

CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES NOUVELLES SIMULATIONS FRANÇAISES POUR LE PROCHAIN RAPPORT DU GIEC

Conférence de presse
Jeudi 9 février 2012, à Paris

Contact presse

Presse CNRS | Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | priscilla.dacher@cnrs-dir.fr



energie atomique • energies alternatives



Sommaire

Communiqué de presse « Changement climatique : les nouvelles simulations françaises pour le prochain rapport du GIEC »

Liste des intervenants

Le GIEC : présentation, calendrier et recommandations

Une nouvelle approche pour les simulations du climat futur et pour l'élaboration de scénarios socio-économiques

Les nouvelles simulations numériques

Les résultats

- Les températures
- Les précipitations
- La couverture de glace
- Les émissions de carbone compatibles & émissions anthropiques "autorisées"

Les études de prévisibilité décennales

Des *images* d'illustration sont disponibles sur demande aux services de presse et à la photothèque du CNRS (phototheque@cnrs-bellevue.fr). Une *simulation* est également à votre disposition.



energie atomique • energies alternatives





www.cnrs.fr



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance



énergie atomique • énergies alternatives

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

UNIVERSITÉ DE
VERSAILLES
ST-QUENTIN-EN-YVELINES

COMMUNIQUE DE PRESSE | PARIS | 9 FEVRIER 2012

Changement climatique : les nouvelles simulations françaises pour le prochain rapport du GIEC

La communauté climatique française réunissant principalement le CNRS, le CEA, Météo-France, l'UPMC et l'UVSQ (notamment à travers l'IPSL¹, le CNRM² et le CERFACS³) vient de terminer un important exercice de simulations du climat passé et futur à l'échelle globale. Ces nouvelles données confirment les conclusions du dernier rapport du GIEC⁴ (2007) sur les changements de températures et de précipitations à venir. En particulier, elles annoncent à l'horizon 2100, pour le scénario le plus sévère, une hausse de 3,5 à 5°C des températures, et pour le plus optimiste, une augmentation de 2°C. Mis à disposition de la communauté internationale, ce travail sera utilisé par le GIEC pour établir son prochain rapport, à paraître en 2013. Il donne des indications et des tendances sur le climat futur à l'horizon 2100 mais également, fait nouveau, sur les trente prochaines années.

La mission du GIEC est de recenser et de résumer toute l'information scientifique sur le changement climatique, ses impacts et les solutions pour l'atténuer ou s'y adapter. Le premier volet de son 5^e rapport, publié à la mi-septembre 2013, fera ainsi un nouvel état des connaissances accumulées au cours des dernières années. Comme pour l'édition de 2007, la communauté scientifique internationale s'est mobilisée, en particulier au travers du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), pour concevoir et réaliser un exercice de simulations du climat passé et futur (CMIP-5).

Cet effort de recherche, très exigeant en termes de ressources humaines, de puissance de calcul et de stockage de données, rassemble plus d'une vingtaine de centres climatiques dans le monde ayant développé une cinquantaine de modèles numériques. En France, de nombreux organismes contribuent à ce projet, notamment à travers le CNRM, associé au CERFACS, et l'IPSL.

Le projet CMIP-5 présente un certain nombre d'innovations par rapport aux exercices précédents :

- la prise en compte de scénarios incluant des politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre
- l'utilisation de modèles plus complexes (meilleure prise en compte de différentes perturbations comme les aérosols, le cycle du carbone, ...) et plus précis (meilleure résolution)

¹ IPSL ou Institut Pierre-Simon Laplace regroupe six laboratoires en sciences de l'environnement dont quatre participent aux efforts de modélisation du climat : le LATMOS (CNRS / UPMC / UVSQ), le LMD (CNRS / ENS / UPMC / Ecole Polytechnique), le LOCEAN (CNRS / UPMC / MNHN / IRD) et le LSCE (CNRS / CEA / UVSQ).

² CNRM-GAME, Météo-France / CNRS

³ Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CNRS / CERFACS / Total SA / Safran / EDF/ EADS / CNES / Météo-France / ONERA)

⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat



www.cnrs.fr



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance



énergie atomique • énergies alternatives

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

UNIVERSITÉ DE
VERSAILLES
ST-QUENTIN-EN-YVELINES 

- une évaluation approfondie de la capacité des modèles à reproduire le climat passé et les mécanismes qui sous-tendent son évolution
- la réalisation d'une série de « prévisions rétrospectives » du climat des cinquante dernières années et d'un exercice préliminaire de prévision pour la période 2010-2035.

Résultats des simulations françaises

En accord avec les conclusions du GIEC en 2007, une tendance à l'augmentation des températures est observée à l'horizon 2100 pour tous les scénarios. Elle est plus ou moins marquée selon le scénario considéré : la hausse est de 3,5 à 5°C pour le scénario le plus sévère, de 2°C pour le plus optimiste, qui ne peut être atteint que par l'application de politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, il apparaît que la réponse aux seuls facteurs naturels ne permet pas d'expliquer le réchauffement moyen constaté à partir de la seconde moitié du 20^e siècle.

Une intensification du cycle hydrologique⁵ se confirme, de même qu'une fonte rapide de la banquise Arctique qui, dans le cas du scénario le plus pessimiste, disparaît en été vers 2040 ou 2060 selon le modèle.

Les simulations réalisées en couplant le climat au cycle du carbone apportent des réponses nouvelles. Elles soulignent notamment qu'il faudrait rapidement diminuer les émissions anthropiques et atteindre des émissions « négatives » (qui correspondent à une action anthropique permettant de prélever directement du CO₂ de l'atmosphère) d'ici la fin du 21^e siècle.

Les analyses de cet ensemble de simulations combiné avec les simulations des autres groupes internationaux apporteront un nouveau regard sur le lien entre les activités humaines et le climat, à la fois au cours des dernières décennies et, surtout, dans les décennies et les siècles à venir.

Contact

Presse CNRS | Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | priscilla.dacher@cnrs-dir.fr

⁵ Cela met en jeu les précipitations et l'évaporation à l'échelle planétaire



energie atomique • energies alternatives



Liste des intervenants

> **Introduction** par **Jean Jouzel**, chercheur CEA au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement¹ et membre du bureau du GIEC

> **Une nouvelle approche pour préciser les simulations du climat futur et pour l'élaboration de scénarios socio-économiques** par **Stéphane Hallegatte**, ingénieur Météo-France, chercheur au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement²

> **Les nouvelles simulations et les nouveaux résultats des équipes françaises**

- **David Salas y Melia**, ingénieur Météo-France, chercheur au Centre national de recherches météorologiques - Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique³

- **Jean-Louis Dufresne**, responsable du Centre de modélisation du climat et directeur-adjoint de l'IPSL⁴, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de météorologie dynamique⁵

- **Christophe Cassou**, chargé de recherche CNRS au Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique⁶

¹ LSCE, CNRS / CEA / UVSQ

² CIRED, CNRS / École des ponts ParisTech / EHESS / AgroParisTech / CIRAD

³ CNRM-GAME, Météo-France / CNRS

⁴ IPSL ou Institut Pierre-Simon Laplace regroupe six laboratoires en sciences de l'environnement

⁵ LMD, CNRS / ENS / UPMC / Ecole Polytechnique

⁶ CERFACS, CNRS / CERFACS / Total SA / Safran / EDF / EADS / CNES / Météo-France / ONERA



énergie atomique • énergies alternatives



Le GIEC : présentation, calendrier et recommandations

La question de l'effet éventuel des activités humaines sur le climat commence à préoccuper la communauté scientifique internationale dans les années 70. Dès 1979, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) met sur les rails le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Puis, en 1988, est créé le GIEC ou Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹, sous les auspices de deux organisations dépendant de l'ONU, le Programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE) et l'OMM.

Le GIEC se compose de trois groupes de travail et d'une équipe spéciale. Le groupe I traite des éléments scientifiques de l'évolution du climat : son observation, sa compréhension et son estimation future. Le groupe II s'occupe des questions concernant la vulnérabilité des systèmes socio-économiques et naturels aux changements climatiques, les conséquences de ces changements et les mesures d'adaptation. Le groupe III s'intéresse aux mesures d'atténuation. L'équipe spéciale est en charge des inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

A ce jour, quatre rapports d'évaluation ont été publiés, le premier en 1990, le deuxième en 1995, le troisième en 2001 et le quatrième en 2007. La sortie du premier volet du 5^e rapport est prévue pour l'automne 2013.

Pour établir leurs conclusions, les auteurs s'appuient notamment sur les résultats de simulations du climat dont la réalisation mobilise une large communauté scientifique internationale. Les simulations à réaliser en amont du 5^e rapport du GIEC ont été définies fin 2008 par le Groupe de travail sur les modèles couplés du PMRC, dans le cadre du Projet d'intercomparaison de modèles climatiques CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project).

Le projet CMIP-5 fournit un cadre de travail précis aux équipes développant les modèles de climat et réalisant les simulations climatiques. Il vise à :

- évaluer les modèles de climat
- comprendre le fonctionnement du climat
- interpréter les changements climatiques récents ou passés
- prévoir les changements climatiques futurs
- comprendre les changements climatiques simulés par les modèles, quantifier et comprendre les différences éventuelles entre résultats de modèles.

Dans le cadre de CMIP-5, plusieurs types de simulations ont été retenus :

- des simulations « classiques » comme l'évolution du climat depuis 150 ans, des projections climatiques pour les 100 ou 300 prochaines années selon différents scénarios d'émission de gaz

¹ également connu sous le sigle IPCC : International Panel on Climate Change



energie atomique • energies alternatives



à effet de serre, des changements climatiques en réponse à des évolutions idéalisées² des gaz à effet de serre,

- des simulations nouvelles, notamment des tentatives de prévision de l'évolution du climat à l'échelle de 10 ans, des simulations couplées climat-carbone, des simulations des climats très anciens ou de nouvelles simulations idéalisées.

Un important travail pour développer les modèles de climat et réaliser les simulations climatiques a été effectué par la communauté climatique française entre 2008 et fin 2011. Les résultats de ces simulations ont été mis à disposition de la communauté internationale. Les Français ont été parmi les tous premiers à diffuser leurs données (voir la partie du dossier dédiée aux nouvelles simulations).

² C'est-à-dire des évolutions de la concentration en CO₂ atmosphérique non réalistes mais suffisamment simples pour aider à une meilleure compréhension de la réponse du système climatique



energie atomique • énergies alternatives

Une nouvelle approche pour les simulations du climat futur et pour l'élaboration de scénarios socio-économiques

Lors des précédents exercices, les simulations se faisaient 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 CMIP-5, 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 RCP 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.

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 RCP, notamment ceux qui prennent en compte des politiques climatiques de réduction des 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.

Les RCP peuvent être traduits en termes de modification du bilan radiatif¹ de la planète, ce qui permet de les comparer avec les anciens scénarios d'émission (dits SRES²) utilisés par le GIEC dans ces deux derniers rapports (2001 et 2007). Quatre scénarios RCP de référence ont été retenus pour le projet CMIP-5 parmi plus de 300 couvrant les années 2000 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 énergétique terrestre (**Figure 2.1 et Tableau 2.1**). Le scénario le plus élevé (RCP8.5) est toutefois un peu plus sévère que l'ancien scénario le plus pessimiste A2. Le scénario le plus bas (RCP2.6) n'a, quant à lui, pas d'équivalent parmi les anciens scénarios. Il correspond à des comportements vertueux, très sobres en émission de gaz à effet de serre.

¹ Calculé comme la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge émis au sommet de la troposphère (10 à 16km d'altitude)

² Special Report on Emissions Scenarios, publié en 1999

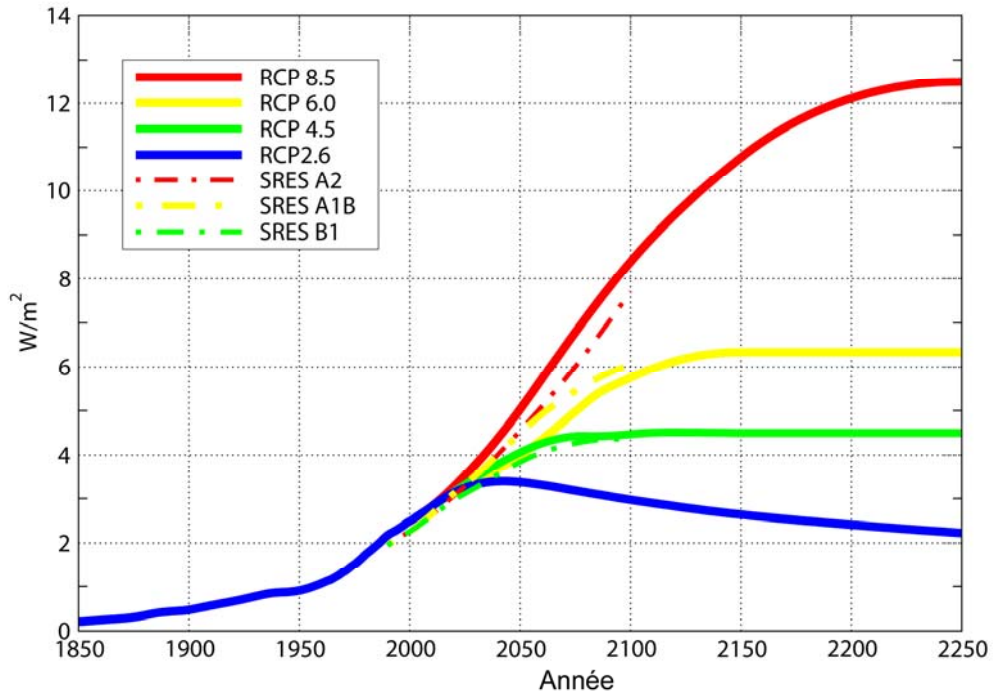


Figure 2.1 : Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif », en Wm^{-2} sur la période 1850-2250. Après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios dits « Representative Concentration Pathways » et les traits pointillés les anciens scénarios (GIEC, 2001 et 2007).

© Stéphane Senesi (CNRM-GAME, Météo-France/CNRS)

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	$\sim 6Wm^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	~ 850 eq- CO_2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	$\sim 4,5Wm^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	~ 660 eq- CO_2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à $\sim 3Wm^{-2}$ avant 2100 puis déclin	Pic ~ 490 eq- CO_2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

*eq- CO_2 est une abréviation pour équivalent CO_2 . Il s'agit de la concentration de CO_2 équivalente à la totalité des gaz à effet de serre en termes de forçage radiatif

Tableau 2.1 : Principales caractéristiques des quatre scénarios RCP



energie atomique • energies alternatives



Les futurs scénarios socio-économiques

En France, ces scénarios sont développés au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) et devraient compléter, fin 2012, les scénarios climatiques. S'ils n'ont pas vocation à prédire l'avenir, les scénarios socio-économiques permettront d'explorer un certain nombre de futurs possibles, en fonction des transformations démographiques, sociales, culturelles, économiques et technologiques des prochaines décennies. Ils tiendront également compte des récents développements économiques, notamment de la croissance rapide des pays émergents, et des avancées technologiques de ces dernières années.

En outre, la combinaison de scénarios climatiques et socio-économiques permettra d'évaluer les conséquences de différentes politiques climatiques, y compris leur impact sur le climat, leur coût économique et leurs conséquences en termes d'usage des sols. Cela permettra par exemple aux scientifiques de se pencher sur les impacts de politiques de développement massif des agro-carburants sur la biodiversité et sur la production alimentaire.

Enfin, **grâce à la diversité des scénarios, il deviendra aussi possible de tester la vulnérabilité des politiques publiques.** Si par exemple une politique est estimée suffisante pour limiter le changement climatique avec une population mondiale stabilisée à 8 milliards d'humains et un développement rapide de l'énergie photovoltaïque, on pourra évaluer ses conséquences dans un contexte de croissance démographique plus forte et de développement technologique moins rapide que prévus. Ceci permettra de développer des politiques publiques plus robustes face aux incertitudes sur l'évolution future de nos sociétés, de nos économies et des technologies.



energie atomique • energies alternatives



Les nouvelles simulations climatiques

Dans le cadre de ce nouvel exercice, la communauté française s'est attachée à enrichir et améliorer ses simulations et les modèles qui les produisent.

Une attention particulière a notamment été portée aux interactions entre le climat et le cycle du carbone, à la façon dont les modèles simulent les nuages et à la façon dont ils simulent les changements climatiques observés dans le passé.

Ainsi, en plus des simulations « classiques » d'évolution du climat sur les deux derniers siècles et futur à l'horizon 2100 ou 2300, les climatologues ont élaboré des simulations dans des contextes climatiques différents, comme ceux qui prévalaient il y a 6 000 ou 21 000 ans et lors du dernier millénaire. Ils ont également développé et mis en œuvre dans les modèles des « simulateurs d'observations satellitales » afin de comparer plus rigoureusement les nuages simulés par les modèles à ceux observés par les satellites. Les projets CFMIP¹ et PMIP², coordonnés par l'IPSL, ont fortement contribué au développement de ces nouveaux aspects.

Par ailleurs, les modèles climatiques³ utilisés pour cet exercice prennent mieux en compte la complexité du système climatique, notamment grâce à :

- une **résolution horizontale ou verticale plus fine** (d'un facteur 2 sur l'horizontale pour le modèle du CNRM, d'un facteur 2 sur la verticale pour le modèle de l'IPSL)
- une **meilleure représentation de certains phénomènes physiques** clés comme la convection atmosphérique, la formation de nuages ou le mélange océanique
- la **prise en compte de différents types d'aérosols d'origine naturelle et anthropique** comme les poussières, les sulfates, les particules de suie... (dans l'exercice précédent, seuls les sulfates anthropiques étaient pris en compte)
- une **meilleure représentation de l'ozone** troposphérique et stratosphérique
- la **prise en compte de l'évolution de l'usage des sols au fil du temps**, à partir d'observations pour la période récente et de possibles évolutions pour la période future, établies par le projet international LUCID coordonné par l'IPSL.

Une autre originalité de cet exercice réside dans **l'élaboration de simulations climatiques pour le futur proche** (2010-2040), ce qui présente un fort intérêt, notamment pour les décideurs. Développer des « prévisions décennales » offrirait la possibilité de réduire l'incertitude liée à la variabilité climatique à cette échéance et de mener des études sur l'adaptation et l'atténuation à des échelles de temps qui concordent avec les calendriers classiques de planification.

Aujourd'hui sujet de recherche fondamentale, la prévision décennale nécessite encore de relever de nombreux défis. Le travail effectué dans le cadre de CMIP-5 constitue un premier stade exploratoire.

¹ Cloud Feedback Model Intercomparison Project (Projet d'intercomparaison de modèles sur les rétroactions des nuages)

² Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (Projet d'intercomparaison des modèles paléo-climatiques)

³ Les modèles de climat 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. Ces modèles représentent également les couplages entre la chimie atmosphérique, les aérosols, le rayonnement atmosphérique et les nuages.



energie atomique • energies alternatives

Les contributions françaises

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 4^e rapport du GIEC, mais qui inclut maintenant 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 de 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.

Les premiers résultats de ces simulations ont été présentés et analysés au travers d'une série d'articles scientifiques à paraître. Ces résultats ont également été mis à la disposition de la communauté internationale depuis avril 2011. Les résultats des modèles français ont été parmi les premiers à être diffusés, ce qui leur a permis de figurer dans les premières analyses effectuées par différents groupes hors métropole.

En chiffres...

La réalisation des simulations a mobilisé les chercheurs et ingénieurs français pendant plus de 2 ans.

Les simulations du CNRM-CERFACS représentent l'occupation de 12 nœuds de 8 processeurs du calculateur NEC SX8 de Météo-France à plein temps pendant un an et demi et un volume de données à gérer et à stocker d'environ 400 To (400 mille milliards d'octets).

Les simulations de l'IPSL représentent l'occupation de 3 nœuds de 16 processeurs du calculateur NEC SX9 de GENCI⁴ et un volume de données de 2 Po (2 millions de milliards d'octets).

⁴ Grand Équipement National de Calcul Intensif



energie atomique • energies alternatives

Simulations de différentes périodes climatiques passées (concentrations CO ₂ fixées)	Projections Climatiques	Simulations pour étudier les rétroactions climat-cycle du carbone (concentrations CO ₂ calculées)	Simulations pour les analyses et l'étude des nuages	Simulations pour les études de détection/attribution du changement climatique (période 1850-2005)
Climat pré-industriel (1850) de référence	RCP 4.5	Climat pré-industriel	1% CO ₂	Forçages naturels seuls (solaire, volcanisme, aérosols)
Climat récent de 1850 à 2005, modèle couplé et atmosphère seule	RCP 8.5	Climat récent	4xCO ₂ et Température de surface de la mer climatologique avec 1x ou 4x CO ₂	Gaz à effet de serre uniquement
Holocène moyen (il y a 6000 ans)	RCP 2.6	RCP 8.5	Forçage CO ₂	Sans usage des sols
Dernier maximum glaciaire (il y a 21 000 ans)	RCP 6.0	ESM* climatologie fixée	Tous types d'aérosols	Forçages anthropiques seuls
Dernier millénaire de 850 à 2005	RCP 4.5 jusqu'en 2300	ESM* rétroactions	Aérosols sulfatés	Aérosols anthropiques seuls
	RCP 8.5 et 2.6 jusqu'en 2300		Planète océan	Pas d'ozone

* ESM : « Earth System Model » (modèle du système climatique incluant un cycle du carbone interactif)

Tableau 2 : Synthèse des simulations CMIP-5 pour le climat à long terme. En rose, les simulations faisant partie du cœur de l'exercice, en jaune les simulations optionnelles du premier cercle et en vert, les simulations optionnelles du second cercle. Les groupes étaient invités à réaliser les simulations cœur et à produire les autres simulations en fonction de leurs thématiques ou des groupes de travail auxquels ils participent. Chaque colonne représente une catégorie de simulations.

Les résultats

Les températures

La **température moyenne planétaire** est un très bon indicateur de l'évolution climatique dans la mesure où elle traduit de manière synthétique la réponse du climat à différents facteurs, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine.

Facteurs d'évolution de la température moyenne entre 1850 et 2005

Certaines simulations additionnelles recommandées dans le cadre de CMIP-5 ont pour objectif de mener des études de détection et d'attribution du changement climatique sur la période 1850-2005.

Détecter un changement climatique, c'est répondre à la question : l'évolution climatique constatée n'est-elle due qu'à la variabilité interne de l'atmosphère interagissant avec l'océan, les surfaces continentales, ... ou bien est-elle due à un facteur externe inconnu ?

Attribuer un changement climatique, c'est évaluer l'importance relative des différents facteurs qui peuvent expliquer un changement climatique détecté dans les observations.

La **Figure 4.1** (ci-dessous) montre l'évolution de la température moyenne de la planète sur la période 1850-2005 simulée par les deux modèles climatiques en tenant compte :

- des seuls facteurs externes naturels (variabilité solaire et volcanisme), en **bleu**
- de ces facteurs auxquels s'ajoutent ceux d'origine humaine (augmentation des gaz à effet de serre, modification de la concentration des aérosols), en **orange**.

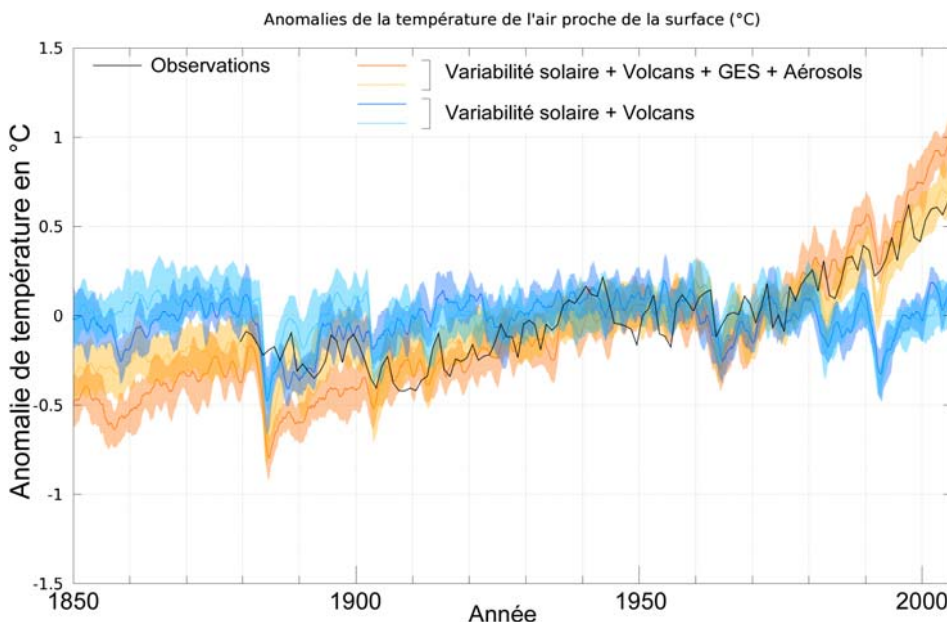


Figure 4.1 : Evolution de la température moyenne à la surface de la Terre mesurée (courbe noire) et calculée par les modèles du CNRM-CERFACS (traits pointillés) et de l'IPSL (traits pleins). Les courbes bleues ne tiennent compte que des forçages naturels (variabilité solaire et volcans) tandis que les courbes en orange tiennent compte des forçages naturels et des forçages anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols). Pour chacune des courbes, les résultats ont été obtenus à partir d'une dizaine de simulations dont la moyenne correspond à la courbe et la variation autour de cette moyenne correspond à l'enveloppe colorée. Les différences sont calculées par rapport à la période 1901-2000 qui sert de période de référence et donc de passage par 0 pour les différentes courbes.

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)



Des analyses poussées devront être conduites à partir de ces simulations avant d'arriver à des conclusions sur la quantification des différentes contributions. Cependant, il apparaît déjà que **la réponse aux seuls facteurs naturels ne permet pas d'expliquer le réchauffement moyen constaté à partir de la seconde moitié du 20^e siècle** (voir la **Figure 4.2** pour la période correspondante). Ce constat reste concordant avec les conclusions du GIEC en 2007.

Evolution de la température moyenne entre 1850 et 2300

La **Figure 4.2** 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 (en noir).
- A 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) prévoit une augmentation de la température moyenne atteignant 3,5 à 5°C entre les années 1990 et 2090.
- 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 pré-industrielle**.

Pour un même scénario, **les changements de température sont sensiblement différents pour les deux modèles**. Suivant le scénario, les réchauffements calculés par le modèle de l'IPSL sont environ 0,4 à 1°C plus importants en 2100 que ceux du modèle du CNRM-CERFACS.

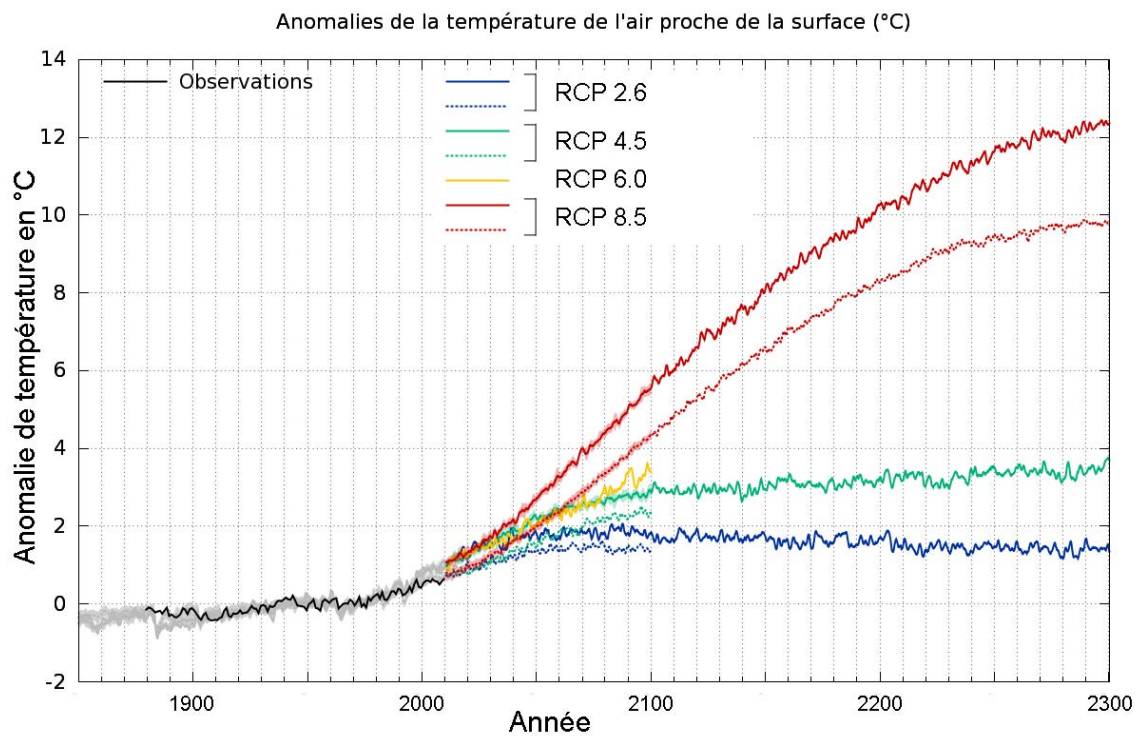


Figure 4.2 : Evolution, de 1850 à 2300, de la température moyenne (°C) à la surface de la Terre par rapport à la moyenne des années 1901-2000 mesurée (courbe noire) et calculée par les modèles du CNRM-CERFACS (traits pointillés) et de l'IPSL (traits pleins) et pour les différents scénarios RCP : RCP2.6 (le plus optimiste), RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (le plus sévère).

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)

Cartographie des évolutions de la température pour le prochain siècle

Les simulations à échéance 20-30 ans et 100 ans précisent les grandes caractéristiques des changements présentés dans le 4^e rapport du GIEC en 2007.

- Durant les premières décennies du 21^e siècle, le réchauffement dépend peu du scénario considéré : il est relativement uniforme sauf dans les régions arctiques affectées par la fonte de la glace de mer.
- A plus longue échéance (une centaine d'années), le réchauffement est plus intense sur les continents que sur les océans et est amplifié dans les régions polaires. L'hémisphère Sud, principalement couvert d'océans, se réchauffe moins que l'hémisphère Nord.

Des analyses plus fines permettront à l'avenir de déterminer le rôle spécifique des différents types d'aérosols et de l'utilisation des sols dans les signatures régionales, en particulier sur les modifications de saisonnalité, sur la variabilité interannuelle et sur les extrêmes climatiques.

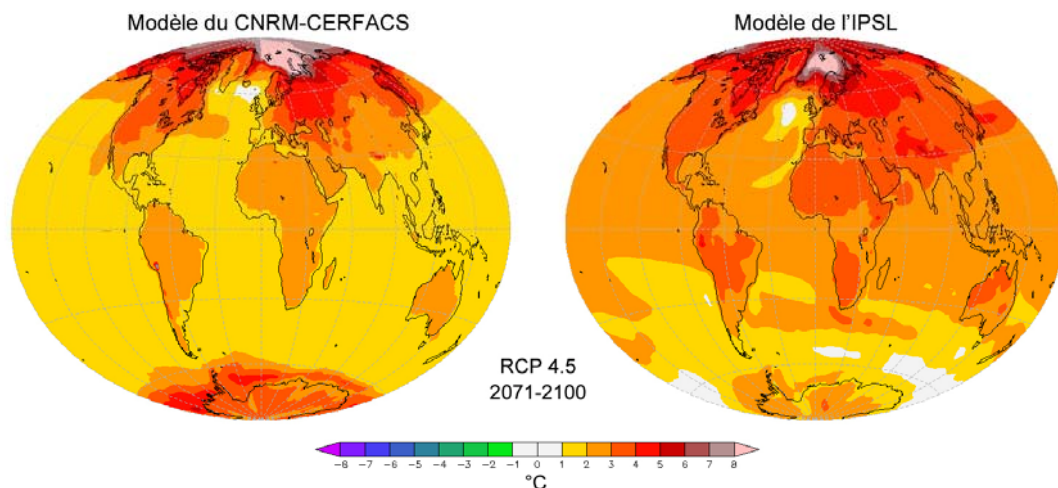


Figure 4.3 : Changements de la température à la surface de la Terre pour la période 2071-2100 par rapport à celle de la période 1971-2000 calculés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL¹ pour le scénario moyen RCP4.5

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)

¹ A l'échelle des grandes régions et pour un scénario donné, le modèle de l'IPSL est plus sensible que celui du CNRM-CERFACS, c'est-à-dire que les températures augmentent davantage pour une perturbation radiative (énergétique) donnée.

Le contexte paléoclimatique

La transition entre le climat du dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, et la période actuelle représente une augmentation de la température globale de l'ordre de 4 à 5°C. Au dernier maximum glaciaire, les continents de l'hémisphère Nord étaient recouverts de calottes de glace culminant à environ 3 000 mètres en Amérique du Nord et en Scandinavie. Avec la fonte des calottes, ces régions sont devenues des zones de très fort réchauffement (voir la **Figure 4.4**). La principale contribution à l'augmentation des températures a eu lieu sur une période d'environ 9 000 ans durant la déglaciation. Or, ce réchauffement est, à l'échelle globale, du même ordre de grandeur que ce qui est projeté pour les 100 à 150 prochaines années par le scénario moyen (RCP4.5). Ainsi, la rapidité et l'amplitude du réchauffement projeté pour le 21^e siècle représentent des modifications profondes du climat.

Par ailleurs, les reconstructions paléoclimatiques² mettent en évidence, du dernier maximum glaciaire à la période pré-industrielle, un réchauffement plus important sur les continents de l'hémisphère Nord et une amplification polaire plus marquée. Ces caractéristiques sont similaires à celles des projections futures. De plus, les reconstructions indiquent que les modèles utilisés ont tendance à sous-estimer l'amplification polaire.

Des comparaisons plus complètes entre climats passés et futurs permettront une meilleure évaluation de la capacité des modèles à représenter un climat différent du climat actuel. Il s'agira en outre d'estimer les risques de dépasser des seuils critiques dans le futur.

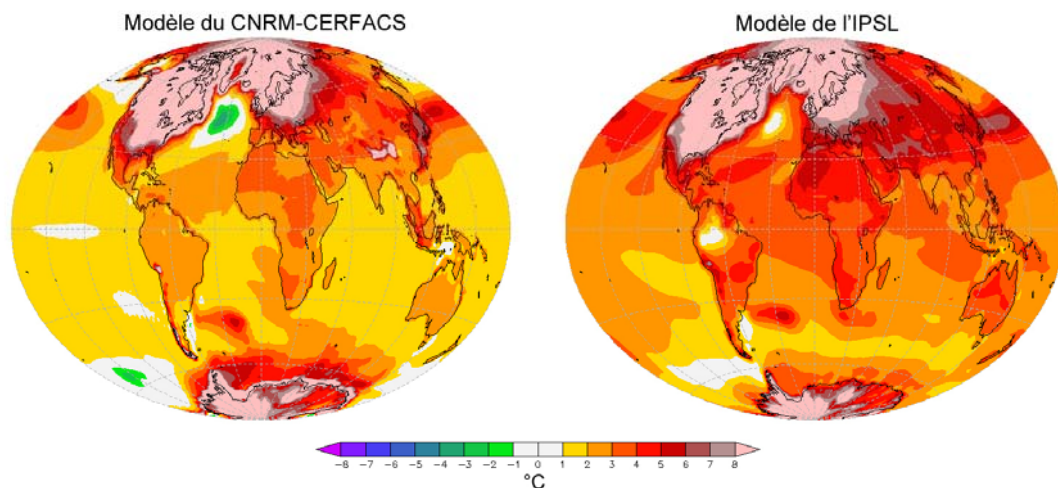


Figure 4.4 : Changements de la température à la surface de la Terre entre le dernier maximum glaciaire, il y a environ 21 000 ans, et la période 1971-2000 calculés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL.

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)

² obtenues à partir de différents enregistrements marins, terrestres ou bien à partir des glaces polaires

Les précipitations

En accord avec les conclusions du 4^e rapport du GIEC, les deux modèles français réaffirment :

- une **augmentation** significative des précipitations annuelles aux hautes latitudes ainsi que sur l'océan Pacifique équatorial
- et une **diminution** dans les latitudes subtropicales.

Ces changements sont d'autant plus marqués que le scénario considéré anticipe une forte augmentation des concentrations des gaz à effet de serre.

Les résultats peuvent être contrastés sur certaines régions. Ces divergences sont en particulier visibles en Afrique de l'Ouest et au sud de l'Europe.

Changement de précipitations entre 1961-1990 et 2071-2100

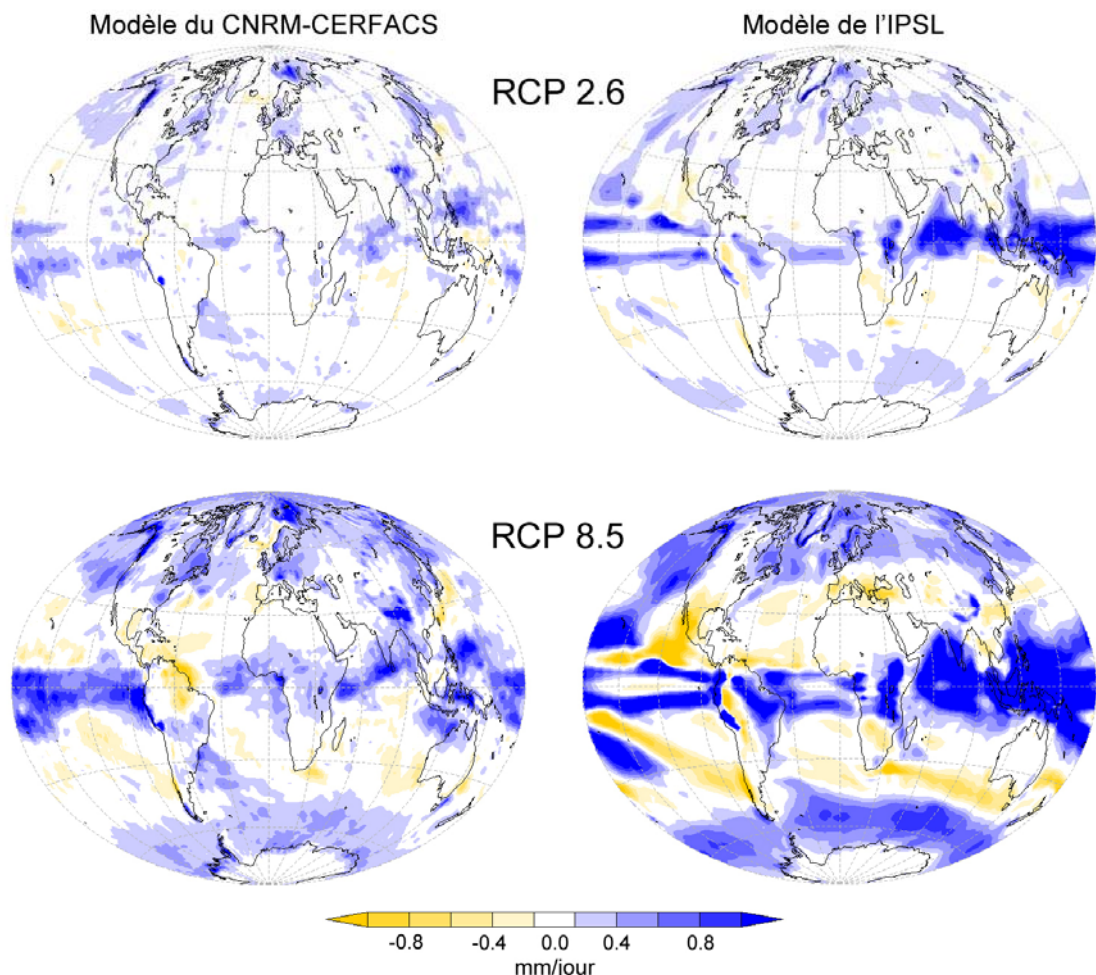


Figure 4.5 : Changements des précipitations pour la période 2071-2100 par rapport à celle de la période 1971-2000 calculés par les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL, pour le scénario sobre RCP2.6 et pessimiste RCP8.5.

© Patrick Brockmann (LSCE/IPSL, CEA/CNRS/UVSQ)



energie atomique • energies alternatives



Couverture de glace

Fait nouveau, la fonte de glace simulée par les deux modèles français sur la période passée est comparable aux observations, alors qu'elle était souvent sous-estimée par ces modèles dans le dernier rapport du GIEC. Cette amélioration est en partie liée à une meilleure résolution horizontale, et pour le modèle du CNRM-CERFACS, à une meilleure prise en compte de la physique du modèle de glace de mer.

Comme le montre la **Figure 4.6**, dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP8.5), les deux modèles font respectivement disparaître la glace de mer estivale en Arctique vers 2060 (modèle de l'IPSL) ou vers 2040 (modèle du CNRM-CERFACS). Dans le cas du scénario RCP2.6, plus optimiste, la glace de mer estivale se maintient tout au long du 21^e siècle (modèle de l'IPSL) ou bien disparaît complètement l'été pendant quelques années entre 2060 et 2080, avant de se reformer en fin de siècle (modèle du CNRM-CERFACS).

A 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 21^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 projeté par les deux modèles pour la fin du 21^e siècle (2080-2099) est significativement plus faible que pendant la période 1980-1999, et ce d'autant plus que le scénario d'émission est pessimiste. **Cette tendance à la régression de la couverture de glace en Antarctique n'apparaissait pas jusqu'à présent dans les projections.**

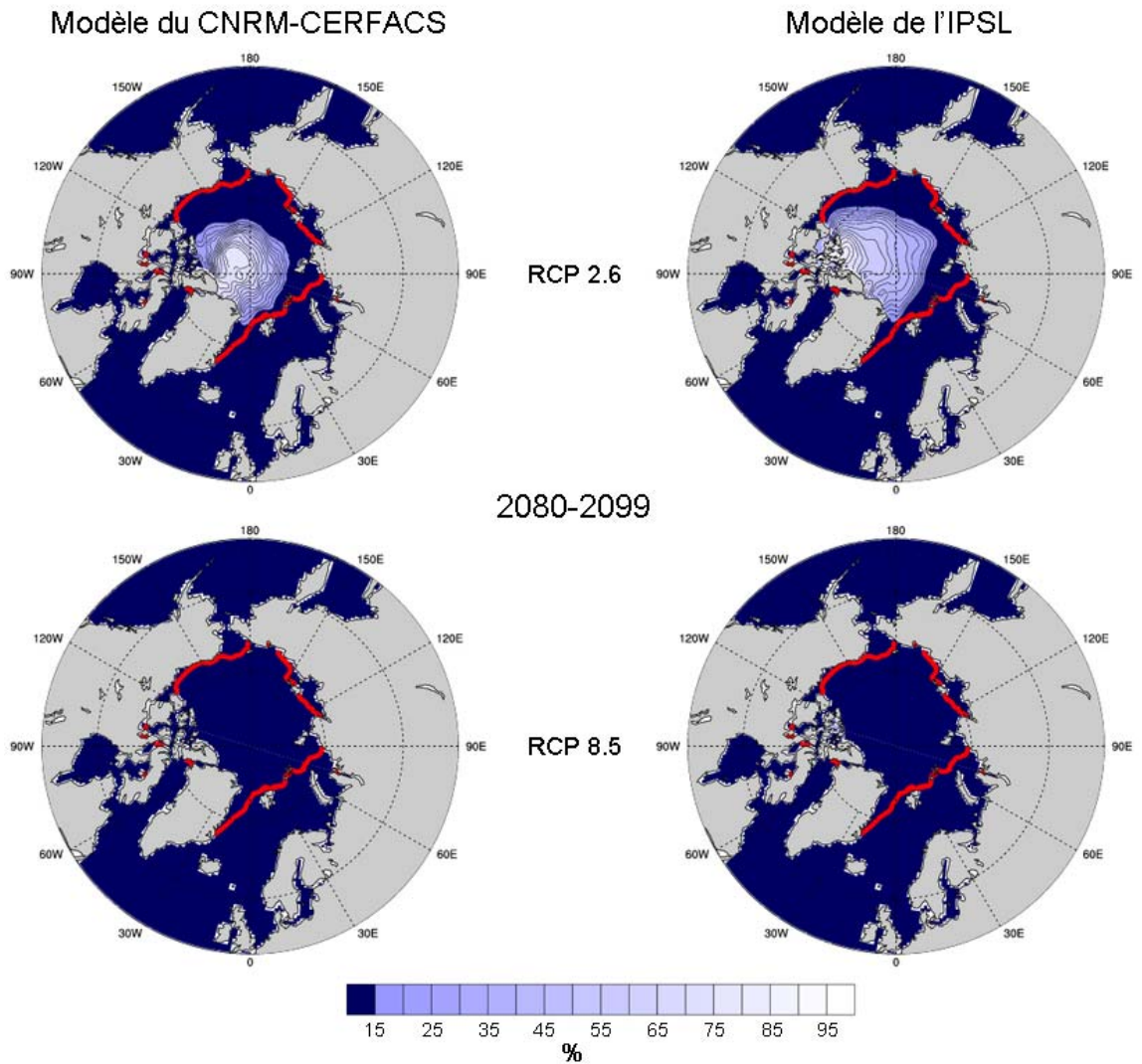


Figure 4.6 : Pourcentage de l'océan couvert par la glace pour la banquise arctique de fin d'été (en septembre, lorsque la glace de mer est à son minimum d'extension) et pour 2080-2099. (a) et (b): scénario RCP2.6 pour les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL; (c) et (d): scénario RCP8.5 pour les modèles du CNRM-CERFACS et de l'IPSL. Le trait rouge signale l'extension moyenne actuelle de la banquise arctique pendant le mois de septembre. © David Salas y Melia (CNRM-GAME, Météo-France / CNRS)

Emissions de carbone compatibles & émissions anthropiques « autorisées »

Au cours des 10 dernières années, plusieurs études de modélisation ont montré l'existence d'une rétroaction positive (réaction amplifiant le phénomène), potentiellement importante, entre changement climatique et cycle du carbone. La quantité de CO₂ anthropique qui peut être absorbée par les puits de carbone naturels (océan et biosphère continentale) dépend du climat : quand le climat se réchauffe, les puits sont de moins en moins efficaces pour pomper du carbone. On ne peut donc plus simuler les évolutions du climat et du CO₂ atmosphérique de façon indépendante.

Dans ce nouvel exercice, certaines simulations prennent en compte le **couplage entre le climat et le cycle du carbone**. Résultat : quel que soit le scénario futur, ces puits deviennent de moins en moins efficaces. **Après 2100, les continents deviennent pour les scénarios pessimistes une source de carbone pour l'atmosphère.**

Les « émissions de carbone compatibles » pour chaque scénario correspondent aux émissions anthropiques « autorisées », permettant de reproduire l'évolution imposée du CO₂ atmosphérique. Les calculer permet d'établir des scénarios d'émissions compatibles, eux-mêmes ensuite utilisés par les modèles socio-économiques.

La **Figure 4.7** démontre par exemple que, pour suivre la trajectoire du scénario RCP2.6 (en **bleu**) et limiter le réchauffement à 2°C, il faudrait rapidement diminuer les émissions anthropiques, et atteindre des émissions « négatives » (qui correspondent à une action anthropique permettant de prélever directement du CO₂ de l'atmosphère) d'ici la fin du 21^e siècle.

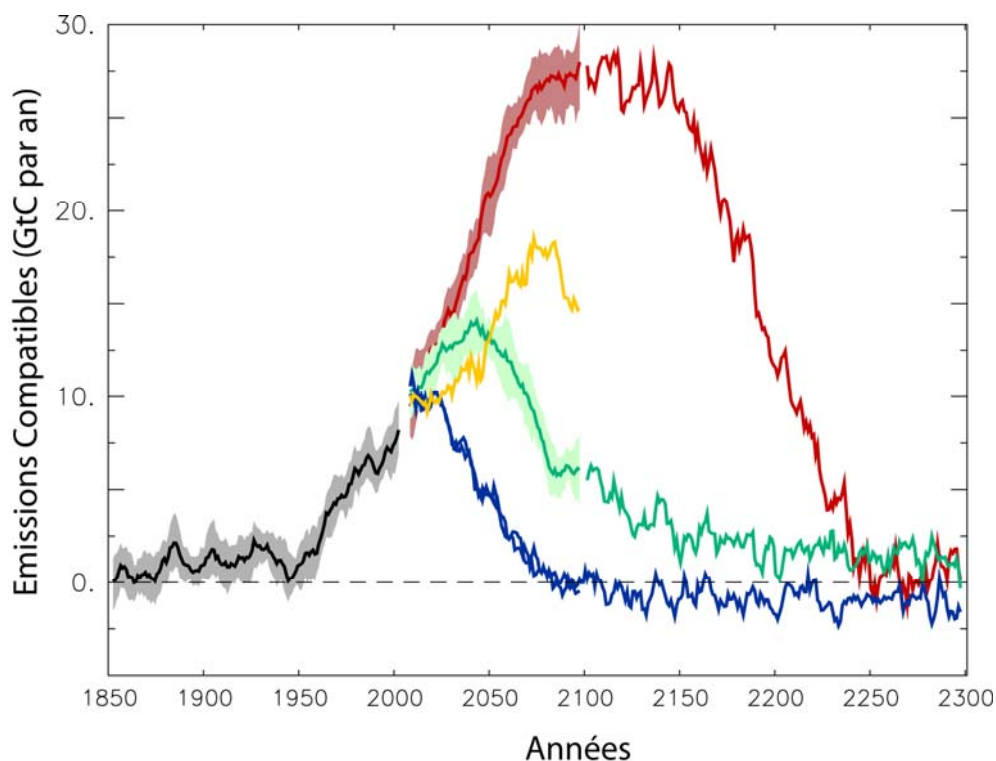


Figure 4.7 : Emissions de CO₂ compatibles avec les concentrations de CO₂ imposées soit par les données avant 2005, soit par les différents scénarios RCP sur la période 2006-2300 (du plus au moins optimiste : RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert, RCP6.0 en jaune et RCP8.5 en rouge).

© Laurent Bopp (LSCE/IPSL, CNRS/CEA/UVSQ)



Les études de prévisibilité décennale

Dans ses rapports successifs, le GIEC émet des conclusions fortes pour le 21^e siècle *via* les **projections** climatiques réalisées numériquement à partir de plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre. L'une des nouveautés et originalités du 5^e rapport est de se focaliser, en complément, sur le "futur proche" correspondant aux prochaines décennies (~2010-2040) et de conduire ainsi un **exercice de prévision** à l'échelle de temps décennale.

En l'absence de variation des forçages extérieurs, le système Terre produit une variabilité à toutes les échelles de temps. Cette variabilité dite interne se superpose au changement induit principalement par les gaz à effet de serre et module ainsi l'évolution climatique, en particulier sur les deux ou trois prochaines décennies. A ces échéances, il est donc particulièrement important d'en tenir compte.

La variabilité interne du système climatique a jusqu'à aujourd'hui été simulée par les modèles sans que l'on cherche à reproduire son évolution chronologique observée. C'est d'ailleurs pourquoi le terme de **projection**, et non pas de **prévision**, était le seul utilisé pour désigner les simulations numériques du 21^e siècle dans tous les précédents rapports du GIEC.

Dans le cadre de CMIP-5, les scientifiques français ont réalisé une série de **prévisions rétrospectives du climat des cinquante dernières années** puis effectué un **exercice préliminaire de prévision, au sens strict du terme, pour la période 2010-2035**. La nouveauté est que ces prévisions ont été initialisées à partir des observations océaniques en respectant la chronologie observée (les prévisions démarrant en 1960 ont utilisé comme état initial de l'océan la meilleure estimation possible de l'état océanique de 1960), l'océan étant le moteur principal de la variabilité interne décennale.

Les principaux objectifs de ces simulations sont de :

- quantifier la capacité à reproduire les fluctuations décennales observées depuis 1960
- estimer la prévisibilité du système climatique aux échelles de temps décennales.

La **Figure 4.8** reproduit deux exemples de prévision :

- L'image du haut montre que les modèles sont capables de reproduire les fluctuations observées pour la température globale de l'océan en surface avec une grande acuité. La prévisibilité de la température océanique est en grande partie expliquée par les forçages externes pris en compte dans les simulations (variabilité solaire, volcanisme, émissions des gaz à effet de serre, ...). On remarque en particulier la tendance au réchauffement et le rôle de l'activité volcanique qui la module.
- L'image du bas montre que, pour la température de surface océanique moyennée sur l'Atlantique Nord uniquement, les prévisions reproduisent une partie significative de la variabilité décennale de ce bassin océanique. L'analyse montre que cette capacité prédictive est principalement associée à l'initialisation de l'océan à partir des observations (et non aux forçages externes, comme précédemment).

D'une manière générale, la capacité à prévoir aux échelles décennales est plus faible :

- à l'échelle régionale qu'à l'échelle planétaire,
- sur les continents que sur les océans,
- au-dessus du Pacifique qu'au-dessus de l'Atlantique.

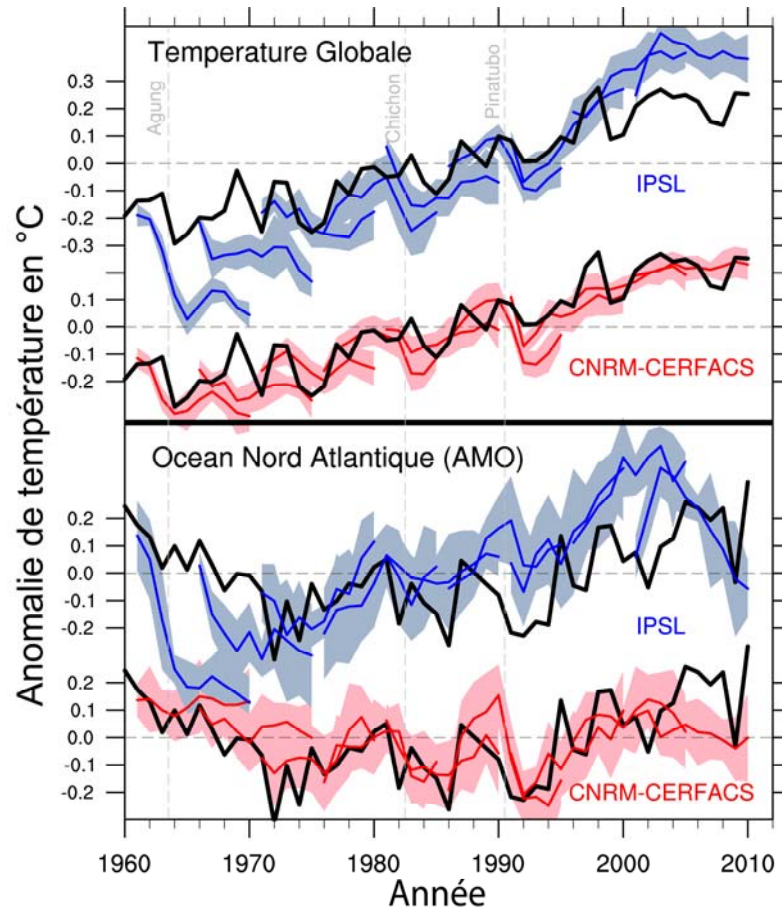


Figure 4.8 : Anomalies de température océanique globale (haut) et sur l'océan Atlantique Nord (bas) calculées sur la période de référence 1960-2010 pour les observations (en noir) et pour les prévisions des modèles (rouge: CNRM-CERFACS, bleu: IPSL) calculées sur la période de référence 1960-2010. Chaque « segment » en trait plein (bleu ou rouge) représente une prévision de 10 ans. Les prévisions ont été démarrées tous les 5 ans à partir de 1960 : 1960, 1965, 1970,..., 1990, 1995, 2000. Les enveloppes (gris-bleu et rose) indiquent une estimation de l'incertitude associée à chaque prévision.

© C. Cassou (CNRS/CERFACS) & J. Mignot (LOCEAN/IPSL, CNRS/UPMC/IRD/MNH)

La prévision décennale correspond à un besoin souvent exprimé par les décideurs politiques ou économiques. Thème émergent et prometteur en termes d'applications, c'est aujourd'hui un sujet majeur de recherche qui nécessite de relever de nombreux défis. L'un d'entre eux concerne l'utilisation des observations pour initialiser les modèles : celles-ci sont très hétérogènes à la surface du globe (peu d'observations des océans de l'hémisphère Sud en particulier) et ne couvrent que les dernières décennies. Ces limitations rendent difficiles l'analyse des fluctuations décennales et l'évaluation de leur prévision. Ainsi, même si la communauté scientifique a atteint la maturité nécessaire pour aborder ces défis, ce volet « prévision décennale », inscrit dans le prochain rapport du GIEC, en est aux premières étapes, à la fois dans la méthodologie et la compréhension des processus physiques en action.