les observations nettement meilleur en termes de cycle saisonnier. Le modèle est également évalué en termes de la réponse de son cycle du carbone à la variabilité interannuelle du climat. On trouve que la variabilité interannuelle du CO<sub>2</sub> est en bon accord avec les observations ; néanmoins, le modèle semble simuler une

réponse trop forte aux événements de type La Niña. Nous avons également utilisé les données de pénétration du carbone anthropique dans l'océan de Sabine et al. (2005) et comparé à la pénétration simulée par le modèle IPSL\_CM4\_Loop. Globalement, Sabine et al. (2005) estiment que l'océan a absorbé 106 PgC (pétagrammes de carbone, soit 10<sup>15</sup> g) depuis le préindustriel, alors que le modèle calcule une absorption de 96,5 PgC de 1869 à 1995.

## Perspectives

Des simulations avec des forçages en concentration des autres gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O...), aérosols et volcans, sont également réalisées. Nous pourrions estimer le rôle de ces différents forçages additionnels sur le réalisme du climat et du cycle du carbone simulé au xx<sup>e</sup> siècle, ainsi que leur impact sur l'amplitude de la rétroaction climat-carbone au XXI<sup>e</sup> siècle.

## Bibliographie

- **Aumont O. et L. Bopp**, 2006 : Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochem. Cycles*, 20, DOI:10.1029/2005GB002591.
- **Bousquet P., P. Peylin, P. Ciais, C. Le Quééré, P. Friedlingstein et P. P. Tans**, 2000 : Regional Changes in Carbon Dioxide Fluxes of Land and Oceans Since 1980. *Science*, 290, 1342-1346.
- **Cox P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall et I. J. Totterdell**, 2000 : Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187.
- **Dufresne J.-L., P. Friedlingstein, M. Berthelot, L. Bopp, P. Ciais, L. Fairhead, H. LeTreut et P. Monfray**, 2002 : Effects of climate change due to CO<sub>2</sub> increase on land and ocean carbon uptake. *Geophys. Res. Lett.*, 29, DOI:10.1029/2001GL013777.
- **Dufresne J.-L., D. Salas y Méliá, S. Denvil, S. Tyteca, O. Arzel, S. Bony, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, L. Fairhead, T. Fichet, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, J.-F. Guérémy, F. Hourdin, A. Idelkadi, G. Krinner, C. Lévy, G. Madec, P. Marquet, O. Marti, I. Musat, S. Planton, J.-F. Royer, D. Swingedow et A. Voltaire** : Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 55, 45-59.
- **Friedlingstein P., J.-L. Dufresne, P. M. Cox et P. Rayner**, 2003 : How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus*, 55B, 692-700.
- **Friedlingstein P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, B. Govindasamy, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. J. Weaver, C. Yoshikawa et N. Zeng** : Climate-carbon cycle feedback analysis, results from the C4MIP model intercomparison. *J. Climate*, 19, 3337-3353.
- **Globalview-CO<sub>2</sub>**, 2006 : Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. CD-ROM, NOAA GMD, Boulder, Colorado [également sur Internet via FTP anonyme à ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/GLOBALVIEW].
- **Houghton R. A. et J. L. Hackler**, 2002 : Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., États-Unis, 74 p.
- **Jones C. D. et P. M. Cox**, 2001 : Modelling the volcanic signal in the atmospheric CO<sub>2</sub> record. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 15, 453-466.
- **Krinner G., N. Viovy, N. deNoblet, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch et I. Prentice**, 2005 : A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 19, DOI:1029/2003GB002199.
- **Leemans R., E. Kreileman, G. Zuidema, J. Alcamo, M. Berk, G. J. van den Born, M. den Elzen, R. Hootsmans, M. Janssen, M. Schaeffer, A. M. C. Toet et H. J. M. de Vries**, 1998 : *The Image User Support System: Global Change Scenarios from Image 2.1*. RIVM Publication (CD-ROM) 4815006, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Pays-Bas.
- **Lucht W, I. C. Prentice, R. B. Myneni, S. Sitch, P. Friedlingstein, W. Cramer, P. Bousquet, W. Buermann et B. Smith**, 2002 : Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 296, 1687-1689.
- **Marland G., T. A. Boden et R. J. Andres**, 2005 : Global, Regional, and National CO<sub>2</sub> Emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., États-Unis.
- **Marti O., P. Braconnot, J. H. G. Bellier, R. Benshila, S. Bony, P. Brockmann, P. Cadule, A. Knaeuer, A. Caubel, S. Denvil, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M. A. Filibert, M.-A. Foujols, T. Fichet, P. Friedlingstein, H. Goosse, J.-Y. Grandpeix, F. Hourdin, G. Krinner, C. Lévy, G. Madec, I. Musat, N. de Noblet, J. Polcher et C. Talandier**, 2005 : The new IPSL climate system model : IPSL-CM4. *Note du Pôle de Modélisation*, 26, IPSL, Paris, 84 p.