

Les nouveaux scénarios climatiques du GIEC

The new IPCC climate scenarios

Serge PLANTON⁽¹⁾, Pascale BRACONNOT⁽²⁾, Christophe CASSOU⁽³⁾, Jean-Louis DUFRESNE⁽⁴⁾, Stéphane HALLEGATTE⁽⁵⁾, David SALAS Y MELIA⁽¹⁾

Résumé

Dans le cadre du projet international CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project*), et en préparation au prochain rapport du GIEC, deux modèles climatiques français ont été mis en œuvre pour réaliser un ensemble de simulations du climat passé et futur. Les scénarios du climat futur sont basés sur des trajectoires d'évolution du bilan radiatif de la terre (*Representative Concentration Pathways*, ou *RCPs*), associés à de nouveaux scénarios anthropiques d'évolution des émissions et concentrations de gaz à effet de serre, d'aérosols et de gaz chimiquement actifs, ainsi qu'à des scénarios d'utilisation des terres. Les premières analyses montrent un réchauffement planétaire futur compris entre 2 °C et 3,5 °C à 5 °C sur l'ensemble du ^{xxi} siècle, selon le scénario et le modèle utilisés. Plusieurs caractéristiques des projections climatiques antérieures et du rôle des activités humaines dans les changements climatiques récents sont confirmées, mais de nouveaux résultats ont aussi été obtenus grâce à cet exercice. Ces simulations permettront aussi de conduire de nouvelles études de régionalisation et d'impact des changements climatiques prenant en compte aussi bien les politiques climatiques d'atténuation que d'adaptation.

Mots-clés

GIEC, scénarios, RCP, effet de serre, climat, simulations, modèles, global, CMIP5.

Abstract

Within the context of the CMIP5 international project (Coupled Model Intercomparison Project), and in preparation to the next IPCC report, two French climate models have been used to perform an ensemble of past and future climate simulations. The future climate scenarios are based on earth's radiation budget time-dependent trajectories (Representative Concentration Pathways or RCPs), associated to new anthropogenic greenhouse gases, aerosols and chemically active gases emissions and concentrations scenarios, as well as land use scenarios. The first analyses show a future global warming between 2 °C and 3.5 °C to 5 °C over the whole 21st century, according to the scenario or model used. Several characteristics of previous climate projections and the role of human activities in recent climate changes are confirmed, but new results have also been obtained thanks to this exercise. These simulations will also allow new regionalization and climate change impact studies taking into account as well mitigation as adaptation climate policies.

Keywords

IPCC, scenarios, RCP, greenhouse effect, climate, simulations, models, global, CMIP5.

(1) Centre National de Recherches Météorologiques – Groupe d'Études de l'Atmosphère Météorologique, Météo-France, Toulouse, France.

(2) Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, France.

(3) Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique, Toulouse, France.

(4) Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris, France.

(5) Banque Mondiale, Washington, USA.

Introduction

Le premier objectif du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) est d'évaluer l'information scientifique et socio-économique sur le changement climatique, ses impacts et les différentes options pour l'atténuer ou s'y adapter. Son 5^e rapport d'évaluation, dont le premier volet sur les bases scientifiques du changement climatique sera publié à la mi-septembre 2013, fera l'état des connaissances accumulées au cours de ces dernières années. Comme cela a été le cas pour le précédent rapport de 2007 [GIEC, 2007], la communauté scientifique s'est mobilisée en particulier au travers du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC), pour concevoir et réaliser un exercice international de simulation du climat passé et futur dont l'analyse permettra de contribuer à cette nouvelle synthèse du GIEC. Cet ensemble de simulations appelé CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project*) va permettre d'apporter un nouveau regard sur le lien entre les activités humaines et le climat, que ce soit au cours des dernières décennies, mais surtout en se projetant sur les décennies et siècles futurs.

Cet exercice, comme les précédents du même type, a été réalisé à partir de modèles numériques globaux du système climatique [Jeandel et Mosseri, 2011]. Ces modèles représentent les circulations tridimensionnelles de l'atmosphère et de l'océan en tenant compte des interactions avec les surfaces continentales, la glace de mer et le transport de l'eau par les fleuves. Ils représentent aussi les couplages entre la chimie atmosphérique, les aérosols, le rayonnement atmosphérique et les nuages, et certains intègrent une représentation du cycle du carbone. La représentation des processus de chimie troposphérique n'est cependant pas encore suffisamment détaillée pour que les simulations puissent être directement utilisées pour traiter la question de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air. Des projets de recherche abordent cette question en régionalisant les résultats des simulations climatiques globales notamment sur l'Europe, et en faisant intervenir des modèles de chimie atmosphérique plus complexes (*cf.* article de A. Colette dans ce numéro). Ces travaux sont en cours et il est donc prématuré de s'interroger sur les conséquences du changement climatique sur la pollution atmosphérique sur la base de ces nouveaux scénarios climatiques. Nous nous limitons dans cet article à la présentation des scénarios d'émissions anthropiques qui ont été utilisés (section suivante), à la présentation de l'exercice de simulation du climat qui a été réalisé à partir de ces scénarios et en particulier à la contribution des équipes françaises (section 3), et à l'exposé de quelques résultats marquants tirés des simulations de ces équipes (section 4).

Les scénarios d'émissions anthropiques

Lors des précédents exercices de simulation CMIP, la construction des scénarios se faisait de manière linéaire : des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre étaient d'abord établis à partir d'hypothèses sur les évolutions démographiques, sociales, économiques et technologiques à l'échelle du globe. Les projections climatiques étaient les réponses des modèles numériques à ces scénarios d'émissions. Dans le cadre de CMIP5, les groupes de travail internationaux ont retenu une nouvelle approche. Modélisateurs du climat et économistes ont travaillé en parallèle, les premiers pour effectuer des projections climatiques, les seconds pour élaborer des scénarios socio-économiques, à partir de « trajectoires » d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (les RCPs pour « *Representative Concentration Pathways* »). Ces trajectoires proviennent des résultats des recherches les plus récentes menées à partir de modèles intégrant les évolutions socio-économiques et climatiques sous une forme relativement simplifiée.

Cette démarche parallèle permet aux économistes d'établir des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques permettant de rendre compte de ces RCPs, notamment ceux qui prennent en compte des politiques climatiques permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette hypothèse n'avait pas été explorée lors des précédents exercices. Par ailleurs, la démarche parallèle n'impose plus de procéder à de nouvelles simulations climatiques après toute modification des scénarios socio-économiques. De plus, les simulations climatiques réalisées avec les scénarios RCP pourront être réinterprétées en termes socio-économiques à l'issue des travaux des économistes.

Les scénarios RCPs peuvent être traduits en termes de modification du bilan radiatif de la planète, ce qui permet de les comparer avec les anciens scénarios d'émission [dits SRES pour « *Special Report on Emissions Scenarios* », Nakićenović et Swart, 2000] figurant dans les deux derniers rapports du GIEC (2001 et 2007). Quatre scénarios RCP de référence ont été retenus pour le projet CMIP5 parmi plus de 300 couvrant les années 2006 à 2300. Trois d'entre eux donnent lieu à des trajectoires d'évolution de concentrations de gaz à effet de serre comparables à celles utilisées pour les deux derniers rapports du GIEC du point de vue de la perturbation du bilan radiatif de la terre (tableau I et figure 1). Le scénario le plus élevé (RCP8.5) est toutefois un peu plus sévère que l'ancien scénario A2. Le scénario le plus bas (RCP2.6) n'a, quant à lui, pas d'équivalent parmi les anciens scénarios. Il correspond à de très faibles émissions de gaz à effet de serre qui ne peuvent être obtenues que par l'application de politiques climatiques exigeantes.

Tableau I.
Principales caractéristiques des quatre scénarios RCP.
Main characteristics of the four RCP scenarios.

Nom	Changement du bilan radiatif (forçage radiatif)	Concentration (en partie par million)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370 eq- CO ₂ * en 2100	croissante
RCP6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq- CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq- CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

*eq- CO₂ est une abréviation pour équivalent CO₂. Il s'agit de la concentration de CO₂ équivalente à la totalité des gaz à effet de serre en termes de forçage radiatif.

À chacun de ces RCPs correspondent une trajectoire d'évolution des émissions et concentrations de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone ou CO₂, méthane ou CH₄, protoxyde d'azote ou N₂O...), ainsi qu'une trajectoire d'évolution de l'occupation des sols. Tous les modèles ont utilisé les trajectoires de concentrations de façon à pouvoir comparer l'ensemble des résultats. Un sous-ensemble de simulation avec les modèles incluant le cycle du carbone a été réalisé à partir des trajectoires d'émission pour quantifier les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone. De même, l'utilisation des scénarios de

changement d'occupation des sols est restée optionnelle, certains modèles et simulations de CMIP5 les prenant en compte dans les scénarios du climat futur.

Les simulations climatiques globales

À la date de rédaction de cet article, une soixantaine de modèles climatiques couplés mis en œuvre par 27 groupes de recherche climatique ont été utilisés pour réaliser tout ou partie des simulations de CMIP5. Parmi eux, le modèle CNRM-CM, développé

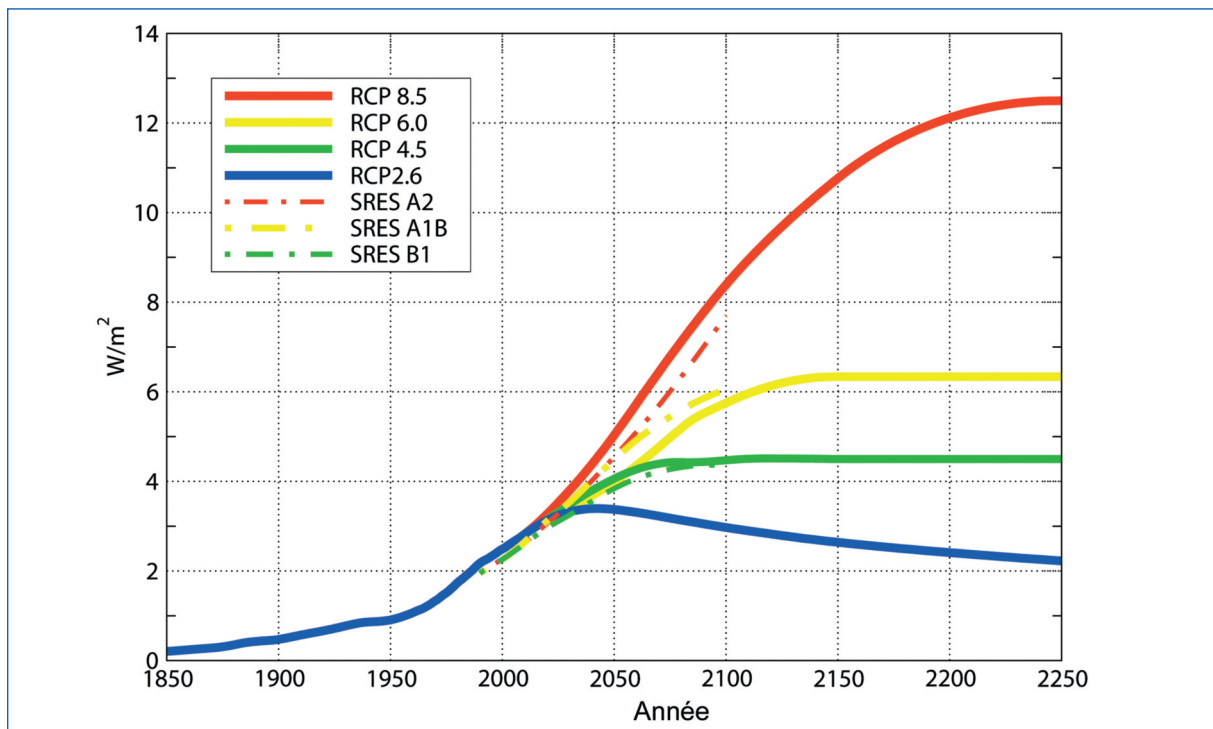


Figure 1.

Changement du bilan radiatif de la terre au sommet de l'atmosphère, ou « forçage radiatif » (en Wm⁻²) induit par les activités humaines. Après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios dits « Representative Concentration Pathways » et les traits pointillés les scénarios SRES (GIEC, 2007).

Change in the earth's radiation budget at the top of the atmosphere, or "radiative forcing" (in Wm⁻²) induced by anthropogenic activities. After 2006, the continuous lines represent the so-called "Representative Concentration Pathways" new scenarios and the dashed lines the SRES scenarios (IPCC, 2007).

par les équipes de Météo-France en collaboration avec le CERFACS et l'IPSL [Voldoire *et al.*, 2012] et le modèle IPSL-CM développé par l'IPSL [Dufresne *et al.*, 2013]. Ces deux modèles avaient été utilisés dans des configurations et versions différentes pour l'exercice de simulation précédent du même type datant de 2005 (CMIP3). La première nouveauté est que la planète est maintenant décrite dans ces modèles avec une résolution plus fine. Dans le cas du modèle CNRM-CM, la taille de la maille élémentaire de calcul dans l'atmosphère (2,8°) et celle de la maille de calcul dans l'océan (2°), ont en effet été divisées par deux (1,4° et 1°). Dans le cas du modèle IPSL-CM, c'est le nombre de niveaux verticaux de calcul qui a été multiplié par deux, passant de 19 à 39. Les modèles doivent représenter de très nombreux processus dynamiques, physiques ou chimiques ayant un impact potentiel sur le climat. Le plus souvent, ces processus font intervenir des échelles spatiales plus petites que les dimensions des mailles de calcul, d'où la nécessité de représentations simplifiées désignées sous le terme de paramétrisations. Les paramétrisations ont fait l'objet d'une remise à niveau dans les deux modèles couplés, que ce soit pour l'atmosphère ou pour l'océan. Cela concerne en particulier pour l'un ou l'autre des deux modèles, le rayonnement, la convection dans l'atmosphère, la formation des nuages, le mélange dans l'océan et les effets de l'ozone. Autre nouveauté, la prise en compte de nouvelles particules en suspension dans l'atmosphère aux effets radiatifs importants, à savoir les poussières désertiques et les particules de suies ajoutées aux particules sulfatées déjà considérées pour l'exercice de simulation précédent.

Les simulations réalisées pour CMIP5 se répartissent en trois grandes catégories selon les objectifs scientifiques poursuivis. Il s'agit d'abord de simulations destinées à évaluer la capacité des modèles à reproduire les climats passés, y compris lointains (dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, et holocène moyen, il y a 6 000 ans), mais aussi à permettre d'évaluer la part des évolutions climatiques récentes liées aux facteurs naturels (variabilité solaire, volcanisme, variabilité interne au système climatique) et aux facteurs anthropiques (évolution des concentrations de gaz à effet de serre et de certaines particules dans l'atmosphère) qui affectent le climat. La deuxième catégorie de simulations est destinée, dans des expériences le plus souvent de type « idéalisées », à analyser et comprendre les mécanismes qui sont à l'origine des évolutions climatiques ou à identifier et évaluer les sources d'incertitudes des projections climatiques (rôle des nuages, rôle des particules...). La troisième catégorie concerne les simulations de scénarios de changement climatique proprement dites, basées sur les scénarios RCPs d'évolution des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre et éventuellement d'occupation future des sols.

L'exercice de simulation CMIP3 comprenait les mêmes grandes catégories de simulations mais quelques nouveautés importantes méritent d'être soulignées ici. Outre la prise en compte des premiers

scénarios intégrant des politiques climatiques, les scénarios climatiques de CMIP5 ont aussi porté sur des périodes plus longues. Les scénarios SRES utilisés pour CMIP3 étaient en effet limités à l'année 2100, tandis que les projections climatiques de CMIP5 ont pu s'étendre jusqu'à l'année 2300 grâce aux trajectoires d'évolution des émissions et concentrations de gaz à effet de serre des scénarios RCPs. Cette évolution est importante car il sera possible d'analyser avec plus de réalisme qu'antérieurement les conséquences à long terme des évolutions climatiques d'origine anthropique.

Une autre nouveauté importante concerne le fait que les simulations centennales ont été pour la première fois enrichies des premières simulations d'étude de la prévisibilité du climat à l'échelle décennale (périodes de 10 à 30 ans). À la différence des projections qui reposent sur des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre qui pourraient ne pas se réaliser, les prévisions climatiques ne concernent que des futurs possibles calculés à partir d'une connaissance de l'état du système climatique à un moment donné. Les prévisions climatiques aux échéances saisonnières, même si elles nécessitent une recherche active, font d'ores et déjà l'objet de bulletins diffusés opérationnellement comme à Météo-France. Dans l'exercice CMIP5, il s'agissait d'évaluer la capacité d'étendre ces prévisions au-delà d'une année, voire jusqu'à une décennie ou plus, mais sur un mode exploratoire, grâce en particulier à une meilleure prise en compte des états initiaux océaniques et au développement de nouvelles méthodologies.

Le CNRM et le CERFACS ont réalisé les différentes simulations centennales, hors cycle du carbone, ainsi que les simulations décennales avec un modèle à haute résolution, qui comprend de nombreuses améliorations de la représentation de la physique atmosphérique, des surfaces continentales, des interactions entre l'atmosphère et les différents types de surface (océan, continent, glace), de la physique océanique et de la glace de mer. De son côté, l'IPSL a effectué l'ensemble de l'exercice avec un modèle à plus basse résolution, très similaire du point de vue de la physique à celui qui avait servi pour le précédent rapport du GIEC, mais qui inclut maintenant l'évolution passée et future de l'usage des sols, une représentation complète de la chimie atmosphérique (notamment celle de l'ozone), des aérosols et du cycle du carbone. L'IPSL a également réalisé un sous-ensemble des simulations avec deux autres versions de son modèle : dans l'une, la résolution horizontale du modèle atmosphérique a été accrue, et dans l'autre, la physique atmosphérique a été profondément modifiée afin de mieux représenter la convection, la couche limite et les nuages.

Quelques résultats marquants

Pour ce qui concerne le modèle du CNRM-CERFACS, de nombreux aspects de l'état moyen du cli-

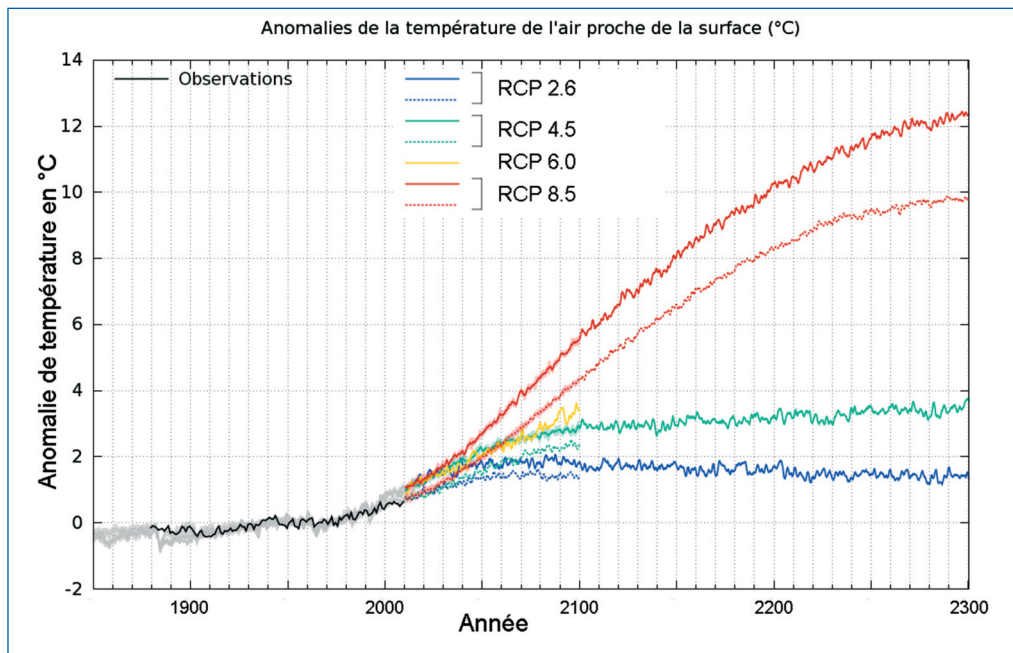


Figure 2.

Évolution de la température moyenne à la surface de la Terre (en °C) par rapport à la période 1901-2000 à partir des observations (courbe noire) et à partir des simulations des modèles du CNRM-CERFACS (traits pointillés colorés) ou de l'IPSL (traits pleins colorés), et pour les différents scénarios RCP.

Global near surface temperature change (in °C) relative to the period 1901-2000 from observations (black curve) and from the CNRM-CERFACS (colored dashed lines) or IPSL (colored solid lines) model simulations, and for the different RCP scenarios.

mat simulé ont été substantiellement améliorés par rapport à la version CMIP3 (température à 2m, pression de surface, température de surface de la mer, transports océaniques, glace de mer arctique...), tandis que des biais importants de précipitations, rayonnement et nuages persistent. Dans le cas du modèle de l'IPSL, les différences sur l'état moyen sont moins importantes. Pour les deux modèles, en revanche, des éléments importants de la variabilité du système climatique, tels que la mousson ou le phénomène El Niño, sont désormais mieux représentés, de même que certaines téléconnexions comme la relation El Niño-mousson indienne. Par ailleurs, le réchauffement planétaire simulé au cours du ^{xx}e siècle ou la fonte de la banquise arctique depuis les années 80 sont plus réalistes que pour le précédent exercice. Il faudra bien sûr attendre l'analyse de plusieurs dizaines d'articles publiés dans la littérature scientifique pour avoir une idée plus complète des forces et faiblesses de la modélisation climatique en général et des performances particulières des deux modèles français. Sans préjuger du résultat de cette analyse, des forces et faiblesses apparaîtront, dépendantes des variables et des régions, avec une incidence sur le niveau de confiance à accorder aux résultats des projections et prévisions du climat futur.

Les premières analyses des simulations du climat passé confirment des résultats acquis au cours des précédents exercices. Parmi eux, ceux des simulations distinguant les différents facteurs d'évolution du climat qui montrent que la réponse de la température

moyenne planétaire aux seuls facteurs naturels ne permet pas d'expliquer le réchauffement moyen constaté à partir de la seconde moitié du ^{xx}e siècle. La figure 2 représente l'évolution de la température moyenne de la planète sur la période 1850-2300, telle qu'elle est simulée par les deux modèles climatiques français. Sur la période 1850-2005, l'ensemble des facteurs naturels et d'origine humaine ont été pris en compte et les simulations sont en bon accord avec l'évolution observée. À partir de 2006, les résultats jusqu'en 2100 ou 2300 dépendent du choix du scénario RCP. Le réchauffement calculé pour le scénario le plus sévère (RCP8.5) représente une augmentation de la température moyenne atteignant 3,5 à 5 °C entre les années 1990 et 2090. Ce réchauffement est du même ordre de grandeur que le réchauffement calculé par les modèles entre le climat du dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, et la période actuelle. Ainsi, la rapidité et l'amplitude du réchauffement projeté pour le ^{xxi}e siècle représentent des modifications profondes du climat.

L'une des principales nouveautés est la simulation d'un réchauffement de 6 à 7 °C supplémentaires lorsque ce scénario est prolongé jusqu'en 2300. En revanche, pour le scénario le plus optimiste comme RCP2.6, qui ne peut être atteint que par l'application de politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le réchauffement se stabilise dès 2100 à une valeur voisine de 2 °C par rapport à la période préindustrielle. Suivant le scénario, les réchauffements calculés par le modèle de l'IPSL sont

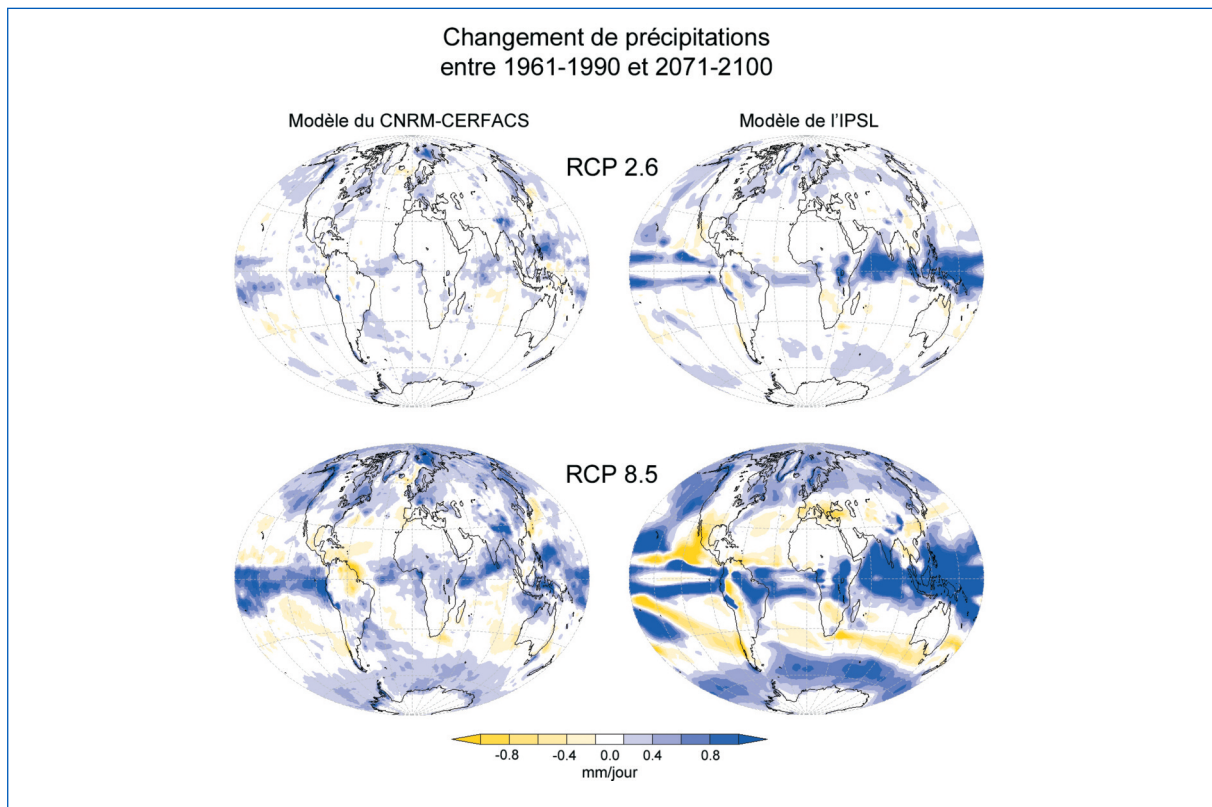


Figure 3.

Changements des précipitations pour la période 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990, simulés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL pour le scénario d'émissions de gaz à effet de serre les plus basses (RCP2.6) et le scénario des émissions les plus élevées (RCP8.5).

Precipitation changes for the period 2071-2100 relative to the period 1961-1990, simulated by the CNRM-CERFACS and the IPSL models for the scenario of the lowest greenhouse gases emissions (RCP2.6) and the scenario of the highest ones (RCP8.5).

environ 0,4 à 1 °C plus importants en 2100 que ceux du modèle du CNRM-CERFACS. Ces ordres de grandeurs situent le modèle de l'IPSL dans la partie haute de la fourchette des réchauffements calculés par les modèles impliqués dans CMIP5 et dont les résultats ont été publiés [Knutti et Sedláček, 2012], tandis que le modèle du CNRM-CERFACS se situe dans la moyenne.

La distribution spatiale des changements de température au cours du ^{xxi}^e siècle s'avère très semblable pour les deux modèles, comme elle l'est aussi par comparaison avec les projections climatiques réalisées dans CMIP3 (non montré). Les continents se réchauffent ainsi plus que les océans, en particulier en raison de leur plus faible inertie thermique. Ce réchauffement est plus marqué aux hautes latitudes de l'hémisphère nord en raison de la réduction de l'étendue de la banquise Arctique. De la même façon, les changements de précipitations présentent de fortes analogies entre les deux modèles et avec les résultats des projections de CMIP3. La figure 3 montre en effet une augmentation significative des précipitations annuelles aux hautes latitudes, ainsi que sur le Pacifique équatorial, et une diminution dans les latitudes subtropicales. Ces changements, traduisant une intensification du cycle hydrologique, sont d'autant plus marqués que le

scénario considéré anticipe une forte augmentation des concentrations des gaz à effet de serre. Cependant, les résultats peuvent être contrastés à une échelle sous-continentale, en particulier en Afrique de l'Ouest et au sud de l'Europe.

Les résultats plus réalistes des simulations concernant la tendance à la diminution de l'extension de la banquise Arctique au cours des dernières décennies augmentent la confiance dans les projections des évolutions futures. Dans le cas du scénario le plus élevé (RCP8.5), les modèles IPSL-CM et CNRM-CM font respectivement disparaître la glace de mer estivale en Arctique vers 2060 ou vers 2040. Le scénario RCP2.6, plus modéré, permet à la glace de mer estivale de se maintenir tout au long du ^{xxi}^e siècle ou bien de disparaître complètement l'été pendant quelques années entre 2060 et 2080, avant de se reformer en fin de siècle (figure 4). À la fin de l'hiver de l'hémisphère Nord (en mars), quand l'extension de la banquise est maximale, la glace de mer persiste pendant tout le ^{xxi}^e siècle, mais semble régresser nettement au nord de la mer de Barents, et ceci d'autant plus que le scénario est pessimiste. Pour l'Antarctique, la couverture de la glace de mer à la fin de l'hiver austral projetée par les deux modèles pour la fin du ^{xxi}^e siècle (2080-2099) est significative-

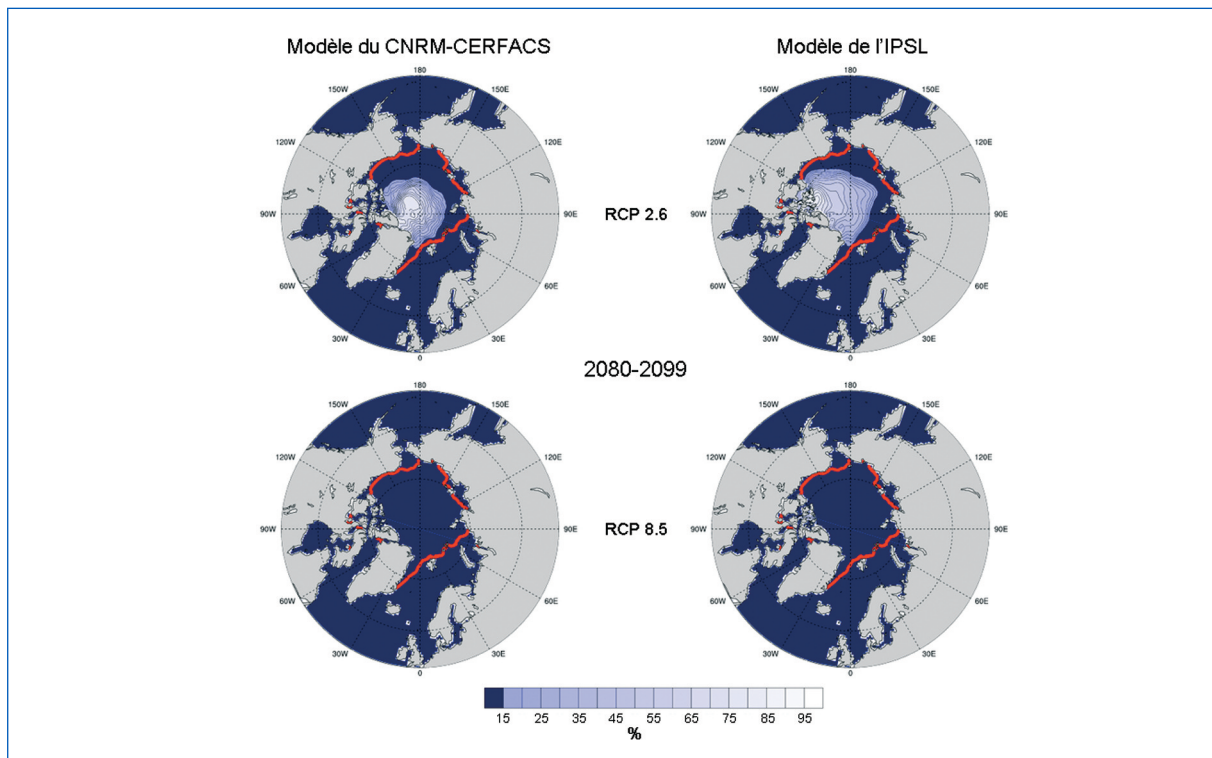


Figure 4.

Fraction de la surface de l'océan (en %) couverte par la banquise arctique à la fin de l'été (en septembre, lorsque la glace de mer est à son minimum d'extension), simulée par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL, en moyenne pour la période 2080-2099 : (a) et (b), scénario RCP2.6 ; (c) et (d), scénario RCP8.5. Le trait rouge représente l'extension moyenne actuelle de la banquise arctique pendant le mois de septembre.

Fraction of the ocean surface (in %) covered by the arctic sea-ice at the summer end (in September, when the sea-ice extension is at its minimum), simulated by the CNRM-CERFACS and IPSL models, on average for the period 2080-2099: (a) and (b), RCP2.6 scenario; (c) and (d), RCP8.5 scenario. The red line is the present mean extension of the arctic sea-ice in September.

ment plus faible que pendant la période 1980-1999. Cette tendance à la régression de la couverture de glace en Antarctique n'apparaissait pas dans les projections CMIP3.

Les nouvelles simulations offrent aussi la possibilité de calculer les émissions anthropiques autorisées suivant la trajectoire de concentration choisie. Au fur et à mesure que le climat se réchauffe, la quantité de carbone anthropique pouvant être absorbée par les puits de carbone naturels (océan et biosphère continentale) diminue. Les résultats du modèle de l'IPSL montrent qu'après 2100, les continents deviennent pour les scénarios pessimistes une source de carbone pour l'atmosphère. Ces simulations indiquent l'effort qu'il faut faire sur les émissions pour tenir les engagements des différents RCPs.

Conclusion

Les premières analyses des nouveaux scénarios climatiques réalisées avec une nouvelle génération de modèles climatiques couplés mis en œuvre par des équipes françaises, confirment les résultats les plus importants du précédent exercice de simulation

pour le GIEC. Pour des émissions de gaz à effet de serre comparables avec celles des scénarios du précédent rapport [GIEC, 2007], le réchauffement climatique simulé est aussi comparable au xx^e siècle, atteignant 3,5 à 5 °C selon le modèle pour le scénario d'émissions les plus élevées (RCP8.5). Le réchauffement observé de la deuxième moitié du xx^e siècle ne peut pas quant à lui être simulé correctement sans prendre en compte simultanément les facteurs naturels et les facteurs anthropiques d'évolution du climat.

Certains aspects sont nouveaux comme la prise en compte pour la première fois de politiques climatiques dans la construction des scénarios socio-économiques servant de base aux simulations climatiques. Le scénario conduisant à la modification du bilan radiatif de la terre (RCP2.6) la plus faible, conduit à un réchauffement d'environ 2 °C par rapport à la période préindustrielle. Une étude menée avec la version du modèle de l'IPSL couplant le climat au cycle du carbone montre cependant que les émissions compatibles avec ce scénario deviennent négatives à la fin du xx^e siècle. Cela impliquerait donc un prélèvement de CO_2 actuellement présent dans l'atmosphère au moyen de stockage sous forme de bio-

masse (par exemple en augmentant les surfaces de forêt) ou en utilisant une combinaison d'agrocarburant et de stockage et séquestration du CO₂ émis lors de son utilisation. Un autre aspect nouveau important concerne les premières simulations d'étude de la prévisibilité du climat aux échelles décennales. Les résultats apparaissent cependant à ce stade peu probants et ce sujet reste donc encore du domaine de la recherche, sans application directe pour l'information des politiques d'adaptation au changement climatique.

La mise à disposition dès avril 2011 des résultats des simulations climatiques françaises dans la base de données internationale de CMIP5 accessible *via* le réseau Internet, a permis qu'elles soient considérées dans les premières analyses publiées par la commu-

nauté scientifique internationale. Une synthèse de ces analyses publiées dans les revues à comité de lecture sera intégrée au prochain rapport du GIEC, notamment son premier volet sur les bases scientifiques du changement climatique qui paraîtra en septembre 2013. Il ne s'agit cependant là que d'une première phase car les simulations continueront à être analysées et utilisées notamment pour des études d'impact et de régionalisation du climat, au-delà de la publication de ce rapport et pour de nombreuses années. Le fait que certains des scénarios RCPs soient diversifiés permettra d'évaluer les conséquences de différentes politiques climatiques d'atténuation des émissions ou d'adaptation, y compris en termes de changements et d'impacts climatiques possibles [Hallegatte *et al.*, 2011].

Remerciements

Les auteurs remercient les services de presse du CNRS, du CEA, de l'IPSL et de Météo-France pour leurs contributions à la relecture et la réécriture du document de la conférence de presse du 9 février 2012 dont est issu pour partie cet article. Nous remercions aussi Patrick Brockmann et Stéphane Sénési pour avoir préparé la plupart des figures de cet article.

Références

- Dufresne JL *et al.* Climate change projections using the IPSLCM5 earth system model with an emphasis on changes between CMIP3 and CMIP5. *Climate Dynamics*, Février 2013 : publié en ligne (doi : [10.1007/s00382-012-1636-1](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1)).
- GIEC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon SD, Qin M, Manning Z *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007: 996 p.
- Hallegatte S, Przulski V, Vogt-Schilb A. Building world narratives for climate change impact, adaptation and vulnerability analyses. *Nature Climatic Change* 2011; 1(3): 151-5.
- Jeandel C, Mosseri R, *et al.* Le climat à découvert, outils et méthodes en recherche climatique. CNRS éditions 2011: 288 p.
- Knutti R, Sedláček J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change* 2012 : publié en ligne (doi: [10.1038/NCLIMATE1716](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1716)).
- Nakićenović N, Swart R (eds.). *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 2000: 599 p.
- Voldoire A, Sanchez-Gomez E, Salas y Melia D *et al.* The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics* 2012; January: publié en ligne (doi:[10.1007/s00382-011-1259-y](https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y)).

