

2

Processus régissant la sensibilité climatique

Sandrine Bony et Jean-Louis Dufresne
IPSL/LMD, CNRS/UPMC UMR 8539

Université Paris 6, tour 45-55, 3^{ème} étage. 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Email : sandrine.bony@lmd.jussieu.fr, jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr

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

Email : pascale.braconnot@cea.fr

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, tel un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO₂. 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 températures, de précipitations, ou autres. Cet indicateur est un diagnostic simple et n'est en aucune façon une grandeur physique en soi. 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 fixées.

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 (tel 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 fixées. A 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 $3.7 \pm 0.2 \text{ W.m}^{-2}$.

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.

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 (1) ce changement est le même partout et que (2) 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 que 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 $1,2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ avec ces hypothèses simplificatrices.

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). Les principales boucles de rétroactions du climat sont :

● **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 (1) la fraction de rayonnement solaire qu'ils réfléchissent et (2) 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 d'avantage son environnement. ►

Analyse des rétroactions dans les modèles climatiques ayant participé au 4^{ème} rapport du GIEC

Pendant longtemps (en gros jusqu'au 3^{ème} rapport du 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^{ème} rapport du GIEC, la situation a radicalement changé avec l'organisation de vastes projets d'intercomparaison de modèles (e. g. CMEP, 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 and 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 clé 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^{ème} rapport du GIEC concernant ce sujet (**chapitre 8**).

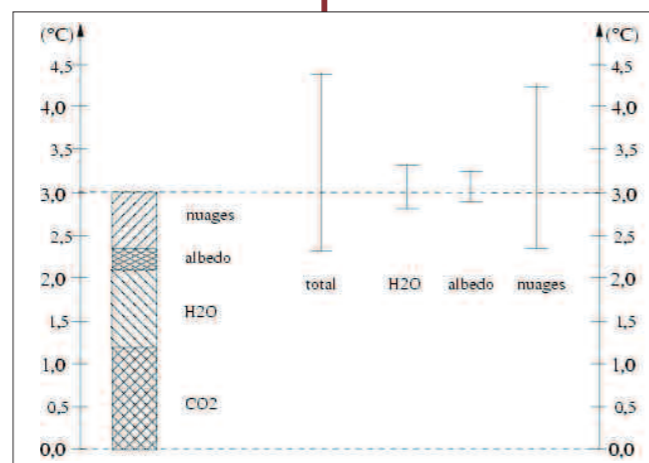
Les modèles climatiques participant au 4^{ème} rapport du GIEC indiquent qu'un doublement de CO₂ aura pour conséquence un accroissement de température de 2 à 4,5°C, avec une moyenne à 3°C environ (**partie gauche de la figure 1**). Ainsi les rétroactions climatiques multiplient la variation initiale 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**).

La rétroaction de la 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

Figure 1 : En réponse à un doublement de la concentration en CO₂, le réchauffement global prédit par les modèles est en moyenne de 3°C. La partie gauche de la figure représente la part de ce réchauffement due uniquement à l'augmentation de CO₂ (en négligeant les rétroactions climatiques), et les contributions des différentes des rétroactions (celles dues aux changements de vapeur d'eau, d'albédo de surface et de nuages) à ce réchauffement. La partie droite de la figure représente l'incertitude sur cette augmentation de température et l'incertitude due aux rétroactions.



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 altitudes 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 artéfact 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 a 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, intra-saisonnière, 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 radiative 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. Ceci 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 clef 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 radiative liée à la neige : dans les modèles participant au 4^{ème} 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 and 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 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 15 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 simulée par 15 modèles climatiques

participant au 4^{ème} rapport du GIEC. Nous montrons que la diversité des rétroactions nuageuses entre les modèles s'explique en premier lieu par différentes 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

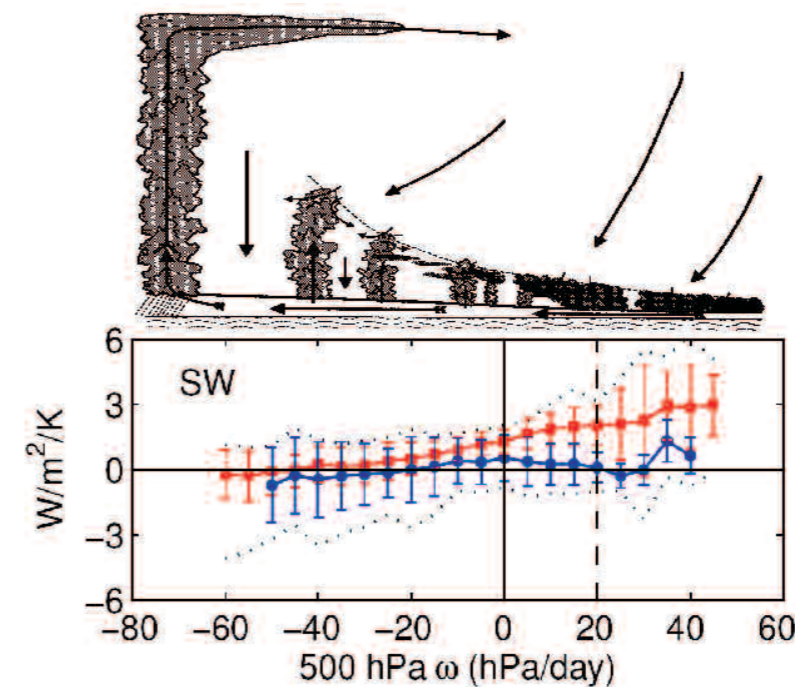


Figure 2 : Sensibilité du forçage radiatif ondes-courtes des nuages tropicaux au réchauffement climatique dans différents régimes de la circulation atmosphérique, associés à différents types de nuages dominants (une sensibilité positive correspond à une diminution de la réflectivité du rayonnement solaire par les nuages). C'est dans les régimes de subsidence atmosphérique (régimes où la vitesse verticale de grande échelle est positive), 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)

différents modèles climatiques dans des simulations du 20^{ème} siècle. Les résultats montrent que c'est dans les régions dominées par les nuages bas (zones de subsidence) que (1) la sensibilité des nuages à la température est la plus forte dans les observations, (2) que l'écart entre simulations et observations est le plus grand (avec notamment 13 modèles sur 15 qui sous-estiment cette sensibilité), et (3) que 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 de l'AR4 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 climatiques (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 les rétroactions climatiques.

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. ■

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 (e.g. CALIPSO, CloudSat, AIRS) pour étudier et évaluer les distributions de la vapeur d'eau et des nuages dans les modèles.

Références

Bony S, J-L Dufresne, H Le Treut, J-J Morcrette and C Senior, 2004 :

On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Clim. Dyn.*, 22, 71-86.

Bony S and J-L Dufresne, 2005 : Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, 32, No. 20, L20806, 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. Clim.*, 19, 3445-3482.

Colman, R.A., 2003 : A comparison of climate feedbacks in general circulation models. *Clim. Dyn.*, 20, 865-873.

Forster, P.M. de F. and M. Collins, 2004 :

Quantifying the water vapour feedback associated with post-Pinatubo cooling. *Clim. Dyn.*, 23, 207-214.

Hall, A. and 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. and I.M. Held, 2006 : An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models. *J. Clim.*, 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 Tsushima, N Andronova, B Li, I Musat, S Bony and K Taylor, 2006 : On the contribution of local feedback mechanisms to the range of climate sensitivity in two GCM ensembles. *Clim. Dyn.*, 27, 17-38, DOI : 10.1007/s00382-006-0111-

Williams KD, MA Ringer, CA Senior, MJ Webb, BJ McAvaney, N Andronova, S Bony, J-L Dufresne, S Emori, R Gudgel, T Knutson, B Li, K Lo, I Musat, J Wegner, A Slingo and J F B Mitchell, 2006 :

Evaluation of a component of the cloud response to climate change in an intercomparison of climate models, *Clim. Dyn.*, 26, 145-165, DOI: 10.1007/s00382-005-0067-7.

Winton, M., 2006 : Surface Albedo Feedback Estimates for the AR4 Climate Models. *J. Clim.*, 19, 359-365.