

Processus régissant la sensibilité climatique

Résumé

Une modification de la concentration des gaz à effet de serre modifie le bilan énergétique de la Terre. Cette modification, appelée forçage radiatif, entraîne une modification de la température moyenne de la Terre dont l'amplitude dépend non seulement du forçage lui-même mais aussi de la façon dont le système climatique dans son ensemble répond à ce forçage. Par exemple, la vapeur d'eau, la cryosphère et les nuages sont modifiés par un changement de température et ces modifications influencent le changement initial de température. Dans cet article nous montrons tout d'abord que ces phénomènes, dits de rétroaction, jouent un rôle clé dans l'estimation de l'amplitude du réchauffement climatique en réponse à un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO_2 . Nous montrons également que l'amplitude de ce réchauffement est différent selon les modèles et que cette différence a pour principale origine la réponse des nuages, et plus particulièrement des nuages bas.

Abstract

Processes governing climatic sensibility

A change in greenhouse gas concentration changes the radiative budget of the Earth, and thus exerts a radiative forcing on the climate system that modifies the global mean surface temperature. The magnitude of this change depends both on the radiative forcing and on the global climate response. For instance, water vapour, the cryosphere and clouds are modified when the temperature changes, and these modifications affect the initial temperature change. In this paper we show that all these phenomena, referred to as feedbacks, play a key role in the magnitude of the temperature change due to a doubling of the CO_2 concentration. We also show that the magnitude of this temperature change varies substantially among models. This arises primarily from inter-model differences in the response of clouds, particularly low-level clouds.

Sandrine Bony et Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de météorologie dynamique (LMD-IPSL), CNRS-UPMC
4, place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05
sandrine.bony@lmd.jussieu.fr

Ndlr Cet article est la reprise du chapitre 2 du rapport Eschime (voir la présentation page 27).

Le climat de la Terre est décrit par de nombreuses variables et a un comportement très complexe. En représentant l'essentiel de cette complexité, les modèles de circulation générale sont relativement réalistes mais aussi assez difficiles à analyser. Une façon de décrypter et de synthétiser la masse d'information qu'ils produisent est de se baser sur des modèles théoriques très simples, tels les modèles énergétiques à 0 dimension. Cela permet, par exemple, d'analyser les changements de température de surface de la Terre en réponse à une modification de l'effet de serre et d'identifier les principaux mécanismes qui influencent ces changements. Cette problématique est connue sous le nom d'étude de la sensibilité climatique et des mécanismes de rétroaction.

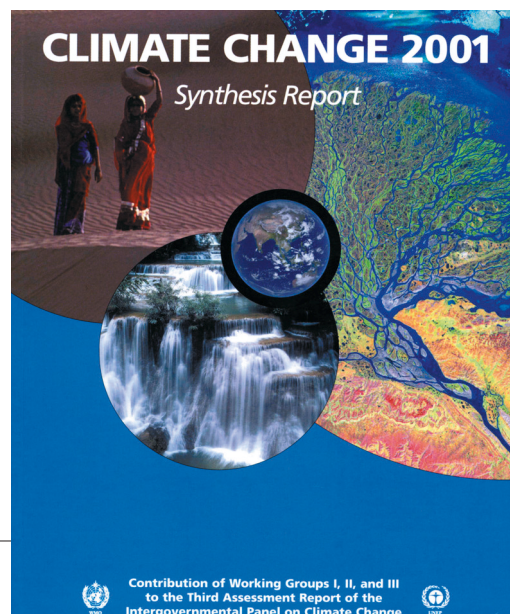
Sensibilité climatique et rétroactions climatiques

La sensibilité climatique est un indicateur global qui quantifie la variation de température de surface de la Terre en réponse à une perturbation, telle un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO_2 . Cet indicateur est souvent utilisé pour comparer très simplement la réponse des différents modèles, ou pour normaliser les variations du climat, lorsque l'on veut par exemple comparer la distribution géographique des variations de température, de précipitations ou autres. Cet indicateur est un diagnostic simple et n'est en aucune façon un grandeur physique en soi.

Les perturbations du forçage radiatif

Une perturbation, telle l'augmentation de la concentration d'un gaz à effet de serre, modifie l'équilibre énergétique de la planète. Pour quantifier cette perturbation, on définit une grandeur, appelée **forçage radiatif**, comme étant l'effet de cette perturbation sur le bilan énergétique au sommet de l'atmosphère, en supposant que toutes les autres caractéristiques de l'atmosphère et de la surface restent fixes. Aujourd'hui, on sait calculer précisément les échanges par rayonnement à l'aide de codes de transfert radiatif et de bases de données spectrales (pourvu que l'on spécifie les différents constituants de l'atmosphère et de la surface : gaz à effet de serre, nuages, aérosols, couverture neigeuse...). On peut aussi calculer précisément l'effet d'une perturbation particulière (comme un changement de la concentration d'un gaz) sur le bilan énergétique de l'atmosphère et de la surface, en supposant que toutes les autres caractéristiques de l'atmosphère et de la surface restent fixes.

Le 3^e rapport du Giec, qui a puissamment contribué à éveiller les esprits sur le changement climatique.



Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change



Le doublement du dioxyde de carbone

À titre d'exemple, pour un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO₂, on obtient un forçage radiatif à la tropopause, pour une atmosphère « moyenne » idéalisée et sans nuages, de $5,48 \pm 0,07 \text{ W.m}^{-2}$ (Collins et al., 2006). Il y a une incertitude, mais on voit qu'elle est assez faible. En moyenne sur le globe et sur l'année, et en tenant compte des nuages, on obtient un forçage radiatif au sommet de l'atmosphère⁽¹⁾ de $3,7 \pm 0,2 \text{ W.m}^{-2}$. Ce déséquilibre énergétique (ou forçage radiatif) va entraîner un changement de la température de surface de la Terre. Un premier calcul très simple consiste à supposer que la température de l'atmosphère et de la surface peut changer, mais que :

- ce changement est le même partout ;
- il n'affecte que la loi d'émission du corps noir (ou loi de Planck), mais ne modifie aucune propriété physique de l'atmosphère ou de la surface ni aucun échange d'énergie autre que ceux par rayonnement infrarouge.

On obtient dans ce cas un accroissement de température à climat fixé en réponse à ce forçage. Ce calcul est précis car l'on connaît la loi du corps noir et l'on sait calculer les échanges radiatifs lorsque toutes les propriétés radiatives sont connues. Toujours avec l'exemple d'un doublement de CO₂, on obtient un accroissement de température de $1,2 \pm 0,1 \text{ °C}$ avec ces hypothèses simplificatrices.

Les rétroactions

Dans la réalité, dès que l'on change la température de surface, toutes les variables climatiques (vent, humidité, nuages, pluie, couverture neigeuse...) sont modifiées. Certaines de ces variations vont entraîner un changement du bilan énergétique au sommet de l'atmosphère, qui va à son tour entraîner un changement de la température d'équilibre de la surface. On appelle cela une boucle de rétroaction. Celle-ci peut être, soit positive (la boucle amplifie l'accroissement initial de température), soit négative (la boucle atténue l'accroissement initial).

Figure 1 - La barre noire large à gauche représente le réchauffement global prédit par les modèles en réponse à un doublement de la concentration en CO₂, soit en moyenne de 3 °C, avec une dispersion entre modèles de 2,2 à 4,5 °C (moyenne plus ou moins un écart-type) représentée par la barre d'erreur contigüe.

La barre colorée au centre représente les contributions moyennes à ce réchauffement, dues uniquement au doublement de CO₂ (c'est-à-dire en négligeant les rétroactions climatiques, noté 2 x CO₂), et aux différentes rétroactions liées aux changements de vapeur d'eau (noté vap.), d'albédo de surface et des nuages. Les barres d'erreur à droite représentent l'incertitude sur le réchauffement provenant de l'incertitude associée à chacune de ces contributions (estimées d'après la dispersion entre modèles).

Les principales boucles de rétroactions du climat sont les suivantes :

- la rétroaction vapeur d'eau : l'augmentation de la température tend à augmenter le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, ce qui augmente l'effet de serre et donc la température de surface ;
- la rétroaction des nuages : les changements de vapeur d'eau et de circulation atmosphérique modifient la couverture nuageuse et ses propriétés radiatives, et donc la fraction de rayonnement solaire qu'ils réfléchissent et leur contribution à l'effet de serre ;
- la rétroaction due à l'albédo de surface : l'augmentation de la température de surface peut changer les propriétés radiatives de la surface (car la neige ou la glace de mer fondent plus vite), qui absorbera alors plus de rayonnement solaire et réchauffera davantage son environnement.

Analyse des rétroactions dans les modèles climatiques ayant participé au 4^e rapport du Giec

La comparaison des modèles climatiques

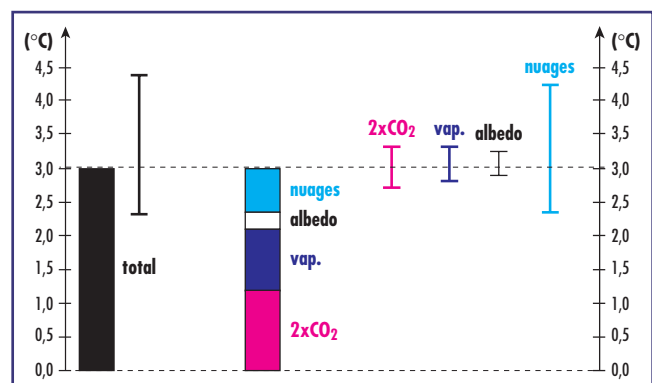
Pendant longtemps, en gros jusqu'au 3^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), l'analyse des rétroactions climatiques a été limitée à quelques modèles. Ces études isolées mettaient en évidence la très grande sensibilité des rétroactions à la modélisation de divers processus, notamment à la représentation des nuages. Ces dernières années, en vue de la préparation du 4^e rapport du Giec, la situation a radicalement changé avec l'organisation de vastes projets d'intercomparaison de modèles, par exemple Climate Model Evaluation Project (CMEP), Cloud Feedback Model Intercomparison

Project (CFMIP). Pour la première fois, les rétroactions climatiques ont été quantifiées dans un grand nombre de modèles (Colman, 2003 ; Hall et Qu, 2006 ; Soden et Held, 2006 ; Webb et al., 2006 ; Winton et al., 2006), et de nouvelles méthodologies d'analyse et d'évaluation de ces rétroactions ont été développées (Bony et al., 2004 ; Forster et Collins, 2004 ; Bony et al., 2006 ; Hall et Qu, 2006 ; Webb et al., 2006 ; Williams et al., 2006). Grâce à ces différentes études, des progrès substantiels ont été réalisés dans la compréhension des écarts de sensibilité climatique entre les modèles, ainsi que dans l'évaluation observationnelle de certaines composantes clés dans des rétroactions. La communauté française a joué un rôle majeur dans ces activités de recherche ainsi que dans la rédaction de la partie du 4^e rapport du Giec concernant ce sujet.

Les modèles climatiques participant au 4^e rapport du Giec indiquent qu'un doublement de CO₂ aura pour conséquence un accroissement de température de 2 à 4,5 °C, avec une moyenne à 3 °C environ (partie gauche de la figure 1). Ainsi, les rétroactions climatiques multiplient la variation initiale de la température par un facteur allant de 2 à 3,5 environ. On peut également remarquer sur cette figure que ce sont les rétroactions climatiques qui sont à l'origine des incertitudes sur les changements de température, le calcul sans rétroaction étant, lui, assez précis.

Pour chacun des modèles, on peut ensuite diagnostiquer la contribution des trois principales boucles de rétroaction (nuages, albédo de surface, vapeur d'eau) à cet accroissement supplémentaire de température (partie droite de la figure 1, d'après Soden et Held, 2006).

(1) On considère ici le forçage radiatif au sommet de l'atmosphère avec ajustement stratosphérique. Cette méthode suppose que la stratosphère s'ajuste de sorte que son bilan radiatif reste inchangé. Elle permet de rendre le forçage radiatif mieux adapté à l'étude des variations lentes du climat.



La rétroaction vapeur d'eau

Du fait des propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau, une augmentation de la température entraîne une augmentation de la quantité de vapeur d'eau au point de saturation. Si l'humidité relative de l'atmosphère reste constante, une augmentation de la température se traduira donc par une augmentation du contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau, et donc par un accroissement de l'effet de serre. La vapeur d'eau étant le principal gaz à effet de serre, nous sommes en présence d'une rétroaction positive qui est très forte.

Mais, dans les régions tropicales, le profil vertical de température est très proche du profil adiabatique humide. Lorsque la quantité de vapeur d'eau augmente, ce profil de température est modifié. Les températures en altitude augmentent plus que les températures près de la surface, ce qui a tendance à diminuer l'effet de serre. Nous sommes en présence d'une rétroaction négative. Comme ces deux rétroactions, de signes opposés, sont très corrélées entre elles, on les associe souvent. Cette rétroaction « combinée », bien que beaucoup moins forte que la rétroaction vapeur d'eau seule, constitue la principale rétroaction amplificatrice de la sensibilité climatique (partie droite de la figure 1).

Les explications ci-dessus reposent sur l'hypothèse d'un changement quasi nul de l'humidité relative. Les modèles atmosphériques n'incluent pas explicitement cette hypothèse, mais incluent une modélisation des phénomènes physiques intervenant dans le cycle de l'eau : évaporation, transport, condensation, formation des nuages et des précipitations. Lorsque l'on réalise des simulations de changements climatiques avec les modèles, les résultats correspondent à un changement quasi nul de l'humidité relative. La confiance que l'on porte à la rétroaction vapeur d'eau des modèles dépend en premier lieu de la crédibilité de ce comportement. Plusieurs études récentes suggèrent que ce comportement ne résulte pas d'un artefact numérique (en particulier cela ne semble pas trop dépendre de la résolution verticale des modèles). D'autre part, pour des variations climatiques associées à des changements relativement faibles de la circulation atmosphérique (ce que les modèles suggèrent pour un réchauffement global de la planète ou pour des variations décennales du climat), les observations montrent également une quasi-constance de l'humidité relative à grande échelle. Enfin, il est apparu ces dernières années que la vapeur d'eau stratosphérique

(généralement mal simulée par les modèles) jouait probablement un rôle minime dans l'amplitude globale de la rétroaction vapeur d'eau. Pour toutes ces raisons, on pense que l'amplitude de la rétroaction vapeur d'eau des modèles est probablement du bon ordre de grandeur.

Toutefois, s'agissant de la rétroaction la plus puissante du système climatique, on peut considérer qu'évaluer l'ordre de grandeur ne suffit pas. Pour aller plus loin, il sera nécessaire d'évaluer plus finement la capacité des modèles à représenter les processus physiques susceptibles de contrôler les changements d'humidité relative en changement climatique. Parmi ces processus, la précipitation des nuages convectifs, l'évaporation des cristaux de glace et le mélange turbulent entre l'air nuageux et l'atmosphère alentour méritent une attention particulière. En parallèle, pour s'assurer que les modèles représentent correctement la distribution de la vapeur d'eau dans une grande gamme de conditions climatiques (et à fortiori en changement climatique), il s'agira d'évaluer plus finement que par le passé le réalisme des variations naturelles de la vapeur d'eau simulées à différentes échelles de temps (diurne, intrasaisonnière, saisonnière, interannuelle, décennale). Une attention particulière devra être portée aux variations de vapeur d'eau en altitude, car ce sont elles qui ont la plus grande capacité à modifier l'intensité de l'effet de serre.

La rétroaction liée aux changements de neige et de glace

C'est dans les régions polaires que les modèles prédisent le plus fort réchauffement en changement climatique. Les rétroactions liées à la cryosphère en sont en partie responsables. L'augmentation de la température globale de la planète entraîne une fonte accrue de la neige et de la glace de mer. Cela entraîne une augmentation du rayonnement solaire absorbé à la surface, ce qui amplifie le réchauffement. Des études récentes suggèrent que ces rétroactions jouent bien un rôle clé à l'échelle régionale, mais, qu'à l'échelle globale, une autre rétroaction joue également un rôle important : c'est l'augmentation du transport de la vapeur d'eau des moyennes vers les hautes latitudes.

L'évaluation des rétroactions liées à la glace de mer se heurte encore beaucoup au manque d'observations. En revanche, nous assistons aujourd'hui aux premières tentatives d'évaluation de la rétroaction



Le traitement des stratocumulus est l'un des principaux défis de la modélisation climatique.

radiative liée à la neige : dans les modèles participant au 4^e rapport du Giec, la relation entre variations de température de surface et albédo de la neige établie pour le cas d'un changement climatique s'avère, pour chacun des modèles, très similaire à celle établie dans le cas de variations saisonnières du climat présent (Hall et Qu, 2006). L'utilisation d'observations pour évaluer la rétroaction à l'échelle saisonnière offre donc la possibilité d'évaluer aussi, indirectement, la rétroaction en changement climatique. Dans cette étude, le modèle du Centre national de recherches météorologiques (CNRM) semble simuler une rétroaction neige-albédo un peu faible, tandis que le modèle de l'IPSL simule une rétroaction du bon ordre de grandeur. Toutefois, d'autres diagnostics de comparaison modèles-observations considérant d'autres échelles de temps sont nécessaires pour tester la robustesse de ce résultat.

La rétroaction liée aux nuages

La diversité des rétroactions liées aux nuages est considérée depuis plus de quinze ans (et le 1^{er} rapport du Giec !) comme l'une des principales sources d'incertitude pour la sensibilité climatique. La figure 1 montre que c'est toujours le cas aujourd'hui puisque c'est pour la rétroaction nuageuse que l'on note la plus forte disparité entre les modèles. De très nombreux facteurs étant potentiellement responsables de cette diversité, il est important de mieux préciser quels sont les facteurs dominants dans cette incertitude pour aider à définir des remèdes. Dans cette optique, nous avons analysé la réponse radiative des nuages tropicaux au réchauffement climatique simulé par quinze modèles climatiques participant au 4^e rapport du Giec. Nous montrons que la diversité des rétroactions nuageuses entre les modèles s'explique en premier lieu par

des différences de réponses des nuages bas (stratus, stratocumulus et petits cumulus). En comparaison, les différences de réponses des nuages convectifs (cumulonimbus et enclumes) entre les modèles jouent un rôle secondaire (figure 2). D'autre part, nous avons étudié la réponse des nuages à un changement de température de la mer dans le climat actuel (variations interannuelles) à partir d'observations spatiales, et l'avons comparée à la réponse simulée par les différents modèles climatiques dans des simulations du xx^e siècle. Les résultats montrent que c'est dans les régions dominées par les nuages bas (zones de subsidence) que :

- la sensibilité des nuages à la température est la plus forte dans les observations ;
- l'écart entre simulations et observations est le plus grand (avec notamment treize modèles sur quinze qui sous-estiment cette sensibilité) ;
- l'écart entre les simulations des différents modèles est le plus important.

La combinaison de ces différents résultats nous mène à conclure qu'actuellement, la réponse des nuages de couche limite aux changements des conditions climatiques est au cœur des incertitudes des rétroactions nuageuses dans les modèles climatiques (Bony et Dufresne, 2005). Webb et al. (2006), dans le cadre de CFMIP, confirment ce résultat en utilisant une autre méthodologie et en considérant un autre ensemble de modèles.

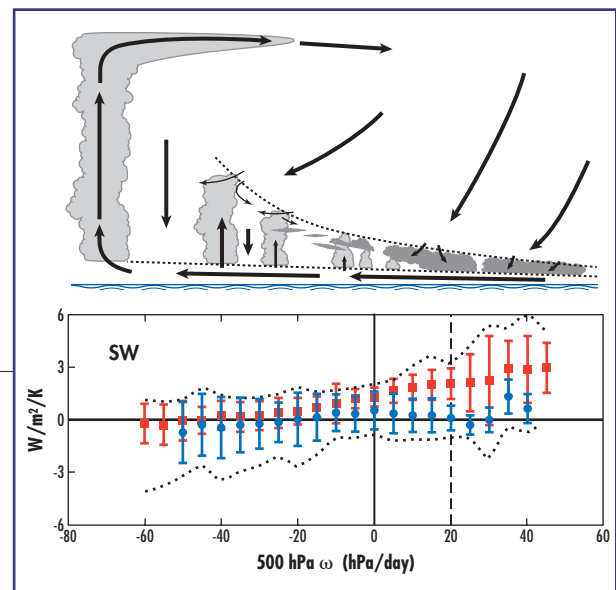
Il va maintenant falloir approfondir ces études pour comprendre plus précisément pourquoi les nuages de couche limite répondent diversement au réchauffement climatique dans les différents modèles. Nous pourrions alors proposer des tests observationnels susceptibles de discriminer les différents comportements nuageux simulés en changement climatique, et ainsi de mieux contraindre la fourchette des estimations de la sensibilité climatique dérivée des modèles de climat.

Conclusion

Les travaux d'intercomparaison de modèles réalisés en vue de la préparation du 4^e rapport du Giec ont permis de mieux apprécier le rôle relatif des différentes rétroactions climatiques dans la dispersion des estimations de sensibilité climatique par les modèles, et de mieux identifier les principales sources d'incertitude associées à chacune des rétroactions (par exemple, la réponse des nuages bas au réchauffement climatique). De gros progrès restent à faire sur l'évaluation du réalisme relatif des différentes réponses de

modèles. Cela demandera de développer des méthodologies spécifiques pour déterminer en quoi l'évaluation de tel ou tel processus dans le climat actuel est pertinente pour évaluer telle ou telle composante des rétroactions climatiques. Cela demandera aussi de mieux comprendre les processus physiques impliqués dans ces rétroactions. Nous entrons actuellement dans l'âge d'or de l'observation spatiale de la Terre, avec notamment l'arrivée de nouveaux jeux de données exceptionnels (par exemple *Calipso*, *CloudSat*, *AIRS*) pour étudier et évaluer les distributions de la vapeur d'eau et des nuages dans les modèles. Les données seules ne suffiront pas à contraindre les rétroactions nuageuses, mais, associées à de réels efforts d'analyse et de compréhension des processus de rétroaction dans les modèles et à des approches originales de comparaison modèles-données, nous avons bon espoir que de réels progrès pourront être accomplis en ce domaine dans les prochaines années.

Figure 2 - Sensibilité du forçage radiatif ondes courtes des nuages tropicaux au réchauffement climatique dans différents régimes de la circulation atmosphérique, associés à différents types de nuages dominants (une sensibilité positive correspond à une diminution de la réflectivité du rayonnement solaire par les nuages). C'est dans les régimes de subsidence atmosphérique, caractérisés par la présence de nuages bas du type stratus, stratocumulus ou petits cumulus, que la réponse radiative des nuages au réchauffement diffère le plus entre les modèles climatiques sensibles [en rouge, moyenne des simulations de modèles prédisant un fort réchauffement climatique] et les modèles les moins sensibles [en bleu, modèles prédisant un réchauffement climatique moindre]. (Adapté de Bony et Dufresne, *Geophys. Res. Lett.*, 2005)



Bibliographie

- Bony S., J.-L. Dufresne, H. Le Treut, J.-J. Morcrette et C. Senior, 2004 : On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Climate Dynamics*, 22, 71-86.
- Bony S. et J.-L. Dufresne, 2005 : Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20806.1- L20806.4, doi : 10.1029/2005GL023851.
- Bony S., R. Colman, V. M. Kattsov, R. P. Allan, C. S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M. M. Holland, W. Ingram, D. A. Randall, B. J. Soden, G. Tselioudis and M. J. Webb, 2006 : How well do we understand and evaluate climate change feedback processes ? *J. Climate*, 19, 3445-3482.
- Colman R. A., 2003 : A comparison of climate feedbacks in general circulation models. *Climate Dynamics*, 20, 865-873.
- Forster P. M. et M. Collins, 2004 : Quantifying the water vapour feedback associated with post-Pinatubo cooling. *Climate Dynamics*, 23, 207-214.
- Hall A. et X. Qu, 2006 : Using the current seasonal cycle to constrain snow albedo feedback in future climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03502, doi : 10.1029/2005GL025127.
- Soden B. J. et I. M. Held, 2006 : An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models. *J. Climate*, 19, 3354-3360.
- Webb M. J., C. A. Senior, D. M. H. Sexton, W. J. Ingram, K. D. Williams, M. A. Ringer, B. J. McAvaney, R. Colman, B. J. Soden, R. Gudgel, T. Knutson, S. Emori, T. Ogura, Y. Tsuchida, N. Andronova, B. Li, I. Musat, S. Bony et K. Taylor, 2006 : On the contribution of local feedback mechanisms to the range of climate sensitivity in two GCM ensembles. *Climate Dynamics*, 27, 17-38, doi : 10.1007/s00382-006-0111-2
- Williams K. D., M. A. Ringer, C. A. Senior, M. J. Webb, B. J. McAvaney, N. Andronova, S. Bony, J.-L. Dufresne, S. Emori, R. Gudgel, T. Knutson, B. Li, K. Lo, I. Musat, J. Wegner, A. Slingo et J. F. B. Mitchell, 2006 : Evaluation of a component of the cloud response to climate change in an intercomparison of climate models. *Climate Dynamics*, 26, 145-165, doi : 10.1007/s00382-005-0067-7.
- Winton M., 2006 : Surface Albedo Feedback Estimates for the AR4 Climate Models. *J. Climate*, 19, 359-365.