



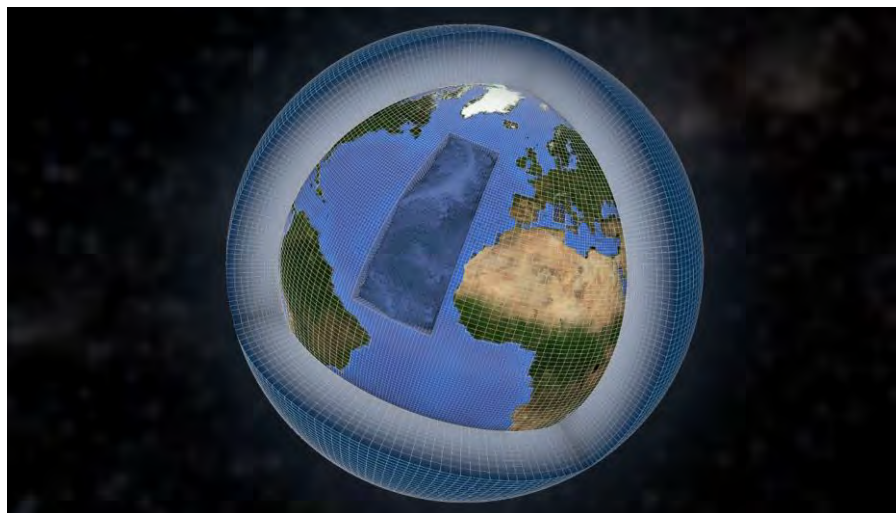
Depuis 80 ans, nos connaissances
bâtissent de nouveaux mondes



Paris,
17/09/2019

Conférence de presse

Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises



© CEA/CNRS/Météo-France 2019 - Animea Studio

Contacts presse

CNRS | Priscilla Dacher / Véronique Etienne | 01 44 96 46 06/51 37 |
presse@cnrs.fr

CEA | François Legrand / Manon Colonna | 01 64 50 20 11 |
presse@cea.fr

Météo-France | Anne Orliac / Xavier Bonnefroid / Neila Ben Miad |
01 77 94 71 36 / 32 | presse@meteo.fr

Sommaire

Les intervenants	p. 3
Le projet CMIP	p. 5
Les scénarios utilisés dans CMIP6 pour simuler le climat futur	p. 7
Les moyens mobilisés en France	p. 8
Les modèles de climat français pour CMIP6	p. 9
Résultats	p. 14
- Évolution de la température moyenne du globe	p. 14
- Évolution des températures : des disparités régionales	p. 17
- Un climat plus sensible à l'effet de serre anthropique ?	p. 19
- Évolution des précipitations	p. 21
- Évolution de la banquise arctique	p. 22
- Premières modélisations régionales détaillées	p. 23
- Un degré de confiance plus élevé	p. 26
Une ressource pour les « services climatiques »	p. 30
Laboratoires impliqués	p. 31
Organismes impliqués	p. 32

Les intervenants



Olivier Boucher est directeur de recherche au CNRS, affilié à l'Institut Pierre-Simon Laplace dont il est directeur-adjoint et où il a la responsabilité du Centre de modélisation du climat. Il a été auparavant, de 2005 à 2011, responsable de l'équipe « Climat, chimie et écosystèmes » au Centre Hadley du Met Office britannique. Ses activités de recherche portent sur les effets météorologiques et climatiques des aérosols atmosphériques, leurs interactions avec les nuages et le rayonnement solaire, la modélisation du système Terre et la géo-ingénierie du climat. Il a coordonné la rédaction du chapitre « Nuages et aérosols » du 5^e rapport du GIEC, publié en 2013. Entre 2015 et 2017, il a coordonné avec l'économiste Céline Guivarch et le climatologue Hervé Le Treut une équipe interdisciplinaire de chercheurs pour évaluer les engagements des Etats signataires de l'Accord de Paris (les contributions nationales, NDC en anglais).



Climatologue, directrice de recherche au CEA, Pascale Braconnot est spécialiste de la modélisation du climat et de la paléoclimatologie au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA/CNRS/UVSQ) à Paris-Saclay. Elle est aussi chargée de mission à l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS. Elle a notamment coordonné le développement du modèle numérique complet du système Terre de l'IPSL. Elle a participé à la rédaction des chapitres « Comprendre et attribuer le changement climatique » et « Evaluation des modèles climatiques » des 4^e et 5^e rapports d'évaluation du GIEC et a reçu, en 2009, la Médaille Milutin Milanković de la *European Geophysical Union*.



Directrice de recherche au CEA, la climatologue Valérie Masson-Delmotte est co-présidente du groupe 1 du GIEC, le groupe qui travaille sur les bases physiques du climat, depuis 2015. Chercheuse au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA/CNRS/UVSQ) à Paris-Saclay, elle mène des recherches sur l'évolution des climats passés et l'impact du climat futur. Elle a notamment participé à la reconstitution de la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère sur les 800 000 dernières années. Elle a également travaillé sur l'impact du réchauffement climatique sur l'Antarctique en 2070. Elle avait contribué, en 2018, à plus de deux cents publications scientifiques.



Chercheur climatologue, David Salas y Mélia est le responsable du Groupe de météorologie de grande échelle et climat du CNRM (Météo-France/CNRS). Cette structure a pour principales missions de mieux comprendre les mécanismes et impacts du changement climatique, d'étudier la qualité de l'air, d'élaborer un système de prévision saisonnière du climat et de produire régulièrement des simulations du climat en soutien des rapports du GIEC. David Salas y Mélia cherche principalement à mieux comprendre et estimer les évolutions passées et futures du climat à travers l'utilisation de modèles. Plus particulièrement, il s'intéresse au rôle et à l'évolution des glaces marines au sein du système climatique. À ce titre, il a notamment créé et développé un modèle représentant l'évolution de la banquise antarctique et arctique.

Le projet CMIP6

Créé il y a plus de vingt ans par le Programme mondial de recherches sur le climat (PMRC), le programme d'intercomparaison des modèles de climat (CMIP) favorise la coopération internationale entre les centres de modélisation du climat. Les simulations numériques du climat issues de CMIP alimentent de nombreux projets scientifiques de compréhension des mécanismes et d'évaluation des modèles, des études d'impacts multidisciplinaires et servent de référence pour les rapports du GIEC. **Chaque phase de ce programme fait donc progresser le socle des connaissances sur le climat et notamment sur son évolution probable, socle sur lequel s'appuient ensuite les politiques.** Ces simulations alimentent également les services climatiques en émergence (voir page 30).

CMIP6 en chiffres

Plus de 20 centres de modélisation du climat dans le monde, dont 2 en France

Une trentaine de modèles dans le monde, dont 2 en France

Plus de 300 expériences numériques standardisées

3 Pétaoctets de données rendues publiques dans le monde, dont 1 pétaoctet en France (au 15 septembre)

Une centaine de chercheurs et ingénieurs impliqués en France

La phase actuelle, CMIP6, a démarré en 2014 à l'issue de la publication du 5^e rapport d'évaluation du GIEC. Faisant intervenir plus de 20 centres de modélisation du climat dans de nombreux pays, elle sera largement utilisée pour le 6^e rapport d'évaluation du GIEC en cours de rédaction (la publication du premier volet est prévue en 2021). Environ 300 « expériences numériques » ciblées composent CMIP6 et visent à répondre à diverses questions scientifiques. Les centres de modélisation améliorent leurs modèles de climat et réalisent ces expériences. Enfin, chercheurs et ingénieurs en informatique développent les « infrastructures » logicielles nécessaires pour mettre les résultats à disposition des chercheurs du monde entier.

CMIP6 s'organise autour de trois grandes questions scientifiques :

1. Comment le système climatique répond-il aux différentes perturbations externes, ou « forçages » (en particulier les gaz à effet de serre) ?
2. Quelles sont les origines et les conséquences des biais systématiques des modèles ?
3. Comment peut-on avoir une meilleure estimation du changement climatique qui prenne en compte la variabilité intrinsèque, la prévisibilité du système et les incertitudes sur les scénarios socio-économiques ?

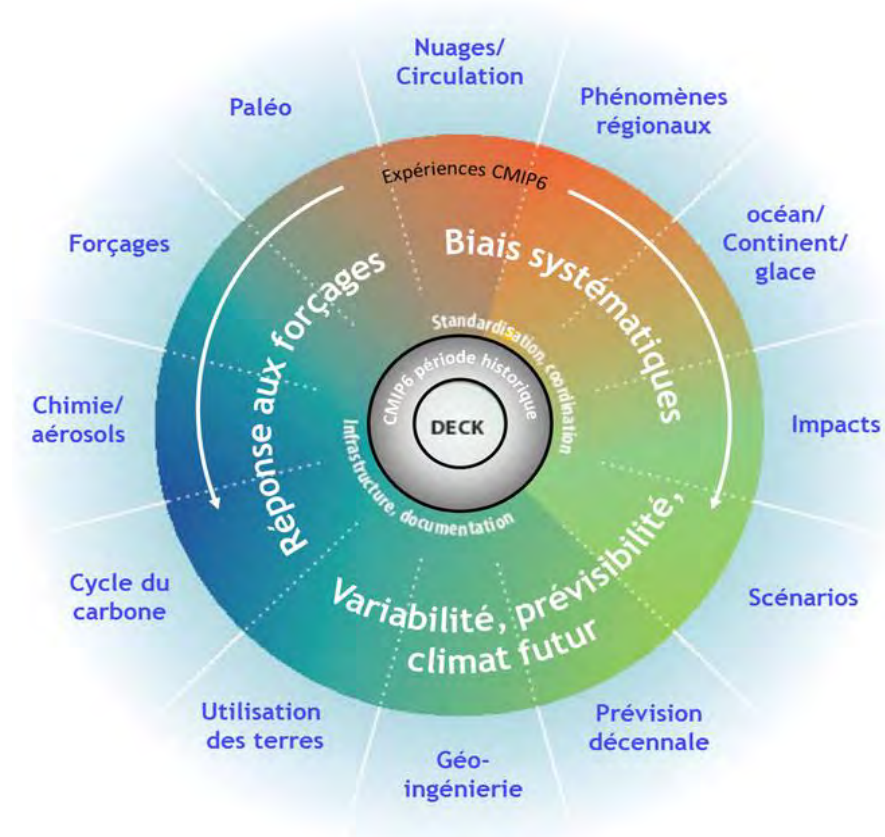
Comme pour les phases précédentes, les expériences numériques sont choisies et définies par la communauté scientifique internationale, guidée par des questions scientifiques permettant d'affiner la compréhension du fonctionnement du climat et de ses changements. Un noyau dur de simulations (appelées DECK) sert de base commune pour tous les groupes qui souhaitent participer avec leurs modèles de climat. Ces simulations sont définies de façon à assurer une évaluation en continu des différentes versions de modèles et à pouvoir mesurer les avancées de manière objective.

Cette phase CMIP6 s'appuie aussi sur 21 sous-projets d'intercomparaison des modèles (MIP) contribuant aux sept grands défis du Programme mondial de recherche sur le climat (figure 1):

- nuages, circulation atmosphérique et sensibilité climatique ;
- changements affectant la cryosphère ;
- extrêmes climatiques ;
- disponibilité en eau ;
- montée de la mer à l'échelle régionale ;
- prévision décennale ;
- forçages biogéochimiques et rétroactions.

Les projections du climat futur sont regroupées dans l'un de ces sous-projets. Elles font collaborer des experts en modélisation du climat et des économistes du climat, qui établissent ensemble différents scénarios visant à explorer les futurs possibles.

Figure 1. Représentation schématique des thèmes scientifiques et de l'organisation de CMIP6. Adapté de Eyring et coll. (GMD, 2016)



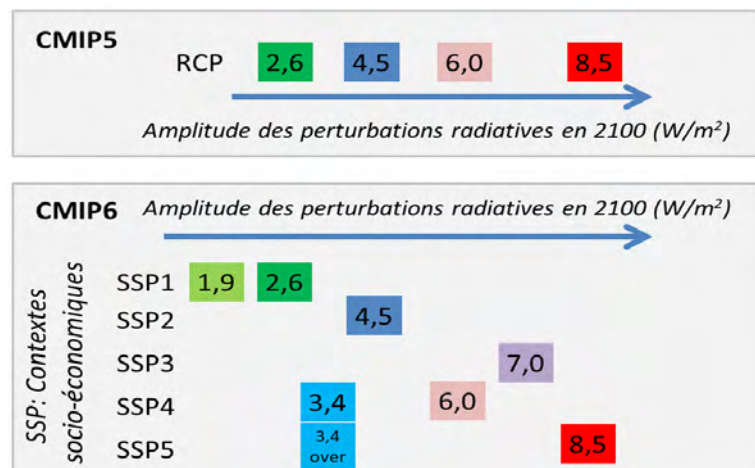
Les scénarios utilisés dans CMIP6 pour simuler le climat futur

Du point de vue de la modélisation du climat, s'interroger sur le climat futur revient à tester la réponse des modèles aux émissions de gaz à effet de serre, aux aérosols (ou particules) atmosphériques d'origine anthropique et aux changements d'utilisation des terres (déforestation/afforestation, agriculture...). Ces différents éléments perturbent le climat en modifiant le bilan radiatif¹ de la Terre. L'amplitude de la réponse en température dépend de l'amplitude des perturbations, au premier rang desquelles figure l'augmentation des gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone.

Les trajectoires possibles des perturbations d'origine anthropique sont choisies en collaboration avec la communauté des économistes du climat et celle s'intéressant aux impacts, à la vulnérabilité et à l'adaptation aux changements climatiques. Ces différents scénarios sont classés selon l'amplitude de la perturbation du bilan radiatif qu'ils génèrent à l'horizon 2100. Ainsi pour CMIP5, quatre scénarios (RCP pour *Radiative Concentrations Pathways*) avaient été utilisés, représentant respectivement des perturbations du bilan radiatif de 2,6, 4,5, 6 et 8,5 W/m².

Cependant, à chaque RCP peuvent correspondre plusieurs scénarios socio-économiques selon les hypothèses faites sur l'évolution de la population mondiale et celle des sociétés, le niveau de coopération entre les pays, etc. Différentes trajectoires socio-économiques (SSP, *Shared Socio-economic Pathways*) ont donc été développées pour CMIP6. Elles correspondent à autant d'évolutions possibles du monde. Les RCP de CMIP5 ont ainsi été révisés à la lumière des SSP (figure 2) afin de proposer des trajectoires couvrant à la fois une gamme de perturbations radiatives et de contextes socio-économiques.

Figure 2. Schéma des options choisies pour les scénarios de référence proposés dans CMIP6 en comparaison à CMIP5. Adapté de O'Neill et coll. (GMD, 2018).



La gamme de perturbations radiatives retenue est similaire à celle de CMIP5, mais permet de mieux explorer les scénarios d'amplitude intermédiaire (3,4 et 7,0 W/m²) et faible (1,9 W/m²), permettant dans ce dernier cas d'approcher l'objectif de limiter l'augmentation des températures à 1,5 ou 2 °C.

¹ Le bilan radiatif de la Terre est l'inventaire de l'énergie reçue et perdue par la planète.

Les moyens mobilisés en France

La modélisation du climat nécessite des moyens importants, réunis à l'échelle de la France dans l'infrastructure de recherche Climeri-France, avec les forces du CNRS, du CEA et de Météo-France, et le soutien notable de Sorbonne Université, de l'IRD et du Cerfacs. Au-delà de la conception des modèles, la modélisation du climat requiert du calcul intensif et du stockage informatique. La contribution française représente plus de 500 millions d'heures de calcul qui ont été mises à disposition, pour la réalisation des simulations climatiques, par le Genci² (environ 300 millions d'heures de calcul sur les supercalculateurs Curie et Joliot-Curie du TGCC-CEA et le supercalculateur Ada de l'Idris-CNRS pour le modèle IPSL) et par Météo-France (environ 200 millions d'heures pour les modèles du CNRM-Cerfacs, dont la configuration à haute résolution CNRM-CM6-HR).

Pour CMIP6, plus de 80 000 ans d'évolution du climat ont été simulés en utilisant les supercalculateurs pendant plus d'un an, 24 heures/24 et 7 jours/7, générant 20 pétaoctets de données. De plus, la distribution et l'analyse des résultats nécessitent un réseau avancé de distribution de données, au sein du Earth System Grid Federation (ESGF), ainsi qu'un support utilisateur personnalisé offert par les centres de calcul.

Figure 3. Distribution des différents nœuds du réseau ESGF dans le monde (dont 2 en France). Le réseau ESGF en Europe est soutenu par la Commission européenne à travers les projets d'infrastructure du réseau européen de modélisation du système Terre (IS-ENES).

© Guillaume Levavasseur, IPSL



L'investissement humain est également important avec plus de 100 chercheurs et ingénieurs impliqués en France. Le programme CMIP6 requiert des compétences dans toutes les sciences du climat mais aussi en informatique (calcul scientifique, sciences des données, architecture réseau).

En savoir plus : communiqué de presse Météo-France/CNRS/CEA du 26 mars 2019 *“Les scientifiques français contribuent de manière importante à l'effort international destiné à mieux comprendre le système climatique par la simulation numérique”* <https://bit.ly/2kB77U8>

² Grand équipement national de calcul intensif. Son parc de calculateurs est installé dans trois centres, dont l'Institut du développement et des ressources en informatique scientifique (IDRIS) du CNRS, à Orsay et le Très grand centre de calcul (TGCC) du CEA, à Bruyères-le-Châtel (Essonne).

Les modèles de climat français pour CMIP6

Ces quatre dernières années, l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et le Centre national de recherches météorologiques (Météo-France/CNRS), en collaboration avec le Cerfacs, ont développé une nouvelle génération de modèles du climat mondial. Ces nouveaux modèles, utilisés pour les simulations CMIP6, ouvrent pour la première fois de nouvelles possibilités d'analyse à l'échelle régionale et un cadre plus cohérent pour étudier les liens climat-environnement et les impacts du changement climatique.

Le modèle de climat de l'IPSL

L'[Institut Pierre-Simon Laplace](#) regroupe les expertises de 9 laboratoires franciliens dans le domaine des sciences de l'environnement et du climat (chacun rattaché à plusieurs universités, écoles ou organismes, comme le CNRS ou le CEA), soit quelque 1500 personnes. Ces laboratoires collaborent afin d'améliorer notre compréhension du climat de la Terre et des changements climatiques passés et futurs. Par ailleurs, l'IPSL coordonne le développement d'outils communs et de services, parmi lesquels figure un modèle intégré du système Terre, pouvant simuler aussi bien le climat actuel que les climats passés et futurs, en lien avec les cycles biogéochimiques et les problématiques de pollution atmosphérique. En combinant des expertises, des modèles et des systèmes d'observations maîtrisés, une puissance de travail de plus de mille personnes, l'IPSL figure parmi les quelques acteurs au monde à pouvoir étudier le système Terre de façon intégrée, et relever quelques-uns des grands défis sociétaux.

Le modèle de climat de l'IPSL est constitué de plusieurs composantes, chacune représentant un compartiment différent du système climatique (figure 4) :

- le modèle atmosphérique LMDZ développé au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD, CNRS/SU/ENS Paris/École polytechnique),
- le modèle océanique Nemo développé au Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques (CNRS/SU/IRD/MNHN) dans le cadre du consortium européen Nemo,
- le modèle de surfaces continentales Orchidee développé au LSCE (CNRS/CEA/UVSQ), au LMD et au laboratoire Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols (CNRS/SU/EPHE).

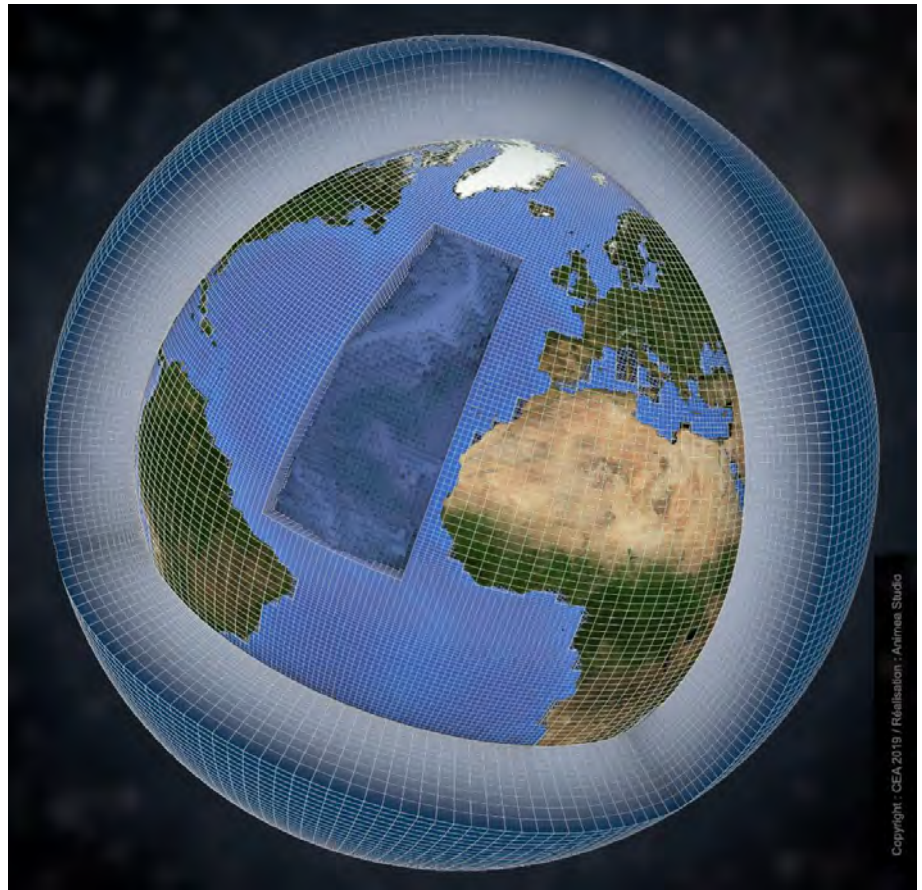
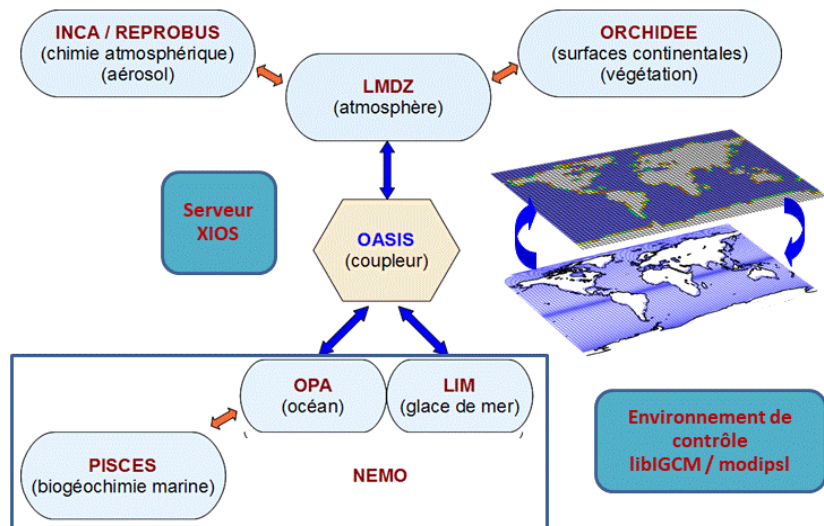
Des modules de chimie atmosphérique sont disponibles. Le modèle climatique IPSL utilise le coupleur OASIS et le puissant serveur d'entrée/sortie XIOS.

Figure 4. Représentations schématiques du modèle de l'IPSL.

En haut, composantes du modèle de climat de l'IPSL.

En bas, illustration des grilles des modèles océaniques, atmosphériques, et de surfaces continentales.

© CEA/CNRS/Météo-France 2019 - Animea Studio

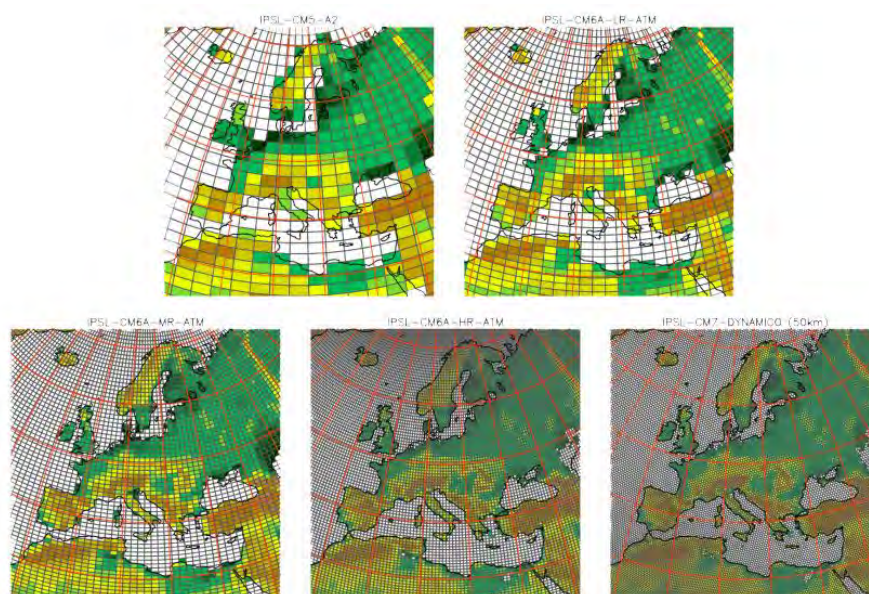


Copyright : CEA 2019 / Réalisation : Animea Studio

Pour CMIP6, une nouvelle configuration, appelée IPSL-CM6A-LR, a été développée, testée et évaluée entre 2015 et 2018. La résolution du modèle d'atmosphère a été portée de 96 x 95 mailles et 39 niveaux à 144 x 142 mailles (soit une résolution moyenne de 150 km) et 79 niveaux (figure 5). La résolution du modèle d'océan est passée de 2° x 2° à 1° x 1° avec une résolution plus fine dans les Tropiques. Ce nouveau modèle capitalise aussi sur six années de travail pour de meilleures représentations de certains processus physiques de petite échelle, dans l'atmosphère (en particulier liés aux nuages, à la convection et au transfert de rayonnement) et dans l'océan.

Figure 5. Grille de la composante atmosphérique des modèles de climat de l'IPSL, avec sur la première ligne IPSL-CM5A2 (à gauche) dédié à l'étude des paléoclimats, IPSL-CM6A-LR utilisé pour CMIP6, et sur la seconde ligne les modèles à moyenne, haute et très haute résolutions en cours de développement.

© Patrick Brockmann, LSCE



Les modèles de climat du CNRM

Les activités de recherche du CNRM (Centre national de recherches météorologiques, Météo-France/CNRS) se nourrissent de l'enrichissement réciproque entre la recherche, les applications opérationnelles et les observations de Météo-France. Les recherches sur le climat et le changement climatique sont principalement menées à Toulouse. Elles concernent la modélisation du système Terre, la participation à des exercices internationaux tels que CMIP6, la réalisation d'études d'impact et l'interprétation des changements climatiques observés par l'utilisation conjointe de données issues de modèles et d'observations.

Partenaire majeur du CNRM dans ce projet, le laboratoire « Climat, environnement, couplages et incertitudes » associe le CNRS et le Cerfacs³ qui mène des activités de recherche, de développement d'outils, de transfert et de formation sur la simulation et le calcul haute performance dans divers domaines, dont le climat.

³ Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique

Le CNRM contribue à CMIP6, en association avec le Cerfacs, via une plate-forme de modélisation incluant trois modèles couplés de climat : CNRM-CM6-1, CNRM-CM6-1 HR et CNRM-ESM2-1.

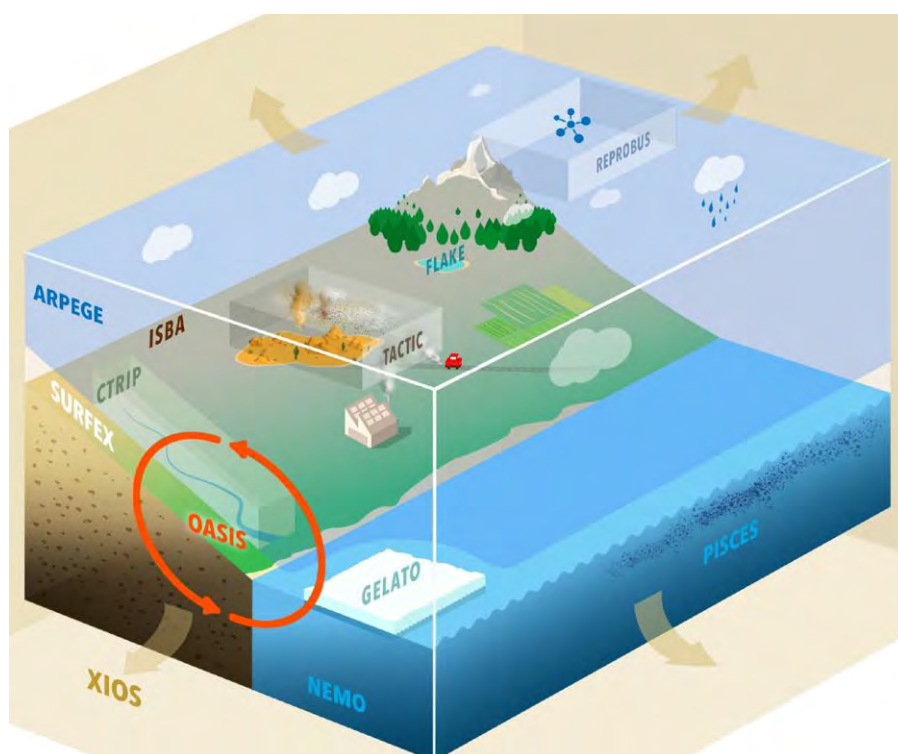
Le cœur de cette plate-forme est **CNRM-CM6-1**, dont la résolution horizontale est de l'ordre de 100 km. Ce modèle résulte de l'assemblage de quatre composantes via le coupleur Oasis3-MCT développé par le Cerfacs :

- Arpege-Climat V6 (atmosphère, version climat du modèle mondial de prévision du temps de Météo-France) ;
- Surfex V8 (modèle de surfaces continentales de tous les modèles d'atmosphère de l'établissement) et CTRIP (fleuves) ;
- Nemo 3.6 (océan, développé par le consortium Nemo) ;
- Gelato 6 (glace de mer, développé au CNRM).

CNRM-CM6-1-HR ne diffère de CNRM-CM6-1 que par sa résolution plus élevée, de l'ordre de 50 km pour l'atmosphère et de 25 km pour l'océan. Ce modèle est proche de la version actuelle du système de prévision climatique saisonnière de Météo-France, qui permet de fournir les tendances (plus chaud/froid, humide/sec...) de la saison à venir pour différentes régions du monde.

Le modèle de système Terre **CNRM-ESM2-1**, plus complexe, regroupe toutes les composantes du système Terre, dont le cycle du carbone global, les aérosols troposphériques interactifs et la chimie stratosphérique.

Figure 6. Schéma du modèle de système Terre CNRM-ESM2-1



Les trois modèles comportent 91 et 75 niveaux respectivement dans l'atmosphère et l'océan, et toutes leurs composantes utilisent le serveur d'entrées-sorties XIOS développé à l'IPSL. Le choix d'utiliser l'un ou l'autre des modèles globaux de la plate-forme est guidé par les objectifs scientifiques.

Les résultats de ces modèles peuvent être « zoomés » sur une région d'intérêt par des modèles développés au CNRM, pour obtenir des informations à échelle plus fine :

- Arpege, modèle à résolution variable dans l'espace ;
- Aladin, version à domaine limité d'Arpege (jusqu'à 10 km de résolution) ;
- Arome (utilisé en prévision du temps sur la France métropolitaine et les outre-mers, et en modélisation du climat à une résolution kilométrique) ;
- CNRM-RCSM, système climatique régional couplé intégrant la représentation à haute résolution de l'atmosphère, des surfaces continentales, de l'océan, des fleuves et des aérosols naturels et anthropiques.

Résultats

Évolution de la température moyenne du globe

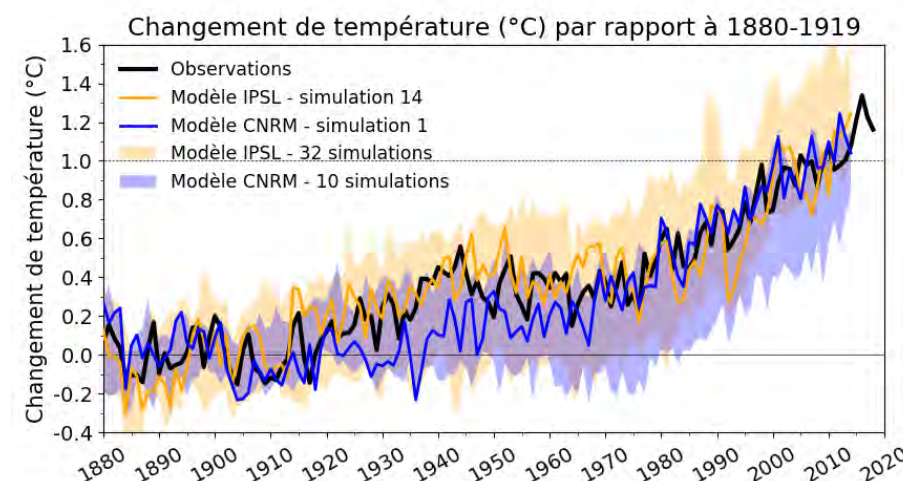
Le projet CMIP6 confirme largement les résultats des précédentes phases CMIP quant à l'évolution de la température moyenne de la planète sur la période passée (1850-2014), dénommée période historique, et la période future (2015-2100). En particulier, les modèles ne peuvent reproduire l'amplitude du réchauffement de la période historique sans prendre en compte l'évolution des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et des aérosols dus aux activités humaines.

Les modèles reproduisent bien l'évolution récente

Parmi les nouveautés, figure le grand nombre de simulations de la période passée (1850-2014) qui ont été réalisées : 32 avec le modèle de l'IPSL et 10 avec CNRM-CM6. Pour chaque modèle, ces simulations ne diffèrent que par les conditions initiales de l'océan et de l'atmosphère en 1850 ; en effet, celles-ci ne sont pas connues et il est important de pouvoir disposer d'un ensemble de simulations que l'on peut considérer comme étant équiprobables. Les deux modèles simulent assez bien l'augmentation observée de la température d'environ 1°C depuis le début de l'ère industrielle, le modèle de l'IPSL ayant tendance à le surévaluer de quelques dixièmes de degrés, et le modèle CNRM-CM6 au contraire à le sous-évaluer légèrement (figure 7). Néanmoins, pour chaque modèle, certaines des simulations reproduisent très fidèlement le réchauffement observé (voir page 26). Il est donc primordial de considérer la variabilité naturelle du climat quand on évalue l'adéquation entre les modèles et les observations.

Figure 7. Changement de température moyenne de la planète : température observée (courbe noire, 1880-2018) et estimée par un ensemble de simulations pour le modèle de l'IPSL (enveloppe jaune, 1880-2014) et CNRM-CM6 (enveloppe bleue, 1880-2014).

Pour chaque modèle, il existe des simulations qui représentent bien la courbe observée (traits continus de couleur). Période de référence : 1880-1919



Les prévisions face aux objectifs de l'Accord de Paris

S'agissant du climat futur, les deux modèles prédisent une augmentation de la température moyenne du globe (avec des variations plus ou moins importantes selon les années) au moins jusqu'en 2040. Le choix du scénario (et des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre associées) a un impact discernable sur la température moyenne de la planète à partir des années 2040 pour les quatre scénarios montrés dans la figure 8 (SSP1 2,6, SSP2 4,5, SSP3 7,0 et SSP5 8,5).

Le scénario SSP1 2,6 (qui implique un effort d'atténuation important) ne permet pas de rester sous l'objectif des 2°C de réchauffement dans les deux modèles français.

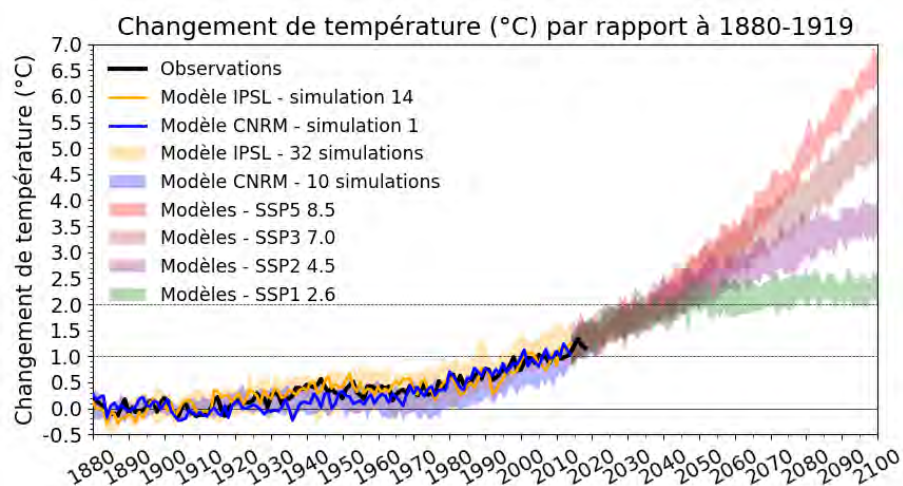
En revanche, le scénario SSP1 1,9, impliquant un effort d'atténuation encore plus important, le permet tout juste et au prix d'un dépassement temporaire de l'objectif de 2°C au cours du siècle.

Dans le pire des scénarios considérés, la hausse de température moyenne globale atteint 6,5 à 7°C en 2100.

La température moyenne de la planète à la fin du siècle dépend donc fortement des politiques climatiques qui seront mises en œuvre dès maintenant et tout au long du 21^e siècle.

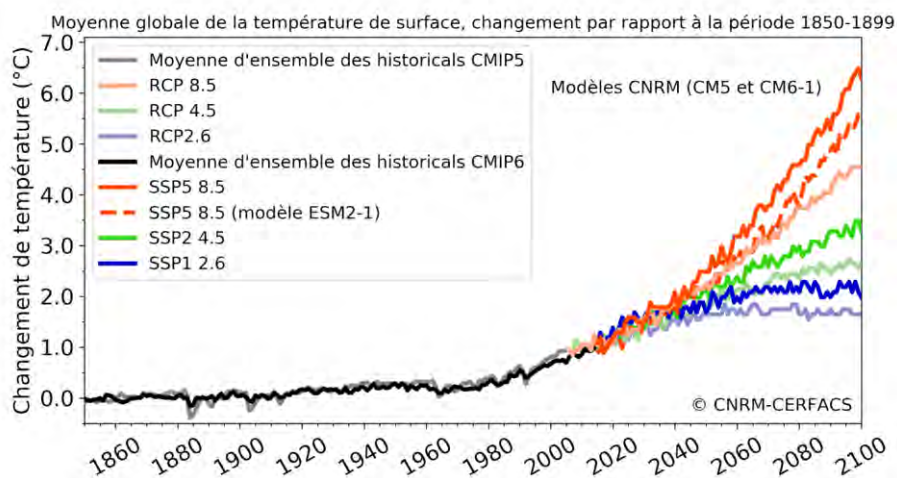
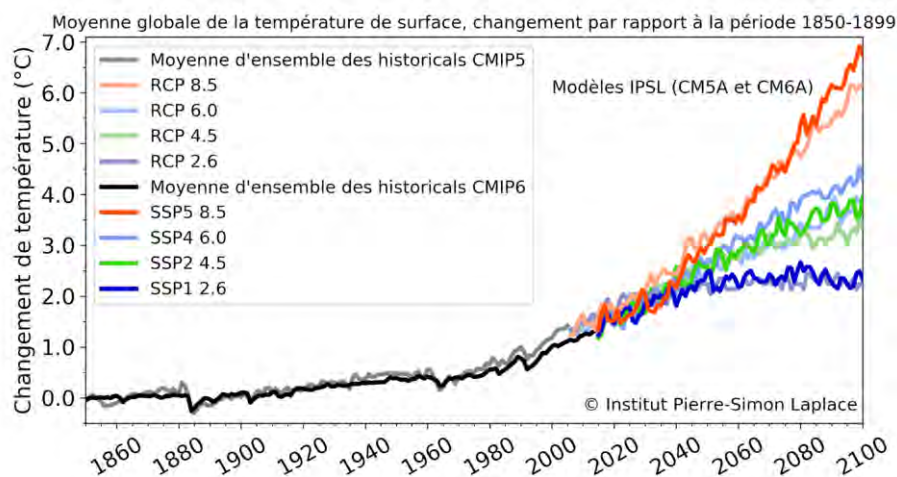
Les scénarios SSP peuvent être traduits en trajectoires d'émissions de CO₂ grâce à la représentation du cycle du carbone qui est intégrée dans chacun des deux modèles. Le scénario SSP1 1,9 implique une diminution immédiate des émissions de CO₂ jusqu'à atteindre la neutralité carbone à l'échelle de la planète vers 2060, ainsi qu'une captation de CO₂ atmosphérique de l'ordre de 10 à 15 milliards de tonnes par an en 2100. Le scénario SSP1 2,6, quant à lui, nécessite d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2080, et d'entreprendre ensuite une captation de CO₂ atmosphérique.

Figure 8. Comme pour la figure précédente, mais avec la prolongation sur le 21^e siècle pour une sélection de quatre scénarios, SSP1 2,6, SSP2 4,5, SSP3 7,0 et SSP5 8,5. Pour chaque scénario, l'enveloppe rassemble l'ensemble des simulations réalisées avec les deux modèles. Période de référence : 1880-1919



Les projections de la température moyenne du globe sont très similaires à celles de CMIP5 pour le modèle de l'IPSL, malgré des évolutions importantes dans le contenu physique du modèle. Elles témoignent en revanche d'un réchauffement plus sévère (en comparaison avec CMIP5) pour le modèle CNRM-CM6 (figure 9). Les deux modèles français sont très cohérents quant au niveau de réchauffement simulé, ce qui est confirmé par des réponses similaires à un doublement de la concentration de CO₂ (voir page 19).

Figure 9. Comparaison entre les températures moyennes du globe simulées pour CMIP5 (traits tiretés et couleurs pastels) et pour CMIP6 (traits pleins et couleurs vives) pour les deux modèles français. Le modèle CNRM-ESM2 est aussi montré pour le scénario SSP5 8,5.

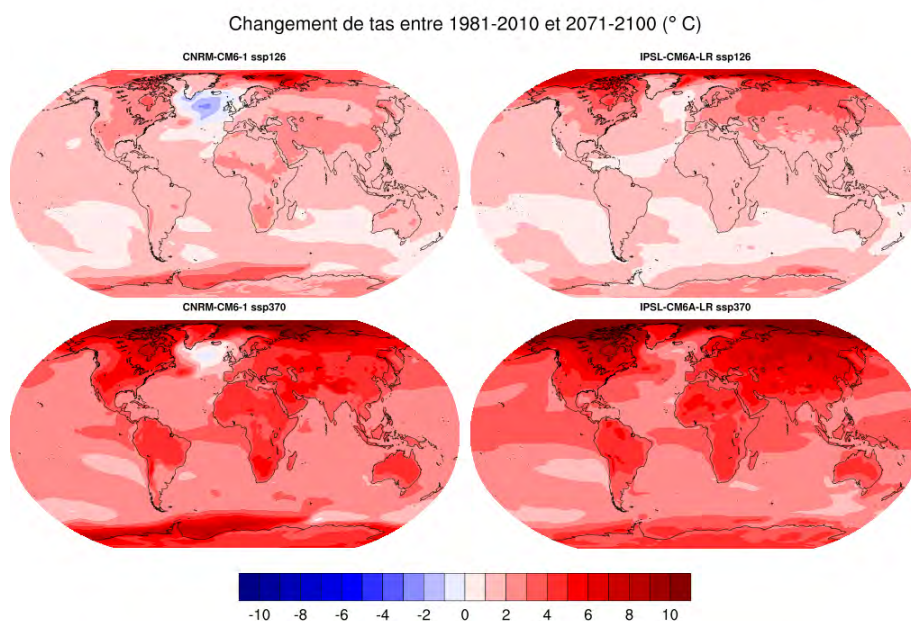


Résultats

Évolution des températures : des disparités régionales

L'évolution de la température moyenne du globe cache des disparités régionales qui sont partagées par les deux modèles mais qui diffèrent entre les scénarios comme l'illustre la figure 10. On notera le réchauffement plus élevé sur les hautes latitudes de l'hémisphère nord et le réchauffement plus important des continents en comparaison aux océans. Le modèle CNRM-CM6 simule un refroidissement localisé dans l'Atlantique Nord. Ce n'est pas le cas du modèle de l'IPSL, pour des raisons qui restent à élucider.

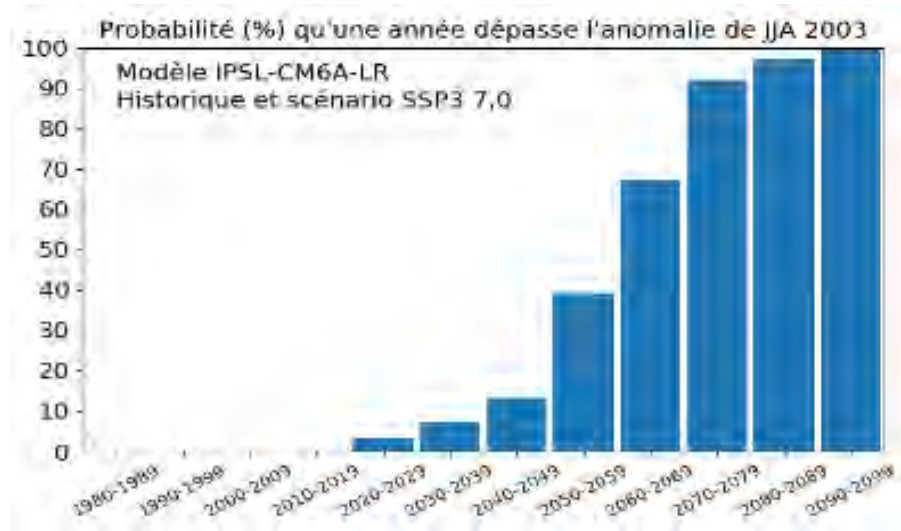
Figure 10. Distribution des changements de température de surface (°C) en moyenne annuelle en 2071-2100 (par rapport à 1981-2010) pour deux des scénarios (SSP1 2,6 et SSP3 7,0), selon le modèle CNRM-CM6 (à gauche) et celui de l'IPSL (à droite).



En France et en Europe de l'Ouest, l'augmentation des vagues de chaleur va se poursuivre

Une analyse des vagues de chaleur à l'échelle de la France métropolitaine montre que les modèles sont capables de simuler des vagues de chaleur d'intensité similaire aux vagues de chaleur déjà observées, même si la vague de chaleur de 2003 est exceptionnelle quant à sa durée. Les modèles confirment aussi que l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur ont augmenté ces dernières décennies : on constate une élévation aussi bien de l'indice T3X (température moyenne sur trois jours consécutifs de canicule) que de l'indice T7X (température moyenne sur sept jours consécutifs de canicule). Les modèles prédisent aussi que **cette tendance va se poursuivre au moins dans les deux décennies qui viennent, quel que soit le scénario considéré** (figure 11).

Figure 11. Probabilité qu'une année dépasse l'anomalie de l'été 2003 (JJA : juin-juillet-août) selon le modèle de l'IPSL dans le cas du scénario SSP3 7,0.



Une analyse plus fine à l'échelle de l'Europe de l'Ouest montre que toutes les caractéristiques des canicules augmentent : température du jour le plus chaud, nombre total de jours de canicule dans l'été, et durée des épisodes de canicule. Cependant, ces évolutions se différencient fortement après 2050 selon les scénarios et les trajectoires d'émissions associées. **Ainsi les scénarios SSP1 1,9 et SSP1 2,6 permettent de limiter la sévérité des canicules.** A contrario, dans les scénarios intermédiaires et hauts, un été typique des années 2050 correspondra à l'été 2003 connu pour ses canicules.

Résultats

Un climat plus sensible à l'effet de serre anthropique ?

Un modèle de climat repose sur la représentation d'un ensemble de processus relatifs à l'atmosphère, l'océan, la glace de mer et les surfaces continentales. Le climat simulé par le modèle découle des interactions entre tous ces processus : on parle de « propriétés émergentes » dans la mesure où les caractéristiques du climat simulé ne sont pas toujours faciles à relier au « contenu » physique du modèle. Parmi ces propriétés émergentes, les climatologues définissent deux mesures de la réponse du climat à l'effet du dioxyde de carbone (CO₂) d'origine anthropique : la réponse à l'équilibre et la réponse transitoire. Ces réponses sont estimées grâce à des simulations idéalisées (différentes des scénarios susmentionnés).

- La **réponse à l'équilibre** correspond à l'augmentation de la température de surface moyenne de la planète pour un doublement théorique de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. C'est une propriété fondamentale du système climatique, qui ne peut pas être observée directement mais qui peut être estimée dans les modèles. Cette réponse prend des siècles voire des millénaires à se matérialiser complètement car il existe dans le système climatique des composantes, comme l'océan, qui évoluent lentement.
- La **réponse transitoire** correspond à l'augmentation de la température de surface moyenne de la planète après 70 ans d'une augmentation continue de 1 % par an de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, ce qui aboutit à un doublement. Cette deuxième quantité est plus faible que la réponse à l'équilibre car le système climatique n'a pas eu le temps de s'ajuster complètement à la perturbation induite par le doublement de CO₂.

Ces deux grandeurs ont été estimées dans le modèle de l'IPSL et CNRM-CM6 d'ancienne (CMIP5) et de nouvelle génération (CMIP6).

Modèle	CMIP5		CMIP6	
	Réponse à l'équilibre	Réponse transitoire	Réponse à l'équilibre	Réponse transitoire
IPSL-CM5A-LR	4,1 °C	2,0 °C	4,8 °C	2,4 °C
CNRM-CM6-1	3,3 °C	2,1 °C	4,9 °C	2,0 °C

La réponse du climat à l'équilibre a augmenté de 4,1 à 4,8°C pour le modèle de l'IPSL entre CMIP5 et CMIP6 à méthodologie constante et de 3,3 à 4,9°C pour CNRM-CM6. Cette augmentation entre CMIP5 et CMIP6 de la réponse à l'équilibre s'accompagne d'une augmentation de la réponse transitoire pour le modèle de l'IPSL, mais pas pour CNRM-CM6. **Une même variation de la teneur en CO₂ entraîne donc des variations de température plus importantes que dans les précédents modèles. Cette augmentation de la « sensibilité » des modèles n'est pas propre aux modèles français, un certain nombre d'autres centres de modélisation à l'étranger faisant un diagnostic similaire.** Les raisons de cette plus grande sensibilité et son impact sur les projections ne sont néanmoins pas encore très clairs. En effet, celles-ci dépendent également d'autres facteurs comme l'inertie du système climatique. Ces questions vont concentrer les efforts de recherche en modélisation du climat dans l'année qui vient.

Résultats

Évolution des précipitations : confirmation des simulations CMIP5

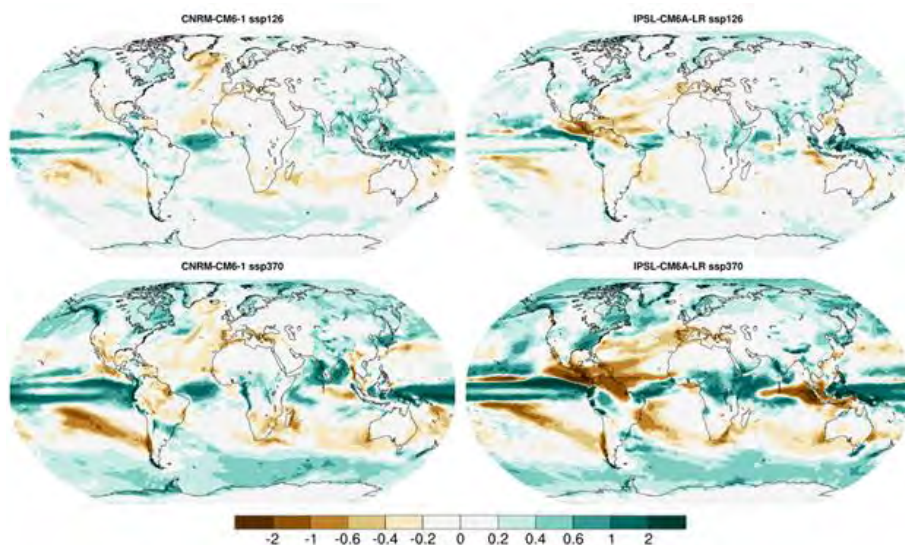
L'évolution des précipitations simulée par les deux modèles français est comparable en intensité et en terme de structure géographique à celle présentée dans le 5^e rapport du GIEC, issue de la moyenne des simulations CMIP5.

Pour un même modèle, la répartition géographique des changements est similaire pour les deux scénarios représentés dans la figure 12 ; l'intensité de ces changements est toutefois d'autant plus marquée que le scénario considéré implique des émissions de gaz à effet de serre élevées.

Dans les deux modèles, les précipitations augmentent dans une grande partie du Pacifique tropical, sur les mers australes et dans de nombreuses régions des moyennes à hautes latitudes de l'hémisphère nord. Comme dans les générations précédentes de modèles, la région méditerranéenne s'assèche, de même que de nombreuses régions semi-arides.

Les modèles présentent des différences fortes dans certaines parties du globe, comme les Amériques. On note aussi que le modèle de l'IPSL tend à simuler des évolutions plus marquées que celui de CNRM-CM6-1, à la fois dans les régions qui s'assèchent et dans celles qui voient les précipitations augmenter.

Figure 12. Changements de cumul annuel de précipitations (en millimètres par jour) simulés par CNRM-CM6 (à gauche) et le modèle de l'IPSL (à droite) entre 1981-2010 et 2071-2100 pour les scénarios SSP1 2,6 (en haut) et SSP3 7,0 (en bas).



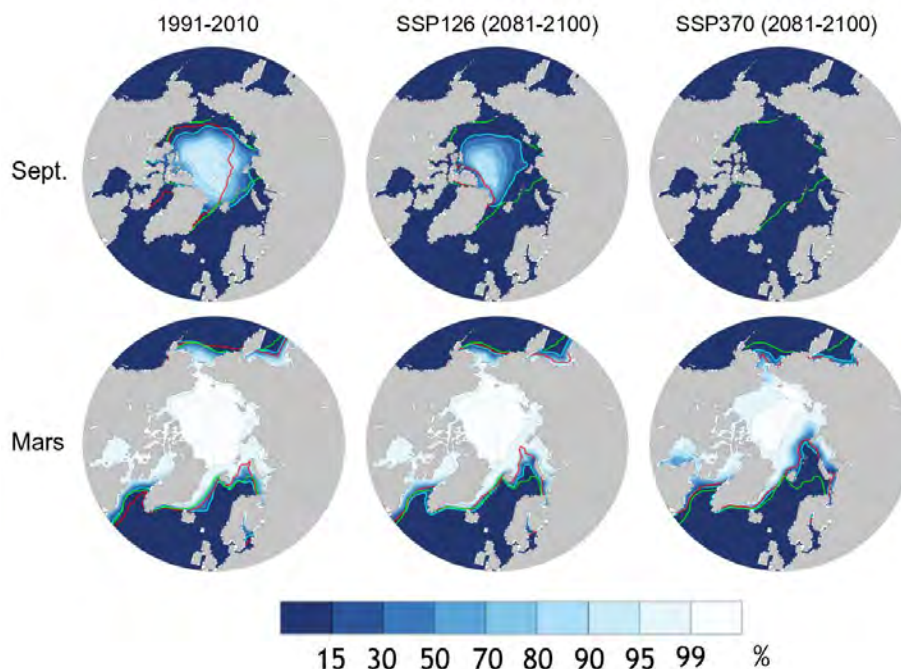
Résultats

Évolution de la banquise arctique : disparition estivale probable à la fin du siècle

En fin d'été, sous le scénario SSP3 7,0, les projections futures des deux modèles pour la fin du siècle convergent vers une disparition complète de la banquise de l'Arctique. En revanche, pour le scénario SSP1 2,6, le modèle CNRM-CM6 maintient des conditions proches du record de faible englacement actuellement détenu par septembre 2012, tandis que celui de l'IPSL simule une quasi-disparition des glaces marines.

En fin d'hiver, la banquise simulée par les deux modèles reste relativement étendue mais n'atteint que quelques dizaines de centimètres d'épaisseur contre 1 à 2 m actuellement. Elle recule dans le secteur Pacifique, et disparaît complètement en mer de Barents, au nord de la Scandinavie, qui perd ainsi son caractère de mer polaire.

Figure 13. Pourcentage de couverture de glace simulé par les 2 modèles en septembre (ligne du haut) et mars (bas) pour 1991-2010 (colonne de gauche), et pour 2081-2100 (SSP1 2,6 au milieu et SSP3 7,0 à droite). Contours rouge et cyan : limite des glaces simulée respectivement par le modèle de l'IPSL et par CNRM-CM6. Contour vert : reconstructions à partir d'observations issues du modèle Piomas pour la période 1991-2010. Dégradés bleu-blanc : couverture de glace simulée par CNRM-CM6.



© D. Salas y Mélia, CNRM

Résultats Premières modélisations régionales détaillées

Les modèles de grande échelle tels que ceux qui participent à CMIP6 ne peuvent pas représenter certains phénomènes d'échelle plus fine comme les cyclones, les pluies intenses méditerranéennes ou encore les îlots de chaleur urbains. C'est ainsi que plusieurs simulations passées et futures réalisées pour CMIP6 avec CNRM-ESM2 ont été « zoomées » par le modèle de climat Aladin à haute résolution (12 km) du CNRM, afin d'obtenir des informations complémentaires sur l'Europe et l'océan Indien (dont la Réunion et Mayotte). D'autres simulations de ce type seront réalisées ultérieurement sur les Antilles, la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie.

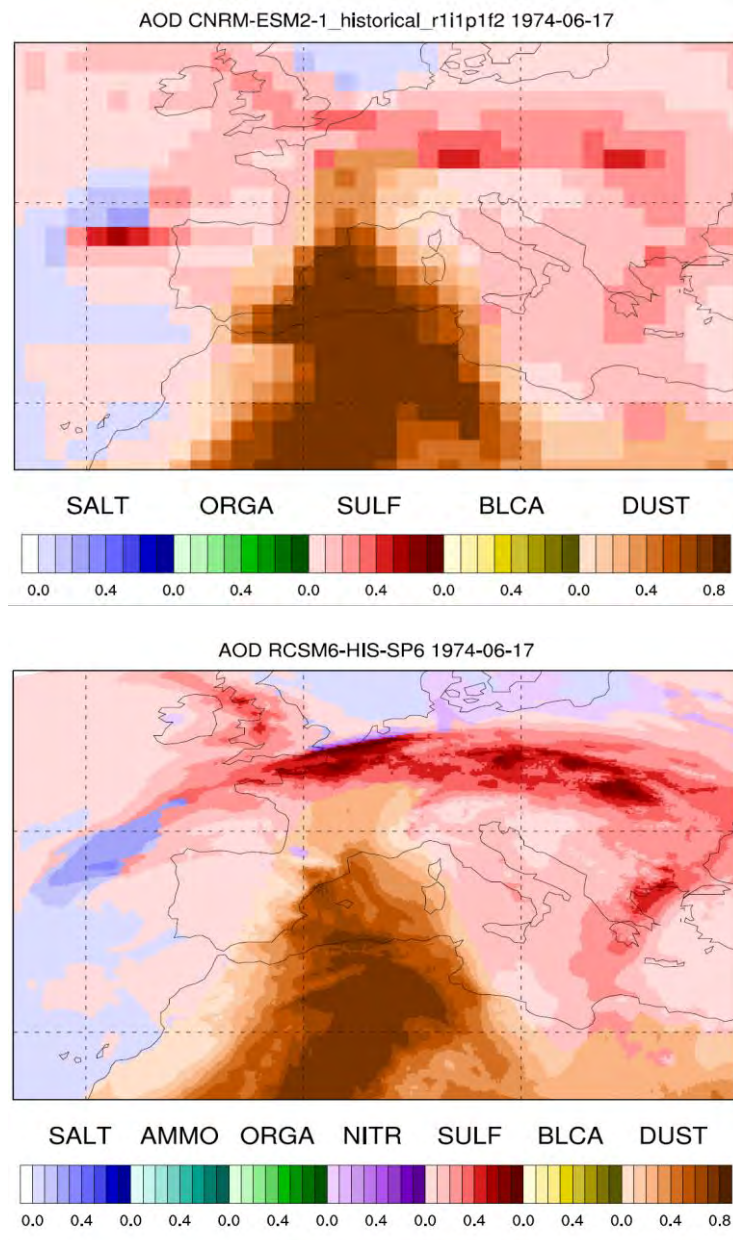
La représentation des aérosols atmosphériques

Les simulations réalisées sur l'Europe prennent en compte les aérosols atmosphériques, particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère, dont l'impact sur le climat de certaines régions est significatif. Contrairement aux gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone ou le méthane, leur concentration varie très fortement d'une région du globe à une autre. Ils altèrent la transparence de l'atmosphère et modulent donc le rayonnement solaire, avec des implications notamment sur la production d'énergie photovoltaïque. Certains d'entre eux modifient les propriétés du manteau neigeux, des nuages et des précipitations. Dans leur globalité, ils contribuent à refroidir légèrement le climat de la planète, mais certains types d'aérosols peuvent contribuer à un léger réchauffement. Par souci de simplification, ils sont fixés dans des modèles de climat tels que CNRM-CM6, mais peuvent être calculés au sein de modèles plus complexes comme le système Terre CNRM-ESM2. Ce modèle, d'une résolution d'environ 150 km, traite cinq types d'aérosols :

- les sels marins, qui sont émis par les océans ;
- les suies qui résultent notamment des feux de forêt naturels ou d'origine humaine ;
- les poussières désertiques ;
- les sulfates, dus notamment aux éruptions volcaniques, au plancton marin et aux activités humaines ;
- les aérosols organiques, qui peuvent être le résultat de processus naturels ou anthropiques.

Figure 14. Extrait d'une simulation régionale sur l'Europe montrant l'intrusion de poussières désertiques (en marron) provenant du Sahara, une pollution aux sulfates allant des îles Britanniques à l'est de l'Europe (en rouge), et la présence de sels marins (en bleu) sur le proche Atlantique et en mer du Nord. En haut, simulation avec CNRM-ESM2 ; en bas, régionalisation avec Aladin-12 km pour la même journée. Les valeurs élevées représentent une altération forte de la transparence de l'atmosphère par les aérosols.

© P. Nabat, CNRM

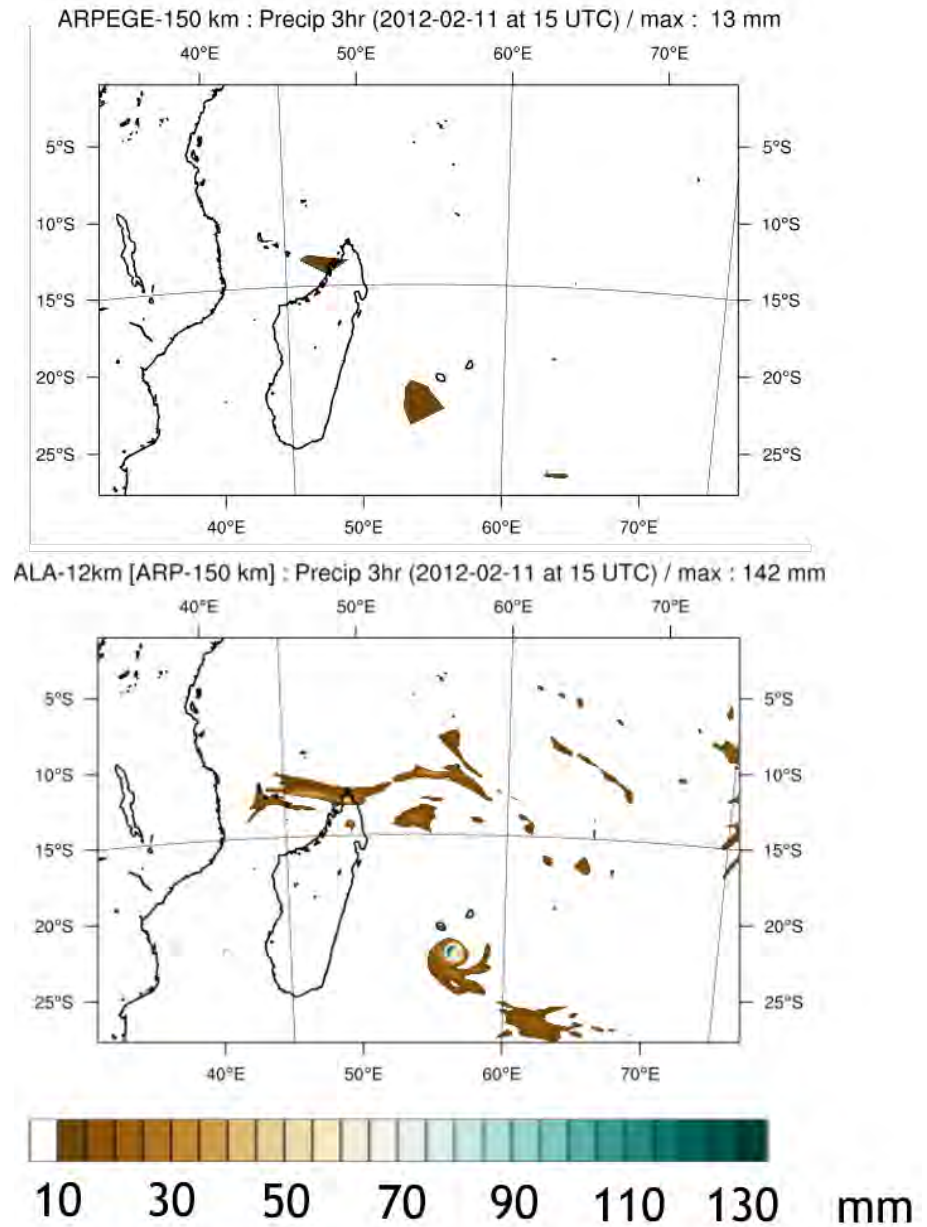


Premières simulations régionales de l'océan Indien

Des simulations régionales passées et futures ont également été menées sur l'océan Indien avec le modèle à échelle fine Aladin. Les premiers résultats montrent qu'un tel modèle permet de représenter la chute de pression et les vents forts associés aux cyclones, ainsi que les précipitations intenses (figure 15). Ces simulations restent à analyser en détail, afin notamment de préciser l'évolution des caractéristiques des cyclones (fréquence, pression, vent, précipitations) dans les scénarios futurs, et plus généralement le changement climatique à la Réunion et Mayotte.

Figure 15. Passage d'un cyclone au large de l'île de la Réunion dans une simulation historique. Les figures du haut et du bas représentent le cumul des précipitations sur 3h simulé respectivement par CNRM-ESM2 et la simulation régionale Aladin-12 km.

© M.-D. Leroux, Météo-France



Ces possibilités de « zoom » sont un premier pas vers des projections régionales en termes de fréquence de cyclones ou de précipitations extrêmes.

Résultats

Un degré de confiance plus élevé pour cette nouvelle génération de modèles

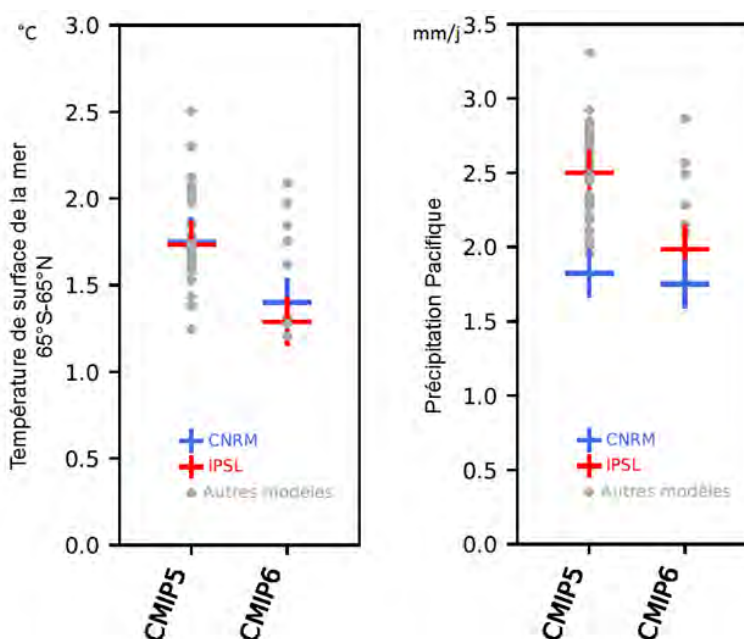
Les modèles de climat étant des représentations imparfaites de la réalité, il est légitime et même indispensable de se poser la question du degré de confiance qu'on peut leur accorder. Cette question est d'autant plus pertinente que la réponse des modèles à des facteurs tels que l'augmentation des gaz à effet de serre a été modifiée entre les générations "CMIP5" et "CMIP6", pour le modèle de l'IPSL et CNRM-CM6, mais aussi pour un certain nombre d'autres modèles étrangers⁴. Plusieurs éléments permettent d'affirmer que les modèles de climat de l'IPSL et du CNRM-Cerfacs se sont améliorés.

1/ Les modèles deviennent de plus en plus réalistes quant à leur représentation des processus physiques importants pour le climat (échanges entre la surface et l'atmosphère, nuages, convection, effets de la dynamique océanique de petite échelle, glace de mer, hydrologie, etc). La **résolution** des modèles a augmenté, ce qui permet de mieux résoudre certains aspects de la dynamique de l'océan et de l'atmosphère.

2/ Les premières analyses montrent que les modèles français progressent de manière significative quant à leur capacité à représenter les caractéristiques observées du climat actuel, en particulier les structures spatiales des températures, des nuages, des précipitations, des vents, des courants marins, de la glace de mer, de la salinité, etc. Cela est mesuré à l'aide d'indicateurs dont on peut suivre l'évolution pour les versions successives des modèles (figure 16).

Figure 16. Deux exemples d'indicateurs montrant la capacité des modèles à reproduire les structures à grande échelle des températures de surface de l'océan (à gauche) et des pluies au-dessus du Pacifique (à droite).

La différence quadratique moyenne entre variables simulées et variables observées est l'une des mesures utilisées pour quantifier les erreurs des modèles. Plus l'erreur est faible, meilleur est le modèle. On voit la progression générale des modèles depuis ceux de la génération CMIP5 à ceux de la génération CMIP6 (en gris), et en particulier du modèle de l'IPSL (en rouge) et de CNRM-CM6 (en bleu).



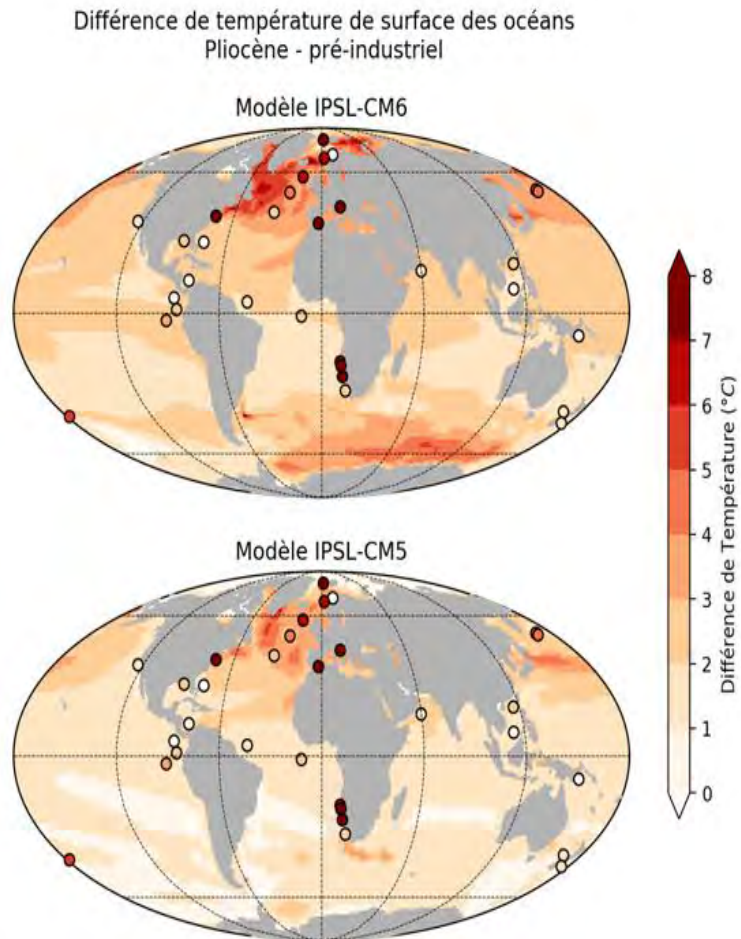
⁴ www.carbonbrief.org/guest-post-why-results-from-the-next-generation-of-climate-models-matter

3/ La simulation de la période historique récente (1850-2018), comparée à l'évolution observée du climat, constitue un autre test "grandeur nature" pour les modèles de climat. Ce test est néanmoins compliqué compte tenu des incertitudes concernant l'effet refroidissant des aérosols sur cette période et la composante chaotique du climat sur les échelles de temps allant jusqu'à la décennie. Concernant ce deuxième point, les chercheurs ont pu effectuer un grand nombre de simulations historiques qui ne diffèrent que par leurs conditions initiales en 1850 (l'état exact de l'océan et de l'atmosphère à l'époque n'étant malheureusement pas connu). Les deux modèles de climat français simulent de manière convaincante non seulement le réchauffement observé mais aussi d'autres caractéristiques du climat du 20^e siècle comme l'évolution de la glace de mer.

4/ Le volet « paléoclimat » de CMIP6 offre aussi des tests supplémentaires pour les modèles. Plusieurs périodes dans le passé permettent d'explorer la façon dont le climat répond à des perturbations du même ordre de grandeur que celles envisagées dans le futur (des conditions qui n'ont pas été rencontrées au cours des derniers siècles). Dans ce cadre, les simulations du Pliocène moyen, il y a 3 millions d'années, s'intéressent à la dernière période de l'histoire de la Terre où la teneur en CO₂ dans l'atmosphère atteignait la valeur de 400 ppm, tout comme aujourd'hui. La précédente génération de modèles reproduisait les grandes caractéristiques de ce climat mais sous-estimait l'amplification du réchauffement des moyennes et hautes latitudes. Cette sous-estimation est illustrée dans la figure 17 par l'écart entre les températures de surface de la mer simulées par le modèle de l'IPSL dans sa version CMIP5, et celles déduites des sédiments marins. Les nouveaux résultats sont en meilleur accord avec les reconstructions dans l'océan Atlantique Nord, suggérant que **la sensibilité climatique accrue du nouveau modèle de l'IPSL permet de reproduire un réchauffement en meilleur accord avec les données.** Des conclusions similaires émanent des premiers résultats des simulations de l'Holocène moyen, il y a 6000 ans, avec une amplification du cycle saisonnier dans l'hémisphère nord.

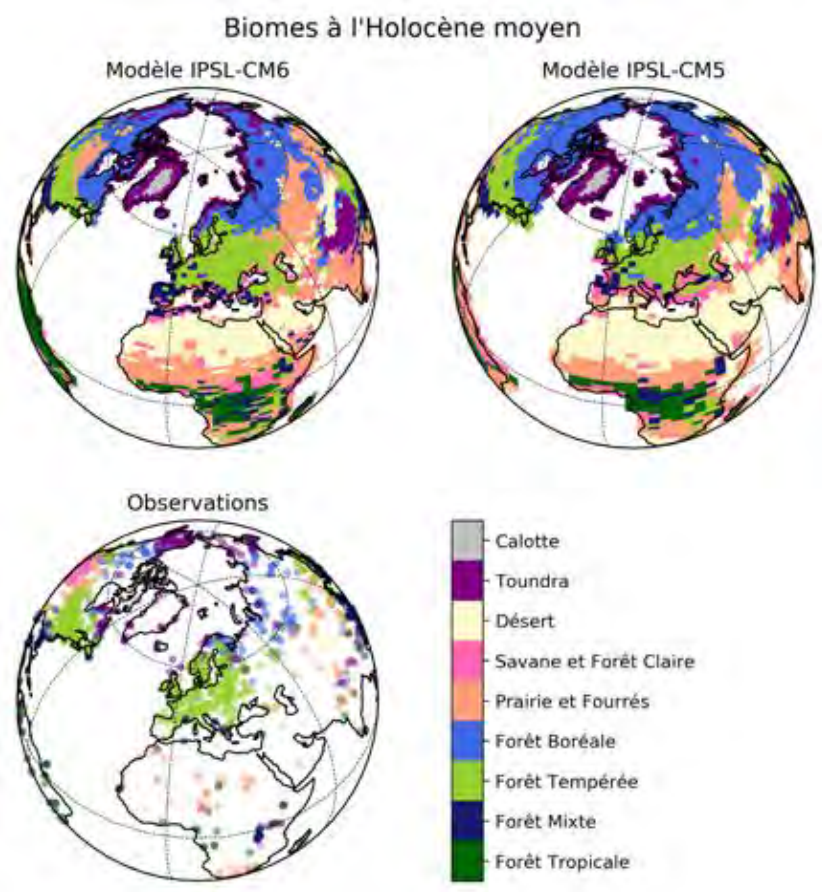
Figure 17. Différence entre la température de surface de la mer au Pliocène moyen, il y a 3.3 Ma, et la température avant l'ère industrielle.

Le fond coloré représente les résultats des simulations de cette période avec les versions IPSL-CM6A-LR (en haut) et IPSL-CM5A-LR (en bas) du modèle de l'IPSL. Les ronds de couleurs représentent les reconstructions réalisées à partir des sédiments marins. Plus la couleur tend vers le rouge, plus les températures étaient chaudes au Pliocène par rapport à la période préindustrielle.



5/ Ces simulations attestent également d'une meilleure représentation des liens entre le climat et l'environnement. À titre d'exemple, les pollens indiquent qu'il y a 6000 ans (Holocène moyen), la forêt s'étendait plus au nord en Europe et le Sahara était en partie couvert de végétation (figure 18). Sur ces deux aspects, le nouveau modèle de l'IPSL reproduit des types de végétation en meilleur accord avec les pollens. Ces résultats donnent confiance dans l'utilisation des résultats de CMIP6 pour étudier des interactions entre le climat, l'hydrologie, le cycle du carbone et le couvert végétal, ou pour alimenter les études multidisciplinaires de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes.

Figure 18. Comparaison des grands types de végétation simulés avec les modèles de l'IPSL utilisés pour CMIP6 (IPSL-CM6) et CMIP5 (IPSL-CM5) avec les reconstructions de végétation issues des données de pollen.



Malgré ces améliorations avérées dans la capacité des modèles à simuler différents types de climat, il n'est pas possible de conclure de manière définitive sur le degré de fiabilité de ces nouveaux résultats qui montrent une réponse accrue des nouveaux modèles à la concentration du CO₂. Cette caractéristique des modèles reste en effet difficile à contraindre précisément à partir des observations disponibles. Nul doute que cette question va focaliser beaucoup d'analyses autour des simulations CMIP6 dans les années qui viennent.

Une ressource pour les « services climatiques »

Les simulations CMIP6, représentatives d'un « état de l'art », sont documentées, publiques et en libre accès. Leurs analyses renforceront notre compréhension des changements climatiques à l'échelle globale et régionale, et les publications issues de ces analyses serviront de référence pour les rapports du GIEC à venir. Ces analyses sont facilitées en France par la mise en place d'une plateforme informatique d'analyse commune ouverte à l'ensemble de la communauté scientifique, dans le cadre de l'infrastructure Climeri-France.

Ces simulations offrent un cadre d'étude devenu indispensable pour aborder les questions d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Cependant, le volume de données et la complexité des modèles et des expériences rendent la base de données CMIP6 difficilement exploitable par des non-spécialistes. Des relais se mettent en place via les « services climatiques », qui ont pour vocation d'offrir des informations climatiques en appui à la décision. Il s'agit de passer de la science à l'action dans le but de faire face au changement climatique. Pour ce faire, un ensemble de variables climatiques, de méthodes et de résultats sont mis à disposition sous une forme exploitable pour d'autres communautés ou différents secteurs d'activité (énergie, transport, agriculture...). A cet effet, les équipes françaises contribuant à CMIP6 s'impliquent notamment dans le service Copernicus Climate Change (C3S) au niveau européen ou le service Drias au niveau français. Ces services, pour le moment basés sur les résultats de CMIP5, intégreront progressivement les données issues de CMIP6.

En savoir plus : www.carbonbrief.org/guest-post-why-results-from-the-next-generation-of-climate-models-matter

Laboratoires impliqués

[Au sein de l'IPSL](#), Institut Pierre-Simon Laplace, qui regroupe neuf laboratoires franciliens de recherche en sciences du climat :

LSCE - Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA/UVSQ)
www.lsce.ipsl.fr

LMD - Laboratoire de météorologie dynamique (CNRS/ENS Paris/École polytechnique/Sorbonne Université)
www.lmd.jussieu.fr

LOCEAN - Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques (CNRS/IRD/MNHN/Sorbonne Université)
www.locean-ipsl.upmc.fr

LATMOS - Laboratoire « atmosphères, milieux, observations spatiales » (CNRS/Sorbonne Université/UVSQ)
www.latmos.ipsl.fr

METIS - Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols (CNRS/EPHE/Sorbonne Université)
www.metis.upmc.fr

[Et au-delà :](#)

CNRM - Centre national de recherches météorologiques (CNRS/Météo-France)
www.umr-cnrm.fr

CECI - laboratoire Climat, environnement, couplages et incertitudes (CNRS/Cerfacs)
cerfacs.fr/umr-5318-climat-environnement-couplages-et-incertitudes-cec

IGE - Institut des géosciences de l'environnement (CNRS/Grenoble INP/IRD/Université Grenoble-Alpes)
www.ige-grenoble.fr

EPOC - Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux (CNRS/Université de Bordeaux)
www.epoc.u-bordeaux.fr

LEGOS - Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (CNRS/CNES/IRD/Université Toulouse III - Paul Sabatier)
www.legos.obs-mip.fr

LOPS - Laboratoire d'océanographie physique et spatiale (CNRS/Ifremer/IRD/Université de Bretagne occidentale)
www.umr-lops.fr

Organismes impliqués

