



Examen critique des impacts des émissions de gaz à effet de serre sur le climat américain

Groupe de travail sur le climat

Département de l'Énergie des États-Unis

23 juillet 2025

Examen critique des impacts des émissions de gaz à effet de serre sur le climat américain

Rapport destiné au secrétaire américain à l'Énergie Christopher Wright

23 juillet 2025

Groupe de travail sur le climat :

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

Ce rapport est diffusé par le ministère de l'Énergie. À ce titre, il a été préparé conformément à la section 515 de la loi sur les crédits budgétaires pour le Trésor et l'administration générale pour l'exercice 2001 (loi publique 106-554) et aux directives sur la qualité de l'information publiées par le ministère de l'Énergie.

Copyright© 2025 États-Unis

Citation suggérée :

Groupe de travail sur le climat (2025) Examen critique des impacts des émissions de gaz à effet de serre sur le Climat aux États-Unis. Washington DC : Département de l'Énergie, 23 juillet 2025

Les notes du traducteur entre crochets [] visent à faciliter la lecture.

La critique de certaines parties du rapport sur le cycle du carbone est faite dans un document annexé.

AVANT-PROPOS DU SECRÉTAIRE

Énergie, Intégrité et la Puissance du Potentiel Humain

Au cours de ma vie, j'ai eu le privilège de travailler comme entrepreneur dans le domaine de l'énergie dans divers secteurs, notamment le nucléaire, la géothermie et le gaz naturel, et j'occupe aujourd'hui le poste de secrétaire à l'Énergie sous la présidence de Donald Trump. Mais avant tout, je suis un physicien qui considère l'énergie moderne comme un véritable miracle. Elle alimente tous les aspects de la vie moderne, est le moteur de toutes les industries et a fait des États-Unis une puissance énergétique capable d'alimenter le progrès mondial.

L'essor de l'humanité au cours des deux derniers siècles est une histoire qui mérite d'être célébrée. Pourtant, on nous répète sans cesse que les systèmes énergétiques qui ont rendu ce progrès possible constituent aujourd'hui une menace existentielle. Selon certains, nous devons abandonner rapidement les combustibles fossiles, sous peine de détruire la planète.

Ce point de vue mérite d'être examiné de près. C'est pourquoi j'ai commandé ce rapport pour encourager un débat plus réfléchi et plus scientifique sur le changement climatique et l'énergie. Fort de mon expérience technique, j'ai examiné les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, les évaluations du gouvernement américain et la littérature universitaire. J'ai également consulté de nombreux climatologues, dont les auteurs de ce rapport.

J'ai constaté que les médias déforment souvent les données scientifiques. Beaucoup de gens en retirent une vision exagérée ou incomplète du changement climatique. Afin d'apporter clarté et équilibre, j'ai demandé à une équipe diversifiée d'experts indépendants d'examiner de manière critique l'état actuel de la science climatique, en mettant l'accent sur son lien avec les États-Unis.

Je n'ai pas sélectionné ces auteurs parce que nous sommes toujours d'accord, loin de là. En fait, ils ne sont peut-être pas toujours d'accord entre eux. Mais je les ai choisis pour leur rigueur, leur honnêteté et leur volonté d'élever le débat. Je n'ai exercé aucun contrôle sur leurs conclusions. Ce que vous lirez, ce sont leurs propres mots, tirés des meilleures données et évaluations scientifiques disponibles.

J'ai examiné attentivement ce rapport et je pense qu'il reflète fidèlement l'état actuel de la science climatique. Néanmoins, de nombreux lecteurs pourraient être surpris par ses conclusions, qui diffèrent considérablement du discours dominant. Cela montre à quel point le débat public s'est éloigné de la science elle-même.

Pour corriger le tir, nous avons besoin d'un débat ouvert, respectueux et éclairé. C'est pourquoi j'invite le public à commenter ce rapport. Un examen honnête et la transparence scientifique doivent être au cœur de notre élaboration des politiques.

Le changement climatique est réel et mérite notre attention. Mais il ne constitue pas la plus grande menace à laquelle l'humanité est confrontée. La plus grande menace est la pauvreté énergétique mondiale. En tant que personne qui accorde une grande importance aux données, je sais que l'amélioration des conditions de vie dépend de l'accès à une énergie fiable et abordable. Le changement climatique est un défi, pas une catastrophe. Mais des politiques malavisées fondées sur la peur plutôt que sur des faits pourraient véritablement mettre en danger le bien-être humain.

Nous sommes à l'aube d'une nouvelle ère de leadership pour l'énergie. Si nous encourageons l'innovation au lieu de la freiner, les États-Unis peuvent devenir le leader mondial dans le domaine des énergies propres et abondantes, ce qui permettra de sortir des milliards de personnes de la pauvreté, de renforcer notre économie et d'améliorer notre environnement.

RÉSUMÉ pour décideurs

Ce rapport passe en revue les certitudes et les incertitudes scientifiques concernant l'impact actuel et futur des émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz à effet de serre sur le climat, les phénomènes météorologiques extrêmes et certains indicateurs du bien-être social aux États-Unis. Ces émissions augmentent la concentration de CO₂ dans l'atmosphère par le biais d'un cycle du carbone complexe et variable, dans lequel une partie du CO₂ supplémentaire persiste dans l'atmosphère pendant des siècles.

Des concentrations élevées de CO₂ favorisent directement la croissance des plantes, contribuant ainsi à « *verdir* » la planète et à augmenter la productivité agricole à l'échelle mondiale [Section 2.1, Chapitre 9]. Elles rendent également les océans moins alcalins (abaissent le pH). Cela pourrait nuire aux récifs coralliens, bien que le récent rebond de la Grande Barrière de Corail suggère le contraire [Section 2.2].

Le dioxyde de carbone agit également comme un gaz à effet de serre, exerçant une influence réchauffante sur le climat et les conditions météorologiques [Section 3.1]. Les projections relatives aux changements climatiques nécessitent des scénarios sur les émissions futures. Il existe des preuves que les scénarios largement utilisés dans la littérature sur les impacts ont surestimé les tendances observées et probables des émissions futures [Section 3.1].

Les quelques dizaines de modèles climatiques mondiaux disponibles fournissent peu d'indications sur la manière dont le climat réagit à une augmentation du CO₂, le réchauffement moyen de la surface du globe en cas de doublement de la concentration de CO₂ variant entre 1,8 °C et 5,7 °C [Section 4.2]. Des méthodes fondées sur des données donnent une fourchette plus basse et plus étroite [Section 4.3]. Les modèles climatiques mondiaux ont généralement tendance à donner des valeurs trop fortes des températures des dernières décennies avec un réchauffement excessif à la surface et une amplification excessive du réchauffement dans la basse et la moyenne troposphère [sections 5.2-5.4]. La combinaison de modèles trop sensibles et de scénarios extrêmes peu plausibles pour les émissions futures donne lieu à des projections exagérées du réchauffement futur.

La plupart des phénomènes météorologiques extrêmes aux États-Unis ne montrent pas de tendances de long terme. Les affirmations selon lesquelles la fréquence ou l'intensité des ouragans, des tornades, des inondations et des sécheresses aurait augmenté ne sont pas étayées par les données historiques américaines [sections 6.1 à 6.7]. En outre, les pratiques de gestion forestière sont souvent négligées dans l'évaluation des changements dans l'activité des feux de forêt [section 6.8]. Le niveau de la mer a augmenté d'environ 20 cm depuis 1900 (en moyenne mondiale) mais avec des variations régionales importantes dues principalement à la subsidence locale des terrains ; les mesures des marégraphes américains ne montrent globalement aucune accélération notable de l'élévation du niveau de la mer au-delà du taux moyen historique [chapitre 7].

L'attribution du changement climatique ou des phénomènes météorologiques extrêmes aux émissions humaines de CO₂ est remise en question par la variabilité naturelle du climat, les limites des données et les lacunes inhérentes aux modèles [chapitre 8]. De plus, la contribution de l'activité solaire au réchauffement de la fin du XXe siècle pourrait être sous-estimée [section 8.3.1].

Les modèles et l'expérience suggèrent que le réchauffement induit par le CO₂ pourrait être moins dommageable sur le plan économique qu'on ne le croit généralement, et que des politiques d'atténuation [mitigation] trop agressives pourraient s'avérer plus néfastes que bénéfiques [chapitres 9, 10, section 11.1]. Les estimations du coût social du carbone, qui tentent de quantifier les dommages économiques causés par les émissions de CO₂ sont très sensibles aux hypothèses qui les sous-tendent et fournissent donc des informations indépendantes limitées [section 11.2].

Des mesures politiques américaines ne peuvent avoir que des effets directs indétectables sur le climat mondial et leurs effets ne se feront sentir qu'à très long terme [chapitre 12].

PRÉFACE

Ce document a vu le jour fin mars 2025, lorsque le Secrétaire Wright a réuni un groupe indépendant chargé de rédiger un rapport sur les questions de science climatique pertinentes pour l'élaboration des politiques énergétiques, y compris les preuves et les perspectives qui remettent en question le consensus dominant. Nous avons accepté d'entreprendre ce travail à condition qu'il n'y ait aucune supervision éditoriale de la part du Secrétaire, du ministère de l'Énergie ou de tout autre personnel du gouvernement. Cette condition a été respectée tout au long du processus et l'équipe de rédaction a travaillé en toute indépendance.

Le groupe a commencé ses travaux début avril, avec pour échéance le 28 mai afin de remettre un projet pour examen interne au DOE. Ce délai court et la nature technique du sujet ne nous ont pas permis d'examiner tous les thèmes de manière exhaustive. Nous avons donc choisi de nous concentrer sur les thèmes traités par une littérature scientifique sérieuse et établie, qui sont pertinents pour notre mission, qui sont minimisés ou absents des rapports d'évaluation récents, et qui relèvent de notre compétence.

Bien que le rapport se veuille accessible à un public non spécialisé, nous avons omis certaines informations introductives ou explicatives qui peuvent être facilement trouvées ailleurs. Nous n'avons pas non plus cherché à passer en revue l'ensemble de la littérature relative aux sujets traités. Nous nous sommes concentrés autant que possible sur la littérature publiée depuis 2020 et avons référencé les précédents rapports d'évaluation du GIEC et le NCA [National Climate Assessment]. Nous avons également utilisé, dans la mesure du possible, des données allant jusqu'en 2024.

L'équipe de rédaction remercie le secrétaire Wright de lui avoir donné l'occasion de préparer ce rapport et de son soutien à une évaluation scientifique indépendante et à un débat scientifique ouvert. Nous sommes également reconnaissants à une équipe d'évaluateurs anonymes du DOE et des laboratoires nationaux dont les contributions ont permis d'améliorer le rapport final.

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKittrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

PARTIE I : L'INFLUENCE DIRECTE DE L'HOMME SUR LES ÉCOSYSTÈMES ET SUR LE CLIMAT

1 LE DIOXYDE DE CARBONE EN TANT QUE POLLUANT

Résumé du chapitre :

Le dioxyde de carbone (CO₂) diffère à bien des égards des polluants atmosphériques dits « Criteria Air Pollutants ». Il n'affecte pas la qualité de l'air local et n'a aux concentrations ambiantes aucune incidence toxicologique sur l'homme. Il n'est préoccupant qu'en raison de ses effets sur le climat mondial.

La loi sur la qualité de l'air (Clean Air Act) de 1970 a défini six polluants atmosphériques dits « Criteria Air Pollutants » et soumis à réglementation (EPA) : les particules, l'ozone troposphérique, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, le plomb et le monoxyde de carbone. En 2007, la Cour suprême a statué que les gaz à effet de serre (dont le CO₂) étaient également des « polluants » soumis à la réglementation en vertu de la loi sur la qualité de l'air (Mass. c. EPA, 2007). Si la définition du terme « polluant » est en fin de compte une question juridique, il existe des distinctions scientifiques importantes entre le CO₂ et les polluants atmosphériques « Criteria Air Pollutants ». Ces derniers sont soumis à une réglementation car ils causent des problèmes locaux en fonction de leur concentration, notamment des nuisances (odeurs, visibilité), des dommages aux plantes et, à des niveaux d'exposition suffisamment élevés, des effets toxicologiques chez l'homme. En revanche, le CO₂ est inodore, n'affecte pas la visibilité et n'a pas d'effets toxicologiques à des niveaux ambiants. Il est présent naturellement dans l'atmosphère et constitue un élément essentiel de la respiration humaine et végétale. Le CO₂ est essentiel à la photosynthèse des plantes et des niveaux plus élevés sont bénéfiques pour la végétation. À cet égard, le CO₂ est similaire à la vapeur d'eau.

L'air ambiant extérieur contient aujourd'hui environ 430 parties par million (ppm) de CO₂, avec une augmentation d'environ 2 ppm par an. L'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) des États-Unis publie des directives pour les lieux de travail intérieurs où des concentrations élevées de CO₂ peuvent être rencontrées, par exemple lorsque de la glace carbonique est utilisée. La limite d'exposition admissible est de 5 000 ppm sur 8 heures (OSHA, 2024). Allen *et al.* (2015) ont rapporté des preuves d'une diminution des performances dans certaines tâches cognitives chez des travailleurs occupant des bureaux cloisonnés lorsqu'ils étaient exposés à des concentrations de CO₂ supérieures à 1 000 -1 500 ppm. Ces concentrations sont bien supérieures à toutes les valeurs plausibles pour l'air ambiant extérieur jusqu'à la fin du 22^{ème} siècle.

La quantité croissante de CO₂ dans l'atmosphère influence directement le système terrestre en favorisant la croissance des plantes (verdissement global), ce qui améliore les rendements agricoles, et en neutralisant l'alcalinité des océans. Mais la principale préoccupation concernant le CO₂ vient de son rôle de gaz à effet de serre (GES) qui modifie l'équilibre énergétique de la Terre et réchauffe la planète. La manière dont le climat réagira à cette influence est une question complexe qui occupera une grande partie du présent rapport.

Références

- Allen, J., Macnaughton, P., Satish, U., *et al.* (2015). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments.. *Environmental Health Perspectives*. 124. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Massachusetts c. Environmental Protection Agency, 549 U.S. 497 (2007). <https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120>
- U.S. Environmental Protection Agency. (Agence américaine pour la protection de l'environnement) Critères relatifs aux polluants atmosphériques. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- U.S. Occupational Safety and Health Administration. (2024). OSHA occupational chemical database: Carbon dioxide. <https://www.osha.gov/chemicaldata/183> <https://www.osha.gov/chemicaldata/183>

2 IMPACTS DIRECTS DU CO₂ SUR L'ENVIRONNEMENT

Résumé de ce chapitre :

Le CO₂ favorise la photosynthèse et améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes, favorisant ainsi leur croissance. Le verdissement mondial dû en partie à l'augmentation des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère est bien établi sur tous les continents.

L'absorption de CO₂ dans l'eau de mer rend les océans moins alcalins. La baisse récente du pH se situe dans la fourchette de variabilité naturelle sur des échelles de temps millénaires. La plupart des formes de vie océanique ont évolué lorsque les océans étaient légèrement acides. La baisse du pH pourrait avoir des effets néfastes sur les coraux, même si la Grande Barrière de Corail australienne a connu une croissance considérable ces dernières années.

2.1 Le CO₂ comme facteur contribuant au verdissement mondial

L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a un effet positif important en favorisant la croissance des plantes grâce à l'amélioration de la photosynthèse et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Cela est évident dans le phénomène de « verdissement mondial » présenté ci-dessous, ainsi que dans l'amélioration des rendements agricoles évoquée au chapitre 10. Ici nous nous concentrons uniquement sur la fertilisation par le CO₂ ; les recherches sur les effets combinés des changements de la température et des précipitations sont abordées au chapitre 10.

2.1.1 Mesure du verdissement mondial

Le « *verdissement* » désigne l'augmentation de la fraction de la surface terrestre recouverte par des végétaux. Il peut être quantifié à l'aide de l'« *indice de surface foliaire* » (LAI, Leaf Area Index) mesuré par satellite. De nombreuses études menées au cours de la dernière décennie ont confirmé une tendance au verdissement mondial (augmentation du LAI) attribuable en partie à l'augmentation des niveaux de CO₂. Zhu *et al.* (2016) ont été parmi les premiers à signaler que le verdissement mondial était détectable à l'aide de capteurs satellitaires. De 1982 à 2011, ils ont détecté un verdissement sur 25 % à 50 % de la Terre, contre un « brunissement » sur seulement 4 %, et ont attribué 70 % du verdissement à l'augmentation des niveaux de CO₂ (voir figure 2.1). Parmi les autres facteurs contributifs figurent les changements d'affectation des terres, le réchauffement et l'azote. La contribution du CO₂ est plus importante dans les régions tropicales, tandis que d'autres facteurs jouaient un rôle plus prépondérant dans la partie continentale des États-Unis [CONUS].

Zeng *et al.* (2017) ont confirmé la tendance au verdissement, notant qu'en trente ans, celui-ci avait augmenté de 8 % la superficie foliaire mondiale et qu'il atténue le réchauffement. Le verdissement a été observé à l'échelle mondiale. Chen *et al.* (2019) montrent qu'en Chine et en Inde, il est en grande partie dû aux changements dans la gestion des terres. Ainsi, alors que la Chine ne représente que 6,6 % de la superficie végétalisée mondiale, elle compte pour 25 % de l'augmentation nette mondiale du Leaf Area Index. Piao *et al.* (2020) ont noté que le verdissement était même observable dans l'Arctique. Les effets de la fertilisation par le CO₂ sont influencés par la température locale et par la disponibilité des nutriments et de l'eau, qui tous varient selon les régions.

Alors que les modèles végétaux prédisent une augmentation de la photosynthèse en réponse à l'augmentation du CO₂, Haverd *et al.* (2020) ont rapporté un taux de fertilisation par le CO₂ beaucoup plus élevé que les prévisions des modèles. En d'autres termes, la fertilisation par le CO₂ a entraîné une augmentation de 30 % de la photosynthèse mondiale observée depuis 1900, contre 17 % prévu par les modèles

végétaux. Si cela s'avère exact, cela indiquerait que les modèles mondiaux des impacts socio-économiques de l'augmentation du CO₂ ont sous-estimé les avantages pour les cultures et l'agriculture. Keenan et al (2023) ont toutefois estimé un taux de fertilisation plus faible, plus conforme aux modèles. Le lien entre la fertilisation par le CO₂ et l'agriculture sera examiné au chapitre 9. [NdT : Lai et al. 2024¹ complète l'estimation de Haverd (143 Mrd t-C en 2016) à 153 Mrd t-C en 2024]

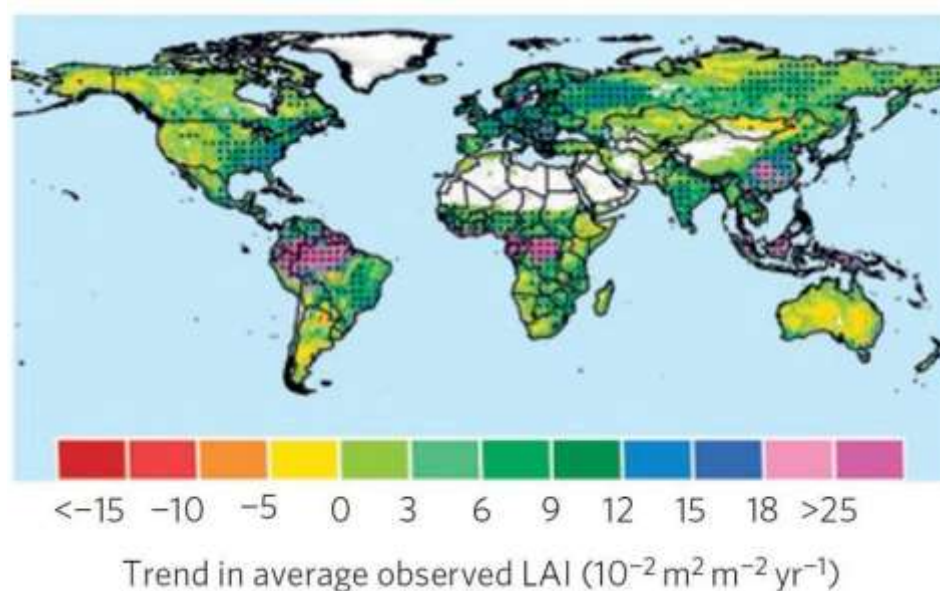


Figure 2.1 : Tendances de l'indice de surface foliaire (LAI) moyen. Source : Zhu *et al.* 2016 Figure 3.

Piao et al. (2020) et Chen *et al.* (2024) indiquent que la tendance au verdissement se poursuit sans signe de ralentissement et que la fertilisation par le CO₂ reste le principal facteur déterminant

2.1.2 Photosynthèse et niveaux de CO₂

Les plantes produisent de la biomasse grâce à la *photosynthèse*, un processus qui transforme le dioxyde de carbone, l'eau et la lumière en sucre. L'enzyme végétale responsable de la photosynthèse est la ribulose-1,5-bisphosphatecarboxylase/oxygénase ou « Rubisco ». La photosynthèse est déclenchée lorsque le CO₂ est disponible à la surface de l'enzyme Rubisco, où il est converti en une molécule à 3 atomes de carbone, puis incorporé dans la masse végétale. Ce processus est appelé « cycle C3 ».

On estime que la rubisco a évolué il y a environ 3 milliards d'années. Au cours des temps géologiques, les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère terrestre étaient généralement plusieurs fois supérieurs à ceux d'aujourd'hui. Les niveaux estimés de CO₂ d'il y a environ 400 millions d'années sont entre 2 000 et 4 000 ppm et pendant la majeure partie de la période comprise entre 200 et 50 millions d'années se situaient à 1 000 ppm ou plus (Berner 2006, Judd *et al.* 2024). Au cours des 35 derniers millions d'années, le niveau de CO₂ atmosphérique a diminué de façon constante, tombant jusqu'à 170 ppm pendant les glaciations (Gerhart et Ward 2010).

Bien que le taux actuel du CO₂ soit élevé par rapport à certaines périodes précédentes, les données géologiques montrent que les plantes et les animaux ont évolué dans des conditions de CO₂ beaucoup plus élevées qu'aujourd'hui.

¹ [Lai, 2024] Jiameng Lai, Linda M. J. Kooijmans, Wu Sun, Danica Lombardozzi, J. Elliott Campbell, Lianhong Gu, Yiqi Luo, Le Kuai, Ying Sun. *Terrestrial photosynthesis inferred from plant carbonyl sulfide uptake*. Nature, 2024; DOI: [10.1038/s41586-024-08050-3](https://doi.org/10.1038/s41586-024-08050-3)

En réponse à des conditions avec une faible concentration de CO₂ dans l'air, certaines plantes ont développé une autre voie photosynthétique appelée C4, dans laquelle le CO₂ est concentré à proximité de la Rubisco, ce qui permet au processus C3 de fonctionner plus efficacement. Pour l'agriculture les types de plantes sont :

- C3 : riz, blé, soja et la plupart des autres cultures
- C4 : maïs, canne à sucre, millet, sorgho

Si les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère avaient continué à baisser, la croissance des plantes aurait diminué et aurait fini par s'arrêter. En dessous de 180 ppm, les taux de croissance de nombreuses espèces C3 sont réduits de 40 à 60 % par rapport à 350 ppm (Gerhart et Ward 2010) et la croissance s'est complètement arrêtée dans des conditions expérimentales de 60 à 140 ppm de CO₂. Certaines plantes C4 sont encore capables de croître à des niveaux aussi bas que 10 ppm, mais très lentement (Gerhart et Ward 2010).

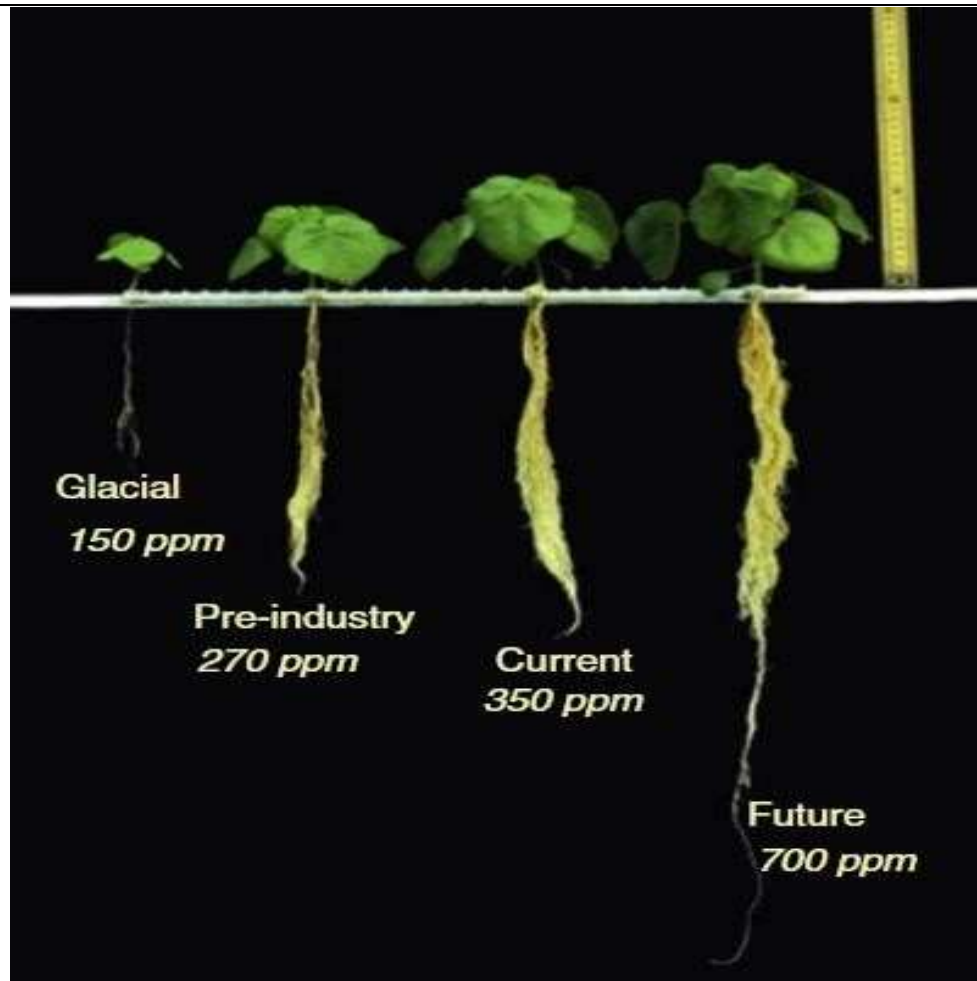


Figure 2.2 : croissance d'*Abutilon theophrasti* après 14 jours dans des conditions identiques, à l'exception des variations indiquées dans les niveaux de CO₂. Source : Gerhart et Ward (2010). Remarque : « Actuel » dans l'image correspond à 1988.

Les niveaux actuels de CO₂ sont d'environ 430 ppm, contre 280 ppm au début des années 1800. La réponse positive des plantes à un excès de CO₂ est illustrée dans la figure 2.2, reproduite à partir de Gerhart et Ward (2010). Elle montre l'effet de la croissance du CO₂ sur des semis d'*abutilon* (*Abutilon theophrasti*) tenus pendant

14 jours dans des conditions contrôlées où seule varie l'exposition au CO₂. Les gains induits par l'augmentation du CO₂ de 150 ppm à 350 ppm se poursuivent lorsque la concentration est doublée à 700 ppm.

Au cours des 60 dernières années, des milliers d'études ont été menées sur la réponse des plantes à l'augmentation des niveaux de CO₂. La conclusion qui ressort majoritairement est que les plantes, en particulier les plantes C3, tirent profit d'un excès de CO₂. Le CO₂ favorise la croissance de deux manières :

- Une photosynthèse améliorée grâce aux voies métaboliques décrites ci-dessus.
- Une utilisation plus efficace de l'eau. Cela s'explique par le fait que les plantes absorbent le CO₂ en ouvrant les stomates (pores) à la surface de leurs feuilles. Lorsque le CO₂ est rare, les stomates doivent rester grands ouverts pendant de longues périodes, ce qui permet à l'eau de s'évaporer. Dans des conditions riches en CO₂ les stomates restent fermés plus longtemps, ce qui aide la plante à conserver l'eau plus longtemps et augmente ainsi l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Des effets spécifiques du changement climatique sur l'agriculture américaine seront examinés au chapitre 9.

2.1.3 Augmentation du CO₂ et efficacité de l'utilisation de l'eau par les cultures

Deryng *et al.* (2016) ont examiné les données disponibles sur la productivité hydrique des cultures [Crop Water Productivity, CWP], c'est-à-dire le rendement par unité d'eau utilisée, et ont attiré l'attention sur le potentiel du CO₂ à la fois pour améliorer la photosynthèse et pour réduire la transpiration au niveau des feuilles (perte d'eau pendant la respiration des feuilles). Ils ont examiné toutes les données FACE (Free Air CO₂ Enrichment — voir chapitre 9) sur les variations de rendement des cultures de maïs, de blé, de riz et de soja, et les ont combinées avec des données issues de modèles de cultures simulant les réponses en termes de rendement à l'horizon 2080 dans le scénario d'émissions extrêmes RCP8.5 dans quatre régions de culture (tropicale, aride, tempérée et froide), chacune étant divisée en sous-régions pluviales et irriguées. Ils ont rapporté que les modèles sans fertilisation par le CO₂ prévoyaient des pertes de CWP dans toutes les régions, mais que celles-ci étaient plus que compensées par la fertilisation par le CO₂ de sorte que toutes les régions affichaient un gain net de CWP. Deryng *et al.* (2016) ont également rapporté que les effets négatifs du réchauffement sur les rendements du blé et du soja étaient entièrement compensés par les gains de CWP et atténués jusqu'à 90 % pour le riz et 60 % pour le maïs.

De même, Cheng *et al.* (2017) ont noté que l'augmentation de la production primaire brute entre 1982 et 2011 due à la hausse des absorptions de CO₂ s'est accompagnée d'un tel gain en CWP que la consommation mondiale d'eau par les plantes n'a pas augmenté, malgré la biomasse supplémentaire.

Deryng *et al.* (2016) ont supposé que le changement climatique « aggraverait la pénurie d'eau ». Cependant, alors que les modèles prédisent une expansion des zones arides sous l'effet du réchauffement climatique, les données actuelles montrent le contraire : un verdissement est en cours, même dans les zones arides. Zhang *et al.* (2024) indiquent qu'en raison de l'augmentation des niveaux de CO₂ « l'aridité croissante des zones arides n'entraînera pas une perte générale de la productivité végétale » ; tout au plus, 4 % des zones actuellement arides connaîtraient une désertification accrue.

2.1.4 Avantages de la fertilisation par le CO₂ dans les rapports du GIEC

Le GIEC n'a que très peu abordé la question du verdissement mondial et de la fertilisation par le CO₂ des cultures agricoles. Ce sujet est brièvement évoqué à quelques endroits dans le corps du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC et dans les rapports précédents, mais il est omis dans tous les documents de synthèse. La section 2.3.4.3.3 du rapport du groupe de travail I du sixième rapport d'évaluation, intitulée « Verdissement et brunissement mondiaux », souligne que le rapport spécial du GIEC sur les changements climatiques et les terres avait conclu avec *un degré de confiance élevé* que le verdissement avait augmenté à l'échelle mondiale au cours des deux ou

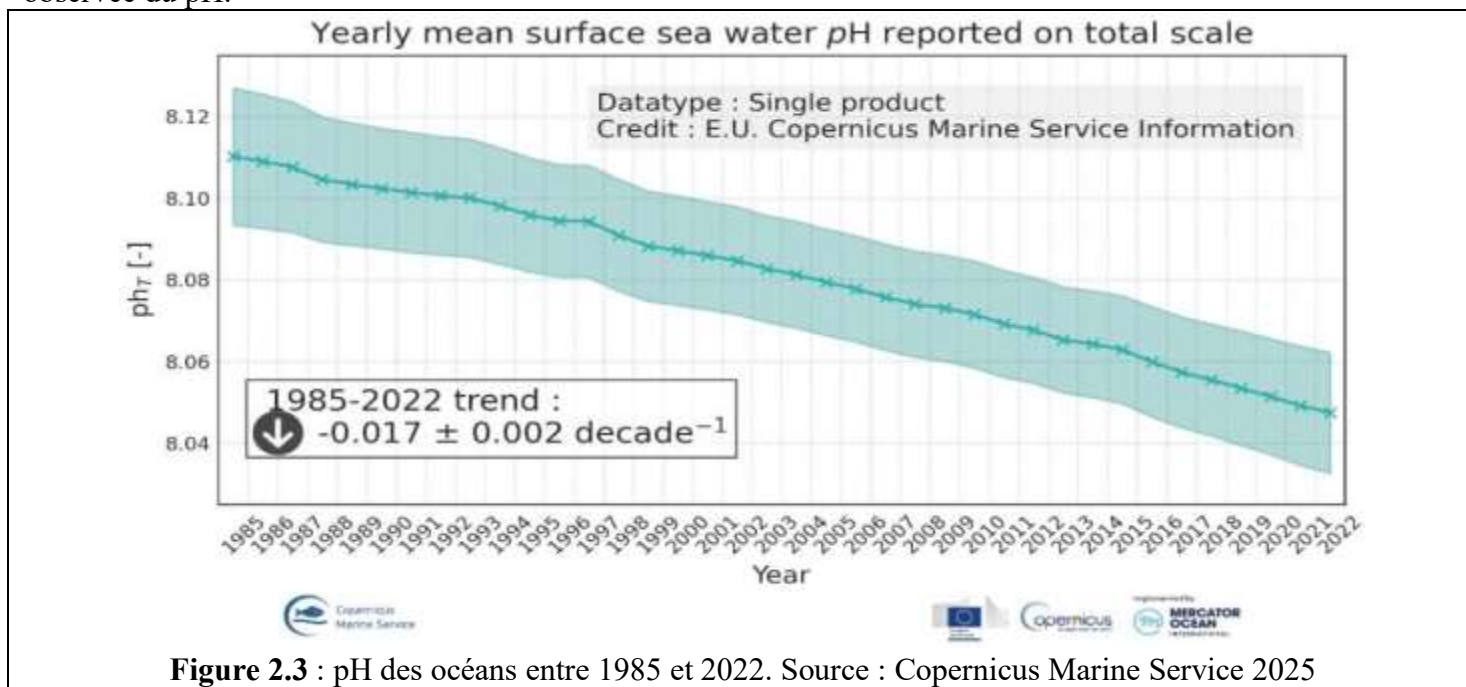
trois dernières décennies. Il examine ensuite les variations de la tendance au verdissement entre les différentes séries de données et conclut que, si le verdissement est avéré avec *un degré de confiance élevé*, l'ampleur de cette tendance est quant à elle *incertaine*. Les effets de la fertilisation par le CO₂ et l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau sont également brièvement mentionnés dans quelques autres chapitres des rapports des groupes de travail I et II du 6^{ème} rapport d'évaluation.

Dans l'ensemble, cependant, les résumés à l'intention des décideurs, les résumés techniques et les rapports de synthèse des AR5 et AR6 n'abordent pas ce sujet.

2.2 Les océans alcalins

2.2.1 L'évolution du pH

Une solution aqueuse neutre a un pH de 7,0, tandis qu'une solution dont le pH est supérieur à 7,0 est alcaline (également appelée basique) et dont le pH est inférieur à 7,0 est acide. Le pH moyen mondial actuel de l'eau de mer en surface est estimé à 8,04 (Copernicus Marine Service 2025, figure 2.3), contre une valeur estimée à 8,2 à l'époque préindustrielle (Gattuso et Hansson, 2011). À mesure que les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère ont augmenté, les océans en ont absorbé davantage, ce qui a fait baisser leur pH. En fonction de leur capacité tampon, les océans devraient devenir légèrement moins alcalins au fil du temps, ce qui correspond à la baisse observée du pH.



Bien que ce processus soit souvent appelé « acidification des océans », ce terme est impropre, car les océans ne devraient pas devenir acides ; « neutralisation des océans » serait plus exact. Même si l'eau venait à s'acidifier, on pense que la vie dans les océans a évolué lorsque ceux-ci étaient légèrement acides, avec un pH compris entre 6,5 et 7,0 (Krissansen-Totton *et al.*, 2018).

À l'échelle de milliers d'années, les mesures indirectes des isotopes de bore montrent que le pH des océans était d'environ 7,4 ou 7,5 pendant la dernière glaciation (il y a environ 20 000 ans), puis a augmenté pour atteindre les valeurs actuelles à mesure que le monde s'est réchauffé pendant la déglaciation (Rae *et al.*, 2018). Ainsi, les biota océaniques semblent résister aux changements naturels à long terme du pH océanique, car les organismes marins ont été exposés à de larges variations de pH.

2.2.2 Changements dans les récifs coralliens

On craint que la baisse du pH de l'eau de mer réduise le taux de calcification des récifs coralliens. Mais les récifs coralliens subissent déjà d'importantes variations de pH, en partie dues à l'activité photosynthétique quotidienne dans le récif ; les valeurs de pH mesurées varient de 9,4 pendant la journée à 7,5 pendant la nuit (Revelle et Fairbridge, 1957). De'ath *et al.* (2009) ont rapporté qu'une partie de la Grande Barrière de Corail australienne (GBR, Great Barrier Reef) le plus grand écosystème corallien au monde) avait connu une baisse de 14 % de la calcification depuis 1990. Cette baisse a été provisoirement attribuée à l'augmentation de la température de l'eau et à la diminution du pH. Mais Ridd *et al.* (2013) ont montré que ce rapport résultait d'une analyse biaisée des données qui, une fois corrigée, ne montrait aucun changement dans les taux de calcification. Néanmoins, l'alerte lancée par l'article original a persisté, comme en témoigne le grand nombre de citations publiées (541) de l'étude originale, contre seulement 11 citations de la correction (au 30 avril 2025). [NdT : la température de l'eau de surface des mers sur la GBR varie de plus de 1°C par mois avec un minimum en hiver (austral) et un maximum en été (austral)]

Le dernier résumé annuel de l'état de la GBR publié par l'Institut australien des sciences marines (AIMS) indique que la production corallienne a fortement rebondi (AIMS, 2023). La figure 2.4 présente les résultats des enquêtes de l'AIMS sur la couverture corallienne dure, exprimée en pourcentage de la superficie du récif. Une grande partie du déclin de la GBR avant 2011 s'est avérée être due à une intense activité cyclonique tropicale (Beeden *et al.*, 2015) ainsi qu'à une série de vagues de chaleur marine, de ruissellements agricoles et d'espèces envahissantes (Woods Hole, 2023). Compte tenu du déclin de la calcification de la GBR entre 1990 et 2009 et de l'augmentation continue des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère, ce rebond a surpris certains observateurs.

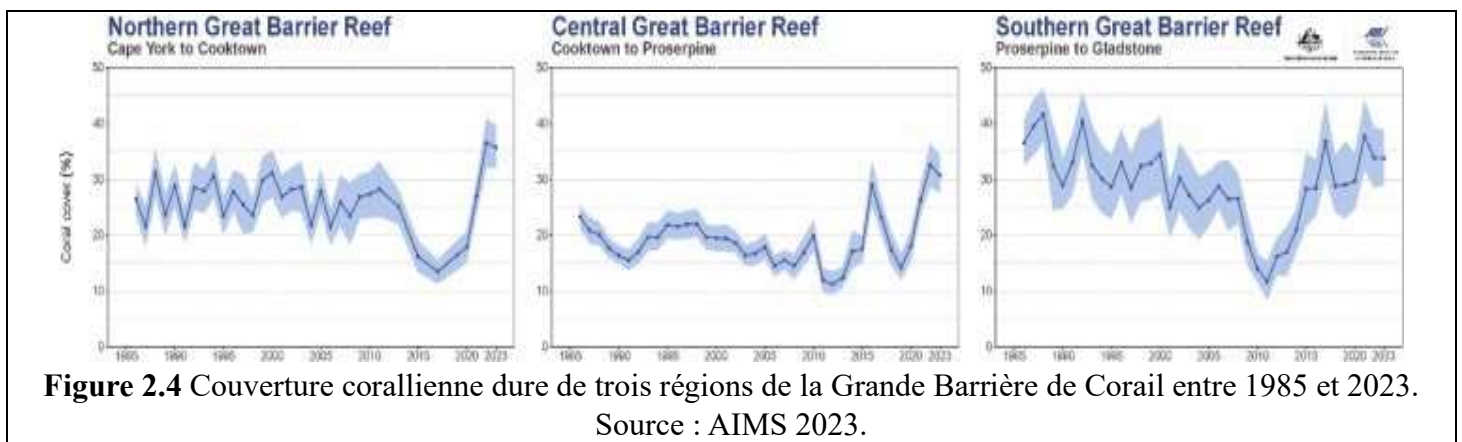


Figure 2.4 Couverture corallienne dure de trois régions de la Grande Barrière de Corail entre 1985 et 2023.
Source : AIMS 2023.

Il est de plus en plus reconnu que le biais de publication (les résultats alarmants sur l'acidification des océans privilégiés par les publications scientifiques à fort impact) exagère les effets rapportés de la baisse du pH des océans. Un numéro spécial du Journal of Marine Science de l'ICES a abordé ce problème dans un article intitulé « *Towards a Broader Perspective on Ocean Acidification Research* » (*Vers une perspective plus large sur la recherche sur l'acidification des océans*). Dans l'introduction de ce numéro spécial, H. I. Browman a déclaré : « Comme c'est le cas dans tous les domaines scientifiques, les études qui ne font état d'aucun effet de l'acidification des océans sont généralement plus difficiles à publier. » (Browman, 2016).

De même, une méta-analyse (Clements *et al.*, 2021) des effets négatifs de l'acidification des océans sur le comportement des poissons de récif a mis en évidence ce qu'ils ont appelé un « effet de déclin » : les conclusions initialement spectaculaires publiées dans des revues prestigieuses, qui montraient des impacts apparemment importants de l'acidification, ont généralement été suivies par des études ultérieures portant sur des échantillons plus importants et révélant des effets beaucoup plus faibles, voire inexistants. Ils appellent leurs collègues à améliorer leurs pratiques de recherche afin de contrer « l'effet de déclin » :

La grande majorité des études ayant un impact important dans ce domaine se caractérisent généralement par un échantillon de petite taille, mais sont publiées dans des revues à fort impact et ont une influence disproportionnée sur le domaine en termes de citations. Nous soutenons que l'acidification des océans a un impact direct négligeable sur le comportement des poissons et préconisons l'amélioration des approches afin de minimiser le risque d'un effet de déclin dans les futures pistes de recherche (Clements et al., 2021).

En résumé, la vie océanique est complexe et une grande partie de celle-ci a évolué lorsque les océans étaient plus acides qu'aujourd'hui. Les ancêtres des coraux modernes sont apparus il y a environ 245 millions d'années. Pendant plus de 200 millions d'années, les niveaux de CO₂ ont été plusieurs fois supérieurs à ceux d'aujourd'hui. Une grande partie du débat public sur les effets de l'« acidification » des océans sur le biote marin a été partielle et exagérée.

Références

- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Australian Institute of Marine Science. (2022). Continued coral recovery leads to 36-year highs across two-thirds of the Great Barrier Reef. https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf
- Beeden, R., Maynard, J., Puotinen, M., Marshall, P., Dryden, J., Goldberg, J., and Williams, G. (2015). Impacts and recovery from Severe Tropical Cyclone Yasi on the Great Barrier Reef. PLOS ONE, 10, e0121272. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121272>
- Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 5653–5664. 8
- Browman, H. I. (2016). Applying organized scepticism to ocean acidification research. ICES Journal of Marine Science, 73(3), 529.1–536. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw010>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., and Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2, 122–129. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7>
- Chen, X., Wang, Y., Liu, Y., and Piao, S. (2024). The global greening continues despite increased drought stress since 2000. Global Ecology and Conservation, 49, e02791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y. P., et al. (2017). Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. Nature Communications, 8, 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>
- Clements, J. C., Sundin, J., Clark, T. D., and Jutfelt, F. (2022). Meta-analysis reveals an extreme “decline effect” in the impacts of ocean acidification on fish behavior. PLOS Biology, 20(2), e3001511. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511>
- Copernicus Marine Service. (2025). Global ocean acidification – Mean sea water pH time series and trend from multi-observations reprocessing. https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description
- De'ath, G., Lough, J., and Fabricius, K. (2009). Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. Science, 323, 116–119. <https://doi.org/10.1126/science.1165283>
- Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R., Jones, R., ... and Elliott, J. (2016). Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. Nature Climate Change. <https://doi.org/10.1038/nclimate2995>

- Gattuso, J. P., and Hansson, L. (Eds.). (2011). Ocean acidification: Background and history. Oxford University Press.
- Gerhart, L. M., and Ward, J. K. (2010). Plant responses to low [CO₂] of the past. *New Phytologist*, 188, 674–695. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>
- Haverd, V., B. Smith, J. G. Canadell, et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402. <https://doi.org/10.1111/gcb.14950>
- Keenan, T. F., X. Luo, B. D. Stocker, et al. (2023). A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO₂. *Nature Climate Change* 13(12): 1376-1381 DOI: 10.1038/s41558 023-01867-2.
- Judd, E. J., Scotese, C. R., Young, S. A., et al. (2024). A 485-million-year history of Earth's surface temperature. *Science*, 385(6715). <https://doi.org/10.1126/science.adk3705>
- Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., and Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), 4105–4110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115>
- Piao, S., X. Wang, T. Park, et al. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1): 14-27 DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x
- Rae, J. W. B., Burke, A., Robinson, L. F., et al. (2018). CO₂ storage and release in the deep Southern Ocean on millennial to centennial timescales. *Nature*, 562, 569–573. <https://doi.org/10.1038/s41586 018-0614-0>
- Revelle, R., and Fairbridge, R. W. (1957). Carbonate and carbon dioxide. In J. W. Hedgpeth (Ed.), *Treatise on marine ecology and paleoecology* (Vol. 1). Geological Society of America.
- Ridd, P., Silva, E., and Stieglitz, T. (2013). Have coral calcification rates slowed in the last twenty years? *Marine Geology*, 346, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.002>
- Woods Hole Oceanographic Institution. (2023). Is the Great Barrier Reef making a comeback? <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/is-the-great-barrier-reef-making-a-comeback/>
- Zeng, Z., Piao, S. Li, L., et al. (2017). Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate3299 9>
- Zhang, Y., Liu, Y., Chen, X., et al. (2024). Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment*, 5. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., et al. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6, 791–795. <https://www.nature.com/articles/nclimate3004>

3 INFLUENCES HUMAINES SUR LE CLIMAT

Résumé du chapitre :

Le climat mondial varie naturellement à toutes les échelles temporelles. Les émissions anthropiques de CO₂ accentuent cette variabilité en modifiant le bilan énergétique radiatif total de l'atmosphère.

Le GIEC a minimisé le rôle du soleil dans le changement climatique, mais il existe des reconstitutions plausibles du rayonnement solaire qui suggèrent qu'il a contribué au réchauffement récent.

Les projections climatiques sont basées sur les scénarios d'émissions du GIEC, qui ont tendance à dépasser les tendances observées. La plupart des études universitaires sur l'impact climatique réalisées ces dernières années s'appuient sur le scénario extrême RCP 8.5, désormais considéré comme peu plausible ; son utilisation comme scénario de référence a été trompeuse.

Les modèles du cycle du carbone relient les émissions annuelles à l'augmentation du stock de CO₂ dans l'atmosphère. Si les modèles divergent quant au taux d'absorption du CO₂ par les terres et les océans, tous s'accordent sur le fait qu'il est en augmentation depuis 1959.

Il existe des preuves que les biais liés à l'urbanisation dans les données sur le réchauffement terrestre n'ont pas été complètement éliminés des ensembles de données climatiques.

3.1 Les composantes du forçage radiatif et leur historique

3.1.1 Forçage radiatif historique

Le changement climatique est une constante depuis les 4,6 milliards d'années d'existence de la Terre. La température et les régimes climatiques de la Terre varient naturellement à des échelles temporelles allant de quelques décennies à plusieurs millions d'années. Les variations naturelles du climat à la surface de la Terre ont deux origines. Les fluctuations climatiques internes associées aux circulations atmosphériques et océaniques échangent de l'énergie, de l'eau et du carbone entre l'atmosphère, les océans, les terres et la glace. Les influences externes sur le système climatique comprennent les variations de l'énergie reçue du soleil et les effets des éruptions volcaniques. Les activités humaines influencent le climat en modifiant l'utilisation et la couverture des sols. Les humains modifient également la composition de l'atmosphère par les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre et en altérant la concentration des particules d'aérosols dans l'atmosphère.

La Terre est réchauffée par la lumière solaire qu'elle absorbe et refroidie par la chaleur qu'elle rayonne vers l'espace. En moyenne à la surface de la Terre, chacun de ces processus implique des flux d'énergie d'environ 240 watts par mètre carré (240 W/m²). Lorsqu'ils sont en équilibre, il n'y a pas de cause externe nette de réchauffement ou de refroidissement. Les influences humaines et naturelles sur le climat modifient cet équilibre et provoquent ainsi des changements climatiques.

Les influences sur le bilan énergétique de la Terre au sommet de l'atmosphère sont quantifiées par le « forçage radiatif », c'est-à-dire la mesure dans laquelle elles perturbent l'équilibre entre réchauffement et refroidissement ; un forçage positif réchauffe, tandis qu'un forçage négatif refroidit. L'historique estimé par le GIEC des principaux composants du forçage radiatif depuis 1750 est présenté dans les deux figures suivantes tirées de son AR6.

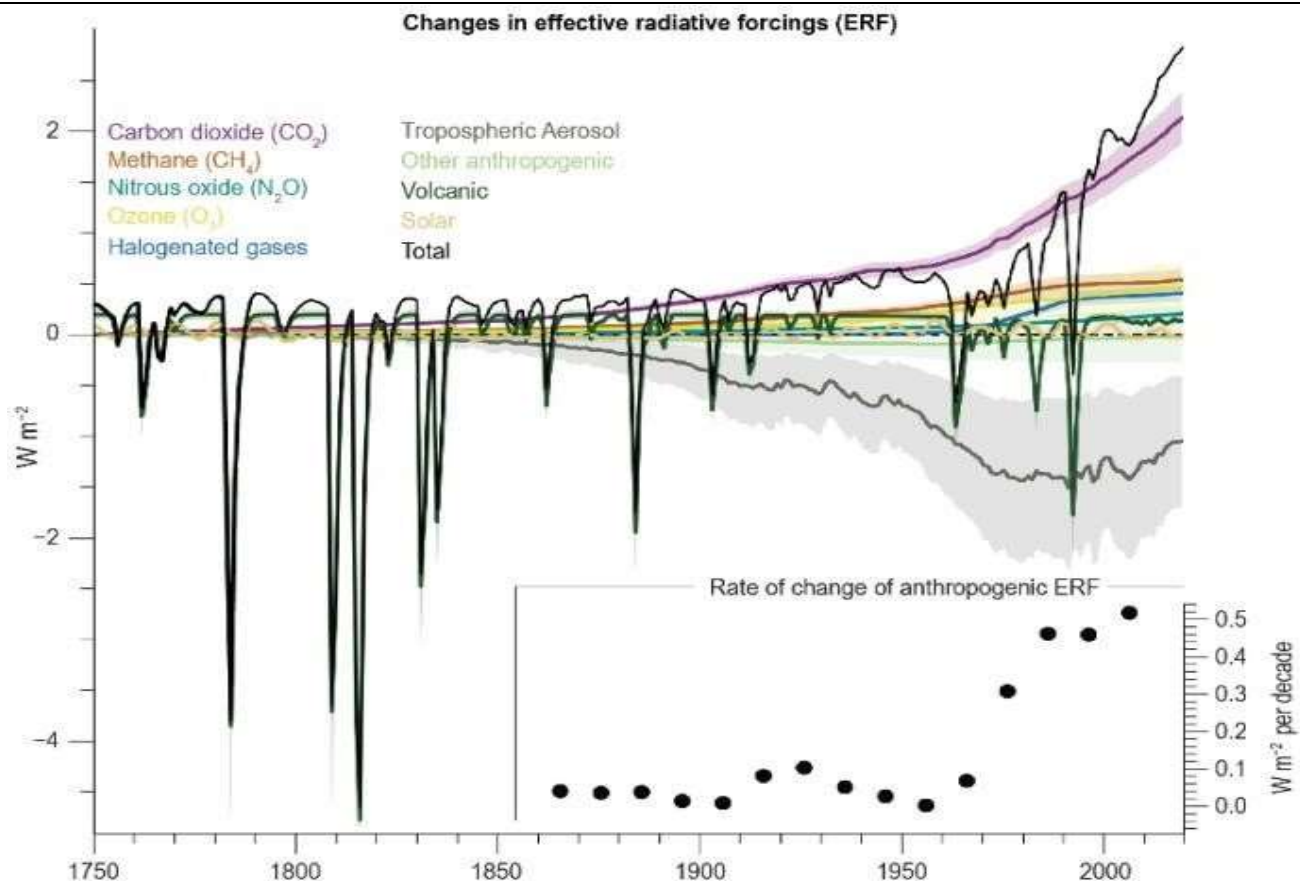


Figure 3.1.1 : Estimations du GIEC des composantes du forçage radiatif au fil du temps. Les zones ombrées indiquent les marges d'incertitude. Source : AR6 WGI Ch2 Fig. 10

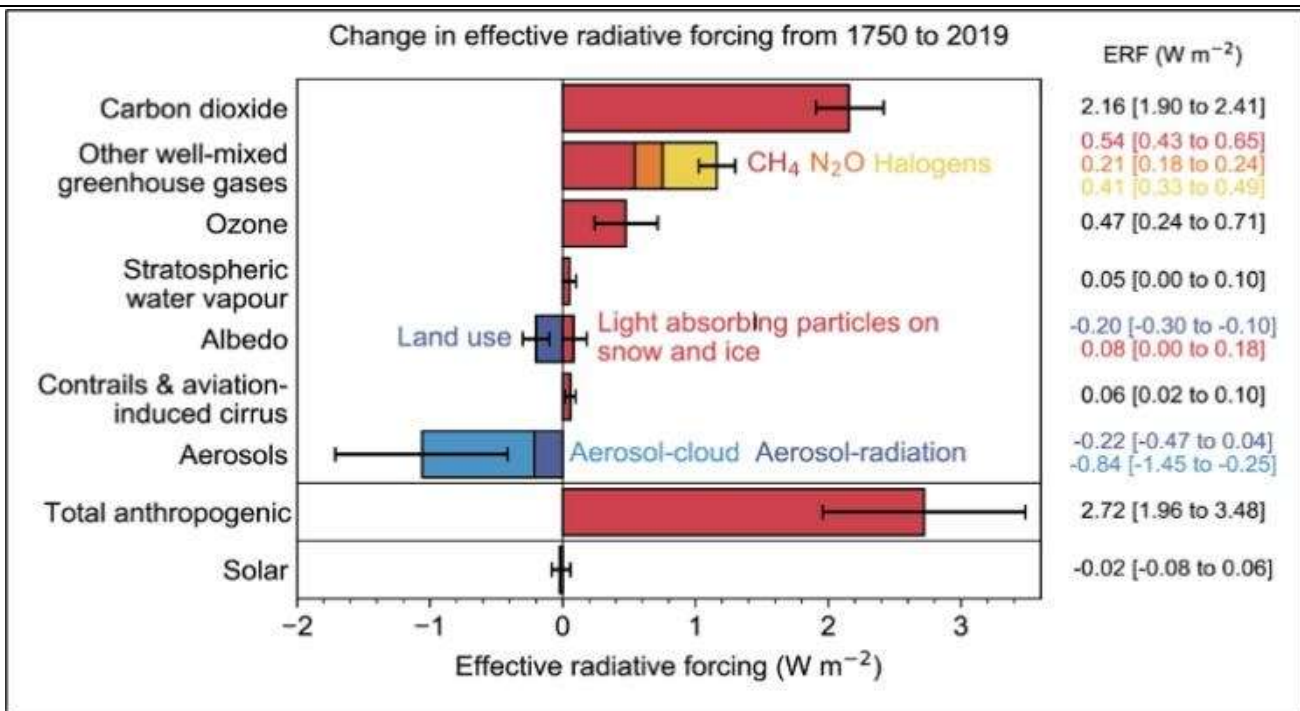


Figure 3.1.2 Estimations du GIEC des variations des composantes du forçage radiatif entre 1750 et 2019. Source : AR6 WGI Ch 7 Fig. 7-6.

Ces graphiques montrent que le forçage radiatif total est composé de composantes naturelles et anthropiques. Le dioxyde de carbone est le facteur anthropique qui influence le plus le climat et qui est le plus pertinent pour l'influence de l'utilisation des combustibles fossiles. Il exerce un effet de réchauffement en diminuant le pouvoir refroidissant de l'atmosphère. Les émissions de CO₂ s'accumulent dans l'atmosphère, comme décrit dans la section suivante, de sorte que l'effet de réchauffement s'accroît. D'autres gaz à effet de serre (méthane, protoxyde d'azote, halogènes et ozone) agissent de manière similaire, ajoutant actuellement 75 % supplémentaires au réchauffement causé par le CO₂. Les aérosols ont un effet refroidissant global, bien que la manière dont ils catalysent la formation de nuages réfléchissants soit très incertaine. Par conséquent, pour comprendre les causes du réchauffement récent, il ne suffit pas d'identifier les effets de réchauffement du CO₂, mais également les effets de refroidissement plus incertains des aérosols.

Le GIEC estime que le changement du forçage radiatif solaire est négligeable, en se basant sur sa préférence pour des reconstructions de données qui impliquent un changement solaire minimal depuis l'époque préindustrielle. Cependant, Connolly *et al.* (2021) ont examiné seize reconstructions différentes du rayonnement solaire total (TSI) dans la littérature couvrant les années 1600 à 2000 ; ces reconstructions varient entre une absence quasi totale de changement de la TSI et une tendance à la hausse relativement importante. Ces auteurs notent que les variations des reconstructions de la TSI combinée aux variations des reconstructions de la température de surface, permettent de tirer des conclusions cohérentes ou avec pas du tout de réchauffement attribuable au soleil au cours du XX^{ème} siècle ou avec la totalité du réchauffement attribuable au soleil.

Une question particulièrement épineuse est celle de l'écart entre les données TSI de 1989 et 1991, dû à un retard dans le lancement d'un satellite à la suite de la catastrophe de la navette spatiale Challenger le 28 janvier 1986. Ce retard a empêché un recouvrement temporel avec le système d'observation précédent et l'inter-calibration des mesures (Zacharias 2014, Scafetta *et al.* 2019). C'est ce qu'on appelle le problème de l'écart ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor). La question de savoir s'il existe une tendance à la hausse du TSI entre 1978 et 2018 dépend de la manière dont le manque de données ACRIM sera comblé. Connolly *et al.* (2021) ont constaté que les déclarations consensuelles du GIEC sur le forçage solaire avaient été formulées prématurément en supprimant les opinions scientifiques opposées.

Les aérosols volcaniques constituent un autre élément naturel du forçage radiatif, qui exerce une influence épisodique de refroidissement. L'encadré 4.1 du rapport AR6 du GIEC traite de l'impact climatique des éruptions volcaniques, en mentionnant trois éruptions volcaniques explosives qui se sont produites au cours de la première moitié du XIX^{ème} siècle. Parmi celles-ci, l'éruption du Tambora en 1815 a entraîné une « année sans été », avec de mauvaises récoltes dans diverses régions de l'hémisphère nord. Il existe une incertitude quant au signe du forçage relativement faible dû au volcan sous-marin Hunga Tonga entré en éruption en 2022 (Jenkins *et al.* 2023, Schoeberl *et al.* 2024).

La figure 3.1.1 montre que la composante anthropique du forçage était négligeable avant 1900 environ et qu'elle a augmenté régulièrement depuis, pour atteindre près de 3 W/m² aujourd'hui. Toutefois, cela ne représente encore qu'environ 1% des flux de rayonnement non perturbés, ce qui rend difficile l'isolation des effets du forçage anthropique ; les estimations satellitaires les plus récentes des flux d'énergie radiative à l'échelle mondiale ne sont précises qu'à quelques W/m².

Les sources naturelles du déséquilibre énergétique mondial autres que les volcans et le rayonnement solaire total (TSI) ne sont pas incluses dans ces graphiques, car elles restent largement inconnues.

3.1.2 Évolution du CO₂ atmosphérique depuis 1958

L'influence du dioxyde de carbone sur le réchauffement dépend de la quantité « supplémentaire » de CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère, *c'est-à-dire* de sa concentration au-dessus de la valeur préindustrielle de 280 ppm. Le niveau de CO₂ enregistré à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï, généralement utilisé comme concentration moyenne mondiale représentative, est disponible en ligne à [l'adresse https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html). La concentration était d'environ 316 ppm au début des enregistrements en 1959 et est aujourd'hui d'environ 430 ppm, soit une augmentation de 36 %. À la fin de la dernière glaciation, les niveaux de CO₂ étaient tombés à environ 180 ppm. Comme indiqué au chapitre 2, les plantes C3 commencent à mourir lorsque les niveaux de CO₂ sont inférieurs à environ 140 ppm et les plantes C4 lorsque les niveaux sont inférieurs à 100 ppm. Si les niveaux de CO₂ avaient continué à baisser, la vie végétale aurait été menacée.

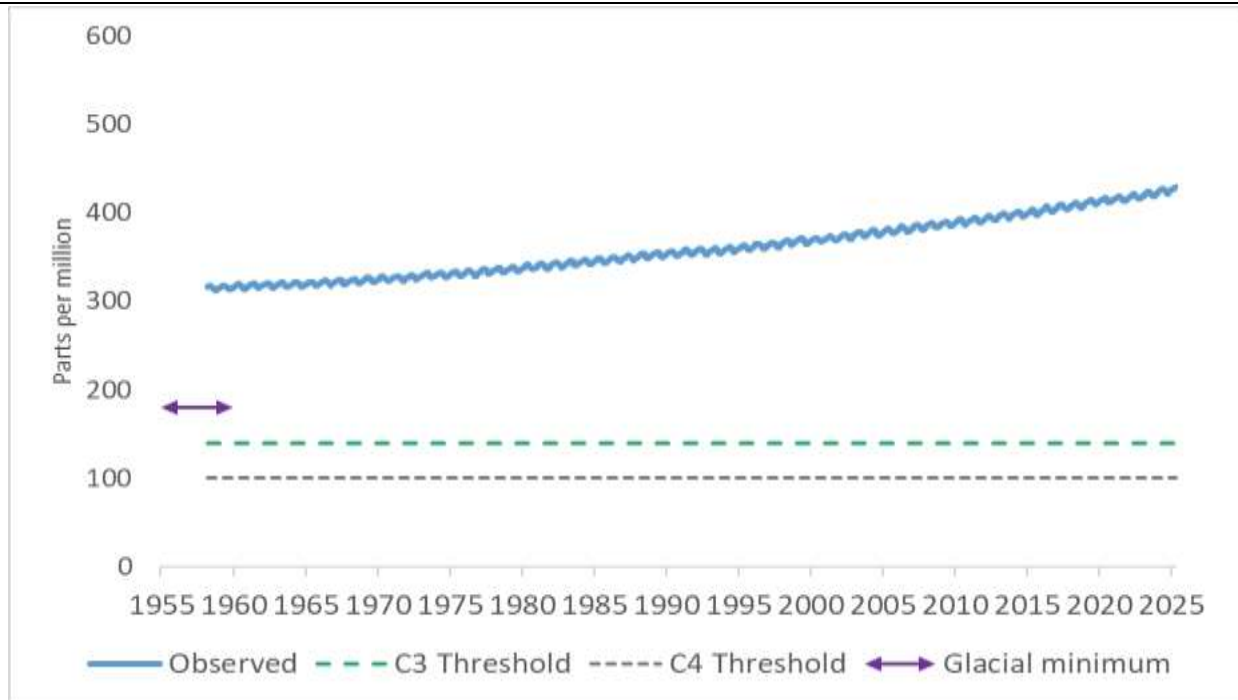


Fig. 3.1.3. Concentrations atmosphériques moyennes annuelles de CO₂ (1959-2025) en ppm mesurées à Mauna Loa (en bleu). Seuil C3 : niveau en dessous duquel les plantes C3 commencent à mourir (140 ppm, voir chapitre 2). Seuil C4 : niveau en dessous duquel les plantes C4 commencent à mourir (100 ppm, voir chapitre 2). Minimum glaciaire : niveau minimum atteint lors des dernières glaciations (flèche violette). Source des données sur le CO₂ : <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

L'augmentation annuelle de la concentration n'est que d'environ la moitié du CO₂ émis, car les processus terrestres et océaniques absorbent actuellement l'« excès » de CO₂ à un taux correspondant à environ 50 % des émissions humaines. Les concentrations futures, et donc les influences futures de l'homme sur le climat, dépendent donc de deux facteurs :

- (1) les taux futurs des émissions mondiales de CO₂ par l'homme, et
- (2) la vitesse à laquelle la terre et les océans éliminent le CO₂ supplémentaire de l'atmosphère.

Nous examinerons chacun de ces éléments tour à tour.

3.2 Scénarios d'émissions futures et cycle du carbone

3.2.1 Scénarios d'émissions

Évaluer les dangers liés aux émissions futures de GES demande des hypothèses sur la nature de ces émissions. Les émissions futures, et donc l'influence de l'homme sur le climat, dépendront de l'évolution démographique, de l'activité économique, de la réglementation et des technologies énergétiques et agricoles. Diverses hypothèses sur chacun de ces facteurs permettent d'établir des projections des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre, des concentrations d'aérosols et des changements dans l'utilisation des sols, qui finalement sont combinées en hypothèses sur le forçage radiatif anthropique.

Les grandes incertitudes qui entourent ces nombreux facteurs rendent impossible toute prévision précise des émissions futures. Le GIEC a donc utilisé différents scénarios couvrant un éventail plausible de possibilités en matière de population, d'économie et de technologies. Les versions récentes des scénarios sont identifiées par un chiffre indiquant le forçage radiatif anthropique prévu en 2100 dans le cadre de ce scénario. Ainsi, un scénario identifié par le chiffre « 6 » correspond à un forçage radiatif (réchauffement) d'origine humaine de 6 W/m² à la fin du siècle. (Rappelons que le forçage radiatif anthropique actuel est d'environ 2,7 W/m²).

Bien que le GIEC ne prétende pas que ses scénarios d'émissions soient des prévisions, ils sont souvent traités comme tels. Les comparaisons entre les scénarios passés et les observations montrent que les projections faites par le GIEC [depuis 1990] surestiment les émissions observées. Pour les troisième et quatrième rapports d'évaluation du GIEC a été utilisé un ensemble de projections d'émissions issues du *Rapport spécial sur les scénarios d'émissions*, appelé scénarios SRES. McKittrick *et al.* (2012) ont montré que, lorsqu'elles étaient converties en valeurs par habitant, la distribution des émissions des scénarios SRES était biaisée à la hausse par rapport aux tendances observées. Ce biais des scénarios SRES a été confirmé par l'analyse ultérieure de Hausfather *et al.* (2019), qui ont montré que les concentrations atmosphériques de CO₂ observées suivaient la fourchette basse de la plage des SRES, ce qui est aussi le cas pour les scénarios du GIEC employés après les SRES (figure 3.2.1).

Pour le cinquième rapport d'évaluation (AR5), le GIEC a élaboré une nouvelle série de scénarios appelés « *trajectoires représentatives de concentrations* » (RCP, Representative Concentration Pathways). Ceux-ci ont été identifiés par un chiffre représentant l'augmentation du forçage et ont donc été appelés RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5. Le RCP2.6 (avec un forçage radiatif anthropique de 2.6 W/m² en 2100) décrit une trajectoire de concentration des GES conduisant à un réchauffement bien inférieur à 2 °C. À l'autre extrémité le RCP8.5 est un scénario extrême impliquant un réchauffement de près de 5 °C entre 1900 et 2100.

Le RCP8.5 a été qualifié de « *scénario de référence en l'absence de politiques de réduction des émissions* », ou scénario « *business as usual* » ça tant dans la littérature scientifique que dans les médias grand public. Il a donc servi pour générer le résultat de référence prétendu représenter le monde du XXI^{ème} siècle sans politiques de plus en plus strictes de réduction des émissions. Mais le RCP8.5 était conçu comme un scénario à faible probabilité et à fortes émissions, et son utilisation comme scénario de référence « *business as usual* » a été critiquée comme grossièrement trompeuse.² Hausfather et Peters (2020a), dans un commentaire publié dans *Nature*, ont souligné que le RCP8.5 avait été élaboré comme un scénario extrême, et que son utilisation abusive comme scénario de référence « *business as usual* » avait donné lieu à un grand nombre d'études et de reportages médiatiques trompeurs.

L'in vraisemblance du scénario RCP8.5 a été examinée par Burgess *et al.* (2021). L'in vraisemblance du RCP8.5 ne doit pas être interprétée comme *très improbable* (par exemple 99^{ème} percentile) ou comme un « *scénario catastrophe* », mais plutôt comme véritablement invraisemblable en raison de l'in vraisemblance des

² Ce scénario extrême est utile pour les modélisateurs, car un forçage important génère une réponse importante (réchauffement), ce qui rend plus facile l'évaluation de la sensibilité d'un modèle. Mais cela est très différent de l'affirmation que c'est un avenir plausible.

suppositions nécessaires pour atteindre un forçage de $8,5 \text{ W/m}^2$. Ils ont noté que le RCP8.5 s'écarte déjà des tendances observées en matière de consommation d'énergie et que les tendances pour l'avenir proche divergent fortement de celles de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), qui fournit des projections basées sur le marché de la consommation d'énergie pour les décennies à venir. Pielke Jr. *et al.* (2022) ont en outre montré que les tendances historiques et projetées de l'AIE se situent près du bas des enveloppes des projections RCP et des tendances plus récentes du scénario Shared Socioeconomic Pathway (SSP).

Schwalm *et al.* (2020) ont défendu l'utilisation du RCP8.5 au motif que les émissions cumulées de CO_2 entre 2005 et 2020 le suivent de plus près que les scénarios RCP moins élevés. Ils affirment également qu'une version modifiée des scénarios de l'AIE suit de près le RCP8.5 pour les décennies à venir. Hausfather *et Peters* (2020b) ont répondu que la précision apparente du RCP8.5 pour les 15 dernières années s'explique par des erreurs dans sa représentation du CO_2 provenant de l'utilisation des combustibles et du changement d'affectation des terres [Land Use Change, LUC], et que la concordance apparente avec l'AIE pour les décennies à venir vient de ce que Schwalm *et al.* ont ajouté des émissions LUC très élevées. Les projections de l'AIE sur les émissions de CO_2 sont bien inférieures au RCP8.5.

L'utilisation généralisée du scénario RCP8.5 comme référence sans politique de réduction des émissions a créé un biais alarmiste dans la littérature sur les impacts climatiques. L'ampleur de ce problème a été confirmée par une analyse documentaire réalisée par Pielke Jr. *et Ritchie* (2020). Ils ont constaté qu'environ 16 800 articles scientifiques publiés entre 2010 et 2020 utilisaient le scénario RCP8.5, dont environ 4 500 associaient le RCP8.5 au concept de « *business as usual* ». Leur analyse a montré comment le RCP8.5 était utilisé à mauvais escient non seulement par des chercheurs individuels, mais aussi par des organismes scientifiques influents tels que le GIEC et l'U.S. National Climate Assessment (USNCA), ce qui a directement conduit à une couverture médiatique trompeuse dans des médias de premier plan.

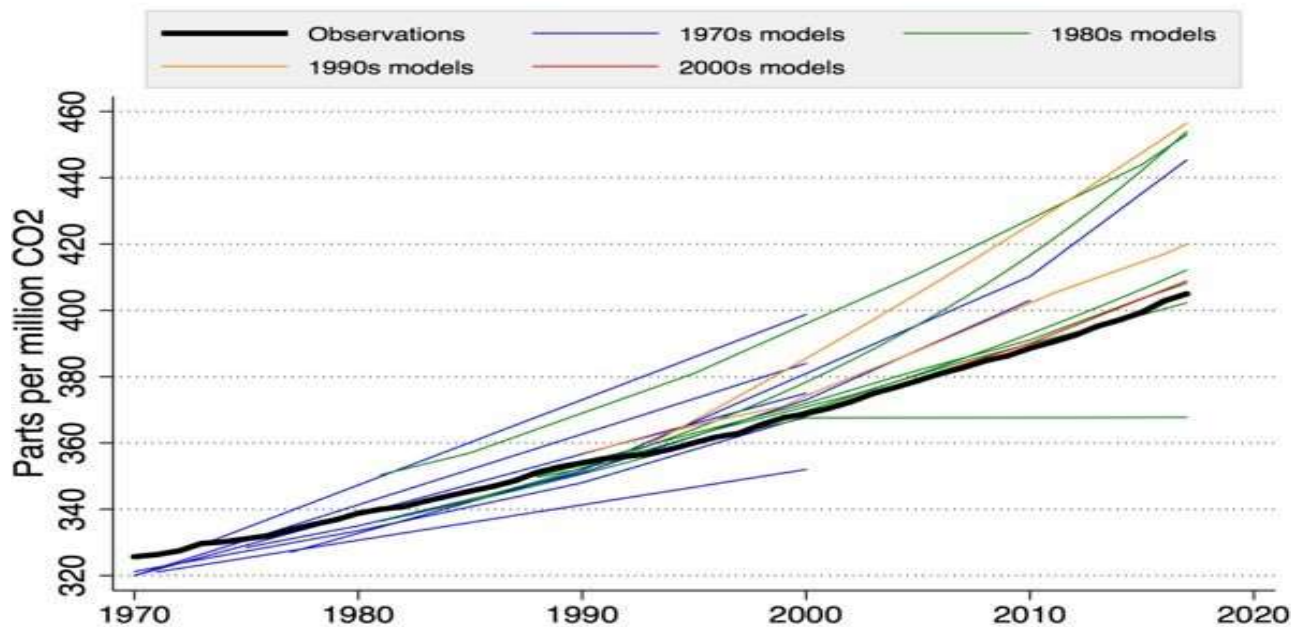


Figure 3.2.1 Les différentes séries de projections des émissions et des concentrations (lignes colorées) ont systématiquement surestimé les observations (ligne noire).Source : Hausfather *et al.* (2019), figure S4.

Pielke *et Ritchie* (2020) ont signalé que de nouvelles études utilisant le RCP8.5 étaient publiées à un rythme d'environ 20 par jour, dont environ deux par jour établissant un lien spécifique entre le RCP8.5 et le « *business as usual* ». Ils concluent que la communauté des chercheurs en climatologie a passé une décennie à « consacrer

des ressources scientifiques à de la science-fiction » et que « la littérature scientifique est devenue déséquilibrée dans une direction apocalyptique ».

Le GIEC a élaboré une nouvelle série de scénarios pour son sixième rapport d'évaluation (AR6), les scénarios « *Shared Socioeconomic Pathway* » (SSP), qui ont perpétué le biais observé dans les scénarios RCP et SRES. La figure 3.2.2 montre les émissions mondiales totales de CO₂ observées compilées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) fusionnées avec les projections d'émissions de l'EIA [Energy Information Administration des USA] tenant compte des projections de consommation d'énergie et des politiques actuelles. Les autres lignes indiquent la fourchette des scénarios SSP du GIEC (SSP1-SSP5). En 2023, les émissions mondiales de CO₂ étaient bien en dessous du SSP7.0 et même en dessous du SSP2-4.5.

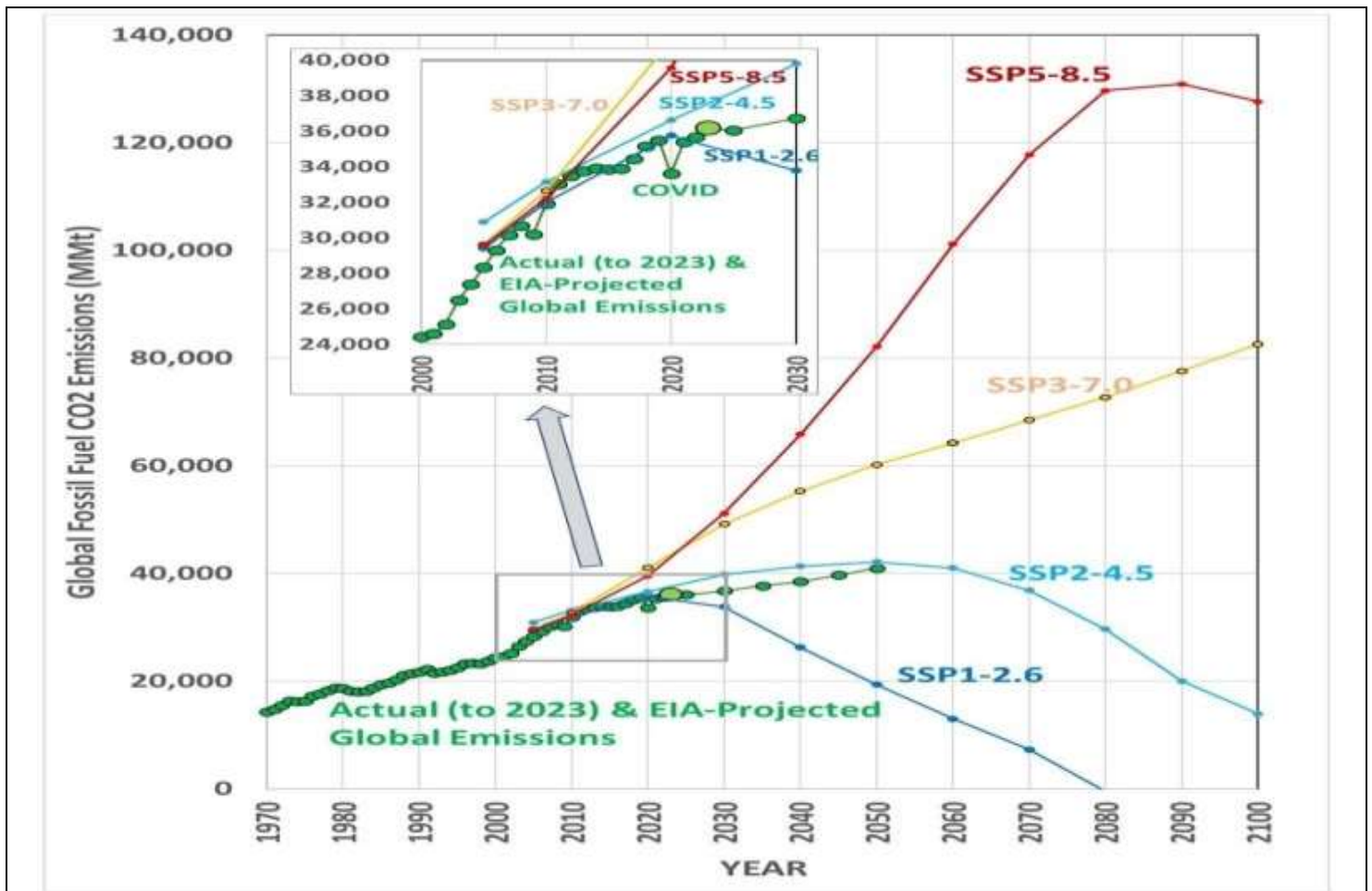


Figure 3.2.2. Émissions de CO₂ observées et projetées. Source : GIEC (scénarios SSP) et Energy Information Administration (EIA). En vert : émissions historiques observées et projections de l'EIA.

Autres lignes : SSP 1 à 5. Source des données : Friedlingstein *et al.* (2024).

3.2.2 Le cycle du carbone reliant les émissions et les concentrations

Les émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles (et, dans une moindre mesure, de la déforestation et de la production de ciment) ont entraîné une augmentation constante des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, comme le montre la figure 3.1.3. La relation entre les émissions et les concentrations est déterminée par le cycle mondial du carbone des processus terrestres et océaniques qui échangent du carbone avec l'atmosphère. Notre compréhension de ces processus a été revue par Crisp *et al.* (2021).

Il y a environ 850 Gt de carbone (GtC) dans l'atmosphère terrestre³, presque entièrement sous forme de CO₂. Chaque année, les processus biologiques (croissance et décomposition des plantes) et physiques (absorption par les océans et dégagement gazeux) échangent environ 200 GtC de ce carbone avec la surface de la Terre (environ 80 GtC avec les terres et 120 GtC avec les océans). Avant que les activités humaines ne deviennent significatives, les prélèvements dans l'atmosphère étaient à peu près équilibrés avec les ajouts. Mais la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) extrait le carbone du sol et l'ajoute à l'échange annuel avec l'atmosphère. Cet ajout (associé à une contribution bien plus petite de la fabrication du ciment) s'élevaient à 10,3 GtC en 2023, soit seulement environ 5 % de l'échange annuel avec l'atmosphère.

Le cycle du carbone absorbe environ 50 % des faibles émissions annuelles de carbone rejetées par l'humanité dans l'atmosphère en le séquestrant naturellement grâce à la croissance des plantes et à l'absorption océanique, tandis que le reste s'accumule dans l'atmosphère (Ciais *et al.*, 2013). C'est pourquoi l'augmentation annuelle de la concentration atmosphérique de CO₂ n'est en moyenne que la moitié de celle que l'on pourrait naïvement attendre des émissions humaines.

Pour prévoir les concentrations futures de CO₂ dans l'atmosphère, et donc l'influence future de l'homme sur le climat, il est important de savoir comment le cycle du carbone pourrait évoluer à l'avenir. La quasi-constance historique de cette fraction de 50 % signifie que plus l'humanité a produit de CO₂, plus la nature l'a éliminé rapidement de l'atmosphère. Cette fraction de 50 % varie quelque peu d'une année à l'autre en raison des déséquilibres naturels du cycle du carbone causés par El Niño, La Niña et les variations climatiques. Une réduction supplémentaire substantielle du CO₂ atmosphérique a également été observée après l'éruption du mont Pinatubo en 1991, un résultat curieux qui reste à expliquer (Angert *et al.*, 2004).

Les principaux processus qui éliminent l'excès de CO₂ de l'atmosphère sont la croissance accrue de la végétation terrestre (en particulier aux latitudes élevées), une certaine augmentation de la séquestration du carbone dans les sols et l'absorption du CO₂ par l'océan en raison de la pression partielle croissante du CO₂ atmosphérique par rapport à celle du CO₂ dissous dans l'océan. Les vingt modèles du cycle du carbone terrestre suivis par le Global Carbon Project (Friedlingstein *et al.*, 2024) montrent que les processus terrestres éliminent l'excès de CO₂ à un rythme croissant depuis 1959. Cela correspond au phénomène du « *verdissement mondial* » (chapitre 2.1) observé par les satellites depuis le début de la surveillance de la verdure mondiale en 1982.

Si la végétation terrestre a réagi positivement à l'augmentation du CO₂ atmosphérique, l'absorption du CO₂ supplémentaire par les processus biologiques océaniques reste trop incertaine pour être mesurée de manière fiable. Notre compréhension actuelle de ces processus et de nombreux autres processus du cycle du carbone a été revue par Crisp *et al.* (2021).

Absorption du CO₂ par les processus terrestres

L'absorption du CO₂ supplémentaire présent dans l'atmosphère par les processus à la surface terrestre (également déduite du verdissement mondial) a été modélisée à l'aide de 20 modèles dynamiques mondiaux de végétation, dont les résultats sont mis à jour chaque année par le Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024). Comme le montre la figure 3.2.3, tous ces modèles s'accordent sur le fait que la végétation et les sols ont séquestré du carbone de l'atmosphère. Mais nous constatons également que les tendances à long terme entre 1959 et 2023 (65 ans) varient considérablement d'un modèle à l'autre, avec un écart de près d'un facteur 7. Cela démontre qu'il existe encore une grande incertitude quant à la vitesse à laquelle les processus terrestres éliminent le CO₂ de l'atmosphère, ce qui crée à son tour une incertitude quant aux concentrations futures de CO₂ dans l'atmosphère, qui se traduit ensuite par une incertitude dans les simulations des modèles climatiques sur les changements climatiques futurs.

³ Comme le CO₂ subit une transformation chimique au cours du cycle du carbone, il est plus pratique de suivre les atomes de carbone plutôt que les molécules de CO₂. Un gigatonne de carbone (GtC) équivaut à environ 3,7 Gt de CO₂.

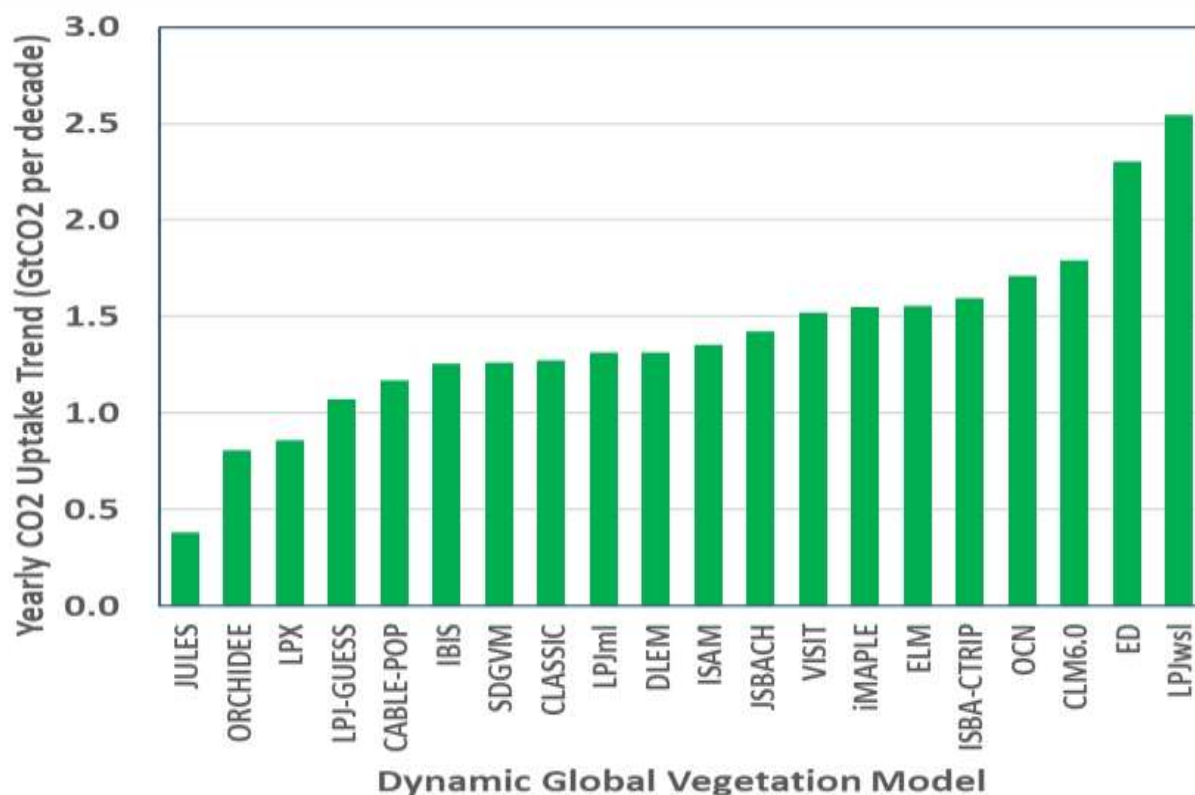


Figure 3.2.3 Tendances de l'absorption annuelle de CO₂ (GtCO₂ par an et par décennie) par les processus terrestres entre 1959 et 2023, simulées par 20 modèles dynamiques mondiaux de végétation rapportés périodiquement par le Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024).

Absorption de CO₂ par les processus océaniques

L'absorption du CO₂ supplémentaire présent dans l'atmosphère par les processus océaniques a été modélisée à l'aide de 10 modèles biogéochimiques océaniques différents, dont les résultats sont mis à jour chaque année par le Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024). À l'instar des résultats des modèles terrestres, tous les modèles océaniques s'accordent à dire que les océans mondiaux ont séquestré le carbone de l'atmosphère à un rythme croissant entre 1959 et 2023 (figure 3.2.4). Contrairement aux modèles terrestres, cependant, les modèles océaniques sont beaucoup plus cohérents entre eux, le modèle produisant l'augmentation la plus rapide de l'absorption de CO₂ n'étant que 65 % plus rapide que le modèle présentant l'augmentation la plus lente. Malgré la relative concordance entre les modèles, Friedlingstein *et al.* (2022) notent qu'il existe des divergences importantes entre les différentes méthodes concernant la force du puits océanique au cours de la dernière décennie, en particulier dans l'océan Austral.

Il convient de noter que la tendance moyenne de l'absorption de CO₂ dans tous les modèles terrestres de la figure 3.2.3 est supérieure de 25 % à la tendance moyenne de l'absorption océanique. Cela suggère que les processus terrestres augmentent leur capacité à éliminer le CO₂ plus rapidement que les processus océaniques n'augmentent leur séquestration de CO₂.

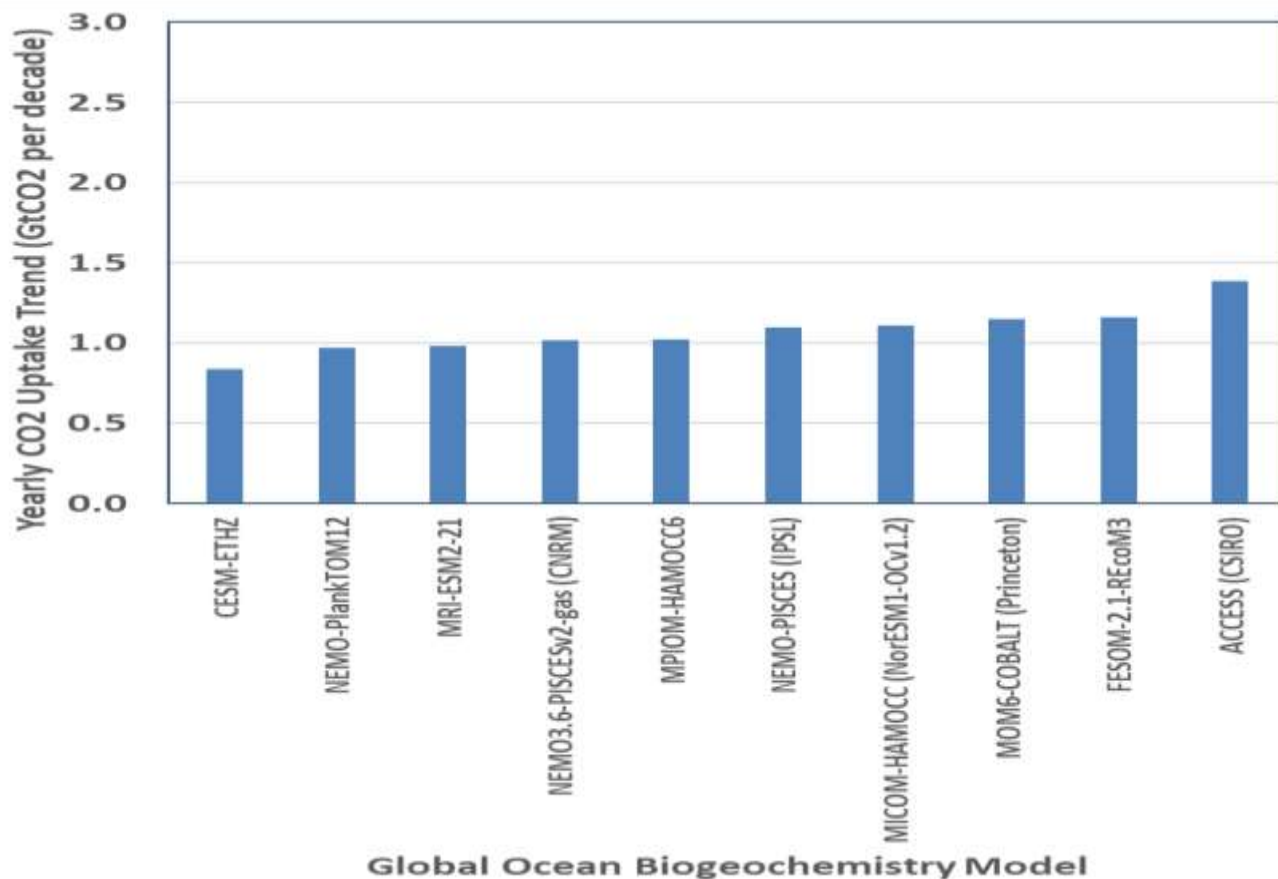


Figure 3.2.4 Tendances de l'absorption annuelle de CO₂ (Gt-CO₂ par an et par décennie) par les processus océaniques entre 1959 et 2023, simulées par 10 modèles biogéochimiques océaniques différents et rapportées périodiquement par le Global Carbon Project (Friedlingstein, 2024).

3.3 Influence de l'urbanisation sur les tendances de température

Les données historiques sur les températures terrestres ont été collectées principalement dans les zones habitées. Cela pose le problème de la filtration des signaux de réchauffement non climatiques dus aux îlots de chaleur urbains (ICU [en anglais UHI Urban Heat Island]) et à d'autres changements de la surface terrestre. Si ces effets ne sont pas éliminés, les données pourraient surestimer l'impact des gaz à effet de serre sur le réchauffement observé. Le GIEC reconnaît que les données brutes sur les températures sont contaminées par les effets des ICU, mais affirme disposer de procédures de nettoyage des données qui les éliminent. La question de savoir si ces procédures sont suffisantes reste ouverte.

L'AR6 a minimisé cette question en affirmant (WGI p. 235) qu'aucune preuve récente n'était venue modifier la conclusion de l'AR5 selon laquelle l'urbanisation entraîne un biais à la hausse ne dépassant pas 10 % dans la tendance au réchauffement de la surface terrestre mondiale. L'AR5 (WGI p. 189) a également cité cette limite supérieure de 10 % sans mentionner de source. L'AR4 (WGI p. 244) citait Jones *et al.* (1990) et Peterson *et al.* (1999) comme source de cette affirmation. Peterson *et al.* n'avaient trouvé aucune différence entre les tendances observées dans les échantillons ruraux et urbains, bien que leur définition du terme « rural » incluait les populations locales comptant jusqu'à 10 000 personnes, alors que l'influence relative de l'urbanisation commence bien en dessous de ce seuil (Spencer *et al.*, 2025). Jones *et al.* ont comparé le réchauffement rural/urbain dans trois régions : l'est de l'Australie, l'est de la Chine et l'ouest de l'Union soviétique. Leur définition du terme « rural » incluait les villes comptant jusqu'à 10 000 habitants dans

l'ancienne Union soviétique et jusqu'à 100 000 en Chine. Ils ont constaté des biais de réchauffement relatifs supérieurs à 10 % dans ces zones, mais ont émis l'hypothèse que l'effet de l'urbanisation, calculé en moyenne sur les zones qu'ils n'ont pas examinées, ramènerait le biais global pour les terres émergées à moins de 10 % de la tendance au réchauffement observée.

Plusieurs articles ont été publiés avant le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (AR4) qui affirmaient que l'effet de réchauffement des ICU ajoutait une composante relativement importante (30 à 50 %) au réchauffement observé et n'était pas simulé par les modèles climatiques (de Laat et Maurellis 2006, McKittrick et Michaels 2007). Ces conclusions s'appuyaient sur des corrélations entre les endroits où le réchauffement était le plus important sur les terres émergées et ceux où le développement socio-économique était le plus avancé. Le quatrième rapport du GIEC affirmait (p. 244) que ces corrélations étaient un artefact des circulations atmosphériques naturelles et qu'elles étaient en fait statistiquement insignifiantes, et sur cette base, il a écarté ces conclusions. Cette affirmation était controversée car elle n'était étayée par aucune preuve. McKittrick (2010) et McKittrick et Nierenberg (2010) ont montré que la prise en compte de diverses explications alternatives conjecturées pour ces corrélations n'affectait pas leur signification. L'AR5 (p. 189) a concédé que l'AR4 n'avait fourni « aucune preuve explicite » à l'appui de son évaluation et a en outre reconnu, sur la base de ces articles, qu'il existait « des preuves significatives d'une telle contamination des données », c'est-à-dire un biais de réchauffement dans les données terrestres. Cependant, comme déjà indiqué, ailleurs dans le rapport AR5, ils ont repris l'affirmation de l'AR4 selon laquelle ce biais était inférieur à 10 % du réchauffement observé. En outre, ils n'ont émis aucune mise en garde concernant l'utilisation des données terrestres pour mesurer le climat, malgré avoir admis l'existence de preuves d'une contamination par l'UHI. Récemment, Soon *et al.* (2023) ont estimé que le biais d'urbanisation dans les données terrestres de l'hémisphère nord entre 1850 et 2018 était suffisant pour augmenter la tendance dans les données combinées de 0,55 °C à 0,89 °C par siècle.

Certaines études fournissant des preuves contre la contamination par les ICU ont comparé les taux de réchauffement entre les zones rurales et urbaines (Jones *et al.* 1990, Peterson *et al.* 1999, Wickham *et al.* 2013). On ignore si ces méthodes seraient capables de détecter un biais ÎUE même s'il existe. L'influence du réchauffement dû à l'UHI est logarithmique par rapport à la population, c'est-à-dire qu'elle est plus forte lorsque la densité de population est faible, puis se stabilise à mesure que l'urbanisation locale s'étend (Oke 1973, Spencer *et al.* 2025). Par conséquent, l'absence de différence entre les taux de réchauffement des stations urbaines et rurales ne prouve pas l'absence de contamination par l'ICU. McKittrick (2013) a fourni une démonstration empirique dans laquelle les tendances rurales/urbaines n'étaient pas significativement différentes dans un ensemble de données qui, pour d'autres raisons, était contaminé par un biais IUE.

Parker (2006) a examiné un échantillon de sites urbains et n'a trouvé aucune différence de tendance entre les sous-ensembles répartis en fonction de la vitesse du vent nocturne, concluant sur cette base que l'urbanisation ne pouvait pas être un facteur significatif. Là encore, la question est de savoir si une telle méthode permettrait de détecter un biais ICU même s'il existe. McKittrick (2013) a présenté un exemple dans lequel des données contaminées par l'ICU ne présentaient pas de différences de tendance significatives lorsqu'elles étaient stratifiées en fonction de la vitesse du vent.

La difficulté de mesurer le biais ICU réside dans le fait de relier les changements de température locaux à un changement correspondant de la population ou de l'urbanisation, plutôt qu'à une variable de classification statique telle que « rural » ou « urbain ». Spencer *et al.* (2025) ont utilisé de nouvelles archives historiques sur la population pour entreprendre une telle analyse et ont trouvé des preuves d'un biais ICU significatif dans les données sur les températures estivales aux États-Unis.

En résumé, si le réchauffement des terres est clairement établi, il existe également des preuves qu'il est biaisé à la hausse par les modèles d'urbanisation et que ces biais n'ont pas été complètement éliminés par les algorithmes de traitement des données utilisés pour produire les ensembles de données climatiques.

Références

- Angert, A., S. Biraud, Bonfils, C., Buermann, W. and I. Fung (2004). CO₂ seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink. *Geophysical Research Letters* 31. <https://doi.org/10.1029/2004GL019760>
- AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch. 21
- AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2013) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2007) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.
- Burgess, Matthew et al (2021) *Environmental Research Letters* 16 014016
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abcdd2/meta>
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Connolly, Roman, Willie Soon, Michael Connolly et al. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate *Research in Astronomy and Astrophysics* 21(6) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Crisp, David & Dolman, Han (A.J.) & Tanhua, Toste & Mckinley, Galen & Hauck, Judith & Bastos, Ana & Sitch, Stephen & Eggleston, Simon & Aich, Valentin. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle?. *Reviews of Geophysics*. 60. 10.1029/2021RG000736.
- De Laat, A.T.J., and A.N. Maurellis (2006), Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends, *International Journal of Climatology* 26:897—913.
- Friedlingstein, P., and 95 co-authors (2024): Global Carbon Budget 2024, *Earth System Science Data* 14(4), <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519>
- Hausfather et al. (2019) “Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections” *Geophysical Research Letters* 47(1) <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020a) “Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading” *Nature* 29 January 2020 <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3>
- Hausfather, Z. and G. Peters (2020b) RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 27791–27792 (2020)
- Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. *Nature Climate Change*. 13, 127–129 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>
- Jones, P. D., P. Y. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang, and T. R. Karl (1990), Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, *Nature*, 347, 169 – 172
- Liu, Pengfei et al. (2021) “Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere” *Science Advances* 7(22) May 2021
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379>
- McKittrick, R.R. and P.J. Michaels (2007), Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S09, doi:10.1029/2007JD008465.
- McKittrick, Ross R. (2010) Atmospheric Oscillations Do Not Explain the Temperature-Industrialization Correlation. *Statistics Politics and Policy* Vol 1. No. 1., July 2010
- McKittrick, Ross R. (2013) Encompassing Tests of Socioeconomic Signals in Surface Climate Data. *Climatic Change* doi 10.1007/s10584-013-0793-5. Volume 120, Issue 1-2.
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0793-5>

- McKittrick, Ross R. and Nicolas Nierenberg (2010) Socioeconomic Patterns in Climate Data. *Journal of Economic and Social Measurement*, 35(3,4) pp. 149-175. DOI 10.3233/JEM-2010-0336
- McKittrick, Ross R., Mark Strazicich and Junsoo Lee (2012) “Long-Term Forecasting of Global Carbon Dioxide Emissions: Reducing Uncertainties Using a Per-Capita Approach.” *Journal of Forecasting*, Vol 32, Issue 5, pp 435-451 DOI: 10.1002/for.2248.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* 7, 769-779 22
- Parker, D.E. (2006) “A Demonstration that Large-Scale Warming is not Urban.” *Journal of Climate* 19:2882—2895.
- Peterson, Thomas C., Kevin P. Gallo, Jay Lawrimore, Timothy W. Owen, Alex Huang, David A. McKittrick (1999) Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters* February 1999
<https://doi.org/10.1029/1998GL900322>
- Pielke Jr., Roger and Ritchie, Justin (2020) “Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment” *Social Sciences Research Network* April 2020, available at:
<https://ssrn.com/abstract=3581777>
- Pielke Jr, R., Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005-2050 emissions scenarios project between 2 and 3 degrees C of warming by 2100. *Environmental Research Letters* 17 024027
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac4ebf/pdf>
- Scaffeta, Nicola, Richard C. Willson, Jae N. Lee and Dong Wu (2019) Modeling Quiet Solar Luminosity Variability from TSI Satellite Measurements and Proxy Models during 1980–2018. *Remote Sensing* 11(21) 2569 <https://doi.org/10.3390/rs11212569>
- Schoeberl, M.R., Y. Wang, G. Taha, D.J. Zawada, R. Ueyama and A. Dessler, 2024. Evolution of the climate forcing during the two years after the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption. *Journal of Geophysical Research*, 129.
- Schwalm, C.R., S. Glendon, P. B. Duffy (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 117, 19656–19657 (2020).
- Soon, W.; Connolly, R.; Connolly, M.; Akasofu, S.-I.; Baliunas, S.; et al. (2023) The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data. *Climate* 2023, 11, 179. <https://doi.org/10.3390/cli11090179>
- Spencer, Roy W, John R Christy and William D. Braswell (2025) Urban Heat Island Effects in U.S. Summer Surface Temperature Data, 1895–2023 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* April 2025
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0199.1>
- Wickham C, R Rohde , RA Muller, J Wurtele, J Curry, et al. (2013) Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. *Geoinformatics and Geostatistics: An Overview* 1:2.
- Zacharias, Pia (2014) An Independent Review of Existing Total Solar Irradiance Records. *Surveys in Geophysics* 35 pp. 897—912 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-014-9294-y>

PARTIE II : RÉPONSE DU CLIMAT AUX ÉMISSIONS DE CO₂

4 SENSIBILITÉ DU CLIMAT AU FORÇAGE PAR LE CO₂

Résumé du chapitre

Il est de plus en plus reconnu que les modèles climatiques ne sont pas adaptés pour déterminer la sensibilité climatique à l'équilibre (ECS) du climat à l'augmentation du CO₂. Le GIEC s'est tourné vers des approches fondées sur des données, notamment des données historiques et des reconstitutions paléoclimatiques, mais leur fiabilité est compromise par l'insuffisance des données.

Les estimations de l'ECS fondées sur des données tendent à être inférieures aux valeurs générées par les modèles climatiques. La limite supérieure de l'IPCC AR6 pour la fourchette probable de l'ECS est de 4,0 °C, soit une valeur inférieure à celle de l'AR5, qui était de 4,5 °C. Cette révision à la baisse de la limite supérieure semble bien justifiée par les données paléoclimatiques. La limite inférieure de l'AR6 pour la fourchette probable de l'ECS est de 2,5 °C, ce qui est nettement supérieur à la valeur de 1,5 °C de l'AR5. Cette augmentation de la limite inférieure est moins justifiée ; les données disponibles depuis l'AR6 indiquent en effet que la limite inférieure de la fourchette *probable* se situe autour de 1,8 °C.

4.1 Introduction

L'ampleur de la réponse du climat à l'augmentation des concentrations de CO₂ est au cœur du débat scientifique sur le changement climatique anthropique, et donc également du débat public sur « l'action pour le climat ». La mesure la plus simple de cette réponse est l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe, quantifiée par la sensibilité climatique à l'équilibre (ECS). L'ECS est définie comme le réchauffement attendu en réponse à un doublement de la concentration de CO₂ par rapport à sa concentration préindustrielle de 280 ppm, après que tous les composants du climat ont eu le temps de s'adapter. Certaines composantes, comme les températures dans la basse atmosphère (troposphère), s'adaptent rapidement, tandis que d'autres, comme les océans profonds et la cryosphère, peuvent mettre des siècles à s'adapter. Une mesure connexe, la réponse climatique transitoire (TCR), décrit mieux les échelles de temps plus courtes ; elle est définie comme le réchauffement qui se produit lorsque la concentration de CO₂ double en augmentant de 1 % par an pendant 70 ans.

Le rapport Charney de 1979 pour l'Académie nationale des sciences des États-Unis (National Research Council 1979) proposait un ECS le plus probable sur $3,0 \pm 1,5$ °C. Le GIEC a réaffirmé à plusieurs reprises cette fourchette, avec seulement des variations mineures, jusqu'à son dernier rapport AR6. Le rapport AR5 a qualifié *de probable* la fourchette de 1,5 à 4,5 °C (probabilité de 66 %) et a déclaré qu'il était *extrêmement improbable* (probabilité de 95 %) que l'ECS soit inférieure à 1,0 °C et *très improbable* (probabilité de 90 %) qu'elle dépasse 6,5 °C.

L'incertitude concernant l'ECS reste très importante, malgré de nombreuses études individuelles qui prétendent la réduire (Hausfather 2023). Plus récemment, le rapport AR6 a réduit la fourchette *probable* à 2,5-4,0 °C et a estimé que la fourchette *très probable* était de 2,0-5,0 °C. Cette réduction de la fourchette basse est contestée, comme nous le verrons ci-dessous.

Les incertitudes relatives à l'ECS ont des conséquences importantes pour l'élaboration des politiques. Comme nous le verrons au chapitre 11, les modèles économiques utilisent les valeurs de l'ECS pour projeter les coûts des émissions de CO₂. La valeur traditionnelle (3,0 °C) a généralement donné lieu à des coûts sociaux mondiaux modestes pour les émissions de CO₂, suffisants pour justifier certaines mesures politiques, mais principalement reportées à plus tard dans le siècle. Si l'ECS est très élevée (supérieure à 4,5 °C), des mesures

immédiates et agressives de contrôle des émissions deviennent plus impératives, alors qu'aucune mesure de contrôle des émissions de CO₂ n'est économiquement justifiable pour une ECS inférieure à 2,0 °C (Dayaratna *et al.* 2017, 2020). Il est impossible d'obtenir une estimation précise, de sorte que l'élaboration des politiques doit tenir compte de cette incertitude.

En soi, l'effet de réchauffement à l'équilibre d'un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ est légèrement supérieur à 1°C (Soden et Held 2006). Des valeurs plus élevées de l'ECS résultent de rétroactions positives qui amplifient le réchauffement dû au CO₂. La rétroaction de la vapeur d'eau est positive : une atmosphère plus chaude peut contenir plus de vapeur d'eau, qui est elle-même un puissant gaz à effet de serre. Des températures plus élevées entraînent également une diminution de la couverture neigeuse et de la banquise, ce qui permet à la Terre d'absorber davantage le rayonnement solaire. Certaines estimations simples de ces rétroactions augmentent l'ECS à environ 2 °C (Sherwood *et al.*, 2020). Des valeurs plus élevées de l'ECS sont associées à des rétroactions positives des nuages.

Les climatologues utilisent plusieurs sources de données pour déterminer la sensibilité climatique à l'équilibre :

- Simulations de modèles climatiques
- Observations historiques
- Reconstitutions paléoclimatiques
- Compréhension des processus de rétroactions

4.2 Estimations de la sensibilité climatique fondées sur des modèles

Les fourchettes d'ECS indiquées dans les rapports AR4 et AR5 du GIEC ont été obtenues principalement en examinant le comportement de modèles climatiques à grande échelle, également appelés modèles de circulation générale (GCM General Circulation Models). Cependant, le GIEC a changé de cap dans son rapport AR6 en se tournant vers une méthodologie plus directe, fondée sur les données. Nous discutons ici de certains des écueils liés à l'utilisation des GCM pour tenter de déterminer la sensibilité climatique de la Terre.

L'ECS peut être déterminée à partir de simulations de modèles climatiques en doublant la concentration de CO₂ et en laissant plusieurs siècles au réchauffement pour s'équilibrer. Pour éviter de recourir à des simulations aussi longues, la « sensibilité climatique effective » est généralement évaluée à partir d'une simulation sur 150 ans en réponse à un quadruplement soudain du CO₂ .

En principe, l'ECS est une propriété émergente des GCM, c'est-à-dire qu'elle n'est pas directement paramétrée ou ajustée, mais qu'elle apparaît dans les résultats de la simulation. Des GCM et des choix de paramètres par ailleurs plausibles ont été écartés en raison d'un conflit apparent avec le taux de réchauffement attendu ou d'une aversion pour une sensibilité climatique du modèle se situant en dehors d'une fourchette acceptée (Mauritsen *et al.* 2012). Cette pratique était courante pour les modèles utilisés dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (AR4) ; les modélisateurs se sont avec le temps éloignés de cette pratique. Cependant, même dans un modèle CMIP6, Mauritsen et Roeckner (2020) déclarent ce qui suit concernant le modèle climatique de l'Institut Max Planck (MPI) (mise en évidence ajoutée) :

« Nous avons documenté la manière dont nous avons ajusté le modèle climatique mondial MPI-ESM1.2 afin qu'il corresponde aux données instrumentales sur le réchauffement ; une entreprise qui s'est clairement avérée fructueuse. En raison de l'ordre chronologique des événements, nous avons choisi de procéder de manière pratique en **ciblant une ECS d'environ 3 K à l'aide des rétroactions des nuages**, plutôt que d'ajuster le forçage des aérosols. »

En d'autres termes, les modélisateurs du MPI ont choisi une valeur ECS de 3 °C, puis ont ajusté les paramétrisations des nuages pour obtenir le résultat souhaité.

Comme indiqué, le réchauffement direct dû au doublement du CO₂ n'est que d'environ 1°C (Soden et Held 2006) ; le réchauffement supplémentaire résulte de rétroactions climatiques qui ne sont pas explicitement résolues par le GCM, mais reposent sur des paramétrisations des processus physiques. Les valeurs plus élevées de l'ECS proviennent principalement des rétroactions positives des nuages, alors que l'ampleur et même le signe de ces rétroactions sont très incertains.

Les éléments de la rétroaction des nuages comprennent les changements dans la distribution latitudinale des nuages, les changements dans la distribution de la hauteur des nuages (changements dans les nuages bas par rapport aux nuages élevés), les changements dans la phase des nuages (glace par rapport à liquide), les changements dans la taille des particules de nuages (associés à des changements dans la concentration et/ou la composition des particules d'aérosols), les changements dans l'efficacité des précipitations des nuages, et même les changements dans la façon dont les nuages sont répartis au cours du cycle solaire quotidien (Curry et Webster, 1999). Il est difficile pour les GCM de simuler correctement l'un de ces processus en raison de leur petite échelle, et encore moins de prédire comment ils évolueront à l'avenir. En outre, les processus nuageux modulent l'amplitude des rétroactions de la vapeur d'eau, du gradient thermique et de l'albédo de surface.

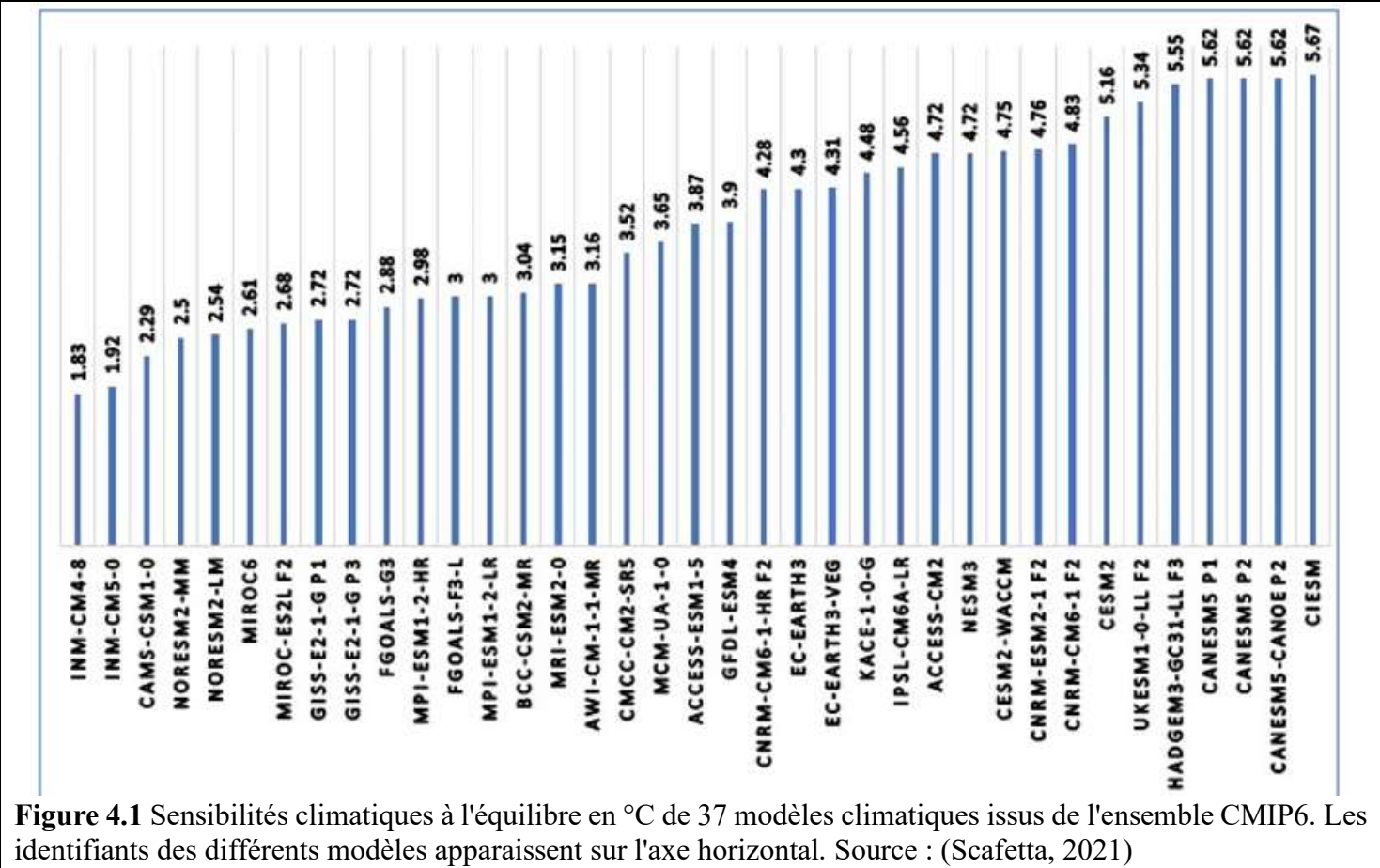


Figure 4.1 Sensibilités climatiques à l'équilibre en °C de 37 modèles climatiques issus de l'ensemble CMIP6. Les identifiants des différents modèles apparaissent sur l'axe horizontal. Source : (Scafetta, 2021)

La fourchette des valeurs de l'ECS issues de l'ensemble de modèles climatiques CMIP5 utilisés dans l'AR5 était comprise entre 2,0 et 4,7 °C ; cette fourchette a augmenté pour les modèles CMIP6 utilisés dans l'AR6, passant à 1,8 et 5,7 °C (Chen *et al.*, 2021, Scaffetta 2021, voir figure 4.1). Loin de résoudre la question de la sensibilité climatique basée sur des modèles, la fourchette semble s'élargir. La principale cause de la hausse

globale de l'ECS dans le CMIP6 par rapport au CMIP5 est une rétroaction positive plus importante des nuages, due à des modifications des paramétrisations des nuages dans de nombreux modèles CMIP6 (Zelinka *et al.*, 2020).

En raison des préoccupations liées à l'ajustement des modèles et à la forte sensibilité aux paramétrisations des nuages, l'AR6 (2021) ne s'est pas appuyé sur des simulations de modèles climatiques pour évaluer la sensibilité climatique, mais plutôt sur des méthodes fondées sur des données nuages.

4.3 Estimations de la sensibilité climatique basées sur des données

La sensibilité climatique peut également être estimée à partir des enregistrements instrumentaux des températures de surface et de la chaleur contenue dans les océans, combinés à des estimations de l'évolution des forçages climatiques (par exemple, les gaz à effet de serre, le rayonnement solaire, les volcans, les aérosols) dans le passé (Otto *et al.*, 2013). À partir de ces informations, un modèle empirique simple d'équilibre énergétique peut être utilisé. Il nécessite d'estimer un paramètre de rétroaction dont les incertitudes sont fortement amplifiées dans l'ECS qui en résulte (Roe et Baker, 2007) nuages.

La précision des méthodes basées sur les données dépend de la qualité des données d'entrée. Des hypothèses doivent être formulées concernant le stockage de chaleur dans les océans, et seules les données des dernières décennies sont fiables. La principale source d'incertitude réside dans la quantité et la composition des particules d'aérosols et leurs interactions avec les propriétés radiatives des nuages (ce que l'on appelle l'effet indirect des aérosols ; voir figures 3.1.1 et 3.1.2). Les modèles climatiques montrent un réchauffement en réponse aux GES, mais un refroidissement en réponse aux aérosols (Schwartz *et al.*, 2007). Le réchauffement observé au cours du XX^{ème} siècle peut être considéré comme compatible soit avec une faible ECS et un faible refroidissement par les aérosols, soit avec une ECS élevée et un refroidissement élevé par les aérosols. Étant donné que l'utilisation de combustibles fossiles ajoute à la fois des GES et des aérosols dans l'atmosphère, ces deux effets doivent être estimés afin d'isoler l'effet réchauffant du CO₂.

Les proxies ou marqueurs paléoclimatiques sont également utilisés pour évaluer la sensibilité des climats passés en comparant les changements paléoclimatiques des températures terrestres aux estimations des changements des forçages. Les deux périodes les plus instructives sont le dernier maximum glaciaire (il y a environ 20 000 ans), qui était environ 3 à 7 °C plus froid qu'aujourd'hui [NdT : les températures de la zone intertropicale varient peu (1°C) alors que les zones polaires et des hautes latitudes sont refroidies de 20°C et plus] , et une période du Pléistocène moyen (il y a environ trois millions d'années), qui était 1°C à 3°C plus chaude qu'aujourd'hui. Les limites du refroidissement pendant le dernier maximum glaciaire constituent la meilleure preuve que des valeurs élevées de sensibilité climatique sont peu probables. Cependant, les estimations paléoclimatiques sont associées à de très grandes incertitudes quant aux températures et aux forçages estimés. En outre, les estimations de la sensibilité climatique basées sur les états climatiques passés pourraient ne pas être applicables à l'état actuel du système climatique.

Un thème récurrent dans la littérature sur le climat est que les estimations de l'ECS basées sur des données historiques sont inférieures aux estimations de l'ECS déduites des modèles climatiques (Sherwood et Forest 2024). Environ 15 estimations basées sur des données historiques ont été publiées dans la littérature évaluée par des pairs entre 2012 et 2024, donnant les meilleures estimations de l'ECS entre 1,0 °C et 2,5 °C, bien que des critiques aient remis en question certaines des méthodes et la qualité des données. Pour le sixième rapport d'évaluation (AR6), le GIEC a accordé une importance primordiale aux résultats de Sherwood *et al.* (2020), qui ont combiné des données historiques et des proxies paléoclimatiques avec une approche fondée sur les processus et ont abouti à une meilleure estimation de 3,1 °C avec une fourchette *probable* comprise entre 2,6 et 3,9 °C. Lewis (2022) a signalé un certain nombre de doutes sur ce résultat, notamment des erreurs méthodologiques, des valeurs d'entrée obsolètes et l'utilisation d'a priori bayésiens subjectifs dans l'analyse. L'analyse de Lewis a trouvé que la sensibilité climatique estimée est à un niveau bien plus bas et mieux

contraint que dans l'analyse de Sherwood *et al.* – médiane de 2,2 °C (1,8°C à 2,7 °C dans la fourchette *probable* de 17% à 83 %, et 1,6°C à 3,2 °C dans la fourchette *très probable* de 5% à 95 %). Le sixième rapport d'évaluation du GIEC n'estimait qu'à 5 % la probabilité que l'ECS soit inférieure à 2,3 °C, alors que Lewis l'estimait à plus de 50 %. Les publications les plus récentes sur le débat entre Sherwood *et al.* et Lewis défendent leurs positions respectives : Sherwood et Foster (2024) et Lewis (2025).

Un argument mis en avant dans le rapport AR6 est que les estimations du réchauffement climatique basées sur des données pourraient sous-estimer la réponse future au réchauffement climatique due aux GES en raison d'un « effet géographique [Pattern Effect] » (Forster *et al.*, 2021). On pense que le Pacifique tropical influence fortement l'efficacité globale avec laquelle la Terre rayonne la chaleur vers l'espace, mais certaines régions éliminent la chaleur plus efficacement que d'autres. Si le gradient de température ouest-est dans le Pacifique tropical s'affaiblit dans un climat plus chaud, le réchauffement se concentrerait là où la chaleur est éliminée moins efficacement, ce qui augmenterait l'ECS.

La plupart des modèles climatiques simulent que l'augmentation des GES affaiblira le gradient de température ouest-est, ce qui a conduit le GIEC dans son sixième rapport d'évaluation (AR6) à conclure que les estimations de l'ECS basées sur des données sous-estimaient la valeur *future* de l'ECS. Cependant, Seager *et al.* (2019) ont souligné que, contrairement aux modèles, le gradient de température est-ouest s'est renforcé au fil du temps. Ils ont en outre fait valoir que le mécanisme prédisant le contraire dans les modèles climatiques reposait sur une caractérisation erronée de la dynamique océanique et qu'il n'y avait aucune raison de s'attendre à un affaiblissement du gradient. Un argument similaire a récemment été avancé par Lee *et al.* (2024), qui ont conclu que « *la trajectoire de la tendance observée reflète la réponse à l'augmentation de la charge de GES dans l'atmosphère* » ; en d'autres termes, le réchauffement dû aux GES devrait entraîner un renforcement plutôt qu'un affaiblissement du gradient de température à l'avenir. Une efficacité accrue du refroidissement atmosphérique implique, tout au plus, que l'ECS future dans un climat en réchauffement pourrait être *inférieure* aux estimations actuelles.

4.4 Réponse climatique transitoire

La réponse climatique transitoire (TCR) fournit une contrainte observationnelle plus utile sur la sensibilité climatique. La TCR est l'augmentation de la température mondiale qui résulte d'une augmentation du CO₂ à un taux annuel de 1 % sur une période de 70 ans (*c'est-à-dire* un doublement progressif). Par rapport à l'ECS, les valeurs de la TCR déterminées par observation évitent les problèmes d'incertitude liés à l'absorption de chaleur par les océans et à la frontière floue dans la définition de l'équilibre résultant d'une gamme d'échelles de temps pour les processus de rétroaction à plus long terme (*par exemple*, les calottes glaciaires). La TCR est mieux contrainte par le réchauffement historique que l'ECS. L'AR6 a estimé que la fourchette *très probable* de la TCR se situait entre 1,2 et 2,4 °C. Contrairement à l'ECS, la limite supérieure du TCR est plus strictement contrainte. À titre de comparaison, les valeurs du TCR déterminées par Lewis (2023) sont comprises entre 1,25 et 2,0 °C, ce qui correspond beaucoup mieux aux valeurs de l'AR6 qu'à celles de l'ECS.

Références

- Carbon Brief. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity.
<https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Carbon Brief. (2020, July 22). Guest post: Why low-end 'climate sensitivity' can now be ruled out.
<https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-low-end-climate-sensitivity-can-now-be-ruled-out>

- Carbon Brief. (2021, August 9). In-depth Q&A: The IPCC's sixth assessment report on climate science. <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science>
- Chen, D., et al. (2021). Framing, context, and methods. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *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 University Press.
- Curry, J. A., & Webster, P. J. (1999). Thermodynamic feedbacks in the climate system. In *Thermodynamics of atmospheres and oceans* (pp. 351–385). Academic Press.
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. *Environmental Economics and Policy Studies* <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Forster, P., et al. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *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 University Press.
- Hausfather, Z. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity>
- Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2025). Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>
- Lee, S., Byrne, M. P., Loikith, P. C., & O'Dell, C. W. (2024). Zonal contrasts of the tropical Pacific climate predicted by a global constraint. *Climate Dynamics*, 62(1–2), 229–246. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06741-7>
- Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. *Climate Dynamics*, 61(9–10), 3155–3163. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>
- Lewis, N. (2025). Comment on “Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further?” by Sherwood and Forest (2024). *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1179>
- Thorsten Mauritsen et al., (2012) “Tuning the Climate of a Global Model,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 4, no. 3 <https://doi.org/10.1029/2012ms000154>
- Mauritsen, T., & Roeckner, E. (2020). Tuning the MPI-ESM1.2 global climate model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002037. <https://doi.org/10.1029/2019MS002037>
- Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Johnson, G. C. (2013). Energy budget constraints on climate response. *Nature Geoscience*, 6(6), 415–416. <https://doi.org/10.1038/ngeo1836>
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Roe, G. and M. Baker (2007). Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science* 318, 629–632. <https://doi.org/10.1126/science.1144735>
- Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980 1990 to 2011–2021: High ECS is not supported. *Climate*, 9(11), 161. <https://doi.org/10.3390/cli9110161>
- Schwartz, S. E., R. J. Charlson, H. Rodhe (2007). Quantifying climate change—Too rosy a picture? *Nature Climate Change* 1, 23–24, <https://doi.org/10.1038/climate.2007.22>
- Seager, R., Cane, M., Ting, M., Naik, N., Clement, A., DiNezio, P., & Lee, D. E. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nature Climate Change*, 9(7), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x>

- Sherwood, S. C., & Forest, C. E. (2024). Opinion: Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5), 2679–2686. <https://doi.org/10.5194/acp-24-2679-2024>
- Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>
- Soden, B. J., and I.M. Held (2006). An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *Journal of Climate*, 19(14), 3354–3360. <https://doi.org/10.1175/jcli3799.1>
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>

5 DIVERGENCES ENTRE MODÈLES ET OBSERVATIONS INSTRUMENTALES

Résumé du chapitre

Les modèles climatiques présentent des biais de réchauffement dans de nombreux aspects de leur reproduction des dernières décennies. En réponse aux changements estimés du forçage, ils produisent un réchauffement excessif à la surface (à l'exception des modèles présentant l'ECS la plus faible), un réchauffement excessif dans la basse et moyenne troposphère et une amplification excessive du réchauffement en altitude.

Les modèles climatiques produisent également un refroidissement stratosphérique trop important ces dernières années, des albédos hémisphériques invalides, une perte de neige trop importante et un réchauffement trop important dans la Corn Belt. Le GIEC a reconnu certains de ces problèmes, mais pas tous.

5.1 Introduction

Les modèles climatiques sont le principal outil utilisé pour projeter les changements climatiques futurs en réponse à l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre anthropiques. Pour évaluer l'adéquation des modèles climatiques à cette fin, il est raisonnable de se demander dans quelle mesure ils reproduisent le climat actuel et ses variations au cours du siècle dernier. L'encadré « Modélisation climatique » donne quelques détails sur le fonctionnement des modèles climatiques.

Il est très préoccupant de constater qu'après plusieurs décennies de modélisation climatique impliquant environ trois douzaines de modèles exploités par des centres de recherche à travers le monde, l'intervalle de prévision du réchauffement futur en réponse à un doublement hypothétique de la concentration atmosphérique de CO₂ varie d'un facteur trois, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Cet écart entre les modèles n'a pas diminué depuis des décennies.

Les problèmes liés aux modèles climatiques ne résident pas seulement dans leurs divergences quant à l'avenir, mais aussi dans leur capacité à reproduire le passé récent. Nous passons ici en revue certains des indicateurs les plus importants de la précision des modèles climatiques : capacité à reproduire les tendances historiques des températures à la surface, dans la troposphère et dans la stratosphère ; capacité à reproduire le profil de réchauffement vertical ; et capacité à reproduire d'autres caractéristiques climatiques telles que les chutes de neige. Dans tous les cas, on constate systématiquement que les modèles ont tendance à surestimer le réchauffement en réponse aux forçages historiques estimés.

ENCADRÉ : Modélisation climatique.

À l'exception des modèles climatiques les plus simples, tous représentent la surface terrestre à l'aide d'une grille de carrés d'environ 100 km de large. Pour simuler l'atmosphère, 30 cases ou plus sont généralement empilées au-dessus de ces carrés. L'océan est modélisé à l'aide d'une grille similaire mais plus fine, ce qui donne des dizaines de millions de cases pour l'atmosphère et les océans.

Les modèles informatiques, basés sur les lois physiques, calculent comment l'air, l'eau et l'énergie se déplacent entre les mailles au fil du temps. Le pas de temps peut être aussi court que 10 minutes, et la répétition de ce processus des millions de fois permet de simuler le climat sur plusieurs siècles. L'exécution de ces modèles, même sur les supercalculateurs les plus puissants, peut prendre des mois. La comparaison des résultats de la simulation avec les données climatiques historiques permet d'évaluer la précision d'un modèle, tandis que les projections dans l'avenir permettent d'estimer les changements climatiques sous l'influence supposée de l'homme et de la nature.

Bien que cela semble simple, la modélisation climatique est extrêmement complexe. De nombreux processus critiques se produisent à des échelles plus petites que la taille de la grille. Par exemple, les flux de lumière solaire et de chaleur dans l'atmosphère dépendent fortement de la couverture nuageuse. Comme il est impossible de suivre chaque nuage individuellement, les chercheurs doivent faire des hypothèses « sous-maillées » sur la distribution des nuages dans chaque case de la grille. La couverture neigeuse et glacière, qui influe sur la quantité de lumière solaire réfléchie ou absorbée par la surface, est un autre facteur sous-maillé.

Chaque hypothèse sous-maillée nécessite des paramètres numériques qui doivent être soigneusement définis. Les modélisateurs estiment initialement ces paramètres sur la base de la physique et des modèles climatiques observés, puis exécutent le modèle. Comme les premiers résultats divergent souvent considérablement des observations réelles, ils « ajustent » ces paramètres afin de mieux correspondre aux caractéristiques climatiques observées. Différentes équipes de modélisation utilisent des hypothèses et des stratégies d'ajustement distinctes, ce qui conduit à des résultats variés. L'ajustement est un aspect nécessaire mais délicat de la modélisation climatique, comme pour tout système complexe. Un mauvais ajustement peut entraîner des simulations inexactes, tandis qu'un ajustement excessif risque d'orienter artificiellement les résultats vers des conclusions prédéterminées.

Les représentations du climat actuel par les modèles sont très variées. L'un des indicateurs les plus fondamentaux, la température moyenne à la surface de la Terre, varie d'environ 3 °C entre les modèles CMIP6 avant 1880 (figure 5.1), se réduit légèrement jusqu'en 2040, puis diverge pour atteindre plus de 4 °C. À titre de comparaison, le réchauffement au cours du XX^{ème} siècle n'a été que d'environ 1,0 °C. Cette variation suggère des différences substantielles entre les processus physiques des modèles.

Au-delà de la capacité des modèles à reproduire les caractéristiques du climat actuel, la question cruciale pour la société est de savoir dans quelle mesure ils prédisent les réactions à des influences humaines subtiles, telles que les émissions de gaz à effet de serre, le refroidissement par les aérosols et les changements d'affectation des sols. L'aspect le plus crucial que les modèles doivent saisir correctement est celui des « rétroactions ». Celles-ci se produisent lorsque les changements climatiques amplifient ou atténuent le réchauffement. En général, l'effet net modélisé de toutes les rétroactions double ou triple l'impact direct du CO₂ sur le réchauffement. .

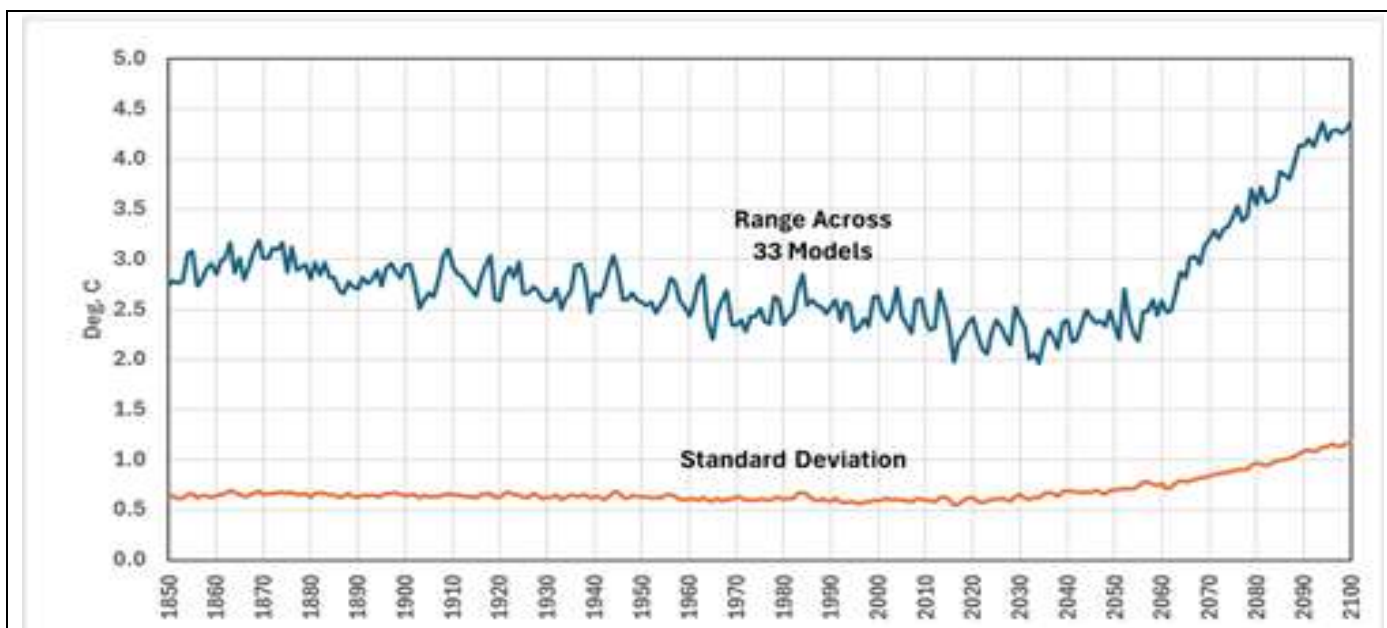


Figure 5.1 Fourchette de températures moyennes à la surface du globe selon 33 modèles CMIP6 et écart-type selon le scénario SSP5-85. Données provenant du site Web KNMI Climate Explorer à l'adresse <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>.

5.2 Réchauffement de la surface

Un test simple pour vérifier la validité d'un modèle climatique consiste à évaluer sa capacité à reproduire le réchauffement historique en réponse à des changements passés connus des facteurs climatiques tels que les gaz à effet de serre. La figure 5.2 est reproduite à partir de Scaffeta (2023), qui regroupe les modèles climatiques de dernière génération (CMIP6) en trois catégories : ECS faible (1,5 à 3,0 °C), ECS moyenne (3,0 à 4,5 °C) et ECS élevée (4,5 à 6,0 °C), et compare leurs fourchettes de simulation de la température moyenne mondiale après 1980 à celles de trois enregistrements de température de surface et d'un produit de données satellitaires sur la température de la basse troposphère.

La colonne de gauche montre que les modèles à faible ECS suivent assez bien les données historiques de réchauffement postérieures à 1980, mais les colonnes du milieu et de droite montrent que les modèles à ECS moyen et élevé surestiment de manière flagrante le réchauffement.

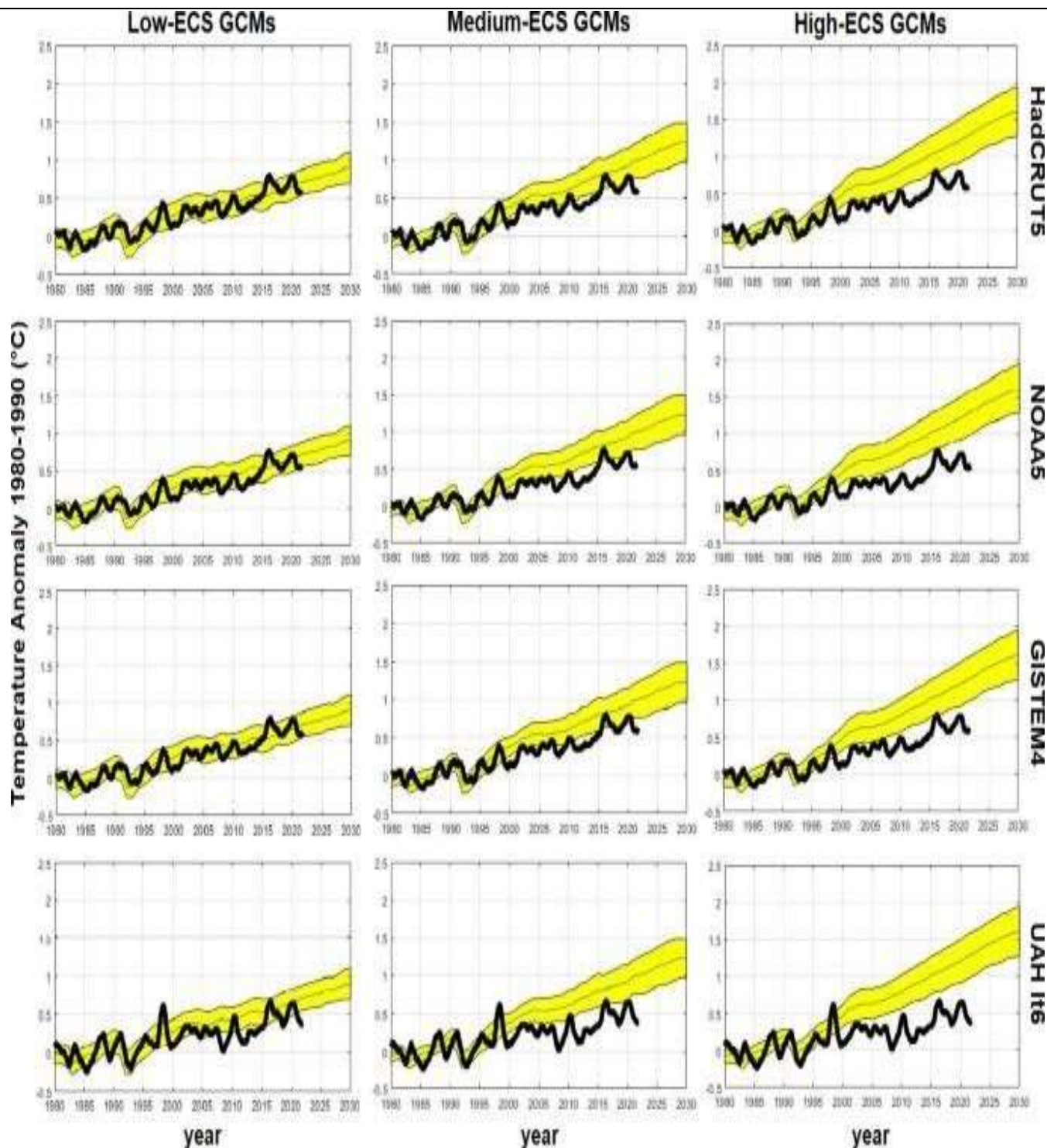


Figure 5.2 : Comparaisons entre les modèles et les observations pour le réchauffement de la surface terrestre. Les colonnes correspondent aux groupes de modèles présentant un faible ECS (13 modèles), un ECS moyen (11 modèles) et un ECS élevé (14 modèles), tandis que les lignes correspondent aux enregistrements de température observés les plus couramment utilisés, les trois premières indiquant les moyennes à la surface et la quatrième la moyenne dans la basse troposphère. Dans chaque panneau, la zone jaune indique la moyenne et la plage ($\pm$ une déviation standard) des simulations des modèles climatiques pour ce groupe. La ligne noire épaisse indique la température moyenne annuelle observée dans l'enregistrement indiqué. Source : Scafetta (2023) Fig.2.

Spencer (2024) a également fourni un résumé utile de l'écart entre les modèles et les observations en comparant les tendances des données sur la température de surface avec celles des modèles climatiques individuels, comme le résume la figure 5.3 ; la plupart des modèles climatiques montrent un réchauffement nettement plus important que les observations depuis 1979.

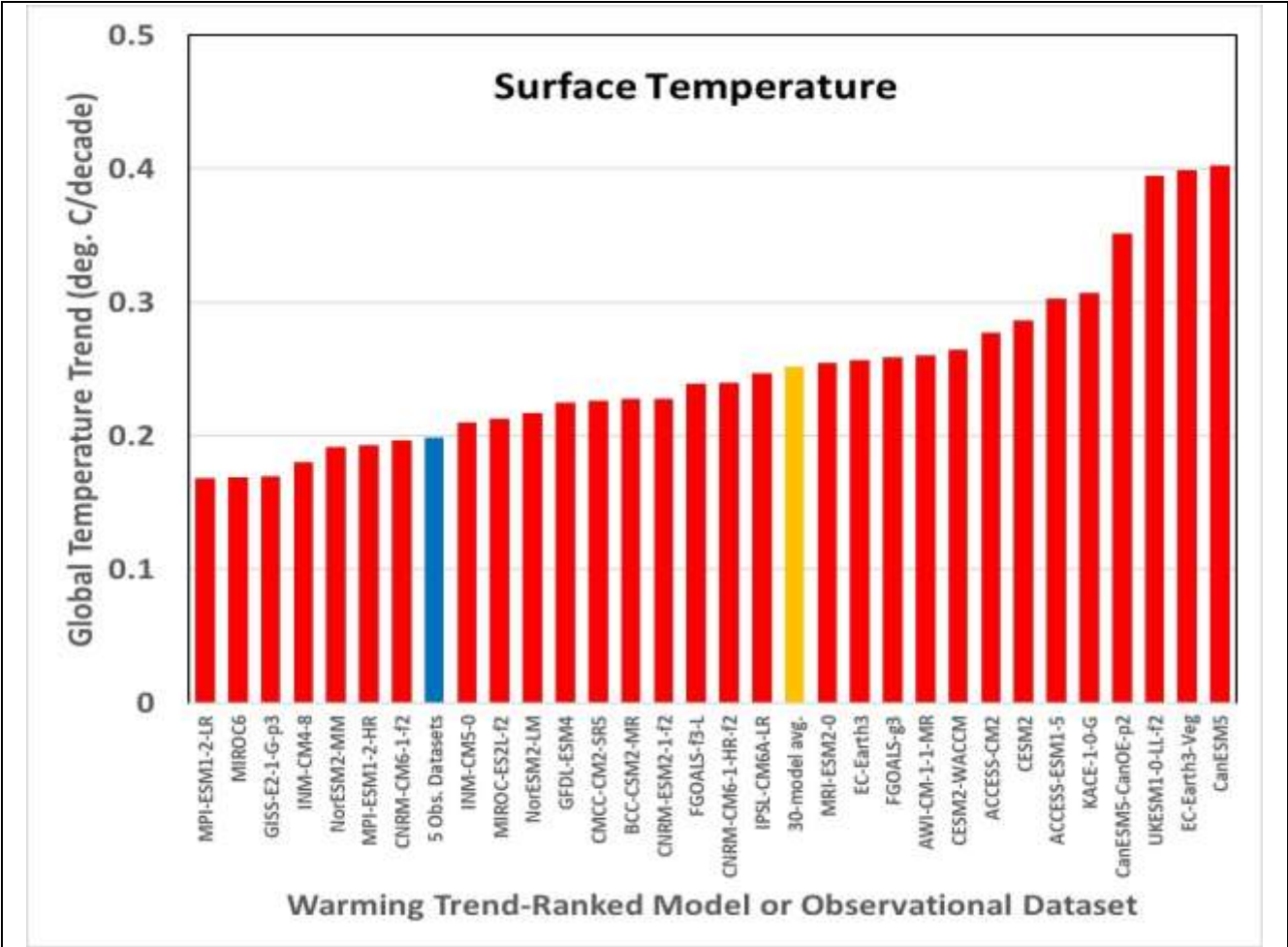


Figure 5.3 Tendances de la température de l'air à la surface du globe (°C/décennie), 1979-2024, d'après divers modèles climatiques CMIP6 (en rouge, moyenne de 30 modèles en orange) ; et moyenne de trois ensembles de données thermométriques (HadCRUT5, NOAA Global Temp et Berkeley 1 deg.) et de deux ensembles de données de réanalyse (ERA5 et NCEP/NCAR R1) en bleu. Source des données : <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>.

5.3 Réchauffement de la troposphère

On sait depuis longtemps que les modèles climatiques surestiment en moyenne le réchauffement dans la troposphère tropicale. Cette région constitue un test important pour les modèles climatiques, car c'est là que le signal du réchauffement anthropique dû à l'effet de serre apparaît le premier et le plus fortement. Les biais dans les tendances troposphériques indiquent des défauts dans les modèles relatifs aux processus de transfert de chaleur, qui se traduisent par des erreurs sur le réchauffement en surface.

Cette divergence a été signalée comme une incohérence grave dans le premier rapport du Programme scientifique américain sur le changement climatique (Karl *et al.* 2006) et a été mentionnée dans tous les rapports du GIEC depuis lors, mais elle s'est aggravée au fil du temps et le biais est désormais mondial. McKittrick et Christy (2020) ont comparé les tendances du réchauffement troposphérique dans les modèles climatiques CMIP6 aux tendances observées par les satellites, les ballons-sondes et les systèmes de réanalyse.

Tous les modèles ont surestimé la tendance moyenne du réchauffement observée entre 1979 et 2014 dans les couches inférieure et moyenne de la troposphère, tant à l'échelle mondiale que dans les régions tropicales. Dans la plupart des modèles individuels, le biais était statistiquement significatif et, en moyenne, il était très significatif dans l'ensemble des modèles.

La figure 5.4 présente les comparaisons avec les données mises à jour jusqu'en 2024 (McKittrick et Christy 2025). Les années chaudes récentes ont légèrement fait remonter la tendance observée et élargi les intervalles de confiance, mais la tendance générale reste la même : le biais des modèles est vers un réchauffement excessif, dans la plupart des cas la différence est statistiquement significative et, en moyenne, le biais est statistiquement très significatif. McKittrick et Christy (2020) ont également montré que le biais est plus important dans les modèles à ECS élevé, mais même les modèles avec un ECS moyen plus faible prédisent un réchauffement trop important. Si les modèles climatiques futurs devaient représenter de manière réaliste le réchauffement troposphérique mondial, ils seraient probablement moins sensibles que les membres à faible ECS de l'ensemble CMIP6.

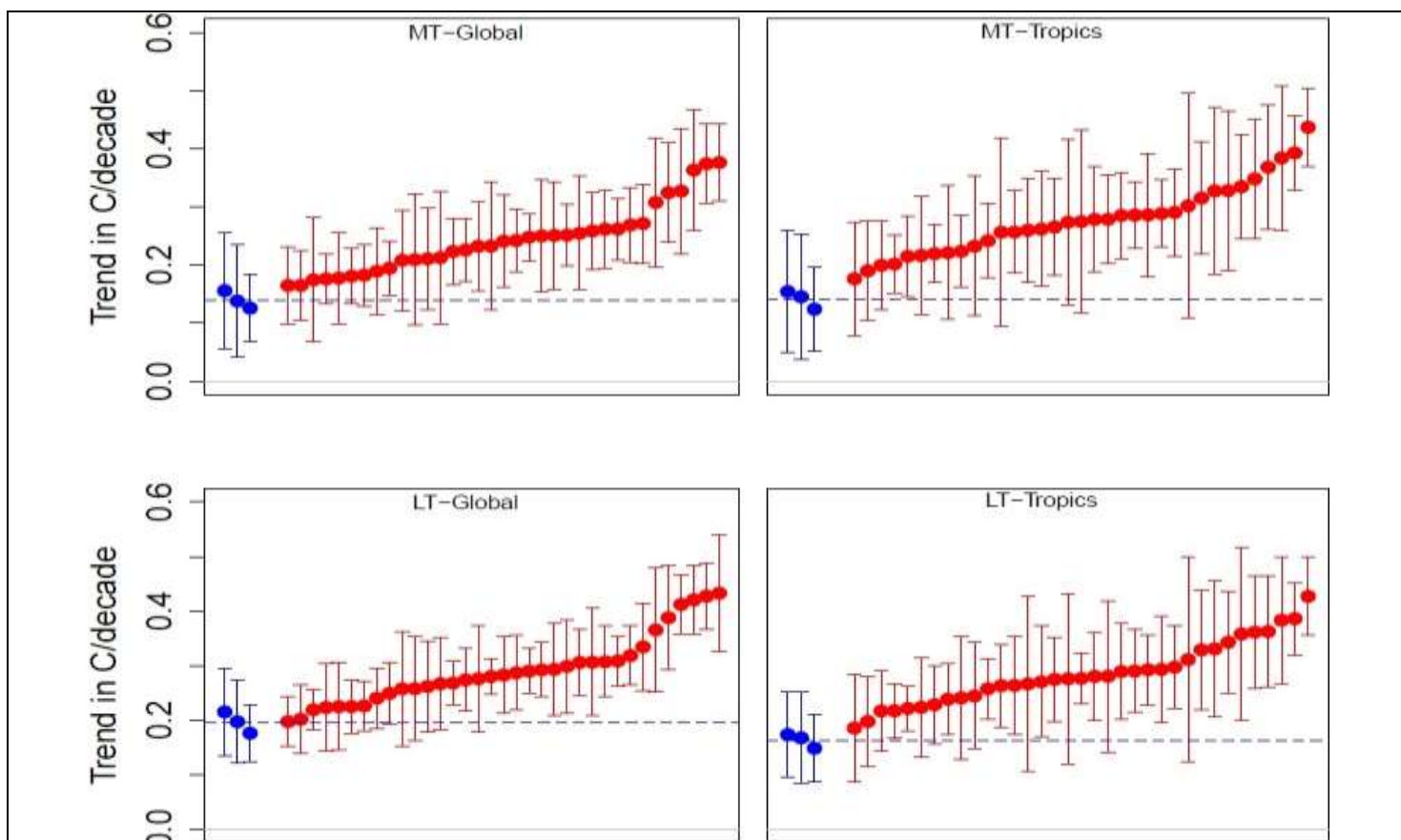


Figure 5.4 : Tendances du réchauffement observées par rapport à celles modélisées par le CMIP6 ($^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ 1979-2024) dans la troposphère inférieure (LT) et moyenne (MT) mondiale et tropicale, selon la méthodologie de McKittrick et Christy (2020) sur la base de données mises à jour de 2014 à 2024.

Points bleus : tendances du réchauffement avec des intervalles de confiance à 95 % pour 3 produits de données (radiosondes, réanalyse et satellites). Ligne bleue en pointillés : moyenne des tendances du réchauffement pour 3 séries observées.

Points rouges : tendances du réchauffement modélisées avec des intervalles de confiance à 95 % dans 35 modèles classés du plus bas au plus élevé.

Comme mentionné précédemment, le GIEC reconnaît depuis longtemps l'écart entre les modèles et les observations. Par exemple, le rapport AR6, pages 443-444, fournit les informations suivantes sur la troposphère tropicale (il ne traite pas de la comparaison mondiale) :

Plusieurs études menées depuis le cinquième rapport d'évaluation ont continué à démontrer une incohérence entre les tendances de température simulées et observées dans la troposphère tropicale, les modèles simulant un réchauffement plus important que les observations (Mitchell *et al.*, 2013, 2020 ; Santer *et al.*, 2017a, b ; McKittrick et Christy, 2018 ; Po-Chedley *et al.*, 2021) ... Au cours de la période 1979-2014, les modèles sont plus cohérents avec les observations dans la basse troposphère, et moins cohérents dans la haute troposphère autour de 200 hPa, où les biais dépassent 0,1 °C par décennie. Plusieurs études utilisant les modèles CMIP6 suggèrent que les différences de sensibilité climatique pourraient être un facteur important contribuant à l'écart entre les tendances de température troposphérique simulées et observées (McKittrick et Christy, 2020 ; Po-Chedley *et al.*, 2021), bien qu'il soit difficile de dissocier l'influence de la sensibilité climatique, des changements dans le forçage des aérosols et de la variabilité interne dans les biais de réchauffement de la troposphère (Po-Chedley *et al.*, 2021). Une autre étude a montré que l'absence d'une rétroaction négative des nuages tropicaux, comme le suggère l'hypothèse, pourrait expliquer la moitié du biais de réchauffement de la troposphère supérieure dans un modèle (Mauritsen et Stevens, 2015).

... En résumé, les études continuent de montrer que les simulations des modèles CMIP5 et CMIP6 prévoient un réchauffement plus important que les observations dans la troposphère tropicale moyenne et supérieure au cours de la période 1979-2014 (Mitchell *et al.*, 2013, 2020 ; Santer *et al.*, 2017a, b ; Suárez-Gutiérrez *et al.*, 2017 ; McKittrick et Christy, 2018), et que le réchauffement de surface surestimé en est en partie responsable (Mitchell *et al.*, 2013 ; Po-Chedley *et al.*, 2021). ... Par conséquent, nous estimons avec *un niveau de confiance moyen* que les modèles CMIP5 et CMIP6 continuent de surestimer le réchauffement observé dans la troposphère tropicale supérieure au cours de la période 1979-2014 d'au moins 0,1 °C par décennie.

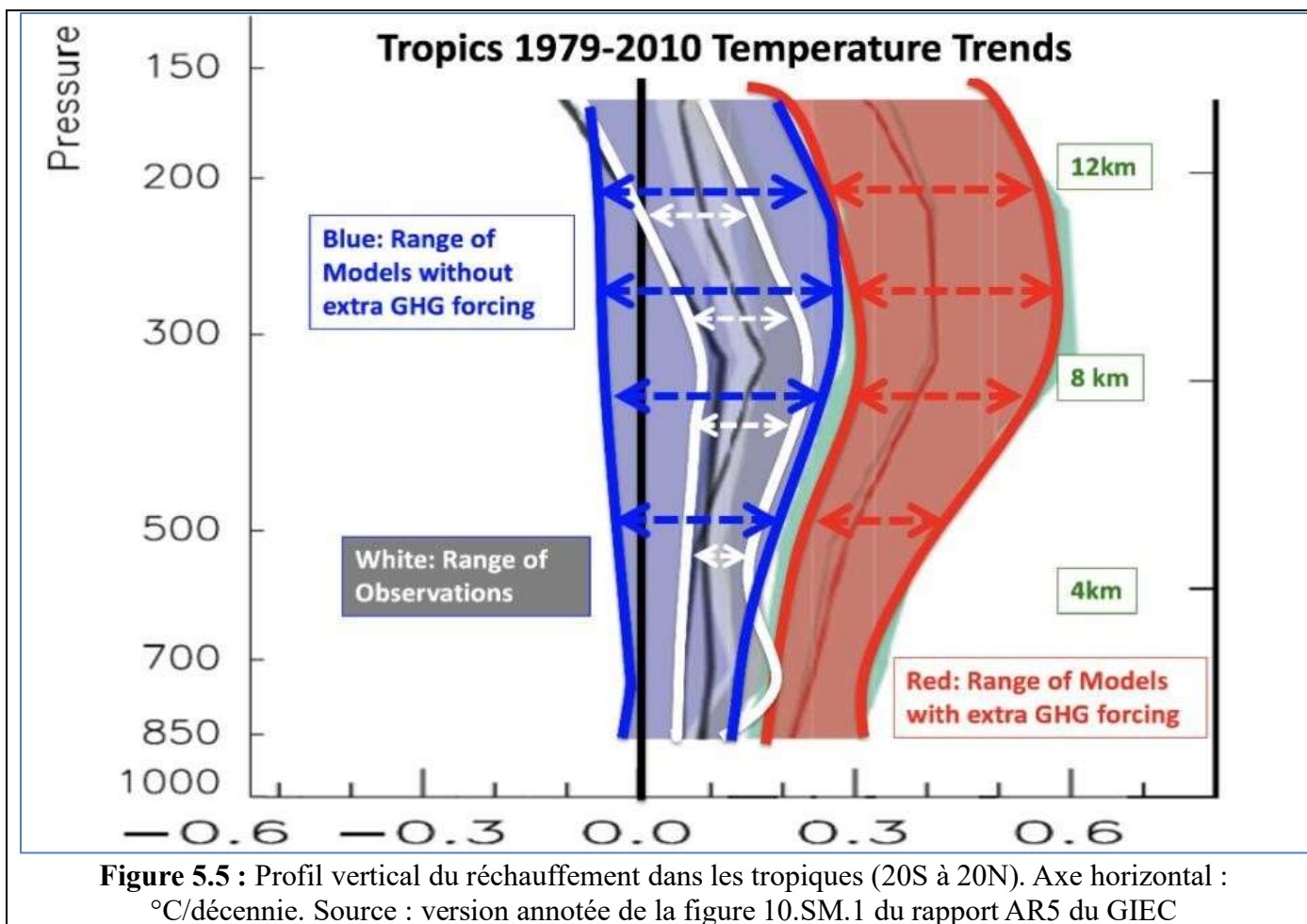
Il convient de noter que malgré l'accumulation de preuves d'un réchauffement excessif dans les modèles, le GIEC n'accorde qu'*un niveau de confiance moyen* à l'existence d'un biais de réchauffement.

5.4 Inadéquation du profil vertical de la température

Une autre divergence importante entre les modèles et les observations est l'amplification excessive avec l'altitude observée dans les modèles climatiques. La comparaison a été faite dans le chapitre 10 du rapport AR5, mais uniquement dans le supplément en ligne (figure 10.SM.1) et dans un graphique dont la mise en page masquait le point important.

La figure 10.SM.1 n'est mentionnée ni dans le rapport principal du GIEC ni dans aucun résumé, de sorte que les lecteurs n'auraient pas pu en prendre connaissance. Bien que cela ne soit pas évident à première vue, cela montre que le réchauffement de la basse troposphère entre 1979 et 2010 est si faible qu'il est compatible avec l'absence totale de forçage par les GES et incompatible avec les simulations des modèles qui tiennent compte du forçage par les GES.

Dans la figure 5.6, nous adaptons la figure 10.SM.1 du rapport AR5 du GIEC afin de mettre en évidence ce point essentiel.

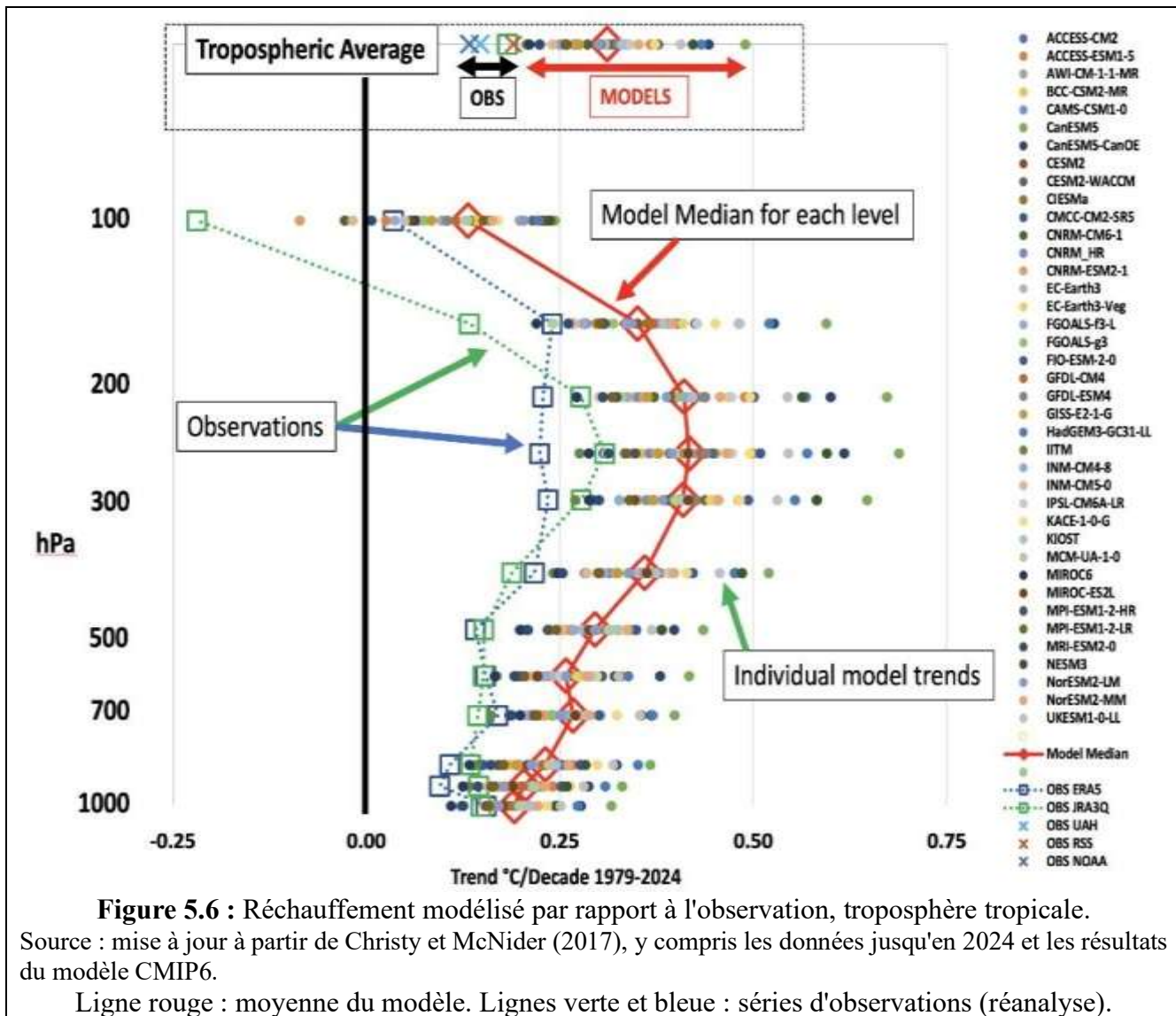


La figure 5.5 compare les tendances de température modélisées et observées en fonction de l'altitude entre 20°S et 20°N (les tropiques). Dans cette région où les modèles prévoient un réchauffement le plus fort, les observations (représentées ici en blanc) se situent dans la bande bleue « *Sans CO₂* » et entièrement en dehors de l'enveloppe rouge « *Avec CO₂* ». Cela signifie que dans toute la colonne atmosphérique tropicale, de la surface à la base de la stratosphère, les tendances de réchauffement observées sont si faibles qu'elles sont compatibles avec les résultats des modèles qui ne tiennent pas compte du CO₂ anthropique et incompatibles avec l'ensemble de l'enveloppe des tendances de réchauffement générées par les modèles forcés avec une augmentation du CO₂.

Une comparaison similaire est présentée dans Christy et McNider (2017), dont une version mise à jour (couvrant la période 1979-2024) est reproduite à la figure 5.6. Les tendances de température modélisées dépassent les observations faites à la surface jusqu'au sommet de la troposphère, les tendances observées étant inférieures à toute la gamme des modèles à la plupart des niveaux de la pression atmosphérique. La figure 5.6 montre également la température moyenne de la troposphère tropicale (TTT) à partir de trois produits de données satellitaires (NOAA, UAH et RSS) comparée à la moyenne de la même couche à partir des modèles climatiques pour 1979-2024. Là encore, les tendances observées se situent en dessous de toute la fourchette du modèle.

Le large éventail de choix effectués par les modélisateurs pour caractériser les processus physiques dans les modèles (voir encadré « Modélisation du climat » à la section 5.1 ci-dessus) se traduit par une grande dispersion des tendances dans la troposphère moyenne,

$\pm 40\%$ autour de la médiane (figure 5.6). Cela illustre clairement les incertitudes liées aux tentatives de modélisation (paramétrisation) d'un système complexe impliquant la turbulence, la thermodynamique de l'humidité et les flux d'énergie sur l'ensemble des échelles temporelles et spatiales de l'atmosphère tropicale.



Cette divergence a été source de nombreuses controverses, certains affirmant que même si le réchauffement observé en altitude dans les tropiques est très faible, il existe toujours un « point chaud » dans le sens où le réchauffement en altitude est plus important qu'à la surface (Santer et al. 2008). Mais il existe des preuves solides que les modèles exagèrent également le taux d'amplification. Klotzbach *et al.* (2009) ont montré que les modèles prévoient une amplification plus importante avec l'altitude que celle observée. Ce résultat a ensuite été confirmé par une analyse détaillée des séries chronologiques (Vogelsang et Nawaz 2016), qui a révélé que la différence entre les modèles et les observations est statistiquement significative.

Le profil de température de l'atmosphère est un cas où les modèles ne sont pas seulement incertains, mais présentent également un biais de réchauffement commun par rapport aux observations. Cela suggère qu'ils représentent de manière erronée certains processus de rétroaction fondamentaux.

Le rapport AR6 du GIEC n'a pas évalué cette question.

5.5 Refroidissement stratosphérique

Un élément important de l'« empreinte » générale attendue du changement climatique anthropique est le réchauffement simultané de la troposphère et le refroidissement de la stratosphère. Cette dernière caractéristique est également influencée par l'appauvrissement et la reconstitution de la couche d'ozone. Le rapport AR6 a reconnu que le refroidissement avait été observé, mais seulement jusqu'en 2000. Depuis, la stratosphère a connu un certain réchauffement, contrairement aux projections des modèles.

AR6 WG1 Ch 2 pp. 327-9 indique :

Les températures moyennes dans toute la basse stratosphère (environ 10 à 25 km) ont diminué entre 1980 et 2019 dans tous les séries de données, la majeure partie de cette baisse ayant eu lieu avant 2000. Cette baisse persiste même si l'on élimine l'influence des éruptions volcaniques du Chichon (1982) et du Pinatubo (1991) sur la tendance, qui, selon Steiner *et al.* (2020a), a augmenté la tendance au refroidissement de 0,06 °C par décennie entre 1979 et 2018. La plupart des ensembles de données ne montrent aucune tendance significative ou seulement une tendance marginale entre 2000 et 2019, et les résultats de Philipona *et al.* (2018) montrent de faibles augmentations entre 2000 et 2015 dans la partie la plus basse de la stratosphère échantillonnée par des radiosondes....

Il est pratiquement certain que la basse stratosphère s'est refroidie depuis le milieu du XXe siècle. Cependant, la plupart des ensembles de données montrent que les températures de la basse stratosphère se sont stabilisées depuis le milieu des années 1990, sans changement significatif au cours des 20 dernières années. Il est probable que les températures de la stratosphère moyenne et supérieure aient diminué depuis 1980, mais le degré de confiance dans l'ampleur de cette diminution est faible.

La source citée, Philipona *et al.* (2018), dans un article intitulé « Radiosondes Show That After Decades of Cooling, the Lower Stratosphere Is Now Warming » (Les radiosondes montrent qu'après des décennies de refroidissement, la basse stratosphère se réchauffe désormais), a écrit :

En réponse à l'augmentation continue des gaz à effet de serre et à l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, les modèles climatiques prévoient un réchauffement continu de la troposphère et un refroidissement de la stratosphère au cours des prochaines décennies. Les observations satellitaires moyennes mondiales des températures de la basse stratosphère ne montrent aucune tendance significative depuis le début du siècle. En revanche, une analyse des mesures par radiosondes à résolution verticale provenant de 60 stations montre une augmentation de la température de la basse stratosphère depuis le début du siècle à des altitudes comprises entre 15 et 30 km et au-dessus de la plupart des continents. Les estimations des tendances sont quelque peu sensibles aux choix effectués en matière d'évaluation de l'homogénéité, mais tous les ensembles de données de radiosondes étudiés suggèrent un passage d'un refroidissement à la fin du XXe siècle à un réchauffement au début du XXIe siècle dans la basse stratosphère.

Santer *et al.* (2023) utilisent des données actualisées pour montrer qu'une tendance au refroidissement n'est pas réapparue dans la basse stratosphère.

La combinaison du réchauffement de la troposphère et du refroidissement de la stratosphère est un « marqueur » couramment cité du changement climatique anthropique. Le réchauffement de la stratosphère depuis 2000 coïncide avec le réchauffement continu de la surface et de la troposphère, un phénomène qui n'apparaît pas dans les simulations des modèles climatiques et qui ne semble pas cohérent avec l'empreinte anthropique.

5.6 Inadéquation de la couverture neigeuse

Les données compilées par le Snow Lab de l'université Rutgers montrent que la couverture neigeuse hivernale dans l'hémisphère nord ne diminue pas (figure 5.7) ; elle affiche même une tendance à la hausse.

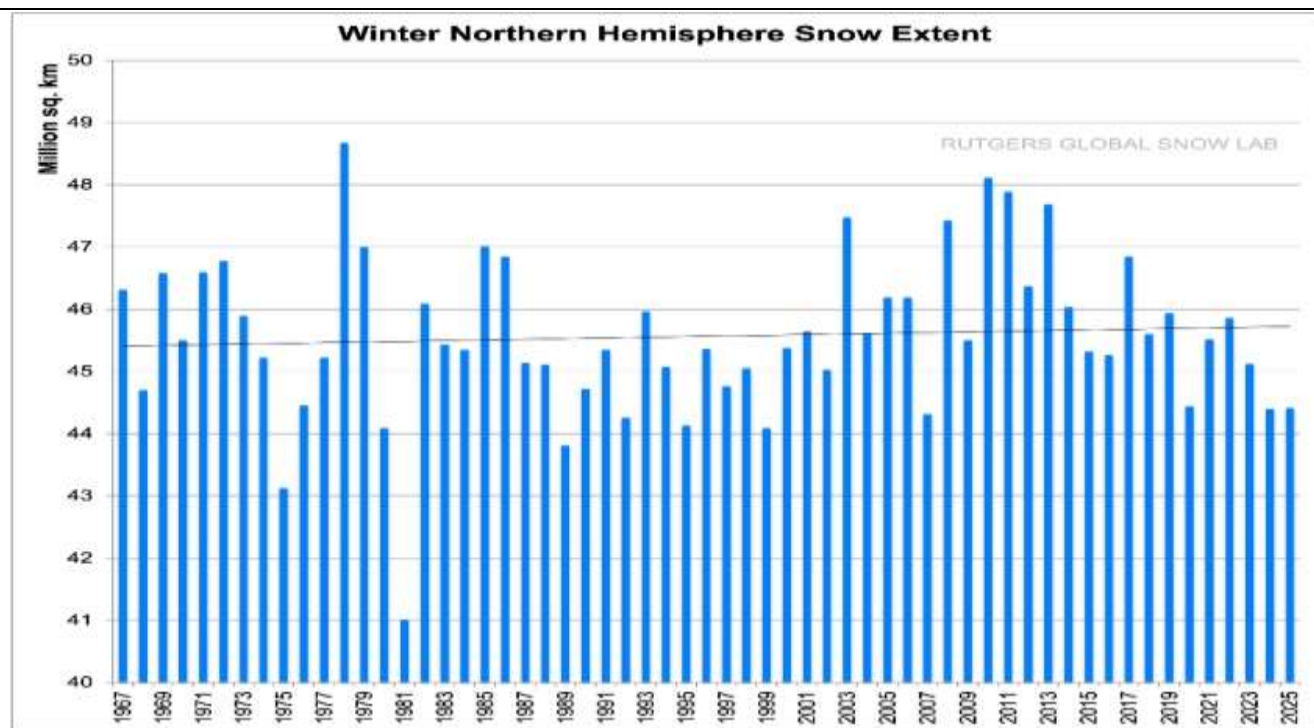


Figure 5.7 : Étendue de la neige en hiver dans l'hémisphère nord.

Source : https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1
(consulté le 27 mai 2025)

Pourtant, les modèles prévoient une diminution de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord dans un contexte de réchauffement climatique, comme le décrivent Connolly *et al.* (2019).

Les modèles climatiques se sont révélés peu aptes à expliquer les tendances observées [en matière de couverture neigeuse dans l'hémisphère nord]. Alors que les modèles suggèrent que la couverture neigeuse aurait dû diminuer régulièrement au cours des quatre saisons, seuls le printemps et l'été ont connu une baisse à long terme, et le schéma des baisses observées pour ces saisons était très différent des prévisions des modèles. De plus, les tendances observées pour l'automne et l'hiver suggèrent une augmentation à long terme, bien que ces tendances ne soient pas statistiquement significatives.

Le rapport AR6 limite en grande partie son analyse de l'évolution de l'étendue de la couverture neigeuse (SCE [Snow Cover Extent]) dans l'hémisphère nord à la saison printanière, pour laquelle les modèles et les observations s'accordent sur une tendance à la baisse. En ce qui concerne les changements hivernaux, il fait les remarques suivantes (AR6 WGI Ch. 2 p. 344) :

L'évaluation des tendances de la SCE dans l'hémisphère nord depuis 1978 indique que pour la période d'octobre à février, il existe une incertitude importante quant aux tendances, dont le signe dépend du

produit d'observation. L'analyse des données climatiques de la NOAA montre une augmentation de la SCE entre octobre et février (Hernández-Henríquez *et al.*, 2015 ; Kunkel *et al.*, 2016), tandis que les analyses basées sur des capteurs optiques satellitaires (Hori *et al.*, 2017) ou sur des produits multi-observations (Mudryk *et al.*, 2020) montrent une tendance négative pour toutes les saisons.

Le chapitre 9 du rapport AR6 WGI (p. 1284) souligne que les données climatiques de la NOAA montrant une augmentation de la SCE en automne et en hiver ne sont pas cohérentes avec les observations terrestres et les ensembles de données basés sur des modèles. Il note qu'il est difficile d'utiliser l'imagerie optique par satellite pour déduire la SCE en hiver en raison de la couverture nuageuse et de la diminution de l'ensoleillement pendant les mois d'hiver. Si l'on se concentre sur les États de la côte Pacifique (Californie, Oregon et Washington), les chutes de neige en montagne pendant la saison froide, qui fondent au printemps et en été, fournissent une part importante des ressources en eau pendant la saison chaude. Une reconstitution complète des chutes de neige pour les principales régions sources (Cascades et Sierra Nevada) n'indique aucune tendance significative dans les totaux annuels depuis la fin du XIXe siècle (Christy 2022).

En résumé, la base de données SCE actualisée de Rutgers indique un décalage entre les modèles et les observations. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour concilier les tendances contradictoires des ensembles de données d'observation.

5.7 Symétrie hémisphérique de l'albédo planétaire

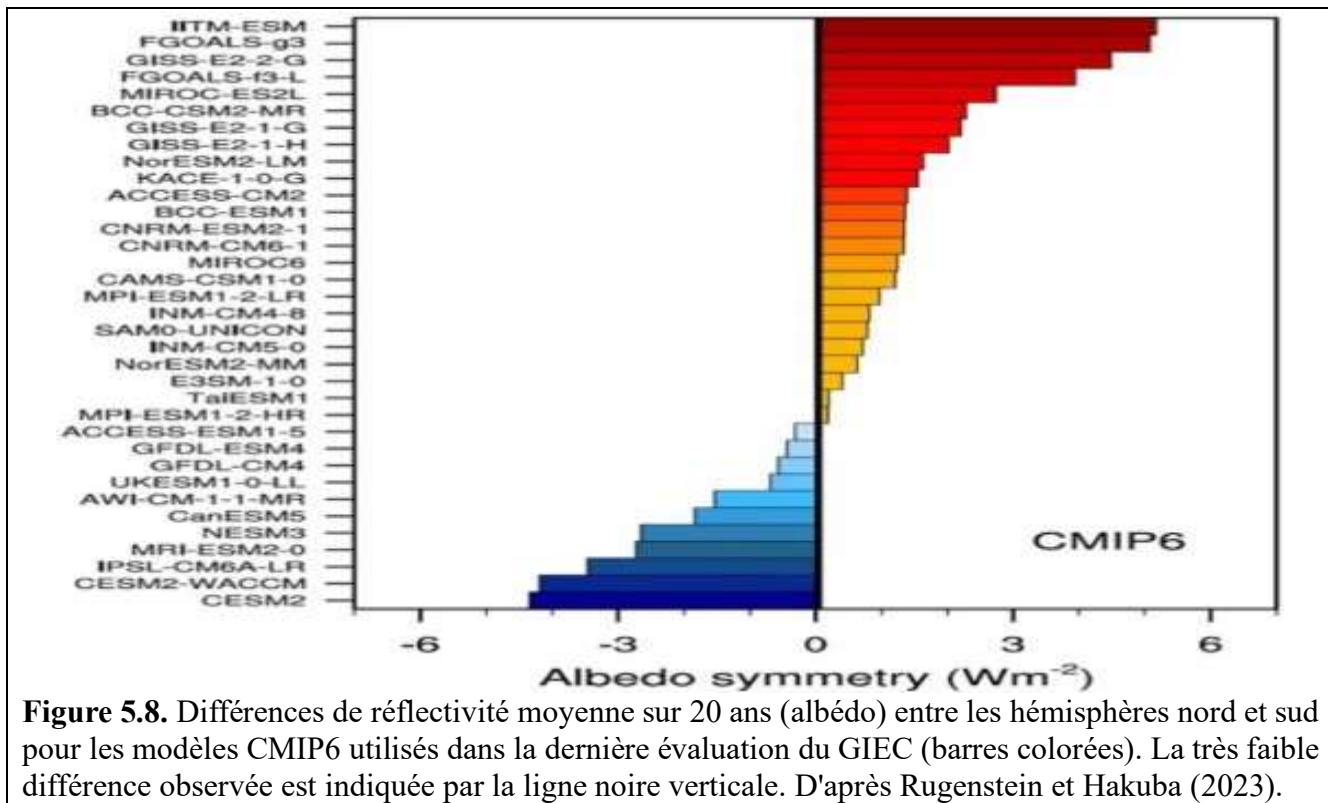
L'albédo planétaire est la fraction du rayonnement solaire incident qui est réfléchi par la Terre vers l'espace. Il s'agit d'un élément important du bilan radiatif et il influence le réchauffement ou le refroidissement de la planète au fil du temps. L'albédo planétaire est généralement estimé à environ 0,30 ; des variations de l'ordre de 0,01 correspondent à des changements du forçage solaire d'environ 3 W/m^2 , une quantité supérieure au forçage anthropique actuel. On constate depuis longtemps que les modèles divergent entre eux et avec les observations sur la valeur de l'albédo planétaire global (Stephens *et al.* 2015).

Une propriété intrigante de l'albédo terrestre est que, en moyenne, l'hémisphère nord (HN) et l'hémisphère sud (HS) ont eu un albédo presque identique, du moins tout au long des cinquante années d'enregistrement par satellite (Stephens *et al.*, 2015). Cette symétrie est surprenante, car HS a beaucoup plus d'océans que de terres. L'océan étant moins réfléchissant que la terre, HN devrait avoir un albédo plus élevé. Les nuages (qui sont très réfléchissants) sont plus fréquents dans le HN et compensent ainsi les déséquilibres de l'albédo de surface entre les deux hémisphères. Datseris et Stephens (2021) montrent que cette compensation par les nuages provient des trajectoires des tempêtes extratropicales de SH, qui sont plus nuageuses que celles de NH. Bien que le mécanisme à l'origine de cette symétrie hémisphérique ne soit pas clair, il opère probablement à grande échelle temporelle et spatiale.

La symétrie hémisphérique de l'albédo est une mesure brute simple pour les modèles climatiques. Rugenstein et Hakuba (2023) ont défini cette mesure comme la différence entre les albedos annuels moyens de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud, exprimée en Wm^{-2} de la lumière solaire réfléchi, et l'ont compilée pour les modèles climatiques CMIP6, comme le montre la figure 5.8. La plupart des modèles CMIP6 ne reproduisent pas la faible asymétrie observée (environ $0,1 \text{ Wm}^{-2}$ et ne s'accordent même pas sur l'hémisphère le plus réfléchissant. De plus, l'ampleur de l'asymétrie peut atteindre 5 Wm^{-2} dans certains modèles, soit deux fois plus que le forçage anthropique actuel d'environ $2,7 \text{ Wm}^{-2}$.

La signification des asymétries non physiques de l'albédo dans les modèles climatiques n'est pas encore entièrement connue. Cependant, d'autres études de modèles suggèrent que les changements interhémisphériques de l'albédo peuvent modifier les flux de chaleur vers les pôles, les gradients de température méridionaux, la tempétuosité et les différences dans le stockage de chaleur océanique

hémisphérique. La divergence entre les modèles et les observations soulève d'autres questions concernant les processus de rétroaction des nuages et, plus généralement, diminue la confiance dans les projections des modèles sur le climat futur.



5.8 La Corn Belt (Ceinture de maïs) américaine

L'une des plus grandes divergences entre les modèles et les observations concerne la Corn Belt américaine, une région particulièrement importante pour la production alimentaire mondiale. La figure 5.9 montre les tendances de réchauffement pour l'été (juin, juillet, août) dans les 12 États de la Corn Belt (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) entre 1973 et 2022. Les 36 modèles climatiques (en rouge) montrent tous un réchauffement beaucoup trop rapide par rapport aux observations (en bleu).

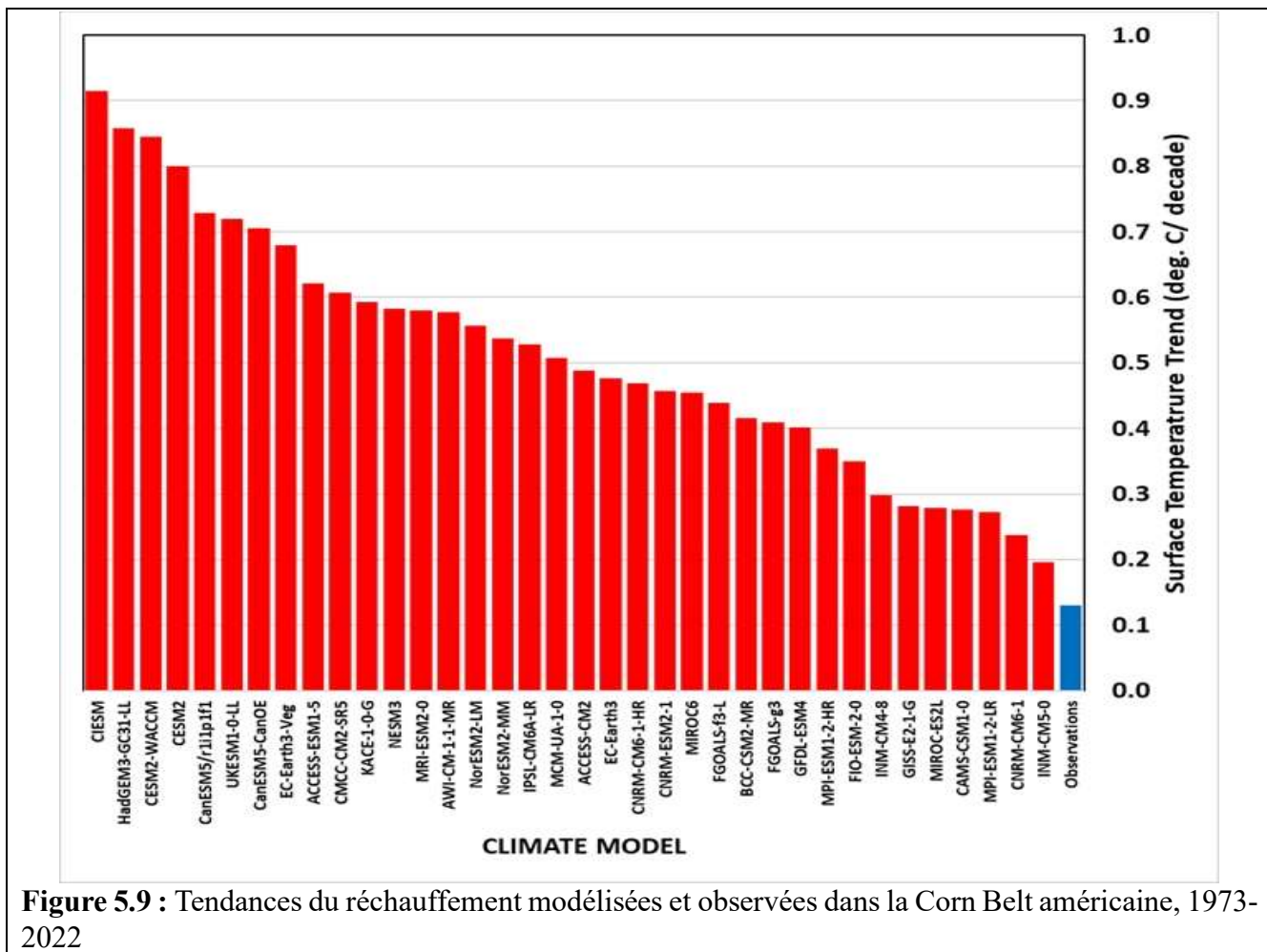


Figure 5.9 : Tendances du réchauffement modélisées et observées dans la Corn Belt américaine, 1973-2022

Comme indiqué au chapitre 9, les effets négatifs attendus de la hausse des températures sur les rendements du maïs aux États-Unis ne se sont pas concrétisés, contrairement à des études largement médiatisées qui affirment que les impacts théoriques futurs se font déjà sentir (*par exemple*, Seager *et al.*, 2018).

Le GIEC reconnaît les limites de la précision des résultats des modèles climatiques régionaux. Cet exemple montre que les utilisateurs doivent évaluer soigneusement les projections des modèles au cas par cas, car les biais locaux peuvent être suffisamment importants pour que les modèles ne soient tout simplement pas adaptés à l'objectif visé. Comme l'ont récemment souligné deux leaders de la communauté des modélisateurs (c'est nous qui soulignons)

... pour de nombreuses applications clés qui nécessitent les résultats de modèles climatiques régionaux ou pour évaluer les changements à grande échelle résultant de processus à petite échelle, nous pensons que **la génération actuelle de modèles n'est pas adaptée à l'usage prévu**. (Palmer et Stevens 2019)

En résumé :

- Les modèles climatiques présentent des biais de réchauffement dans de nombreux aspects de leur reproduction des dernières décennies.

- Ils produisent un réchauffement excessif à la surface (à l'exception des modèles avec l'ECS le plus faible), un réchauffement excessif dans la basse et moyenne troposphère et une amplification excessive du réchauffement en altitude.
- Ils produisent également un refroidissement stratosphérique trop important, une perte de neige trop importante et un réchauffement trop important dans la Corn Belt américaine.
- La différence d'albédo hémisphérique dans les modèles climatiques individuels varie considérablement en signe et en amplitude par rapport aux observations. La fourchette en W/m^2 est trois fois plus grande que le forçage anthropique direct du CO_2 .
- Le GIEC a reconnu certains de ces problèmes, mais pas tous.

Références

- Christy, J. R., R. T. McNider (2017). Satellite bulk tropospheric temperatures as a metric for climate sensitivity. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 53, 511-518. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z>
- Christy, J. R. (2022). Time series construction of Oregon and Washington snowfall since 1890 and an update of California snowfall through 2020. *Journal of Hydrometeorology* 23, 1845-1860. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0178.1>
- Connolly, R., M. Connolly, W. Soon, et al. (2019). Northern Hemisphere snow-cover trends (1967– 2018): A comparison between climate models and observations. *Geosciences* 9, 135. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030135>
- Datseris, G., B. Stevens (2021). Earth's albedo and its symmetry. *AGU Advances* 2, e2021AV000440. <https://doi.org/10.1029/2021AV000440>
- Karl, T.R., S. J. Hassol, C. D. Miller, W. L. Murray, eds. (2006). *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences*. U.S. Climate Change Science Program/Subcommittee on Global Change Research. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12017/m2/1/high_res_d/sap1-1-final-all.pdf
- Klotzbach, P.J., R. A. Pielke, Sr., R. A. Pielke, Jr., J. R. Christy, R. T. McNider (2009). An alternative explanation for differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research — Atmospheres* 114(D21). <https://doi.org/10.1029/2009JD011841>
- McKittrick, R. and J. R. Christy (2020). Pervasive warming bias in CMIP6 tropospheric layers. *Earth and Space Science* 7. <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2025), "Data and Code for DoE Report 2025", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1
- Palmer, T., and B. Stevens (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(49), 24390–24395. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Philipona, R., C. Mears, M. Fujiwara, et al. (2018). Radiosondes show that after decades of cooling, the lower stratosphere is now warming. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres* 123. <https://doi.org/10.1029/2018JD028901>
- Rugenstein, M., and M. Hakuba (2023). Connecting hemispheric asymmetries of planetary albedo and surface temperature. *Geophysical Research Letters* 50, e2022GL101802. <https://doi.org/10.1029/2022GL101802>
- Santer B D, P.W. Thorne, L Haimberger et al. (2008) Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere *International Journal of Climatology* 28 1703–22 <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1756>
- Santer, B.D. S. Po-Chedley, L. Zhao, C et al. (2023) Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature, *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* 120 (20) e2300758120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2300758120>.

- Scaffeta, N (2023) CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. *Climate Dynamics* 60, 3091–3120 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- Seager, R., J. Feldman, N. Lis, et al. (2017). Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America’s arid–humid divide. Part II: The meridian moves east. *Earth Interactions* 22. <https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0012.1>
- Spencer, R. W. (2024). Global warming: Observations vs. climate models. Environment Backgrounder, The Heritage Foundation. <https://www.heritage.org/environment/report/global-warming-observations-vs-climate-models>
- Stephens, G. L., D. O'Brien, P.J. Webster et al. (2015). The albedo of Earth. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
- Vogelsang, T. and N. Nawaz (2016). Estimation and inference of linear trend slope ratios with an application to global temperature data: *Journal of Time Series Analysis* 38. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12209>

6 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Résumé du chapitre

La plupart des types de phénomènes météorologiques extrêmes ne présentent aucune tendance statistiquement significative de long terme d'après les données historiques disponibles. Bien qu'il y ait eu une augmentation du nombre de journées chaudes aux États-Unis depuis les années 1950, comme le souligne le rapport AR6, ce nombre reste faible par rapport aux années 1920 et 1930. Les tempêtes convectives extrêmes, les ouragans, les tornades, les inondations et les sécheresses présentent une variabilité naturelle considérable, mais aucune augmentation à long terme n'a été détectée. Une augmentation des précipitations extrêmes peut être observée dans certaines régions sur de courtes périodes, mais cette tendance ne se maintient pas sur de longues périodes et à l'échelle régionale. Les feux de forêt ne sont pas plus fréquents aux États-Unis qu'ils ne l'étaient dans les années 1980. La superficie brûlée a augmenté entre les années 1960 et le début des années 2000, mais elle reste faible par rapport au niveau naturel estimé. L'activité des feux de forêt aux États-Unis est fortement influencée par les pratiques de gestion forestière.

6.1 Introduction

Les phénomènes météorologiques extrêmes à fort impact, généralement liés à la température, aux précipitations et/ou à des vents violents, peuvent perturber les infrastructures et donc mettre en danger la santé et le bien-être des personnes. La question n'est pas de savoir si des phénomènes extrêmes se produisent. Il s'agit plutôt de déterminer s'il existe des changements à long terme (à l'échelle décennale) dans la fréquence ou la nature des phénomènes extrêmes (« détection »), ainsi que la mesure dans laquelle ces changements et les changements connexes dans les risques sont causés par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (« *attribution* » ; par exemple, AR6 Seneviratne *et al.* 2021).

Une compréhension fondée sur les processus et des arguments thermodynamiques simples ont été invoqués pour affirmer que le réchauffement aggrave les phénomènes météorologiques extrêmes. Cependant, il est naïf de supposer que tout événement extrême récent est causé par l'influence humaine sur le climat. Le climat concerne les propriétés statistiques du temps sur plusieurs décennies, et non des événements isolés. De plus, il n'existe que 130 années environ d'observations fiables pouvant être analysées statistiquement. Cette brève période ne couvre pas tous les événements extrêmes que le système climatique peut créer à lui seul. Au cours des temps géologiques, le système climatique a généré une variété (essentiellement) infinie de phénomènes météorologiques et d'événements extrêmes que les humains n'ont jamais observés et qui sont donc absents des bases de données utilisées pour déterminer les statistiques extrêmes [voir *les dangers liés à la brièveté des séries de données* ci-dessous]. Pour cette raison, attribuer un événement extrême sans précédent dans les archives nécessite des hypothèses sur l'ampleur des variations naturelles.

Ce chapitre traite de la détection des tendances climatiques extrêmes, tandis que le chapitre 8 examine les causes, la section 8.4 étant spécifiquement consacrée aux phénomènes climatiques extrêmes. Si aucune tendance n'est détectée, il n'y a évidemment aucune base pour établir un lien de causalité. Mais même lorsqu'une tendance est observée, il ne faut pas nécessairement en conclure qu'elle est due au réchauffement causé par l'homme.

Cela est particulièrement vrai pour les précipitations. La littérature hydrologique note depuis longtemps la présence d'oscillations longues, lentes et irrégulières dans les données pluviométriques (Hurst 1951, Cohn et Lins 2005, Markonis et Koutsoyiannis 2016). Les caractéristiques de ces modèles naturels nécessitent de

longues séries d'observations pour estimer avec précision la variabilité. L'analyse de données relativement courtes par rapport à l'échelle de la variabilité naturelle tend à donner une image faussée des tendances, surestimant ainsi l'importance des tendances apparentes et sous-estimant la probabilité d'événements extrêmes (Cohn et Lins 2005).

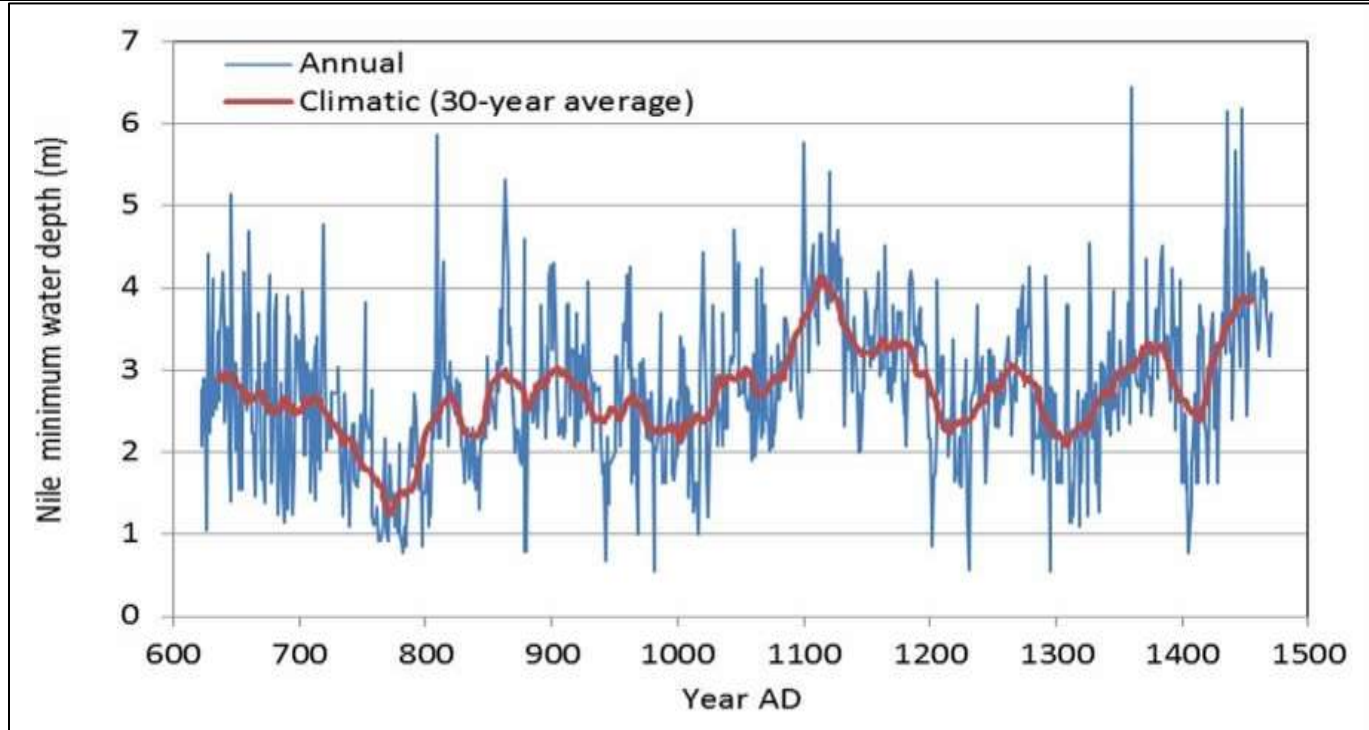


Figure 6.1.1 : Profondeur minimale annuelle du Nil près du Caire sur plus de 650 ans, de 622 à 1284 après J.-C. Les données, mesurées en mètres, montrent un schéma caractéristique de fluctuations annuelles autour de tendances à plus long terme. Données tirées de Koutsoyiannis (2013).

Un bon exemple en est l'enregistrement sur huit siècles de la hauteur minimale annuelle du Nil observée à l'île de Roda, au Caire, illustré à la figure 6.1.1. Le Nil est alimenté par les précipitations d'un bassin versant de 4 millions de miles carrés, soit une superficie équivalente à environ un tiers de la CONUS. Étant donné que l'influence humaine sur le climat mondial était négligeable bien avant le XX^{ème} siècle, la variabilité sur un siècle de la moyenne sur trente ans est entièrement naturelle ; les Égyptiens des VII^e et VIII^e siècles auraient eu tort de supposer que l'aggravation de la sécheresse à cette époque était la « nouvelle norme ».

En gardant ces réserves à l'esprit, nous examinons les preuves des changements observés dans certains phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes. Un thème récurrent est le fossé important qui existe entre la perception du public et les preuves scientifiques. Il est devenu courant dans les médias, les discussions au sein du gouvernement et du secteur privé, et même dans certaines publications universitaires, d'affirmer de manière généralisée que tous les types de phénomènes météorologiques extrêmes s'aggravent en raison des GES et du « changement climatique ». Pourtant, les évaluations des experts ne tirent généralement pas de conclusions aussi radicales et soulignent plutôt la difficulté d'identifier des tendances spécifiques et d'établir un lien de causalité avec le forçage anthropique.

Dans les sections suivantes, nous fournissons des extraits de divers rapports d'évaluation du GIEC et du NCA [National Climate Assessment], en indiquant les sources comme suit :

SREX : The IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (2012) Rapport spécial du GIEC sur la gestion des risques liés aux phénomènes extrêmes et aux catastrophes pour améliorer l'adaptation aux changements climatiques (2012)

AR6 : Sixième rapport d'évaluation du GIEC, Groupe de travail 1 (2021).

NCA4 : The U.S. Climate Science Special Report of the Fourth National Climate Assessment (2017) Volume I. Rapport spécial sur la science du climat des États-Unis issu de la quatrième évaluation nationale du climat (2017), volume I.

NCA5 : Fifth National Climate Assessment (2023). Cinquième évaluation nationale du climat (2023).

Dans les extraits, *les italiques* sont dans l'original, tandis que **les caractères gras** ont été ajoutés pour mettre en évidence.

De plus, nous utilisons des sources gouvernementales standard pour fournir des informations jusqu'en 2024, dans la mesure du possible.

6.2 Ouragans et cyclones tropicaux

Le rapport AR6 fournit l'évaluation suivante concernant les cyclones tropicaux (CT, utilisés ici comme synonyme d'ouragans) :

AR6 : *Le niveau de confiance est faible* pour la plupart des tendances à long terme (multidécennales à centennales) rapportées concernant la fréquence ou l'intensité des CT, en raison des changements dans les technologies utilisées pour collecter les données et suivre la trajectoire. (GIEC, 2021, p. 1585)

AR6 : Il est *probable* que la proportion mondiale de cyclones tropicaux majeurs (catégories 3 à 5) ait augmenté au cours des quatre dernières décennies. [...] *Le niveau de confiance est faible* pour les tendances à long terme (multidécennales à centennales) de la fréquence des cyclones tropicaux de toutes catégories. (GIEC, 2023 SPM p. 9)

AR6 : Un sous-ensemble des données de meilleure trajectoire correspondant aux ouragans qui ont directement touché les États-Unis depuis 1900 est considéré comme fiable et **ne montre aucune tendance dans la fréquence des événements touchant les côtes américaines**. (GIEC 2021, p. 1585)

Depuis 1980, date à laquelle les observations satellitaires ont commencé à couvrir l'ensemble des océans, nous disposons de données fiables sur le nombre total d'ouragans et d'ouragans majeurs (catégorie 3 et plus) dans le monde. La figure 6.2.1 montre qu'en moyenne, chaque année, il y a environ 50 ouragans, dont environ 25 atteignent le statut d'ouragan majeur (Maue, 2025). On observe une variabilité importante d'une année à l'autre et d'une décennie à l'autre, une légère diminution du nombre d'ouragans et une augmentation légère mais non significative du nombre d'ouragans majeurs. Ces deux tendances se combinent pour créer une augmentation globale de la proportion d'ouragans majeurs.

Les statistiques mondiales sur les ouragans sont dominées par le nord-ouest de l'océan Pacifique, qui représente environ 35 % du total des ouragans mondiaux, tandis que l'Atlantique représente environ 15 % des ouragans mondiaux (Colorado State University, 2025). Les données relatives au bassin atlantique remontent plus loin que celles des autres bassins océaniques et sont les plus pertinentes pour les décideurs politiques américains.

Global Major Hurricane Frequency – 12 month running sums – @RyanMaue

Updated March 10, 2025

Last 30-years, annual: 45 H | 24 M

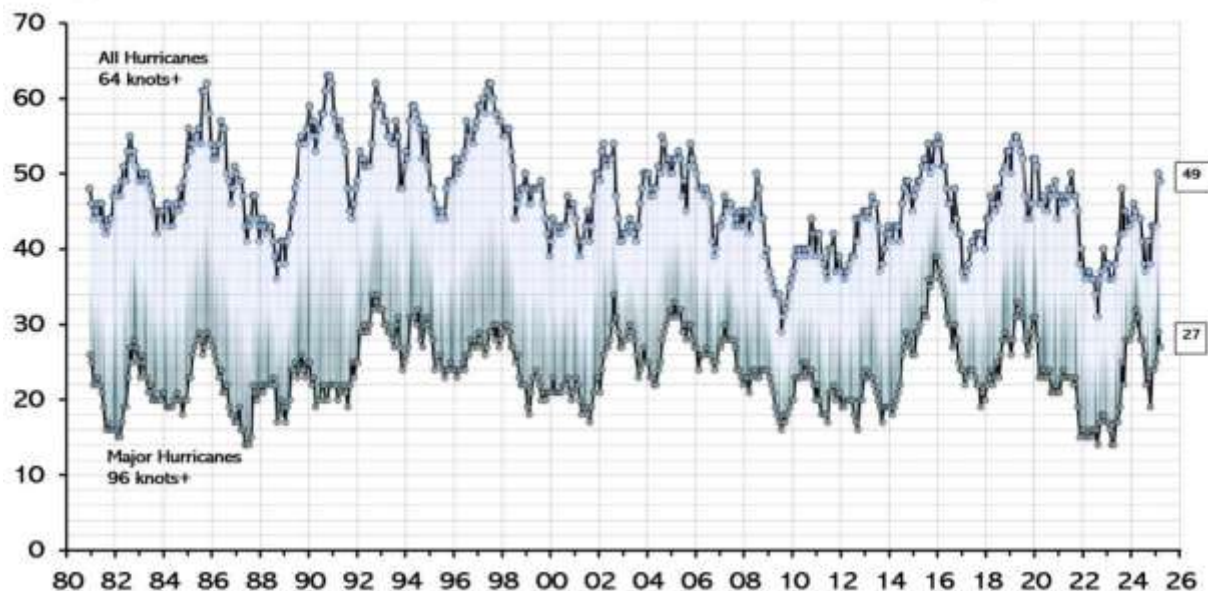
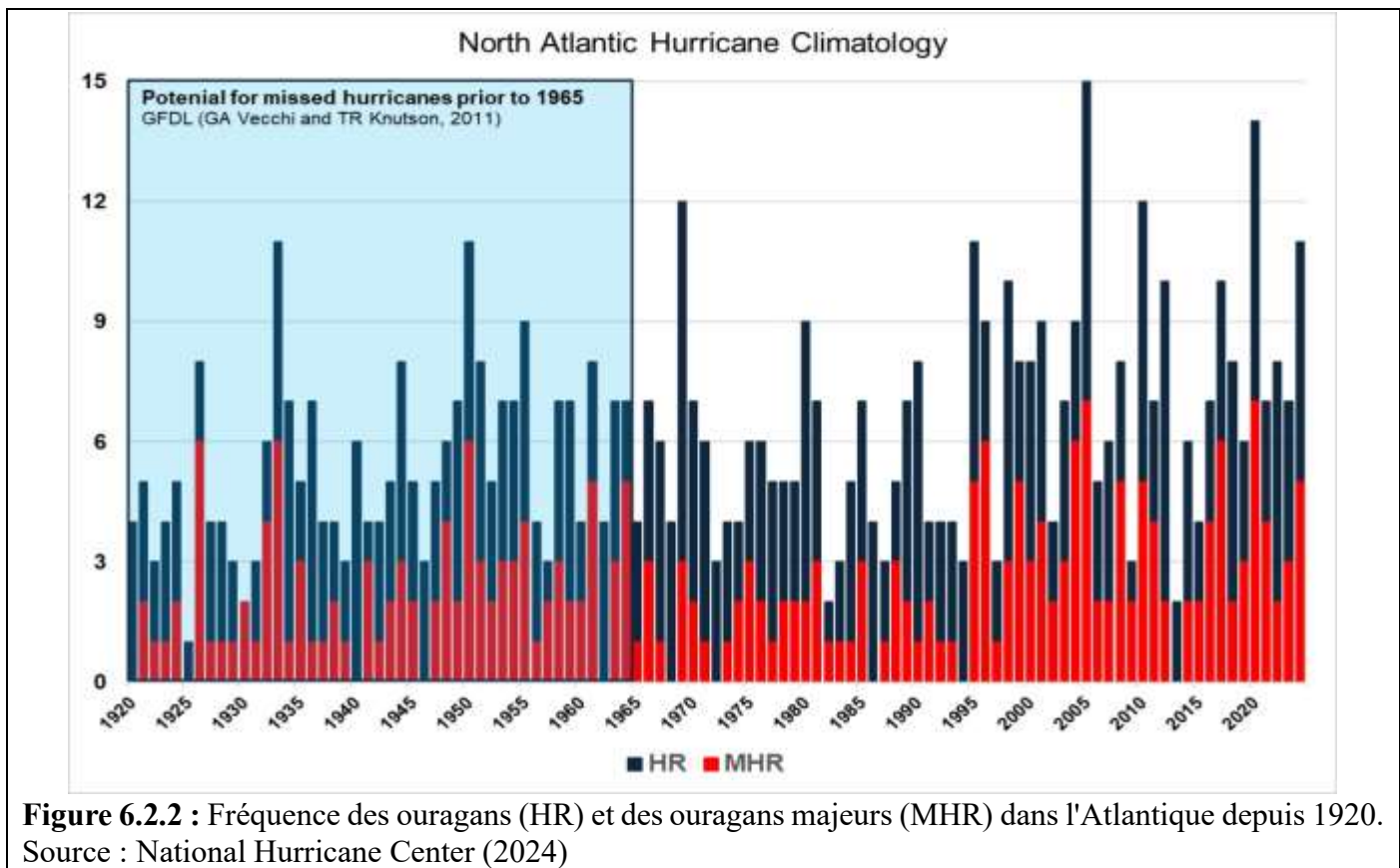


Figure 6.2.1 : Fréquence mondiale des ouragans et des ouragans majeurs depuis 1980. Source : mise à jour à partir de Maue 2011.

La figure 6.2.2 montre la fréquence des ouragans et des ouragans majeurs (catégorie 3 et plus) dans l'Atlantique depuis 1920. Les données antérieures à 1965 (début des observations par satellite dans l'Atlantique, en bleu) montrent une certaine sous-estimation, les données antérieures à 1920 présentant une sous-estimation importante (Vecchi et Knutson, 2011).

Toutes les mesures de l'activité cyclonique dans l'Atlantique montrent une augmentation significative depuis 1970. Cependant, la période 1971-1994 a été marquée par une activité exceptionnellement faible, une activité élevée (comparable à celle des deux dernières décennies, même en tenant compte du sous-dénombrement des cyclones) ayant également été observée dans les années 1950 et 1960, et même dans les années 1930.



La figure 6.2.2 montre que les ouragans dans l'Atlantique varient fortement à l'échelle décennale et multi-décennale. Ces variations sont principalement associées à l'oscillation multi-décennale de l'Atlantique (AMO), qui se manifeste par des fluctuations de la température de surface de la mer et de la pression au niveau de la mer à l'échelle du bassin, liées à des régimes de circulation océanique à grande échelle. L'AMO était dans sa phase chaude entre 1926 et 1970 et depuis 1995, mais dans sa phase froide entre 1971 et 1994. Elle a son impact le plus important sur le nombre d'ouragans majeurs (catégorie 3+), que Goldenberg *et al.* (2001) ont associé à des SST supérieures à la normale et à une diminution du cisaillement vertical pendant la phase chaude de l'AMO (voir également Bell et Chelliah, 2006 ; Klotzbach *et al.*, 2018).

Klotzbach *et al.* (2018) ont mené une évaluation exhaustive des données relatives aux ouragans ayant touché les côtes continentales des États-Unis depuis 1900. La figure 6.2.3 actualise leur analyse jusqu'en 2024. Si le plus grand nombre d'ouragans ayant touché les côtes a été enregistré en 2004, 2005 et 2020, aucune tendance statistiquement significative n'est observée depuis 1920.

La figure 6.2.3 montre également la série chronologique des ouragans majeurs ayant touché terre (catégories 3 à 5). L'année la plus importante jamais enregistrée est 2005, avec 4 ouragans majeurs ayant touché terre. Cependant, après 2005, aucun ouragan majeur n'a frappé les États-Unis jusqu'en 2016, la plus longue période de ce type depuis 1920.

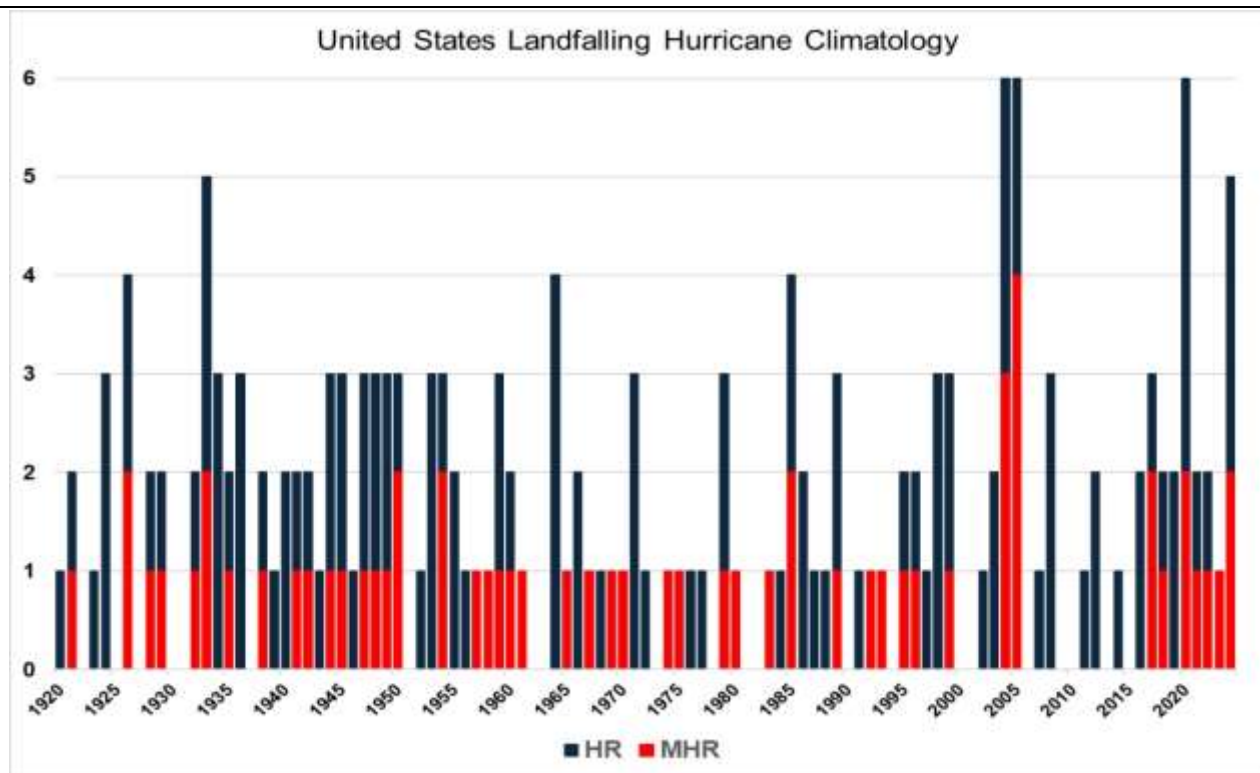


Figure 6.2.3 : Fréquence des ouragans (HR) et des ouragans majeurs (MHR) ayant touché les côtes américaines depuis 1920. Source : NOAA HRD(a) (2024)

La figure 6.2.3 montre une variabilité interannuelle à multi-décennale importante de l'activité cyclonique aux États-Unis. Klotzbach *et al.* (2018) ont examiné comment le nombre de cyclones touchant les côtes varie en fonction de l'ENSO (El Niño par rapport à La Niña) et des phases chaudes et froides de l'oscillation multi-décennale de l'Atlantique (AMO).

Villarini *et al.* (2012) fournissent une analyse des ouragans ayant touché les côtes des États-Unis depuis 1878. Bien qu'il soit possible que certains ouragans aient échappé aux observations à la fin du XIX^{ème} siècle en raison de la faible densité de population sur la côte du golfe du Mexique, il est remarquable que l'année la plus importante de toute l'histoire soit 1886, avec 7 ouragans ayant touché les côtes, alors que l'influence humaine sur le climat était bien moindre qu'aujourd'hui.

Le tableau 6.2.1 présente les 10 ouragans les plus violents (ex æquo) qui ont touché les côtes américaines. Parmi les ouragans qui ont touché terre avec des vents soutenus supérieurs à 150 miles per hour [$150 \times 4.609 = 241 \text{ km/h}$ ou 67 m/s] un seul s'est produit au XXI^e siècle.

En résumé, l'analyse de la variabilité et des tendances mondiales et régionales de l'activité cyclonique fournit une base pour détecter les changements et en comprendre les causes. Les données historiques sur l'activité cyclonique, relativement peu nombreuses, et les données encore plus rares de l'ère satellitaire ne permettent pas d'évaluer si l'activité cyclonique récente est inhabituelle par rapport à la variabilité naturelle de fond. Les processus cycloniques dans l'Atlantique sont fortement influencés par les modes naturels de variabilité de la circulation océanique dans l'Atlantique, notamment l'oscillation multidécennale de l'Atlantique. Bien que l'on ait longtemps émis l'hypothèse qu'une augmentation de la température mondiale de la surface de la mer entraînerait une augmentation de l'intensité des ouragans, l'identification de toute tendance significative dans les données sur les ouragans est rendue difficile par la brièveté des données disponibles et la variabilité naturelle importante.

La compréhension des processus suggère également que les ondes de tempête et les précipitations liées aux ouragans devraient augmenter avec le réchauffement des températures. Cependant, le nombre relativement faible d'ouragans dont les lieux d'atterrissage varient et la dynamique complexe associée à chaque tempête empêchent de détecter de manière significative tout changement.

Classe	Année	Vitesse du vent à l'atterrissage mph	
1	1935	185	« Labor Day »
2	1969	175	Camille
3	1992	165	Andrew
4	2018	160	Michael
5	1856	150	« Last Island »
5	1886	150	« Indianola »
5	1919	150	-----
5	1932	150	« Freeport »
5	2004	150	Charley
5	2020	150	Laura
5	2021	150	Ida
5	2022	150	Ian

Tableau 6.2.1 Ouragans les plus violents ayant touché les côtes américaines. Source (NOAA HRD(b), 2024)

6.3 Températures extrêmes

L'évaluation AR6 s'est concentrée sur la période après 1950 et a fait état d'une tendance à la hausse de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur. Cependant, le NCA4 [National Climate Assessment 4] a noté que l'activité des vagues de chaleur aux États-Unis a atteint un pic dans les années 1930 (figure 6.3.1).

AR6 : Il est *pratiquement certain* que les épisodes de chaleur extrême (y compris les vagues de chaleur) sont devenus plus fréquents et plus intenses dans la plupart des régions terrestres depuis les années 1950, tandis que les épisodes de froid extrême (y compris les vagues de froid) sont devenus moins fréquents et moins sévères (SPM, A3.1).

AR6 : En Amérique du Nord, il existe des preuves très solides d'une augmentation *très probable* de l'intensité et de la fréquence des épisodes de chaleur extrême et d'une diminution de l'intensité et de la fréquence des épisodes de froid extrême sur l'ensemble du continent, bien qu'il existe des variations spatiales et saisonnières importantes dans ces tendances. Les températures minimales affichent un réchauffement constant sur l'ensemble du continent, tandis que les tendances des températures maximales quotidiennes annuelles sont plus contrastées dans certaines régions des États-Unis. (Chapitre 11, p. 1550)

NCA4 : Les changements dans les températures extrêmes chaudes sont plus nuancés que ceux dans les températures extrêmes froides. Par exemple, la température quotidienne la plus chaude de l'année **a augmenté** dans certaines parties de l'Ouest au cours du siècle dernier, mais elle a **diminué** dans presque toutes les régions situées à l'est des Rocheuses. En fait, toutes les régions de l'est ont

connu une **baisse** nette, notamment le Midwest (environ 2,2 °F [1,2 °C]) et le sud-est (environ 1,5 °F [0,8 °C]). (pp. 190-191)

NCA4 : Depuis le milieu des années 1960, la température quotidienne la plus élevée de l'année n'a que très légèrement augmenté (malgré une grande variabilité interannuelle). Les vagues de chaleur (périodes de 6 jours avec une température maximale supérieure au 90e centile pour 1961-1990) ont augmenté en fréquence jusqu'au milieu des années 1930, sont devenues beaucoup moins fréquentes jusqu'au milieu des années 1960, puis ont de nouveau augmenté par la suite. Comme pour les températures quotidiennes chaudes, **l'intensité des vagues de chaleur a atteint son maximum dans les années 1930.** (pp. 190-191)

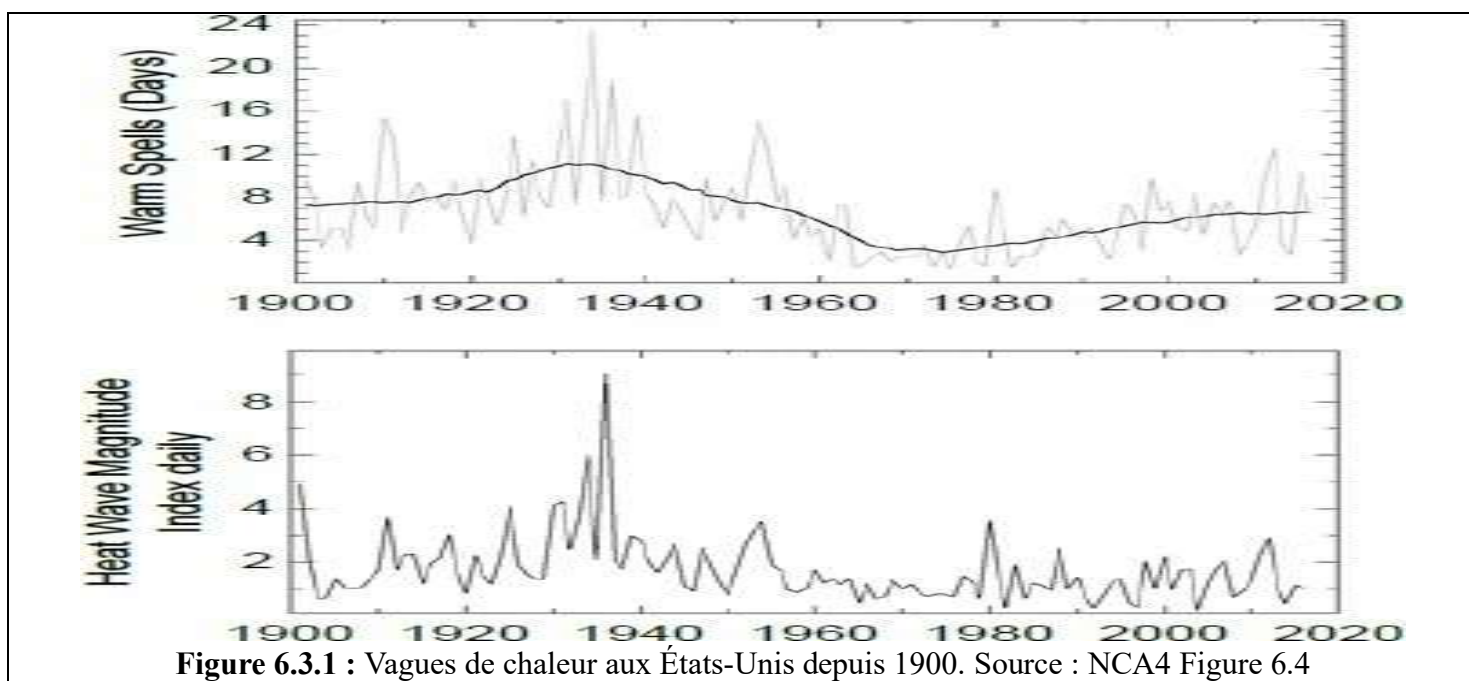


Figure 6.3.1 : Vagues de chaleur aux États-Unis depuis 1900. Source : NCA4 Figure 6.4

6.3.1 Les températures aux États-Unis deviennent moins extrêmes

Les températures maximales quotidiennes pendant la saison chaude (Tmax, mai-septembre) et les températures minimales quotidiennes pendant la saison froide (Tmin, décembre-mars) sont disponibles depuis décembre 1898 (126 ans). L'ensemble de données comprend 1211 stations CONUS désignées comme stations du Réseau climatique historique des États-Unis (USHCN) (voir figure 6.3.2 ; Quinlan *et al.* 1987, Karl *et al.* 1990). Ces stations ont été sélectionnées par la NOAA comme présentant le moins de problèmes liés aux lacunes, aux déplacements de stations et aux changements d'instruments. Lorsque des lacunes subsistent, les stations voisines (corrigées des biais) ont été fusionnées afin que le volume médian des données disponibles pour une station soit de 98 %. Bien qu'il existe certainement des erreurs dans l'ensemble de données, notamment un réchauffement fallacieux non résolu dû aux effets de l'îlot de chaleur urbain qui biaisent particulièrement les enregistrements de Tmin, cet ensemble de données est suffisamment précis pour évaluer les tendances des extrêmes de chaleur Tmax.

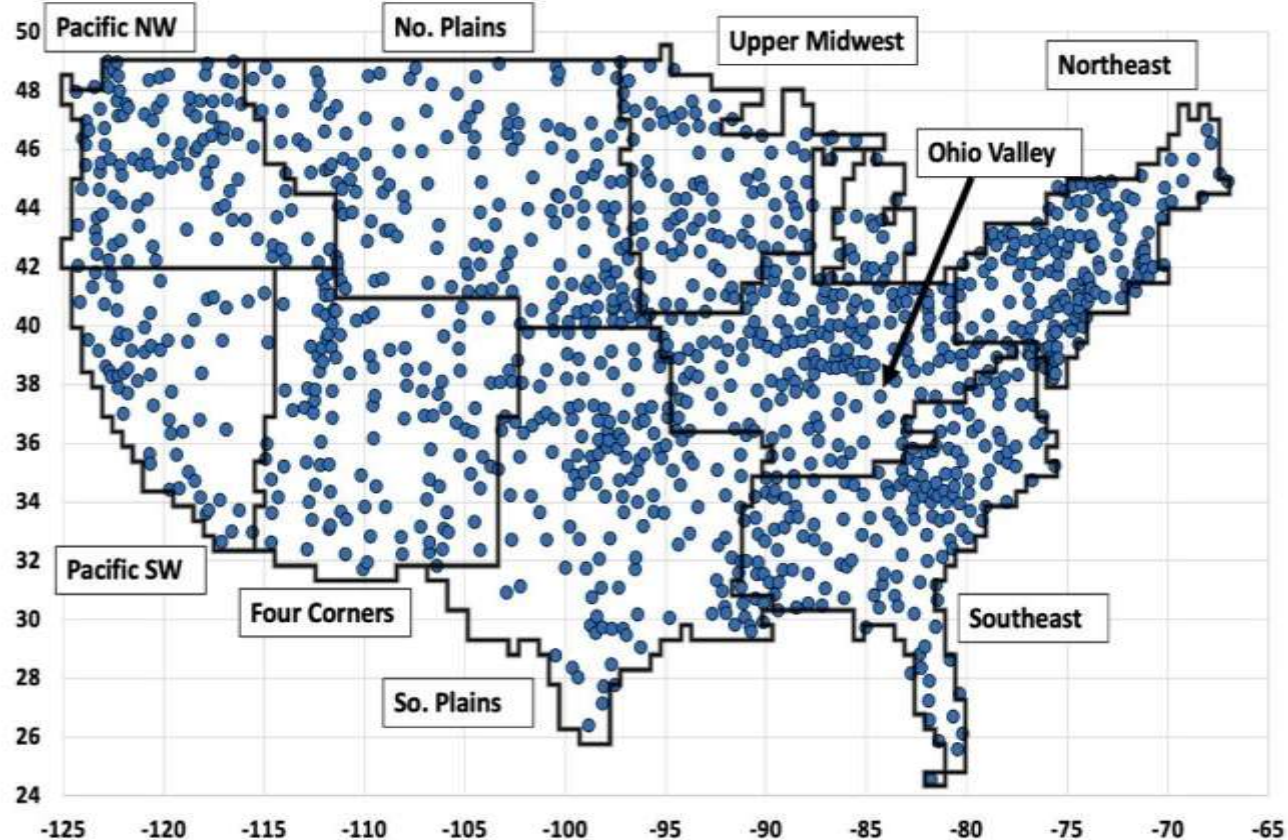


Figure 6.3.2 Emplacement des stations de mesure de température USHCN. Source : USHCN.

Nous commençons par nous demander si la fréquence des records quotidiens de températures maximales ou minimales a changé depuis décembre 1898. Chaque saison chaude compte 153 jours (du 1er mai au 30 septembre) et chaque saison froide 122 jours (du 1er décembre au 31 mars). Pour chaque station et chaque jour, nous avons calculé l'année au cours de laquelle la température maximale (minimale) record a été enregistrée. Avec 126 années d'observations, s'il n'y avait pas eu de tendance au fil du temps, le nombre attendu de records pour Tmax serait de 1,21 ($= 153/126$) par station et par an et pour Tmin 0,96 ($= 122/126$) par station et par an.

La figure 6.3.3 montre la répartition dans le temps observée pour ces événements extrêmes. De nombreux paramètres relatifs aux phénomènes extrêmes observés pendant la saison chaude dans la partie continentale des États-Unis présentent une caractéristique commune : la chaleur exceptionnelle des années 1920 et surtout des années 1930, qui a atteint son apogée en 1936. En moyenne par station, 60 % des records de Tmax et 59 % des records de Tmin ont été enregistrés pendant la première moitié de la période (1899-1961).

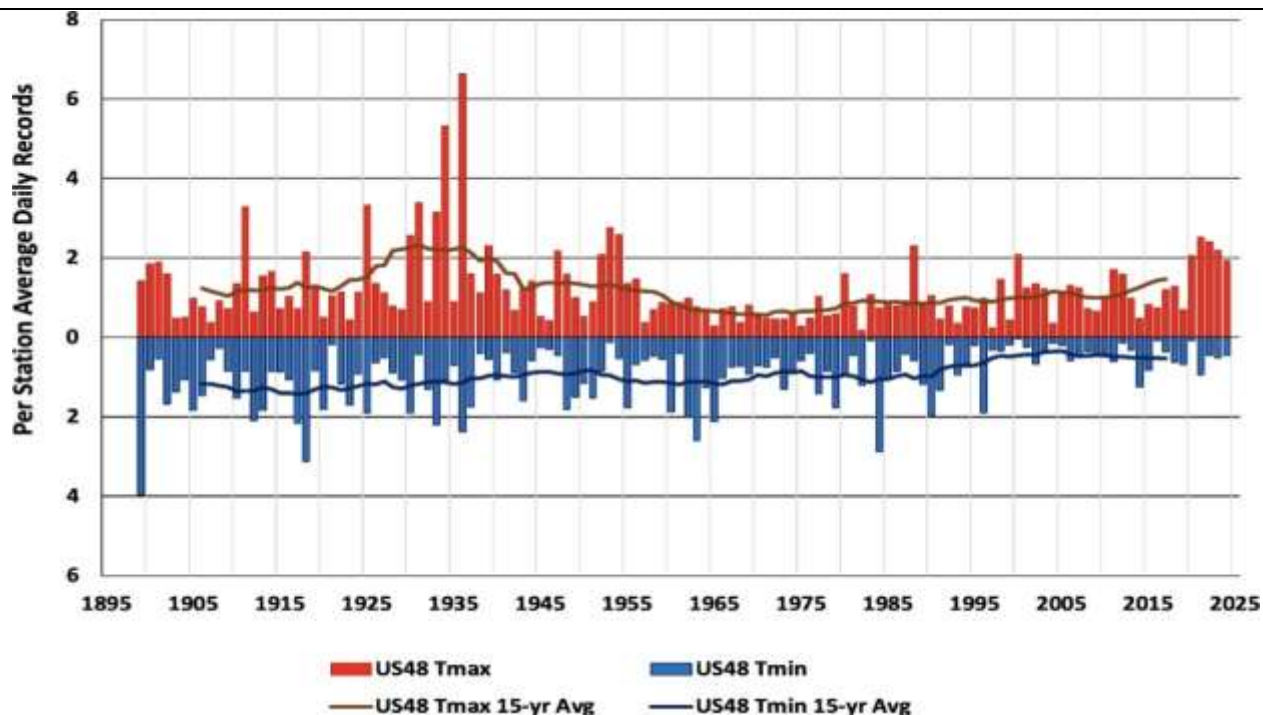


Figure 6.3.3 Nombre de records quotidiens de températures maximales (en rouge) et minimales (en bleu) pour les saisons chaudes et froides dans la CONUS. Les lignes représentent la moyenne mobile sur 15 ans, centrée. Source : 1 211 stations USHCN complétées si nécessaire pour atteindre un minimum de 92 % des observations sur une période de 126 ans depuis décembre 1898.
US48 : États contigus des États-Unis. Tmax : température maximale. Tmin : température minimale.

Du côté des températures froides, la vague de froid arctique de la Saint-Valentin en février 1899 reste l'épisode de froid extrême le plus important jamais enregistré dans la CONUS [Continental USD], suivi par celui de 1917. La fréquence des records de froid a diminué, en particulier au cours du dernier quart de la période, où seulement 13 % des épisodes de froid extrême ont été mesurés.

En revanche, 25 % des records de Tmax extrêmes ont été enregistrés au cours du dernier trimestre, conformément aux prévisions statistiques. Ces caractéristiques générales ont été relevées dans des évaluations antérieures (voir ci-dessus, IPCC AR6, NCA4). Si l'on combine ces deux historiques, la réduction globale du nombre d'événements extrêmes froids et chauds au cours du siècle dernier indique un climat moins sujet aux extrêmes.

Cette tendance est également illustrée à la figure 6.3.4. Pour chaque station et pour chaque année, les températures les plus chaudes de la saison chaude et les températures les plus froides de la saison froide ont été calculées. Les différences entre ces températures ont ensuite été calculées par station et moyennées géographiquement sur l'ensemble des stations, ce qui a permis d'obtenir une mesure annuelle de la fourchette attendue des températures extrêmes locales pour chaque année. La figure 6.3.4 montre la moyenne mobile sur 15 ans de cette mesure, qui a clairement diminué au cours du siècle dernier.



Figure 6.3.4. Moyenne mobile sur 15 ans de la différence entre la Tmax de la saison chaude et la Tmin de la saison froide de chaque station par rapport à la moyenne à long terme.

Source : analyse des données USHCN par l'auteur.

La différence moyenne entre la température maximale estivale (Tmax) et la température minimale hivernale (Tmin) pour chaque station a diminué d'environ 5 °F au cours des 126 dernières années. Cette baisse est principalement due à des températures minimales hivernales plus élevées, mais la baisse des températures maximales estivales est également un facteur. L'augmentation de la Tmin est étroitement liée à la présence croissante de surfaces artificielles autour des stations météorologiques au cours des 100 dernières années (ce que l'on appelle l'effet d'îlot de chaleur urbain ; section 3.3, Karl *et al.* 1988, Runnals et Oke 2006, et Spencer *et al.* 2025).

En résumé, bien que des températures extrêmes soient régulièrement observées aux États-Unis et attirent beaucoup l'attention des médias, les enregistrements à long terme montrent que le climat américain est devenu moins extrême au fil du temps (plus doux) lorsqu'on le mesure par l'écart entre les maximales de la saison chaude et les minimales de la saison froide.

6.3.2 Dépassements d'un seuil de chaleur

Sous la rubrique « Le risque lié aux températures extrêmes évolue », le dernier rapport américain sur l'évaluation nationale du climat (NCA5) souligne l'augmentation du nombre de jours où la température atteint ou dépasse 35 °C, en indiquant que

L'ouest des États-Unis est particulièrement touché par les chaleurs extrêmes depuis les années 1980 [...], avec une augmentation plus importante du nombre de jours où la température dépasse 35 °C, comme on pouvait s'y attendre compte tenu du réchauffement plus important de cette région par rapport à l'est des États-Unis. Plusieurs vagues de chaleur majeures ont touché les États-Unis depuis 2018, notamment un événement record dans le nord-ouest du Pacifique en 2021.

La fréquence des journées où la température atteint 95 °F est-elle en train de changer ? Dans un climat aussi varié que celui de la CONUS, les statistiques de seuil peuvent être trompeuses. Une région comptant de nombreuses stations où la température maximale moyenne est proche de 95 °F en été peut connaître

d'importantes variations de cet indicateur alors que la température moyenne ne varie que légèrement. Ailleurs, dans les stations où la température maximale atteint rarement ou presque toujours 95 °F, une légère variation n'aura pas beaucoup d'impact sur les résultats.

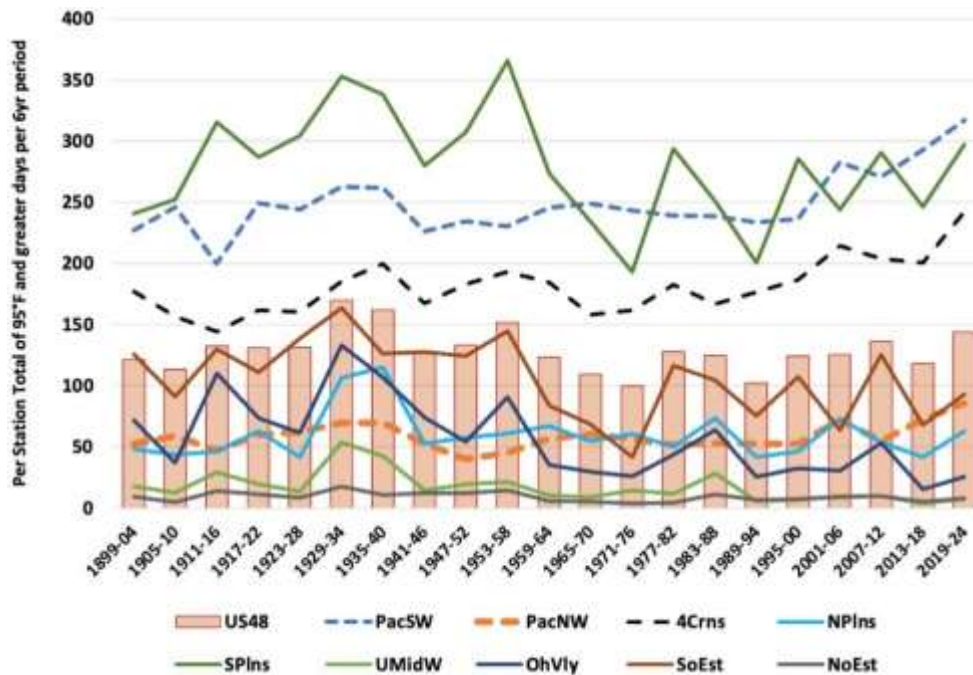


Figure 6.3.5. Nombre total de jours où la température est inférieure à 35 °C ($\geq$) sur des périodes de 6 ans, États-Unis 48 (barres) et régions (lignes). Une période de 6 ans est utilisée car elle divise de manière égale les 126 années d'enregistrement. Les résultats sont robustes pour des périodes de 2 à 11 jours. US48 : États contigus des États-Unis. Voir la figure 6.3.2 pour les noms des régions. Source : analyse des données USHCN par l'auteur.

Au cours des 126 dernières années, la station CONUS moyenne a enregistré 129 jours où la température a dépassé 95°F [le texte anglais est °C ; 95°F = 35°C] par période de six ans, mais les valeurs régionales varient de 278 dans les plaines du sud à 9 dans le nord-est. Ces analyses de seuil doivent donc être interprétées avec prudence. La figure 6.3.5 montre que seules trois des neuf régions, toutes situées dans l'ouest, ont connu une tendance à la hausse du nombre de jours où la température a atteint ou dépassé 95 °F (lignes pointillées). Ce n'est pas le cas de l'ensemble du CONUS, et les six autres régions ont connu une baisse.

La vague de chaleur qui a frappé le nord-ouest du Pacifique en 2021, mentionnée dans la citation du NCA5, sera examinée plus en détail à la section 8.6.1. Les données indiquent qu'il s'agissait d'un événement unique et sans précédent dans les archives, qui ne s'inscrit pas dans une tendance à l'augmentation des chaleurs extrêmes. Par exemple, l'anomalie de température moyenne sur 5 jours au niveau des points de la grille troposphérique au-dessus du nord-ouest du Pacifique pendant cet événement était de +10,8 °C, l'anomalie estivale la plus extrême au niveau des points de la grille dans l'hémisphère nord en 46 ans, sur plus de 4 millions de valeurs de la grille. En revanche, l'anomalie de température mondiale pendant cette période était pratiquement nulle (+0,03 °C, Mass *et al.* 2024).

6.3.3 Vagues de chaleur

Les vagues de chaleur (jours consécutifs où la température dépasse un seuil extrême) ont un impact social plus important qu'un record de température quotidien. Nous mesurons ici les « jours de canicule » comme le

nombre de jours entre mai et septembre de chaque année où la température dépasse le 90^{ème} percentile pour ce jour-là et qui se situent dans une période d'au moins six jours consécutifs. Cette méthode est équivalente à celle utilisée dans le NCA4, à l'exception que la période de référence est ici l'ensemble des données enregistrées entre 1899 et 2024, alors que le NCA4 a tronqué la période de référence à 1961-1990, qui était une période plus fraîche. (La tendance des résultats présentés ci-dessous ne dépend pas du choix de la période de référence.) Cette troncature augmente les résultats positifs (jours dépassant le 90^{ème} percentile) dans les années plus chaudes que la période de référence, en particulier à partir de 1960 et jusqu'à aujourd'hui (voir figure 6.3.6 et discussion ci-dessous).

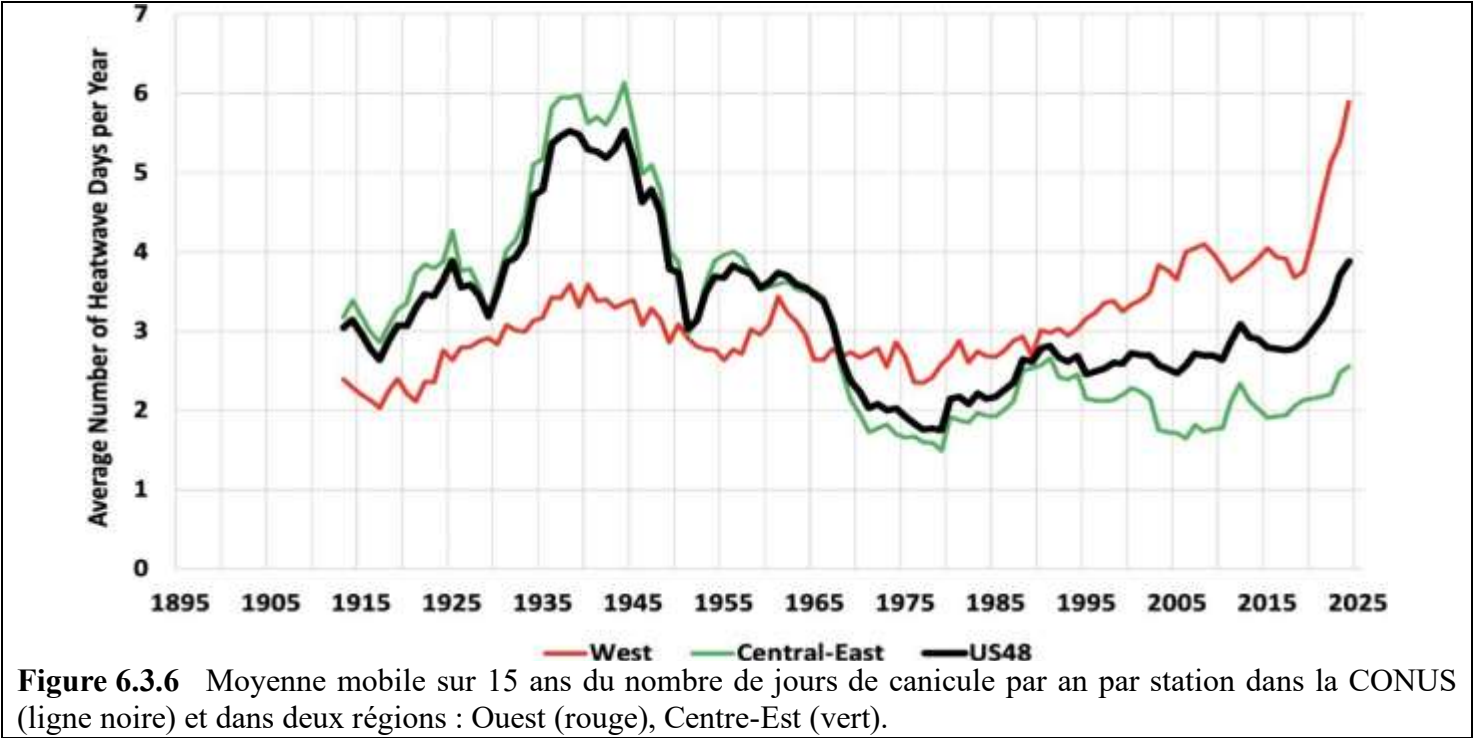


Figure 6.3.6 Moyenne mobile sur 15 ans du nombre de jours de canicule par an par station dans la CONUS (ligne noire) et dans deux régions : Ouest (rouge), Centre-Est (vert).

La figure 6.3.6 montre qu'il existe des variations régionales dans l'activité des vagues de chaleur. La chaleur excessive de la première moitié du XX^{ème} siècle s'est principalement manifestée dans les deux tiers est du pays, tandis que l'ouest a connu récemment une augmentation du nombre de jours de canicule (NCA5). Cela indique que la circulation atmosphérique pendant la saison chaude a favorisé les vagues de chaleur dans l'est du pays au cours de la première moitié du XX^{ème} siècle, mais qu'au XXI^{ème} siècle les conditions ont favorisé les vagues de chaleur dans l'ouest. Pour l'ensemble du CONUS [CONTinental US], les vagues de chaleur ne sont pas plus fréquentes aujourd'hui qu'il y a un siècle, ce qui correspond au panneau supérieur de notre figure 6.4.1 tirée du NCA4.

Cette mesure varie considérablement selon les régions. Les quatre régions du nord (nord-ouest du Pacifique, plaines du nord, haut Midwest et nord-est) connaissent en moyenne 15 à 27 jours de canicule par période de 15 ans. En revanche, les cinq régions du sud (sud-ouest du Pacifique, 4-Corners, plaines du sud, vallée de l'Ohio et sud-est) en enregistrent entre 37 et 54, soit pratiquement deux fois plus. Cela suggère que le régime de circulation estival est plus propice à des événements stationnaires dans les régions du sud, tandis que les systèmes transitoires sont plus fréquents dans les régions du nord, ce qui raccourcit ces événements potentiellement plus longs.

L'analyse des vagues de chaleur illustre pourquoi il est important de prendre en compte des ensembles de données complets et des indicateurs appropriés. Le NCA5 renvoie les lecteurs vers le site web <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (USGCRP 2023) pour consulter un graphique

présentant le nombre de vagues de chaleur urbaines par décennie depuis les années 1960, que nous reproduisons dans la figure 6.3.7.

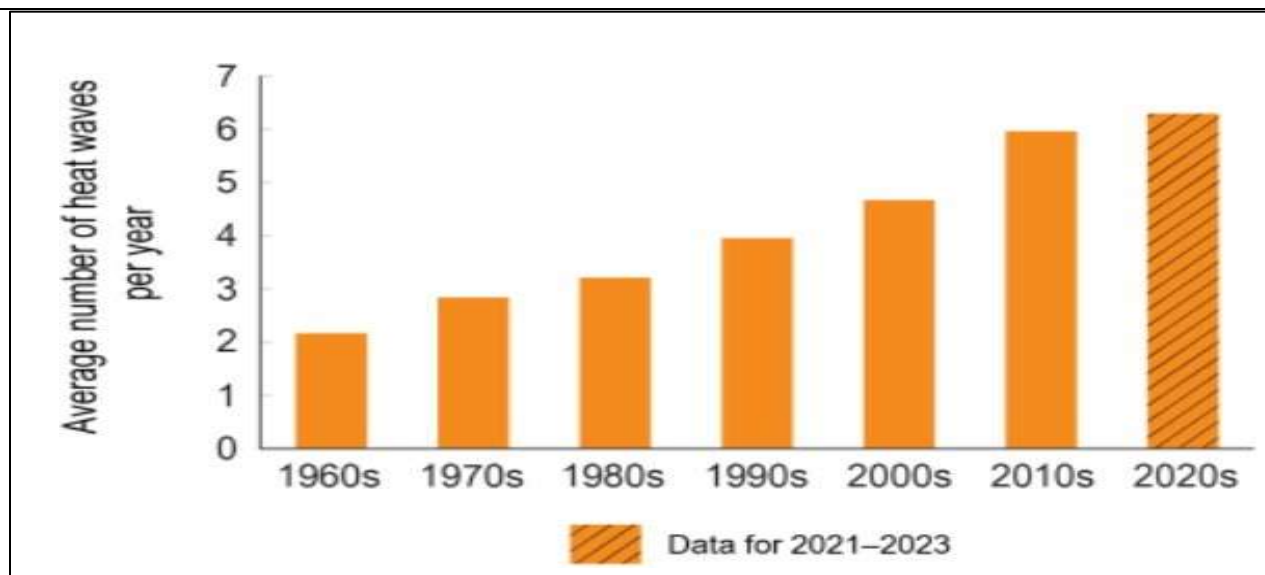


Figure 6.3.7 : Nombre moyen de vagues de chaleur urbaines par an dans 50 grandes agglomérations américaines, un indicateur trompeur pour les raisons expliquées dans le texte.

Source : <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves> (consulté le 22 mai 2025).

La figure montre une augmentation monotone au cours de chaque décennie, passant de deux occurrences par an dans les années 1960 à six dans les années 2020. La définition d'une vague de chaleur utilisée est une mesure inhabituelle mais pratique de l'inconfort humain : une période d'au moins deux jours consécutifs pendant laquelle la température apparente *minimale* (combinaison de la température et de l'humidité) dépasse le 85^{ème} percentile. Il convient également de noter que l'ensemble de données est limité aux 50 plus grandes villes des États-Unis.

Compte tenu de la définition inhabituelle de la vague de chaleur et de l'accent mis sur les zones urbaines, ces valeurs en hausse depuis 1960 présentées dans l'USGCRP (2023) ne sont pas révélatrices des tendances à long terme ni de l'influence des émissions de GES, et ce pour au moins deux raisons.

Premièrement, comme le montrent les figures 6.3.1 et 6.3.6, les années 1960 ont été la décennie la plus froide et les années 1970 la deuxième décennie la plus froide depuis les années 1910, de sorte que cette date de départ conditionne la série chronologique à montrer des augmentations.

Deuxièmement, l'urbanisation postérieure à 1960 dans ces villes est un facteur majeur de l'augmentation de la Tmin par rapport à la Tmax enregistrée au même endroit et par rapport à la Tmin enregistrée dans les stations rurales voisines (Karl *et al.* 1988, Runnals et Oke 2006, Christy *et al.* 2009, McNider *et al.* 2012).

Cela ne remet pas en cause la hausse réelle des températures nocturnes dans les grandes villes américaines et les impacts sociétaux associés à ces changements. Cependant, nous notons pour diverses raisons que la température maximale estivale (en particulier dans les zones rurales) est un meilleur indicateur pour détecter les changements dans les vagues de chaleur influencés par les changements du climat de fond dus, par exemple, à l'augmentation des GES (Christy *et al.* 2009).

Pour l'ensemble du CONUS, les données présentées dans cette section suggèrent que les émissions de GES ont eu peu ou pas d'effet sur les vagues de chaleur dans le contexte de l'urbanisation et de la variabilité climatique naturelle. Quelle que soit la cause ultime des tendances régionales, les vagues de chaleur ont des effets importants sur la société qui doivent être pris en compte, comme nous le discutons au chapitre 10.

ENCADRÉ : Les dangers des séries de données courtes

San Francisco offre un bon exemple des limites de l'utilisation d'échantillons historiques courts pour caractériser la variabilité naturelle des événements extrêmes. Supposons que nous utilisions un échantillon de 130 ans de précipitations quotidiennes à San Francisco, de 1895 à 2024, et que nous recherchions les enregistrements de précipitations sur 3 jours, 5 jours, 14 jours et 30 jours. Les résultats sont présentés au tableau 6.2.

Évènement	Précipitation record observée en pouces	année
3 jours	6,94 (176.3 mm)	2023
5 jours	8,55 (217.2 mm)	2023
14 jours	12,62 (320.5 mm)	2023
30 jours	18,93 (480.8 mm)	1998

Tableau 6.2 : Records de précipitations extrêmes, San Francisco, 1895-2024

Les records sont tous concentrés dans les années les plus récentes. 2023 semble être une année exceptionnelle et, comme elle se situe près de la fin de l'échantillon, cela pourrait suggérer que le climat est devenu plus dangereux, peut-être en raison de l'influence humaine. [Remarque : « 2023 » indique que l'événement s'est produit pendant l'année hydrologique allant d'août 2022 à juillet 2023.]

Mais le tableau est très différent si l'on utilise un échantillon qui commence 45 ans plus tôt, en 1850. Le tableau 6.3 montre que tous les événements record se sont produits dans les années 1860. De plus, 2023 n'occupe même plus la ^{deuxième} place mais tombe à la ^{troisième} ou quatrième place. Et la comparaison des records des deux graphiques montre que les événements de précipitations extrêmes de 1862 et 1867 ont impliqué des précipitations considérablement plus importantes que les événements de 1998 et 2023, avec des totaux sur 14 et 30 jours environ 50 % plus élevés.

Évènement	Observé en pouces (de 2.54mm)	Année	Classement de l'événement sur les 130 ans répertoriés au tableau 6.2
3 jours	8,85 (224.8 mm)	1867	2
5 jours	9,80 (248.9 mm)	1867	3
14 jours	19,05 (483.9 mm)	1862	4
30 jours	28,25 (717.6 mm)	1862	2

Tableau 6.3 : Records de précipitations extrêmes, San Francisco, 1850-2024.

La gamme de variabilité naturelle est encore plus remarquable lorsque l'on examine les données paléoclimatiques. Porter *et al.* (2011) ont découvert qu'au cours des 1 800 dernières années, au moins six méga-tempêtes ont été plus intenses que la tempête ARkStorm qui a dévasté la région en 1861-1862. De toute évidence, ces événements extrêmes, « sans précédent » dans notre échantillon de 1895 à 2024, ont touché la région environ tous les 300 ans, mais pas depuis 1895.

Cet exemple illustre les limites de l'utilisation de périodes climatiques relativement courtes (~130 ans) pour évaluer le caractère et l'amplitude de la variabilité naturelle en général et des événements extrêmes en particulier. Une représentation précise de toute l'amplitude de la variabilité naturelle est nécessaire pour toute analyse d'attribution (section 8.6). Les planificateurs d'infrastructures, les institutions de gestion des urgences et les scientifiques spécialisés dans l'attribution comprendraient l'importance de

la mauvaise caractérisation de l'ampleur d'un événement extrême futur si celle-ci était basée uniquement sur les 130 dernières années. Dans ce cas, un seul échantillon temporel de 130 ans fournit une sous-estimation de la valeur extrême pouvant atteindre 50 % lorsqu'on ajoute seulement 45 années supplémentaires d'observations. Par rapport aux données paléoclimatiques à l'échelle millénaire, la sous-estimation serait encore plus importante. Une leçon importante à retenir est que le climat peut réserver de grandes surprises, même sans influence humaine.

6.4 Précipitations extrêmes

Le rapport AR6 a évalué qu'une augmentation des précipitations intenses a été observée dans les données depuis les années 1950.

AR6 : La fréquence et l'intensité **des épisodes de fortes précipitations ont augmenté** depuis les années 1950 sur la plupart des zones terrestres pour lesquelles les données d'observation sont suffisantes pour analyser les tendances (degré de confiance élevé). (SPM A3.2)

AR6 : En Amérique du Nord, il existe des preuves solides que **l'ampleur et l'intensité des précipitations extrêmes ont très probablement augmenté** depuis les années 1950. Les [maxima journaliers] et les [maxima sur 5 jours] ont tous deux augmenté de manière significative en Amérique du Nord entre 1950 et 2018. (Chapitre 11, p. 1560)

Les évaluations nationales du climat des États-Unis (NCA4, NCA5) ont mis en évidence une augmentation de la fréquence des précipitations les plus intenses (définies de différentes manières) principalement dans la moitié est du CONUS, en particulier dans le nord-est, lorsque l'analyse commence en 1901 ou 1958. Il est intéressant de noter que les variations régionales indiquent que les augmentations les plus importantes des précipitations extrêmes se produisent dans le nord-est et les plus faibles dans l'ouest, un schéma contraire aux changements des températures extrêmes (figure 6.3.6).

McKittrick et Christy (2019) ont examiné les observations longues et cohérentes des stations météorologiques sur les précipitations quotidiennes extrêmes afin de vérifier certaines des affirmations de la NCA [National Climate Assessment] pour le sud-est et la côte ouest à l'aide d'un modèle de tendance avec un estimateur de variance non paramétrique robuste face aux propriétés d'autocorrélation complexes des données sur les précipitations. Lorsque les séries chronologiques ont été prolongées dans le temps (jusqu'en 1872 dans certains cas) ou ont commencé plus tard (1978), aucune tendance significative n'a été observée pour l'une ou l'autre région.

Ces résultats ont été mis à jour pour le présent rapport (McKittrick et Christy 2025) à l'aide d'observations similaires provenant de 29 stations situées sur la côte pacifique des États-Unis continentaux (depuis 1893, de San Diego en Californie à Blaine dans l'État de Washington) et de 24 stations situées dans le sud-est humide (depuis 1872, d'Austin au Texas à Washington DC), auxquelles ont été ajoutées 27 stations situées dans le nord-est (1888ff, de Buffalo, New York, à Eastport, Maine). Les emplacements sont indiqués dans la figure 6.4.1. Les stations ont été sélectionnées en fonction de la disponibilité de données de longue durée de haute qualité. Chaque région est associée à des caractéristiques importantes du comportement des précipitations extrêmes : la côte Pacifique est associée à des rivières atmosphériques qui touchent terre, pour lesquelles le rapport AR6 cite des preuves d'une activité croissante depuis 1948, avec une augmentation supplémentaire prévue à mesure que le monde se réchauffe (AR6 8.3.2.8.2) ; le rapport NCA indique que le nord-est a connu

la plus forte augmentation des événements extrêmes, et le sud-est est également une région mentionnée dans les NCA comme ayant connu une augmentation des événements extrêmes.

Les résultats de l'application de l'analyse de McKittrick et Christy (2019) ont été les suivants pour chaque région, suivis d'explications supplémentaires.

Épisodes de fortes précipitations sur la côte Pacifique

- La tendance moyenne des précipitations est statistiquement significative (à la baisse) à Astoria (Oregon) ; elle est insignifiante ailleurs.
- La tendance de la variance des précipitations est positive et significative à Big Sur, en Californie ; elle est insignifiante ailleurs.
- La tendance des précipitations maximales quotidiennes est positive et significative à Aberdeen (Washington) et Big Sur (Californie) et négative et significative à Newport (Oregon) (nulle ailleurs).
- En moyenne sur l'ensemble des stations de la région, aucun de ces trois paramètres de tendance n'est statistiquement significatif.

La côte Pacifique reçoit des précipitations considérables provenant de phénomènes appelés « rivières atmosphériques » (RA), qui durent souvent plus d'un jour ou deux (par exemple, Gershunov *et al.* 2017, Pan *et al.* 2024). La pire série d'événements de ce type dans l'histoire récente est celle dite « ARkStorm », qui s'est produite entre décembre 1861 et janvier 1862 ; elle a déversé près de 3 mètres de pluie dans certaines parties de la Californie et submergé toute la vallée centrale pendant des semaines sous près de 4,5 mètres d'eau (Brewer 1930, Null et Hulbert 2007). De plus, des recherches paléoclimatiques ont mis en évidence six mégatempêtes plus violentes que celle de 1861-1862 en Californie au cours des 1800 dernières années, survenant à des intervalles d'environ 300 ans (Porter *et al.* 2011).

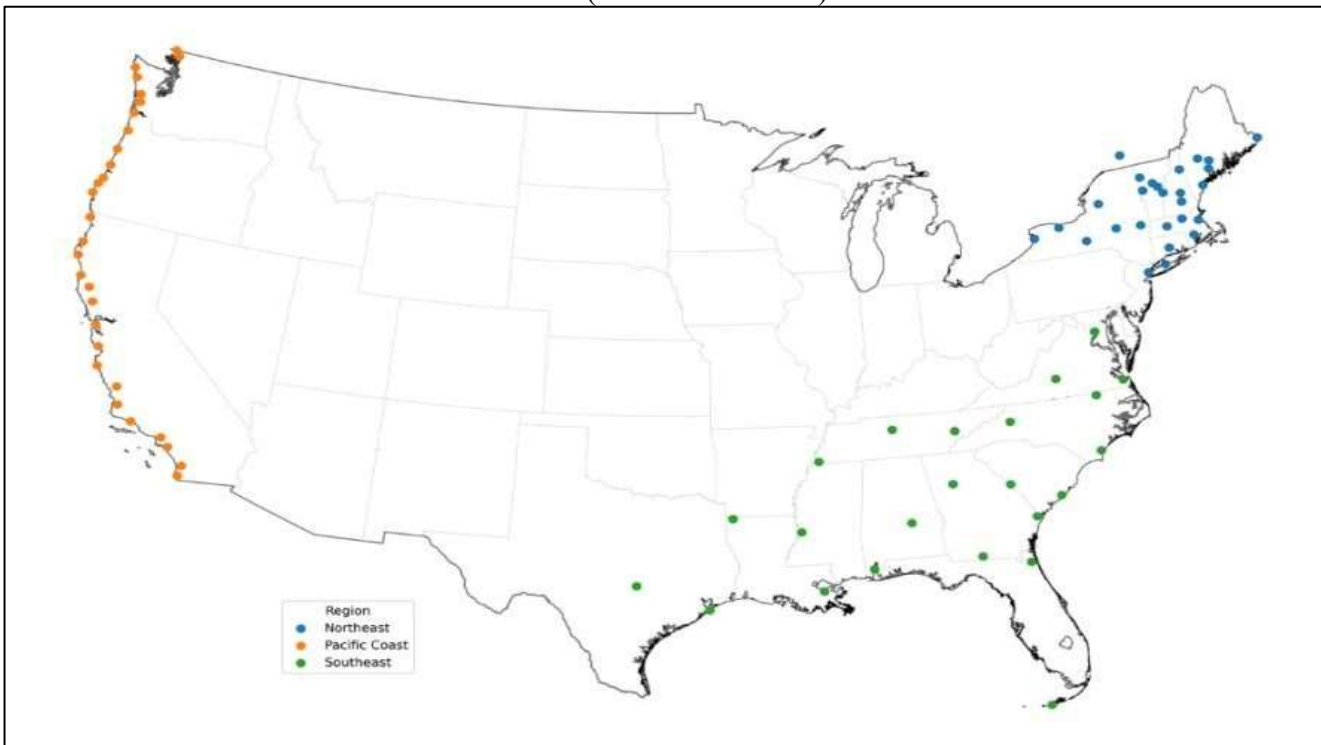


Figure 6.4.1 : Emplacement des stations de surveillance des précipitations utilisées dans ce rapport. Orange : côte Pacifique. Bleu : nord-est. Vert : sud-est. Données tirées de McKittrick et Christy (2025).

Nous examinons comme suit des occurrences de déluges de 5 jours. En prenant la côte Pacifique comme exemple, une période de 130 ans comprend 26 intervalles de 5 ans. À chaque emplacement, nous avons calculé les précipitations totales sur 5 jours tout au long de l'année et sélectionné les 26 valeurs les plus élevées de l'échantillon. Une seule année peut compter plusieurs des 26 précipitations les plus importantes. Chacune d'entre elles peut être considérée comme un événement survenant une fois tous les cinq ans. S'il n'y a pas de tendance dans les précipitations, le nombre total de ces événements dans toutes les stations devrait être réparti de manière uniforme sur les années. La figure 6.4.2 montre la répartition dans le temps de ces événements pour la côte Pacifique. Les déluges associés à l'événement El Niño de 1997/1998 sont clairement visibles. Bien qu'irrégulières, comme c'est généralement le cas pour ce type de mesures pluviométriques, elles ne montrent aucune tendance à devenir plus fréquentes au fil du temps.

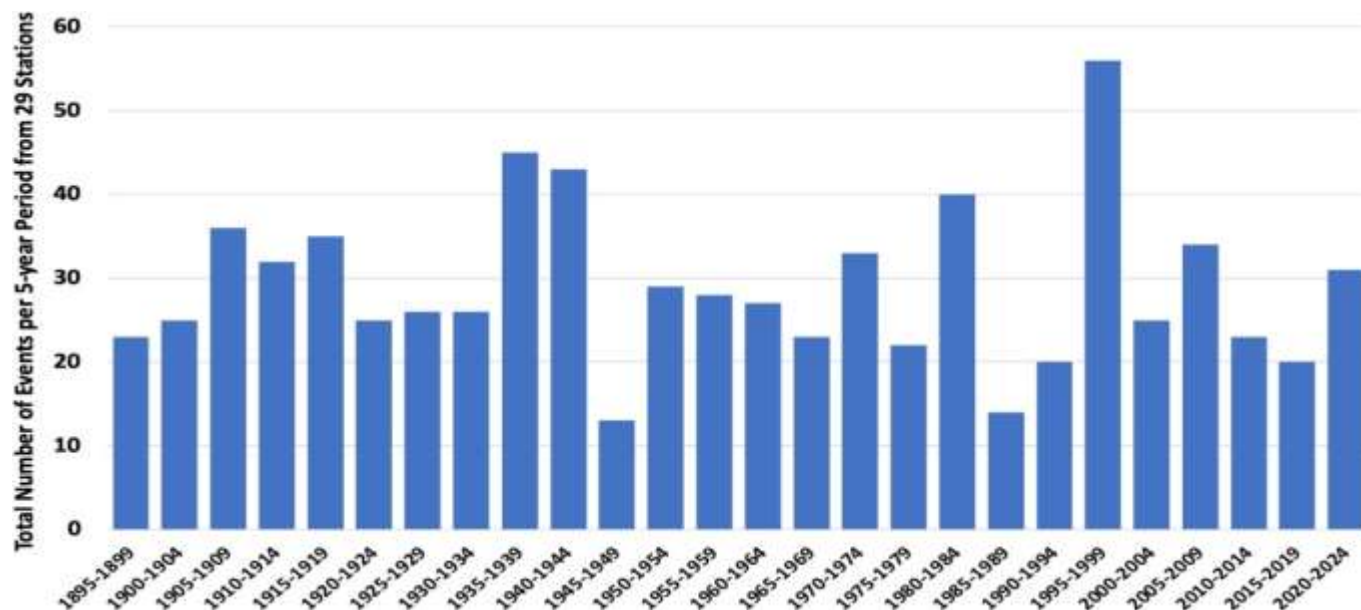


Figure 6.4.2. Répartition temporelle par périodes de cinq ans des 26 événements les plus importants (1 tous les cinq ans) pour 29 stations situées sur la côte Pacifique.

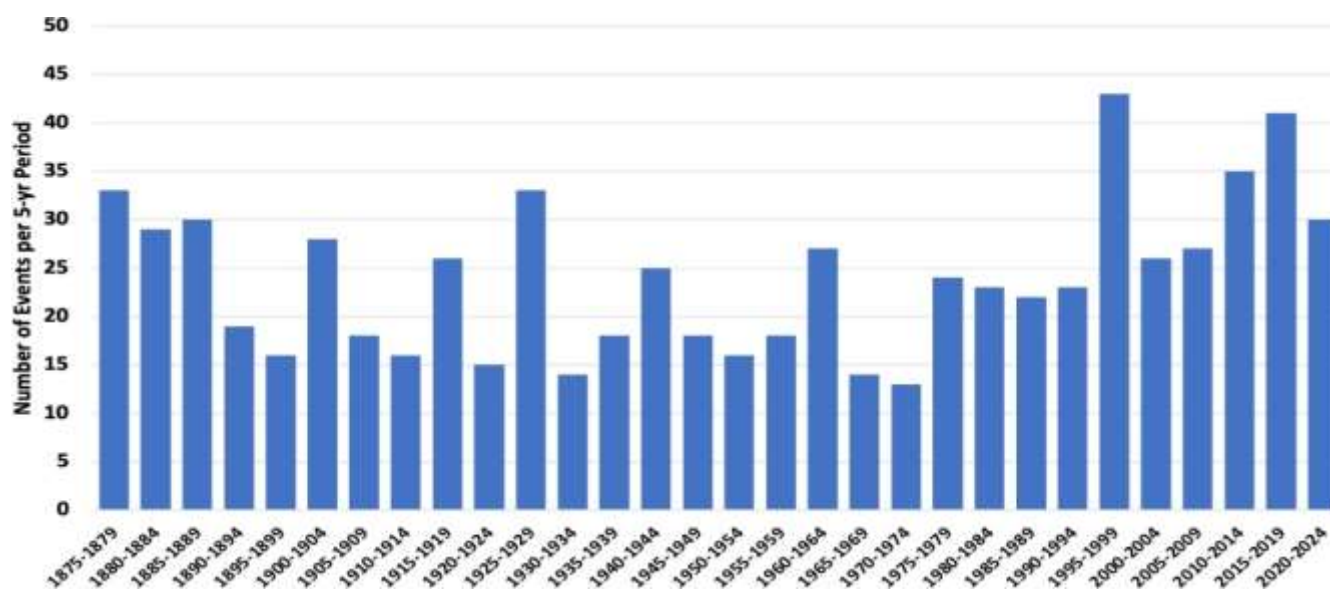


Figure 6.4.3. Comme dans la figure 6.4.2, mais pour les 30 événements les plus importants (1 tous les 5 ans) pour 24 stations dans le sud-est humide, d'Austin (Texas) à Washington (District de Columbia), par tranches de 5 ans pour la période 1875-2024.

Épisodes de fortes précipitations dans le sud-est

- La tendance des précipitations moyennes est positive et statistiquement significative à Mobile (Alabama) et Quitman (Géorgie), mais insignifiante ailleurs.
- La tendance de la variance des précipitations est positive et significative à Mobile (Alabama), mais insignifiante ailleurs.
- La tendance des précipitations maximales quotidiennes est positive et significative à Vicksburg (Mississippi) et Norfolk (Virginie), mais non significative ailleurs.
- En moyenne sur l'ensemble des stations de la région, aucun de ces trois paramètres de tendance n'est statistiquement significatif.

La figure 6.4.3 est analogue à la figure 6.4.2 pour les 150 dernières années dans la zone humide du sud-est. La tendance temporelle des cumuls sur 5 jours des événements violents survenant une fois tous les 5 ans est généralement peu remarquable, bien qu'un groupe de valeurs plus élevées apparaisse entre 1995 et 2019. L'augmentation observée au cours de ces années est due en grande partie aux quatre stations les plus au nord-est, situées à Wilmington (Caroline du Nord), Weldon (Caroline du Nord), Washington (district de Columbia) et Norfolk (Virginie). Cela confirme la tendance indiquée dans les rapports NCA4 et NCA5, à savoir une fréquence croissante des épisodes intenses due à un regroupement temporel des tempêtes tropicales entre l'est de la Caroline du Nord et le Maine, comme indiqué ci-dessous. Sinon, les 20 stations restantes présentent une distribution temporelle peu remarquable des épisodes intenses.

Événements de fortes précipitations dans le nord-est

- La tendance des précipitations moyennes est positive et statistiquement significative dans 12 des 27 sites, ainsi que dans la moyenne régionale.
- La tendance de la variance des précipitations est positive et significative à Portland (Maine), Albany (New York), Buffalo (New York) et Eastport (Maine), mais non significative ailleurs.
- La tendance des précipitations maximales quotidiennes est positive et significative à Portland (Maine), Gardiner (Maine) et Eastport (Maine), mais non significative ailleurs.
- Lorsque l'on fait la moyenne de toutes les stations de la région, on ne constate aucune tendance statistiquement significative, ni dans la variance des précipitations, ni dans la maximale.

La figure 6.4.4 est analogue à la figure 6.4.2 pour les 135 dernières années dans 27 stations du nord-est (y compris Montréal, au Canada). Nous utilisons ici les totaux sur trois jours, car ils ont produit les variations temporelles les plus importantes. Dans cette région, 77 % des événements se produisent entre juin et octobre et sont dominés par des ouragans, des tempêtes tropicales ou des tempêtes tropicales qui se transforment en systèmes extratropicaux. Selon les rapports NCA4 et NCA5, cette région a connu les plus fortes augmentations d'événements extrêmes, ce qui mérite un examen plus approfondi.

On observe un regroupement notable des événements extrêmes entre 1995 et 2014. Howarth *et al.* (2019) ont examiné une région similaire à celle de la figure 6.4.4, qui comprend la Pennsylvanie et le New Jersey, et ont signalé des différences significatives dans divers extrêmes de précipitations entre deux périodes de 18 ans, 1979-1996 et 1997-2014. Cela comprenait une augmentation de 317 % des événements de 24 heures dépassant 6 pouces, alors que nous constatons une augmentation de 58 % au cours des mêmes années. Cependant, la

figure 6.4.4 montre que la fréquence diminue fortement après 2014, revenant à la moyenne à long terme au cours des intervalles de cinq ans suivants, ce qui illustre une fois de plus les dangers de tirer des conclusions à partir de tendances à court terme dans des mesures très variables.

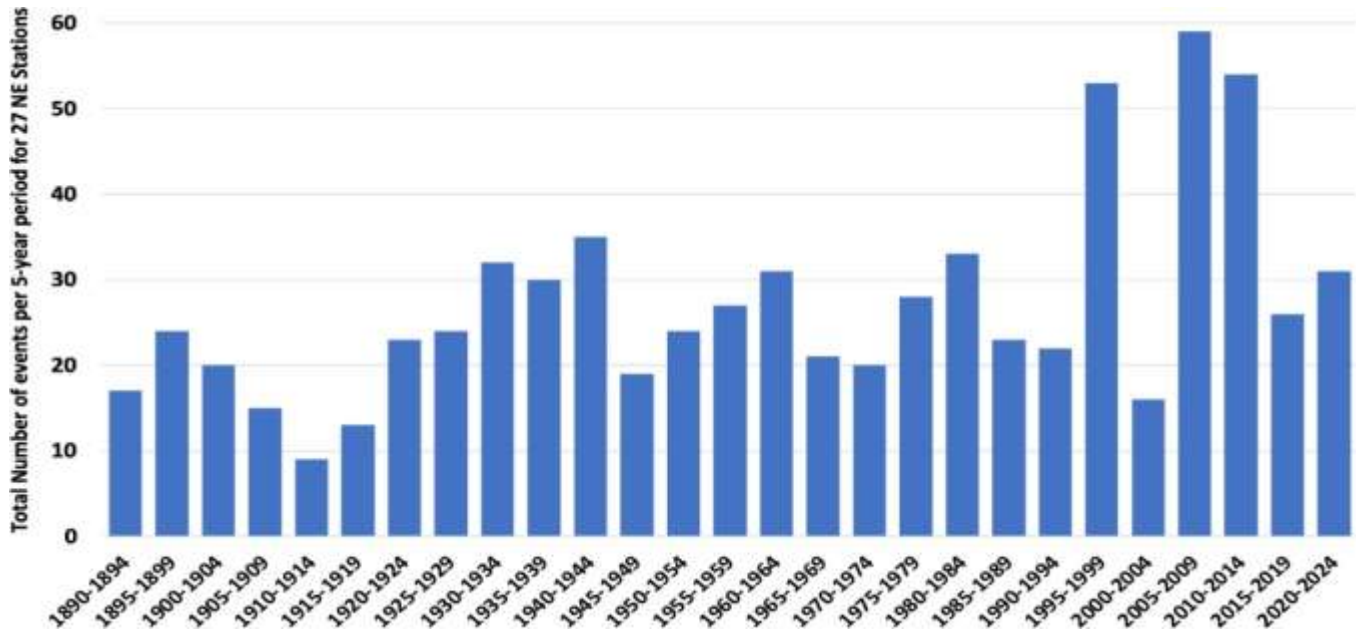


Figure 6.4.4. Comme dans la figure 6.4.2, mais pour les 27 épisodes de précipitations les plus intenses (1 tous les 5 ans) sur 3 jours pour 27 stations du nord-est, de New York au Maine, y compris Montréal.

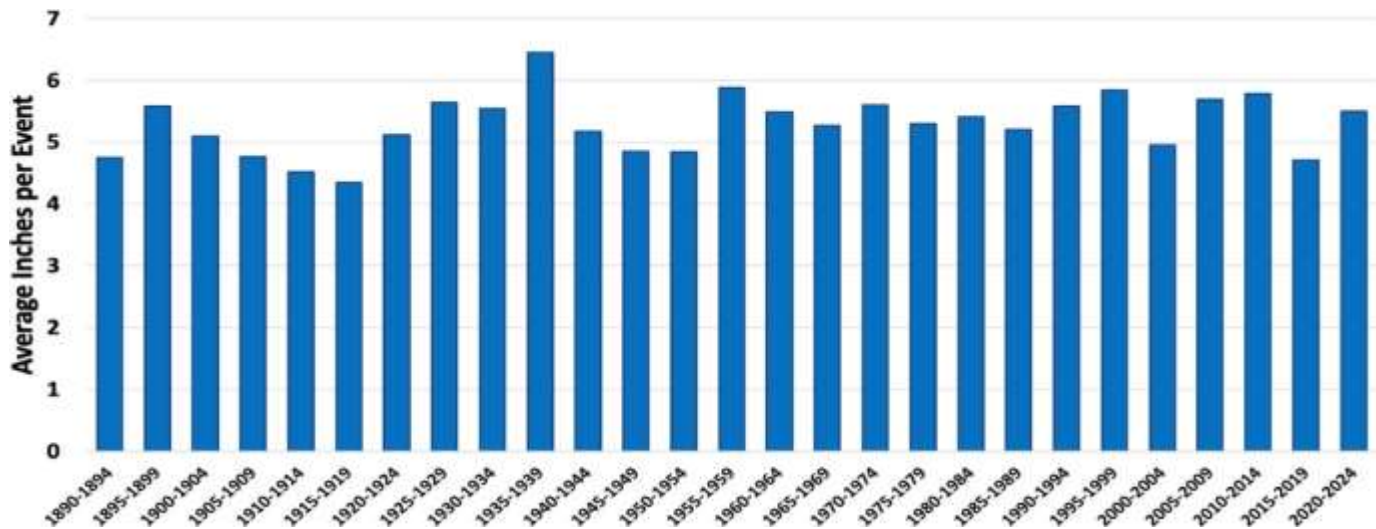


Figure 6.4.5. Quantité moyenne de précipitations tombées lors des événements survenant une fois tous les cinq ans pour les stations du nord-est.

La forte augmentation en pourcentage observée dans l'échantillon de Howarth *et al.* est associée à un petit nombre d'événements survenus à des endroits relativement peu nombreux : il n'y en a eu que 6 au cours de la première période et 25 au cours de la deuxième, répartis sur 58 stations. La plupart des stations n'ont pas enregistré un tel événement. S'il y avait une augmentation des événements violents à l'échelle régionale, cela devrait se refléter dans la moyenne de toutes les stations. La figure 6.4.5 montre la moyenne des précipitations lors des événements survenant une fois tous les cinq ans dans le nord-est. La tendance n'est que de +0,04

pouce par décennie. La quantité la plus élevée, enregistrée entre 1935 et 1939, inclut le grand ouragan de Nouvelle-Angleterre de 1938, l'un des rares ouragans majeurs (de catégorie 3 ou plus) à avoir frappé la région. Les résultats présentés dans les figures 6.4.4 et 6.4.5 suggèrent donc que, bien qu'il y ait eu une augmentation du nombre d'événements à quelques endroits entre 1995 et 2014, il n'y a pas eu de tendance régionale et ce changement n'a pas persisté après 2014.

Jong *et al.* (2024) documentent l'augmentation des influences tropicales sur les précipitations dans le nord-est depuis 1959 et concluent que « *la tendance aux précipitations extrêmes en automne dans le nord-est des États-Unis est principalement attribuée à des événements liés aux cyclones tropicaux depuis les années 1990* ».

La question qui se pose alors est la suivante : « *Le regroupement temporel des systèmes tropicaux qui a affecté le nord-est entre 1997 et 2014 était-il une réponse à l'augmentation des GES ?* » Jong *et al.* ont examiné les résultats du modèle CMIP-6, qui suggèrent qu'il y aura moins de systèmes de ce type au XXI^{ème} siècle, mais que l'intensité des précipitations pourrait augmenter. Cette hypothèse n'est pas confirmée par la figure 6.4.5, où la quantité par événement est restée stable sur une période de 135 ans.

Certaines données indiquent que les précipitations les plus importantes pourraient être redistribuées en raison de l'impact des infrastructures urbaines sur le climat local (par exemple, Pielke Sr. *et al.* 2011, Zhang *et al.* 2018, Yang *et al.* 2024). Yang *et al.* affirment que « *les villes qui connaissent un développement compact ont tendance à enregistrer une augmentation plus importante de la fréquence des précipitations extrêmes dans le centre-ville que dans les zones rurales environnantes, tandis que les anomalies dans la fréquence des précipitations extrêmes diminuent dans les villes à développement dispersé* ». Bien qu'il s'agisse d'une observation importante à prendre en compte, l'effet sur les stations spécifiques utilisées dans cette analyse est inconnu, ou du moins non détectable dans la figure 6.4.5.

En résumé, certaines régions des États-Unis connaissent une augmentation de courte durée des précipitations extrêmes, ce qui correspond à la variabilité naturelle. Cependant, l'analyse des données historiques à long terme à l'échelle nationale, qui tient compte des propriétés d'autocorrélation des données pluviométriques, ne corrobore pas l'affirmation selon laquelle les précipitations extrêmes de courte durée seraient de plus en plus fréquentes ou intenses.

6.5 Tornades

L'AR6 évalue les tendances des tornades aux États-Unis comme suit :

Les tendances observées en matière de tornades, de grêle et de foudre associées à de violentes tempêtes convectives ne sont pas détectées de manière fiable en raison de la couverture insuffisante des observations à long terme. Il existe *une confiance moyenne* dans le fait que le nombre annuel moyen de tornades aux États-Unis est resté relativement constant. (Chapitre 11, section 11.7.3, p. 1594)

La surveillance des tornades faibles a évolué au fil du temps. La croissance des populations rurales et la capacité croissante à filmer avec des appareils portables ont conduit à une augmentation des signalements de tornades faibles causant des dégâts minimes. En revanche, les tornades fortes à violentes ont été observées de manière plus constante au fil du temps. Il convient de noter que la force d'une tornade est mesurée en fonction des dégâts qu'elle cause, et non en fonction de l'apparence visuelle de la trombe. Les capacités d'observation en temps réel limitées au cours des décennies précédentes n'ont pas empêché l'identification, car les tornades fortes à violentes causent beaucoup plus de dommages qui peuvent être évalués ultérieurement, même si la

tornado elle-même n'a pas été observée. Depuis le début des statistiques en 1950, le nombre de tornades fortes à violentes a considérablement diminué (d'environ 50 %), comme le montre la figure 6.5.1a.

En résumé, on observe une tendance à la baisse notable du nombre de tornades violentes aux États-Unis depuis 1950. Après 1990, le nombre de tornades faibles aux États-Unis est resté à peu près constant ; les données antérieures à cette date sont incomplètes en raison d'une surveillance limitée.

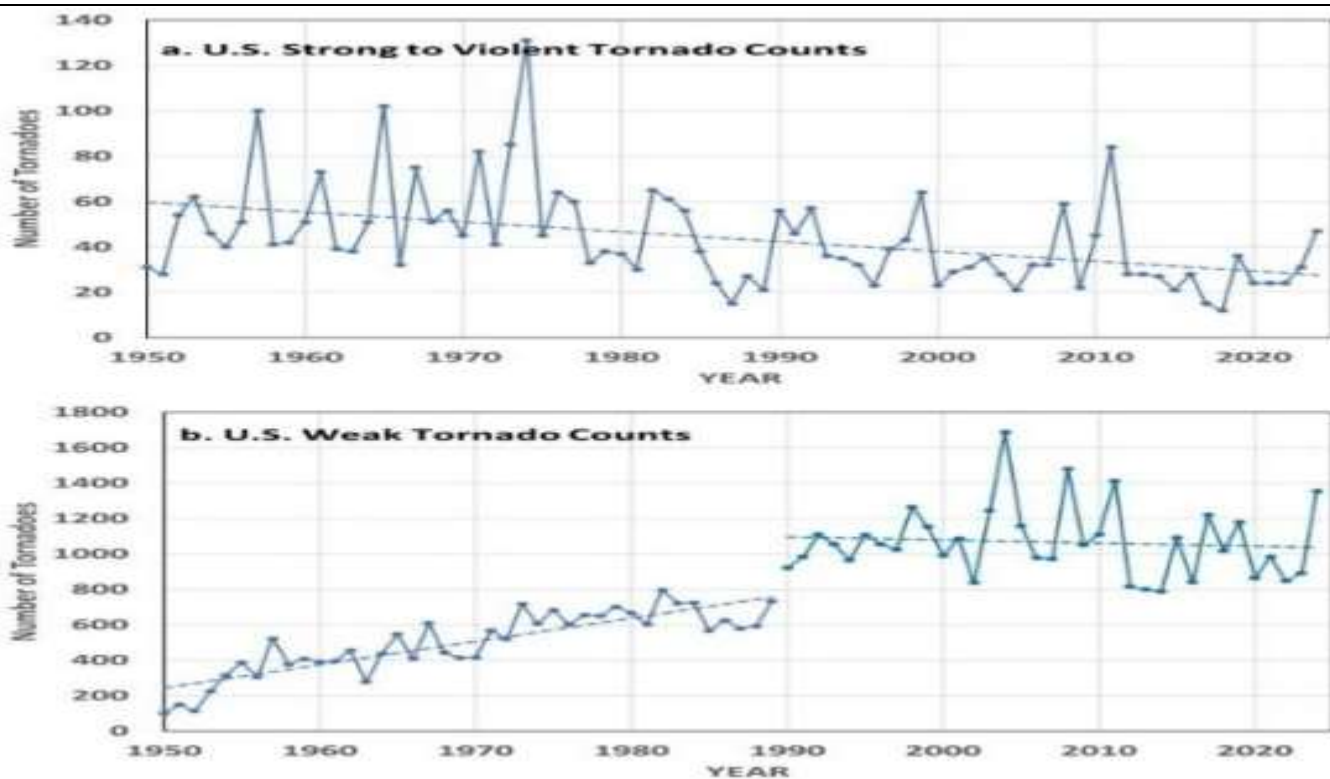


Figure 6.5.1. Nombre annuel de tornades aux États-Unis pour

(a) les tornades fortes à violentes (EF3 à EF5) et

(b) les tornades faibles (EF0 à EF2).

D'après les données du Centre de prévision des tempêtes de la NOAA, disponibles à l'adresse https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/19502024_actual_tornadoes.csv

6.6 Les inondations

Les changements en matière d'inondations ont été évalués comme suit :

AR6 : Le SREX a évalué *comme faible le degré de confiance dans les changements observés dans l'ampleur ou la fréquence des inondations* à l'échelle mondiale. Cette évaluation a été confirmée par le rapport AR5. Le SR15 a constaté une augmentation de la fréquence des inondations et des débits extrêmes dans certaines régions, mais une diminution dans d'autres. . . La littérature hydrologique sur les changements observés en matière d'inondations est hétérogène, se concentrant à l'échelle des bassins régionaux et sous-régionaux, ce qui rend difficile la synthèse à l'échelle mondiale et parfois régionale. (Chapitre 11.5)

AR6 : La saisonnalité des inondations a changé dans les régions froides où la fonte des neiges domine le régime hydrologique en réponse au réchauffement (*degré de confiance élevé*). Le degré

de confiance concernant les tendances des débits de pointe au cours des dernières décennies à l'échelle mondiale est **faible**. (Chapitre 11.5)

NCA4 : Les tendances relatives aux valeurs extrêmes élevées des débits fluviaux sont **mitigées** à travers les États-Unis. L'analyse de 200 jauges fluviales américaines indique des zones où l'ampleur des inondations augmente et d'autres où elle diminue, **mais ne fournit pas de preuves solides** que ces tendances soient attribuables à l'influence humaine (pp. 240-241).

L'absence de tendances détectables à l'échelle des États-Unis en matière d'inondations est conforme aux conclusions de la section 6.4 concernant l'absence de changements cohérents dans les précipitations extrêmes.

6.7 Les sécheresses

Les évaluations des tendances en matière de sécheresse ont été les suivantes.

AR6 : Peu de régions couvertes par l'AR6 montrent une augmentation observée de la sécheresse météorologique (section 11.9, p. 1575).

AR6 : Des tendances à la hausse des sécheresses agricoles et écologiques ont été observées sur tous les continents (*confiance moyenne*), mais elles ne diminuent que dans une seule région AR6 (*confiance moyenne*). Des tendances à la hausse des sécheresses hydrologiques ont été observées dans quelques régions AR6. (Résumé du chapitre 11)

NCA4 : En conséquence de cette augmentation des précipitations, **les statistiques sur la sécheresse dans l'ensemble du CONUS ont diminué**. (p. 233)

NCA4 : Les récentes sécheresses et les vagues de chaleur qui les ont accompagnées ont atteint une intensité record dans certaines régions des États-Unis ; toutefois, en termes d'échelle géographique et de durée, la période du Dust Bowl des années **1930 reste la référence** en matière de sécheresse et de chaleur extrême dans les archives historiques (*confiance très élevée*). (p. 231)

SREX : D'un point de vue paléoclimatique, **les sécheresses récentes ne sont pas sans précédent**, des « mégasécheresses » sévères ayant été signalées dans les archives paléoclimatiques pour l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Australie. (p. 170)

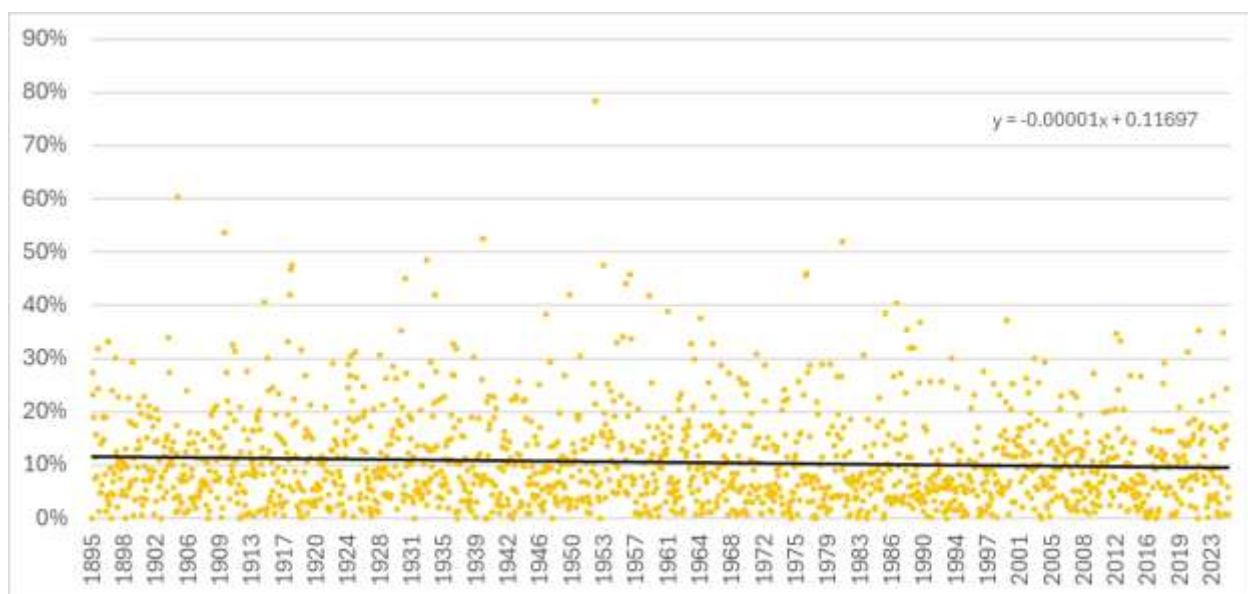


Figure 6.7.1 : Pourcentage mensuel des États-Unis classés comme « très secs » entre 1895 et 2025. Source des données : NOAA <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0> ligne de tendance des moindres carrés ajoutée.

Comme le montre la figure 6.7.1, les données à long terme pour les États-Unis montrent une tendance à la baisse insignifiante de la sécheresse extrême (-0,001 % par an).

Kogan *et al.* (2020) examinent une mesure de la sécheresse par satellite à haute résolution sur 38 ans et concluent que la sécheresse mondiale ne s'est pas intensifiée et n'est pas liée au changement climatique : « *on peut affirmer avec certitude que les tendances en matière de superficie et d'intensité de la sécheresse dans les principaux pays céréaliers et à l'échelle mondiale ne suivent pas le réchauffement climatique mondial depuis les années 1980* ».

En résumé, il n'existe aucune preuve d'une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des sécheresses météorologiques aux États-Unis ou dans le monde au cours des dernières décennies.

6.8 Les Feux de forêt

Le GIEC n'a pas fourni d'évaluation de l'attribution des incendies de forêt. Comme le montre la figure 6.8.1, l'activité mondiale des incendies de forêt, telle que mesurée par l'Agence spatiale européenne, affiche une tendance à la baisse au ^{XXI}e siècle.

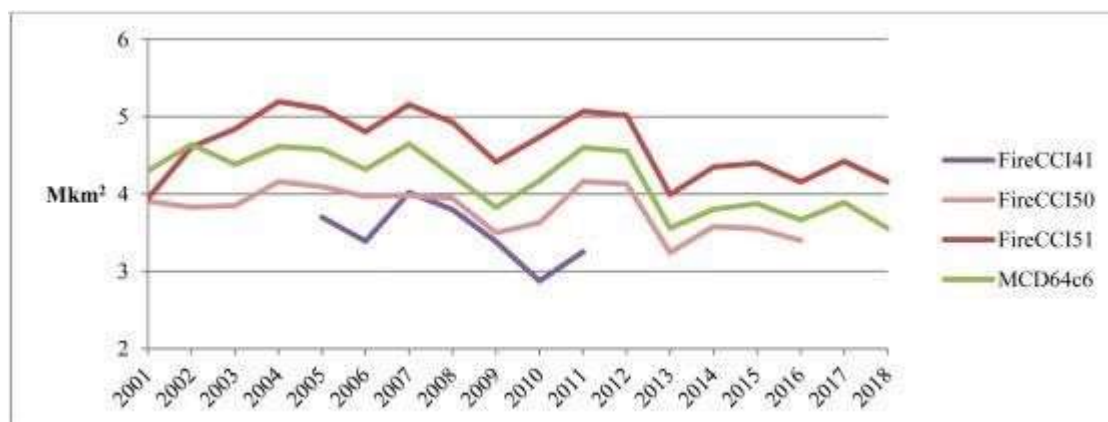


Figure 6.8.1 : Superficie mondiale des feux de forêt entre 2001 et 2018. Source : Lizundia-Loiola *et al.* (2021) Figure

12. Les lignes de différentes couleurs représentent les produits de données dérivés de différents satellites et algorithmes

Les données mondiales montrent que la couverture des feux de forêt est constante ou en baisse sur tous les continents (Samborska et Ritchie, 2024). Cependant, certains éléments indiquent que l'intensité des incendies s'aggrave dans certaines régions (Cunningham *et al.*, 2024) et que les feux de forêt ont entraîné une perte nette de la couverture forestière mondiale entre 2001 et 2019 (Tyukavina *et al.*, 2022).

La lutte active contre les incendies depuis 1900 rend difficile l'établissement d'une référence naturelle pour l'activité des feux de forêt aux États-Unis. Les données paléoclimatiques indiquent que l'activité passée était beaucoup plus importante qu'aujourd'hui. Marlon *et al.* (2012) ont utilisé des couches de charbon sédimentaire pour reconstituer l'histoire des incendies dans l'ouest des États-Unis au cours des 1 400 dernières années et ont également ajusté un modèle pour prédire l'activité des incendies en fonction des conditions climatiques.

Leurs résultats sont résumés dans la figure 6.8.2 cidessous (tirée de la figure 2 de leur article). Au cours du XX^{ème} siècle, on a observé une diminution des feux de forêt. En d'autres termes, quelle que soit l'intensité des incendies observés au cours du XX^{ème} siècle, ils ont été moins nombreux que ce qui aurait pu être observé au cours des siècles précédents compte tenu des conditions climatiques. Parks *et al.* (2025) constatent également que malgré l'augmentation récente de la superficie brûlée par les feux de forêt en Amérique du Nord, il existe toujours un déficit important par rapport aux régimes historiques.

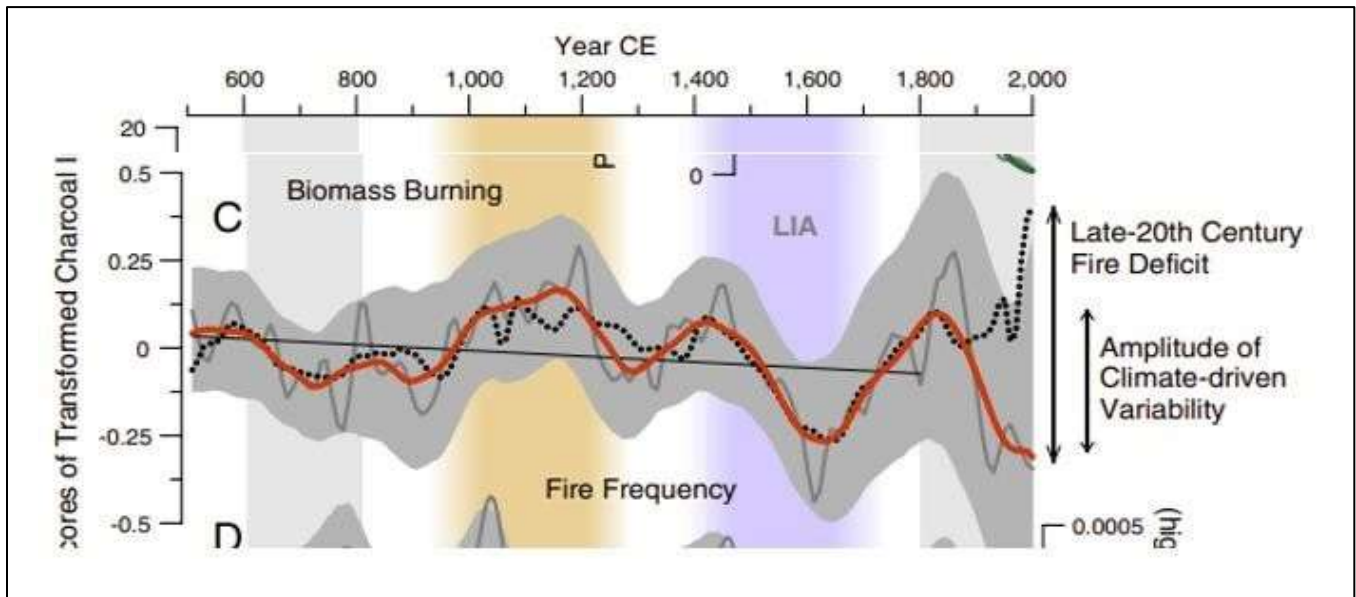


Figure 6.8.2 Fréquence des incendies et déficit en incendies aux États-Unis. La ligne rouge représente les données lissées sur les observations des charbons et la ligne pointillée noire représente les données prévues sur le charbon en fonction des conditions climatiques. Source : Marlon *et al.* (2012) Figure 2.

Les données américaines du National Interagency Fire Centre (NIFC) de 1926 à 2023 sont présentées à la figure 6.8.3. Le NIFC a supprimé les données antérieures à 1960 de son site web actuel, au motif que les méthodes de mesure ont changé après 1960, rendant la comparaison peu fiable. Néanmoins, si l'on se concentre uniquement sur la période postérieure à 1985, le nombre d'incendies n'augmente pas. La superficie brûlée a certes augmenté, mais seulement jusqu'en 2007 environ.

Les incendies de forêt ont toujours fait partie de la nature et peuvent certainement créer des conditions inhospitalières à court terme pour toute forme de vie, y compris pour les êtres humains. La science a confirmé l'intérêt général et la nécessité des incendies de forêt. Si la forte médiatisation des incendies des saisons récentes nous rappellent leur potentiel destructeur, le plus grave incendie de forêt aux États-Unis reste celui de 1910, dans l'ouest du pays, qui a détruit plus de trois millions d'acres [12141 km²] et rayé de la carte des villes entières comme Taft, dans le Montana (Apple, 2020). L'incendie de 1910 a remodelé le Service forestier américain (National Forest Foundation 2022), qui s'est alors concentré sur la lutte contre les incendies avec pour objectif principal d'éteindre tous les incendies de forêt (Forest History Society, 2022). Cela a conduit à la « règle des 10 heures » en 1935, qui exigeait que tous les incendies repérés au cours d'une journée soient maîtrisés avant 10 heures le lendemain (National Forest Foundation, 2022).

Si éteindre tous les incendies semblait être un objectif noble, des questions ont commencé à se poser quant à savoir si cette approche était « scientifiquement fondée » (U.S. Forest Service, 2022). Au fil du temps, le Service forestier américain a commencé à repenser ses objectifs, reconnaissant que de nouvelles approches telles que les brûlages dirigés, l'élimination des combustibles et les feux de forêt contrôlés étaient plus appropriées (Sommer, 2016). Des recherches récentes valident cette approche et reconnaissent que des

incendies plus fréquents et de moindre ampleur sont susceptibles d'améliorer la santé des forêts, des écosystèmes aquatiques et de la biodiversité (Stephens *et al.*, 2021).

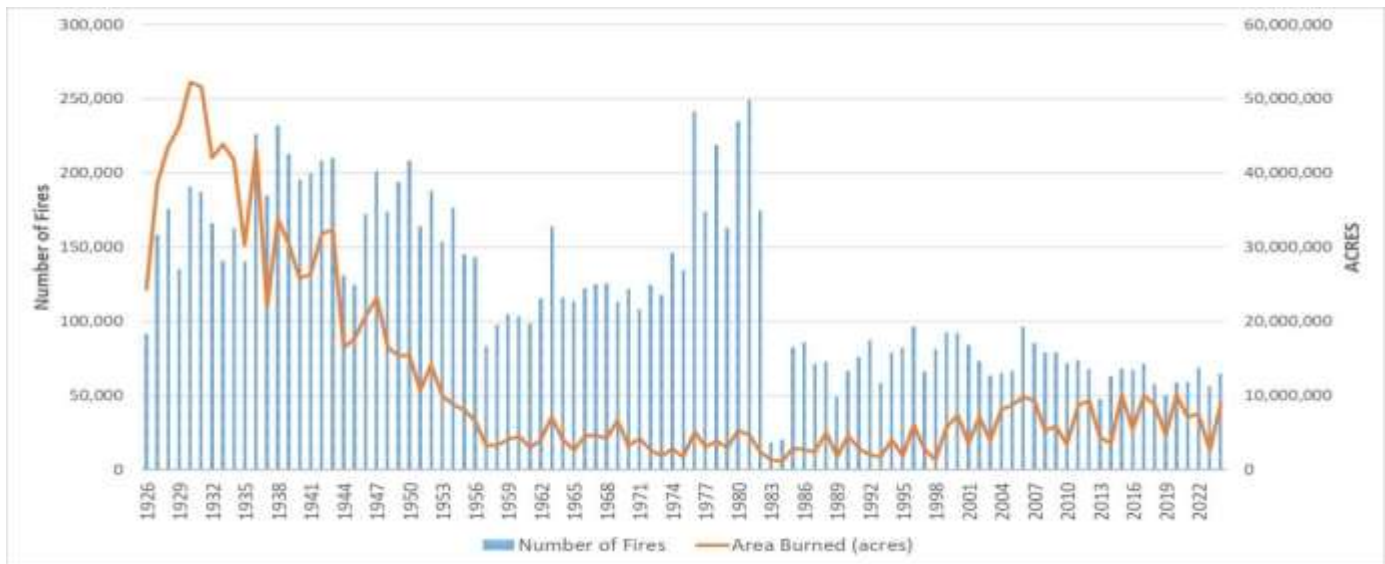


Figure 6.8.3 : Feux de forêt aux États-Unis de 1926 à 2023. Source : Après 1981 : données du National InterAgency Fire Center <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>. Avant 1981 : webarchive.org (n.d.).

Références

- Apple, C. (2020, January 21). 1910 fire – The big burn across Montana and Idaho. The Spokesman Review. <https://www.spokesman.com/stories/2020/jan/19/1910-fire-big-burn-across-montana-and-idaho/>
- Bell, Gerald D. and Muthuvel Chelliah, “Leading Tropical Modes Associated with Interannual and Multidecadal Fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity,” *Journal of Climate* 19, no. 4 (February 15, 2006): 590–612, <https://doi.org/10.1175/JCLI3659.1>.
- Brewer, W. H. (1930). *Up and down California in 1860–1864: The journal of William H. Brewer*. University of California Press.
- Christy, J. R., Norris, W. B., and McNider, R. T. (2009). Surface temperature variations in East Africa and possible causes. *Journal of Climate*, 22(12), 3342–3356. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2726.1>
- Cohn, T. A. and Lins, H. F. (2005). Nature’s style: Naturally trendy. *Geophysical Research Letters*, 32(23). <https://doi.org/10.1029/2005GL024476>
- Colorado State University. (2025). Realtime tropical cyclone guidance. <https://tropical.atmos.colostate.edu/Realtime/index.php>
- Cunningham, C.X., G.J. Williamson, and D. Bowman (2024) Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature Ecology and Evolution* 8, 1420–1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>
- Forest History Society (2022). The 1910 fires. <https://foresthstory.org/research-explore/us-forest-service-history/policy-and-law/fire-u-s-forest-service/famous-fires/the-1910-fires/> Gershunov, A., and K. Guirguis (2012). California heat waves in the present and future. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL052979>
- Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers J.J. and Rutz (2017). Assessing the climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7900–7908. <https://doi.org/10.1002/2017GL074175>

- Goldenberg, Stanley et al., “The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications,” *Science* 293, no. 5529 (July 20, 2001): 474–479, <https://doi.org/10.1126/science.1060040>. 71
- Howarth, M. E., C.D. Thorncroft, and L.F. Bosart (2019). Changes in extreme precipitation in the Northeast United States: 1979–2014. *Journal of Hydrometeorology*, 20(4), 673–689. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1>
- Hurst, H. E. (1951). Long term storage capacities of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 776–808.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jong, B.-T., H. Murakami, T.L. Delworth and W.F. Cooke (2024). Contributions of tropical cyclones and atmospheric rivers to extreme precipitation trends over the Northeast US. *Earth’s Future*, 12, e2023EF004370. <https://doi.org/10.1029/2023EF004370>
- Karl, T.R., H.F. Diaz, and G. Kukla. (1988): Urbanization: Its detection and effect on the United States climate record. *Journal of Climate*, 1, 1099–1123 https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/1/11/15200442_1988_001_1099_uidaei_2_0_co_2.xml
- Karl, T. R., C.N. Williams Jr., F.T. Quinlan, and T.A. Boden (1990). United States Historical Climatology Network (HCN) serial temperature and precipitation data (Publication No. 3404). Oak Ridge National Laboratory.
- Klotzbach, Phil et al. (2018) Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks, *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, no. 7 (July 2018): 1359–1376, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1>.
- Kogan, Feliz, Wei Guob and Wenze Yang (2020) “Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security” *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol 11(1)
- Koutsoyiannis, D. (2013) *Hydrology and Change*. *Hydrological Sciences Journal* 58(6) <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>
- Lizundia-Loiola, J., et al. (2020) A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of the Environment* 236, 111493, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>
- Markonis, Y., and D. Koutsoyiannis (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. *Nature Climate Change*, 6, 399–401. <https://doi.org/10.1038/nclimate2894>
- Marlon, Jennifer, Patrick J Bartlein, Daniel G. Gavin et al. (2012) Long-term perspective on wildfires in the western USA *Proceedings of the National Academy of Sciences* February 14 2012 <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>
- Maue, R. N. (2025). *Climatlas: Tropical cyclones*. <https://climatlas.com/tropical/> Maue, R. N. (2011) Recent historically low tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters* 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711
- McKittrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. *Journal of Hydrology*, 578, 124074. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074>
- McKittrick, R. and J.R. Christy (2025), “Data and Code for CWG2025 Report”, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/by76s7rxfb.1
- McNider, R.T., G.J. Steeneveld, A.A.M. Holtslag, R.A. Pielke Sr., S. Mackaro, A. Pour-Biazar, J. Walters, U. Nair, and J.R. Christy, 2012: Response and sensitivity of the nocturnal boundary layer over land to added longwave radiative forcing. *Journal of Geophysical Research*, 117, D14106, doi:10.1029/2012JD017578.
- Null, J. and J. Hulbert, “California Washed Away: The Great Flood of 1862,” *Weatherwise* 60, no. 1 (2007): 26–30, <https://doi.org/10.3200/wewi.60.1.26-30>

- National Forest Foundation. (2022). Blazing battles: The 1910 fire and its legacy. <https://www.nationalforests.org/our-forests/your-national-forests-magazine/blazing-battles-the-1910-fire-and-its-legacy> 72
- National Interagency Fire Center. (2024). Wildfire statistics. <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>
- NCA4. (2017). Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>
- NCA5. (2023). Fifth National Climate Assessment (A. R. Crimmins et al., Eds.). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1> (accessed May 22, 2025)
- NOAA Hurricane Research Division. (2025a). All U.S. hurricanes (1851–2019). https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html
- NOAA Hurricane Research Division. (2025b). Most intense (3, 4, 5) continental United States hurricanes: 1851–1970, and 1983–2023. https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html
- Overland, J. E. (2021). Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. *Atmosphere*, 12(11), 1434. <https://doi.org/10.3390/atmos12111434>
- Pan, M., M. Lu and U. Lall (2024). Diversity of cross-Pacific atmospheric river main routes. *Communications Earth and Environment*, 5, 378. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01552-y>
- Parks, Sean, Christopher Guiterman, Ellis Margolis et al. (2025) A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. *Nature Communications* 16 <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56333-8>
- Pielke, R. A., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Porter, K., et al. (2011). Overview of the ARkStorm scenario. U.S. Geological Survey.
- Quinlan, F. T., T. R. Karl, and C.N. Williams Jr. (1987). United States Historical Climatology Network (USHCN) serial temperature and precipitation data (NDP-019). Oak Ridge National Laboratory.
- Runnalls, K.E. and T.R. Oke, 2006: Technique to detect microclimate inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *Journal of Climate*, 19, 959–978. <https://doi.org/10.1175/JCLI3663.1>
- Samborska, V., and H. Ritchie (2024). Wildfires. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/wildfires>
- Seneviratne, S. et al. (2021) “Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.” In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Sommer, L. (2016, November 7). Let it burn: The Forest Service wants to stop putting out some fires. *KQED*. <https://www.kqed.org/science/1134217/let-it-burn-the-forest-service-wants-to-stop-putting-out-some-fires>
- Stephens, Scott et al., (2021) “Fire, Water, and Biodiversity in the Sierra Nevada: A Possible Triple Win,” *Environmental Research Communications* 3, no. 8 (August 6, 2021): p. 081004, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac17e2>.
- Tyukavina Alexandra , Peter Potapov, Matthew Hansen et al. (2022) Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019, *Frontiers in Remote Sensing*. Volume 3 <https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.825190/full>
- U.S. Forest Service. (2022). Managing fire. <https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire>
- USGCRP. (2023). USGCRP indicators platform: Heat waves. <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>

- Vecchi, Gabriel A. and Thomas R. Knutson (2011) “Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density,” *Journal of Climate* 24, no. 6 (2011): 1736–1746, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1.73>
- Villarini, Gabriele, Gabriel A. Vecchi, and James A. Smith, “U.S. Landfalling and North Atlantic Hurricanes: Statistical Modeling of Their Frequencies and Ratios,” *Monthly Weather Review* 140, no. 1 (January 2012): 44–65, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00063.1>.
- Web Archive. (n.d.). Archive of NIFC fire data.
https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html
- Yang, L., Y. Yang, Y. Shen, et al. (2024). Urban development pattern’s influence on extreme rainfall occurrences. *Nature Communications*, 15, 3997. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48533-5>
- Zhang, W., G. Villarini, G.A. Vecchi, and J.A. Smith, J. A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 563, 384–388.
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>

7 CHANGEMENTS DU NIVEAU DE LA MER

Résumé du chapitre

Depuis 1900, le niveau moyen de la mer a augmenté d'environ 20 cm. Le changement du niveau de la mer le long des côtes américaines est très variable, en raison des variations locales des processus qui contribuent à l'affaissement et des modèles de circulation océanique. Les plus fortes élévations du niveau de la mer le long des côtes américaines ont été observées à Galveston, à la Nouvelle-Orléans et dans la baie de Chesapeake, chacune de ces régions étant associée à un affaissement local important (subsidence) sans rapport avec le changement climatique.

Les projections extrêmes de l'élévation du niveau mondial de la mer sont associées à un scénario d'émissions extrêmes peu plausible et à la prise en compte de processus mal compris liés à des instabilités hypothétiques des calottes glaciaires. En évaluant les projections du sixième rapport d'évaluation (AR6) pour 2050 (par rapport à la période de référence 1995-2014), près de la moitié de l'intervalle s'est écoulé en 2025, avec une élévation du niveau de la mer inférieure aux prévisions. Les mesures des marégraphes américains ne révèlent aucune accélération évidente au-delà du taux moyen historique d'élévation du niveau de la mer.

7.1 L'élévation du niveau mondial de la mer

L'élévation du niveau mondial des mers est sans doute le facteur climatique le plus important clairement associé à la hausse des températures. À l'échelle mondiale, le réchauffement provoque une élévation du niveau des mers par dilatation thermique de l'eau de mer et par la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Les variations du stockage de l'eau sur les terres émergées constituent un autre facteur important. À l'échelle régionale, le changement du niveau des mers est influencé par les grands courants océaniques, les processus géologiques et les déformations résultant de la redistribution de la glace et de l'eau. À l'échelle locale, les mouvements verticaux du sol résultant de processus géologiques, du prélèvement d'eau souterraine et de l'extraction de combustibles fossiles jouent également un rôle important.

Le sixième rapport d'évaluation estime que le niveau moyen mondial de la mer a augmenté de 7,9 (5,9-9,8) pouces [soit 200 mm, 150 mm et 249 mm] entre 1901 et 2018, le rythme de l'élévation du niveau de la mer s'accroissant au cours des dernières décennies. À l'échelle des bassins océaniques, le niveau de la mer a augmenté le plus rapidement dans le Pacifique occidental et le plus lentement dans le Pacifique oriental au cours de la période 1993-2018 (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Le taux d'élévation du niveau mondial de la mer est estimé à 0,12 pouce par an [3.05 mm/an], soit environ la hauteur de l'empilement de deux pièces de un cent de \$ (NASA, 2020).

Les systèmes d'observation de l'élévation du niveau mondial de la mer ont considérablement progressé à l'ère des satellites, en particulier avec l'avènement des altimètres satellitaires en 1993. Les marégraphes locaux ont fourni des données utiles au cours du siècle dernier, et même depuis plus longtemps encore dans quelques endroits. Après la fin du petit âge glaciaire au milieu du XIX^e siècle, les marégraphes montrent que le niveau moyen mondial de la mer a commencé à monter entre 1820 et 1860, bien avant la plupart des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

7.2 La montée du niveau de la mer aux États-Unis

Les taux observés et prévus de l'élévation moyenne du niveau mondial de la mer pourraient avoir peu de pertinence scientifique pour des endroits précis, en raison de processus locaux (NOAA, 2025). La figure 7.1 montre qu'au Canada et en Alaska (ainsi que dans le nord de l'État de Washington), le niveau de la mer baisse en raison du rebond glaciaire. La plupart des marégraphes de la côte Pacifique indiquent de faibles taux d'élévation du niveau de la mer, tandis que les taux les plus élevés aux États-Unis sont enregistrés sur la côte du golfe du Mexique (Louisiane et Texas) et dans les États du centre de la côte Atlantique (région de la baie de Chesapeake).

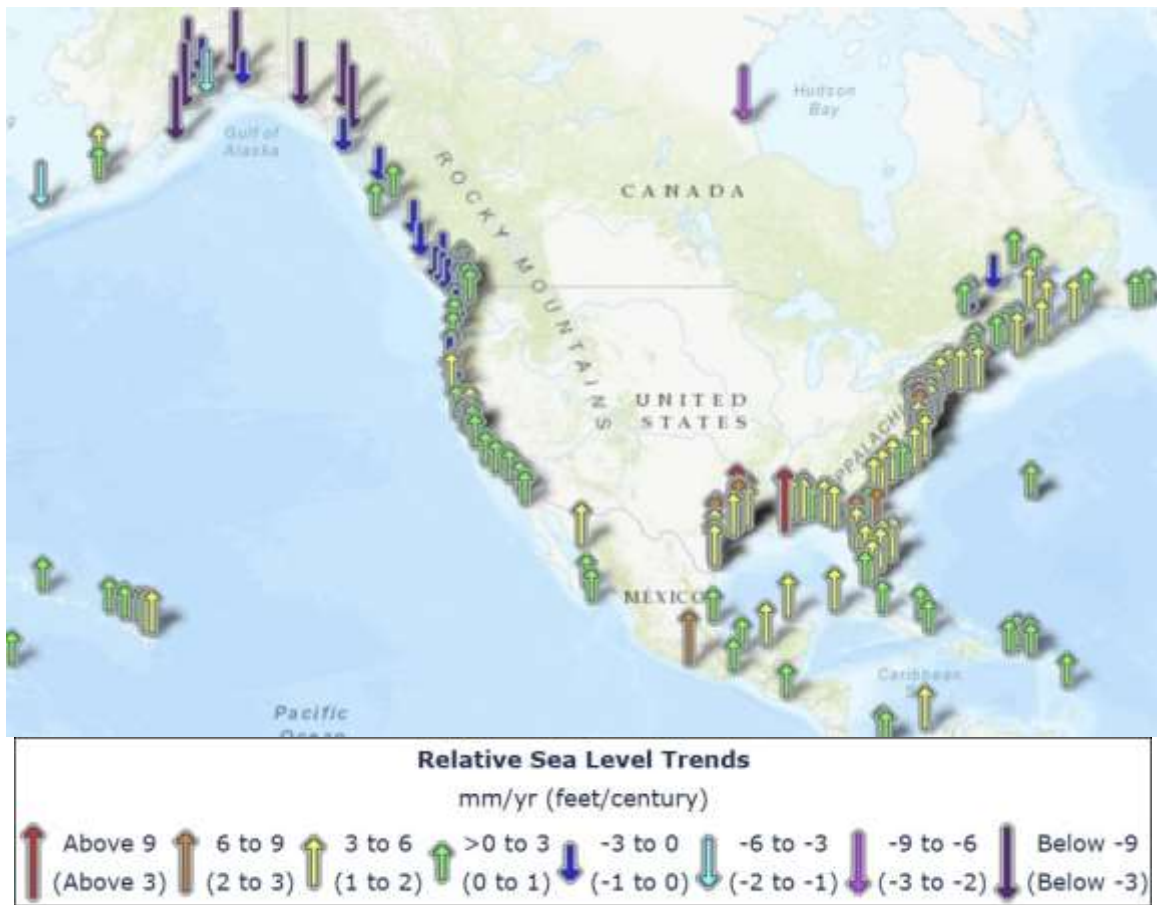


Figure 7.1. Carte des taux d'élévation relative du niveau de la mer le long de la côte américaine (NOAA, <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>). À titre de référence, 3 mm = 0,12 pouce.

Des mesures de l'élévation relative du niveau de la mer faites avec des marégraphes combinent l'augmentation climatologique du volume d'eau de mer et les mouvements verticaux locaux du sol. Ces derniers, qui varient d'un endroit à l'autre, sont mieux mesurés à l'aide d'une station GPS (système de positionnement global) située à proximité du marégraphe. Il est induit par divers processus qui peuvent être comparables au signal climatique et peuvent localement exacerber (subsidence/affaissement) ou atténuer (élévation) le risque d'élévation du niveau de la mer (Wöppelmann et Marcos, 2016). Les activités humaines à l'origine de la subsidence sont souvent importantes. Elles comprennent le drainage des sols (*par exemple* pour le développement urbain) et l'extraction souterraine d'eau souterraine ou d'hydrocarbures.

Le tableau 7.1 présente l'élévation absolue du niveau de la mer (ASLR) pour certains endroits, déterminée à partir de la somme de l'élévation relative non corrigée du niveau de la mer (RSLR) estimée à partir des séries chronologiques des marégraphes (NOAA, 2025) et des mesures du mouvement vertical du sol (VLM) (NAS, 2012 ; Letetrel *et al.*, 2015 ; Karegar *et al.*, 2016). L'élévation absolue du niveau de la mer pour chacun de ces

emplacements est nettement inférieure à l'élévation relative mesurée en raison de l'affaissement local. Plus de la moitié de l'élévation relative mesurée est attribuée à l'affaissement des terres pour les emplacements suivants : San Francisco, Galveston, Grand Isle. À titre de référence, le taux moyen mondial d'élévation absolue du niveau de la mer est estimé à 0,12 pouce par an.

Emplacement	RSLR	VLM	ASLR
San Francisco, Californie	+0,08	-0,06	+0,02
Galveston, Texas	+0,26	-0,19	+0,07
Grand Isle, Louisiane	+0,36	-0,28	+0,08
Saint-Petersbourg, Floride	+0,12	-0,02	+0,10
New York, NY	+0,11	-0,05	+0,06

Tableau 7.1 Élévation absolue du niveau de la mer (en pouces/an [25.4 mm/an]) composée de l'élévation relative du niveau de la mer (RSLR) et du mouvement vertical du sol (VLM)

Baie de San Francisco

Au cours des 100 dernières années, le niveau relatif de la mer dans la région de la baie de San Francisco a augmenté de 7,8 pouces, à un rythme moyen de 0,08 pouce par an (figure 7.2). Comme le montre le tableau 7.1, le mouvement vertical du sol à San Francisco est de -0,06 pouce par an (affaissement), ce qui donne un taux absolu récent de +0,02 pouce par an [0,5 mm/an]. Certaines parties de Treasure Island, de l'aéroport international de San Francisco et de Foster City s'affaissent à un rythme pouvant atteindre 1 cm par an (Shirzaei et Bürgmann, 2018). Les problèmes dans la région de la baie de San Francisco, notamment les menaces qui pèsent sur l'aéroport, sont principalement dus à la compaction des sols dans les zones de remblayage qui étaient autrefois des zones humides, et non à la lente élévation du niveau mondial de la mer.

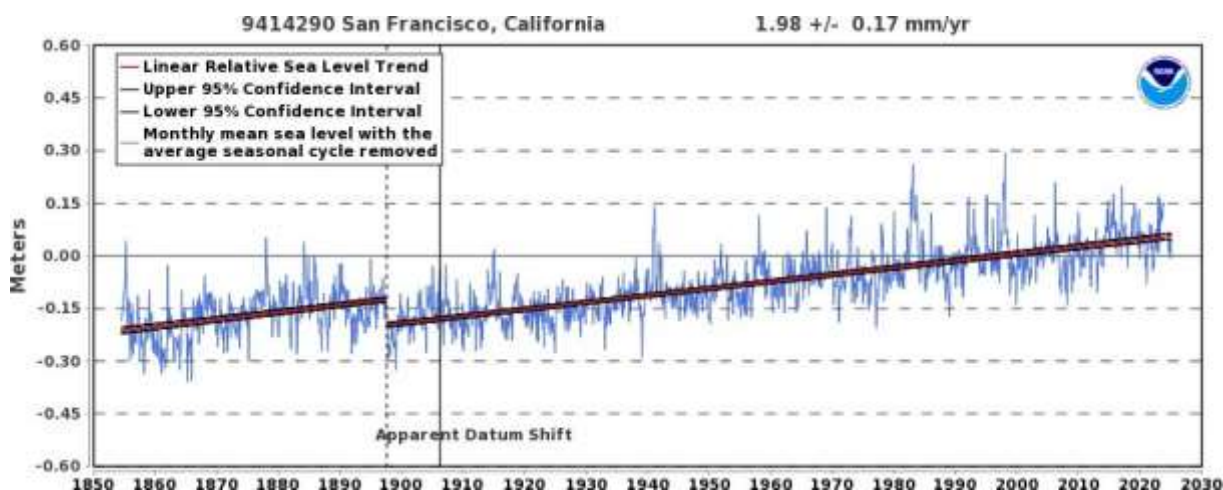


Figure 7.2. Mesures du marégraphe à San Francisco, Californie, obtenues auprès de la NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (téléchargées le 22/04/25).

Galveston - Houston

Les mesures à long terme des marées effectuées à Galveston Pier 21 montrent une élévation du niveau de la mer de 2,18 pieds au cours du siècle dernier, soit un taux de 0,26 pouce par an [6.6 mm/an] (figure 7.3). Le

mouvement vertical du sol (subsidence) à Galveston est estimé à -0,19 pouce par an , ce qui donne un taux d'élévation absolu de +0,07 pouce par an [1.78 mm/an] (tableau 7.1). L'U.S. Geologic Survey a constaté que la majeure partie de la subsidence de la surface terrestre dans la région de Houston-Galveston est une conséquence directe du prélèvement d'eau souterraine (Kasmarek et Ramage 2017), qui a provoqué un compactage des sédiments aquifères, principalement dans les couches de limon et d'argile à grains fins. En 1979, Houston avait subi une subsidence pouvant atteindre 10 pieds [3.048 m].

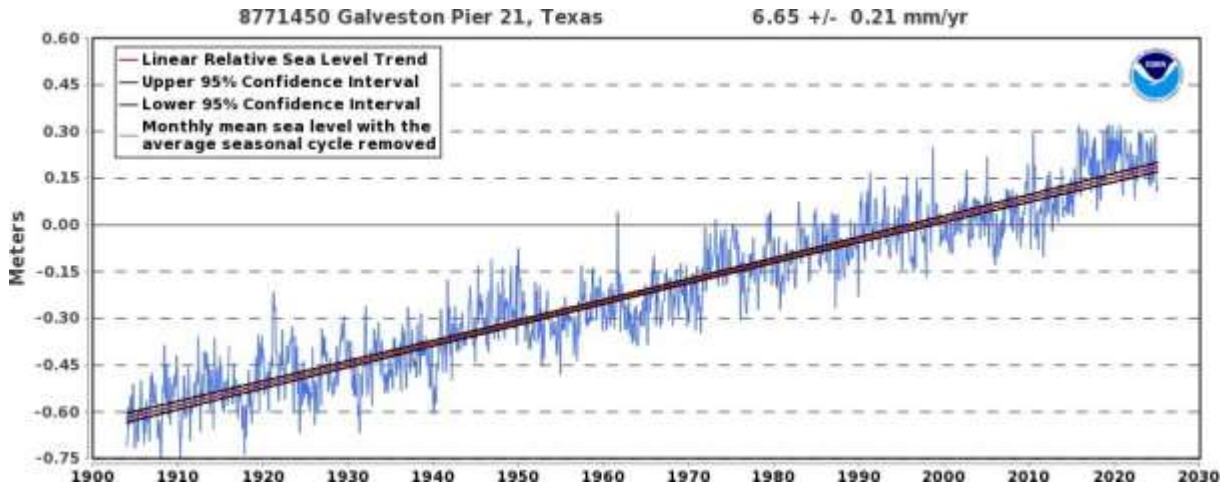


Figure 7.3. Mesures du marégraphe de Galveston Pier, Texas, obtenues auprès de la NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (téléchargées le 22/04/2025).

La Nouvelle-Orléans et le delta du Mississippi

Les mesures à long terme du marégraphe de Grand Isle, en Louisiane, montrent que le niveau de la mer a augmenté d'un peu plus de 3 pieds au cours des 100 dernières années, à un rythme moyen de 0,36 pouce par an (figure 7.4). Le mouvement vertical du sol (subsidence) est estimé à -0,28 pouce par an. Le tableau 7.1 indique une élévation absolue du niveau de la mer de +0,08 pouce par an.

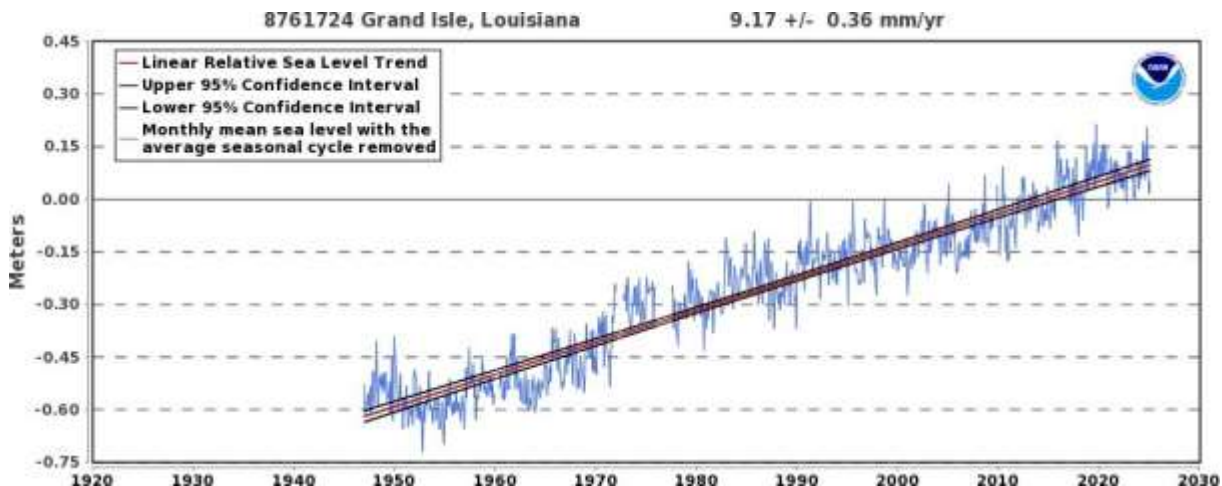


Figure 7.4. Mesures effectuées par des marégraphes à Grand Isle, en Louisiane, obtenues auprès de la NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (téléchargées le 22/04/25).

Les problèmes liés à l'élévation du niveau de la mer et à la perte de terres dans la région du delta du Mississippi sont complexes, les principaux facteurs étant l'affaissement géologique et la diminution des sédiments transportés par le fleuve Mississippi. La construction de barrages dans le bassin depuis les années 1950 a réduit la charge sédimentaire en suspension du Mississippi d'environ 50 % (Maloney 2018). Une nouvelle carte de l'affaissement de la côte de la Louisiane montre que la région côtière s'enfonce d'environ un tiers de pouce par an (Neinhuis *et al.* 2017), en raison du retrait des eaux souterraines et de l'exploitation des ressources. L'altitude moyenne de la ville étant comprise entre un et deux pieds *sous* le niveau de la mer, l'élévation du niveau de la mer due au réchauffement anthropique n'est pas le principal facteur à l'origine des problèmes de la Nouvelle-Orléans.

New York

La ville de New York est particulièrement vulnérable aux effets de l'élévation du niveau de la mer, car elle est principalement construite sur des îles et possède 830 km de côtes. Les mesures effectuées par un marégraphe situé à la pointe sud de Manhattan (The Battery) montrent que le niveau relatif de la mer a augmenté de plus de 28 cm au cours du siècle dernier, à un rythme moyen de 0,11 pouce par an [2.8 mm/an] (figure 7.5). Cependant, le mouvement vertical du sol dans la région de New York est de -0,05 pouce par an (environ 5 pouces par siècle), de sorte que le taux absolu d'élévation du niveau de la mer à The Battery est de 0,06 pouce par an, soit environ 55 % de l'élévation relative mesurée.

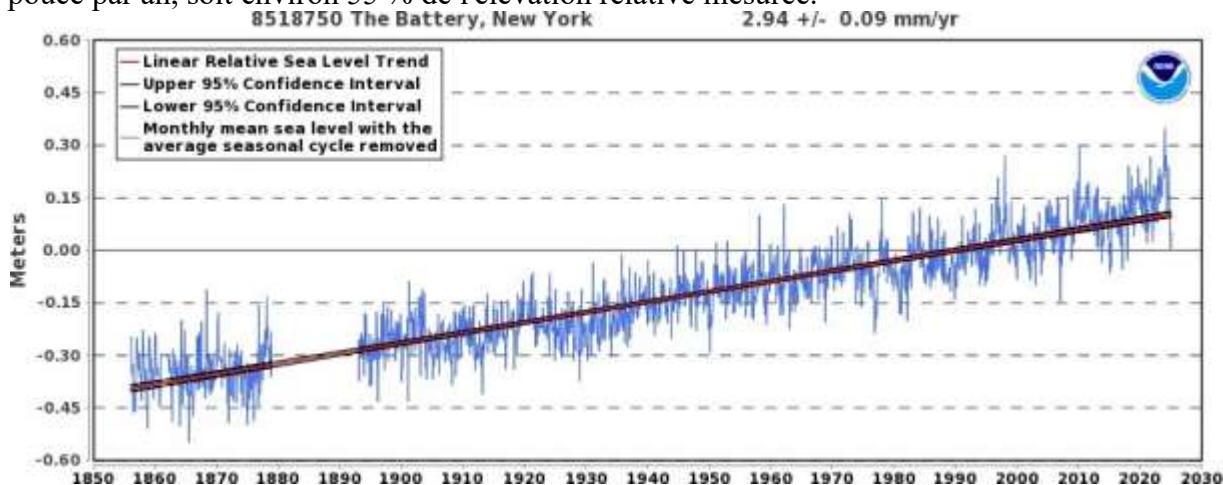


Figure 7.5. Mesures du marégraphe à The Battery, New York, obtenues auprès de la NOAA - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (téléchargées le 22/04/25).

7.3 Élévation prévue du niveau de la mer

La préoccupation concernant l'élévation du niveau de la mer ne porte pas sur les quelque 20 cm d'élévation mondiale enregistrés depuis 1900. Elle porte plutôt sur les projections d'une élévation *accélérée* basées sur des simulations du réchauffement climatique au cours du XXI^{ème} siècle.

Le rapport AR6 constate *une forte concordance* entre les projections mondiales publiées concernant le niveau moyen de la mer pour 2050, avec une faible sensibilité aux scénarios d'émissions. Si l'on ne tient compte que des projections intégrant les processus liés aux calottes glaciaires dont la quantification est au moins *moyennement fiable*, les projections mondiales du niveau de la mer pour 2050, tous scénarios

d'émissions confondus, se situent entre 3,94 et 15,75 pouces [entre 100 et 400 mm] (intervalle *très probable* de 5 à 95 %) par rapport à la période de référence 1995-2014 (Fox-Kemper *et al.*, 2021).

À l'inverse, l'AR6 indique qu'il existe *un faible consensus* entre les projections mondiales publiées concernant le niveau moyen de la mer pour 2100, en particulier pour les scénarios prévoyant des émissions élevées. Si l'on ne tient compte que des projections représentant les processus liés aux calottes glaciaires dont la quantification est au moins *moyennement fiable*, les projections du niveau moyen mondial de la mer pour 2100 dans le rapport AR6 se situent entre 7,9 et 39,4 pouces [201 mm à 1001 mm] (intervalle *très probable* entre le 5e et le 95e centile) dans le scénario d'émissions moyennes SSP2-4,5 (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Les projections de l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100 sont entourées d'une grande incertitude en raison des incertitudes liées à l'instabilité des calottes glaciaires, en particulier dans les scénarios prévoyant des émissions élevées.

En février 2022, la NOAA a publié ses projections concernant l'élévation du niveau de la mer pour différents sites le long de la côte américaine (Sweet *et al.*, 2022). Elle affirme que d'ici 2050, le niveau de la mer aura augmenté d'un pied à The Battery, à Manhattan (par rapport à 2020). Une élévation d'un pied en trente ans représenterait plus du double du taux actuel et environ trois fois le taux moyen du siècle dernier. Dans ce contexte historique, les prévisions de la NOAA sont remarquables : comme le montre la figure 7.6, elles supposent une accélération spectaculaire, sans précédent depuis le début du XX^{ème} siècle. Mais ce qui est encore plus remarquable, c'est que Sweet *et al.* (2022) affirment que cette élévation est « inévitable », qu'elle se produira quelles que soient les émissions futures. Nous devrions savoir d'ici une dizaine d'années si cette prévision est fondée.

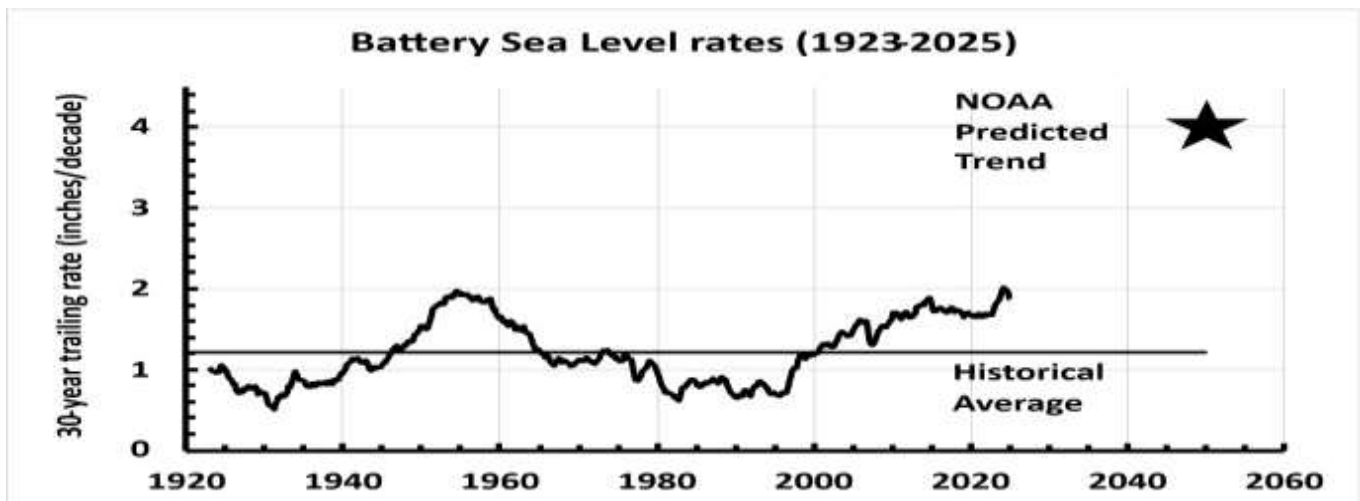


Figure 7.6 Taux d'élévation du niveau de la mer à Battery, Manhattan [en unité de 24.5 mm/décennie]. Le graphique montre la tendance historique sur trente ans, ainsi que la tendance prévue par la NOAA pour 2050, qui serait « inéluctable ». Données historiques : NOAA Tides and Current.

Références

- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Adalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., ... & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Karegar, M. A., Dixon, T. H., & Engelhart, S. E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3126–3133. <https://doi.org/10.1002/2016GL068015>
- Kasmarek, M. C., & Ramage, J. K. (2017). Water-level altitudes 2017 and water-level changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper aquifers and compaction 1973–2016 in the Chicot and Evangeline aquifers,

- Houston-Galveston Region, Texas (Scientific Investigations Report 2017–5080). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20175080>
- Letetrel, C., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2015). Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades. *Continental Shelf Research*, 111(Part A), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018>
- Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelcz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. *Marine Geology*, 400, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001>
- National Academy of Science (NAS, 2012). Sea-level rise for the coasts of California, Oregon and Washington: Past, present, and future. Appendix A: Vertical land motion and sea-level data along the West Coast of the United States. National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/13389/sea-level-rise-for-the-coasts-of-california-oregon-and-washington>
- NASA. (2020). NASA sea level rise portal: 2020 edition. <https://www.nasa.gov/specials/sea-level-rise-2020/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Center for Operational Oceanographic Products and Services. (n.d.). Sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>
- NOAA Tides & Currents. (n.d.). Relative sea level trends. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/> Nienhuis, J. H., Törnqvist, T. E., Esposito, C. R., Liang, M., & Ma, H. (2017). A new subsidence map for coastal Louisiana. *GSA Today*, 27(6), 28–29. <https://doi.org/10.1130/GSATG337GW.1>
- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science Advances*, 4(3), eaap9234. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9234>
- Sweet, W. V., Hamlington, B. D., Kopp, R. E., et al. (2022). Global and regional sea level rise scenarios for the United States (USGS Report 70229139). United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/publications/global-and-regional-sea-level-rise-scenarios-united-states>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54, 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

8 LES INCERTITUDES DANS L'ATTRIBUTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Résumé du chapitre

Le terme « attribution » désigne l'identification de la cause d'un aspect du changement climatique, en particulier en référence à l'activité anthropique. Les méthodes d'attribution font actuellement l'objet d'un débat scientifique, notamment en ce qui concerne les phénomènes météorologiques extrêmes. L'attribution est rendue difficile par la forte variabilité naturelle, le signal anthropique attendu relativement faible, le manque de données de haute qualité et le recours à des modèles climatiques imparfaits. Le GIEC met en garde depuis longtemps contre le caractère intrinsèquement incertain des méthodes permettant d'établir un lien de causalité en science du climat, qui repose en fin de compte sur l'avis d'experts.

Les critiques substantielles des principales évaluations du GIEC sur le rôle du CO₂ dans le réchauffement récent portent sur l'évaluation inadéquate de la variabilité naturelle du climat, les incertitudes dans la mesure de la variabilité solaire et du forçage des aérosols, et les problèmes liés aux méthodes statistiques utilisées pour l'attribution.

Le GIEC ne se prononce pas sur l'attribution de la plupart des facteurs climatiques liés aux événements extrêmes. Les déclarations relatives aux statistiques des phénomènes extrêmes à l'échelle mondiale (*par exemple*, la probabilité ou la période de retour des événements, leur ampleur et leur fréquence) ne sont généralement pas considérées comme exactes en raison des limites des données disponibles et sont formulées avec un faible degré de confiance. L'attribution des événements météorologiques extrêmes individuels est difficile en raison de leur rareté. Les affirmations contradictoires sur les causes de la vague de chaleur qui a frappé l'ouest de l'Amérique du Nord en 2021 illustrent les dangers d'une attribution hâtive des événements extrêmes pris un par un.

8.1 Introduction

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) fait la distinction entre la détection du changement climatique et l'attribution de ses causes. Selon la définition du glossaire du GIEC AR6 WGI (GIEC, 2025) :

Détection : La détection d'un changement est définie comme le processus qui consiste à démontrer que le climat ou un système influencé par le climat a changé dans un sens statistique défini, sans fournir de raison à ce changement. Un changement identifié est détecté dans les observations si la probabilité qu'il se produise par hasard en raison de la seule variabilité interne est jugée faible, par exemple inférieure à 10 %.

Attribution : L'attribution est définie comme le processus qui consiste à évaluer les contributions relatives de plusieurs facteurs causaux à un changement ou à un événement à l'aide d'une évaluation formelle du degré de confiance.

La détection et l'attribution reposent toutes deux sur une analyse statistique. La détection vise à déterminer si les changements sont suffisamment importants pour se distinguer des variations aléatoires, quelle qu'en soit

la cause. L'attribution consiste à comparer les événements observés à des contre-faits générés par des modèles. Comme il n'est pas possible de mener des expériences sur le climat, l'attribution nécessite une inférence statistique pour évaluer dans quelle mesure les activités humaines (telles que les émissions de GES) contribuent aux changements observés par rapport aux facteurs naturels (tels que les éruptions volcaniques). Les méthodes d'attribution supposent que tous les facteurs externes et internes du système sont connus et représentés.

Les méthodes d'attribution font actuellement l'objet de débats scientifiques, en particulier celles qui permettent d'attribuer les phénomènes météorologiques extrêmes au changement climatique. Le GIEC met depuis longtemps en garde contre le caractère intrinsèquement incertain des méthodes permettant d'établir un lien de causalité en climatologie, qui repose en fin de compte sur l'avis d'experts. Le groupe de travail I du quatrième rapport d'évaluation du GIEC (Hegerl *et al.*, 2007) l'explique ainsi :

« L'attribution » des causes du changement climatique est le processus qui consiste à établir les causes les plus probables du changement détecté avec un certain niveau de confiance ... Une attribution sans équivoque nécessiterait des expériences contrôlées sur le système climatique. Comme cela n'est pas possible, dans la pratique, l'attribution du changement climatique anthropique signifie démontrer qu'un changement détecté est « *compatible avec les réponses estimées à la combinaison donnée de forçages anthropiques et naturels* » et « *incompatible avec d'autres explications physiquement plausibles du changement climatique récent qui excluent des éléments importants de la combinaison donnée de forçages* » (GIEC, 2001) ... Les approches utilisées dans les recherches sur la détection et l'attribution décrites ci-dessus ne peuvent pas tenir compte de toutes les incertitudes. Il est donc nécessaire, en dernier ressort, de recourir à l'avis d'experts pour évaluer de manière calibrée si une cause spécifique est responsable d'un changement climatique donné.

Le groupe de travail II du cinquième rapport d'évaluation du GIEC (Cramer *et al.*, 2014) fait la déclaration suivante :

Deux grands défis liés à la détection et à l'attribution des impacts des changements climatiques concernent les observations et la compréhension des processus. Du point de vue des observations, il est rare de disposer de données de haute qualité et à long terme sur les systèmes naturels et humains et sur les multiples facteurs qui les influencent. En outre, la détection et l'attribution des impacts des changements climatiques nécessitent une compréhension des processus par lesquels les changements climatiques, en conjonction avec d'autres facteurs, peuvent affecter le système en question.

En raison de la complexité des chaînes causales dans le système climatique, l'étude de ces relations est extrêmement difficile.

8.2 Méthodes d'attribution

Le GIEC utilise plusieurs méthodes d'attribution pour évaluer les causes des changements climatiques observés, en distinguant les facteurs naturels et anthropiques. Vous trouverez ci-dessous une description concise des principales méthodes d'attribution utilisées par le GIEC.

L'empreinte optimale [Optimal Fingerprinting] utilise la régression linéaire pour expliquer les variations des données climatiques observées comme une somme pondérée des simulations de modèles climatiques avec

et sans forçages anthropiques. Les données utilisées dans le modèle de régression sont pondérées afin de minimiser l'influence du bruit aléatoire et la méthode d'estimation est choisie pour tenir compte des erreurs des modèles climatiques.

L'analyse des séries chronologiques exploite les différences statistiques entre les forçages anthropiques et la variabilité naturelle afin de déterminer lequel domine les températures observées. Elle utilise également les variations dans le moment où les changements se produisent pour déterminer si une dépendance causale entre les séries de données peut être déduite.

L'attribution basée sur les processus vise à comprendre les mécanismes physiques à l'origine des changements observés. Cette approche combine des observations, des modèles climatiques et des connaissances théoriques pour attribuer les changements dans des processus spécifiques à des forçages. Elle est souvent utilisée pour les phénomènes climatiques régionaux, tels que les changements de la mousson ou l'amplification polaire.

L'attribution des événements extrêmes évalue le rôle de l'influence humaine dans la probabilité d'occurrence ou l'intensité des événements météorologiques extrêmes (*par exemple*, les vagues de chaleur ou les sécheresses). Les méthodes comprennent :

- L'attribution probabiliste des événements utilise de grands ensembles de simulations de modèles climatiques pour comparer les événements observés à des contre-faits générés par des modèles.
- L'approche par scénario examine les processus physiques à l'origine d'un événement et évalue comment les forçages anthropiques pourraient avoir modifié ces processus.

8.3 L'attribution du réchauffement climatique

Les déclarations d'attribution du réchauffement climatique dans les trois derniers rapports d'évaluation du GIEC sont les suivantes :

AR4 : La majeure partie de l'augmentation observée des températures moyennes mondiales depuis le milieu du XX^{ème} siècle est *très probablement* due à l'augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre anthropiques. (GIEC 2007)

AR5 : Il est extrêmement probable que plus de la moitié de l'augmentation observée de la température moyenne à la surface du globe entre 1951 et 2010 soit due à l'augmentation anthropique des concentrations de gaz à effet de serre et à d'autres forçages anthropiques combinés. La meilleure estimation de la contribution humaine au réchauffement est similaire au réchauffement observé au cours de cette période. (GIEC 2013)

AR6 : L'augmentation probable de la température mondiale à la surface de l'atmosphère due à l'activité humaine entre 1850-1900 et 2010-2019 est comprise entre 0,8 °C et 1,3 °C, avec une estimation optimale de 1,07 °C. Il est *probable* que les gaz à effet de serre bien mélangés aient contribué à un réchauffement de 1,0 °C à 2,0 °C, d'autres facteurs anthropiques (principalement les aérosols) ont contribué à un refroidissement de 0,0 °C à 0,8 °C, les facteurs naturels ont modifié la température mondiale à la surface de l'atmosphère de -0,1 °C à +0,1 °C, et la variabilité interne l'a modifiée de -0,2°C à +0,2 °C. Il est *très probable* que **les GES bien mélangés aient été le principal facteur** du réchauffement de la troposphère depuis 1979. (GIEC 2021)

Les déclarations d'attribution des rapports AR4 et AR5 font référence au réchauffement observé depuis le milieu du XXe siècle, période au cours de laquelle les émissions de gaz à effet de serre ont commencé à augmenter rapidement. Les termes « la plupart » et « plus de la moitié » sont délibérément imprécis, pouvant aller de 51% à 99 % du réchauffement. Cette imprécision vise vraisemblablement à tenir compte des incertitudes structurelles telles que la variabilité interne naturelle. Le niveau de confiance passe de « *très probable* » à « *extrêmement probable* » entre le rapport AR4 et le rapport AR5. La structure de la déclaration d'attribution dans le rapport AR6 est fondamentalement différente, faisant référence au réchauffement entre 1850 et 1900. La déclaration d'attribution de l'AR6 est plus précise sur le plan numérique, mais avec un niveau de confiance plus faible, « *probable* » – l'AR6 attribue essentiellement tout le réchauffement à l'augmentation des gaz à effet de serre. La déclaration la plus fiable de l'AR6 concerne le réchauffement de la troposphère depuis 1979, utilisant les termes « *principal facteur* » et « *très probable* ».

Trois critiques substantielles peuvent être formulées à l'égard de l'évaluation par le GIEC des causes du réchauffement récent : une évaluation insuffisante de la variabilité naturelle du climat, des méthodes statistiques inappropriées et des divergences importantes entre les modèles et les observations. Cette dernière critique est examinée au chapitre 5, tandis que le présent chapitre traite des deux premières. Toutes ces critiques sont pertinentes pour l'attribution du réchauffement récent par le GIEC, qui sous-tend également l'attribution des événements extrêmes.

8.3.1 Variabilité climatique naturelle

Le rapport AR6 indique que les facteurs externes naturels depuis 1850-1900 ont modifié la température mondiale à la surface de la Terre de $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, et que la variabilité interne l'a modifiée de $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui, en moyenne, n'a eu pratiquement aucun impact net sur le réchauffement depuis 1850-1900. Comme nous le verrons ci-dessous, cette contribution minimale de la variabilité naturelle a été contestée par plusieurs publications qui remettent en question l'ampleur de la variabilité solaire et de la variabilité interne due aux circulations océaniques à grande échelle.

Variabilité solaire

L'AR5 a conclu que la meilleure estimation du forçage radiatif dû aux variations du rayonnement solaire total (TSI) au cours de la période 1750-2011 était très faible ($0,05\text{ W/m}^2$, Myrhe *et al.*, 2014). L'AR6 reconnaît des valeurs nettement plus élevées et une fourchette beaucoup plus large d'estimations des variations de la TSI au cours des derniers siècles, indiquant que la TSI entre le minimum de Maunder (1645-1715) et la seconde moitié du XXe siècle a augmenté de $0,7$ à $2,7\text{ W/m}^2$ fourchette qui inclut à la fois des données de TSI à faible et à forte variabilité (Gulev, 2021). Cependant, l'ensemble de données de forçage recommandé pour les simulations du modèle climatique CMIP6 utilisé dans l'AR6 pour les études d'attribution est une moyenne de deux ensembles de données présentant une faible variabilité solaire (Matthes, 2017).

Bien que le rapport AR6 montre un impact solaire nettement plus important que le rapport AR5, l'impact global du forçage solaire sur le climat a tout de même été jugé faible par rapport au forçage anthropique. Cependant, l'impact des variations solaires sur le climat est incertain et fait l'objet d'un débat important (Lockwood, 2012 ; Connolly *et al.*, 2021), ce qui n'apparaît pas clairement dans les rapports d'évaluation du GIEC.

Les variations de la TSI [Total Solar Illumination] au fil du temps restent un problème difficile à résoudre. Depuis 1978, la TSI est mesurée directement par des satellites. Cependant, les données présentent des incohérences non négligeables, et l'interprétation de toute tendance pluri-décennale de la TSI nécessite de comparer les observations de satellites qui se chevauchent. Il existe plusieurs ensembles de données composites concurrents sur la TSI qui divergent quant à savoir si la TSI a augmenté ou diminué au cours de

la période 1986-1996 (l'écart ACRIM ; voir chapitre 4). En outre, les enregistrements satellitaires du TSI sont utilisés pour calibrer des modèles proxy qui déduisent les variations solaires passées à partir des taches solaires et des mesures d'isotopes cosmogéniques (Velasco Herrera *et al.*, 2015).

Il existe des preuves substantielles d'une activité solaire élevée dans la seconde moitié du XX^e siècle (à partir de 1959) et jusqu'aux années 1990, avant un déclin au début du XXI^e siècle ; cette période est souvent appelée « maximum moderne ». (Chatzistergos *et al.*, 2023 ; Solanki *et al.*, 2004 ; Usoskin *et al.*, 2007). Cependant, certains scientifiques ont conclu qu'il n'était pas possible d'affirmer avec certitude l'existence d'une tendance pluri-décennale du TSI (Schmutz, 2021).

Cette incertitude fait que certaines reconstructions de la TSI entre 1750 et aujourd'hui présentent une faible variabilité (ce qui implique un impact très faible des variations solaires sur la température moyenne à la surface du globe), tandis que les ensembles de données présentant une forte variabilité de la TSI peuvent expliquer plus de 70 % de la variabilité des températures depuis l'ère préindustrielle (Scafetta, 2013 ; Stefani, 2021). Le choix des données satellitaires TSI utilisées dans une analyse peut donc influencer considérablement la part du changement climatique attribuée aux forçages anthropiques par rapport aux forçages naturels.

Il existe de plus en plus de preuves que d'autres aspects de la variabilité solaire, appelés effets indirects du soleil, amplifient le forçage de la TSI ou sont indépendants de celui-ci. Scafetta *et al.* (2023) suggèrent qu'environ 80 % de l'influence solaire sur le climat pourrait provenir de mécanismes non liés au TSI. Il existe de nombreux processus candidats, notamment les changements dans le rayonnement ultraviolet solaire, les précipitations de particules énergétiques, l'effet du champ électrique atmosphérique sur la couverture nuageuse, les changements dans les nuages produits par les rayons cosmiques galactiques modulés par le soleil, les changements relatifs importants dans le champ magnétique et la force du vent solaire. Ces effets solaires indirects ne sont pas pris en compte dans les modèles climatiques, bien que des méthodes indirectes d'estimation de leur impact suggèrent qu'ils sont significatifs. Cependant, les affirmations selon lesquelles des mécanismes non liés au TSI influencent le climat sont incertaines et font l'objet de débats.

Variabilité naturelle des circulations océaniques à grande échelle

Les variations de la température moyenne à la surface du globe sont liées à des variations récurrentes à grande échelle des modèles de circulation océanique, notamment l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO), l'oscillation décennale du Pacifique (PDO) et le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO). Ces circulations influencent l'absorption et la distribution de la chaleur océanique, ainsi que les modèles de circulation atmosphérique et la répartition des nuages. La question de savoir si ces variations sont strictement internes au système climatique ou si cette variabilité peut avoir une origine solaire/astronomique ou être influencée par de grandes éruptions volcaniques fait l'objet d'un débat.

Si les modèles climatiques simulent les circulations océaniques à grande échelle et la variabilité climatique interne, la plupart d'entre eux ont une amplitude trop faible par rapport aux observations à des fréquences pluri-décennales et sont déphasés par rapport au climat observé (Kravtsov *et al.* 2024). La moyenne de plusieurs simulations permet de lisser efficacement les variations internes, ne laissant que la variabilité climatique forcée (*par exemple*, le forçage du CO₂). Le réchauffement moderne ayant commencé pour l'essentiel à la fin des années 1970, le réchauffement des 50 dernières années se situe sur la même échelle de temps que les oscillations pluri-décennales de l'AMO et du PDO.

Voici un résumé des rapports AR5 et AR6 :

AR5 : La variabilité décennale dans le Pacifique, associée au PDO ou à l'IPO [oscillation inter-décennale du Pacifique], contribue de manière significative aux tendances régionales et mondiales des températures, mais les contributions relatives de la variabilité interne et du forçage externe sont difficiles à distinguer dans les simulations CMIP5.

AR6 : Depuis l'AR5, la compréhension du rôle de la variabilité interne, telle que l'ENSO, le PDO et l'AMO, dans la modulation des tendances climatiques régionales s'est améliorée. Cependant, les limites des modèles CMIP6 dans la simulation du moment exact et de l'amplitude de ces modes contribuent à l'incertitude quant à l'attribution des changements observés au forçage anthropique (*confiance élevée*).

L'amplitude de l'impact des oscillations multidécennales sur les températures mondiales, entre le pic et le creux, a été évaluée par le GIEC AR6 : « *La fourchette probable de variation due à la variabilité interne est comprise entre -0,2 °C et +0,2 °C (GIEC, 2021)* ». Cela implique une variation entre le creux et le pic de 0,4 °C. Sur plusieurs siècles, les variations mondiales de température entre les creux et les pics s'annulent, avec un impact net faible, voire nul.

Cependant, avec une échelle de temps nominale de 60 à 80 ans pour les oscillations telles que l'AMO et le PDO, le moment des pics et des creux peut être confondu avec la tendance séculaire. Cela devient très pertinent pour attribuer le réchauffement des 50 dernières années, période durant laquelle la majeure partie du réchauffement récent s'est produite. Même si les modèles climatiques ont l'amplitude correcte des oscillations multi-décennales, le moment des pics et des creux n'est pas simulé de manière adéquate, chaque modèle et chaque ensemble [une simulation par un modèle avec un jeu de conditions initiales] individuel donnant un déphasage différent. Une fois que les simulations des membres de l'ensemble et des différents modèles sont moyennées, la contribution de la variabilité interne naturelle est moyennée en raison des différences de déphasage, annulant ainsi le rôle de la variabilité interne naturelle dans le processus d'attribution.

La série chronologique des anomalies de la température mondiale à la surface depuis 1850 (figure 8.1) montre des variations irrégulières d'amplitude significative sur fond de tendance générale au réchauffement et, après 1976, une différence prononcée entre les tendances de l'hémisphère nord et celles de l'hémisphère sud. La période comprise entre 1905 et 1945 montre une forte tendance au réchauffement. Les 30 années suivantes, de 1945 à 1976, ont été marquées par une légère baisse des températures. La période de réchauffement la plus récente a commencé en 1977.

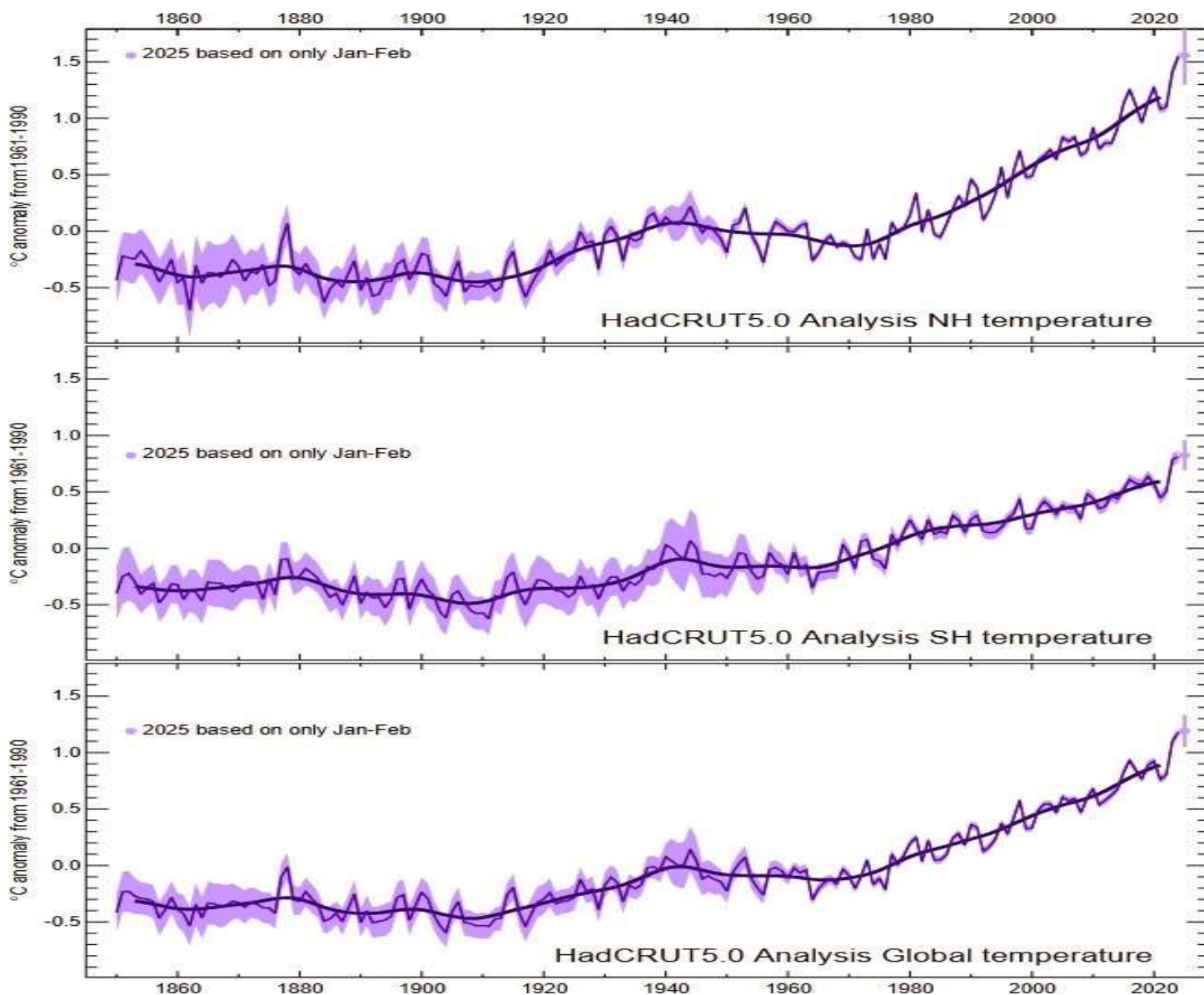


Figure 8.1 Anomalies de la température moyenne à la surface du globe entre 1850 et 2025.

En haut : hémisphère nord. Au milieu : hémisphère sud. En bas : moyenne mondiale.

Source : Centre Hadley du Royaume-Uni <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

Les causes du réchauffement du début du XX^e siècle sont examinées par Hegerl *et al.* (2017 ; 2019). La concentration atmosphérique de CO₂ est passée de 298 ppm en 1905 à 310 ppm en 1941, ce qui implique que le CO₂ a eu peu d'impact. L'activité volcanique pendant cette période était très faible et le forçage solaire est incertain. Pourtant, Hegerl *et al.* (2017) ont conclu que 40 à 54 % de ce réchauffement pouvait être attribué à un forçage externe, le reste étant associé à la variabilité interne. Bronniman *et al.* (2024) se sont intéressés aux causes du refroidissement observé au cours de la première décennie du XX^{ème} siècle dans l'hémisphère sud. Ils ont constaté que le refroidissement était lié à un phénomène similaire à La Niña dans le Pacifique, à un refroidissement tropical et subtropical de l'Atlantique Sud, à un refroidissement extratropical du Pacifique Sud et à un refroidissement des zones terrestres des latitudes moyennes sud. Le mode annulaire austral était positif, avec un renforcement de la dépression des mers d'Amundsen et de Bellingshausen, bien que la dispersion des données soit considérable.

Le réchauffement des années 1930 et le refroidissement qui a suivi au milieu du siècle ont été particulièrement prononcés dans l'Arctique. Bokuchava et Semenov (2021) ont constaté que ces variations étaient très probablement dues à l'effet combiné des variations climatiques naturelles à long terme dans l'Atlantique Nord et le Pacifique Nord, avec une contribution du forçage radiatif naturel lié à la réduction de l'activité volcanique et aux variations de l'activité solaire, ainsi qu'à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Tokinaga *et al.* (2017) ont montré que l'effet combiné de la variabilité interdécennale générée en interne dans le Pacifique et l'Atlantique a intensifié le réchauffement de l'Arctique au début du XXe siècle. Le réchauffement synchronisé du Pacifique et de l'Atlantique modifie radicalement les circulations à l'échelle planétaire dans l'hémisphère nord ; ces mêmes schémas de circulation ont une influence mondiale.

La période de refroidissement entre 1945 et 1976 a été qualifiée de « *grand hiatus* ». De nombreuses causes ont été avancées : variabilité interne naturelle due aux fluctuations associées à l'oscillation décennale du Pacifique et à l'oscillation multi-décennale de l'Atlantique ; refroidissement dû à l'augmentation des émissions d'aérosols provenant des activités industrielles ; augmentation de l'absorption de chaleur dans les océans Atlantique, Austral et Pacifique équatorial. Thompson *et al.* (2010) constatent que les différences hémisphériques dans les tendances de température au milieu du XXe siècle proviennent en grande partie d'une baisse rapide des températures de surface de la mer dans l'hémisphère nord d'environ 0,3 °C entre 1968 et 1972 environ.

Le grand changement climatique du Pacifique de 1976-1977 a été un événement climatique notable caractérisé par une modification brutale du système atmosphérique et océanique dans le nord de l'océan Pacifique, qui a interagi avec les modèles climatiques mondiaux. Ce changement est étroitement lié à l'oscillation décennale du Pacifique (PDO), qui oscille entre des phases chaudes et froides sur plusieurs décennies. Le changement de 1976 a marqué la transition d'une phase PDO principalement négative (froide) (1947-1976) à une phase positive (chaude) (1977 à 2000), avec des implications importantes pour les modèles climatiques mondiaux et régionaux, notamment la fréquence des phénomènes El Niño et La Niña. Le grand changement climatique dans le Pacifique a coïncidé avec le début d'une période d'accélération du réchauffement climatique mondial. Lorsque le grand changement climatique dans le Pacifique est pris en compte dans les analyses d'attribution climatique depuis 1950, 40 % ou plus du réchauffement de la seconde moitié du XXe siècle est attribué à la variabilité interne naturelle (McLean *et al.*, 2009 ; Tung et Zhou, 2013 ; Chylek *et al.*, 2016 ; Scafetta, 2021).

8.3.2 Trouver l'empreinte optimale [*Optimal fingerprinting*]

L'empreinte optimale est une technique statistique introduite par Allen et Tett (1999) qui compare les données climatiques observées aux simulations de modèles climatiques afin d'identifier des modèles (ou « *empreintes* ») associés à des forçages humains ou naturels. Elle consiste à prendre un vecteur de changements climatiques observés, tels que les taux de réchauffement dans différentes régions du monde, et à les décomposer en une somme pondérée de « signaux », qui sont analogues aux observations générées par des modèles climatiques avec différents types de forçages. Les pondérations sont choisies à l'aide d'une méthode de régression appelée « moindres carrés totaux » (TLS, Total Least Squares). L'analyse utilise généralement deux signaux seulement, l'un généré par des modèles utilisant uniquement des forçages anthropiques et l'autre utilisant uniquement des forçages naturels. Si le coefficient de pondération estimé associé à un signal est significativement différent de zéro, ce signal est alors dit « détecté ». S'il est proche de 1,0, le modèle générant le signal est alors considéré comme cohérent avec les observations. S'il est inférieur à 1,0, le signal du modèle pour ce forçage est trop fort et doit être réduit, et inversement. Les données observées et les signaux sont

pondérés à l'aide d'une estimation générée par le modèle des schémas aléatoires du système climatique afin, en principe, d'accorder le plus de poids possible aux régions où la variabilité naturelle est minimisée.

L'empreinte optimale est le principal outil d'attribution utilisé dans la littérature scientifique. Bien qu'elle soit largement utilisée et mise en avant par le GIEC depuis 2001, très peu d'études examinent les propriétés statistiques des résultats qu'elle génère. L'une de ses faiblesses intrinsèques réside dans le fait que les résultats dépendent d'hypothèses sur la précision des modèles climatiques, en particulier en ce qui concerne leur représentation de la variabilité naturelle (GIEC AR5 Ch 10.2.3).

Une série d'articles de McKittrick (McKittrick 2021, 2022, 2023, 2025) a remis en question la méthode optimale d'empreinte digitale, arguant qu'elle est intrinsèquement peu fiable et que les pratiques adoptées en économétrie peuvent fournir des résultats plus valables. La théorie statistique exige que, pour que les modèles de régression donnent des coefficients non biaisés, un ensemble d'hypothèses appelées conditions de Gauss-Markov soit respecté. McKittrick (2021) a fait valoir que la méthodologie d'Allen et Tett (1999) viole les conditions de Gauss-Markov, ce qui conduit à des coefficients d'empreinte digitale potentiellement biaisés et incohérents, compromettant ainsi la fiabilité de la méthode. Chen *et al.* (2023) ont confirmé cette analyse, tout en affirmant que la méthode pouvait donner des résultats valables dans des conditions très strictes. McKittrick (2022) et (2023) ont soulevé une autre préoccupation, à savoir que les climatologues – pratiquement les seuls parmi les disciplines scientifiques – ont utilisé la TLS pour estimer les coefficients des signaux anthropiques des gaz à effet de serre, malgré sa tendance à être instable à moins que soient vérifiées certaines hypothèses fortes, peu susceptibles d'être vraies dans la pratique.

Dans des conditions qui surviennent facilement lors d'une prise d'empreintes optimale, les estimations TLS présentent un biais positif important. Ainsi, toute étude ayant utilisé TLS pour une prise d'empreintes optimale sans vérifier son applicabilité dans le contexte spécifique des données a probablement surestimé l'attribution.

McKittrick (2025) a présenté un exemple empirique comparant les résultats de l'empreinte optimale conventionnelle à ceux de méthodes issues de l'économétrie traditionnelle, connues pour être valides dans le cas spécifique de la détection de signaux. Alors que la méthode optimale de fingerprinting du GIEC donne un coefficient de signal anthropique proche de 1,0 sur un ensemble de données de température mondiale couvrant la période 1900-2010, la méthode cohérente donne un coefficient d'environ 0,4, qui passe à environ 0,65 sur les données couvrant la période 1980-2010, ce qui implique que la réponse du modèle aux gaz à effet de serre doit être réduite de moitié environ pour correspondre de manière optimale aux observations. En revanche, le coefficient du signal de forçage naturel se situe entre 2,0 et 4,0, ce qui implique que les signaux des modèles climatiques relatifs au forçage naturel doivent être multipliés par deux à quatre pour correspondre au changement climatique observé. Les coefficients d'empreinte estimés par McKittrick (2025), lorsqu'ils sont utilisés pour mettre à l'échelle la sensibilité moyenne des modèles climatiques utilisés pour générer les signaux de forçage dans son ensemble de données, impliquent une sensibilité climatique transitoire de 1,4 °C, ce qui est cohérent avec l'estimation de Lewis (2023) utilisant une méthode d'estimation différente et plusieurs ensembles de données indépendants.

Ces résultats indiquent que la base sur laquelle la méthode optimale d'empreinte digitale a longtemps été considérée comme fiable n'est pas valable. Il serait nécessaire de réexaminer individuellement les résultats précédents afin de déterminer quelles conclusions sont statistiquement robustes.

8.3.3 Méthodes des séries temporelles

Le GIEC (AR5 WGI 10.2.2) a attiré l'attention sur d'autres approches d'évaluation de la causalité issues de la littérature sur l'économétrie des séries chronologiques. Ces approches ont l'avantage de ne pas dépendre d'hypothèses sur la précision des modèles climatiques, mais elles présentent l'inconvénient de reposer sur des hypothèses difficiles à vérifier concernant le processus de génération des données sous-jacentes aux données

climatiques et aux données de forçage. Ces méthodes, désormais appelées « économétrie climatique », utilisent les outils du test de racine unitaire, de la causalité de Granger et de l'analyse de cointégration, tous bien connus en économie et en finance et qui sont progressivement adoptés en science du climat. Les méthodes d'analyse des séries chronologiques offrent la possibilité de déterminer si les forçages anthropiques ou naturels sont les principaux moteurs du changement climatique sans avoir recours à des modèles climatiques, même si des questions clés restent en suspens (par exemple, Dergiades *et al.*, 2016, Balcombe *et al.*, 2019, Dagsvik *et al.*, 2020, Razzak, 2022, Dagsvik et Moen, 2023).

La modélisation de la « causalité de Granger » est un outil permettant de déterminer les directions d'influence dans des séries de données qui évoluent ensemble. Il s'agit d'un concept statistique et non physique. Si la connaissance de la valeur actuelle d'une variable améliore considérablement la précision des prévisions d'une autre variable, nous pouvons en déduire qu'il existe un lien de causalité ; c'est ce qu'on appelle la causalité de Granger. Les outils de modélisation, appelés autorégression vectorielle, mesurent les modèles d'impulsion-réponse directs et les rétroactions. Une application aux données bien connues des carottes de glace de Vostok a révélé une erreur dans le documentaire d'Al Gore, *Une vérité qui dérange*. Gore a montré les données et a attiré l'attention sur la cohérence des variations de température et de CO₂ sur une période de 440 000 ans, qu'il a attribuée à l'influence du CO₂ sur les variations de température. Mais les variations de température peuvent également influencer les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère. Davidson *et al.* (2015) ont examiné la série et ont constaté que la température est une cause de Granger du CO₂, mais pas l'inverse. En d'autres termes, à l'échelle temporelle représentée dans les données de Vostok, la cohérence de la série est principalement due à l'influence de la température sur les niveaux de CO₂ et non à la rétroaction des niveaux de CO₂ sur la température.

En résumé, les principales méthodes statistiques utilisées pour attribuer la causalité dans les données climatiques sont l'empreinte optimale et l'analyse des séries chronologiques. Les applications de la méthode d'empreinte optimale d'Allen et Tett (1999) dominent la littérature sur l'attribution et ont étayé les conclusions précédentes du GIEC, mais les résultats dépendent de la précision des modèles climatiques et la méthode a récemment été critiquée pour son biais inhérent. Les méthodes basées sur les séries temporelles n'ont pas besoin de modèles climatiques, mais elles nécessitent leurs propres hypothèses et ont donné des résultats qui, jusqu'à présent, ne font pas l'objet d'un consensus.

8.4 La baisse de l'albédo planétaire et le réchauffement record récent

La forte augmentation récente des températures moyennes mondiales a soulevé la question des facteurs qui pilotent le climat à court terme. L'un des facteurs potentiels est la fraction du rayonnement solaire absorbé, qui a augmenté brusquement ces dernières années. La question est de savoir si ce changement est une rétroaction interne au réchauffement causé par les gaz à effet de serre, ou si un autre facteur a augmenté la fraction du rayonnement absorbé, provoquant ainsi le réchauffement récent.

L'albédo planétaire est la fraction du rayonnement solaire incident qui est réfléchi vers l'espace plutôt qu'absorbée par la planète. Les surfaces hautement réfléchissantes comme le sommet des nuages, la neige et la glace jouent un rôle prépondérant à cet égard. L'albédo de la Terre est d'environ 30 %, ce qui signifie que près d'un tiers de la lumière solaire qui atteint la Terre est directement réfléchi vers l'espace. Un albédo plus faible implique que davantage d'énergie solaire est absorbée par la planète pour être ensuite réémise sous forme de chaleur. Par conséquent, toutes choses étant égales par ailleurs, une diminution de l'albédo planétaire est associée à un réchauffement de la Terre.

Le changement le plus frappant du système climatique terrestre au cours du XXI^{ème} siècle est sans doute la réduction significative de l'albédo planétaire depuis 2015, qui a coïncidé avec au moins deux années de chaleur record à l'échelle mondiale. La figure 8.2 montre les variations de l'albédo planétaire depuis 2000,

date depuis laquelle les observations satellitaires sont fiables. La réduction de 0,5 % de l'albédo planétaire depuis 2015 correspond à une augmentation de 1,7 W/m² du rayonnement solaire absorbé en moyenne sur la planète (Hansen et Karecha, 2025). À titre de comparaison, Forster et al. (2024) estiment que le forçage actuel dû à l'augmentation du CO₂ atmosphérique par rapport à l'époque préindustrielle est de 2,33 W/m².

En se basant sur des données moins précises antérieures à 2000, Goessling *et al.* (2025) ont estimé que l'albédo planétaire était relativement faible dans les années 1940 et 1950, avant que les émissions industrielles de précurseurs d'aérosols n'augmentent l'albédo jusqu'aux années 1980. Les variations les plus importantes de l'albédo planétaire ont été des épisodes d'albédo élevé causés par des éruptions volcaniques, comme après l'éruption du mont Pinatubo en 1991. L'albédo de l'année 2023 pourrait avoir été le plus faible albédo planétaire depuis au moins 1940, (même si c'est incertain).

Les changements dans les caractéristiques de la surface ne peuvent expliquer cette diminution de l'albédo planétaire depuis 2015 :

- L'étendue de la banquise arctique a diminué d'environ 5 % depuis 1980 (https://nsidc.org/data/seaice_index/images/s_plot_hires.png), bien qu'après 2007, le recul de la banquise arctique ait marqué une pause (England *et al.*, 2025).
- En ce qui concerne la glace de mer de l'Antarctique, le sixième rapport d'évaluation du GIEC conclut qu'« il n'y a pas eu de tendance significative de la superficie de la glace de mer de l'Antarctique entre 1979 et 2020 en raison de tendances régionales opposées et d'une grande variabilité interne » (résumé à l'intention des décideurs, A.1.5).
- La couverture neigeuse annuelle de l'hémisphère nord diminue lentement depuis 1967, avec des tendances à peine significatives. Les données montrent que l'hémisphère nord connaît des hivers plus enneigés, accompagnés d'une fonte plus rapide au printemps et en été, voir <http://climate.rutgers.edu/snowcover/> et la section 5.6.
- Le verdissement mondial (chapitre 2) contribue à la diminution de l'albédo planétaire, car les forêts ont un albédo plus faible que les terres ouvertes ou la neige. Cependant, certaines données indiquent que les forêts augmentent la couverture nuageuse (réflectivité élevée), ce qui contrebalance la diminution directe de l'albédo associée à l'augmentation de la superficie forestière.

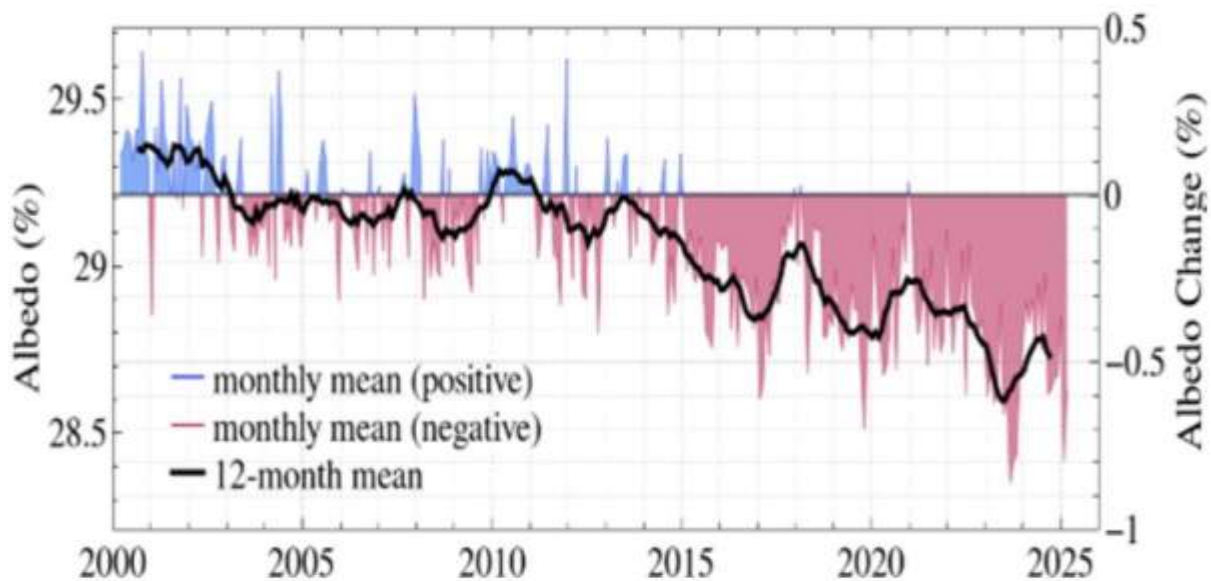


Figure 8.2. Albédo de la Terre (réflectivité, en pourcentage), sans saisonnalité. D'après Hansen et Karecha (2025)

Les changements de réflectivité de la surface contribuent à une légère et lente diminution de l'albédo planétaire. Cependant, ces changements ne peuvent expliquer la forte baisse de l'albédo planétaire observée depuis 2015. En outre, tout changement de l'albédo de surface est efficacement atténué d'un facteur trois en moyenne, principalement en raison du masquage par les nuages (Loeb *et al.* 2019). Les changements de l'albédo de surface n'ont donc contribué que faiblement au récent déclin de l'albédo planétaire, en particulier lorsqu'ils sont calculés en moyenne annuelle et à l'échelle mondiale. Cela ne laisse comme explication la plus probable du déclin marqué de l'albédo que des changements dans les aérosols atmosphériques et/ou les nuages.

Les aérosols sont de petites particules présentes dans l'atmosphère qui réfléchissent la lumière du soleil et peuvent interagir avec les processus nuageux pour rendre les nuages plus réfléchissants. Les aérosols ont à la fois des origines naturelles (par exemple, la poussière provenant des sols, les feux de forêt) et humaines, issues de la combustion (notamment des combustibles fossiles). Les régions qui verdissent et/ou connaissent une augmentation des précipitations pourraient produire moins de poussière. En ce qui concerne les aérosols anthropiques, de nouvelles réglementations sur les carburants marins visant à réduire les émissions de soufre ont été mises en œuvre en trois phases, en 2010, 2015 et 2020. Les particules de sulfate réfléchissent le rayonnement solaire, de sorte qu'un air plus pur signifie moins de rayonnement solaire réfléchi, ce qui contribue au réchauffement de la surface. Les effets indirects des aérosols sulfatés comprennent l'augmentation de la réflectivité des nuages bas dans les régions subtropicales. L'importance de cette modification des émissions de sulfate pour le bilan radiatif de la Terre fait l'objet d'une controverse (Hodnebrog *et al.*, 2024 ; Yuan *et al.*, 2024), mais le fait que cet effet soit limité aux principales routes maritimes suggère un impact global faible (Schmidt, 2024).

Les changements dans les nuages sont la principale hypothèse avancée pour expliquer la baisse de l'albédo global depuis 2015. Deux articles récents (Loeb *et al.*, 2024 ; Goessling *et al.*, 2024) se sont penchés sur les variations récentes des propriétés des nuages. En examinant les données satellitaires et de réanalyse, Loeb *et al.* ont constaté que la diminution des nuages de basse et moyenne altitude depuis 2015 est la principale cause de la baisse de l'albédo planétaire dans l'hémisphère nord, tandis que dans l'hémisphère sud, cette baisse est principalement due à la diminution des nuages de moyenne altitude dans toutes les zones de latitude. Goessling *et al.* (2024) ont constaté que les anomalies nuageuses étaient principalement dues à la réduction des nuages bas. Les régions qui ont connu une réduction cohérente des nuages bas au cours de la dernière décennie comprennent la région du bassin chaud autour du continent maritime et le nord de l'océan Pacifique extratropical occidental, ainsi que de grandes parties de l'Atlantique et des régions terrestres adjacentes. La réduction de la couverture nuageuse mondiale identifiée dans ces analyses depuis 2015 est de 1 à 2 %.

La question est alors de déterminer la cause de ce changement dans la couverture nuageuse. Deux explications ont été avancées pour expliquer la diminution de la couverture nuageuse au cours de la dernière décennie :

- Variabilité naturelle du climat
- Changements de la couverture nuageuse basse associés au réchauffement des températures de surface de la mer, impliquant une rétroaction positive émergente sur le changement climatique (Hansen et Karecha, 2025)

Il n'est pas facile de justifier un nouveau retour positif des nuages bas qui a commencé à apparaître en 2015, car il n'y a pas de déclencheur évident à cette période. Cependant, de nombreux signaux climatiques naturels associés à des changements dans la circulation atmosphérique susceptibles d'influencer la répartition des nuages ont été observés au cours de cette période :

- La période 2014-2016 a été l'une des plus forts épisodes El Niño jamais enregistrés

- Une anomalie de froid apparue en 2015 dans le gyre subpolaire de l'Atlantique Nord reflète un changement dans la circulation océanique associé à la variabilité décennale dans l'Atlantique (Frajka-Williams *et al.*, 2017 ; Arthun *et al.* 2021).
- L'indice positif de l'oscillation décennale du Pacifique a atteint son maximum en 2016, puis a diminué et est resté négatif depuis fin 2019
- Éruption du volcan sous-marin Hunga-Tonga en 2022

Les anomalies interannuelles de la nébulosité associées au phénomène El Niño Southern Oscillation (ENSO) ont un signal global significatif et des signaux régionaux forts, en particulier au-dessus des océans Indien et Pacifique tropicaux.

L'éruption du Hunga Tonga est remarquable en raison de sa coïncidence avec la valeur exceptionnellement faible de l'albédo planétaire en 2023. Goessling *et al.* (2024) ont constaté que les perturbations nuageuses en 2023 présentaient un schéma différent de celui observé depuis 2015, avec une réduction de la couverture nuageuse particulièrement prononcée dans l'hémisphère nord et les régions tropicales. Les réductions régionales de la couverture nuageuse étaient les plus prononcées au-dessus de l'océan Indien oriental, au-dessus de l'Amérique du Sud et s'étendant au-dessus du Pacifique oriental, ainsi qu'au-dessus du nord de l'Amérique du Nord, dans l'océan Austral autour de 60°S, dans l'Atlantique Nord subtropical et oriental, et dans certaines parties du Pacifique Nord.

L'éruption du Hunga Tonga était inhabituelle en ce qu'elle a injecté de grandes quantités de vapeur d'eau dans la stratosphère en plus de particules de sulfate. Les premières publications se sont concentrées sur les impacts sur les circulations stratosphériques et l'impact radiatif direct. En 2025, des articles examinent les effets indirects du Hunga Tonga sur le climat de surface à l'aide de simulations d'ensemble issues de modèles du système terrestre (Bednarz *et al.*, 2025 ; Kuchar *et al.*, 2025). Ces articles ont mis en évidence des impacts statistiquement significatifs sur les climats régionaux, induits par des changements de circulation résultant des couplages entre la stratosphère et la troposphère. Ils soulignent la complexité des interactions entre l'activité volcanique et la dynamique climatique. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour démêler les impacts de l'éruption du Hunga Tonga sur l'albédo planétaire.

En résumé, la diminution de l'albédo planétaire et la diminution concomitante de la nébulosité ont mis en évidence l'importance des nuages et de leurs variations pour la variabilité et le changement climatiques mondiaux. Une variation de 1 à 2 % de la couverture nuageuse mondiale a un impact radiatif sur le climat plus important que l'effet radiatif direct du doublement du CO₂. S'il est difficile de démêler les causes de la tendance récente, les explications concurrentes de la diminution de la couverture nuageuse ont des implications importantes pour l'évaluation de la sensibilité climatique à l'équilibre et pour l'attribution du réchauffement récent. Dix années supplémentaires de données devraient permettre de déterminer s'il s'agit d'une forte rétroaction positive des nuages associée au réchauffement ou d'une fluctuation temporaire due à la variabilité naturelle.

8.5 Attribution des facteurs qui pilotent l'impact climatique

Le GIEC (Ranasinghe *et al.* 2021) définit les « Climate Impact Drivers , facteurs d'impact climatique » ou CID comme « *les conditions physiques du système climatique (par exemple, les moyennes, les événements, les extrêmes) qui affectent un élément de la société ou des écosystèmes* ». Les CID sont donc les caractéristiques du système météorologique et climatique qui présentent un intérêt particulier pour l'évaluation des impacts du changement climatique, car pouvant avoir des effets sur les humains et sur le monde naturel. Par exemple, sous la rubrique « Chaleur et froid », les CID sont identifiés comme la température moyenne de l'air, les vagues de chaleur extrême, les vagues de froid et le gel. Le GIEC souligne également que les CID ne

sont pas nécessairement liés à des dommages : selon le système en question, ils peuvent être néfastes, neutres, bénéfiques ou une combinaison de ces trois éléments.

Les premières colonnes du tableau 12.12 de Ranasinghe *et al.* (2021, p. 1856), reproduit ici sous le nom de tableau 8.1, résument l'évaluation du sixième rapport d'évaluation du GIEC visant à déterminer si un signal d'influence anthropique attribuable est apparu dans tous les principaux CID. L'un des thèmes de ce chapitre est que les méthodes d'attribution utilisées par le GIEC ont tendance à surestimer l'influence anthropique et à sous-estimer le rôle de la variabilité naturelle. Néanmoins, ce tableau récapitulatif montre de manière frappante que très peu de CID présentent un signal anthropique suffisant pour qu'on puisse les distinguer de la variabilité naturelle.

Sur les 33 catégories d'impacts climatiques répertoriées, un signal anthropique est affirmé avec *un niveau de confiance élevé* dans seulement cinq d'entre elles, et avec un *niveau de confiance moyen* dans quatre autres. (Il convient de noter que l'un des CID est une augmentation des niveaux de CO₂ et que, comme il est tautologique d'attribuer cela à l'augmentation des niveaux de CO₂, ce CID peut être ignoré). Pour le reste, le GIEC ne prétend pas avoir détecté de facteurs anthropiques. Sur les cinq *affirmations à haut degré de confiance*, deux concernent des changements des températures moyennes (atmosphériques et océaniques) et ne sont donc pas des mesures de phénomènes météorologiques extrêmes. En outre, deux des quatre affirmations *à degré de confiance moyen* sont liées à la chimie des océans et ne sont donc pas non plus liées à des phénomènes météorologiques extrêmes. Le GIEC n'affirme pas une influence humaine sur de nombreux phénomènes météorologiques non liés à la température, tels que le vent, les précipitations, les inondations ou la sécheresse.

Les autres colonnes du tableau 12.12 du GIEC indiquent si des signaux anthropiques sont susceptibles d'apparaître au cours de ce siècle dans le scénario RCP8.5, le scénario de forçage le plus extrême. Nous avons omis ces colonnes pour plusieurs raisons.

Premièrement, parce qu'elles font référence à la capacité des modèles climatiques à projeter des signaux détectables dans les observations, ce qui est une question très différente de celle qui nous intéresse ici, à savoir si un signal a été détecté dans les données historiques.

Deuxièmement, comme nous l'expliquons au chapitre 4, le scénario RCP8.5 est un scénario très extrême [avec une augmentation fantastique de la consommation de charbon après 2040] trompeur et peu plausible, il ne s'agit pas d'un « *scénario de base* » ou d'une extension de ce qui est actuellement observé.

Troisièmement, l'ensemble des modèles détaillés est reconnu (Palmer et Stevens 2019) comme « inadapté » [« not fit for purpose »] pour décrire les changements régionaux et « incapable de représenter les conditions futures avec le degré de précision spatiale, temporelle et probabiliste avec lequel les projections sont souvent fournies ». (Nissan et al, 2019). Même avec ces réserves, nous notons que les colonnes omises dans le tableau 12.12 du rapport AR6 montrent que la plupart des impacts climatiques ne devraient pas présenter de signal anthropique d'ici la fin du siècle.

Comme indiqué au chapitre 6, la variabilité naturelle domine les schémas des systèmes météorologiques extrêmes et les affirmations simplistes sur la détection de tendances sont souvent remises en cause par l'hétérogénéité régionale et les inversions de tendance au fil du temps. Le tableau 8.1 souligne à cet égard qu'il n'est actuellement pas possible d'attribuer les changements dans la plupart des types de phénomènes météorologiques extrêmes à une influence humaine. Prenant l'exemple du vent, le GIEC affirme qu'aucun signal anthropique n'est apparu dans les vitesses moyennes du vent, les tempêtes violentes, les cyclones tropicaux ou les tempêtes de sable et de poussière, et qu'aucun n'est attendu au cours de ce siècle, même dans le scénario d'émissions extrêmes. Il en va de même pour les conditions météorologiques propices aux sécheresses et aux incendies.

Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period
Heat and Cold	Mean air temperature	1
	Extreme heat	2
	Cold spell	4
	Frost	
Wet and Dry	Mean precipitation	
	River flood	
	Heavy precipitation and pluvial flood	
	Landslide	
	Aridity	
	Hydrological drought	
	Agricultural and ecological drought	
	Fire weather	
Wind	Mean wind speed	
	Severe wind storm	
	Tropical cyclone	
	Sand and dust storm	
Snow and Ice	Snow, glacier and ice sheet	
	Permafrost	
	Lake, river and sea ice	11
	Heavy snowfall and ice storm	
	Hail	
	Snow avalanche	
Coastal	Relative sea level	
	Coastal flood	
	Coastal erosion	
Open Ocean	Mean ocean temperature	
	Marine heatwave	
	Ocean acidity	
	Ocean salinity	13
	Dissolved oxygen	14
Other	Air pollution weather	
	Atmospheric CO ₂ at surface	
	Radiation at surface	

High confidence of decrease

Medium confidence of decrease

Low confidence in direction of change

Medium confidence of increase

High confidence of increase

Tableau 8.1 : Reproduction de la colonne 1 du tableau 12.12, rapport du groupe de travail I du GIEC AR6. Émergence d'un signal anthropique au cours de la période historique pour les CID indiqués. Blanc : aucun signal détecté. Bleu et orange : changement détecté (diminution ou augmentation) et niveau de confiance indiqué dans la légende des couleurs. Les chiffres renvoient à des régions spécifiques et à des niveaux de confiance : voir le tableau original pour les notes.

8.6 L'attribution des événements extrêmes (EEA, Extreme Event Attribution)

En examinant plus largement le traitement par le GIEC de l'attribution des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, le rapport AR6 fournit une évaluation ambiguë du rôle du réchauffement anthropique, qui diffère d'un chapitre à l'autre. Le chapitre 11 du GT1 indique (Seneviratne *et al.*, 2021) :

Les preuves des changements observés dans les phénomènes extrêmes et leur attribution à l'influence humaine (y compris les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols et les changements d'affectation des terres) se sont renforcées depuis le cinquième rapport, en particulier pour les précipitations extrêmes, les sécheresses, les cyclones tropicaux et les phénomènes extrêmes combinés (y compris les épisodes de sécheresse/chaleur et les conditions météorologiques propices aux incendies). Certains événements extrêmes de chaleur récents auraient été extrêmement improbables sans l'influence humaine sur le système climatique.

En revanche, comme indiqué à la section 8.5, le chapitre 12 du WG1 (tableau 12.12) brosse un tableau différent – on peut supposer que les avis des différents groupes d'auteurs des deux chapitres ont abouti à des conclusions différentes (Ranasinghe, 2021) :

- Confiance élevée dans l'augmentation des épisodes de chaleur extrême dans les régions tropicales où les observations permettent d'estimer les tendances et dans la plupart des régions des latitudes moyennes, confiance moyenne partout ailleurs
- Confiance moyenne dans la diminution des épisodes de froid extrême en Australie, en Afrique et dans la majeure partie du nord de l'Amérique du Sud, où des observations permettent d'estimer les tendances
- Aucune preuve d'apparition, au cours de la période historique, d'un changement dans les crues fluviales, les fortes précipitations, les sécheresses, les conditions météorologiques propices aux incendies, les tempêtes violentes et les cyclones tropicaux.

Si la question générale de la détection des changements dans les phénomènes météorologiques extrêmes et de leur attribution reste ambiguë, la plupart des activités dans ce domaine concernent l'attribution de phénomènes météorologiques extrêmes particuliers. L'initiative la plus importante est celle de World Weather Attribution (WWA ; worldweatherattribution.org), une initiative internationale de recherche sur l'attribution des événements extrêmes qui vise à analyser comment le changement climatique influence la probabilité et l'intensité des événements météorologiques extrêmes. Son approche consiste à utiliser de grands ensembles de modèles climatiques régionaux pour comparer un événement dans le climat actuel avec un événement dans un climat préindustriel imaginé (counterfactual) sans influence humaine.

La WWA jouit d'une grande visibilité publique dans le domaine du lien entre les phénomènes météorologiques extrêmes et le changement climatique, ses communiqués de presse suscitant un vif intérêt dans les débats publics et politiques. Cependant, la promotion intensive par la WWA de conclusions non évaluées par des pairs, son admission ouverte qu'elle manipule les analyses à des fins judiciaires et ses problèmes méthodologiques ont suscité des controverses, les détracteurs remettant en question la solidité et l'impartialité de ses conclusions (Pielke Jr. 2024). Malgré ces problèmes, les travaux de la WWA continuent d'influencer la science du climat et les discours médiatiques. Les critiques techniques de son approche portent notamment sur l'absence de processus de détection formel, l'hypothèse implicite que le réchauffement post-industriel est entièrement dû aux gaz à effet de serre et la prise en compte insuffisante de la variabilité climatique interne.

L'EEA [Extreme Event Attribution] étant relativement récente, de nombreuses questions méthodologiques fondamentales restent encore à régler dans la littérature spécialisée. Le manque de données constitue un défi important. Les événements extrêmes sont, par définition, rares. De nombreuses analyses des types d'événements extrêmes (y compris les rapports d'évaluation nationaux des États-Unis) n'évaluent que les données disponibles

depuis 1950 ou 1970. Cependant, comme souligné au chapitre 6, bon nombre des événements météorologiques et climatiques extrêmes les plus graves de l'histoire des États-Unis se sont produits au cours de la première moitié du XX^e siècle, voire avant, y compris au début du XIX^e siècle. Et si l'on tient compte des reconstitutions paléoclimatiques, il devient très difficile pour un événement de dépasser les seuils attendus de la variabilité naturelle, en particulier si l'on considère une région géographique de taille raisonnable.

Un autre défi consiste à définir l'événement étudié. Il existe une littérature abondante en statistiques et en économétrie sur la difficulté d'analyser des données comportant des valeurs aberrantes. Ce problème se pose parce qu'une série de données établit une distribution de probabilité définissant la fourchette attendue des observations. Si une valeur aberrante est observée, cela peut indiquer que le processus sous-jacent à l'origine de la distribution des données a changé (ce qui, dans le contexte météorologique, signifierait qu'un changement climatique a été détecté) ou que le processus sous-jacent comporte plusieurs régimes ayant chacun une distribution de probabilité différente, auquel cas l'observation d'une valeur aberrante signifie simplement que nous nous trouvons temporairement dans un régime différent, mais que le système lui-même est inchangé. Si une série chronologique ne contient qu'un seul événement aberrant à la fin de la série, il n'est pas possible de déterminer quel est le bon modèle (Chen et Liu 1993). Par exemple, il peut exister un régime météorologique « ordinaire » qui donne une distribution des températures maximales estivales dans une région côtière particulière, et un second régime « canicule » qui se déclenche lorsqu'un événement de blocage se produit à l'intérieur des terres, ce qui donne une distribution des températures centrée autour d'une valeur de 15 °C à au-dessus du régime ordinaire. Une journée avec des températures supérieures de 13 °C à la normale serait soit une anomalie de chaleur extrême dans le premier régime, soit un événement quelque peu frais dans le second, et nous n'avons dans ce cas aucun moyen de savoir, sur la base de données statistiques, quelle vision est correcte.

Visser et Petersen (2012) ainsi que Sardeshmukh *et al.* (2015) soulignent tous deux que différentes distributions peuvent correspondre tout aussi bien aux données observées, mais avoir des implications très différentes quant à la probabilité d'un événement météorologique spécifique. Visser et Petersen affirment qu'au vu des incertitudes profondes qui entourent l'analyse des phénomènes météorologiques extrêmes, il convient d'éviter d'établir un lien entre des événements individuels et le changement climatique mondial. En outre, l'existence d'une valeur aberrante à la fin d'une série de données pose le problème que les estimations des probabilités d'événements seront biaisées, que la valeur aberrante soit incluse ou exclue (Barlow *et al.*, 2020). Les méthodes permettant d'éliminer ce biais n'ont pas encore été établies, ce qui conduit certains experts (*par exemple* Miralles et Davison 2023) à affirmer que dans les cas où une série de données contient un seul événement extrême à la fin, l'estimation de la période de retour de l'événement extrême sera tellement biaisée et incertaine qu'il faut éviter absolument d'éviter de faire ce genre d'estimation.

Nous présentons une étude de cas d'un événement extrême récent aux États-Unis qui a eu un impact considérable afin d'illustrer les défis et les ambiguïtés liés à l'attribution de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes au réchauffement causé par l'homme.

8.6.1 Étude de cas – Vague de chaleur de 2021 dans l'ouest de l'Amérique du Nord

La vague de chaleur de 2021 dans l'ouest de l'Amérique du Nord a été un événement extrême qui a touché une grande partie de l'ouest de l'Amérique du Nord à la fin du mois de juin 2021. Des records de température à la surface ont été enregistrés à Portland, dans l'Oregon (116° F ; précédent record 107° F) et à Seattle, dans l'État de Washington (108° F ; précédent record 103° F) (Mass *et al.*, 2024).

L'équipe de la WWA a fait la une des journaux internationaux avec son analyse, qui a fourni les déclarations d'attribution suivantes (WWA, 2021 ; Philip *et al.*, 2022) :

- D'après les observations et les modélisations, cette vague de chaleur aurait été pratiquement impossible sans le changement climatique causé par l'homme.

- Cet événement est estimé à environ un sur 1 000 ans dans le climat actuel.
- Cet événement aurait été au moins 150 fois plus rare sans le changement climatique induit par l'homme.
- Cette vague de chaleur a été environ 2 °C plus chaude qu'elle ne l'aurait été si elle s'était produite au début de la révolution industrielle (lorsque les températures moyennes mondiales étaient de 1,2 °C plus froides qu'aujourd'hui).

Cependant, un contre-argument important à la première affirmation est que d'autres chercheurs ont conclu, à partir de données météorologiques historiques, que si une vague de chaleur de l'ampleur observée était effectivement pratiquement impossible sans changement climatique anthropique, elle était également pratiquement impossible *avec* le changement climatique. Bercos-Hickey (2022) a noté que « ces températures étaient pratiquement impossibles dans toutes les conditions météorologiques connues jusqu'à présent, avec ou sans réchauffement climatique ». McKinnon et Simpson (2022) ont déclaré que « *l'explication la plus probable reste que l'événement météorologique lui-même était un cas de « malchance »* ». L'évaluation climatique de l'Oregon pour 2023 (Fleischman, 2023)[2023 Oregon Climate Assessment] a conclu que le dôme de chaleur se serait formé même sans changement climatique et qu'« *il n'y a aucune preuve que la combinaison très inhabituelle de caractéristiques météorologiques qui a provoqué le dôme de chaleur ait été favorisée par le changement climatique, et les modèles climatiques ne prévoient pas d'augmentation de la fréquence des crêtes de haute pression [high-pressure ridges] au-dessus du nord-ouest du Pacifique* » (Fleischman, 2023, p. 49).

Mass *et al.* (2024) résume la séquence d'événements complexes qui ont conduit à la vague de chaleur. Une crête barométrique record s'est formée dans la troposphère moyenne au-dessus du nord-ouest du Pacifique, sous l'effet d'une perturbation tropicale dans l'ouest du Pacifique. Cela a entraîné des températures record dans la troposphère moyenne, une forte subsidence dans la basse atmosphère, un flux vers l'est à basse altitude qui a provoqué un réchauffement en pente descendante sur le terrain régional et l'élimination de l'air marin plus frais, ainsi qu'un creux barométrique à basse altitude qui a renforcé le flux dévalant la pente. Cet événement s'est produit à un moment où l'ensoleillement était maximal et où l'humidité du sol était plus faible que la normale. À l'aide d'une approche narrative [storyline], Mass *et al.* ont estimé qu'il n'y avait pas de tendance à la sécheresse et à l'assèchement des sols dans le nord-ouest du Pacifique ; il n'y a aucune preuve que le réchauffement climatique entraîne des crêtes de haute pression plus fortes, et aucune tendance n'a été observée en matière de vagues de chaleur ou de températures record dans la région. Ils ont conclu que, bien que le réchauffement anthropique ait pu contribuer jusqu'à 2 °F à l'ampleur de l'événement, il y a peu de preuves d'une amplification supplémentaire de l'événement due à l'augmentation des gaz à effet de serre.

Bercos-Hickey *et al.* (2022) ont mené une analyse statistique d'une étude d'attribution basée sur un modèle de cette vague de chaleur. Étant donné que cet événement est très atypique et dépasse largement les limites des distributions de valeurs extrêmes généralisées ajustées à partir de données historiques, ils ont conclu que les estimations des temps de retour, des changements quantitatifs dans l'ampleur et la fréquence des événements, ainsi que la probabilité de températures extrêmes telles que fournies par la WWA ne sont pas précises et doivent être interprétées comme peu fiables. Ils ont constaté que les méthodes d'attribution rétrospective utilisant un ensemble de modèles climatiques régionaux, combinées aux inférences causales de Pearl (2009), peuvent fournir des informations limitées et conditionnelles sur l'ampleur de l'influence humaine sur cette vague de chaleur. Ils ont fourni une estimation plus restrictive selon laquelle les activités humaines ont causé une augmentation de 1,4°F à 1,8°F des températures maximales journalières.

Zeder *et al.* (2023) ont également conclu que les méthodes utilisées par Philip *et al.* (2022, l'analyse WWA) ont tendance à surestimer la rareté des vagues de chaleur extrêmes, ce qui conduit à une perception biaisée de l'effet du changement climatique sur les vagues de chaleur : « *La tendance à surestimer la période de retour des vagues de chaleur extrêmes observées peut alimenter l'impression que des vagues de chaleur extrêmes, qui semblent impossibles, se multiplient actuellement à un rythme sans précédent.* »

La vague de chaleur qui a frappé l'ouest de l'Amérique du Nord en 2021 a été un phénomène météorologique rare et sans précédent qui a battu des records de température vieux d'un siècle, avec des pics atteignant 9°F de plus [5°C]. Si l'équipe WWA a bénéficié d'une couverture médiatique mondiale pour avoir rapidement attribué ce phénomène au changement climatique anthropique, des analyses ultérieures évaluées par des pairs ont montré que cet événement était dû à des conditions météorologiques rares qui n'étaient pas rendues plus probables par le réchauffement climatique.

Références

- Allen, M. R., & Tett, S. F. B. (1999). Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, 15(6), 419–434. <https://doi.org/10.1007/s003820050291>
- AR4 : *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, quatrième rapport d'évaluation* (2021), contribution du groupe de travail I. www.ipcc.ch.
- AR5 : *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cinquième rapport d'évaluation* (2021), contribution du groupe de travail I. www.ipcc.ch.
- AR6 : *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, sixième rapport d'évaluation* (2021), contribution du groupe de travail I. www.ipcc.ch.
- Arthun, M, RCJ Willis, HL Johnson, L Chafik, HR Langehaug (2021) Mechanisms of Decadal North Atlantic Climate Variability and Implications for the Recent Cold Anomaly. *Journal of Climate*, vol. 34
- Balcombe, Kevin, Iain Fraser and Abhijit Sharma (2019) Is radiative forcing cointegrated with temperature? A further examination using a structural time series approach.” *Management of Environmental Quality* 30(5) DOI 10.1108/MEQ-12-2018-021.
- Barlow, Anna Maria, Chris Sherlock and Jonathan Tawn (2020) Inference for Extreme Values Under Threshold-Based Stopping Rules. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* August 2020, Pages 765–789, <https://doi.org/10.1111/rssc.12420>
- Bednarz, EW, AH Butler, X Wang, Z Zhou, W Yu, G Stenchikov, M Toohey, Y Zhu (2025) Indirect climate impacts of the Hunga eruption. Preprint, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1970>
- Bercos-Hickey, E., et al. (2022). Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. *Geophysical Research Letters*, 49(23), e2022GL099396. <https://doi.org/10.1029/2022GL099396>
- Bokuchava, DD and VV Semenov (2021) Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*, 222, 103820
- Chatzistergos, T., Krivova, N. A., & Yeo, K. L. (2023). Long-term changes in solar activity and irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 252, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150>
- Chen, C., & Liu, L.-M. (1993). Joint estimation of model parameters and outlier effects in time series. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421), 284–297. <http://www.jstor.org/stable/2290724>
- Chen, H, SX Chen and M Mu (2023) A statistical review on the optimal fingerprinting approach in climate change studies. *Climate Dynamics* 62:1439-1446 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06975-5>
- Chylek, P., et al. (2016). The role of Atlantic Multi-Decadal Oscillation in the global mean temperature variability. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3271–3279. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7>
- Connolly, R., et al. (2021). How much has the sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(6), 131. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/131>
- Cramer, W., et al. (2014). Detection and attribution of observed impacts. In C. B. Field et al. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 979–1037). Cambridge University Press.
- Dagsvik, JK SH Moen (2023) To what extent are temperature levels changing due to greenhouse gas emissions? Statistics Norway Discussion Paper 1007 September 2023

- Dagsvik, JK, M Fortuna and SH Moen (2020) How Does Temperature Vary Over Time?: Evidence on the Stationary and Fractal Nature of Temperature Fluctuations. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, Volume 183, Issue 3, June 2020, Pages 883–908, <https://doi.org/10.1111/rssa.12557>
- Davidson, James E.H., David B. Stephenson and Alemtsehai A. Turasie (2015) Time series modeling of paleoclimate data *Environmetrics* 27(1) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.2373>
- Dergiades, T., R.K. Kaufmann and T. Panagiotidis (2016). Long-run changes in radiative forcing and surface temperature: The effect of human activity over the last five centuries. *Journal of Environmental Economics and Management* 76:67—85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911>
- England, Mark, Lorenzo M Polvani, James A Screen, et al (2025). Surprising, but not unexpected, multi decadal pause in Arctic sea ice loss. *ESS Open Archive*. March 29, 2025.
- Fleishman, E., editor. (2023). Sixth Oregon Climate Assessment. Oregon Climate Change Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon. <https://blogs.oregonstate.edu/occric/oregon-climate-assessments-98>
- Forster et al. (2024) “Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence” *Earth System Science Data* 17(6) <https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>
- Frajka-Williams, E, C Beaulieu, Aurelie Duchez (2017) Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. *Scientific Reports*, 7:11224
- Goessling, Helge F. Thomas Rackow and Thomas Jung (2024) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* Vol 387, Issue 6729 pp. 68-73 <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280>
- Gulev, S. K., et al. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 287–422). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Hansen J and P Karecha (2025) Large cloud feedback confirms high sensitivity. <https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf>
- Hegerl, G. C., et al. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 663–745). Cambridge University Press.
- Hegerl, GC, S Bronniman, A Schurer et al. (2017) Early 20th century warming: Anomalies, causes and consequences. *WIREs Climate Change*, DOI: 10.1002/wcc.522
- Hegerl, GC, S Bronniman, T Cowan (2019) Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters*, 14, 123006
- Hodnebrog, Ø et al. (2024), Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth’s energy imbalance. *Communications Earth and Environment* 5, 166 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01324-8
- Houghton, J. T., et al. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–881). Cambridge University Press. <https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity>
- Kravtsov, S., Westgate, A., & Gavrillov, A. (2024). Global-scale multidecadal variability in climate models and observations, part II: The stadium wave. *Climate Dynamics*, 62, 10281–10306. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4>
- Kuchar, A., Sukhodolov, T., Chiodo, G., Jörimann, A., Kult-Herdin, J., Rozanov, E., and Rieder, H. H. (2025): Modulation of the northern polar vortex by the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai eruption and the associated surface response, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 3623–3634, <https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025>.

- Lewis, Nicholas (2023) “Objectively Combining Climate Sensitivity Evidence,” *Climate Dynamics* 61, no. 9–10 (2023): 3155–3163, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8>.
- Lockwood, M. (2012). Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3–4), 503–534. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3>
- Loeb, N. G. et al. (2019) Decomposing Shortwave Top-of-Atmosphere and Surface Radiative Flux Variations in Terms of Surface and Atmospheric Contributions. *Journal of Climate* 32(16), 5003–5019 (2019). doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1
- Loeb, N., S-H Ham, RP Allen, TJ Thorsen, B Meyssignac, S Kato, GC Johnson, JL Lyman (2024) Observational Assessment of Changes in Earth’s Energy Budget since 2000. *Surveys in Geophysics*, 45, 1757–1783
- Mass, C., et al. (2024). The Pacific Northwest heat wave of 25–30 June 2021: Synoptic/mesoscale conditions and climate perspective. *Weather and Forecasting*, 39(2), 275–291. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0154.1>
- Matthes, K., et al. (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development*, 10(6), 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100380. <https://doi.org/10.1029/2022GL100380>
- McKittrick, R. (2021). Checking for model consistency in optimal fingerprinting: A comment. *Climate Dynamics*, 58(1–2), 405–411. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05913-7>
- McKittrick, R. (2023). Total least squares bias in climate fingerprinting regressions with heterogeneous noise variances and correlated explanatory variables. *Environmetrics*, 35(2), e2835. <https://doi.org/10.1002/env.2835>
- McKittrick, Ross R (2022) On the choice of TLS versus OLS in climate signal detection regression. *Climate Dynamics* 10.1007/s00382-022-06315-z
- McKittrick, Ross R (2025) Consistent Climate Fingerprinting. *Climate Dynamics* forthcoming preprint available at www.rossmckittrick.com
- McLean, J.D., C. R. de Freitas, and R. M. Carter, (2009) “Influence of the Southern Oscillation on Tropospheric Temperature,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, no. D14 (July 23, 2009): D14104, <https://doi.org/10.1029/2008JD011637>.
- Miralles, Ophélie and Anthony Davison (2023) Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. *Weather and Climate Extremes* 41 100584 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584>
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, et al (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nissan, Hannah, Lisa Goddard, Erin Coughlan de Perez, et al. (2019) On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wires Climate Change* 14 March 2019 <https://doi.org/10.1002/wcc.579>
- Palmer, Tim N and Bjorn Stevens (2019) The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (49) 24390–24395 <https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116>
- Pearl, J. (2009). *Causality*. Cambridge University Press.
- Philip, S. Y., et al. (2022). Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the U.S. and Canada June 2021. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1689–1713. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>
- Pielke Jr., Roger (2024) *Weather Attribution Alchemy*. Substack essay <https://rogerpielkejr.substack.com/p/weather-attribution-alchemy>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., ... Zaaboul, R. (2021). Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.014_100
- Razzak, Weshah A. (2022). "The Econometrics of Global Warming," *Journal of Economics and Econometrics*, vol. 65(2), pages 13–47.
- Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., & Penland, C. (2015). Need for caution in interpreting extreme weather statistics. *Journal of Climate*, 28(23), 9166–9187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0020.1>
- Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Science Reviews*, 126, 321
- Scaffeta, Nicola (2021) "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature," *Atmosphere* 12, no. 2: 147, <https://doi.org/10.3390/atmos12020147>
- Schmidt, G. (2024) Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory. *Nature* 627, 467. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z>
- Schmutz, Werner K. (2021) "Changes in the Total Solar Irradiance and Climatic Effects," *Journal of Space Weather and Space Climate* 11: 40, <https://doi.org/10.1051/swsc/2021016>.
- Seneviratne, S. et al. (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by V. Masson Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Solanki, S.K. et al. (2004), "Unusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared to the Previous 11,000 Years," *Nature* 431, no. 7012 (October 28, 2004): 1084–1087, <https://doi.org/10.1038/nature02995>.
- Stefani, Frank (2021) "Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions," *Climate* 9, no. 11 (November 3, 2021): 163, <https://doi.org/10.3390/cli9110163>.
- Thompson, DJW, JM Wallace, JJ Kennedy, PD Jones (2010) An abrupt drop in Northern Hemisphere Sea Surface Temperature around 1970. *Nature*, 467, 444–447
- Tokinaga, H, SP Xie, and H Mukougawa (2017) Early 20th century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6227–6233 <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1615880114>
- Tung, Ka-Kit and Jiansong Zhou (2013) "Using Data to Attribute Episodes of Warming and Cooling in Instrumental Records," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 6 (January 23, 2013): 2058–2063, <https://doi.org/10.1073/pnas.1212471110>.
- Usoskin, I.G., S. K. Solanki, and G. A. Kovaltsov (2007) "Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints," *Astronomy & Astrophysics* 471, no. 1 (June 6, 2007): 301–309, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>.
- Velasco Herrera, V.M., B. Mendoza, and G. Velasco Herrera (2015) "Reconstruction and Prediction of the Total Solar Irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st Century," *New Astronomy* 34 (January 2015): 221–233, <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>.
- Visser, H. and A.C. Petersen (2012) Inferences on weather extremes and weather-related disasters: a review of statistical methods *Climates of the Past* 8, 265–286 <https://cp.copernicus.org/articles/8/265/2012/cp-8-265-2012.pdf>
- World Weather Attribution (2021) "Western North American Extreme Heat Virtually Impossible without Human-Caused Climate Change." July 7, 2021. <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>. 101
- Yuan, et al. (2024) Abrupt reduction in shipping emission as an inadvertent geoengineering termination shock produces substantial radiative warming. *Communications Earth and Environment* 5, 281 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01442-3
- Zeder, J., Sippel, S., Pasche, O. C., Engelke, S., & Fischer, E. M. (2023). The effect of a short observational record on the statistics of temperature extremes. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104090. <https://doi.org/10.1029/2023GL104090>

PARTIE III : IMPACTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES ET SUR LA SOCIÉTÉ

9 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'AGRICULTURE AUX ÉTATS-UNIS

Résumé du chapitre

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses preuves démontrent que l'augmentation des niveaux de CO₂ est bénéfique pour les plantes, y compris les cultures agricoles, et que le réchauffement induit par le CO₂ aura un effet positif net sur l'agriculture américaine. L'augmentation du CO₂ ambiant a également stimulé la productivité de toutes les principales cultures américaines. Il y a lieu de conclure que, dans l'ensemble, le changement climatique a été et continuera d'être neutre ou bénéfique pour la plupart des cultures agricoles américaines.

9.1 Analyses économétriques

Les analyses économétriques des effets du changement climatique sur l'agriculture ont cherché à intégrer des informations sur les variations à long terme des rendements agricoles en réponse aux changements de température et de précipitations, en se basant sur des hypothèses concernant le comportement adaptatif des agriculteurs. Une méthode se concentre sur les variations de la valeur des terres agricoles. Le raisonnement est que si le changement climatique est un avantage net à long terme pour l'agriculture, il devrait se traduire par une augmentation de la valeur marchande des terres agricoles, et inversement. Si certaines cultures peuvent bénéficier ou souffrir du changement climatique, une fois prises en compte les mesures d'adaptation prises par les agriculteurs, la valeur des terres agricoles constitue un indice permettant de déterminer si les changements sont susceptibles d'être bénéfiques ou non. Mendelsohn *et al.* (1994) ont examiné la relation entre les variations climatiques historiques et la valeur des terres agricoles et ont conclu que le réchauffement climatique serait légèrement bénéfique pour l'agriculture américaine.

La méthode de Mendelsohn *et al.*, appelée analyse ricardienne d'après David Ricardo, économiste britannique du XIX^e siècle qui a été le premier à étudier la valeur du foncier, a ensuite été critiquée par des auteurs qui estimaient qu'elle ne tenait pas compte des différences de valeur foncière attribuables à des caractéristiques fixes liées à l'emplacement, telles que la qualité du sol, et à des changements non climatiques, notamment l'urbanisation à proximité. Deschênes et Greenstone (2007) se sont intéressés aux profits agricoles plutôt qu'à la valeur des terres et sont parvenus à des conclusions similaires à celles de Mendelsohn *et al.* (1994), à savoir que les variations climatiques passées ont eu relativement peu d'effet sur la rentabilité des exploitations agricoles et que le réchauffement devrait avoir des effets globalement limités sur le secteur agricole américain. Toutefois, un échange ultérieur avec des détracteurs les a amenés (Deschênes et Greenstone 2012) à réviser leurs conclusions et à prévoir des pertes potentiellement importantes pour l'agriculture américaine en raison du réchauffement climatique.

Burke et Emerick (2016) ont examiné les variations de température entre 1980 et 2000 et ont fait valoir que les agriculteurs n'étaient pas aussi capables de s'adapter aux changements de température que le suppose la méthode ricardienne et que le changement climatique aurait des effets négatifs importants sur les rendements du maïs et du soja. Schlenker et Roberts (2009) ont également fait valoir que les gains de rendement liés au réchauffement passé ne se poursuivraient pas à l'avenir et que les rendements du maïs et du soja diminueraient fortement au cours de ce siècle en raison du changement climatique.

Deux études récentes ont démontré que ces conclusions pessimistes ne sont pas fondées. Ortiz-Bobea (2019) a fait valoir que la valeur foncière tient compte à la fois des influences agricoles et non agricoles, et que ces dernières doivent être filtrées. Il a élaboré un ensemble de données utilisant les loyers en espèces pour

l'activité agricole comme mesure de la valeur foncière spécifiquement pour l'activité agricole. Alors que le modèle de valeur foncière impliquait des pertes futures en cas de réchauffement climatique, le même modèle estimé à partir des loyers en espèces ne le faisait pas, ce qui a conduit l'auteur à conclure que les résultats pessimistes étaient dus à l'utilisation d'une mesure inexacte des rendements de l'activité agricole.

Bareille et Chakir (2023) ont constitué une vaste base de données sur les prix de vente des exploitations agricoles en France pour les propriétés vendues deux fois entre 1996 et 2019. Ils ont pu reproduire les résultats pessimistes montrant les effets négatifs du réchauffement sur la valeur des terres agricoles à l'aide d'une modélisation économétrique classique. Mais en tirant parti des données sur les ventes répétées, qui fournissent des informations sur l'évolution des prix fonciers spécifiques à chaque site, ils ont constaté que les résultats s'inversaient et impliquaient que le changement climatique serait très bénéfique pour l'agriculture française. Les auteurs ont conclu qu'en tenant compte de l'adaptation, le réchauffement climatique aurait des effets positifs pour l'agriculture française, compris entre deux et 20 fois plus importante que ce qui avait été estimé précédemment. En moyenne, avec une adaptation complète, ils ont conclu que les changements climatiques dans le scénario RCP4.5 moyen pourraient doubler la valeur des terres agricoles françaises d'ici 2100.

Une lacune majeure de toutes ces études est toutefois qu'elles omettent le rôle de la fertilisation par le CO₂. Le changement climatique tel qu'il est abordé dans le présent rapport est causé par les émissions de GES, principalement le CO₂ [NdT : les émissions venues des combustibles et des cimenteries représentent 5,5% du stock de dioxyde de carbone dans l'atmosphère dont la croissance est essentiellement le reflet des températures de surface des mers des zones de dégazage]. Les analyses économétriques mentionnées ci-dessus se concentrent uniquement sur les changements de température et de précipitations et ne tiennent pas compte de l'effet bénéfique sur la croissance du CO₂ supplémentaire qui les provoque. Comme expliqué au chapitre 2, le CO₂ est un facteur majeur de la croissance des plantes, de sorte que cette omission biaise l'analyse vers une sous-estimation des avantages du changement climatique pour l'agriculture.

9.2 Études sur le terrain et en laboratoire sur l'enrichissement en CO₂

L'un des moyens utilisés pour étudier l'effet du CO₂ sur la croissance des cultures consiste à réaliser des « expériences d'enrichissement en air libre » ou parcelles FACE, dans lesquelles de petites sources de CO₂ sont placées dans des champs entourant des plantes et où la réponse de la croissance à des concentrations élevées de CO₂ dans des conditions météorologiques variables est enregistrée. Ainsworth *et al.* (2020) résument les résultats d'environ 250 études de ce type. Ils ont constaté qu'une augmentation de 200 ppm du CO₂ entraînait une augmentation moyenne de 18 % du rendement des cultures C3. Les plantes C4 montrent cet effet surtout dans des conditions de sécheresse.

Outre les expériences menées sur des parcelles FACE, des milliers d'expériences en laboratoire ont été réalisées sur les effets du CO₂ sur la croissance de toutes sortes de plantes. Nous passons ici en revue certains des résultats obtenus pour les principales cultures de l'agriculture des États-Unis.

Soja

Des études sur l'impact d'une concentration élevée de CO₂ sur les plants de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) dans la région aride de la plaine de Huang-Huai-Hai, en Chine, ont montré qu'une concentration élevée de CO₂ améliorait le taux de photosynthèse, l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la croissance Li (2013) dans des conditions normales et en situation de sécheresse. Le site web CO2Science.org rend compte de 108 expériences publiées entre 1985 et 2019 exposant le soja à des niveaux élevés de CO₂. Convertis à une échelle commune de +300 ppm, le bénéfice moyen en termes de croissance était de +50,9 %.

Dix études ont également fait état d'une augmentation de 90,3 % de la photosynthèse pour un enrichissement en CO₂ de +600 ppm.

Maïs [Corn]

Le site web CO2Science.org rend compte de 28 expériences publiées entre 1983 et 2018 exposant du maïs (*Zea mays* L.) à des niveaux élevés de CO₂. Converti à une échelle commune de +300 ppm, le gain de croissance moyen était de +23,7 %. Le maïs bénéficie également d'une meilleure tolérance à la sécheresse dans des conditions de CO₂ élevé. Une étude expérimentale (Allen Jr., 2011) a exposé des plantes à des conditions de stress hydrique dans des chambres à environnement contrôlé ensoleillées à 360 ppm (ambiante) et 720 ppm (élevée) de CO₂. Le stress hydrique a entraîné une perte de croissance de 41 % dans des conditions ambiantes de CO₂, mais seulement de 13 % pour 720 ppm de CO₂.

Blé

Le site web CO2Science.org rend compte de 92 expériences publiées entre 1983 et 2020 exposant le blé commun (*Triticum aestivum* L.) à des niveaux enrichis de CO₂. Convertie à une échelle commune de +300 ppm, la croissance moyenne a augmenté de +67,6 %. Blandino (2020) a mesuré le rendement et la qualité nutritionnelle d'une variété de blé hybride « améliorée » et de ses parents sous des niveaux élevés de CO₂ (+166 ppm). Il a constaté une augmentation du rendement en grains de +16 %, mais une diminution de 7 % de la teneur en protéines des grains. Cependant, ils ont également constaté que la qualité alimentaire de différentes variétés de blé réagissait différemment à des niveaux élevés de CO₂, de sorte qu'avec une sélection variétale appropriée, les producteurs pouvaient choisir les types de blé qui tiraient le meilleur parti de l'augmentation du CO₂.

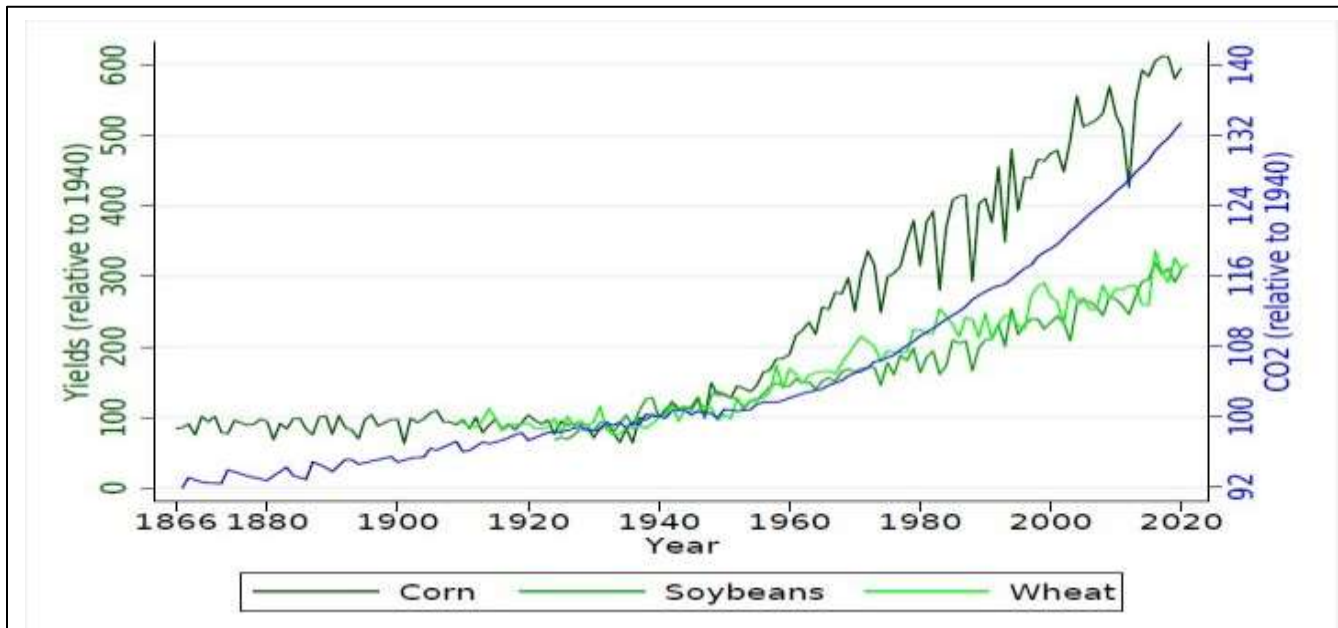


Figure 9.1 : Niveaux moyens de CO₂ aux États-Unis et rendements du maïs, du soja et du blé, tous normalisés de manière à ce que 1940 = 100. Source : Taylor et Schlenker (2021)

Preuves supplémentaires

Un rapport publié en 2021 par le National Bureau of Economic Research des États-Unis (Taylor et Schlenker 2021) a utilisé des observations satellitaires des niveaux de CO₂ en plein air à travers les États-Unis, associées à des données sur la production agricole au niveau des comtés et à d'autres variables économiques. Après avoir contrôlé les effets du climat, de la pollution et de la technologie, les auteurs ont conclu que les émissions de CO₂ avaient stimulé la production agricole américaine depuis 1940 de 50 à 80 %, attribuant des

gains beaucoup plus importants que ceux estimés précédemment à partir des expériences FACE. Ils ont constaté que chaque augmentation d'une partie par million (ppm) de la concentration de CO₂ augmente le rendement du maïs de 0,5 %, celui du soja de 0,6 % et celui du blé de 0,8 %.

Au-delà des avantages en termes de croissance, le CO₂ supplémentaire renforce la résilience des plantes à la sécheresse. Voir la discussion à la section 2.1.3.

9.3 Méta-analyses de modélisations des cultures

Malgré les nombreuses preuves des avantages directs du CO₂ et du réchauffement induit par le CO₂ sur la croissance des cultures, en 2023, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA 2023) a multiplié par cinq son estimation du coût social du carbone (SCC), en se basant principalement sur une estimation très pessimiste de 2017 des dommages agricoles mondiaux liés au réchauffement climatique (Moore *et al.*, 2017). L'un des deux modèles de dommages utilisés par l'EPA attribuait près de la moitié du SCC [Social Cost of Carbon] pour 2030 aux dommages agricoles mondiaux prévus sur la base de l'analyse de Moore *et al.* (2017). Cette étude était une méta-analyse d'études de modèles de cultures simulant les variations de rendement des cultures agricoles dans différents scénarios de réchauffement climatique. Moore *et al.* prévoyaient une baisse des rendements mondiaux pour tous les types de cultures dans toutes les régions en raison du réchauffement.

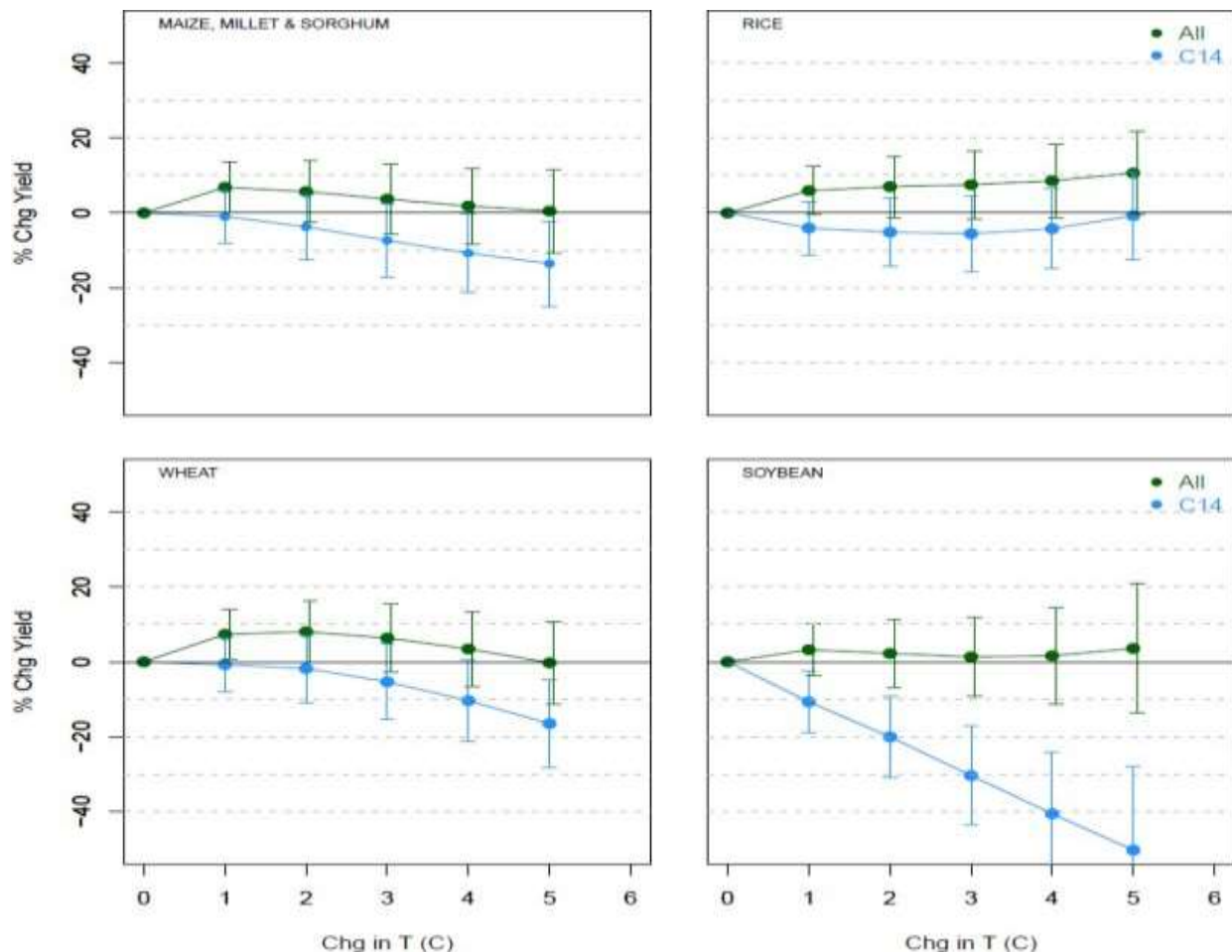


Figure 9.2 Rendements agricoles dans un contexte de réchauffement climatique induit par le CO₂. Bleu : tel que publié dans Moore *et al.* (2017). Vert : après inclusion des données omises. Source : McKittrick (2025).

McKittrick (2025) a réexaminé la base de données de Moore *et al.* et a constaté que, bien qu'elle prétende couvrir 1722 études, seule la moitié des entrées (N = 862) comportaient des enregistrements complets, de sorte

que l'échantillon disponible pour l'analyse de régression était beaucoup plus petit que ce qu'indiquaient les deux études. McKittrick a noté que les données les plus souvent manquantes concernaient les variations de la concentration ambiante de CO₂ et a constaté que, dans de nombreux cas, celles-ci pouvaient être récupérées à partir des études sous-jacentes ou des tableaux originaux des scénarios climatiques, ce qui a permis d'augmenter la taille de l'échantillon utilisable de 40 %. Les projections de rendement des cultures intégrant les nouvelles données disponibles ont considérablement changé. Comme le montre la figure 9.2, alors que l'ensemble de données partielles impliquait que le réchauffement entraînerait une baisse des rendements (lignes bleues), l'ensemble de données complet impliquait des rendements mondiaux constants ou en augmentation, même avec un réchauffement de 5 °C (lignes vertes).

9.4 Fertilisation par le CO₂ et perte de nutriments

Il a été démontré que les gains de biomasse induits par le CO₂ s'accompagnent parfois d'une réduction des concentrations en protéines et autres nutriments essentiels tels que le fer et le zinc (Ebi *et al.* 2021). Certaines expériences ont montré que la hausse des températures qui devrait accompagner l'augmentation des concentrations de CO₂ compensera cette perte (Köhler *et al.* 2019), bien que les preuves à cet égard soient mitigées, tout comme celles indiquant que la dilution des nutriments observée à ce jour est entièrement attribuable à l'augmentation du CO₂ (Ziska 2022).

Si une dilution des nutriments se produit effectivement dans un contexte d'augmentation des concentrations de CO₂ plusieurs stratégies d'adaptation pourraient être mises en œuvre.

D'abord, la sélection génétique visant à augmenter la teneur en micronutriments est déjà bien établie (Saltzman *et al.* 2017) et s'est avérée être une stratégie agricole rentable (Ebi *et al.* 2021). Les stratégies peuvent inclure à la fois la sélection conventionnelle et les organismes génétiquement modifiés. Un exemple de cette dernière approche est le riz doré, qui contient des niveaux élevés de bêta-carotène afin de stimuler la biosynthèse de la vitamine A dans l'organisme humain. Les stratégies optimales seront spécifiques à chaque lieu, car elles varient en fonction des cultures, du climat et du type de sol (Ebi *et al.* 2021).

Deuxièmement, l'enrichissement des produits alimentaires en micronutriments est déjà une pratique courante. L'acide folique (une vitamine B) est ajouté à la farine et à de nombreux autres aliments ; l'iode est ajouté au sel de table, la plupart des céréales commerciales pour le petit-déjeuner sont enrichies en fer et en nombreuses vitamines, *etc.*

Troisièmement, les compléments alimentaires sous forme de comprimés multivitaminés sont peu coûteux, largement disponibles et consommés régulièrement.

Une préoccupation concernant le recours à des stratégies adaptatives est de savoir si elles sont réalisables dans les pays à faible revenu. Les carences en micronutriments constituent déjà un problème dans les pays en développement et les compléments alimentaires se sont avérés être une réponse efficace et peu coûteuse (Ebi *et al.* 2021). Il convient également de noter que les scénarios d'émissions du GIEC qui génèrent des niveaux élevés de réchauffement impliquent également une forte croissance des revenus.

Les scénarios SSP⁴ partent du principe que, par rapport aux niveaux de 2005, le revenu mondial par habitant doublera d'ici 2100 dans le scénario de croissance la plus faible (SSP3) et que, dans le scénario avec les émissions les plus élevées (SSP5), il sera multiplié par près de 16.

⁴ See compilation at Our World in Data.

Dans ce scénario SSP5 même les régions les plus pauvres (Afrique et Moyen-Orient) atteignent [en 2100] un revenu par habitant d'environ 126 000 dollars américains, soit 70 % de plus que le revenu par habitant actuel des États-Unis (d'environ 75 000 dollars américains). Par conséquent, les scénarios dans lesquels les niveaux de CO₂ augmentent le plus sont également ceux dans lesquels la pauvreté mondiale est largement éliminée, auquel cas tous les pays seraient en mesure de se procurer les compléments alimentaires nécessaires pour combler les carences en micronutriments, si celles-ci apparaissaient et ne pouvaient être comblées par des stratégies au niveau des exploitations agricoles.

En résumé, il existe de nombreuses preuves, remontant à plusieurs décennies, que l'augmentation des niveaux de CO₂ est bénéfique pour les plantes, y compris les cultures agricoles, et que le réchauffement induit par le CO₂ aura un effet net positif sur l'agriculture américaine. Dans la mesure où une dilution des nutriments se produit, il existe des stratégies d'atténuation qui devront être étudiées et adaptées aux conditions locales.

Références

- Ainsworth, Elizabeth and Stephen P. Long (2020) 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology* <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Allen Jr, L. K. (2011). Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water limited maize and sorghum. *Journal of Plant physiology*, 168(16), 1909-1918.
- Bareille, F. and R. Chakir (2023) The impact of climate change on agriculture: A repeat-Ricardian analysis. *Journal of Environmental Economics and Management* 119
- Blandino, M. B. (2020). Elevated CO₂ impact on common wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(39), 10574-10585.
- Burke, Marshall and Kyle Emerick (2016) Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy* 8(3) August 2016 106—140
<https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/pol.20130025>
- Cheng, L., Zhang, L., Wang, YP. et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. *Nature Communications* 8, 110 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5>
- CO2Science.org (undated) Plant growth archive
http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/dry_subject_b.php
- Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C. et al. (2021) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change* 6, 786–790 (2016).
<https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
- Deschênes, Olivier and Michael Greenstone (2012) The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather: Reply to Comment *American Economic Review*. 102, no. 7: 3761-3773. <http://hdl.handle.net/1721.1/82641>
- Ebi, Kristie L, C Leigh Anderson, Jeremy J Hess, et al. (2021) Nutritional quality of crops in a high CO₂ world: an agenda for research and technology development. *Environmental Research Letters* 16(6) 064045
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abfcfa>
- Köhler, Iris H., Steven C. Huber, Carl J. Bernacchi, Ivan R. Baxter (2019) Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO₂ concentrations. *The Plant Journal* 97(5) 872 – 886 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/tpj.14166>
- Li, D. L. (2013). Effects of elevated CO₂ on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105-112.
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>

- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *The American Economic Review*, Sept 1994 753-771.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Ortiz-Bobea, Ariel (2019) The role of nonfarm influences in ricardian estimates of climate change impacts on US agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*. 102 (3), 934–959.
- Saltzman, Amy, Ekin Birol, Adewale Oparinde et al. (2017) Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. *Annals of the New York Academy of Sciences* Volume 1390, Issue1 <https://doi.org/10.1111/nyas.13314>
- Schlenker, Wolfram and Michael Roberts (2009) Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (37) 15594-15598 <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Taylor, Charles and Wolfram Schlenker (2023) Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO2 fertilization of US field crops. National Bureau of Economic Research Working paper 29320, <https://www.nber.org/papers/w29320>
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, Nov. 2023, https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
- Zhang et al. (2024) Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. *Nature Communications Earth and Environment* 5 June 2024 <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y>
- Ziska, Lewis H (2022) Rising Carbon Dioxide and Global Nutrition: Evidence and Action Needed. *Plants* 1(7), 1000; <https://doi.org/10.3390/plants11071000>

10 GÉRER LES RISQUES LIÉS AUX PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Résumé du chapitre

Les tendances en matière de pertes liées aux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes sont dominées par l'augmentation de la population et la croissance économique. Les progrès technologiques, tels que l'amélioration des prévisions météorologiques et des systèmes d'alerte précoce, ont considérablement réduit les pertes liées aux phénomènes météorologiques extrêmes. L'amélioration des codes de construction, des défenses contre les inondations et des mécanismes d'intervention en cas de catastrophe a permis de réduire les pertes économiques rapportées au PIB. L'expansion de l'économie américaine a atténué l'impact relatif des coûts des catastrophes, comme le montre la comparaison des pourcentages du PIB historique et moderne. Le risque de mortalité lié à la chaleur a considérablement diminué grâce à des mesures d'adaptation, notamment l'adoption de la climatisation, qui dépend de la disponibilité d'une énergie abordable. Même dans des scénarios de réchauffement extrême, les risques de mortalité aux États-Unis ne devraient pas augmenter si la population est en mesure de prendre des mesures d'adaptation.

10.1 Le contexte socio-économique

Les risques liés au changement climatique d'origine humaine sont influencés par la variabilité naturelle des conditions météorologiques et climatiques et sont principalement liés à l'exposition des richesses dans les régions côtières et autres régions sujettes aux catastrophes, ainsi qu'à la vulnérabilité des populations les plus pauvres. L'évolution des risques climatiques aux États-Unis a été principalement influencée par des facteurs sociétaux plutôt que par des changements réels des conditions météorologiques et climatiques. Le nombre de décès dus à des catastrophes météorologiques a considérablement diminué depuis 1900, alors même que la population américaine est passée de 76 millions en 1900 à plus de 331 millions en 2020 (Goklany 2011). Par exemple, l'ouragan de Galveston a tué plus de 8 000 personnes en 1900 (0,01 % de la population américaine), tandis que la pire catastrophe récente, l'ouragan Katrina en 2005, a tué 1 800 personnes (soit 0,0006 % de la population américaine) (NOAA National Hurricane Center 2025 ; U.S. Census Bureau 2025).

Les progrès technologiques ont considérablement réduit les pertes causées par les phénomènes météorologiques extrêmes. Les systèmes d'alerte précoce, la surveillance par satellite et l'amélioration des prévisions météorologiques ont permis de réduire le nombre de décès, bien que les chiffres exacts soient difficiles à quantifier (Deryugina et Hsiang 2023). On estime que les prévisions météorologiques aux États-Unis permettent de réduire les pertes liées aux phénomènes météorologiques de 31,5 milliards de dollars par an, protégeant ainsi des vies et des biens et soutenant l'agriculture et les transports (NRC 2010). L'amélioration des prévisions relatives aux ouragans a permis de réduire les dépenses avant et après leur arrivée, avec une réduction annuelle des coûts par ouragan estimée à 5 milliards de dollars (Molina et Rudik 2024).

Les améliorations apportées aux infrastructures ont contribué à réduire considérablement les pertes causées par les phénomènes météorologiques extrêmes. Les codes de construction, tels que ceux mis en œuvre en Floride après l'ouragan Andrew (1992), ont permis de réduire les pertes en garantissant que les structures puissent résister à des vents violents et à des inondations. Les maisons construites après 2002 ont subi des dommages minimes lors de l'ouragan Michael (2018), contrairement aux maisons plus anciennes (FEMA 2020). Les digues, comme celle de Galveston, protègent contre l'action des vagues et les ondes de tempête. Le système de réduction des risques liés aux ouragans et aux tempêtes de la Nouvelle Orléans a permis d'atténuer avec succès les ondes de tempête lors de l'ouragan Isaac (2012) (Battelle Memorial Institute 2013).

Aux États-Unis, les barrages intérieurs contribuent à contrôler les inondations en stockant l'excès d'eau lors de fortes pluies. On estime que les barrages de la Tennessee Valley Authority (TVA) permettent d'éviter environ 309 millions de dollars de dommages annuels liés aux inondations dans la région de la TVA et le long des fleuves Ohio et Mississippi (TVA, 2025). Lors de l'ouragan Helene (2024), les stratégies de la TVA ont permis d'éviter environ 406 millions de dollars de dommages potentiels (APPA 2024).

10.2 Les défis liés aux données

Depuis 1980, la NOAA fournit un décompte des catastrophes météorologiques annuelles aux États-Unis dont elle estime le coût à plus d'un milliard de dollars (ajusté en fonction de l'inflation), qui affiche une augmentation substantielle depuis 2008. La NOAA et d'autres responsables gouvernementaux ont cité la tendance à la hausse de la série des catastrophes d'un milliard de dollars comme preuve que le changement climatique aggrave les phénomènes météorologiques extrêmes (Pielke Jr., 2024). Mais au fil du temps, la population et la richesse ont considérablement augmenté aux États-Unis, de sorte que lorsqu'un événement météorologique ou climatique extrême se produit, les dégâts sont plus importants, même s'il n'y a pas de tendance sous-jacente dans la fréquence ou l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes. Pielke Jr. (2024) démontre que les pertes par catastrophe météorologique en pourcentage du PIB ont diminué d'environ 80 % depuis 1980, comme le montre la figure 10.1. Pielke Jr. (2024) a également fait valoir qu'en plus de s'appuyer sur des sources de données opaques et des ajustements non déclarés, la NOAA n'avait pas normalisé correctement sa série de données sur les catastrophes d'un milliard de dollars pour tenir compte de l'évolution de l'exposition de la population et de la richesse. En mai 2025, la NOAA a annoncé qu'elle retirait de la publication son produit « Billion Dollar Disaster » (Pielke Jr., 2025).

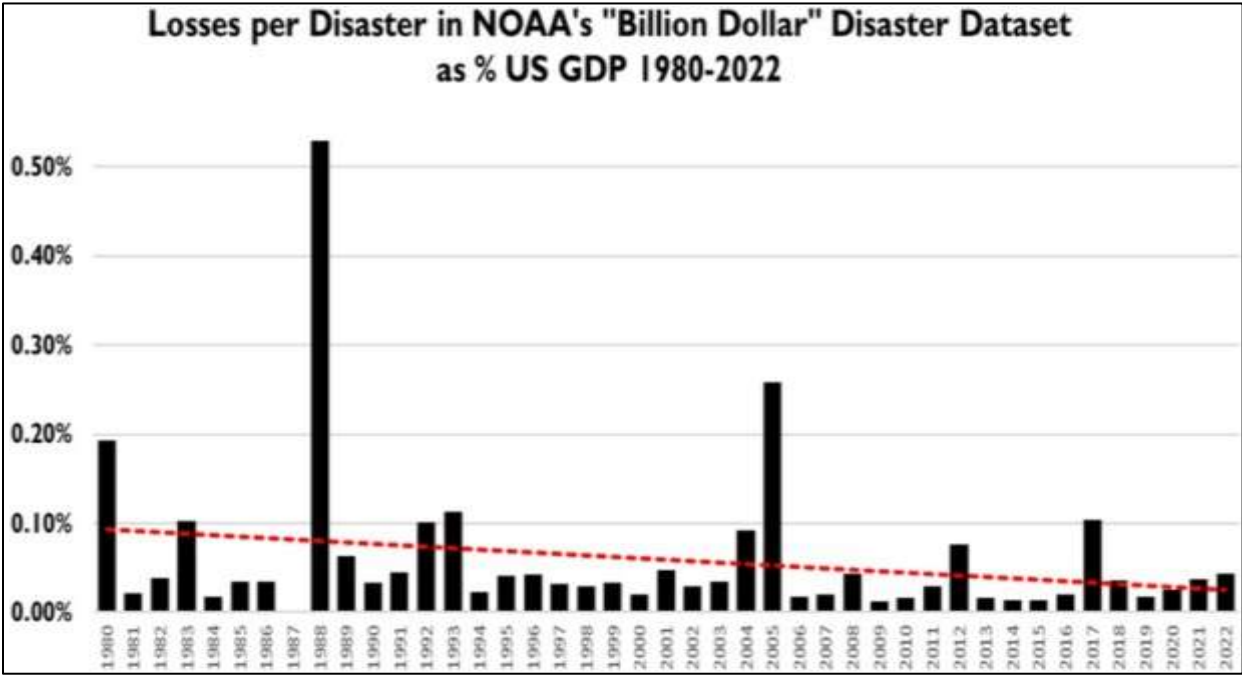


Figure 10.1 : Pertes par catastrophe en pourcentage du produit intérieur brut dans la base de données des catastrophes d'un milliard de dollars et plus de la NOAA (version téléchargée en juillet 2023), 1980 à 2022. Source : (Pielke, Jr. 2024)

En résumé les tendances des pertes liées aux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes sont dominées par l'augmentation de la population et la croissance économique. Les progrès technologiques, tels que

l'amélioration des prévisions météorologiques et des systèmes d'alerte précoce, ont considérablement réduit les pertes liées aux phénomènes météorologiques extrêmes.

L'amélioration des codes de construction, des défenses contre les inondations et des mécanismes d'intervention en cas de catastrophe a permis de réduire les pertes économiques par rapport au PIB. Enfin, l'expansion de l'économie américaine a atténué l'impact relatif des coûts des catastrophes, comme le montre la comparaison des pourcentages du PIB historique et moderne.

10.3 Mortalité due aux températures extrêmes

10.3.1 Risques liés à la chaleur et au froid

Les changements dans les températures extrêmes comptent parmi les impacts les plus certains attendus dans un monde en réchauffement. Il va de soi que les épisodes de chaleur extrême devraient devenir plus fréquents, tandis que les épisodes de froid extrême devraient devenir moins fréquents. Cette tendance est évidente dans la période historique, mais pas dans la région continentale des États-Unis (chapitre 6), et devrait se poursuivre avec le réchauffement.

La mortalité pendant les épisodes de chaleur extrême est généralement causée par des coups de chaleur et des épuisements, tandis que la mortalité pendant les épisodes de froid extrême est généralement due à l'hypothermie et à des tensions cardiaques. La mortalité mondiale est nettement plus élevée dans des conditions froides que dans des conditions chaudes (Zhao et al. 2021, Ritchie 2024).

Contrairement à la mortalité liée à la chaleur, les risques liés au froid apparaissent même dans des conditions modérément froides (Gasparini *et al.* 2015, Lee et Dessler 2023). L'EPA américaine (citant des données des Centers for Disease Control) rapporte qu'en moyenne, entre 1999 et 2015, il y a eu 2,2 décès par million d'Américains pour lesquels le froid était la cause principale et 2,4 décès supplémentaires par million pour lesquels le froid était un facteur contributif (EPA 2025). En revanche, on a dénombré 1,3 décès par million pour lesquels la chaleur était la cause principale et 0,8 décès supplémentaires par million pour lesquels elle était un facteur contributif. Selon cet indicateur, le froid est responsable d'environ deux fois plus de décès liés aux conditions météorologiques que la chaleur.

Les méthodes épidémiologiques qui tiennent compte des preuves tirées de corrélations et pas seulement des rapports des certificats de décès, indiquent que le rapport froid/chaud pourrait être beaucoup plus élevé. Une étude menée dans 13 pays sur 74 millions de décès entre 1985 et 2012 a estimé qu'en moyenne, 7,7 % des décès étaient attribuables à des températures sous-optimales, dont 7,4 % étaient attribuables au froid et seulement 0,4 % à la chaleur (Gasparini *et al.* 2015). En d'autres termes, le froid a tué 18,5 fois plus de personnes que la chaleur.

La figure 10.2 montre la répartition des résultats de Gasparini *et al.* (2015) par pays. Aux États-Unis, la proportion de décès attribuables à la température était de 5,9 %, dont 5,5 % étaient dus au froid, ce qui signifie que le froid a tué 14 fois plus de personnes que la chaleur.

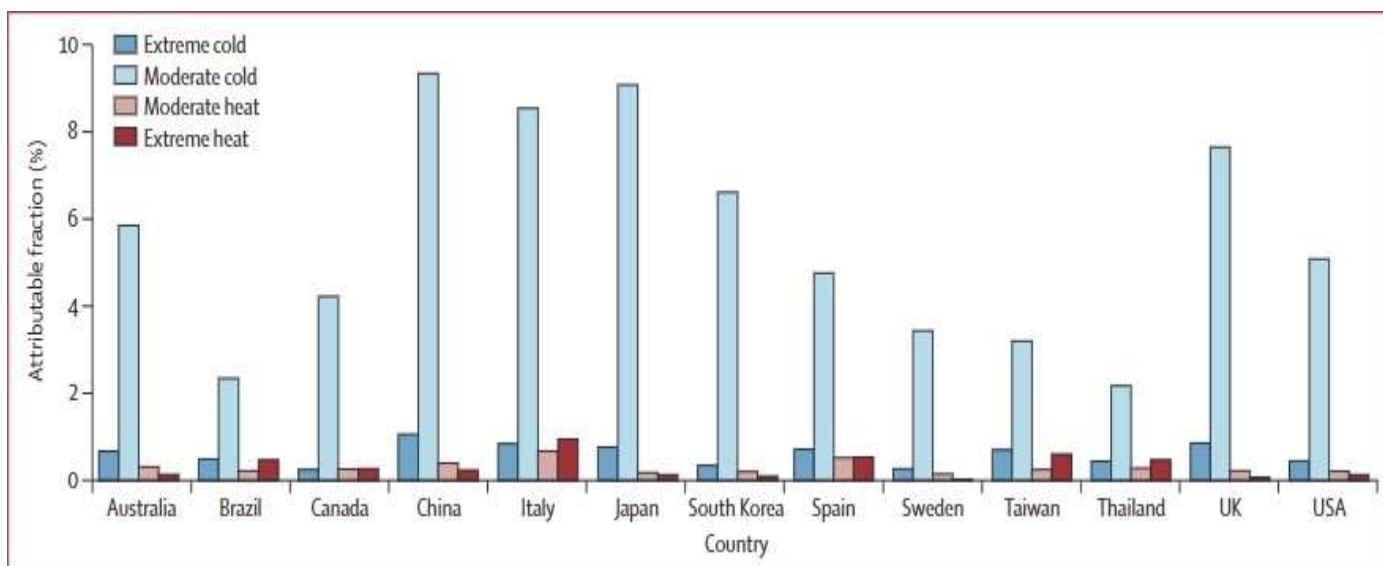


Figure 10.2. Mortalité attribuable au froid et à la chaleur extrêmes et modérés par pays. Source : reproduit à partir de Gasparini *et al.* (2015).

Il existe des preuves solides que les populations s'adaptent aux risques climatiques. Lee et Dessler (2023) ont rapporté que 86 % des décès liés à la température dans 40 villes des États-Unis étaient dus à la mortalité liée au froid et que, grâce à l'adaptation, le risque relatif de décès diminuait dans les villes chaudes comme dans les villes froides à mesure que les températures saisonnières augmentaient. Allen et Sheridan (2018) ont constaté que les épisodes de froid courts et précoces étaient 2 à 5 fois plus mortels que les épisodes de chaleur, mais que le risque de mortalité lié aux températures extrêmes, qu'elles soient froides ou chaudes, tombait à près de zéro si ces épisodes se produisaient tard dans la saison.

Davis *et al.* (2003) ont examiné la mortalité liée à la chaleur dans 28 villes américaines entre les années 1960 et la fin des années 1990 et ont constaté qu'elle avait diminué de trois quarts au cours de la période étudiée. Bobb *et al.* (2014) ont examiné les données de mortalité de 106 millions de personnes dans plus de 100 villes américaines et ont constaté une baisse de 60 % de la mortalité moyenne liée à la chaleur entre 1987 et 2005, passant de 51 pour mille décès à 19 pour mille décès. Ils ont en outre constaté que la baisse la plus importante concernait les personnes âgées de plus de 75 ans. Dans une étude portant sur 42 millions de décès survenus dans 211 villes américaines entre 1962 et 2006, Nordio *et al.* (2015) ont constaté une baisse de plus de 90 % du risque de mortalité due à la chaleur excessive.

Dans le contexte d'une forte baisse de la mortalité liée à la chaleur, l'augmentation des températures est associée à un gain net en termes de vies sauvées, car elle réduit la mortalité due aux épisodes de froid. Le chapitre 16.2.3.5 du rapport AR6 du groupe de travail 2 (O'Neill *et al.* 2022) reconnaît que le risque de mortalité lié à la chaleur diminue avec le temps :

Les fractions de mortalité attribuables à la chaleur ont diminué au fil du temps dans la plupart des pays grâce à l'amélioration générale des systèmes de santé, à la généralisation de la climatisation dans les logements et aux changements de comportement. Ces facteurs, qui déterminent la vulnérabilité de la population à la chaleur, ont prédominé sur l'influence du changement de température.

Pourtant, le GIEC présente une image faussée de la situation globale dans son rapport de synthèse AR6. La section A.2.5 de ce document indique : « Dans toutes les régions, l'augmentation des épisodes de chaleur

extrême a entraîné une mortalité et une morbidité humaines (confiance très élevée) ». Mais il ne mentionne pas la baisse plus importante du nombre de décès lors d'épisodes de froid extrême.

La baisse observée de la mortalité liée à la chaleur aux États-Unis a été spécifiquement attribuée à l'adaptation. Wang *et al.* (2018) ont exploité la variabilité spatiale de la mortalité liée aux vagues de chaleur dans 209 villes américaines entre 1962 et 2006. Si une simple corrélation semblait indiquer une augmentation du risque de mortalité pendant les vagues de chaleur, la prise en compte de l'adaptation à l'intensité des vagues de chaleur a fait chuter cet effet à près de zéro et l'a rendu statistiquement insignifiant. Ils ont utilisé les résultats de leur modèle épidémiologique pour projeter la mortalité liée à la chaleur jusqu'en 2050 selon quatre scénarios de réchauffement RCP (dont RCP8.5) avec et sans comportement adaptatif. En supposant que les populations continuent de s'adapter aux risques liés aux vagues de chaleur dans les régions où elles vivent, Wang *et al.* (2018) prévoient non seulement aucune augmentation de la mortalité liée à la chaleur, mais aussi *une diminution* globale de la mortalité aux États-Unis. Ils concluent que

Ignorer l'adaptation entraînerait une surestimation considérable de la mortalité future liée aux vagues de chaleur... En tenant compte de l'adaptation, la mortalité globale liée à la chaleur d'ici 2050 ne changerait pas de manière significative par rapport à 2006.

10.3.2 Risques de mortalité et coûts de l'énergie

Une étude réalisée en 2016 sur les risques de mortalité à long terme aux États-Unis associés aux variations de température (Barreca *et al.* 2016) a montré que l'augmentation de la mortalité dans ce pays est liée à la fois au froid et à la chaleur. Mais au fil du temps, l'introduction de l'électricité et l'adoption du chauffage central et de la climatisation (AC) ont considérablement réduit ces deux risques, en particulier ceux liés aux températures élevées. Avant 1960, une journée où la température dépassait 32 °C (90 °F) augmentait de 2,2 % le taux moyen de risque de mortalité, mais après 1960, les mêmes conditions météorologiques n'augmentaient plus que de 0,3 % le risque de mortalité, soit une réduction de 85 %. Avant 1960, les températures inférieures à 4 °C (39 °F) augmentaient le risque de mortalité d'environ 1 %, mais après 1960, ces mêmes conditions météorologiques n'ont augmenté ce risque que de moitié environ. L'adaptation grâce à des améliorations conventionnelles des logements a considérablement réduit la vulnérabilité de la population aux conditions météorologiques extrêmes. La réduction totale de la mortalité due à la chaleur est attribuable à l'adoption généralisée de la climatisation intérieure, qui dépend de la disponibilité d'une électricité fiable et abordable.

La conséquence de cette constatation est que l'utilisation des systèmes de chauffage et de climatisation dépend du prix de l'énergie. Doremus *et al.* (2022) ont montré que les ménages riches et pauvres aux États-Unis ajustent leurs dépenses énergétiques à des taux similaires en réponse à des variations modérées de température, mais pas en réponse à des variations extrêmes. Lorsque les températures descendent à des niveaux très froids (< 5 °C), les dépenses énergétiques des ménages à revenus élevés augmentent de 1,2 %, mais seulement de 0,5 % dans les ménages à faibles revenus. Lors de journées très chaudes (> 30 °C), les dépenses en électricité des ménages à revenus élevés augmentent de 0,5 %, mais ne changent pas du tout dans les ménages à faibles revenus. Ce dernier résultat est observé même dans les sous-échantillons où tous les ménages sont équipés de climatisation. Cong *et al.* (2022) rapportent des résultats similaires pour un échantillon de ménages en Arizona. Cela signifie que même avec la généralisation des systèmes de chauffage et de climatisation dans les foyers, l'incapacité à payer l'énergie expose les ménages à faibles revenus aux conditions météorologiques extrêmes.

Références

- Allen, M.J. and S.C. Sheridan (2018) Mortality risks during extreme temperature events (ETEs) using a distributed lag non-linear model. (2018) *International Journal of Biometeorology* 62, 57–67 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1117-4>
- American Public Power Association. (APPA, 2024, March 7). TVA flood mitigation strategies prevented approximately \$406 million in potential damages. *Public Power Current*. <https://www.publicpower.org/periodical/article/tva-flood-mitigation-strategies-prevented-approximately-406-million-potential-damages>
- Barreca, Alan, Karen Clay, Olivier Deschenes, Michael Greenstone, and Joseph S Shapiro (2016), Adapting to climate change: The remarkable decline in the US temperature mortality relationship over the twentieth century, *Journal of Political Economy*, 2016, 124 (1), 105–159.
- Battelle Memorial Institute. (2013, December). Final independent external peer review report: Hurricane Isaac (2012) assessment (Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, New Orleans District). <https://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/PeerReview/TCN13003HurrIsaacAssessIEPRFinal.pdf>
- Bobb JF, RD Peng, ML Bell and F Dominici (2014) Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environmental Health Perspectives* 122:811–816; <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307392>
- Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, Y.L. et al. Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. *Nature Communications* 13, 2456 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>
- Davis, Robert E., Paul C. Knappenberger, Patrick J. Michaels and Wendy M. Novicoff (2003) “Changing Heat-Related Mortality in the United States” *Environmental Health Perspectives* 111(14) November 2003 pp. 1712—1718 <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.6336>
- Deryugina, T., & Hsiang, S. M. (2023). Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States (NBER Working Paper No. 31361). National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w31361>
- Doremus, JM, I. Jacqz and S. Johnston (2022), “Sweating the energy bill: Extreme weather, poor households, and the energy spending gap.” *Journal of Environmental Economics and Management*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102609>.
- Environmental Protection Agency (2025) Climate Change Indicators. <https://www.epa.gov/climate-indicators/view-indicators>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020, February 13). The role of Florida’s building codes in Hurricane Michael recovery. <https://www.fema.gov/case-study/role-floridas-building-codes-2018-hurricane-michael>
- Gasparini, A., Y. Guo, M. Hashizume et al. (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet* 386: 369-385 July 25, 2015 [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Goklany, I. M. (2011). Deaths from extreme weather events, 1900–2010. Reason Foundation. https://a8d50b36.delivery.rocketcdn.me/wpcontent/uploads/2011/09/deaths_from_extreme_weather_1900_2010.pdf
- Lee, Jangho and Andrew Dessler (2023) Future Temperature-Related Deaths in the U.S.: The Impact of Climate Change, Demographics, and Adaptation. *GeoHealth* 7(8) August 2023 <https://doi.org/10.1029/2023GH000799>
- Molina, R and I Rudik (2024) The value of improving hurricane forecasts. National Bureau of Economic Research Working Paper 32548 June 2024. <https://www.nber.org/digest/202409/value-improving-hurricane-forecasts>

- National Hurricane Center. (n.d.). Costliest U.S. tropical cyclones tables updated. NOAA National Hurricane Center. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.nhc.noaa.gov/outreach/history/> National Research Council. (2010). Adapting to the impacts of climate change. The National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/12888/chapter/2>
- Nordio, Francesco, Antonella Zanobetti, Elena Colicino, Itai Kloog and Joel Schwartz (2015). “Changing patterns of the temperature–mortality association by time and location in the US, and implications for climate change” *Environment International* Volume 81, pp 80-86 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.009>.
- O'Neill, B., et al. (2022). Key risks across sectors and regions. In AR6 Working Group II Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 2411–2538). Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch
- Pielke Jr., R. (2024). Scientific integrity and U.S. 'billion dollar disasters'. *npj Natural Hazards*, 1, Article 12. <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0>
- Pielke Jr., R. (2025, May 8). RIP NOAA's billion dollar disasters. The Honest Broker [Substack]. <https://rogerpielkejr.substack.com/p/rip-noaas-billion-dollar-disasters>
- Ritchie, H. (2024). How many people die from extreme temperatures, and how this could change in the future: Part one. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future>
- Tennessee Valley Authority (TVA). (n.d.). Flood management. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.tva.com/environment/managing-the-river/flood-management>
- U.S. Census Bureau. (n.d.). Decennial census by decade. Retrieved May 8, 2025, from <https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census/decade.html>
- Wang, Yan, Francesco Nordio, John Nairn, Antonella Zanobetti and Joel D. Schwartz (2018) “Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality” *Environmental Research* 161 pp. 464—471. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.049>
- Zhao, Q., et al. (2021). Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: A three-stage modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(7). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4)

11 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, L'ÉCONOMIE ET LE COÛT SOCIAL DU CARBONE

Résumé du chapitre

Les économistes ont longtemps considéré le climat comme un facteur relativement peu important pour la croissance économique, un point de vue repris par le GIEC lui-même dans son cinquième rapport d'évaluation. La plupart des économistes spécialisés dans le climat reconnaissent que le réchauffement induit par le CO₂ pourrait avoir certains effets économiques négatifs, mais ceux-ci sont trop faibles pour justifier une politique de réduction agressive et que tenter de « stopper » ou de plafonner le réchauffement climatique, même à des niveaux bien supérieurs à l'objectif de Paris, serait pire que de ne rien faire.

Une étude influente publiée en 2012 suggérait que le réchauffement climatique nuirait à la croissance des pays pauvres, mais cette conclusion s'est par la suite révélée peu solide. Les études qui tiennent pleinement compte des incertitudes liées à la modélisation ne trouvent soit aucune preuve d'un effet négatif des émissions de CO₂ sur la croissance mondiale, soit que les pays pauvres sont susceptibles d'en bénéficier autant que les pays riches.

Les estimations du coût social du carbone (SCC Social Cost of Carbon) sont très incertaines en raison des incertitudes liées à la croissance économique future, aux trajectoires socio-économiques, aux taux d'actualisation, aux dommages climatiques et aux réponses du système. Le SCC n'est pas intrinsèquement informatif quant aux impacts économiques ou sociétaux du changement climatique. Il fournit un indice reliant un vaste réseau d'hypothèses sur le climat et l'économie à une valeur monétaire. Certaines hypothèses aboutissent à un SCC élevé, d'autres à un SCC faible ou négatif (c'est-à-dire un bénéfice social des émissions). Les preuves à l'appui ou à l'encontre des hypothèses sous-jacentes doivent être établies de manière indépendante ; le SCC qui en résulte n'apporte aucune information supplémentaire sur la validité de ces hypothèses. La prise en compte de points de basculement potentiels ne justifie pas de révisions majeures des estimations du SCC.

11.1 Changement climatique et croissance économique

11.1.1 Aperçu

On observe depuis longtemps que les économies ont tendance à être moins performantes dans les régions très froides et très chaudes, la température optimale se situant quelque part entre les deux (Nordhaus, 2006). Cela implique que le réchauffement aura tendance à être néfaste dans les régions chaudes, mais bénéfique dans les régions froides. Les activités économiques sensibles à la température migrent, dans la mesure du possible, vers les endroits qui leur sont les plus propices, et la société s'adapte au climat local. S'appuyant en partie sur ces observations, Thomas Schelling, alors président de l'American Economic Association, a fait valoir en 1992 que les effets du changement climatique sur l'activité économique américaine seraient faibles par rapport aux nombreux autres changements qui se produiraient (Schelling 1992).

... La fabrication dépend rarement du climat, et là où la température et l'humidité jouaient autrefois un rôle important, la climatisation est désormais utilisée. Lorsque Toyota choisit entre l'Ohio, l'Alabama et le sud de la Californie pour implanter une usine d'assemblage automobile, les considérations

géographiques sont importantes, mais pas en raison du climat... La finance est peu affectée par le climat, tout comme les soins de santé, l'éducation ou la radiodiffusion. Les transports peuvent être affectés, mais les améliorations apportées aux atterrissages et décollages par tous les temps au cours des 30 dernières années sont plus importantes que les différences climatiques. Si l'effet moyen est un réchauffement, des voies navigables couvertes de glace et le déneigement pourraient perdre de leur importance.

La construction est affectée, principalement par le froid, et si l'effet moyen va dans le sens d'un réchauffement, la construction pourrait en bénéficier légèrement.

C'est en réalité l'agriculture qui est touchée. Mais même si la productivité agricole diminuait d'un tiers au cours du prochain demi-siècle, le PNB par habitant que nous aurions pu atteindre en 2050 ne serait plus alors atteint qu'en 2051.

...

Je conclus qu'aux États-Unis, et probablement au Japon, en Europe occidentale et dans d'autres pays développés, l'impact sur la production économique sera négligeable et peu susceptible d'être remarqué.

Trente ans plus tard, le GIEC lui-même a fait valoir pratiquement le même argument dans son cinquième rapport d'évaluation (Arent *et al.* 2014, italiques ajoutés)

Pour la plupart des secteurs économiques, l'impact du changement climatique sera faible par rapport à celui d'autres facteurs. Les changements démographiques, l'âge, les revenus, la technologie, les prix relatifs, les modes de vie, la réglementation, la gouvernance et de nombreux autres aspects du développement socioéconomique auront un impact sur l'offre et la demande de biens et services économiques qui sera important par rapport à l'impact du changement climatique.

Les données disponibles depuis le cinquième rapport d'évaluation ne modifient pas cette évaluation. Mohaddes *et al.* (2023) ont constaté que les chocs climatiques chauds ont de faibles effets négatifs sur la production au niveau des États américains, mais pas sur les revenus, tandis que les chocs climatiques froids ont des effets négatifs sur les deux, et que ces effets sont environ quatre fois plus importants, ce qui implique qu'un réchauffement climatique aurait, au pire, un bénéfice économique net pour les États-Unis.

Ces affirmations sont confirmées par l'expérience. Depuis 1900, l'anomalie moyenne de la température mondiale à la surface de la Terre a augmenté de 1,3 °C, soit environ autant que ce que prévoit le GIEC pour le siècle prochain dans un scénario d'émissions modérées. Mais même si le globe s'est réchauffé et que la population a quintuplé, l'humanité a prospéré comme jamais auparavant. Par exemple, l'espérance de vie moyenne mondiale est passée de trente-deux ans à soixante-douze ans, l'activité économique par habitant a été multipliée par sept et le taux de mortalité lié aux phénomènes météorologiques extrêmes a été divisé par cinquante. Les projections des dommages liés au changement climatique font généralement référence à une diminution de l'amélioration des conditions de vie de l'humanité, elles n'affirment pas que celles-ci vont se détériorer dans l'absolu (O'Neill 2023).

Si les phénomènes météorologiques extrêmes sont coûteux, ils perdent progressivement de leur importance dans toutes les économies modernes (Formetta et Feyen, 2019). Depuis 1990, les pertes liées aux catastrophes météorologiques ont diminué en fraction du PIB mondial (Pielke Jr, 2018, 2020), tout comme les risques de mortalité (Formetta et Feyen, 2019). Si les indemnités versées par les assurances pour des risques liés aux conditions météorologiques sont en hausse, cela s'explique entièrement par la croissance de l'économie et la valeur des actifs assurés. Les épisodes de conditions météorologiques extrêmes enregistrés par le passé n'ont

pas eu d'effet significatif (positif ou négatif) sur la valeur marchande des compagnies d'assurance (Hu et McKittrick, 2015). Les phénomènes météorologiques extrêmes passés n'ont pas non plus eu d'effet significatif sur les performances des banques américaines (Blickle *et al.*, 2021) ; le réchauffement s'est même révélé bénéfique pour le secteur de la finance et de l'assurance (Mohaddes *et al.* 2023). La figure 11.1 ci-dessous est illustrative. Pour ces raisons, les économistes ont longtemps hésité à soutenir les tentatives visant à « stopper » le changement climatique ou même à réduire de manière drastique les émissions de GES, car les coûts ne seraient pas justifiés. Comme l'a déclaré un critique de l'économie de la politique climatique (Storm 2017) :

L'économie climatique dominante prend le réchauffement climatique au sérieux, mais conclut de manière déroutante que la politique économique optimale consiste à ne pratiquement rien faire... Le contraste est frappant. Alors que la science climatique envoie des messages clairs et forts indiquant que le désinvestissement des énergies fossiles doit commencer dès maintenant, en abandonnant le charbon et le pétrole et en réorientant les ressources vers des technologies d'énergie renouvelable afin de maintenir le réchauffement en dessous de la limite de 2 °C (GIEC 2014), l'économie dominante appliquée au climat affirme que des objectifs climatiques trop ambitieux nuiraient inutilement à l'économie et que la décarbonisation immédiate est trop coûteuse. La plupart des économistes du climat recommandent donc à l'humanité d'attendre et de voir.

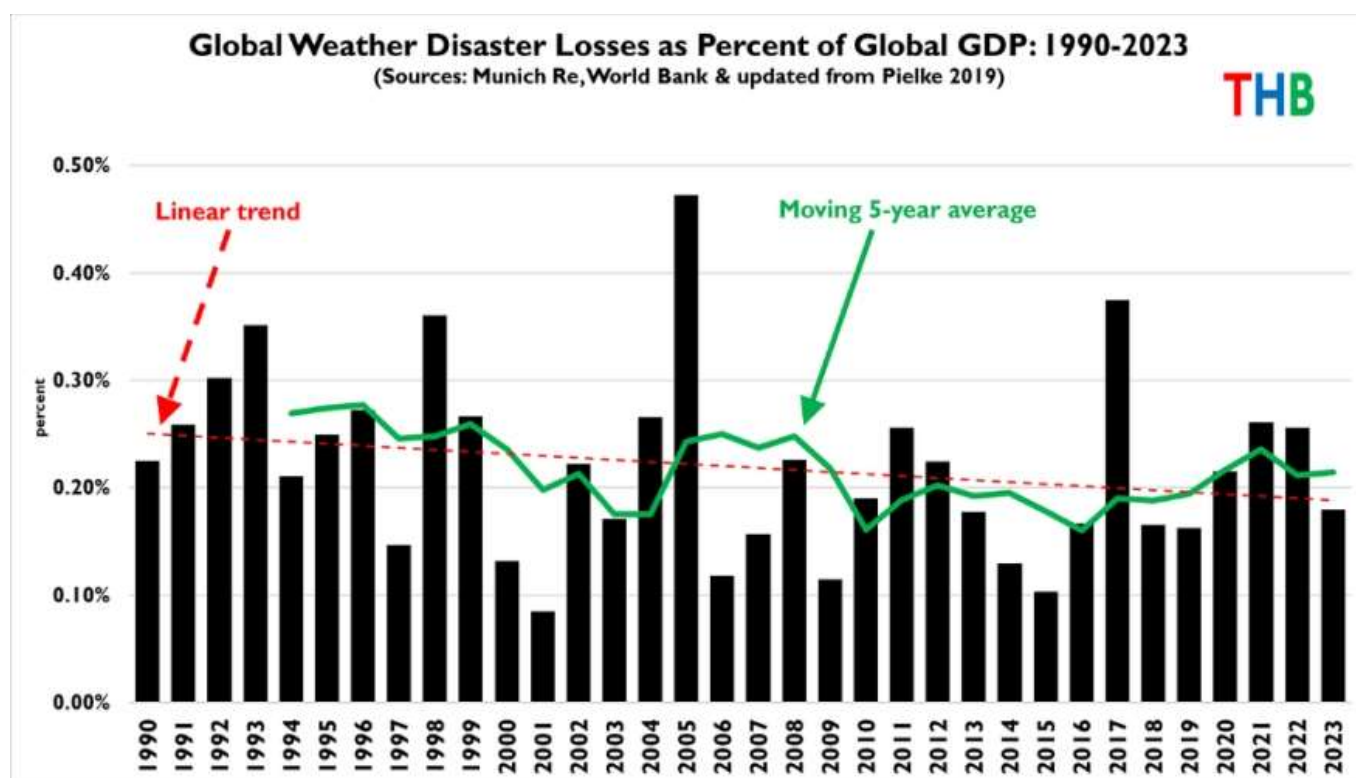


Figure 11.1 Pertes mondiales liées aux conditions météorologiques en pourcentage du PIB.

Source : Pielke Jr. (2023)

La position économique dominante sur la question de la politique climatique est parfaitement illustrée par les conclusions tirées au cours des trois dernières décennies des modèles d'évaluation intégrée IAM (Integrated Assessment Models) des politiques en matière de changement climatique, pour lesquels l'économiste de Yale William Nordhaus a reçu le prix Nobel d'économie 2018.

Les IAM combinent des données économiques, climatiques et sociales dans un cadre unifié permettant de simuler les dommages climatiques et d'évaluer la réponse politique optimale (Resources for the Future, 2025). Les travaux de Nordhaus ont généralement soutenu une politique climatique mondiale modérée, les mesures agressives étant largement reportées à la fin du siècle. Nordhaus a développé au début des années 1990 le modèle dit « Dynamic Integrated Model of the Climate and Economy » (DICE) afin d'étudier l'interaction entre le changement climatique, la politique climatique et la croissance économique mondiale sur le long terme. Le modèle DICE part du principe que le contrôle des émissions mondiales peut être coordonné sans coût et s'interroge sur l'objectif politique optimal à atteindre. La composante climatique du modèle DICE est basée sur une modélisation climatologique simplifiée. La version du modèle DICE au moment de l'attribution du prix Nobel à Nordhaus a été décrite dans Nordhaus (2018) ; elle avait un paramètre de sensibilité climatique de 3,1 °C pour le doublement du CO₂, proche de la meilleure estimation des rapports du GIEC (3,0 °C).

Le scénario de référence (sans politique climatique) n'entraîne que 400 milliards de dollars (ou 0,4 Trillions de \$) de coûts de réduction au niveau mondial et conduit à 134200 milliards de dollars de dommages climatiques mondiaux, pour un coût total de 134600 milliards de dollars. La composante climatique du modèle DICE prévoit un réchauffement de 4,1 °C d'ici 2100 par rapport aux températures préindustrielles. Il convient de noter qu'il s'agit là d'une estimation du réchauffement plus élevée que celle de nombreux modèles climatiques du GIEC.

Le scénario « *politique optimale* » ne s'écarte guère du scénario « *statu quo* ». Il vise un réchauffement de +3,5 °C, ce qui signifie que nous réduisons modestement notre consommation de combustibles fossiles et que nous nous contentons de vivre avec la quasi-totalité du réchauffement. Cela suggère que la plupart des émissions de CO₂ sont moins nocives que les politiques qui seraient nécessaires pour les réduire. Tenter de prévenir le réchauffement entraîne rapidement des coûts qui dépassent les avantages. La poursuite de l'objectif de limiter le réchauffement à 2,5 °C entraînerait un coût total de 177 800 milliards de dollars, soit 43200 milliards de dollars de plus que si l'on ne faisait rien.

Nordhaus n'a pas évalué la possibilité d'atteindre l'objectif de 1,5 °C fixé à Paris, mais cela serait encore plus coûteux.

Une édition ultérieure du DICE inclut des dommages supposés plus élevés liés au réchauffement, ce qui, sans surprise, conduit à des recommandations politiques plus agressives, comme expliqué dans la section ci-dessous sur le coût social du carbone.

11.1.2 Analyse empirique du changement climatique et de la croissance économique

De nombreuses autres études ont utilisé des méthodes économétriques appliquées à des données historiques, au lieu des IAM (Integrated Assessment Models), pour étudier l'impact potentiel du changement climatique sur la croissance économique. Dell *et al.* (2012, ci-après DJO12) ont mené une étude influente qui s'est appuyée sur un panel multinational de données nationales couvrant la période 1950-2005, dans laquelle ils ont mis en correspondance les données climatiques et économiques en calculant la moyenne des températures au niveau des mailles locales jusqu'au niveau national à l'aide de pondérations démographiques. Ils ont constaté que le réchauffement a un effet positif insignifiant sur la croissance des revenus dans les pays riches, mais un effet négatif significatif dans les pays pauvres. Moore et Diaz (2015) ont modifié le modèle DICE pour tenir compte de cette conclusion et ont conclu que cela impliquait un coût social du carbone considérablement plus élevé en raison des effets cumulés de la perte de revenus au fil du temps.

De nombreux travaux ont ensuite débattu de la robustesse des conclusions du DJO12. Burke *et al.* (2015) ont analysé un panel mondial avec des températures moyennes au niveau national et ont constaté un effet négatif du réchauffement sur la croissance dans les pays riches comme dans les pays pauvres lorsque la

température moyenne nationale est supérieure à 13 °C. Zhao *et al.* (2018) ont utilisé l'ensemble de données G-Econ de Nordhaus (2006), qui ventile l'activité économique au niveau des mailles du réseau, ont reproduit les résultats de DJO12 sur le même sous-ensemble de pays que celui utilisé dans DJO12, mais ont ensuite montré que, sur l'ensemble de l'échantillon mondial, le réchauffement augmente la croissance dans les pays riches comme dans les pays pauvres, bien que l'effet positif dans ce dernier groupe soit limité aux régions où les températures locales sont inférieures à environ 16 °C. Greßer *et al.* (2021) ont développé un ensemble de données économiques régionales pour 1542 régions infranationales à travers le monde entre 2005 et 2015 et ont constaté que la température n'avait aucun effet sur la croissance. Yang *et al.* (2023) ont mis à jour l'ensemble de données DJO12 et ont appliqué un estimateur robuste aux fréquences d'échantillonnage mixtes, constatant que si les chocs de température avaient un effet temporaire sur les niveaux de revenu, ils n'avaient pas d'effet durable significatif sur les taux de croissance.

Newell *et al.* (2021) ont noté qu'il n'existe aucune théorie sous-jacente pour guider la spécification des modèles économétriques dans cette littérature. Compte tenu du caractère arbitraire du choix des variables explicatives à inclure, ils ont identifié plus de 800 spécifications de modèles possibles. À partir des données de Burke *et al.* (2015), ils ont utilisé une méthode d'estimation qui tient compte de l'incertitude du modèle et ont constaté que la forme du modèle privilégiée par Burke *et al.* (2015), qui impliquait des effets négatifs du réchauffement sur la croissance même dans les pays riches, est explicitement exclue par l'algorithme de sélection du modèle optimal. Dans l'ensemble, ils n'ont pas pu détecter d'effet de la température sur le PIB ou la croissance du PIB, et ils ont estimé que l'intervalle de confiance à 95 % pour l'impact sur la croissance mondiale en 2100, même dans le scénario de réchauffement très exagéré RCP8.5, s'étendait de -86 % à +388 %. En d'autres termes, l'effet net est probablement positif, mais trop incertain pour être distingué de zéro.

Barker (2023) a critiqué l'hypothèse du DJO12 selon laquelle les pays peuvent être regroupés en catégories fixes « pauvres » et « riches » sur la base de leurs revenus il y a plusieurs décennies. Il a fait remarquer que de nombreux pays étaient autrefois pauvres mais sont devenus riches au fil du temps, et que si l'on tient compte de ce fait, les effets initiaux de la température rapportés par Dell *et al.* deviennent faibles et insignifiants.

Berg *et al.* (2023) ont fait valoir que les pays ne devraient pas être regroupés en grandes catégories « riches » et « pauvres », car ils sont trop hétérogènes. Ils ont plutôt estimé les coefficients de réponse à la température propres à chaque pays, puis ont regroupé les pays ayant des coefficients de réponse similaires en petits panels. Ils ont estimé séparément les réponses aux chocs thermiques mondiaux et locaux idiosyncrasiques afin de mieux identifier le signal climatique dans les données météorologiques. Dans l'ensemble, ils ont constaté que les pays subissant les effets négatifs du réchauffement sur la croissance étaient plus nombreux que ceux subissant les effets positifs, mais seulement de manière temporaire : à terme, les effets s'inversent, de sorte qu'environ deux fois plus de pays bénéficient d'un effet positif net sur la croissance. Ils ont également constaté que les changements de température mondiaux (par opposition aux changements locaux) sont beaucoup plus susceptibles de favoriser la croissance dans les pays pauvres que dans les pays riches. Dans une simulation à l'horizon 2100, même en utilisant le scénario extrême RCP8.5, ils ont calculé que la perte moyenne du PIB mondial serait de seulement 1,9 % par rapport à un scénario sans réchauffement. Autrement dit, au lieu d'une croissance économique de 400 %, celle-ci serait de 392 %.

L'analyse précédente de Nordhaus implique que tenter de prévenir le réchauffement conduirait à une croissance bien inférieure à 392 %.

En résumé, les économistes considèrent le climat comme un facteur relativement peu important pour la croissance économique, un point de vue repris par le GIEC lui-même dans son cinquième rapport d'évaluation. La plupart des économistes spécialisés dans le climat reconnaissent que le réchauffement induit par le CO₂ pourrait avoir certains effets négatifs sur l'économie, mais ceux-ci sont trop faibles pour justifier une politique de réduction agressive et que tenter de « stopper » ou de plafonner le réchauffement climatique, même à des niveaux bien supérieurs à l'objectif de Paris, serait pire que de ne rien faire.

Une étude influente publiée en 2012 suggérait que le réchauffement climatique nuirait à la croissance des pays pauvres, mais cette conclusion s'est par la suite révélée peu solide (Tol 2024). Les études qui tiennent pleinement compte des incertitudes liées à la modélisation ne trouvent soit aucune preuve d'un effet négatif des émissions de CO₂ sur la croissance mondiale, soit que les pays pauvres sont susceptibles d'en bénéficier autant que les pays riches.

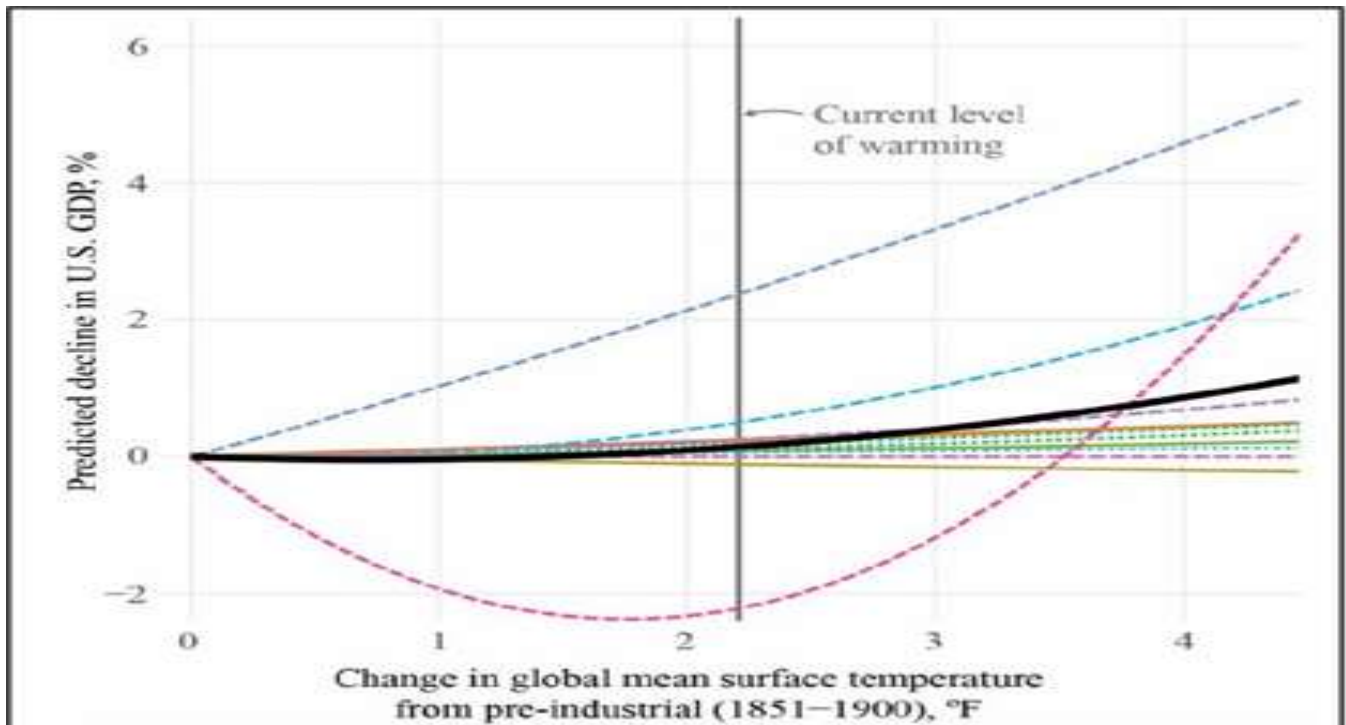


Figure 11.2 : Baisse du PIB américain par degré (Fahrenheit 5/9 de degré Celsius) de réchauffement. Source : CEA-OMB (2023)

L'hypothèse selon laquelle un réchauffement climatique important aurait un impact limité sur l'économie américaine a été discrètement reconnue par l'administration Biden, alors même que le président proclamait l'urgence climatique. La figure 11.2, tirée d'un rapport 2023 du CEA-OMB, montre la baisse prévue du PIB américain en fonction de l'augmentation de la température. Les lignes colorées indiquent les résultats d'une douzaine d'études publiées et évaluées par des pairs, tandis que la ligne noire continue représente leur moyenne. Ce graphique pourrait se résumer ainsi : « *quelques pourcents d'impact pour quelques degrés de réchauffement* ». Étant donné que le taux de croissance annuel de l'économie devrait être de 1 à 2 %, l'impact du réchauffement climatique sur le PIB américain est en effet négligeable.

11.2 Modèles du coût social du carbone

Le coût social du carbone (SCC, Social Cost of Carbon) est un outil permettant de quantifier l'impact économique des émissions de dioxyde de carbone, aidant les décideurs politiques à évaluer les coûts et les avantages des politiques climatiques. Il estime les dommages causés par l'émission d'une tonne supplémentaire de CO₂, exprimés en dollars. Plus formellement, le SCC est la valeur actualisée de la perte marginale actuelle et future de bien-être économique due à une tonne supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère.

11.2.1 Estimation du SCC

Bien que la littérature fasse référence à des « estimations » du SCC, celui-ci n'est pas estimé de la même manière que les autres statistiques économiques. Par exemple, les données sur les transactions commerciales, notamment les prix et les quantités, peuvent être utilisées pour estimer le taux d'inflation actuel ou le taux de croissance du produit intérieur brut réel par habitant, et les incertitudes associées à ces quantités sont bien comprises. Cependant, il n'existe pas de données commerciales permettant de mesurer la plupart, voire la totalité, des dommages ou avantages marginaux supposés être associés aux émissions de CO₂. Il faut donc les imputer à l'aide de modèles économiques.

Par exemple, un élément influent dans certains calculs du SCC est le coût social perçu associé à une modification du risque de mortalité future due à des conditions météorologiques extrêmes. Il n'existe aucun marché sur lequel les gens peuvent directement attribuer un prix à ce risque. Au mieux, les économistes peuvent essayer de déduire ces valeurs en examinant les transactions sur des marchés connexes tels que l'immobilier ou l'assurance, mais il est très difficile d'isoler la composante des variations de prix attribuable aux niveaux de CO₂ atmosphérique.

Les économistes utilisent des modèles d'évaluation des impacts (IAM, Impact Assessment Models) pour calculer le SCC. Deux des plus connus sont le Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (« FUND », Tol 1997) et le DICE de Nordhaus. L'EPA (2023) en a introduit de nouveaux dans le cadre de ses travaux récents. Les IAM intègrent une « fonction de dommage » ou un ensemble de fonctions reliant la température ambiante aux conditions économiques locales. Les hypothèses intégrées dans la fonction de dommage détermineront en grande partie le SCC qui en résultera.

Les IAM supposent également un taux d'actualisation à long terme ou, comme dans le modèle DICE, calculent le taux d'actualisation interne optimal dans le cadre de la solution.

Une approche pour développer une fonction de dommage consiste à commencer par estimer les coûts (ou les avantages) du réchauffement dans des secteurs spécifiques de pays du monde entier, puis à les agréger pour obtenir un montant global. C'est l'approche qui a été utilisée dans le modèle FUND. Une autre approche consiste à développer une équation simple qui pénalise le revenu mondial selon une fonction quadratique simple de la température mondiale moyenne. Cette approche a été utilisée dans le modèle DICE. Dans le cas du modèle FUND, plusieurs centaines de paramètres ont dû être sélectionnés, alors que dans le modèle DICE, seuls trois paramètres étaient nécessaires et avaient été initialement choisis pour attribuer une pénalité prédéterminée (1,2 %) à la production mondiale à partir d'un réchauffement de 3 °C, avec un terme quadratique impliquant que les dommages augmentent avec le carré de l'anomalie de la température moyenne mondiale.

Barrage et Nordhaus (2024) ont récemment modifié les paramètres afin d'augmenter la pénalité à 3 °C à 1,6 % et ont ajouté une pénalité supplémentaire discrète de 1,0 % du PIB à 3 °C de réchauffement afin de tenir compte des « *points de basculement* » [tipping points] ([très hypothétiques] changements environnementaux discrets à grande échelle déclenchés par le franchissement d'un seuil de réchauffement) et encore d'un « ajustement discrétionnaire » de 0,5 % pour les impacts exclus à 3 °C de réchauffement. Sans surprise, la nouvelle version du DICE génère des estimations du SCC beaucoup plus élevées qu'auparavant.

Les concepts d'estimation et d'incertitude ne s'appliquent pas facilement aux calculs des SCC. Aucune quantité de données collectées ne peut changer le fait que de nombreux éléments des SCC sont inconnus et reposent sur des jugements et des opinions fondés sur la connaissance de la littérature sous-jacente relative aux effets physiques du changement climatique. Les calculs de la SCC doivent donc être considérés comme des déclarations « si-alors » :

si les hypothèses suivantes sont valables, alors la SCC est de X dollars par tonne.

La liste des déclarations « si » comprend la prémisse selon laquelle le climat et l'économie mondiaux fonctionnent conformément à la représentation donnée dans le modèle IAM. L'une des raisons pour lesquelles cette hypothèse pourrait ne pas se vérifier est le moment où le réchauffement se produit.

Chaque IAM suppose une valeur de sensibilité climatique à l'équilibre (ECS, Equilibrium Climate Sensitivity), qui contrôle le réchauffement résultant des émissions de CO₂ et peut être librement modifiée afin de générer une distribution des valeurs SCC associées aux incertitudes relatives à l'ECS.

Mais comme l'ont souligné Roe et Baumann (2013), le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre augmente avec le carré de l'ECS, de sorte qu'un ajustement à la hausse du paramètre ECS sans ralentissement approprié du processus d'ajustement peut donner lieu à des estimations faussées de la valeur actuelle des dommages. En particulier, la partie supérieure de la courbe de réchauffement associée à certaines distributions ECS couramment utilisées est physiquement impossible, même dans un millénaire (Roe et Baumann 2013), mais serait réalisée en quelques siècles dans un modèle IAM. Le fait de ne pas aligner l'ECS sur le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre conduira à une surestimation de la valeur SCC.

11.2.2 Des variations dans les évaluations du SCC (*Social Cost of Carbon*)

Chaque niveau dans les calculs des IAM (Impact Assessment Models) repose sur des hypothèses, certaines plus influentes que d'autres. Les principales hypothèses sont les suivantes.

- Le taux d'actualisation : les dommages climatiques s'accumulent sur une longue période et les coûts d'un ou deux siècles doivent être actualisés à leur valeur d'aujourd'hui. Plus le taux d'actualisation est élevé, plus la valeur actualisée des dommages futurs est faible, et inversement. Le taux d'actualisation représente le coût d'opportunité de dépenser de l'argent aujourd'hui plutôt que de l'investir et d'avoir plus à dépenser demain. Certains économistes ont plaidé en faveur de l'utilisation de taux d'actualisation très bas dans les calculs du SCC, ce qui a donné lieu à des recommandations politiques favorisant des investissements immédiats relativement importants dans la réduction des émissions de CO₂. L'inconvénient est que d'autres investissements pourraient potentiellement générer un taux de rendement plus élevé pour la société.
- Sensibilité climatique à l'équilibre : les modèles d'intégration des émissions et des adaptations (IAM) ont généralement utilisé une valeur de 3,0 °C ou 3,1 °C, conformément aux recommandations du GIEC. Les valeurs ECS (Equilibrium Climate Sensitivity) les plus récentes tirées d'observations tendent à être moindres (voir chapitre 4). Dayaratna *et al.* (2017, 2020, 2023) ont montré que l'utilisation de valeurs ECS empiriques plus faibles réduit considérablement l'estimation du SCC, même avec des taux d'actualisation faibles.
- Coefficients de la fonction de dommage : les modèles IAM (Impact Assessment Models) partent du principe que le CO₂ et le réchauffement causent des dommages nets qui augmentent de manière exponentielle avec la température. Plus récemment, les modèles IAM ont également intégré des effets supposés des points de basculement climatiques potentiels. Le modèle FUND a pris en compte de manière limitée mais explicite les effets de la fertilisation par le CO₂ dans l'agriculture. Étant donné que ces coefficients ont été choisis avant la publication des preuves effectives du verdissement mondial et de l'ampleur des avantages pour les cultures d'une augmentation du CO₂ (voir chapitres 2 et 9), les effets sur la croissance sont probablement sous-estimés. Le modèle DICE (et d'autres) n'a pas explicitement inclus les avantages de la fertilisation par le CO₂ sauf dans la mesure où ils ont été pris en compte dans la littérature consultée lors du choix des coefficients de la fonction de dommage. La fonction de dommage dans FUND comprend une région dans laquelle un faible réchauffement apporte des avantages nets dans de nombreuses régions ; cette conclusion qui est étayée par des modèles économétriques du réchauffement et de la croissance (Berg *et al.* 2023) et des simulations économétriques des changements agricoles

(McKittrick 2025). La fonction de dommage DICE, de par sa conception, exclut tout avantage net à n'importe quel niveau de réchauffement.

- Scénarios d'émissions : les IAM (Impact Assessment Models) génèrent des estimations du SCC qui augmentent avec la concentration préexistante de CO₂. Par conséquent, la valeur des dommages plus tard dans le siècle sera plus élevée, en fonction des émissions de référence supposées pour les prochaines décennies.

Certains IAM (tels que DICE) incluent le coût économique de la réduction des émissions de CO₂ afin d'identifier le SCC le long d'une trajectoire de croissance optimale. Si les réductions des émissions de CO₂ sont supposées peu coûteuses, le modèle conclura que la politique optimale doit viser des réductions plus importantes, et inversement.

Il est instructif de vérifier si les valeurs du SCC sont sensibles aux changements apportés à certaines hypothèses ; lorsque des hypothèses différentes amènent des valeurs SCC ou plus élevées ou plus faibles, la variation de la valeur du SCC ne constitue pas une preuve *prima facie* de la validité de ces hypothèses. Par exemple, en 2023, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a multiplié par cinq la valeur SCC qu'elle préconisait par rapport aux estimations qu'elle avait publiées dix ans plus tôt. Cela n'est pas dû à la collecte de nouvelles données ou à l'invention de meilleures méthodes mathématiques, mais à l'utilisation de nouvelles hypothèses, dont la validité est une question distincte. Les tableaux figurant à la page 81 du document de l'EPA (2023) montrent que si des hypothèses similaires à celles des analyses précédentes avaient été appliquées, les résultats n'auraient pas été sensiblement différents. Une nouvelle hypothèse était que les dommages agricoles mondiaux étaient beaucoup plus élevés qu'on ne le pensait auparavant, sur la base d'une analyse de Moore *et al.* (2017). Mais comme nous l'avons vu au chapitre 9, McKittrick (2025) a montré que Moore *et al.* (2017) avaient utilisé une base de données où manquaient la moitié des observations sur l'évolution du CO₂. Lorsque le plus grand nombre possible de ces observations ont été récupérées à partir des sources sous-jacentes et que l'analyse a été refaite, les pertes de rendement agricole prévues ont disparu et se sont transformées en gains pour tous les niveaux de réchauffement. Par conséquent, la part de la révision du SCC de l'EPA liée aux pertes de rendement agricole était injustifiée.

11.2.3 Preuves d'un faible SCC [Social Cost of Carbon]

Le chapitre 2 a passé en revue les preuves relatives au changement climatique et au verdissement, tandis que le chapitre 9 s'est penché sur le changement climatique et l'agriculture aux États-Unis. Les preuves montrent que la fertilisation par le CO₂ a un effet bénéfique plus important sur l'agriculture que ce qui était connu au moment où ont été définis les paramètres des modèles IAM tels que DICE et FUND. Haverd *et al.* (2020) ont constaté que le taux de fertilisation par le CO₂ observé était presque deux fois plus élevé que celui prévu par les modèles de culture. Dayaratna *et al.* (2023) ont utilisé l'estimation empirique actualisée de la distribution de l'ECS de Lewis (2022), qui assimile des observations instrumentales modernes et des observations paléoclimatiques de la température : ça donne un gain de 30 % du bénéfice de la fertilisation par le CO₂ dans le modèle FUND ; ils ont constaté que, même avec un taux d'actualisation faible de 2,5 %, la SCC médiane en 2050 n'était que de 18,67 dollars, avec une probabilité de 24 % que la valeur réelle soit négative. Avec un taux d'actualisation de 5 %, la valeur médiane de la SCC est négative jusqu'au milieu des années 2040 et n'était que de 0,37 dollar en 2050, avec une probabilité de 49 % d'être négative. Ainsi, dans des hypothèses raisonnables, un modèle IAM (Impact Assessment Model) courant avec des données scientifiques actualisées fournit des preuves cohérentes avec le fait que la SCC n'est pas significativement supérieure à zéro.

Il convient également de noter que le SCC se concentre sur les coûts sociaux des émissions de CO₂ liées à l'utilisation des combustibles fossiles. Il n'a pas pour objectif de mesurer les avantages marginaux (marginal private benefits) pour les consommateurs et la société découlant de la disponibilité des combustibles fossiles.

La volonté du public de payer pour tous les types de combustibles indique la valeur pour la société d'une énergie fossile fiable et abondante. Tol (2017) estime que le bénéfice du carbone pour le consommateur [marqué par sa volonté d'acheter] est important par rapport au coût social. Ceci peut être illustré : le prix d'un gallon d'essence indique la valeur marginale de ce carburant pour le consommateur. Prenons l'hypothèse un coût social du carbone relativement élevé, par exemple 75 dollars par tonne. Déflaté par une valeur MCPF⁵ de 1,5, cela donne une taxe carbone de 50 dollars par tonne, soit environ 44 cents par gallon d'essence (Lavelle, 2019). Un prix avant taxe de 3 dollars par gallon [le gallon aux USA vaut 3,78 litres : donc 0,53 \$/litre ou 0,46 €/litre] impliquerait que le bénéfice social marginal du carburant est près de sept fois supérieur au coût social marginal.

11.2.4 Les points de basculement [tipping points]

Les calculs du SCC tiennent généralement compte des effets progressifs du réchauffement climatique, tels que la fonte lente des glaciers et l'augmentation de la température moyenne. L'introduction dans les modèles de catastrophes associées à des changements brusques (Dietz *et al.*, 2021) est un facteur susceptible d'entraîner des valeurs élevées du Social Cost of Carbon (SCC). Ces transitions rapides sont souvent appelés « points de basculement ».

Le terme « *point de basculement* » mélange deux concepts physiques différents, deux points différents à étudier.

De nombreux systèmes physiques sont intrinsèquement stables tant qu'ils ne subissent pas l'action d'une énergie externe suffisante. Par exemple, une calotte glaciaire peut rester intacte dans une large plage de températures, mais dès que la température franchit le seuil de 0 °C, elle fond. De telles discontinuités sont omniprésentes dans la nature et nécessitent une force externe. La force nécessaire par rapport à la taille du système dépend de la stabilité sous-jacente de ce dernier.

Un autre type de point de basculement, appelé *bifurcation*, est issu de l'étude de la dynamique interne des systèmes non linéaires (Crawford, 1991). On a observé que de nombreux systèmes ont plus d'un point d'équilibre et peuvent passer de l'un à l'autre avec une influence externe minimale ou nulle. Par exemple, un système météorologique peut avoir deux états d'équilibre différents : un état calme et un état avec une tornade. La transition d'un état à l'autre peut se produire sans force externe ou avec un changement infime, tel que le battement des ailes d'un papillon (Shen *et al.* 2014). Le terme « point de basculement » est parfois utilisé pour désigner une bifurcation de ce type et implique une instabilité inhérente au système lui-même, qui ne dépend pas nécessairement de forces extérieures. Elle dépend plutôt des paramètres du système qui prennent des valeurs favorisant l'émergence de bifurcations (Crawford, 1991).

Ces deux concepts différents impliquent des recherches différentes. Pour le premier la question est de savoir si les composantes du système climatique sont susceptibles de discontinuités abruptes en réponse à un forçage anthropique suffisamment important. Pour le second, la question est de savoir si le système climatique de la Terre présente des bifurcations inhérentes qui impliqueraient la possibilité de transitions abruptes avec ou sans forçage externe.

Des modèles ont été développés qui suggèrent que le deuxième type est possible. Kypke *et al.* (2020) ont présenté un modèle climatique simple dans lequel la concentration de GES est l'un des paramètres qui contrôle l'émergence de bifurcations du climat arctique vers un climat présentant à la fois des équilibres froids et chauds. Si un forçage des GES suffisamment élevé est combiné à un taux de transport de chaleur océanique

⁵ Marginal Cost of Public Funds, Coût marginal des fonds publics : le taux optimal de la taxe carbone est le SCC divisé par le MCPF (Sandmo 1977).

suffisamment élevé, une bifurcation devient possible. De manière plus générale, il a été observé que les GCM (Global Circulation Models) contiennent des bifurcations et des équilibres multiples (Brunetti et Ragon, 2023).

L'existence possible de bifurcations dans le système climatique de la Terre implique que des transitions abruptes sont possibles, non seulement en réponse à des forçages importants, mais aussi à de petites perturbations. Cela place les points de basculement dans la catégorie des événements peu probables et potentiellement catastrophiques, tels que les impacts de gros météorites. La question clé est alors : ce type de points de basculement peut-il être prédit ? Les recherches actuelles n'ont pas résolu cette question (Dakos *et al.*, 2024) et pourraient même ne pas être en mesure de le faire, car l'une des implications de l'« effet papillon » est l'existence de limites à la prévisibilité des systèmes non linéaires (Palmer *et al.*, 2014). Il n'est donc pas évident de savoir comment intégrer ces possibilités dans les calculs du SCC. De petites variations dans les hypothèses entraîneront des variations arbitrairement importantes dans les SCC sans qu'il soit possible de choisir entre ces variations. Si de tels points de basculement sont possibles, la position la plus appropriée pour la politique économique est de maximiser la résilience à toute forme de catastrophe externe, car il est peu probable que nous puissions la prévoir ou l'empêcher.

Le rapport AR6 (WGI, chapitre 1) se concentre principalement sur le premier type de point de basculement, à savoir un changement brusque en réponse à un forçage externe. C'est également le sens associé à l'utilisation courante du concept de « point de basculement » dans les discussions sur le changement climatique (voir par exemple <https://report2023.global-tipping-points.org/what-is-a-tipping-point/>). Comme le résume l'AR6, il existe des preuves de changements brusques dans les archives paléoclimatiques, et certains de ces événements ont été interprétés comme des points de basculement. Certaines projections réalisées à l'aide de modèles du système terrestre ont par exemple mis en évidence des points de basculement tels que le dépérissement de la forêt amazonienne en réponse à des valeurs spécifiques de concentration de CO₂ ou d'augmentation de la température.

L'alarme sur les points de basculement climatiques est reflétée dans *le rapport Global Tipping Points Report* publié lors de la COP 28 le 6 décembre 2023 (Lenton *et al.*, 2023). Ce rapport identifie plus de 25 éléments du système climatique qui constitueraient des points de basculement. Ce qui est classé comme « point de basculement » climatique est une cible mouvante. Les exemples les plus courants dans la littérature et les rapports d'évaluation sont les suivants : désintégration de la calotte glaciaire du Groenland, désintégration de la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental, disparition estivale de la banquise arctique, dépérissement de la forêt amazonienne, mort des récifs coralliens, dégel du pergélisol et des hydrates de méthane, effondrement de la circulation AMOC dans l'Atlantique (Atlantic Meridional Overturning Circulation), déplacement de la forêt boréale, déplacement de la mousson ouest-africaine et déplacement de la mousson indienne.

Tous ces points de basculement nécessitent une certaine instabilité du système pour entraîner une transition brutale en réponse au réchauffement. Pour cette raison, il semble très difficile de faire la distinction entre un événement de basculement et la variabilité naturelle du climat. La variabilité climatique naturelle a déjà entraîné des changements dans les moussons d'Afrique de l'Ouest et de l'Inde, le dépérissement de la forêt amazonienne et des récifs coralliens, ainsi que la désintégration de certaines parties des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique occidental. Ces impacts peuvent s'inverser à l'échelle décennale ou centenaire, en fonction de la variabilité climatique naturelle et des réactions des écosystèmes.

Certains changements brusques sont potentiellement plus graves, notamment l'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental et celui de la circulation méridionale de retournement dans l'Atlantique (AMOC). Le résumé pour les décideurs du rapport AR6 WG1 indique :

La circulation méridionale de retournement dans l'Atlantique va très probablement s'affaiblir au cours du XXI^e siècle, quel que soit le scénario d'émissions. Si le déclin au cours du XXI^e siècle est *très probable*, il n'y a qu'une *faible confiance* dans l'ampleur de la tendance. Et *une confiance moyenne* dans le fait qu'il n'y aura pas d'effondrement brutal avant 2100. (C.3.4)

Il existe des preuves limitées de scénarios peu probables mais à fort impact (résultant de processus d'instabilité des calottes glaciaires caractérisés par une profonde incertitude et impliquant dans certains cas des points de basculement) qui augmenteraient fortement la perte de glace de la calotte glaciaire antarctique pendant des siècles dans le cadre de scénarios à fortes émissions de GES (par exemple, SSP5-8.5). (B.5.2)

Pour les calculs du SCC, la question de recherche soulevée par ce type de point de basculement est de savoir si de tels événements ont été observés dans le passé dans des conditions climatiques similaires à celles que nous connaissons actuellement ou que nous connaissons dans un avenir proche. Le rapport AR6 trouve peu d'éléments indiquant un effondrement imminent de la circulation méridionale de retournement dans l'Atlantique ou de la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental. Il conclut qu'il n'existe pas de point de basculement associé à la glace de mer arctique (résumé technique du rapport AR6, p. 76).

Dietz *et al.* ont intégré plusieurs points de basculement potentiels (changements brusques) dans un modèle du SCC (coût social du carbone) et constaté qu'ils ajoutaient environ 25 % à l'estimation, principalement en raison du dégel du pergélisol et de la libération d'hydrates de méthane. Cependant, le GIEC considère ce scénario comme *très improbable* (AR6, résumé technique, p. 107).

En résumé, il pourrait exister des points de basculement inconnus par bifurcation associés aux processus climatiques naturels, mais cette possibilité ne se traduit pas par des indications spécifiques pour l'évaluation du SCC. Il existe des points de changement abrupts potentiels dans le système climatique en réponse au réchauffement, bien que le GIEC attribue de faibles probabilités à la plupart d'entre eux, y compris les plus importants. Lorsque ces probabilités sont prises en compte, il en résulte seulement une augmentation modeste de la valeur du SCC au cours du XXI^e siècle.

11.2.5 Existe-t-il des alternatives ?

De plus en plus, on estime que le SCC est trop variable pour être utile aux décideurs politiques. Cambridge Econometrics (Thoung, 2017) a déclaré qu'il était « *temps de le supprimer* » en raison des incertitudes. Le Royaume-Uni et l'UE n'utilisent plus le SCC pour l'évaluation des politiques, optant plutôt pour une tarification du carbone « *cohérente avec les objectifs* » (UK Department for Energy Security and Net Zero 2022, Dunne 2017). Toutefois, l'incertitude des estimations du SCC ne signifie pas que d'autres instruments réglementaires soient intrinsèquement meilleurs ou plus efficaces. De nombreuses réglementations en matière d'émissions (telles que les obligations relatives aux véhicules électriques, les obligations en matière d'énergies renouvelables, les réglementations sur l'efficacité énergétique et les interdictions de certains types d'appareils électroménagers) coûtent beaucoup plus cher par tonne de CO₂ éliminée que n'importe quelle estimation courante du SCC, ce qui suffit à établir que ces réglementations ne satisfont pas au test coût-bénéfice.

Références

AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

Arent, D.J., R.S.J. Tol, E. Faust, J.P. Hella, S. Kumar, K.M. Strzepek, F.L. Tóth, and D. Yan (2014) Key economic sectors and services. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A:

- Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659
708.https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf
- Barker, D. (2023) Temperature Shocks and Economic Growth: Comment on Dell, Jones, and Olken. *Econ Journal Watch* 20(2) 234-253 <https://econjwatch.org/articles/temperature-shocks-and-economic-growth-comment-on-dell-jones-and-olken-125>
- Barrage, Lint and William Nordhaus (2024) Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121 (13) e2312030121 <https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121>
- Berg, Kimberly, Chadwick C Curtis and Nelson Mark. (2021) GDP and temperature: Evidence on cross country response heterogeneity. NBER Working Paper 31327 June 2023 <http://www.nber.org/papers/w31327>
- Blickle, Kristian; Sarah N. Hamerling, and Donald P. Morgan (2021) : How bad are weather disasters for banks?, Staff Reports, No. 990, Federal Reserve Bank of New York, New York, NY <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/247913/1/sr990.pdf>
- Brunetti, Maura and Charline Ragon (2023) Attractors and bifurcation diagrams in complex climate models. *Physical Review E* 107 054214 <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.107.054214>
- Burke, Marshall, Solomon M Hsiang, and Edward Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577):235–239.
- Council of Economic Advisors-Office of Management and Budget (CEA-OMB 2023) Methodologies and considerations for integrating the physical and transition risks of climate change into macroeconomic forecasting for the president’s budget. March 13, 2023. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf>
- Crawford, John D (1991) Introduction to Bifurcation Theory. *Reviews of Modern Physics* 63(4) October 1991 991—1037.
- Dakos, Vasilis, Chris Boulton, Joshua Buxton et al. (2024) Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics* 15 1117—1135 <https://doi.org/10.5194/esd-15-1117-2024>
- Dayaratna, Kevin and Ross McKittrick (2023) "Reply to comment on “climate sensitivity, agricultural productivity and the social cost of carbon in fund” by Philip Meyer" *Environmental Economics and Policy Studies* 2023 link.springer.com/article/10.1007/s10018-023-00364-2
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. *Climate Change Economics* April 2017 DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063>
- Dayaratna, Kevin, Ross McKittrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. *Environmental Economics and Policy Studies* <https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w>
- Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American economic journal: Macroeconomics*, 4(3):66 95, 2012. ISSN 1945-7707.
- Dietz, S., J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner (2021) Economic impact of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Science* 2021 Vol. 118 No. 34 e2103081118
- Dunne, Daisy (2017), “Q&A: The Social Cost of Carbon,” Carbon Brief, February 14, 2017, <https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/> Formetta, Giuseppe and Luc Feyen (2019) Empirical

- evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. *Global Environmental Change* 57 101920 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.004>
- Greßer, Christina, Daniel Meierrieks, and David Stadelmann (2021) The link between regional temperature and regional incomes: econometric evidence with sub-national data. *Economic Policy*, 36(107):523–550, 2021.
- Haverd, V., Raupach, M., Briggs, P., et al. (2020). Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology*, 26, 2390–2402.
- Hu, Bin and Ross McKittrick (2015) Climatic Variations and the Market Value of Insurance Firms. *Journal of Insurance Issues* Vol. 39, No. 1, pp. 92–111 <https://www.jstor.org/stable/43741103>
- Kypke, K. L., Langford, W. F., and Willms, A. R.: Anthropocene climate bifurcation, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 27, 391–409, <https://doi.org/10.5194/npg-27-391-2020>, 2020. 126
- Lavelle, Marianne (2019) Carbon Tax Plans: How They Compare and Why Oil Giants Support One of Them. *Inside Climate News* March 7, 2019 <https://insideclimatenews.org/news/07032019/carbon-tax-proposals-compare-baker-shultz-exxon-conocophillips-ccl-congress/>
- Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, et al. (eds) (2023) The Global Tipping Points Report 2023. University of Exeter, Exeter, UK. <https://report-2023.global-tipping-points.org/>
- Lewis, N., (2013) An objective Bayesian, improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity. *Journal of Climate*, 26, 7414–7429. <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00473.1>
- McKittrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. *Scientific Reports* 15 article 5575 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>
- Mohaddes, Kamiar, Ryan Ng., Hashem Psaran, Mehdi Raissi and Jui-Chung Yang (2023) Climate change and economic activity: evidence from US states. *Oxford Open Economics* Vol 2 odac010 <https://doi.org/10.1093/ooec/odac010>
- Moore, Frances C. and Delavane B. Diaz (2015) Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2):127–131, 2015. ISSN 1758-678X.
- Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. *Nature Communications* 8:1607. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x>
- Newell, Richard G., Brian C. Prest, and Steven E. Sexton (2021). The GDP-temperature relationship: Implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108 <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102445>
- Nordhaus, William (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10):3510–3517, 2006. ISSN 0027-8424.
- Nordhaus, William. (2018) Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy* August 2018, 10(3): 333–360. <https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/pol.20170046>
- Nordhaus, W. (1993) Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model *American Economic Review* Vol. 83, No. 2, (Papers and Proceedings) pp.313–317.
- O'Neill, Brian C. (2023) Envisioning a future with climate change. *Nature Climate Change* 13, pages 874–876 <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01784-4>
- Palmer, TN, A Döring and G Seregin (2014) The real butterfly effect. *Nonlinearity* 27(9) 10.1088/0951-7715/27/9/R123 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/27/9/R123/meta> Pielke Jr., Roger (2018): Tracking progress on the economic costs of disasters under the indicators of the sustainable development goals, *Environmental Hazards*, DOI: 10.1080/17477891.2018.1540343
- Pielke Jr., Roger (2020) Economic ‘normalisation’ of disaster losses 1998–2020: a literature review and assessment,” *Environmental Hazards*, 2020, pp. 1–19

- Pielke Jr., Roger (2023) Global disaster losses: 1990-2023 Substack essay
<https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023> Resources for the Future (2025) “Social Cost of Carbon Explorer,” Resources for the Future website, accessed April 22, 2025, <https://www.rff.org/publications/data-tools/scc-explorer/>.
- Roe, Gerard H. and Yoram Bauman (2013) Climate Sensitivity: Should the climate tail wag the policy dog? *Climatic Change* (2013) 117:647–662 DOI 10.1007/s10584-012-0582-6
- Sandmo, Agnar (1975) “Optimal Taxation in the Presence of Externalities.” *Swedish Journal of Economics* 77 (1), 86–98.
- Schelling, Thomas C (1992) Some economics of global warming. *The American Economic Review*, 82 (1):1–14.
- Shen, Bo-Wen, Roger A Pielke Sr and Xubin Zeng (2023) The 50th Anniversary of the Metaphorical Butterfly Effect since Lorenz (1972): Multistability, Multiscale Predictability, and Sensitivity in Numerical Models. *Atmosphere* 2023 14(8) <https://doi.org/10.3390/atmos14081279>
- Storm, S (2017) “How the Invisible Hand is Supposed to Adjust the Natural Thermostat: A Guide for the Perplexed.” *Science and Engineering Ethics* vol 23: 1307—1331. 127
- Thoung, Chris (2017) “Is It Time to Kill Off the Social Cost of Carbon?” *Cambridge Econometrics Blog*, September 14, 2017, <https://www.camecon.com/blog/time-kill-social-cost-carbon/>.
- Tol, Richard S.J. (1997) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND *Environmental Modeling and Assessment* 2: 151—163.
- Tol, Richard S.J. (2017). "The Private Benefit of Carbon and its Social Cost," Working Paper Series 0717, Department of Economics, University of Sussex Business School.
<https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html>
- Tol, Richard S.J. (2024) A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy* 185 113922 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>
- UK Department for Energy Security and Net Zero (2022). “Carbon Valuation.” GOV.UK, last updated April 4, 2022. <https://www.gov.uk/government/collections/carbon-valuation--2>.
- US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, November 2023, https://www.epa.gov/system/files/documents/2023/12/epa_scghg_2023_report_final.pdf accessed February 28, 2024.
- Yang, Yimin, Fei Jia, and Haoran Li. Estimation of panel data models with mixed sampling frequencies (2023). *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 85(3):514–544.
- Zhao, Xiaobing, Mason Gerety, and Nicolai V. Kuminoff (2018) Revisiting the temperature-economic growth relationship using global subnational data. *Journal of environmental management*, 223:537–544, 2018.

12 IMPACTS SUR LE CLIMAT MONDIAL DES POLITIQUES AMÉRICAINES EN MATIÈRE D'ÉMISSIONS

Résumé du chapitre

Les mesures politiques américaines devraient avoir des effets directs indétectables sur le climat mondial et tout effet ne se fera sentir qu'à très long terme.

12.1 Le problème de l'échelle ou du passage à l'échelle

Les taux d'émission et les concentrations atmosphériques des principaux polluants atmosphériques sont étroitement liés, car leur durée de vie est courte et leurs concentrations faibles ; lorsque les émissions locales diminuent, la concentration locale de pollution baisse rapidement, généralement en quelques jours. Mais la concentration moyenne mondiale de CO₂ se comporte très différemment, car les émissions se mélangent à l'échelle mondiale et le cycle mondial du carbone est vaste et lent. Toute modification des émissions locales de CO₂ aujourd'hui n'aura qu'un effet global très faible, et ce avec un long délai.

Après l'émission d'une impulsion (rejet) de CO₂ dans l'atmosphère, seuls environ 40 ± 15 % du CO₂ supplémentaire auront été séquestrés après vingt ans. Cette proportion passe à 75 ± 10 % après mille ans, et le reste sera progressivement éliminé au cours des dizaines de milliers d'années suivantes (Ciais *et al.*, 2013, pp. 472-473). Par conséquent, toute réduction des émissions américaines ne ferait que ralentir modestement, sans toutefois empêcher, l'augmentation de la concentration mondiale de CO₂. Et même si les émissions mondiales cessaient demain, il faudrait des décennies, voire des siècles, pour constater une réduction significative de la concentration mondiale de CO₂ et, par conséquent, de l'influence humaine sur le climat.

Pour réduire les stocks atmosphériques de CO₂, il faudrait que les émissions soient inférieures au taux naturel de séquestration, en supposant que toute l'augmentation soit d'origine anthropique. Étant donné que ce taux s'est élevé en moyenne à environ 50 % des émissions au cours des dernières décennies, une réduction de 50 % des émissions mondiales permettrait (au moins temporairement) de stopper l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. Le protocole de Kyoto de 1997 proposait de plafonner les émissions de CO₂ des pays industrialisés à un niveau modeste de 5 % en dessous des niveaux de 1990 d'ici 2102. Même si cette politique était trop difficile à mettre en œuvre pour la plupart des pays, son respect intégral n'aurait pas réduit de manière substantielle les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère. Elle n'aurait que légèrement ralenti la croissance du CO₂, qui aurait atteint le niveau prévu pour 2100 en 2105 (Wigley, 1998). Lomborg (2016) a estimé que le respect intégral des engagements initiaux de l'Accord de Paris ne mettrait pas fin au réchauffement, mais permettrait seulement d'éviter un réchauffement d'environ 0,1 °C et de retarder d'une dizaine d'années l'atteinte des niveaux de température de référence de 2100.

Ainsi, contrairement aux mesures conventionnelles de lutte contre la pollution atmosphérique, même des actions locales drastiques n'auront que des effets négligeables au niveau local, et ce avec un long délai. Le fait de qualifier les réductions unilatérales des États-Unis de « lutte contre le changement climatique » ou de « mesures en faveur du climat » en partant du principe que nous pouvons arrêter le changement climatique reflète donc une profonde incompréhension de l'ampleur du problème.

12.2 Étude de cas : les émissions des véhicules à moteur aux États-Unis

Le problème d'échelle peut être illustré par l'exemple des véhicules à moteur aux États-Unis. Le rapport « Endangerment Finding » publié par l'EPA en 2009 s'est concentré sur les émissions de CO₂ des voitures et des camions légers aux États-Unis, car la section 202(a) du Clean Air Act oblige l'EPA à fixer des normes d'émission pour les véhicules à moteur si des polluants sont jugés dangereux pour la santé ou le bien-être public. Le rapport Endangerment Finding de 2009 obligeait donc l'EPA à réglementer les émissions des véhicules à moteur neufs, dans le but déclaré de réduire ou d'éliminer les effets néfastes du changement climatique sur la population américaine.

Deux questions se posent naturellement :

- (1) Quelle serait l'ampleur de la réduction des émissions de CO₂ résultant d'une telle réglementation ? et
- (2) Quel serait l'impact climatique d'une telle réglementation ?

La première question peut être abordée en comparant les émissions de CO₂ des véhicules américains au total mondial. La deuxième question peut être abordée en se basant sur le fait que, selon les modèles utilisés par l'EPA, la réduction du réchauffement climatique serait proportionnelle à la réduction des émissions mondiales, en gardant à l'esprit que la variation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère au cours d'une année donnée est le résultat des émissions mondiales totales de CO₂ et non des seules émissions américaines.

En 2022, les émissions des voitures et des camions légers aux États-Unis ont totalisé 1,05 milliard de tonnes métriques de dioxyde de carbone (GtCO₂, EPA 2024). Dans le même temps, les émissions mondiales de CO₂ liées à la consommation d'énergie ont totalisé 34,6 GtCO₂ (Energy Institute 2024). Les voitures et les camions légers américains ne représentent donc que 3,0 % des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie. À première vue, on peut dire que même en éliminant *toutes* les émissions des véhicules américains, on ne retarderait l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère que d'un an ou deux sur un siècle.

Cela réduirait également la tendance générale au réchauffement d'environ 3 % au maximum. Pour la période 1979 - 2023, qui couvre le plus largement les données météorologiques de différents types à l'échelle mondiale, les tendances au réchauffement sont déterminées avec une précision d'environ $\pm 15\%$, de sorte que l'impact de la réduction du taux de réchauffement climatique mondial par l'élimination des émissions de CO₂ des véhicules aux États-Unis serait bien inférieur aux limites de mesurabilité. Étant donné que la température moyenne mondiale est l'indicateur le plus direct du changement climatique, les effets de la réduction des émissions de CO₂ des véhicules américains sur les indicateurs climatiques secondaires (par exemple, les phénomènes météorologiques extrêmes, les inondations, les sécheresses, etc.) seraient encore moins mesurables.

Par conséquent, contrairement au cas des polluants atmosphériques locaux tels que les particules et l'ozone, même les mesures réglementaires les plus strictes en matière d'émissions de GES des véhicules aux États-Unis ne peuvent être considérées comme susceptibles de remédier de façon mesurable aux dangers climatiques présumés pour la population américaine.

12.3 Conclusion

Ce rapport préconise une approche plus nuancée et fondée sur des preuves pour éclairer les politiques climatiques, qui reconnaisse explicitement les incertitudes. Les risques et les avantages d'un changement climatique sous l'influence des facteurs naturels et humains doivent être mis en balance avec les coûts, l'efficacité et les effets collatéraux de toute « action climatique », en tenant compte des besoins du pays en matière d'énergie fiable et abordable avec un minimum de pollution locale. Au-delà de la poursuite d'observations précises et ininterrompues du système climatique mondial, il sera important de formuler des hypothèses réalistes sur les émissions futures, de réévaluer les modèles climatiques afin de corriger les biais

et les incertitudes, et de reconnaître clairement les limites des études sur l'attribution des événements extrêmes. Une approche qui reconnaît à la fois les risques et les avantages potentiels du CO₂ plutôt que de s'appuyer sur des modèles imparfaits et des scénarios extrêmes, est essentielle à une prise de décision éclairée et efficace.

Références

- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, *et al.* (2013) : Carbon and Other Biogeochemical Cycles. Dans : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution du Groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, *et al.* (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis
- EPA (2024) *Fast Facts: U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2022*. Disponible en ligne à l'adresse <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P101AKR0.pdf>
- Energy Institute (2024) Statistical Review of World Energy. Disponible en ligne à l'adresse <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Lomborg, Bjorn (2016) « Impact of Current Climate Proposals » *Global Policy* 7(1) 109—118. Disponible à l'adresse <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1758-5899.12295/full>.
- Wigley, T.M.L. (1998). « The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications » (Le protocole de Kyoto : CO₂, CH₄ et implications climatiques). *Geophysical Research Letters* 25(13), 2285-2288

GLOSSAIRE

2 X CO₂ : Doublement de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO₂), une référence couramment utilisée pour lutter contre le changement climatique. En 2025, les concentrations atmosphériques de CO₂ avaient atteint environ 50 % du niveau de 2XCO₂ référencé à l'année 1800.

ACE (Accumulated Cyclone Energy) : mesure statistique de l'énergie accumulée par un cyclone tropical au cours de sa durée de vie, calculée à partir de la somme des carrés des vitesses maximales soutenues ou continues du vent.

ACIDIFICATION : Terme couramment utilisé pour désigner la diminution du pH des océans, qui passe de valeurs alcalines à des valeurs moins alcalines.

ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) GAP : trou dans les données sur le rayonnement solaire total entre 1989 et 1991, causé par un retard dans le lancement d'un moniteur satellitaire qui aurait dû être mis en service à temps pour avoir un temps commun avec le système précédent et permettre l'inter-calibration des deux appareils

AÉROSOLS : minuscules particules solides ou liquides en suspension dans l'air.

AIE (Agence internationale de l'énergie) IEA (International Energy Agency) : Organisation intergouvernementale basée à Paris, créée en 1974, qui fournit des recommandations politiques, des analyses et des données sur le secteur énergétique mondial.

ALKALINE : ayant un pH chimique supérieur à 7,0. Le « contraire » d'acide, qui signifie un pH inférieur de 7,0.

AMBIANT : Relatif à l'environnement immédiat de quelque chose.

AMO : Oscillation multi-décennale de l'Atlantique, cycle de 60 ans des températures de surface de la mer dans l'Atlantique Nord.

ANALYSE RICARDIENNE : Méthode utilisée en économie environnementale, nommée d'après David Ricardo, pour estimer les impacts économiques du changement climatique, en particulier sur l'agriculture, en partant de l'hypothèse que les changements attendus dans le rendement de l'activité agricole future seront capitalisés dans la valeur actuelle des terres.

ANTHROPOGÈNE : Créé par l'homme.

AR (rapports d'évaluation) : évaluations périodiques publiées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, qui évaluent les connaissances actuelles sur le système climatique, le changement climatique mondial et les questions connexes. Un AR se compose désormais de rapports de trois groupes de travail, le premier (WG1) portant sur les sciences physiques et les autres sur les impacts sociétaux et les stratégies d'atténuation. Le plus récent est l'AR6.

ATTRIBUTION : Affirmation d'une relation de cause à effet, principalement entre les émissions anthropiques de GES et les modèles climatiques observés.

AUTOCORRÉLATION : Phénomène selon lequel la valeur actuelle d'une variable aléatoire dans une série chronologique est corrélée à sa valeur dans une période antérieure.

BIOMASSE : Quantité totale ou poids de la matière organique présente dans une zone ou un volume donné.

CARBONE : Sixième élément du tableau périodique. Couramment utilisé comme abréviation pour désigner le dioxyde de carbone.

CHANGEMENT CLIMATIQUE (CLIMATE CHANGE): Modification du climat due à l'influence humaine, par opposition à la variabilité climatique, qui est d'origine naturelle.

CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) : Projet organisé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat afin de comparer différents modèles climatiques océaniques et atmosphériques mondiaux soumis à des scénarios d'émissions identiques. Les deux plus récents sont le CMIP5 et le CMIP6, respectivement pour les rapports AR5 et AR6.

COMBUSTIBLE FOSSILE FOSSIL FUEL: Combustible hydrocarboné naturel tel que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, formé au cours de l'histoire géologique à partir des restes d'organismes vivants.

CONSTATATION DE DANGER ENDANGERMENT FINDING (EF) : Constatation faite en 2009 par l'administrateur de l'Agence de protection de l'environnement que les émissions de gaz à effet de serre bien mélangés (principalement le CO₂) mettent en danger la santé et le bien-être humains.

CONUS : Les 48 États contigus des États-Unis.

DICE (Dynamic Integrated model of the Climate and Economy) : modèle d'évaluation intégré développé par William Nordhaus en 1993.

DRY ICE, GLACE CARBONIQUE : Dioxyde de carbone congelé.

ÉCONOMÉTRIE (ECONOMETRICS) : Branche de l'économie qui s'intéresse à l'utilisation de méthodes statistiques (principalement la régression multiple) pour analyser les systèmes économiques.

ECS (Sensibilité climatique à l'équilibre) : Réchauffement moyen total de la surface du globe en réponse à un doublement hypothétique de la concentration atmosphérique de CO₂ par rapport aux niveaux préindustriels.

EFFET DE SERRE GREENHOUSE EFFECT (GHE) : Tendance de toute atmosphère planétaire contenant des gaz à effet de serre à être plus chaude dans ses couches inférieures que si ces gaz n'existaient pas.

EL NIÑO : Phase chaude du phénomène El Niño – Oscillation australe, caractérisée par un afflux moins important d'eau froide au large des côtes sud-américaines et par un affaiblissement des alizés dans le Pacifique.

ENSO : El Niño – Oscillation australe, une fluctuation climatique naturelle importante qui se caractérise par des variations annuelles dans la remontée d'eau froide au large des côtes équatoriales de l'Amérique du Sud et par le renforcement ou l'affaiblissement des alizés dans l'océan Pacifique.

FACE : (Free-Air CO₂ Enrichment, enrichissement en CO₂ à l'air libre) Études à grande échelle en plein air qui exposent des plantes à des niveaux élevés de CO₂, simulant ainsi des scénarios climatiques futurs.

FORCAGE RADIATIF : Modification de l'équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement infrarouge (IR) émis, considéré au sommet de l'atmosphère et causée par des changements dans les gaz à effet de serre, les aérosols anthropiques, les volcans, etc.

FUND (Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution) : Modèle d'évaluation intégrée développé par Richard Tol en 1997.

GAZ À EFFET DE SERRE (GES) GREENHOUSE GAS (GHG): Gaz atmosphérique qui absorbe et émet le rayonnement infrarouge, en particulier la vapeur d'eau, le CO₂ et le méthane.

GBR ((Great Barrier Reef, Grande Barrière de Corail) : Le plus grand écosystème corallien au monde, situé au large de la côte nord-est de l'Australie. Australie.

GDP (Gross Domestic Product) (PIB): valeur marchande totale de tous les biens et services finaux produits à l'intérieur d'une frontière d'un pays, généralement sur une année.

GHCN (Global Historical Climatology Network) : Réseau mondial de stations météorologiques réparties dans le monde entier qui effectuent des mesures horaires, quotidiennes ou mensuelles des précipitations, de la température et parfois des chutes de neige et de l'épaisseur de la neige.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) : groupe d'experts internationaux et de représentants gouvernementaux créé en 1988 par les Nations Unies et l'Organisation météorologique mondiale afin de fournir aux gouvernements de tous niveaux des informations scientifiques qu'ils peuvent utiliser pour élaborer des politiques climatiques.

GNP (Gross National Product) PNB (produit national brut) : valeur marchande totale de tous les biens et services finaux produits par les citoyens d'un pays, y compris les exportations et les importations, généralement sur une année.

HYDROLOGIE : Étude du mouvement de l'eau, en particulier sur terre et dans l'atmosphère.

IAM (Integrated Assessment Model, modèle d'évaluation intégrée) : outil informatique qui combine l'économie, la science du climat et les sciences sociales afin d'établir des relations quantitatives entre les systèmes humains et terrestres, contribuant ainsi à éclairer les décisions politiques.

IR (infrarouge) : Rayonnement thermique émis par tous les objets solides et les gaz à effet de serre en raison de leur température.

LA NIÑA : Phase froide de l'ENSO, caractérisée par un renforcement des remontées d'eau froide au large des côtes sudaméricaines et des alizés dans le Pacifique.

MAIZE : Maïs.

MODÈLE : Code informatique ou ensemble de codes qui quantifient nos connaissances sur divers processus et les interactions entre ces processus.

MORTALITÉ : Décès ou nombre de décès, généralement exprimé pour une population et une période données.

NCA (National Climate Assessment) : Rapport périodique rendu obligatoire par la loi Global Change Research Act de 1990, qui résume l'impact du changement climatique sur les États-Unis. Cinq rapports NCA ont été publiés : NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18) et NCA5 (2023).

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) : groupe de 38 pays membres dotés d'un système démocratique et d'une économie libre.

PALEOCLIMAT : Climat d'un passé lointain, avant l'utilisation généralisée des instruments météorologiques modernes (généralement avant 1850), nécessitant le recours à des mesures « indirectes » telles que les cernes des arbres, les carottes de glace, les enregistrements polliniques, etc.

PDI (Power Dissipation Index, indice de dissipation de puissance) : estimation statistique du potentiel destructeur cumulé d'un cyclone tropical au fil du temps, calculé comme la somme des cubes des vitesses maximales soutenues du vent.

PDO : Oscillation décennale du Pacifique, interaction récurrente entre l'océan et l'atmosphère centrée sur le bassin pacifique, associée à des régimes principalement chauds ou froids qui influencent le climat mondial.

PHÉNOMÈNE DE HURST HURST PHENOMENON : Voir persistance à long terme.

PHOTOSYNTÈSE : Processus par lequel les plantes se développent, nécessitant du dioxyde de carbone, de l'eau et de la lumière à des températures suffisamment élevées (10°C à 35°C pour un fonctionnement optimal).

PPM : Parties par million, une mesure de la concentration d'une substance dans (par exemple) l'atmosphère.

PRÉINDUSTRIEL : Période historique récente où les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine étaient considérées comme insignifiantes, généralement jusque vers le milieu du XVIIIe siècle.

PRODUCTION PRIMAIRE BRUTE : Énergie chimique totale utilisée par les plantes pendant la photosynthèse au cours d'une période donnée. La production primaire nette est le résidu après utilisation de l'énergie nécessaire à la respiration et représente la contribution à la croissance de la biomasse.

RÉDUCTION : Dans le contexte de la politique environnementale, diminution des émissions.

RÉGRESSION : Méthode statistique permettant de sélectionner les coefficients d'une équation linéaire afin d'expliquer le comportement d'une variable dépendante en fonction des variations d'une ou plusieurs variables explicatives.

RÉTROACTION RADIATIVE, RADIATIVE FEEDBACK : Modification de l'équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement infrarouge (IR) émis, par rapport au sommet de l'atmosphère, causée par des changements de la température de surface.

SCC (Social Cost of Carbon, coût social du carbone) : estimation des dommages économiques nets, mesurés en dollars actuels, causés par l'émission d'une tonne supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère.

SCÉNARIO D'ÉMISSIONS : Scénario hypothétique des émissions futures de gaz à effet de serre (ou des concentrations atmosphériques qui en résultent) basé sur des hypothèses concernant l'activité économique mondiale, la prévalence de l'utilisation des combustibles fossiles et (parfois) les estimations du cycle mondial du carbone concernant le taux d'absorption du CO₂ par les terres et les océans.

SCÉNARIOS RCP (Representative Concentration Pathway) : Différents scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre et de leur impact sur l'atmosphère, présentés dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5) du GIEC. Les scénarios RCP sont identifiés par un numéro (par exemple RCP6.0) indiquant le forçage radiatif qu'ils supposent en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle, en watts par mètre carré. Les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 sont des scénarios intermédiaires, tandis que le scénario RCP8.5 est un scénario extrême avec des émissions futures très importantes de gaz à effet de serre.

SCÉNARIOS SSP (Shared Socioeconomic Pathway) : Différents scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre et de leur impact sur l'atmosphère, présentés dans le sixième rapport d'évaluation (AR6) du GIEC. Certains scénarios SSP sont analogues aux anciens scénarios RCP, à des fins de continuité et de comparaison avec les évaluations antérieures des modèles climatiques.

TAUX D'ACTUALISATION (DISCOUNT RATE): Taux d'intérêt utilisé pour convertir les coûts et les avantages futurs en valeur actuelle. Il varie inversement avec la valeur actuelle, de sorte qu'un taux d'actualisation élevé réduit la valeur actuelle des coûts et des avantages futurs.

TC : Tropical cyclone, Cyclone tropical.

TENDANCE , TREND : Coefficient, généralement estimé à l'aide d'une régression linéaire, représentant la pente d'une ligne de meilleur ajustement à travers une série chronologique de données, indiquant toute tendance de la moyenne de la série à augmenter ou à diminuer au fil du temps.

TMAX : Température maximale quotidienne de l'air à la surface.

TMIN : Température minimale quotidienne de l'air à la surface.

TOA : Top of atmosphere, Sommet de l'atmosphère.

TONNE : Tonne métrique.

TOXICOLOGIE : Étude des effets néfastes des substances chimiques sur les organismes vivants.

TSI (Total Solar Irradiance) : Mesure de la quantité totale de rayonnement solaire incident par unité de surface, incluant toutes les longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique, qui atteint l'atmosphère terrestre. Généralement exprimée en watts par mètre carré (W/m²).

UHI (Urban Heat Island, îlot de chaleur urbain) : tendance des zones habitées à être plus chaudes que leur environnement rural, en raison du remplacement des terres naturelles et de la végétation par des routes, des parkings, des bâtiments et des sources de chaleur résiduelle.

USHCN : U.S. Historical Climatology Network Réseau climatologique historique des États-Unis, composé de données sur la température et les précipitations contrôlées par des normes de qualité provenant de 1 218 stations météorologiques de surface.

VERDISSEMENT MONDIAL GLOBAL GREENING:: Augmentation de la verdure observée par satellite dans la plupart des zones végétalisées depuis le début des années 1980.

MÉTADONNÉES POUR LES FIGURES ET LES TABLEAUX

Figure 2.1 Capture d'écran de la figure 3 de Zhu *et al.* 2016 <https://www.nature.com/articles/nclimate3004>

Figure 2.2 Capture d'écran tirée de Gerhart et Ward (2010) Figure 2
<https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x>

Figure 2.3 Capture d'écran tirée de Copernicus Marine Services
https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/description

Figure 2.4 Capture d'écran tirée de l'AIMS (2023) Figures 2-4
https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

Figure 3.1.1 Capture d'écran de l'AR6 WG1 Ch2 Fig 10 Figure

3.1.2 Capture d'écran de l'AR6 WG1 Ch7 Fig 7-6

Figure 3.1.3 Figure créée par l'auteur. Source des données sur le CO₂ :
<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

Figure 3.2.1 Capture d'écran tirée de Hausfather *et al.* (2019) Figure S4
<https://doi.org/10.1029/2019GL085378>

Figure 3.2.2 Figure créée par l'auteur. Source des données : Freidlingstein *et al.* (2024)
<https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519>
Source des données : <https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>

Figure 3.2.3 Créée par l'auteur à partir des tendances OLS, source des données :
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>

Figure 3.2.4 Créée par l'auteur à partir des tendances OLS, source des données :
<https://globalcarbonbudget.org/download/1442/>

Figure 4.1 Capture d'écran tirée de Scafetta (2021) Figure 1 <https://doi.org/10.3390/cli9110161>

Figure 5.1 Source des données : <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Figure créée par l'auteur. Un membre de l'ensemble par modèle, les températures moyennes annuelles sont calculées à partir des températures brutes mensuelles mondiales ; la « fourchette » correspond à la température la plus chaude du modèle moins la température la plus froide du modèle pour chaque année ; l'écart type est calculé à partir des températures brutes des 33 modèles pour chaque année.

Figure 5.2 Capture d'écran tirée de Scafetta (2023) Figure 2 <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>

Figure 5.3 Figure créée par l'auteur. Source des données : <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Un membre de l'ensemble SSP370 par modèle. Tendances OLS linéaires calculées à partir des anomalies de température mensuelles mondiales par rapport à 1981-2010.

Figure 5.4 Figure créée par l'auteur, basée sur la figure 3 de McKittrick et Christy (2020) <https://doi.org/10.1029/2020EA001281>. Mise à jour à l'aide des mêmes méthodes et données étendues de 2014 à 2024, voir McKittrick et Christy (2025) dans les références du chapitre.

Figure 5.5 Capture d'écran de la figure 10.SM1 du rapport AR5 du GIEC, avec annotations de l'auteur.

Figure 5.6 Figure créée par l'auteur d'après Christy et McNider (2017) <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z> avec des données mises à jour disponibles à l'adresse https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/ERA5_REANALYSES/ et https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/JRA3Q_REANALYSES/ compilées ici https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/CWG25_Fig_5.7_Table_250627.xlsx

Figure 5.7 Capture d'écran tirée de

https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 (consulté le 27 mai 2025) Figure 5.8 Capture d'écran tirée de Rugenstein et Hakuba (2023) Figure 1 <https://doi.org/10.1029/2022GL101802>

Figure 5.9 Figure créée par l'auteur. Source des données : <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Tendances linéaires OLS. Un membre de l'ensemble SSP370 par modèle, températures moyennes de l'air en surface pour les mois de juin à août entre 31° N et 49° N de latitude et 84° O et 102° O de longitude. Données de température observées pour les mêmes mois par le NOAA/NCEI à l'adresse <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/time-series> pour les 12 États du Corn Belt, moyennées ensemble.

Figure 6.1.1 Représentation graphique de la figure 10 tirée de Koutsoyiannis (2013) <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626>

Figure 6.2.1 Capture d'écran de la figure tirée de Maue (2025) <https://climatlas.com/tropical/>

Figure 6.2.2 Figure créée par l'auteur. Données provenant du National Hurricane Center (2024) <https://www.nhc.noaa.gov/climo/>

Figure 6.2.3 Figure créée par l'auteur. Données provenant du NOAA HRD https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

Tableau 6.2.1 Tableau créé par l'auteur. Données provenant du NOAA HRD https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html

Figure 6.3.1 Capture d'écran tirée de NCA4 Figure 6.4

Figure 6.3.2 Figure créée par l'auteur. Source des données : https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

Figure 6.3.3 Figure créée par l'auteur. Source des données : https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

Figure 6.3.4 Figure créée par l'auteur. Source des données : https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

Figure 6.3.5 Figure créée par l'auteur. Source des données : https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

Figure 6.3.6 Figure créée par l'auteur. Source des données : https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

Figure 6.3.7 Capture d'écran tirée de <https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves>

Tableaux encadrés. Tableau créé par l'auteur. Données tirées de McKittrick et Christy (2025)

Figure 6.4.1 Figure créée par l'auteur. Données tirées de McKittrick et Christy (2025)

Figure 6.4.2 Figure créée par l'auteur. Données tirées de McKittrick et Christy (2025)

Figure 6.4.3 Figure créée par l'auteur. Données tirées de McKittrick et Christy (2025)

Figure 6.4.4 Figure créée par l'auteur. Données tirées de McKittrick et Christy (2025)

Figure 6.4.5 Figure créée par l'auteur. Données tirées de McKittrick et Christy (2025)

Figure 6.5.1 Figure créée par l'auteur. Source des données : https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv

Figure 6.7.1 Figure créée par l'auteur. Source des données : <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0> consulté le 16 juin 2025. Ligne de tendance OLS ajoutée.

Figure 6.8.1 Capture d'écran tirée de Lizundia-Loiola *et al.* (2021), figure 12.

Figure 6.8.2 Capture d'écran tirée de Marlon *et al.* (2012), figure 2, panneau C. <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109>

Figure 6.8.3 Figure créée par l'auteur. Données de 1926 à 2016 : https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_to talFires.html. Après 2017 <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires> Consulté le 16 juin 2025.

Figure 7.1 Capture d'écran tirée de <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>

Tableau 7.1 Tableau créé par l'auteur. Tiré de la section 6.2 de <https://judithcurry.com/wp-content/uploads/2018/11/special-report-sea-level-rise-3.pdf>

Figure 7.2 Capture d'écran tirée de https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (téléchargée le 22/04/25)

Figure 7.3 Capture d'écran de https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (téléchargée le 22/04/2025)

Figure 7.4 Capture d'écran de https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (téléchargée le 22/04/25)

Figure 7.5 Capture d'écran tirée du site https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (téléchargée le 22/04/25)

Figure 7.6 Figure créée par l'auteur. Données provenant de https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750

Figure 8.1 Capture d'écran tirée de <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf>

Figure 8.2 Capture d'écran tirée de Hansen et Karecha (2025) Figure 1

<https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf> Tableau 8.1 Capture d'écran de la colonne 1 du tableau 12.12 Rapport du groupe de travail I du GIEC AR6

Figure 9.1 Capture d'écran tirée de Taylor et Schlenker (2021) Figure 1 <https://www.nber.org/papers/w29320>

Figure 9.2 Capture d'écran tirée de McKittrick (2025) Figure 1 <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2>

Figure 10.1 Capture d'écran tirée de Pielke (2024) <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0> Figure 3.

Figure 10.2 Capture d'écran tirée de Gasparini *et al.* (2015) Figure 2 [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)

Figure 11.1 Capture d'écran tirée de Pielke Jr (2023) <https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023>

Figure 11.2 Capture d'écran tirée de CEA-OMB (2023) <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf> Figure 1.

À PROPOS DES AUTEURS

John Christy, Ph.D., est professeur émérite en sciences atmosphériques et terrestres et climatologue de l'État d'Alabama à l'université d'Alabama à Huntsville. Il est titulaire d'une licence en mathématiques de la CSU Fresno et d'une maîtrise et d'un doctorat en sciences atmosphériques de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign. Il est membre de l'American Meteorological Society et a reçu la médaille de la NASA pour ses réalisations scientifiques exceptionnelles pour avoir construit, avec le Dr Roy Spencer, le premier ensemble de données sur la température atmosphérique mondiale à partir de satellites en orbite polaire. Il a été auteur principal du troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001), coauteur du rapport d'experts de l'Académie nationale des sciences sur la reconstitution des températures de surface (2006) et a siégé au programme scientifique sur le changement climatique de la NOAA, au sous-comité des sciences de la Terre de la NASA, au conseil des études spatiales du Conseil national de la recherche et au conseil consultatif scientifique de l'EPA. En outre, le Dr Christy a témoigné lors de 20 audiences du Congrès américain.

Judith Curry, Ph.D., est professeur émérite à l'Institut de technologie de Géorgie, où elle a occupé le poste de présidente du département des sciences de la Terre et de l'atmosphère pendant 13 ans. Elle est présidente et cofondatrice du Climate Forecast Applications Network (CFAN). Mme Curry est titulaire d'un doctorat en sciences géophysiques de l'université de Chicago. Elle est l'auteur ou coauteur de 192 articles évalués par des pairs dans le domaine des sciences atmosphériques et climatiques, de deux manuels et, plus récemment, du livre *Climate Uncertainty and Risk*. Mme Curry est membre de l'American Meteorological Society, de l'American Association for the Advancement of Science, de l'American Geophysical Union et de l'American Academy of Sciences and Letters. Elle a siégé à plusieurs comités scientifiques du Programme mondial de recherche sur le climat, ainsi qu'au Comité consultatif pour la recherche biologique et environnementale du ministère américain de l'Énergie, au sous-comité des sciences de la Terre du Conseil consultatif de la NASA et au Comité des études spatiales et du Comité de recherche sur le climat du Conseil national de la recherche. Mme Curry a témoigné lors de 13 audiences du Congrès américain.

L'honorable Steven E. Koonin, Ph.D., est Edward Teller Senior Fellow à la Hoover Institution de Stanford. Il a occupé le poste de sous-secrétaire à la Science au ministère américain de l'Énergie (2009-2011), de directeur scientifique chez British Petroleum (2004-2009) et de professeur à Caltech (1975-2004, dont les neuf dernières années en tant que vice-président et doyen). M. Koonin est membre de l'Académie nationale des sciences et du groupe JASON de conseillers gouvernementaux, ainsi que gouverneur du Lawrence Livermore National Laboratory, après avoir occupé des fonctions similaires pour les laboratoires nationaux de Los Alamos, Sandia, Brookhaven et Argonne. Il a également été professeur à l'université de New York, chercheur senior non-résident à l'American Enterprise Institute et administrateur de l'Institute for Defense Analyses. Koonin est titulaire d'une licence en physique du Caltech et d'un doctorat en physique théorique du Massachusetts Institute of Technology. Il est l'auteur du best-seller de 2021 *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, du manuel *Computational Physics* publié en 1985 et de quelque 200 articles évalués par des pairs dans les domaines de la physique et de l'astrophysique, du calcul scientifique, des technologies et politiques énergétiques et de la science du climat.

Ross McKittrick, Ph.D., est professeur d'économie environnementale à l'Université de Guelph, en Ontario, au Canada. Il est titulaire d'un baccalauréat en économie de l'Université Queen's, ainsi que d'une maîtrise et d'un doctorat en économie de l'Université de la Colombie-Britannique. Il a publié de nombreux articles dans des revues d'économie et de sciences physiques sur des sujets liés au changement climatique, à la pollution et

aux politiques publiques. Son livre *Economic Analysis of Environmental Policy* a été publié par les Presses de l'Université de Toronto en 2010. Sa formation en statistiques appliquées l'a amené à rédiger ou à co-rédiger des publications évaluées par des pairs sur un large éventail de sujets dans le domaine des sciences physiques, notamment la reconstitution du paléoclimat, la transmission du paludisme, la mesure de la température de surface, la méthodologie d'attribution climatique et l'évaluation des modèles climatiques. Le professeur McKittrick a donné de nombreuses conférences universitaires à travers le monde et a été invité à contribuer au rapport 2006 de l'Académie nationale des sciences sur la reconstitution des températures de surface, a été expert pour les trois derniers rapports d'évaluation du GIEC (groupes de travail I et II) et a témoigné devant le Congrès américain et devant des commissions de la Chambre des communes et du Sénat canadiens.

Roy W. Spencer, Ph.D., est chercheur principal à l'université d'Alabama à Huntsville. Il est titulaire d'une licence en sciences atmosphériques et océaniques de l'université du Michigan, ainsi que d'une maîtrise et d'un doctorat en météorologie de l'université du Wisconsin-Madison. Les recherches publiées par M. Spencer portent principalement sur la surveillance des processus météorologiques et du changement climatique à partir de satellites en orbite autour de la Terre, ainsi que sur l'utilisation de modèles physiques simples pour diagnostiquer la sensibilité climatique et les rétroactions climatiques. En tant que scientifique principal de la NASA pour les études climatiques, il a été chef de l'équipe scientifique américaine pour le radiomètre à balayage micro-ondes avancé (AMSR-E) embarqué sur le satellite Aqua, qui fournit les mesures mondiales les plus précises de la température de la surface de la mer, de la glace de mer et de plusieurs autres caractéristiques du système climatique. En collaboration avec le Dr John Christy, Spencer a mis au point la première technique satellitaire de surveillance de la température mondiale, pour laquelle ils ont reçu la médaille d'excellence scientifique de la NASA et le prix spécial de l'American Meteorological Society.