



HAL
open science

Reconstitutions paléoclimatiques, modèles et projections climatiques

Jeanne Gherardi, Jérôme Servonnat, Pascale Braconnot, Sophie Laval-Szopa

► To cite this version:

Jeanne Gherardi, Jérôme Servonnat, Pascale Braconnot, Sophie Laval-Szopa. Reconstitutions paléoclimatiques, modèles et projections climatiques. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 23p, 2021, 978-2-7598-2662-9. hal-03480240

HAL Id: hal-03480240

<https://universite-paris-saclay.hal.science/hal-03480240>

Submitted on 14 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Chapitre 9

Reconstitutions paléoclimatiques, modèles et projections climatiques

Ce chapitre est consacré aux modèles climatiques, à la façon dont ils sont élaborés et aux projections du [climat](#) futur qu'ils permettent de faire. Comme les modèles météorologiques, qui prévoient le temps pour demain, les modèles climatiques sont des modèles complexes qui reposent sur les équations de la thermodynamique des fluides. À la différence des modèles météorologiques, cependant, les modèles climatiques ne sont pas utilisés pour dire ce qu'il va se passer à une date donnée, mais nous fournissent des évolutions plausibles du [climat](#) sur des échelles de temps de plusieurs années, voire des dizaines d'années. Il n'existe d'ailleurs pas un modèle, mais des modèles qu'on utilise avec différents [scénarios](#) d'émissions de [gaz à effet de serre](#), qui résultent eux-mêmes de différents choix de société. La validation des modèles se fait en confrontant leurs résultats aux observations *in situ* et spatiales ainsi qu'à la connaissance des [climats](#) passés. Nous verrons que grâce à eux, il est possible d'estimer la quantité de CO₂ restant à émettre pour ne pas dépasser des niveaux critiques de température moyenne à la surface du globe. Le chapitre se termine par une brève présentation du [GIEC](#) qui est chargé d'évaluer la science en lien avec le changement climatique à l'échelle internationale.

9.1. Reconstitutions paléoclimatiques de la variabilité climatique naturelle – J. Gherardi

9.1.1. Rappels sur le fonctionnement du système climatique aux différentes échelles de temps

Nous avons vu que le **climat** de notre planète change à toutes les échelles, de temps et d'espace. Rappelons ici brièvement les principaux facteurs non **anthropiques** qui gouvernent l'évolution du **système climatique** de la Terre :

- le soleil lui-même, moteur du fonctionnement du **système climatique**, source d'énergie (voir section 7.1),
- l'albédo qui est le pouvoir réfléchissant d'une surface (voir section 7.2),
- l'effet de serre de son **atmosphère**, lié en particulier à la vapeur d'eau ainsi qu'à d'autres gaz présents en quantités moindres mais d'une efficacité de réchauffement très importante (le CO₂, le méthane...) (voir section 7.2),
- la **tectonique des plaques**, c'est-à-dire la dérive des continents en lien avec les mouvements profonds de la terre, sur les échelles de temps géologiques (voir section 1.1).

Les forçages induits par les variations de ces différents facteurs sur les composantes du **système climatique**, l'océan, la glace, l'**atmosphère**, les surfaces terrestres et la végétation (Fig. 9.1) induisent des changements climatiques naturels qui peuvent être répartis en trois temps géologiques, comme on a pu l'apprendre dans la première partie de l'ouvrage (voir sections 1.1 et 1.2).

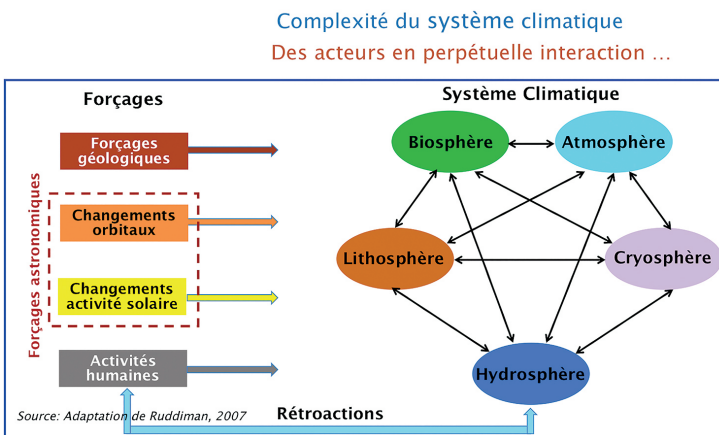


Figure 9.1: Diagramme montrant la complexité du **système climatique**. Avec la courtoisie de W.F. Ruddiman [1].

Nous ne rentrerons donc pas dans les détails. Rappelons-nous d'abord que le milliard d'années est l'échelle de temps sur laquelle les variations climatiques naturelles sont liées à la variation de luminosité du soleil (voir section 1.1). Rappelons ensuite que la deuxième échelle de temps, qui se chiffre en dizaines de millions d'années, est contrôlée par la **tectonique des plaques**, laquelle influence non seulement la teneur en CO₂ de l'**atmosphère** *via* l'ouverture ou la fermeture de bassins océaniques, le soulèvement de chaînes de montagne et leur **érosion**, mais aussi le transport et la répartition de la quantité de chaleur *via* les enveloppes fluides que sont l'océan et l'**atmosphère** (voir section 7.1).

Enfin, nous avons vu que la dernière échelle de temps, qui s'étend de la dizaine à la centaine de milliers d'années, est directement liée à la quantité d'**énergie** solaire reçue par la Terre, celle-ci variant en fonction de trois **paramètres orbitaux** qui caractérisent les variations de l'orbite terrestre autour du soleil (voir Fig. 1.4, chapitre 1)⁷⁶ :

- l'excentricité qui définit la forme de la trajectoire de la Terre autour du soleil, laquelle varie entre une orbite quasi circulaire et une orbite elliptique en oscillant de l'une à l'autre sur deux périodes principales de 413 000 et 100 000 ans respectivement;
- l'obliquité (l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre par rapport à la perpendiculaire au plan de l'orbite) qui oscille entre 22° et 24,5° et amplifie ou réduit les saisons, notamment aux hautes latitudes, l'oscillation se faisant sur une période de 41 000 ans;
- la précession des équinoxes, qui résulte des changements de la direction de l'axe de rotation terrestre par rapport aux étoiles et modifie la façon dont la Terre se positionne sur son orbite aux moments où interviennent les changements de saison. Cette modification se produit sur une période d'environ 25 700 ans.

De façon résumée, les variations d'excentricité modulent le bilan d'**énergie** reçue sur une année à l'échelle du globe alors que l'obliquité et la précession ne modifient que la répartition d'**énergie** en latitude et la saisonnalité. Les variations combinées de ces trois paramètres entraînent donc des variations importantes d'ensoleillement durant l'été à 60°N. L'astronome serbe, Milankovitch, a établi en 1940 la théorie selon laquelle ces variations sont à l'origine des cycles glaciaires et interglaciaires qui ont marqué le quaternaire. Le quaternaire est la période géologique dans laquelle nous nous trouvons depuis 2,5 millions d'années.

Mais comment a-t-il été possible de reconstituer les variations du **climat** sur ces périodes de temps si longues et lointaines ? Comment mettre en évidence ces trois

76. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/milankovitch.xml>

rythmes climatiques naturels? À défaut d'observations, on s'en remet à l'étude des archives climatiques qui, comme nous l'avons vu dans la section 7.5, permettent de reconstituer les variations passées du **climat** de manière indirecte.

9.1.2. Les archives climatiques et leur importance pour les modèles climatiques

Reconstituer les variations du **climat** ancien passe donc par la reconstitution des paramètres climatiques et de leur évolution dans le temps. Ces paramètres sont différents selon la composante du **système climatique** que l'on va étudier. Cela peut être la température ou les précipitations, si on considère des archives continentales, mais cela peut aussi être la **salinité**, l'acidité ou la température de l'océan. Une approche indirecte est évidemment nécessaire, car on ne peut pas « mesurer » la température de la surface de l'océan il y a 25 000 ans, par exemple. On parle donc d'indicateurs climatiques ou de « *proxies* » climatiques que les paléo-climatologues vont dénicher dans des archives très variées^{77 78}.

L'histoire climatique se retrouve essentiellement dans quatre types d'archives différentes : les sédiments, marins, lacustres ou terrestres, la glace, les coraux et les arbres.

Sur les continents, le **loëss**, par exemple, est un indicateur très répandu en Europe et en Amérique du Nord. C'est un empilement de particules très fines transportées par le vent, qui se forme surtout pendant les phases froides et sèches des périodes glaciaires et qui enregistre ainsi l'alternance des phases glaciaire-interglaciaire.

Les pollens se conservent également très longtemps dans les sédiments lacustres ou dans les tourbières. La distribution et la quantité des différents pollens présents sur un site permettent d'évaluer les évolutions de température et de précipitation sur ce site, à la condition de connaître la distribution actuelle de ces mêmes pollens.

Pour reconstituer les **climats** anciens, on utilise donc ces *proxies* climatiques pour remonter à la température de l'eau ou de l'**atmosphère**, à la **salinité** des eaux et leur acidité, à l'intensité des précipitations, etc.

Que ce soit à partir de marqueurs vivants ou de facteurs physiques, les reconstitutions doivent être soigneusement validées et datées pour nous éclairer précisément sur les changements climatiques passés. Il est donc indispensable de croiser les archives et comparer les résultats continentaux et océaniques pour que notre vision du **système climatique** et de son évolution soit complète.

C'est ainsi que l'analyse des sédiments marins a confirmé la théorie de Milankovitch. Plus spécifiquement, c'est l'analyse des squelettes calcaires des microorganismes,

77. <https://www.climate.gov/maps-data/primer/past-climate>

78. <https://books.openedition.org/septentrion/52810?lang=fr>

les foraminifères vivant à la surface des océans que l'on retrouve dans les sédiments marins (Fig. 9.2), qui a permis de reconstituer la température de surface des océans et son évolution dans le passé.



Figure 9.2: Illustration montrant la diversité des espèces de foraminifères présentes dans les océans. ©A.C.991d sous licence Creative Commons.

La température de surface des océans est, en effet, un paramètre essentiel du climat, car elle contrôle les échanges d'eau et de chaleur avec l'atmosphère, et elle module aussi la solubilité des gaz et leur taux d'échange avec l'atmosphère. C'est aussi le paramètre le plus largement reconstruit à partir de différents indicateurs.

Les foraminifères sont ainsi des témoins climatiques précieux et précis. La reconstitution de l'évolution de température passe soit par la quantification de l'abondance d'une espèce par rapport à une autre, soit par l'analyse de la composition des squelettes. Le rapport magnésium sur calcium dans le squelette constitue un véritable paléothermomètre. Lors de l'élaboration de leur coquille calcaire, les foraminifères vont, en effet, incorporer du magnésium et du calcium dans un rapport qui est très précisément lié à la température (Fig. 9.3). Des calibrations sont établies selon les espèces pour être le plus précis possible.

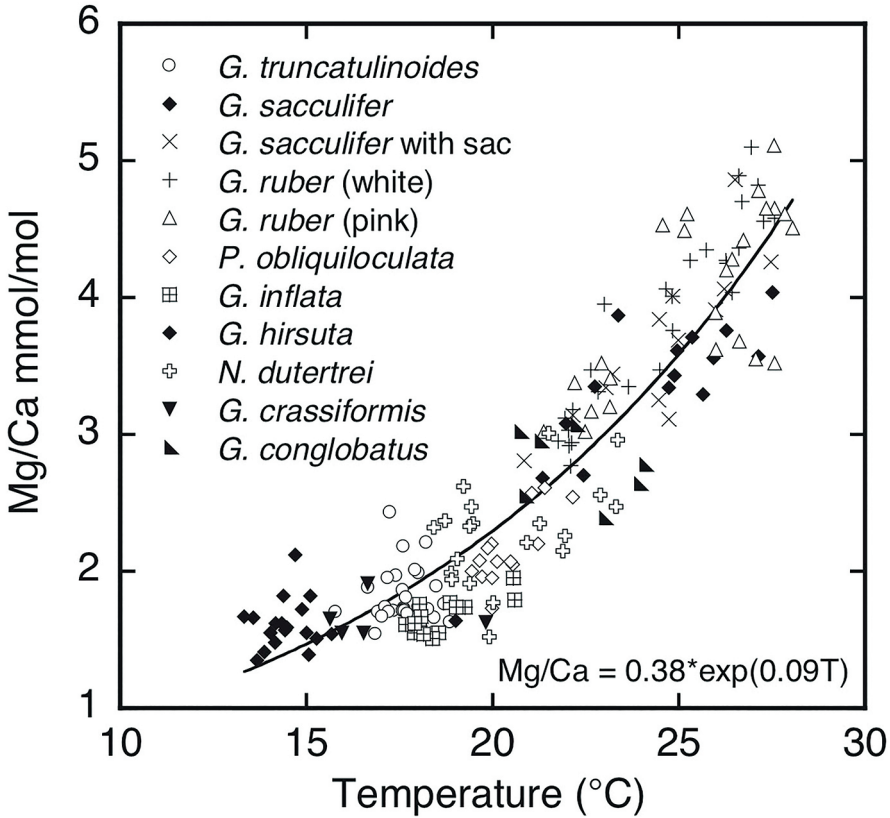


Figure 9.3: Évolution du rapport magnésium sur calcium en fonction de la température pour différentes espèces de foraminifères. Source : Figure 2 de Barker *et al.* (2005) [2].

On utilise aussi le thermomètre isotopique, c'est-à-dire l'analyse des proportions des différents isotopes de l'oxygène contenu dans la calcite des squelettes des foraminifères. Ces proportions dépendent à la fois de la température de l'eau de mer et de sa composition isotopique. L'utilisation combinée et comparée de ces différents *proxies* a permis de constituer des archives climatiques précises. Grâce à elles, on a ainsi pu démontrer que les variations des [paramètres orbitaux](#) étaient bien à l'origine des alternances entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires (Fig. 9.4).

L'analyse des cycles glaciaires/interglaciaires *via* les archives climatiques a mis en évidence les interactions entre les différents forçages climatiques. Ainsi, si comme on l'a vu, les mouvements lents de la Terre autour du soleil sont le moteur des cycles glaciaires, la façon dont ces cycles sont marqués dépend aussi des modifications de la teneur atmosphérique en [gaz à effet de serre](#). L'analyse des bulles d'air dans les glaces a, en effet, mis en évidence des variations de la concentration des [gaz à effet de serre](#) au cours des cycles glaciaires et le fait qu'elles amplifient les contrastes entre période glaciaire et période interglaciaire (courbes bleue et rouge de la Fig. 9.4).

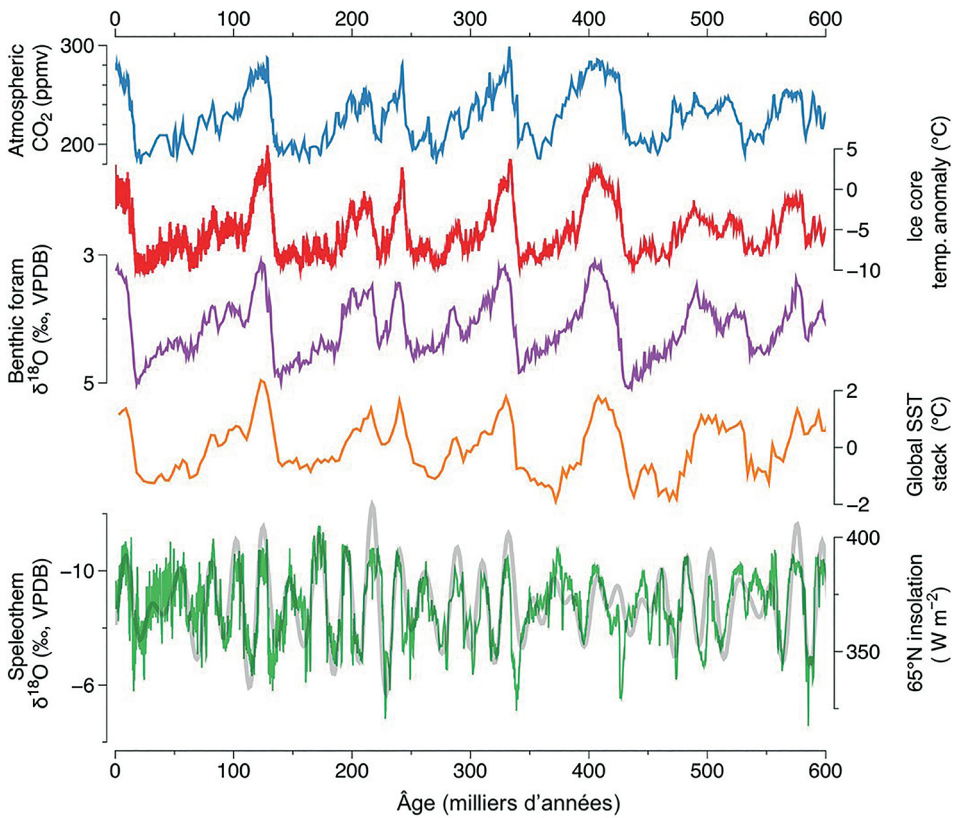


Figure 9.4 : Combinaison de différents *proxies* pour l'étude des climats passés. En bleu : concentration de CO₂ atmosphérique mesuré à partir de calottes de glace en Antarctique; en rouge : estimation de l'anomalie de la température de surface en Antarctique; en violet : proportion de l'isotope ¹⁸O mesuré dans les foraminifères benthiques; en jaune : estimation de la température moyenne de surface des océans à partir de multiples enregistrements, dont le rapport Mg/Ca; en vert : évolution de la proportion de l'isotope ¹⁸O dans les spéléothèmes (concrétion calcaire des grottes) mesurée en Chine; en gris : niveaux d'ensoleillement calculés à 65°N à partir des paramètres orbitaux. Source : Figure 1 de G. Liu *et al.* [3].

Les glaces de l'Antarctique permettent aujourd'hui de reconstituer l'évolution du CO₂ et du méthane atmosphérique jusqu'à 800 000 ans. Les chercheurs s'efforcent désormais de remonter jusqu'à 1,2 millions d'années, ce qui permettrait d'étudier la transition entre une alternance de cycles glaciaires/interglaciaires rythmée à 100 000 ans, donc contrôlée par l'excentricité et qui caractérise le dernier million d'années, et des oscillations glaciaires/interglaciaires sur une période plus courte de 40 000 ans en phase avec les changements d'obliquité.

En conclusion, les archives climatiques, par leur diversité, permettent de remonter en confiance aux évolutions climatiques du passé et ce, sur des temps de plus en plus reculés. Les archives climatiques fournissent donc un banc d'essai indispensable pour tester la capacité des modèles du climat à représenter correctement ces évolutions climatiques du passé, en particulier dans les périodes de transition.

9.2. À quoi sert un modèle climatique ? – J. Servonnat

9.2.1. Présentation des modèles climatiques

Dans cette partie, nous allons donner les éléments pour comprendre en quoi consistent les modèles climatiques et comment ils sont utilisés. Prenons en exemple une question qui concerne la société : comment va évoluer le **climat** en réponse à une augmentation de la concentration de **gaz à effet de serre** ? ou comment va évoluer la température du globe ou un phénomène particulier tel que les **vagues de chaleur** en Europe ? Les modèles climatiques peuvent nous aider à répondre à ces questions.

L'idée avec un modèle climatique est de se créer une planète Terre virtuelle dont le fonctionnement repose sur les principes fondamentaux de la physique du **climat** et de tous ses compartiments introduits dans la section 7.1 : l'**atmosphère**, l'océan, les surfaces continentales, la glace, les grands cycles biogéochimiques, dont celui du carbone, et leurs interactions mutuelles. Les modèles d'**atmosphère** et d'océan, par exemple, reposent sur les équations de la dynamique et de la thermodynamique des fluides de Navier Stokes, appliquées aux fluides géophysiques. Toutes ces équations sont résolues à différents temps et pour plusieurs milliers de points sur la Terre.

Dans ces modèles, il est possible de modifier, comme on le souhaite, des forçages climatiques, comme par exemple, imposer une augmentation de la concentration en **gaz à effet de serre** ou des changements de **paramètres orbitaux**. Au cours de la simulation, le modèle calcule l'évolution dans le temps des grandeurs physiques, biologiques et chimiques liées au **climat** (précipitations, températures, courants océaniques, vents, etc.) en réponse à ces forçages. Les calculs sont réalisés en tous points des grilles qui découpent en trois dimensions (longitudes, latitudes, altitudes/profondeurs), l'**atmosphère**, l'océan, les surfaces continentales et la glace de mer (Fig. 9.5).

Ce qu'il faut donc retenir à ce stade, c'est que ces modèles sont construits sur des lois physiques fondamentales. Pour faire simple, un modèle climatique, c'est une planète Terre virtuelle avec laquelle on peut faire des expériences comme, par exemple, faire varier les concentrations de **gaz à effet de serre** ou la quantité d'**énergie** qu'on reçoit du soleil ou encore introduire des éruptions volcaniques, et ce, non seulement dans la gamme de changements actuels, mais aussi bien au-delà. Les résultats du modèle nous permettent alors de voir comment le **climat** réagit en conséquence.

Nous pouvons trouver des illustrations complémentaires de ce que sont les modèles climatiques à partir de vidéos en libre accès^{79 80}. Nous pouvons également nous faire une première idée de projections climatiques à partir d'un modèle numérique

79. https://www.youtube.com/watch?v=toCFqOGVs54&ab_channel=CSIRO

80. https://www.youtube.com/watch?v=FGB3mEIlms&t=159s&ab_channel=ERISPROJECT – Exemple de simulation numérique à partir d'un modèle climatique

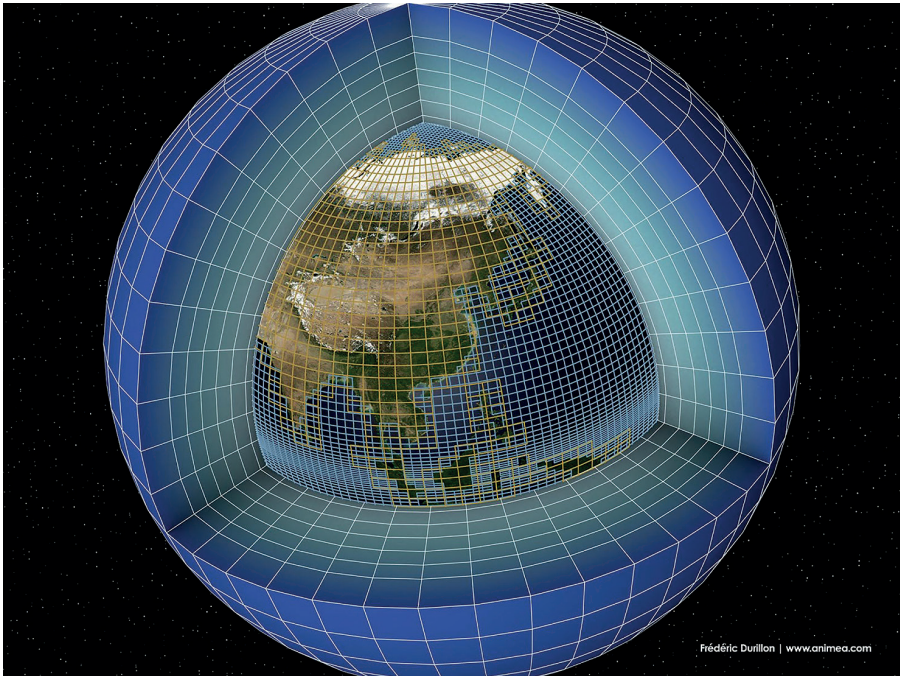


Figure 9.5 : Type de maillage terrestre utilisé dans les modèles climatiques (Source : Frédéric Durillon, www.animea.com - tous droits réservés). Notons que l'échelle de l'**atmosphère** est dilatée verticalement pour mieux voir sa structure en trois dimensions.

qui simule le contenu en vapeur d'eau au-dessus de l'Amérique du Nord, dans la période entre avril et juin 2100, en supposant qu'aucune mesure n'ait été prise pour diminuer les émissions de **gaz à effet de serre anthropiques** d'ici la fin du XXI^e siècle (**scénario** socio-économique RCM8.5)⁸¹. Les résultats du modèle sont comparés à la situation qui a été observée pour la même période entre avril et juin 2011 au-dessus de l'Amérique du Nord. Une autre simulation à partir d'un deuxième modèle compare l'accumulation des nuages dans l'ensemble de l'**atmosphère** en 2090 à celle de l'année 1990 en supposant toujours qu'aucune mesure n'aura été prise pour diminuer les émissions de **gaz à effet de serre anthropiques** dans le siècle en cours (**scénario** socio-économique RCP8.5)⁸².

Tous ces modèles numériques, qui sont appelés GCM (*Global Circulation Model*) ou ESM (*Earth System Model*), sont de véritables prouesses scientifiques et techniques, car ils sont le résultat de plusieurs décennies de développement par des centaines de scientifiques. Ce que contient un modèle climatique à un moment

81. <https://visgallery.ucar.edu/water-vapor-content-of-the-current-and-future-climate-of-north-america/>

82. Illustration de la variabilité interne d'un modèle climatique : <https://visgallery.ucar.edu/present-and-future-climate-in-a-global-model/>

donné est une affaire de choix et de moyens techniques et humains. L'assemblage et le réglage d'un modèle est, en effet, extrêmement complexe, très coûteux en temps humain et en temps de calcul. À chacune des innombrables étapes de développement, les scientifiques ont à choisir parmi plusieurs options sur la base de critères scientifiques et techniques. Comme ils ne peuvent pas tout tester, les développeurs d'un modèle vont faire des choix, qui seront guidés par les sujets scientifiques dans leur domaine de spécialisation.

C'est pourquoi chaque groupe de **modélisation** dans le Monde a développé un modèle qui est différent des autres. On n'a donc pas une, mais des planètes Terre artificielles, très similaires sur les aspects généraux du climat, mais montrant des différences, notamment dans leurs réponses aux **gaz à effet de serre**. Il existe des comparaisons entre ces modèles, qui permettent de centraliser les résultats de simulation et de les rendre accessibles à tous. Les exercices de comparaison, qui incluent également les projections futures, constituent une part importante des éléments de preuve sur lesquels s'appuient les rapports du **GIEC**.

9.2.2. Variabilité interne et variabilité forcée de ces modèles

Le but va maintenant être de mieux comprendre ce que nous disent ces modèles. Et pour cela, nous allons introduire les notions de variabilité interne, et de variabilité forcée (**Fig. 9.6**). Nous allons illustrer ces concepts à partir d'exemples idéalisés. Faisons ensemble une simulation climatique d'une centaine d'années.

Si l'on n'impose aucun forçage (aucune perturbation externe, **Fig. 9.6a**), le modèle simule quand même des variations (**Fig. 9.6b**). C'est ce qu'on appelle la variabilité interne, qu'on peut aussi appeler variabilité intrinsèque du **système climatique**. Elle est le résultat des circulations de fluides au sein de l'**atmosphère** et de l'océan et, plus généralement, elle est le résultat des interactions entre toutes les composantes du **système climatique**. Le seul moteur de cette variabilité interne est le déséquilibre thermique engendré par le rayonnement solaire, la Terre recevant notamment plus d'**énergie** à l'équateur qu'aux pôles (voir section 7.1).

On peut se faire une idée de ce qu'est la variabilité interne à partir d'un modèle simplifié où une Terre en rotation, supposée sans continents et donc uniquement recouverte d'eau, est simplement soumise à un flux solaire variable selon la latitude⁸³. L'**atmosphère** initialement à l'équilibre se met en mouvement, des structures apparaissent et se déplacent au cours du temps. Le même type de comportement aurait été obtenu pour les autres compartiments du **système climatique** : l'océan, la glace de mer, et les surfaces continentales.

83. <https://visgallery.ucar.edu/water-vapor-content-of-the-current-and-future-climate-of-north-america/>

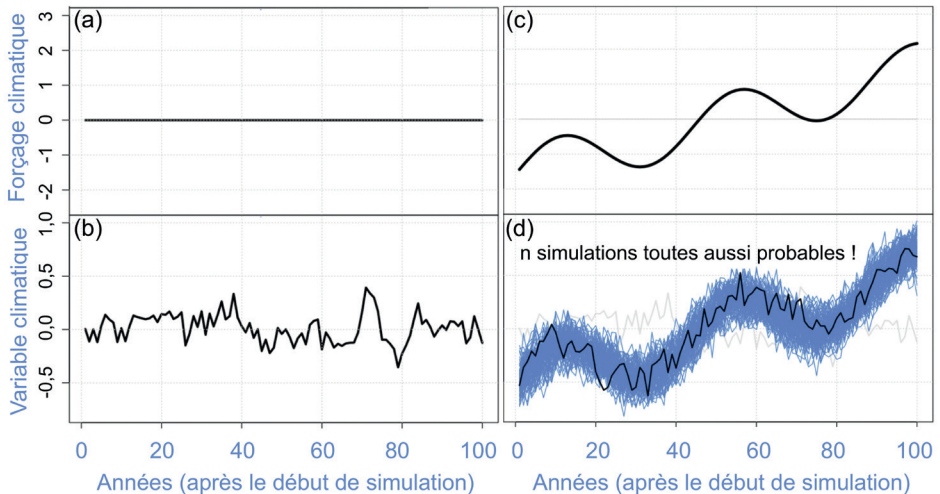


Figure 9.6 : Variabilité interne et variabilité forcée d'un modèle climatique. (a) Forçage constant (nul) imposé au modèle; (b) variabilité interne seule dans ce cas de forçage (ou d'absence de forçage); (c) **forçage radiatif** variable imposé au modèle; (d) courbe grise : résultat du modèle ne montrant que la variabilité interne (comme sur (b)) et courbe noire : résultat complet du modèle incluant la variabilité interne et la réponse au forçage. Enveloppe bleue : superposition des résultats pour n simulations différentes du modèle avec le même **forçage radiatif**. Source : Jérôme Servonnat.

La variabilité interne s'exprime à des échelles de temps qui vont du pas de temps du modèle, soit de quelques minutes pour les phénomènes atmosphériques à plusieurs centaines d'années pour la circulation océanique. Cette variabilité interne est par nature « chaotique » et de fait imprévisible.

Ajoutons maintenant un forçage idéalisé (Fig. 9.6c). Imaginons que ce signal représente des variations de la concentration de **gaz à effet de serre**. La simulation (Fig. 9.6d, courbe noire) fait toujours apparaître des oscillations aléatoires comme précédemment, mais ces oscillations sont maintenant modulées par les réponses du modèle au forçage qu'on lui fait subir. Le **climat** simulé par le modèle est la combinaison d'une variabilité forcée, due au forçage, et d'une variabilité interne qui, elle, est chaotique. Regardons d'abord la variabilité interne (Fig. 9.6d). Comme elle est chaotique, les éléments qui sont simulés, sont le fruit du hasard. Si nous changeons seulement un peu les conditions initiales du départ de la simulation, de l'ordre de l'incertitude incompressible sur cet état de départ, le modèle va simuler des événements différents, une histoire différente. Ceci n'est autre que le célèbre effet papillon. Si l'opération est répétée n fois, à chaque fois, nous obtiendrons une séquence d'événements légèrement différents, et toutes ces histoires sont toutes aussi probables les unes que les autres dans le monde du modèle (courbes bleues, Fig. 9.6d).

C'est pourquoi, on ne peut pas attendre de ces simulations qu'elles nous disent ce qu'il va se passer exactement à une date donnée. Étudier le climat, c'est étudier la distribution statistique du temps qu'il fait. Il en est de même pour une simulation

climatique. On privilégiera donc des analyses sur des périodes de plusieurs dizaines d'années, que ce soit pour mettre en évidence des différences de moyennes entre deux périodes ou, plus simplement, des tendances.

Considérons maintenant la variabilité forcée. Par définition, la variabilité forcée est la même d'une simulation à l'autre. On peut donc la caractériser, l'isoler en prenant en compte la moyenne de toutes les simulations. Cela peut nous permettre d'estimer la part de la variabilité simulée, qui est due à la variabilité forcée, et celle qui est due à la variabilité interne. C'est en suivant cette démarche que l'on peut, par exemple, estimer la contribution des [gaz à effet de serre anthropiques](#) aux changements climatiques des cent dernières années. Tous les modèles n'ont pas la même variabilité interne, ni systématiquement la même réponse à un même forçage. On est donc en présence de deux sources d'incertitude qu'il faut prendre en compte.

Cela étant, lorsque l'on compare les températures moyennes simulées par l'ensemble des modèles, tous simulent un réchauffement climatique avec l'augmentation de [gaz à effet de serre](#), l'amplitude de réchauffement étant toutefois fortement différente d'un modèle à l'autre. Concernant les précipitations sur telle ou telle région, certains modèles vont simuler une augmentation et d'autres, une diminution. Et jusqu'ici, tous ces modèles donnent toujours des effets probables.

9.2.3. Évaluation des modèles

Quelle confiance accorder à tous ces modèles? Pour cela, il faut comparer le [climat](#) qu'ils simulent, avec ce qui est observé. C'est une démarche de base en physique. On observe un phénomène, on le théorise avec un modèle, et on vérifie si la théorie permet d'expliquer l'observation.

Il existe trois grandes formes d'évaluation. La première est ce qu'on pourrait appeler l'évaluation routinière. Au cours du développement d'un modèle climatique, les centres de [modélisation](#) réalisent des batteries de tests pour vérifier si le [climat](#) simulé par le modèle reproduit bien les grandes caractéristiques du [climat](#) récent. C'est en quelque sorte le contrôle qualité qui assure que le modèle reproduit bien le [climat](#) terrestre et qu'il permet également aux modélisateurs de s'assurer que les améliorations, qu'ils souhaitent apporter, permettent effectivement d'améliorer le modèle.

Comme deuxième type d'évaluation, on dispose de l'étude des paléoclimats. Le meilleur moyen pour savoir comment le [climat](#) évolue en réponse à des grandes variations de forçage, c'est d'étudier les [climats](#) du passé. On dispose, en effet, de reconstructions des variations climatiques passées et des forçages de ces mêmes époques. Le jeu pour le modélisateur est alors de voir s'il peut reproduire ces variations climatiques en imposant ces reconstructions de forçage au modèle. C'est un moyen de tester les réponses des modèles aux forçages.

Enfin, le troisième type d'évaluation est l'évaluation ciblée. Supposons que l'on s'intéresse à l'impact du changement climatique sur un phénomène en particulier

comme, par exemple, les canicules en Europe ou la saisonnalité des précipitations sur une région d'Afrique. Les deux types d'évaluations précédentes ne suffisent pas à nous dire si ce **climat** régional est bien représenté. Il nous faut impérativement disposer d'une évaluation ciblée de ces phénomènes dans les modèles pour avoir un regard critique sur leurs prédictions. Donc, soit on la trouve dans la littérature, soit on doit la faire nous-mêmes.

Ce regard critique nous permettra éventuellement d'exclure certains modèles d'une analyse parce qu'ils ne remplissent pas les critères que nous nous sommes fixés. Nous pourrions aussi envisager de pondérer la projection par la note obtenue par chaque modèle sur différents critères d'évaluation. L'évaluation ne nous permettra pas, en revanche, d'identifier un seul meilleur modèle qui pourrait être pris comme notre meilleure manière de nous projeter dans le futur. Pour faire simple, le **système climatique** est trop complexe pour être évalué de manière exhaustive. Il y a trop d'incertitudes à plusieurs niveaux pour que l'on puisse démontrer qu'un seul modèle puisse suffire. Au contraire, la diversité de modèles est une richesse qu'il faut exploiter pleinement. Avec les modèles climatiques, on ne projette pas le futur qui va se produire, mais des futurs probables.

9.3. Scénarios futurs et résultats – P. Braconnot

9.3.1. Rappels sur les éléments constitutifs de la modélisation climatique

Afin d'anticiper l'évolution future du climat, il est d'abord nécessaire d'identifier les différents facteurs qui peuvent le modifier, ce que l'on appelle les forçages.

Il s'agit, en particulier, d'anticiper l'impact des activités humaines, car les émissions croissantes de **gaz à effet de serre**, dont le **dioxyde de carbone** ou CO₂, sont des facteurs majeurs de réchauffement. Les activités humaines émettent également des particules, les aérosols, qui ont un effet plus régional, majoritairement refroidissant mais aussi réchauffant pour certains comme les suies. Notre utilisation des terres, c'est-à-dire l'agriculture ou la déforestation, modifie aussi bien le **climat** que les cycles biogéochimiques, celui du carbone ou celui de l'azote, qui agissent en retour sur le climat. En résumé, pour anticiper les évolutions futures du climat, il faut donc faire des hypothèses quant à l'évolution des activités humaines qui émettent des **gaz à effet de serre** ou des aérosols et qui modifient l'usage des terres, c'est ce que l'on appelle des **scénarios** [4].

N'oublions pas que ces facteurs **anthropiques** se superposent à des facteurs d'origine naturelle comme la fluctuation de l'activité solaire ou des éruptions volcaniques qui refroidissent le **climat** sur plusieurs années, mais dont il n'est pas possible d'anticiper les manifestations sporadiques.

Le modèle de **climat** va permettre de calculer comment les changements de concentration des différents **gaz à effet de serre** et de la végétation vont modifier le

bilan énergétique terrestre, car ces perturbations énergétiques sont la clef du changement climatique. Ces perturbations vont induire, à leur tour, des modifications de la circulation de l'**atmosphère** et de l'océan, des températures, des courants, des vents et des précipitations (Fig. 9.7).

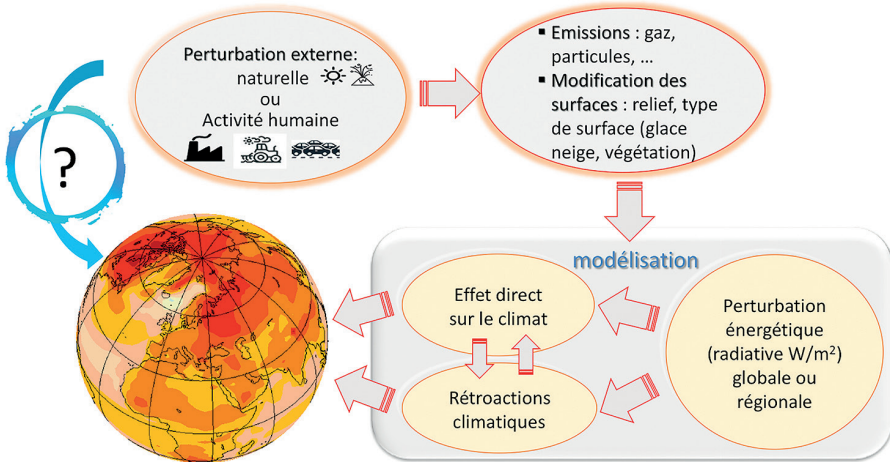


Figure 9.7 : Schéma montrant la façon dont les perturbations externes d'origine naturelle ou **anthropique** sont prises en compte dans un modèle climatique. Source : Pascale Braconnot.

En résumé, la **modélisation** prend non seulement en compte les effets directs des perturbations liées aux activités humaines sur le climat, mais aussi les nombreuses rétroactions induites par les changements climatiques. Comme exemple de rétroaction, le réchauffement fait fondre la neige et fait donc apparaître des surfaces plus sombres, qui absorbent l'**énergie** solaire au lieu de la refléter. Ceci induit un réchauffement additionnel, on dit alors que la rétroaction est positive, car elle amplifie le réchauffement climatique.

9.3.2. Construction des scénarios

Les projections du **climat** futur font l'objet d'un sous-projet spécifique du programme international d'intercomparaison des modèles de **climat** (CMIP). Des experts en **modélisation** du **climat** collaborent avec des économistes afin d'établir ensemble différents **scénarios**.

Ces **scénarios** sont basés sur différentes hypothèses d'évolution de la population, de l'économie, de la demande en **énergie**, des technologies disponibles et des choix politiques en matière de **climat** et de pollution. L'objectif est de couvrir une large gamme de futurs possibles engendrant différents niveaux de **gaz à effet de serre**, différents usages des sols et donc différents **climats** qui vont être explorés par les modèles climatiques. On appelle ces **scénarios** trajectoires socio-économiques partagées ou SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*, en anglais).

La **figure 9.8** présente les cinq grandes familles de trajectoires socio-économiques, classées suivant les défis socio-économiques à relever en termes d'atténuation et d'adaptation. Atténuer doit être compris comme : réduire le nombre de W/m^2 apportés au **système climatique** par l'activité humaine. S'adapter est mettre en place des solutions pour faire face au changement climatique. Les deux actions sont évidemment liées.

Des futurs très variés sont envisagés comme possibles, que ce soit d'une famille SSP à l'autre ou au sein d'une même famille. Ainsi, par exemple, le SSP5 est gourmand en **énergie fossile** alors que le SSP1 met en place des mesures pour remplir les objectifs de l'accord de Paris de 2015 sur le **développement durable**. Le SSP3 met l'accent sur les rivalités entre pays et le SSP4, sur les inégalités à l'intérieur d'un pays. Le SSP2 propose, quant à lui, une évolution intermédiaire.

Pour chaque famille, il existe, de plus, différentes possibilités de faire évoluer l'usage des terres ainsi que les émissions de **gaz à effet de serre** ou d'aérosols, et le **forçage radiatif** dépendant des détails du narratif choisi (**Fig. 9.9**). *In fine*, les perturbations de bilan radiatif (en anglais : *RCP* pour *Radiative Concentrations Pathways*) envisagées en 2100 dans les simulations du dernier programme CMIP6 s'étendent de 1,9 à 8,5 W/m^2 . Ces chiffres correspondent à des trajectoires particulières issues des différentes familles socio-économiques [5].

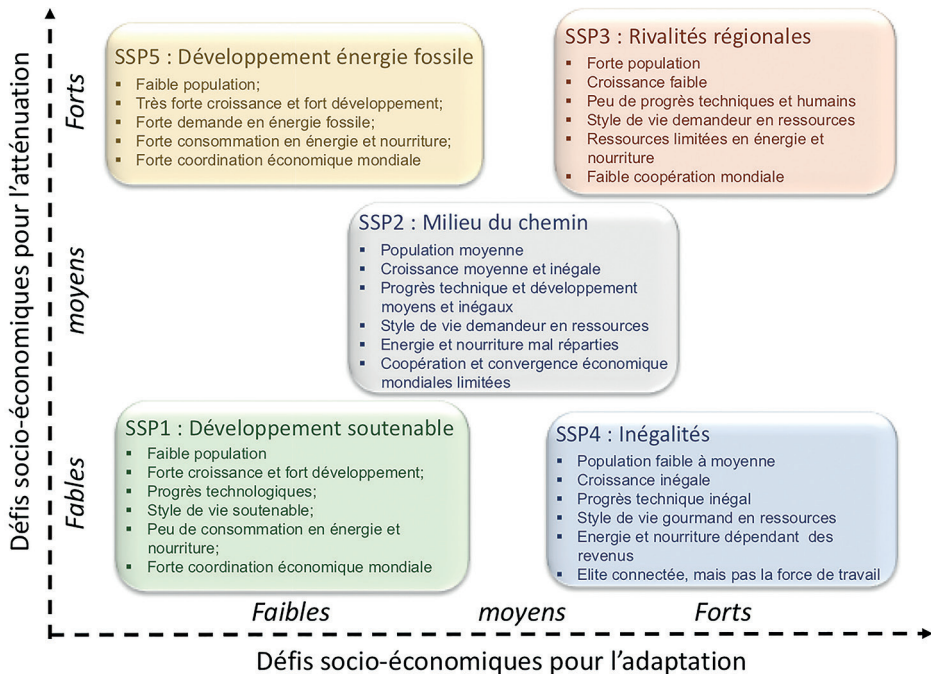


Figure 9.8 : Familles de trajectoires socio-économiques (SSP) classées selon les défis à relever pour atténuer les changements climatiques ou pour s'y adapter. D'après O'Neil *et al.*, 2016 [4].

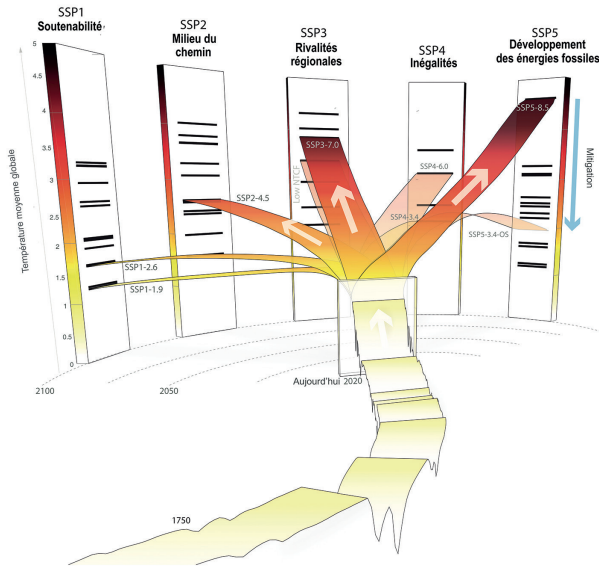


Figure 9.9 : Schéma illustrant différents choix possibles de trajectoires d'évolution concernant l'usage des terres, les gaz à effet de serre ou les aérosols au sein des familles SSP (ici SSP1 et SSP3). Ces choix se traduisent *in fine* par différentes amplitudes de perturbations radiatives en 2100 (exprimées en W/m^2). Source : [5] sous Creative Commons License.

9.3.3. Projections futures des scénarios et modèles climatiques

Les modèles climatiques vont ainsi permettre d'explorer le climat futur selon les hypothèses choisies dans les différents scénarios, et l'on doit garder en mémoire que les résultats obtenus dépendent de ces hypothèses. Les hypothèses sont, en fait, des choix que l'humanité doit faire par la mise en place de politiques d'atténuation des changements climatiques. Les politiques d'adaptation aux changements climatiques doivent tenir compte, elles-mêmes, du fait que différents futurs sont possibles.

La figure 9.10 représente des résultats de simulation qui portent sur l'évolution de la température moyenne à la surface du globe et qui sont obtenus à partir des deux modèles climatiques français, celui de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL [6]) et celui du Centre National de Recherches météorologiques (CNRM [7]). La partie la plus à gauche de la figure montre d'abord l'évolution de cette température calculée de 1880 à 1994 et comparée aux observations sur le terrain. On note le bon accord entre mesures et simulations pour cette période où l'élévation de température s'est « limitée » à 1 °C. La partie à droite de la figure correspond aux projections d'évolution calculées jusqu'à la fin du siècle par les deux mêmes modèles, mais pour quatre types de scénario. Quel que soit le scénario (mesures faibles ou fortes d'atténuation des changements climatiques), les résultats obtenus prévoient une augmentation de la température moyenne au-delà de 2 °C environ.

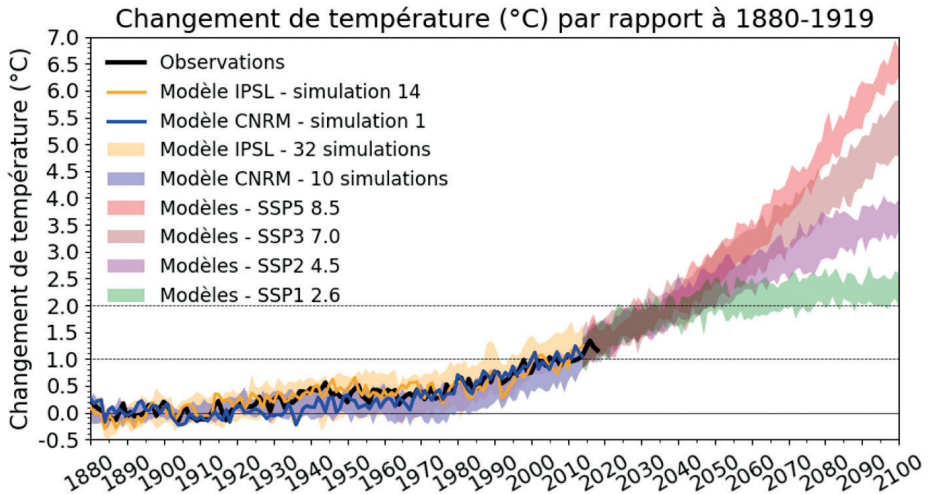


Figure 9.10: Évolution de la température moyenne de la planète. De 1880 à nos jours : évolution observée (courbe noire, 1880-2018) et évolutions estimées par un ensemble de simulations issues du modèle de l'IPSL (enveloppe jaune, 1880-2014) et du modèle CNRM-CM6 (enveloppe bleue, 1880-2014). On note que chacun de deux modèles simule bien la courbe observée (traits continus de couleur). Projections sur le 21^e siècle : quatre scénarios sont envisagés : SSP1 2,6, SSP2 4,5, SSP3 7,0 et SSP5 8,5. Pour chaque scénario futur, l'enveloppe de couleur obtenue regroupe l'ensemble des simulations réalisées à partir des deux modèles. La période de référence choisie pour les projections est celle entre 1880 et 1919⁸⁴.

9.4. Combien de carbone nous reste-t-il à émettre ? – S. Szopa

9.4.1. Objectif de réchauffement global

Le *budget carbone restant* correspond à la quantité de CO₂ qui peut encore être émise dans l'*atmosphère* avant de dépasser un certain seuil de température. C'est, en effet, en termes de température à ne pas dépasser qu'a été négocié l'accord de Paris, accord international sur le *climat* signé en 2015. Le réchauffement climatique est une problématique environnementale globale qui nécessite une action internationale coordonnée. Celle-ci implique donc d'abord de s'entendre sur le fait que le réchauffement actuel est bien lié aux activités humaines, pour ensuite se fixer un objectif commun et tenter d'avoir une stratégie qui limite le changement climatique. L'accord de Paris fixe comme objectif une limitation du réchauffement mondial entre 1,5 °C et 2 °C d'ici 2100. Se fixer un objectif de réchauffement à ne pas dépasser permet également de dimensionner les politiques d'adaptation si, toutefois, les politiques compatibles avec cet objectif sont mises en place de manière tangible.

84. https://climeri-france.fr/wp-content/uploads/2019/09/DP_confpresse_CMIP6.pdf

Pour comprendre ce que signifie cet objectif, rappelons que le réchauffement actuel, tel qu'estimé à partir des observations dont nous disposons, est d'environ 1 °C par rapport à la température globale à l'ère préindustrielle.

L'accord de Paris mentionne donc deux seuils de température, qui peuvent sembler très proches l'un de l'autre. Pour comprendre les conséquences liées au dépassement de l'un ou l'autre des seuils, les États ont mandaté le GIEC de manière à ce qu'il coordonne la rédaction d'une synthèse des connaissances portant sur les conséquences des dépassements liés à ces seuils ainsi que sur les faisabilités techniques et économiques pour rester au-dessous de ces seuils. Il s'agit du rapport spécial 1,5 °C du GIEC qui a permis de démontrer qu'en termes d'impacts du changement climatique, chaque demi-degré compte^{85 86}. Ce rapport a été établi grâce à un processus d'analyse de la littérature scientifique propre au GIEC (voir ci-après, section 9.5.2). Dans le résumé pour décideur du rapport IPCC SR1.5⁸⁷, les résultats des études d'impacts et des risques encourus sont synthétisés comme le montre la figure 9.12 (non exhaustive) ci-après.

Étant donné le niveau de réchauffement actuel de 1 °C, qui résulte des émissions passées de gaz à effet de serre, on constate, d'après la figure 9.11, que certains écosystèmes, comme les coraux d'eau chaude, sont d'ores et déjà affectés de manière irréversible ou persistante par le réchauffement actuel. La pêche et l'aquaculture sont aussi confrontées à des risques croissants dès 1 °C de réchauffement. En revanche, pour d'autres systèmes comme les cultures de céréales, on peut raisonnablement penser qu'une augmentation à 2 °C, même si elle n'est pas sans conséquences sur ces cultures, n'engendrera qu'un risque modéré auquel il sera, sans doute, possible de s'adapter en partie.

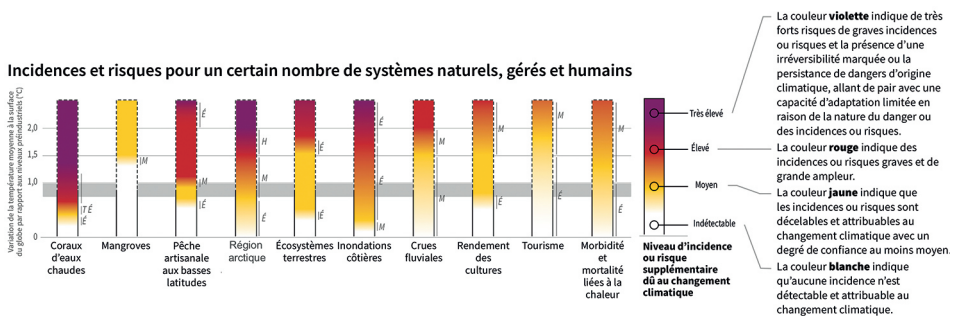


Figure 9.11: Impacts et risques encourus pour différents systèmes naturels selon le niveau d'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre (Extrait de la Figure SPM2, rapport IPCC 2018, SR1.5).

85. Rapport spécial IPCC 1.5

86. Rapport complet et figures téléchargeables à <https://www.ipcc.ch/sr15/>

87. Résumé pour décideurs en français :

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

On voit donc que les impacts diffèrent d'un domaine à l'autre et donc aussi, d'une région à l'autre. Le cap, que l'on se fixe, a forcément un caractère subjectif. On note également dans la [figure 9.11](#) (à droite) que le [GIEC](#) a déterminé un degré de confiance pour les différents impacts et risques. Ceci est un point fondamental des travaux d'expertise du [GIEC](#).

9.4.2. Estimation du carbone restant à émettre

Nous venons de voir que les impacts du réchauffement climatique vont dépendre du niveau de réchauffement. Il reste maintenant à savoir quel niveau d'émission de CO_2 est compatible avec cet objectif de température. Nous savons, en effet, que le CO_2 atmosphérique est le principal [gaz à effet de serre](#) additionnel (voir section [7.2.2](#)) et que pour limiter le CO_2 atmosphérique, il est nécessaire de limiter nos émissions de CO_2 . Cela étant, pour fixer plus précisément les objectifs d'émission par pays ou par continent, encore faut-il connaître la relation entre émissions de CO_2 et température de surface.

Pour rappel, une partie du CO_2 émis vers l'[atmosphère](#) par les activités [anthropiques](#) va être captée par la végétation terrestre et l'océan. Comme les activités humaines émettent chaque année plus que ce que ces puits ne peuvent capturer, le CO_2 s'accumule dans l'[atmosphère](#) (voir section [7.1](#)). Dans l'état actuel du système Terre, il existe une relation de proportionnalité entre la quantité émise et la quantité de CO_2 qui s'accumule dans l'[atmosphère](#).

En connaissant les quantités de CO_2 émises par les activités humaines année après année depuis le début de l'ère industrielle, il nous est possible de relier l'augmentation de température de surface à la quantité cumulée d'émissions de CO_2 pour chaque année (par exemple, points noirs sur la [Fig. 9.12](#), issus de résultats de modèles antérieurs à 2013, et fine courbe bleue issue de travaux de 2018).

Les modèles climatiques (voir section [9.2](#)), qui prennent en compte les éléments du cycle du carbone, notamment les [puits de carbone](#) que sont l'océan et la végétation, ont permis de mettre en évidence que la température de surface augmente effectivement et de façon quasi linéaire avec la teneur atmosphérique en CO_2 , y compris pour des quantités élevées d'émissions cumulées de CO_2 . Ces modèles sont, en effet, capables de calculer la température de surface atteinte pour chaque niveau d'émissions cumulées de CO_2 , qu'il s'agisse des niveaux passés ou qu'il s'agisse de niveaux hypothétiques comme dans les [scénarios](#) futurs. La courbe rouge de la [figure 9.12](#) représente ainsi une évolution de la température de surface, moyennée sur différents modèles considérés dans le rapport [GIEC](#) de 2013. Cette évolution quasi-linéaire a été utilisée pour prolonger la relation observée jusqu'en 2017 (courbe mauve dans le prolongement de la courbe bleue).

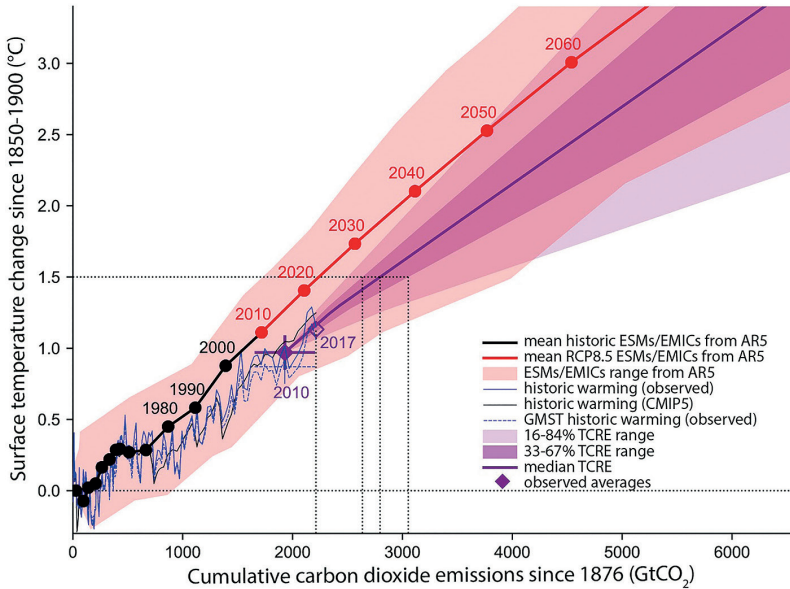


Figure 9.12: Réponse transitoire de la température moyenne de surface aux émissions cumulées de CO₂ depuis 1876 [Figure 2.3 extraite du chapitre 2 du rapport IPCC, 2018, SR1.5].

Il a, par ailleurs, été démontré que la température atteinte à un niveau d'émissions cumulées de CO₂ est proche de la température d'équilibre qui serait obtenue si l'on cessait (fictivement) d'émettre du CO₂. Cette température se maintient ensuite, pendant longtemps, car une partie du CO₂ d'origine **anthropique** demeure dans l'**atmosphère** pour des millénaires. En conséquence, le niveau de réchauffement auquel nous serons capables de stabiliser la température dépend du CO₂ que l'on va ajouter à ce que l'on a déjà émis. De fait, rien n'empêche, physiquement, de stabiliser la température à son niveau actuel. C'est donc seulement notre capacité à nous affranchir des émissions de CO₂ qui va déterminer le maximum de température globale que nous allons atteindre.

En conclusion, le niveau de réchauffement actuel est lié à l'ensemble du CO₂ émis et cumulé sur des décennies. On réalise, d'après la **figure 9.12**, que pour ne pas dépasser un réchauffement de 1,5 °C, les émissions cumulées de CO₂ doivent être inférieures à 2800 Gt. La marge d'incertitude étant toutefois de quelques centaines de gigatonnes. Or, le projet *Global Carbon Project*, qui réévalue chaque année le budget de carbone mondial, estime à 2400 ± 238 Gt le total des émissions de CO₂ cumulées dans la période de 1850 à 2019 et liées à l'usage d'**énergies fossiles**, aux industries et aux changements d'usage des sols⁸⁸ ⁸⁹. En poursuivant le rythme actuel des émissions de CO₂, soit environ 40 Gt par an, les chiffres précédents nous

88. Rapport Le Quéré *et al.* (2018) : <https://essd.copernicus.org/articles/10/2141/2018/>

89. Global Carbon Project : <https://www.globalcarbonproject.org>

permettent donc d'estimer que le seuil de 1,5 °C sera éventuellement dépassé d'ici 10 ans.

Il nous faut cependant souligner à nouveau que la [figure 9.12](#) comporte des incertitudes dues à la dispersion des réponses des différents modèles de [climat](#) et qu'elle ne considère que le CO₂ comme [gaz à effet de serre](#). Cette figure fournit donc un ordre de grandeur de la quantité de CO₂ restant à émettre et non une quantité absolue.

9.4.3. Différentes options pour ne pas dépasser les seuils prescrits

Dans le cadre du rapport SR1.5 du [GIEC](#), de nombreux [scénarios](#) de modification des émissions de CO₂ ont été analysés afin d'évaluer leur faisabilité, leur coût et leur impact sur le climat. Ces travaux ont montré que différentes trajectoires pour parvenir à l'objectif sont possibles (voir section [9.3](#)), allant d'une réduction continue et progressive des émissions à une réduction différée mais qui est alors plus abrupte. Cependant, quelles que soient les trajectoires, des changements importants sont nécessaires dans tous les secteurs d'activité afin d'atténuer l'ampleur du réchauffement climatique, et chaque année compte pour la mise en place de ces changements.

Par ailleurs, toutes les trajectoires prévoient une élimination partielle du [dioxyde de carbone](#) produit (voir « les émissions négatives » en section [11.7](#)), mais la quantité éliminée varie selon les trajectoires, tout comme les contributions relatives de la [bioénergie avec captage et stockage du dioxyde de carbone](#) (BECCS) et les éliminations réalisées dans le secteur de *l'agriculture, des forêts et des autres utilisations des terres* (AFAUT). Ces deux contributions mettent une pression supplémentaire sur l'usage des sols qu'il faudra donc accompagner.

9.5. Présentation du GIEC et des rapports spéciaux – Équipe GIEC

9.5.1. Qu'est-ce que le GIEC ?

Nous avons sans doute tous entendu parler du [GIEC](#) (ou IPCC en anglais) qui a d'ailleurs déjà été mentionné à de nombreuses reprises dans cet ouvrage ? Mais de quoi s'agit-il ?

Le [GIEC](#) ou Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du [climat](#) (en anglais : *Intergovernmental Panel on Climate Change*) est l'organisme international chargé d'évaluer la science en lien avec le changement climatique⁹⁰.

90. https://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_d%27experts_intergouvernemental_sur_l%27évolution_du_climat

Le **GIEC** a été créé en 1988 pour fournir régulièrement des évaluations relatives aux impacts et risques liés au changement climatique ainsi qu'aux options possibles pour y répondre, c'est-à-dire les moyens à mettre en œuvre dans les stratégies d'adaptation et de parade. Ces évaluations sont destinées aux :

- décideurs politiques;
- gouvernements;
- universités;
- et grand public.

Tous les pays membres de l'organisation météorologique mondiale (OMM) et des Nations Unies sont invités à rejoindre le **GIEC**. À l'heure actuelle, l'organisation compte 195 membres.

Le **GIEC** fonctionne en séances plénières régulières. Il est divisé en 3 groupes de travail qui se concentrent sur des aspects spécifiques du changement climatique. Ces groupes de travail sont complétés par une équipe spéciale chargée de développer des méthodes pour estimer les émissions nationales de **gaz à effet de serre** et leur atténuation.

Si le **GIEC** produit principalement des rapports d'évaluation (par groupe de travail), il peut aussi rédiger des rapports spéciaux – qui traitent de sujets interdisciplinaires (avec plusieurs groupes de travail) – ainsi que des rapports méthodologiques.

Tous ces rapports sont non seulement écrits par des centaines d'éminents scientifiques, mais ils sont aussi examinés par des milliers d'experts venant du monde entier.

C'est pourquoi les rapports du **GIEC** peuvent être considérés comme la source la plus fiable de connaissance scientifique sur le changement climatique.

Le **GIEC** représente donc l'autorité scientifique à l'échelle mondiale dans le domaine du changement climatique.

9.5.2. Comment sont produits les rapports du GIEC ?

On peut se demander en quoi des rapports écrits peuvent être utiles pour s'informer sur le changement climatique. En fait, plus qu'utiles, ils sont essentiels !

Les rapports du **GIEC** sont écrits par des centaines d'experts scientifiques provenant du monde entier. Ces experts sont sélectionnés sur la base de leur domaine d'expertise. Les équipes d'auteurs sont constituées de manière à garantir un équilibre géographique ainsi qu'un équilibre des genres. Ils rédigent les rapports sur la base du volontariat, en plus de leur travail de chercheur/professeur.

Des milliers d'autres experts contribuent également au processus en examinant les rapports et en s'assurant qu'ils reflètent bien l'état des connaissances de la communauté scientifique.

Les rapports traversent plusieurs étapes de rédaction et de relecture, afin de garantir le plus haut niveau de rigueur scientifique. La relecture est une partie essentielle du processus du GIEC. Lors des différentes étapes, les experts relecteurs et les gouvernements sont invités à commenter les contenus des versions successives du rapport avant publication ainsi que leur cohérence.

Le résumé pour décideurs de chaque rapport est approuvé ligne après ligne par les délégations des gouvernements, en discussion avec les auteurs qui s'assurent de la véracité scientifique, avant d'être finalement accepté par le GIEC.

Ce processus long et minutieux garantit aux rapports d'évaluation du GIEC un contenu clair, scientifiquement rigoureux et objectif. C'est pourquoi, ils fournissent aux décideurs une base robuste pour la mise en place de politiques climatiques.

Références

- [1] W.F. Ruddiman. 2007. The early anthropogenic hypothesis: Challenges and responses. *Review of Geophysics* **45**. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006RG000207>.
- [2] S. Barker, I. Cacho, H. Benway, K. Tachikawa. 2005. Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy for past oceanic temperatures: a methodological overview and data compilation for the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews* **24**, 821-834. [https://www.whoi.edu/cms/files/hbenway/2006/6/BarkerQSR\(2005\)_11406.pdf](https://www.whoi.edu/cms/files/hbenway/2006/6/BarkerQSR(2005)_11406.pdf).
- [3] G. Liu, X. Li, H-W. Chiang, H. Cheng, S. Yuan, S. Chawchai, S. He, Y. Lu, L.T. Aung, 2020. On the glacial-interglacial variability of the Asian monsoon in speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records. *Science Advances* **6**(7), eaay8189. <https://advances.sciencemag.org/content/6/7/eaay8189>.
- [4] B.C. O'Neill, *et al.* 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* **9**, 3461-3482.
- [5] M. Meinshausen, *et al.* 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.* **13**, 3571-3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>, © Author(s) 2020. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.
- [6] O. Boucher, *et al.* 2020. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **12**, e2019MS002010.
- [7] A. Voltaire, *et al.* 2019. Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **11**, 2177-2213.