



# Guide de recommandations scientifiques visant à faciliter l'utilisation de projections climatiques

Version 1.0 2024-01-15

# Tables des matières

Contexte .....	3
Objectifs et portée .....	3
Modélisations et scénarisations climatiques.....	4
La mise à jour de l'ensemble de modèles CMIP .....	5
Comment aborder le problème des modèles chauds avec CMIP6? .....	7
Scénarios de gaz à effet de serre .....	10
Horizons temporels et période de référence .....	14
Le choix des centiles.....	17
Niveaux de réchauffement planétaire .....	19

# Contexte

La prise en compte du climat futur est maintenant un incontournable, que ce soit pour le développement de plans d'adaptation, ou pour les analyses de vulnérabilité ou encore les appréciations de risques. Or l'information climatique disponible et nécessaire peut être difficile à interpréter et utiliser, car la science du climat est complexe et évolue rapidement. Pour utiliser adéquatement les données, une bonne connaissance des principaux maillons de la chaîne de modélisation climatique est donc souhaitable.

## Objectifs et portée

Ce document émet des recommandations sur l'utilisation de projections climatiques. Formulées en s'appuyant sur l'état actuel des connaissances scientifiques, ces recommandations visent à mieux comprendre certaines notions de la modélisation climatique et d'éclairer le choix des :

- modèles climatiques
- scénarios d'émission (gaz à effet serre, particules aérosols, utilisation des terres)
- horizons temporels et période de référence
- centiles

L'information contenue dans le présent document est basée sur les connaissances scientifiques les plus à jour. Elle sera actualisée, au besoin, en fonction de l'évolution des connaissances.

# Modélisations et scénarisations climatiques

Une simulation climatique est une représentation numérique du système climatique. Différentes configurations permettent de mener des expériences visant à comprendre comment le climat réagit à différentes situations. Certaines expériences simulent par exemple des éruptions volcaniques, ou encore des changements à l'occupation des sols pour explorer leur effet sur les conditions climatiques à différentes échelles. Les expériences les plus utilisées dans le cadre de l'adaptation aux changements climatiques sont celles où les concentrations de GES et particules aérosols suivent des scénarios prédéfinis.

La conception d'une expérience climatique commence par des scénarios d'émissions de GES générés à partir de modèles d'évaluation intégrés (Figure 1.). Le modèle du système Terre simplifié MAGICC7 convertit ces émissions en concentrations de GES dans l'atmosphère, qui elles servent d'intrants à différents modèles globaux de climat. Les résultats des différents modèles de climat sont ensuite mis à la disposition des chercheurs et du public afin de mesurer, entre autres, les conséquences climatiques des politiques visant la réduction des émissions de GES.

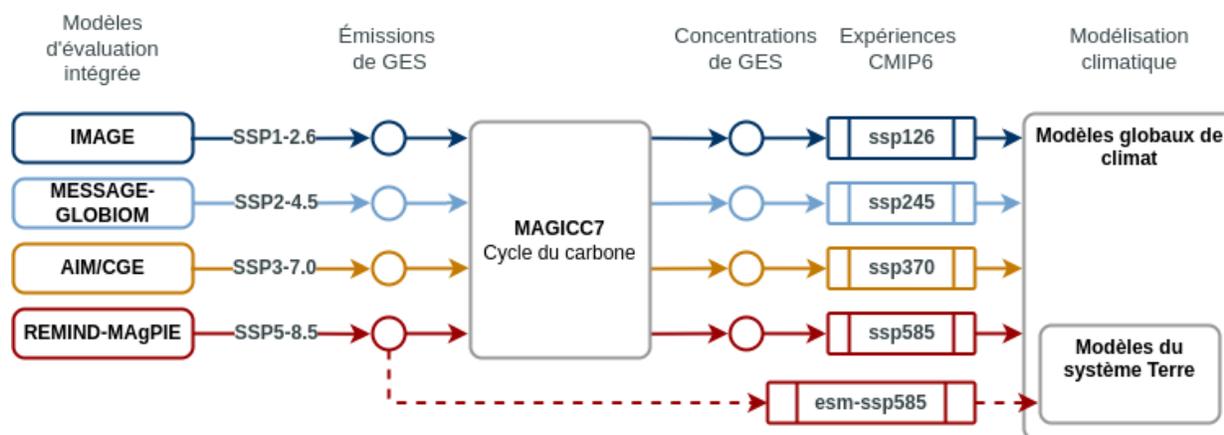


Figure 1. Étapes de génération des projections climatiques tenant compte de l'évolution future des émissions de GES.

# La mise à jour de l'ensemble de modèles CMIP

## Considérant que :

- les résultats de l'ensemble CMIP6 sont de qualité comparable ou légèrement supérieure à ceux de CMIP5,
- il est rare que la nouvelle génération de modèles remette en cause les grandes conclusions à niveau de confiance élevé des générations précédentes.

## Dans le cadre d'une nouvelle étude, il est recommandé de :

- choisir le plus récent ensemble disponible, soit CMIP6.

## Dans le cadre d'une étude existante, il est recommandé de :

- mettre à jour les résultats avec CMIP6 seulement :
  - lorsque l'étude originale est basée sur CMIP3;
  - lorsque l'étude originale est basée sur CMIP5 et que la littérature scientifique suggère que les modèles de la phase 6 performant significativement mieux pour la variable et la région d'intérêt.
- Sinon, conserver CMIP5.

## La coordination des expériences de modélisation climatique

Une quarantaine d'organisations à travers le monde développent des modèles climatiques et rendent public les résultats des simulations. Ces efforts s'inscrivent dans le cadre du Projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP), un Programme mondial de recherche sur le climat. En l'année 2023, ce projet est dans sa sixième phase (CMIP6), offrant une mise à jour des résultats de la précédente phase (CMIP5).

Une expérience CMIP est un protocole expérimental suivi par les différentes équipes de modélisation du climat. En respectant ce protocole, elles s'assurent que les résultats des différentes simulations soient comparables entre eux.

Tous les 6 ou 7 ans, la communauté scientifique détermine des objectifs scientifiques et conçoit des expériences pour y répondre. Les groupes de modélisation choisissent alors les expériences auxquelles ils veulent participer, appliquent les protocoles expérimentaux de simulation puis diffusent leurs résultats publiquement.

Chaque phase de CMIP est une occasion pour les modélisateurs d'évaluer les versions les plus à jour de leur modèle, qui corrigent les faiblesses des versions précédentes. Certaines expériences ciblent une augmentation ou une complexification des processus simulés, visant une représentation plus

réaliste, tandis que d'autres expériences ont pour objectif de répondre à des questions théoriques sur le fonctionnement du système climatique.

### **Une assise aux rapports du GIEC**

Les résultats de CMIP et les analyses qui en découlent contribuent aux évaluations et aux rapports produits par le GIEC. Ainsi, la phase 5 de CMIP a permis d'offrir l'information nécessaire à la présentation des conclusions du 5<sup>e</sup> rapport du GIEC sur la science du climat de 2014. Chaque nouvelle phase de CMIP est une occasion pour les experts conviés par le GIEC de revoir les conclusions tirées de la phase précédente.

Les changements apportés à chaque nouvelle génération de modèle améliorent la performance des modèles à simuler le climat observé et consolident la confiance de la communauté scientifique dans la capacité des modèles à anticiper la réponse climatique aux différents scénarios de GES. Il est toutefois rare que la nouvelle génération de modèles remette en cause les grandes conclusions des générations précédentes, particulièrement pour les résultats à niveau de confiance élevé. Ce sont généralement les résultats moins concluants à niveau de confiance faible ou limité qui sont les plus susceptibles de changer avec l'arrivée d'une nouvelle génération de modèles climatiques.

### **Choisir CMIP6 ou CMIP5**

Le plus récent rapport du GIEC intègre quant à lui la sixième phase du projet (CMIP6). Dans ce dernier, une nouvelle génération de trajectoires communes d'évolution socio-économique – ou SSP (de l'anglais Shared Socio-economic Pathways) – est utilisée. Celles-ci viennent remplacer les profils représentatifs d'évolution de concentration, ou RCP (de l'anglais Representative Concentration Pathway) du précédent rapport du GIEC. C'est sur la base de ces trajectoires d'évolution socio-économique que les émissions de GES et particules aérosols sont estimées puis traduits en concentration servant d'intrant aux modèles climatiques.

De manière générale, CMIP6 offre des résultats comparables, sinon légèrement supérieurs à CMIP5 en matière de reproduction du climat observé. Toutefois, plusieurs nouvelles questions, abordées dans les sections suivantes, se posent quant au choix des scénarios d'émissions et des modèles climatiques à privilégier selon leur sensibilité climatique.

Considérant que les données des modèles globaux de la phase 6 sont maintenant disponibles sur les principales plateformes de données climatiques, il est recommandé d'utiliser les résultats de la phase 6 pour la réalisation de nouvelles études. Il peut toutefois être justifié d'utiliser les résultats de la phase 5, par exemple si l'étude requiert des modèles régionaux, puisque les ensembles multi-modèles régionaux pilotés par des simulations de CMIP6 ne seront probablement disponibles qu'à partir de 2024.

Dans le cas d'une étude existante basée sur CMIP5, on suggère d'effectuer une revue de littérature afin de déterminer si le contenu est susceptible de changer significativement avec CMIP6. On recommande une mise à jour uniquement dans l'affirmative. À noter que les études d'impacts et d'adaptation<sup>1</sup> sont souvent basées sur les données climatiques de la génération CMIP précédente.

---

<sup>1</sup> Rapports du GIEC 2014, Groupes de travail II et III.

# Comment aborder le problème des modèles chauds avec CMIP6?

## Considérant que :

- les modèles dit *chauds* sont surreprésentés dans l'ensemble CMIP6, ou plus généralement que la distribution de la sensibilité climatique effective des modèles de l'ensemble CMIP6 n'est pas représentative de l'état des connaissances basées sur les observations historiques et paléoclimatiques,

## Il est recommandé que :

- les statistiques calculées sur l'ensemble CMIP6 tiennent compte de la surreprésentation de modèles dits "chauds". Cela peut être fait, par exemple, via la sélection ou la pondération des modèles en fonction de leur sensibilité climatique.

## La sensibilité climatique de l'ensemble CMIP6

CMIP6 pose un problème de réchauffement climatique exacerbé due à la surreprésentation de modèles dont le climat futur est particulièrement chaud. On dit de ces modèles qu'ils ont une sensibilité climatique élevée. Cette sensibilité est définie comme le changement global de température à l'équilibre pour une concentration de CO<sub>2</sub> deux fois plus grande que la concentration préindustrielle. Chaque modèle de climat a donc une sensibilité climatique propre qui émerge des différents processus modélisés. Un modèle « sensible » présentera un réchauffement plus intense pour la même concentration de CO<sub>2</sub>.

La sensibilité climatique peut également être mesurée à partir d'observations du climat récent et de reconstructions du paléoclimat. En raison des incertitudes affectant les observations et les reconstructions, l'estimé de la sensibilité climatique n'est pas une valeur unique, mais une distribution de probabilité, interprétée comme un niveau de confiance relatif. La Figure 2 illustre la différence entre la distribution de la sensibilité climatique des modèles de l'ensemble CMIP6 et celle estimée des observations.

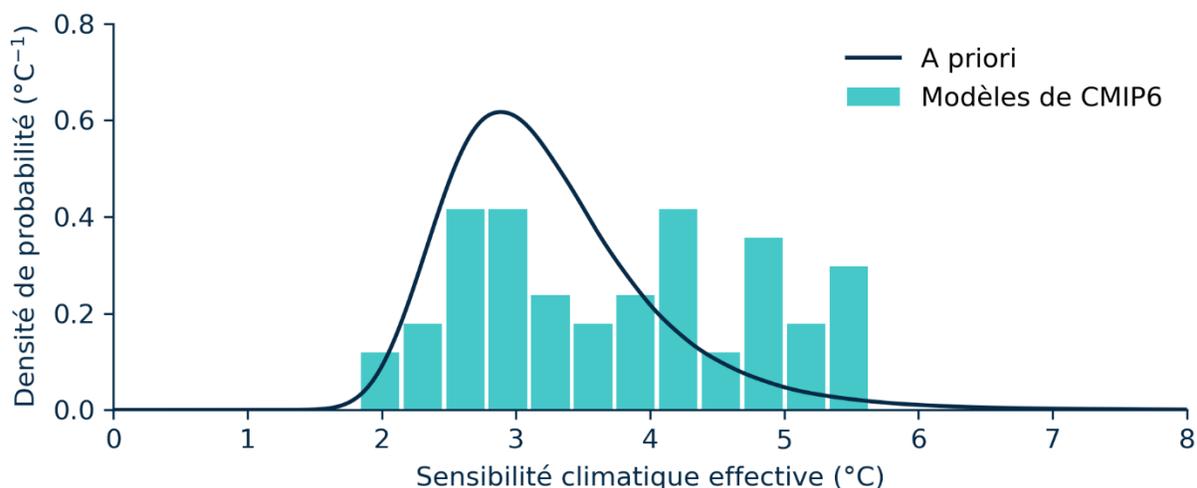


Figure 2 Histogramme de la sensibilité climatique effective des modèles de l'ensemble CMIP6 (Zelinka et al. 2020), comparé à la densité de probabilité de la sensibilité climatique effective estimée à partir du climat historique, du paléoclimat et de la physique des rétroactions climatiques (Sherwood et al. 2020).

En résumé, l'ensemble CMIP6 ne forme pas un échantillon représentatif des connaissances actuelles sur la sensibilité climatique et par conséquent, la moyenne et autres statistiques d'ensemble sont biaisées. Cela implique que la moyenne des changements de température de l'ensemble des modèles de CMIP6 est plus élevée que ce qui est attendu en se basant sur l'estimation de la sensibilité climatique. C'est là tout le problème dit des modèles chauds. À titre illustratif, la Figure 3 présente deux histogrammes du changement de température, l'un calculé en pondérant les modèles de l'ensemble CMIP6 (SSP5-8.5) par leur sensibilité climatique, et l'autre sans pondération. On voit clairement qu'un ensemble de modèle non-pondéré surestime le réchauffement climatique par rapport au même ensemble pondéré.

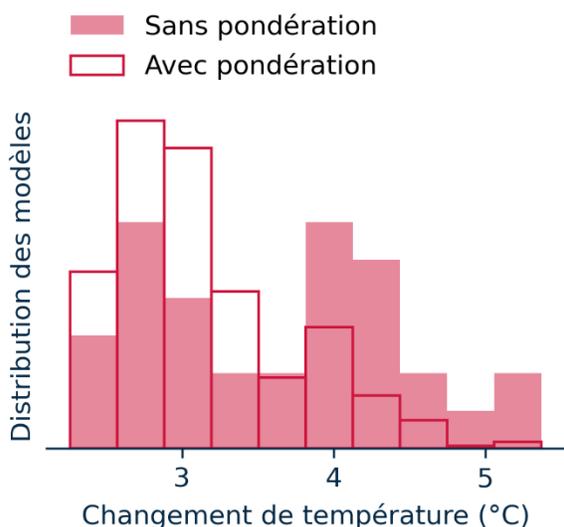


Figure 3 Histogramme du changement de température moyenne globale des modèles de l'ensemble CMIP6 et du scénario SSP5-8.5 entre 1990–2020 et 2070–2100, calculé avec et sans pondération par la sensibilité climatique estimée par Sherwood et al. (2020) et Zelinka et al. (2020).

## Éviter le biais chaud

Dans son dernier rapport, pour répondre au problème des modèles chauds exposé précédemment, le GIEC propose l'utilisation d'émulateurs (outils de sélection de modèles en fonction de différents critères) calibrés à partir de multiples sources d'information. Le recours à ces émulateurs permet de faire des projections en adéquation avec la sensibilité climatique estimée. Cette approche exige toutefois une expertise poussée et est difficilement applicable à la myriade d'applications en adaptation climatique.

De récents travaux de recherche (Hausfather et al. 2022) suggèrent de retrancher les modèles dont la réponse climatique transitoire (une autre mesure de la sensibilité climatique) est à l'extérieur des bornes vraisemblables (66%) définies par le GIEC (1.4–2.2 °C). Cette approche sélective peut toutefois s'avérer inappropriée si elle s'étend à l'étude des risques d'événements extrêmes.

# Scénarios de gaz à effet de serre

## Considérant que :

- la nouvelle génération de scénarios de concentrations, appelées "Shared Socioeconomic Pathway" (SSP) est maintenant disponibles et sous-tend la plus récente génération de simulations climatiques (CMIP6);
- dans son dernier rapport, le groupe de travail III du GIEC mentionne que le SSP5-8.5, fondé sur l'absence de politiques climatiques, devient plus invraisemblable avec la mise en place de mesures de réduction des émissions, et n'est utile que comme un scénario à haut-risque;
- le projet CORDEX a révisé ses choix de scénarios et identifie maintenant le SSP3-7.0 plutôt que SSP5-8.5 comme le scénario à fortes émissions. Le SSP1-2.6 est considéré comme un scénario à faibles émissions.

## Il est recommandé:

- d'adopter une perspective d'analyse de sensibilité basée sur des scénarios de concentrations "médian" (SSP2-4.5) et "élevé" (SSP3-7.0) lors de la planification de l'adaptation.
- de considérer le scénario de concentrations "très élevée" SSP5-8.5 lorsqu'on s'intéresse à des aléas très improbables aux conséquences catastrophiques, ou comme analogue d'un climat post-2100.

Les simulations climatiques disponibles pour l'analyse des impacts des changements climatiques s'appuient sur des scénarios de concentrations de GES et de particules aérosols dans l'atmosphère et de changement d'utilisation des terres. Pour la dernière génération de simulations climatiques, ces scénarios décrivent aussi bien l'historique de 43 GES allant de 1860 jusqu'en 2015, que leur évolution de 2015 jusqu'en 2500.

Ces scénarios de concentrations ont pour origine des scénarios d'émissions de GES résultant de simulations réalisées par des modèles d'évaluation intégrés (MEI). À partir d'hypothèses démographiques, économiques, énergétiques et sur les politiques de réduction des émissions, ces MEI permettent de simuler les trajectoires d'émissions anthropiques de GES.

Parmi les milliers de trajectoires d'émissions simulées par la communauté des MEI, quelques-unes seulement sont sélectionnées, les scénarios dits "représentatifs", pour concevoir les expériences de modélisation climatique. Dans la sixième phase de CMIP, quatre scénarios clés de concentrations de GES, aérosols et d'utilisation des terres sont proposés : SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5. **Ces scénarios SSP sont complètement distincts des RCP. Même si le forçage radiatif du RCP8.5 et SSP5-8.5 sont, en théorie, les mêmes en 2100, les trajectoires d'émissions et de concentrations des GES sont différentes.** La Figure 5 illustre les différences d'émissions, les concentrations de CO<sub>2</sub> et les forçages radiatifs des RCP et SSP.

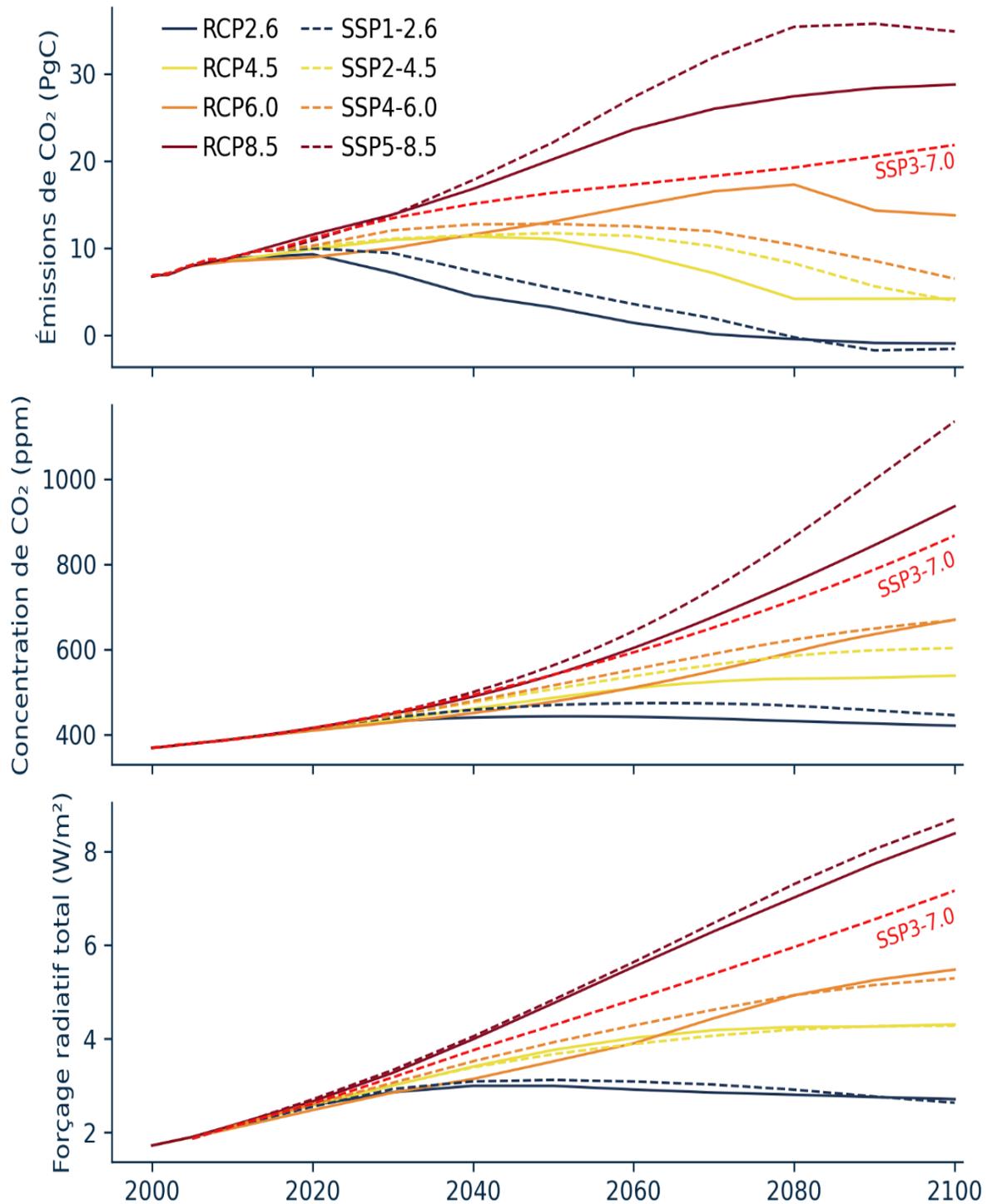


Figure 5 Séries temporelles des émissions (haut) et des concentrations (milieu) annuelles de CO<sub>2</sub> et forçage radiatif total (bas) des scénarios RCP et SSP. Des différences importantes sont notables dans les émissions et concentrations, spécialement dans le cas des scénarios RCP8.5 et SSP5-8.5.

Dans la majorité des études d'impacts des changements climatiques, les résultats sont présentés conditionnellement au scénario. Par exemple, la hausse des niveaux de la mer sera présentée en fonction des différents SSP. Cette approche permet alors d'illustrer le spectre des possibilités, et de comprendre la sensibilité d'un aléa aux changements climatiques.

Idéalement, pour prendre des décisions fondées sur les risques, les SSP seraient accompagnés de probabilités. Or, la communauté scientifique hésite encore à se positionner sur la probabilité respective des différents scénarios. Dans le dernier rapport du GIEC, il est mentionné tout au plus que les RCP8.5 et SSP5-8.5 ne représentent pas un scénario typique ("business-as-usual"), et qu'ils ne sont utiles qu'à titre de scénario à haut risque, représentatifs de la limite supérieure des différents scénarios "sans politique climatique" (Riahi et al. 2022). Ouranos travaille à développer des approches permettant d'assigner des probabilités à des scénarios de concentrations afin de permettre la quantification des risques climatiques (Huard et al. 2022).

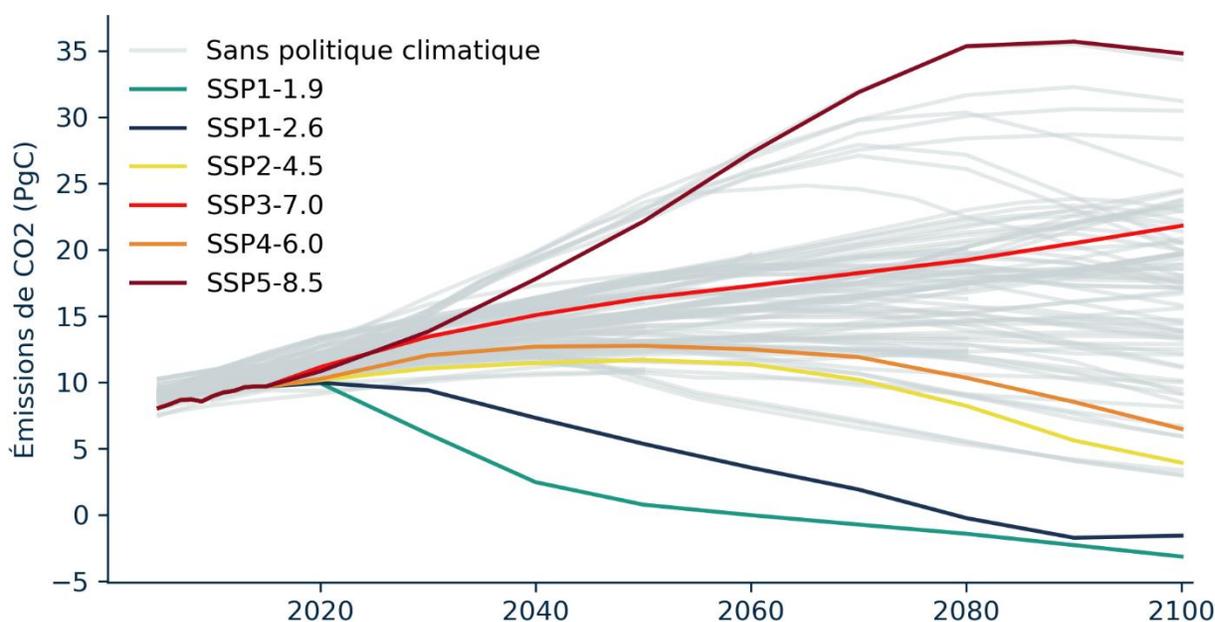


Figure 6 Comparaison des trajectoires d'émissions de CO<sub>2</sub> des SSP (lignes colorées) avec celles des modèles d'évaluation intégrés validés par le groupe de travail III du GIEC filtrés pour ne retenir que ceux faisant l'hypothèse qu'aucune politique de réduction des émissions n'est mise en place (en gris).

D'ici à ce que la communauté scientifique s'entende sur des directives claires guidant le choix de scénario de concentrations, Ouranos suggère d'adopter une perspective d'analyse de sensibilité, et d'interpréter le SSP2-4.5 comme le scénario médian et le scénario SSP3-7.0 comme le scénario supérieur. Par exemple :

- un aléa climatique aux **conséquences graves**, et dont la sévérité ou la fréquence sont amplifiées par les changements climatiques, devrait être analysé avec le scénario SSP3-7.0.
- un aléa **sans conséquence majeure** peut être analysé avec le scénario SSP2-4.5.

L'utilisation du scénario SSP5-8.5 peut quant à lui être pertinent dans un contexte d'aléas improbables, mais aux conséquences catastrophiques, ou encore comme analogue d'un climat post-2100 utile aux questions d'aménagement du territoire.

En pratique, d'autres considérations d'ordre pragmatique peuvent entrer en jeu dans le choix du scénario. Par exemple, le nombre de simulations disponibles varie en fonction du scénario. Un scénario pourrait être écarté s'il compte trop peu de modèles pour une variable donnée.

Aussi, l'influence du scénario est intimement liée à l'horizon temporel. En ce sens, les différents scénarios peuvent suivre les mêmes trajectoires pendant les premières décennies et commencer à diverger à partir de 2040. Le choix du scénario est donc sans conséquence dans une analyse à l'horizon 2040, alors qu'il peut être déterminant en 2100.

# Horizons temporels et période de référence

## Considérant que :

- les scénarios de changements climatiques comparent la climatologie d'une période passée, appelée la période de référence, et celle d'une période future, appelée l'horizon temporel,

## Il est recommandé :

- d'utiliser une période de référence et des horizons temporels suffisamment longs pour estimer les changements aux normales climatiques et ainsi tempérer l'influence des fluctuations naturelles du climat. Des moyennes sur une période de 30 ans sont recommandées.
  - Période de référence : La normale climatique couvrant le climat actuel/passé récent recommandée par l'OMM est 1991-2020;
  - Horizons temporels : Des périodes de 30 ans sont recommandées, par exemple, les période 2021 à 2050, 2041-2070, 2071-2100 pour représenter des horizons à court, moyen et long terme.

## Une période de référence fondée sur des standards

L'OMM recommande des périodes de 30 ans pour calculer les normales climatiques. Cette durée est suffisamment longue pour correctement prendre en compte la variabilité interannuelle tout en évitant que des années anormales, par exemple causées par des épisodes El-Niño intenses, faussent les statistiques du climat. Traditionnellement, il était raisonnable de supposer que le climat était stationnaire sur cette période de 30 ans, ce qui simplifie grandement le traitement statistique. Or, l'intensification du réchauffement des températures porte de plus en plus atteinte à l'hypothèse de stationnarité. On peut alors se tourner vers des statistiques dites non-stationnaires, ou à l'instar du GIEC, raccourcir la fenêtre temporelle à une durée de 20 ans. D'ailleurs, le GIEC multiplie depuis plusieurs années les comparaisons entre des horizons de 20 ans, notamment pour les variables susceptibles de subir les changements les plus marqués.

Si des périodes de 30 ou 20 ans prennent raisonnablement en compte la variabilité interannuelle, elles sont trop courtes pour inclure convenablement la variabilité décennale. La contribution de cette composante de la variabilité peut s'avérer importante pour certaines variables ou indicateurs, en plus de différer d'un endroit à l'autre sur le territoire. Sous l'effet de la variabilité décennale, il est commun de voir une tendance changer de signe selon la fenêtre temporelle considérée. Pour ces raisons, il faut considérer avec beaucoup de circonspection des tendances calculée sur des périodes plus courtes que 50 ans et, résister à la tentation d'extrapoler une tendance sur une période plus longue que celle utilisée pour son calcul. De plus, il faut garder en tête qu'avec l'intensification du réchauffement des températures, il serait de plus en plus difficile de représenter l'évolution de certaines variables et indicateurs à l'aide d'une tendance linéaire.

## Des horizons temporels adaptés aux enjeux

Dans une étude d'impacts des changements climatiques, il est important de spécifier quels scénarios d'émission et quelles années sont à l'étude. Cette période, souvent appelée "horizon temporel" (voir Figure 4) doit être déterminée en fonction des questions auxquelles l'analyste tente de répondre (nature des mesures à mettre en place, durée de vie des systèmes, niveau de facilité pour ajuster les systèmes en place, etc.).

Par exemple, une étude sur le transport maritime dans l'Arctique s'intéressera aux concentrations de glace de mer d'ici à 2035 et optera pour une analyse allant de 2021 à 2050, centrée sur la décennie d'intérêt. La conception du système de climatisation d'un bâtiment pourra considérer la température de l'air maximale estivale jusqu'en 2060 en raison de l'horizon temporel des réfections majeures de ce type de système. Un autre exemple serait l'évaluation de la sécurité d'un barrage, qui exigera d'estimer le risque de débordement jusqu'en 2100 ou même au-delà.

La confiance attribuée aux projections des modèles dépend intimement de l'horizon considéré. En effet, il y a peu d'incertitudes sur la trajectoire des concentrations de GES et autres forçages d'ici à 2030, alors que ces incertitudes sont considérables à l'horizon 2100. De plus, puisque les modèles diffèrent dans la manière de simuler la réponse du climat aux GES, les divergences entre les modèles tendent à s'accroître à mesure que les concentrations augmentent. Sans surprise, la confiance dans les projections diminue lorsque l'échéance est lointaine.

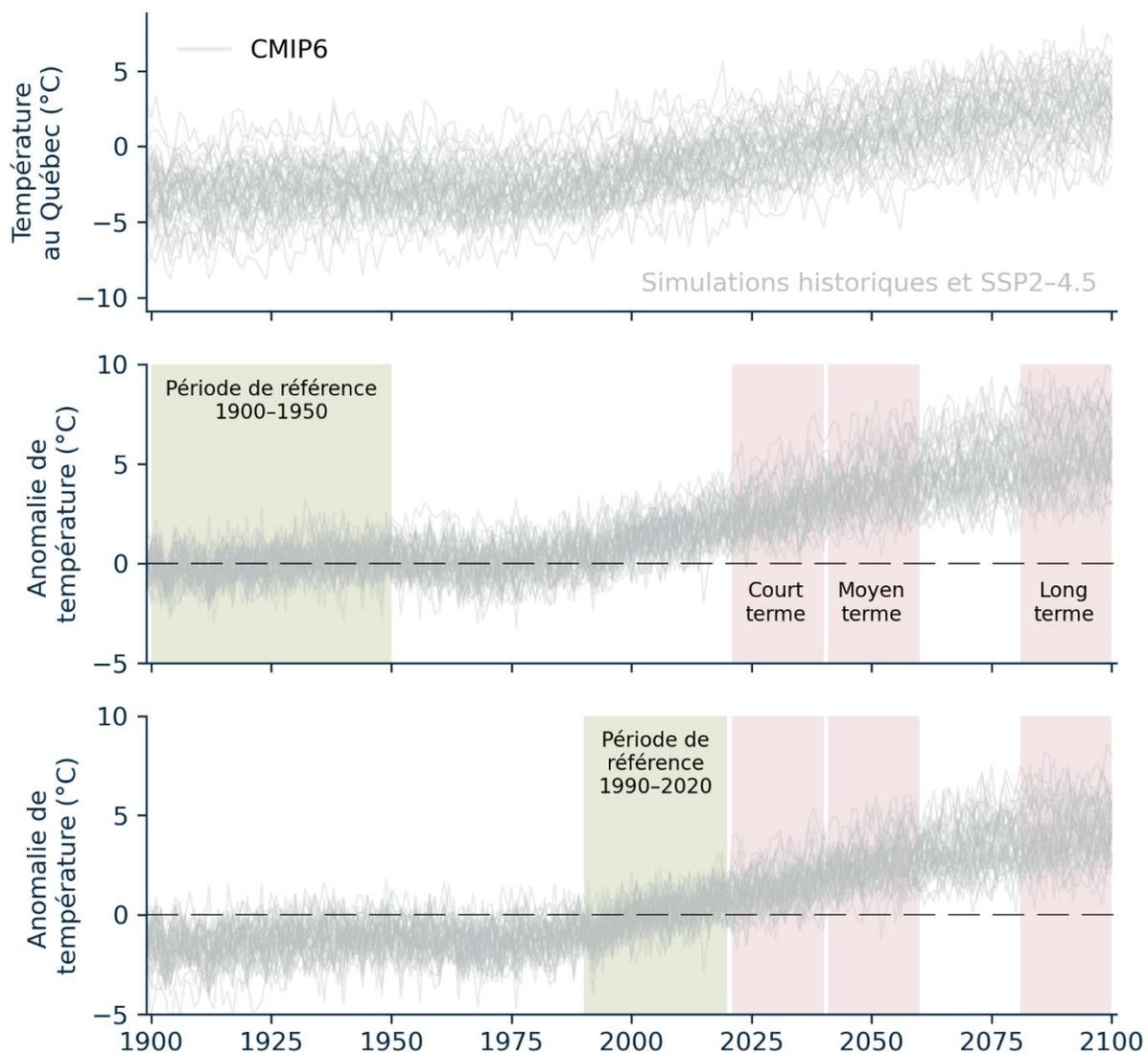


Figure 4 Le panneau supérieur présente la température moyenne du Québec simulée par 46 modèles climatiques de l'ensemble CMIP6 suivant le scénario SSP2-4.5. Le panneau du milieu présente l'anomalie de température, calculée en choisissant la période 1900-1950 comme référence, alors que celui du bas utilise la période 1990 –2020. La figure illustre l'influence du choix de la période de référence sur la moyenne et la dispersion des anomalies.

# Le choix des centiles

## Considérant que :

- les centiles sont des valeurs correspondant à un rang dans un échantillon ou une distribution statistique;
- la distribution des résultats de simulations climatiques pour un scénario d'émission donné illustre à la fois la dispersion dues aux différences entre modèles, et les effets de la variabilité naturelle;
- les 10<sup>e</sup>, 25<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup>, 75<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles d'un ensemble de simulations sont les valeurs souvent représentées dans les projections climatiques;
- les centiles permettent de considérer des conditions rares et parfois à forts impacts (10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup>);
- sous l'hypothèse que la distribution des modèles représente bien les incertitudes, le 50<sup>e</sup> centile a une chance sur deux d'être dépassé pour un scénario de GES donné;

## Il est recommandé de :

- prendre en considération la fourchette ou l'ensemble des projections, surtout si les conditions de forts impacts sont importantes dans le contexte de prise de décision;
- choisir le centile en fonction de la tolérance au risque du décideur et de la sensibilité des mesures et actions à l'ampleur des changements;

Les ensembles de modèles climatiques peuvent inclure plusieurs dizaines de modèles différents, chacun produisant une ou plusieurs simulations. Il est possible de visualiser l'évolution temporelle d'un tel ensemble en illustrant chaque simulation par une ligne. Ce type de graphique "spaghetti" peut toutefois devenir très chargé, et le niveau de détail nuire à sa compréhension. Il est d'usage de le simplifier en traçant la moyenne de l'ensemble, accompagnée de centiles illustrant sa dispersion. Le choix des centiles n'est pas normé et dépend de l'application. À titre d'exemple, Ouranos utilise les 10<sup>e</sup>, 25<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup>, 75<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles sur sa plateforme « Portraits climatiques », mais une autre application pourrait choisir les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> centiles. Lorsqu'on utilise la fourchette des 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles, l'enveloppe des centiles décrit le comportement de 80% des modèles, alors que 50% des modèles sont représentés entre les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> centiles.

Si choisir une fourchette de centiles plus large permet de représenter une plus grande fraction des modèles, les valeurs des centiles près de 0 ou 1 sont toutefois plus bruitées que les centiles près de la médiane. On rappelle également que les séries temporelles de centiles ne correspondent pas aux résultats d'un modèle en particulier, ce sont plutôt des statistiques de l'ensemble. Les valeurs du 90<sup>e</sup> centile pour 2050 et 2051 peuvent donc provenir de modèles différents.

Puisque l'ensemble des modèles ne forme pas un échantillon représentatif de la réalité, il n'est pas possible d'interpréter au sens strict le 90<sup>e</sup> centile comme une valeur ayant une chance sur 10 d'être dépassée dans le monde réel (voir la Figure 7). Les centiles d'un ensemble climatique sont seulement une approximation de la probabilité d'occurrence. La présentation des centiles permet néanmoins d'apprécier l'incertitude de modélisation affectant les résultats.

Dans le cas où un centile doit être choisi pour la mise en place d'une solution d'adaptation aux changements climatiques, on doit faire appel au contexte de décision. Quelle est la sensibilité des mesures à l'ampleur des changements climatiques? Quelle est la tolérance aux risques? Quels sont les coûts et bénéfices associés? Comment la mesure d'adaptation sera acceptée par le milieu?

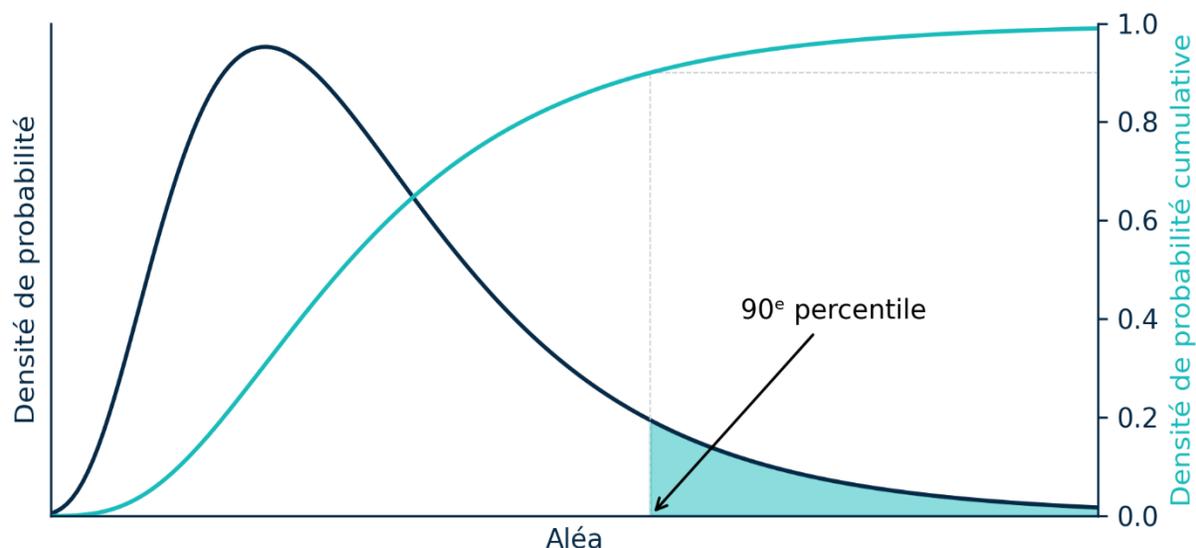


Figure 7 Illustration conceptuelle de la distribution d'un aléa via sa densité de probabilité et sa densité de probabilité cumulative. En théorie, le 90<sup>e</sup> centile correspond à la valeur d'aléa ayant 1 chance sur 10 d'être excédée. En pratique, rien ne garantit que l'échantillon de modèles soit une représentation juste de la réalité.

Des centiles de changements se retrouvent souvent dans la présentation de projections climatiques. Par exemple, pour un scénario de GES donné, il est possible de voir le 10<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles du changement de précipitations. Ces centiles correspondent au rang des différents modèles qui forment un ensemble. Autrement dit, le changement de précipitation est d'abord calculé pour chaque modèle de climat, par la suite les valeurs sont ordonnées en ordre croissant, et enfin la valeur située au rang le plus près du centile souhaité est extraite.

L'interprétation d'une carte de quantiles est délicate car on illustre généralement le centile calculé pour chaque point de grille indépendamment des autres. La valeur pour un point peut donc venir d'un modèle différent de celui du point voisin. Les valeurs représentées n'ayant pas de cohérence spatiale, on ne doit pas faire de moyenne spatiale des valeurs de centiles. L'approche juste consiste à calculer, pour chaque modèle, la moyenne spatiale, puis d'estimer le centile sur ces moyennes.

# Niveaux de réchauffement planétaire

Le rapport spécial du GIEC « Réchauffement planétaire de 1,5C » décrit les impacts climatiques associées à un réchauffement global de 1.5°C et 2°C, ainsi que les stratégies de réduction des émissions compatibles avec ces niveaux de réchauffement. Cette description des impacts par niveau de réchauffement permet de contraster les effets des changements climatiques. Par exemple, dans un monde à 2°C, l'océan Arctique serait libre de glace une année sur 10, et une année sur 100 dans un monde à 1.5°C (Hoegh-Guldberg et al. 2018). Cette approche a été reprise dans le dernier rapport du groupe de travail II du GIEC, qui décline les impacts climatiques selon l'atteinte d'un réchauffement de 1,5, 2, 3, et 4°C (voir l'exemple à la Figure 8).

Une telle approche a l'avantage d'être, à première vue, indépendante du temps. C'est-à-dire qu'elle décrit les impacts d'un monde 2°C plus chaud sans savoir quand cela se produira. En pratique, cela permet de combiner l'ensemble des simulations produites, peu importe le scénario d'émission, les années et la sensibilité climatique des modèles. En fait, les niveaux de réchauffement permettent de contourner les enjeux méthodologiques associés au choix de scénario et à la pondération des modèles abordée plus haut (Comment aborder le problème des modèles chauds avec CMIP6?).

Au plan des communications, elle permet de discuter des impacts des changements climatiques sans décrire les différents scénarios d'émissions, qui constituent parfois un point de discordance dans un contexte décisionnel. De plus, étant largement utilisé par le GIEC, on peut s'attendre à ce que cette manière de présenter les impacts soit familière au public.

Un inconvénient est toutefois l'absence de séries temporelles continues entre aujourd'hui et un niveau de réchauffement donné, une exigence typique des analyses économiques. Aussi, dans un contexte d'adaptation, le choix du niveau de réchauffement se fera vraisemblablement en fonction de l'horizon temporel, et donc, implicitement du scénario d'émission. L'approche n'est donc, en pratique, pas tout à fait indépendante du temps et des scénarios. Enfin, l'approche par niveau de réchauffement étant relativement récente, il existe moins d'expérience terrain sur son utilisation en appui aux décisions d'adaptation.

Ceci étant dit, l'approche par niveau de réchauffement revêt un grand intérêt pour certaines applications comme la communication pour le grand public, ou pour guider des normes de conceptions concernant des enjeux bien représentés par ceux-ci (chauffage et climatisation, pergélisol, couverture de neige). À l'inverse, il est déconseillé d'y faire appel pour les questions de risques en régions côtières ainsi que les analyses qui demandent des séries temporelles en continu.

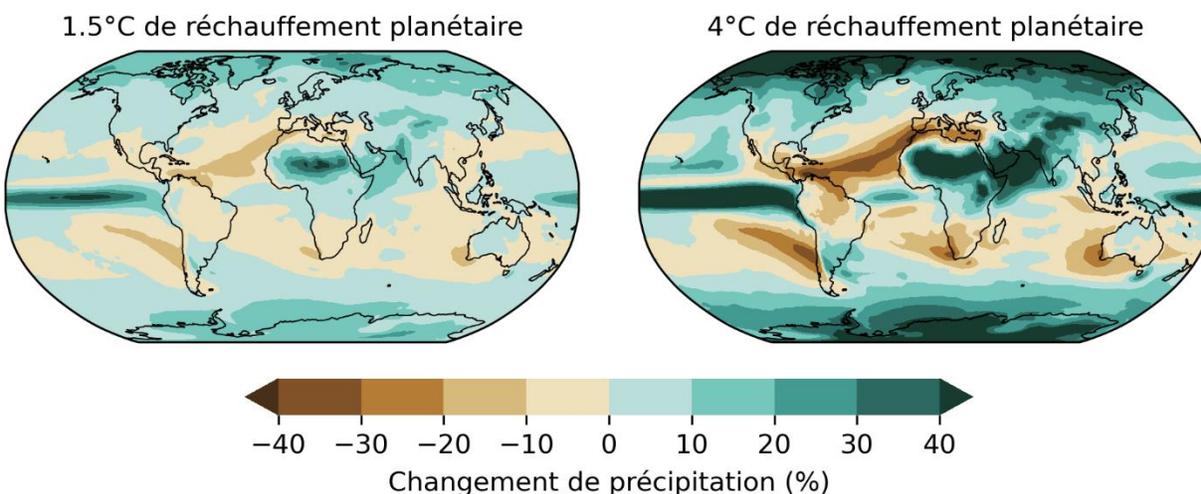


Figure 8 Changement simulé des précipitations moyennes annuelles (%) par rapport à 1950–1900 pour un réchauffement planétaire de 1,5°C et 4°C. Inspiré de la figure 5 du *Résumé à l'intention des décideurs* (IPCC 2021). Données de Fischer and Hauser. (2021).

Pour estimer les impacts sous forme de niveaux de réchauffement, toutes les simulations de tous les scénarios et tous les modèles sont d'abord mis en commun. Pour chaque simulation, on calcule la moyenne globale de température sur une fenêtre mobile centrée de 20 ans, puis, pour chaque niveau de réchauffement, on identifie l'année à laquelle ce niveau est atteint. Pour chaque niveau, les 20 ans de simulations de tous les modèles qui l'atteignent sont combinés, formant un ensemble ayant atteint le même niveau de réchauffement. Les années utilisées varient en fonction du scénario de GES utilisé et de la sensibilité climatique des modèles. Cette approche est désignée comme « transiente », faisant référence au fait que le climat ne s'est pas stabilisé à ce niveau de réchauffement. Il est possible de relier les dates approximatives auxquelles ces niveaux de réchauffement sont atteints en fonction des différents scénarios d'émission de GES (Tableau Cross-Chapter Box CLIMATE.1 , Rawshan Ara Begum et al. 2022). Une autre approche dite « à l'équilibre » choisit une période où le climat s'est stabilisé à un niveau de réchauffement donné.

# Bibliographie

- Fischer, E., and M. Hauser. 2021. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. <https://doi.org/10.5285/2787230b963942009e452255a3880609>.
- Hausfather, Zeke, Kate Marvel, Gavin A. Schmidt, John W. Nielsen-Gammon, and Mark Zelinka. 2022. 'Climate Simulations: Recognize the "Hot Model" Problem'. *Nature* 605 (7908): 26–29. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2>.
- Hoegh-Guldberg, Ove, Marco Bindi, Sally Brown, Ines Camilloni, Arona Diedhiou, Riyanti Djalante, Kristie L Ebi, et al. 2018. 'Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems'. In *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, edited by Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Jim Skea, Priyadarshi R Shukla, Anna Pirani, et al. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- Huard, David, Jeremy Fyke, Iñigo Capellán-Pérez, H. Damon Matthews, and Antti-Ilari Partanen. 2022. 'Estimating the Likelihood of GHG Concentration Scenarios From Probabilistic Integrated Assessment Model Simulations'. *Earth's Future* 10 (10). <https://doi.org/10.1029/2022EF002715>.
- IPCC. 2021. 'Summary for Policymakers'. Edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Rawshan Ara Begum, R., R. Lempert, T.A. Benjaminsen E. Ali, T. Bernauer, W. Cramer, X. Cui, K. Mach, et al. 2022. 'Point of Departure and Key Concepts'. Edited by H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, et al. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.003>.
- Riahi, K, R Schaeffer, J Arango, K Calvin, C Guivarch, T Hasegawa, K Jiang, et al. 2022. 'Mitigation Pathways Compatible with Long-Term Goals.' In *IPCC, 2022: Climate {Change} 2022: Mitigation of {Climate} {Change}. {Contribution} of {Working} {Group} {III} to the {Sixth} {Assessment} {Report} of the {Intergovernmental} {Panel} on {Climate} {Change}*, edited by P R Shukla, J Skea, R Slade, A Al Khourdajie, R Diemen, D McCollum, M Pathak, et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>.
- Sherwood, S C, M J Webb, J D Annan, K C Armour, P M Forster, J C Hargreaves, G Hegerl, et al. 2020. 'An Assessment of Earth's Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence'. *Reviews of Geophysics* 58 (4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>.
- Zelinka, Mark D, Timothy A Myers, Daniel T McCoy, Stephen PoChedley, Peter M Caldwell, Paulo Ceppi, Stephen A Klein, and Karl E Taylor. 2020. 'Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models'. *Geophysical Research Letters* 47 (1). <https://doi.org/10.1029/2019gl085782>.



550, rue Sherbrooke Ouest, Tour Ouest, 19<sup>e</sup> étage  
Montréal (Québec) H3A 1B9

T. 514 282-6464  
@. info@ouranos.ca

[ouranos.ca](http://ouranos.ca)