



# **Le climat du système Terre depuis sa formation jusque l'an 2100 et au-delà**

**Dominique Poissonnier**  
[dominique.poissonnier@meteo.fr](mailto:dominique.poissonnier@meteo.fr)

Société géologique du Nord

3 octobre 2024

## Notre objet d'études...



📷 The Earthrise photo taken by Anders. Photograph: William Anders/AP

... le système Terre, de la graine en son centre jusqu'au sommet de l'atmosphère.

# Plan

---

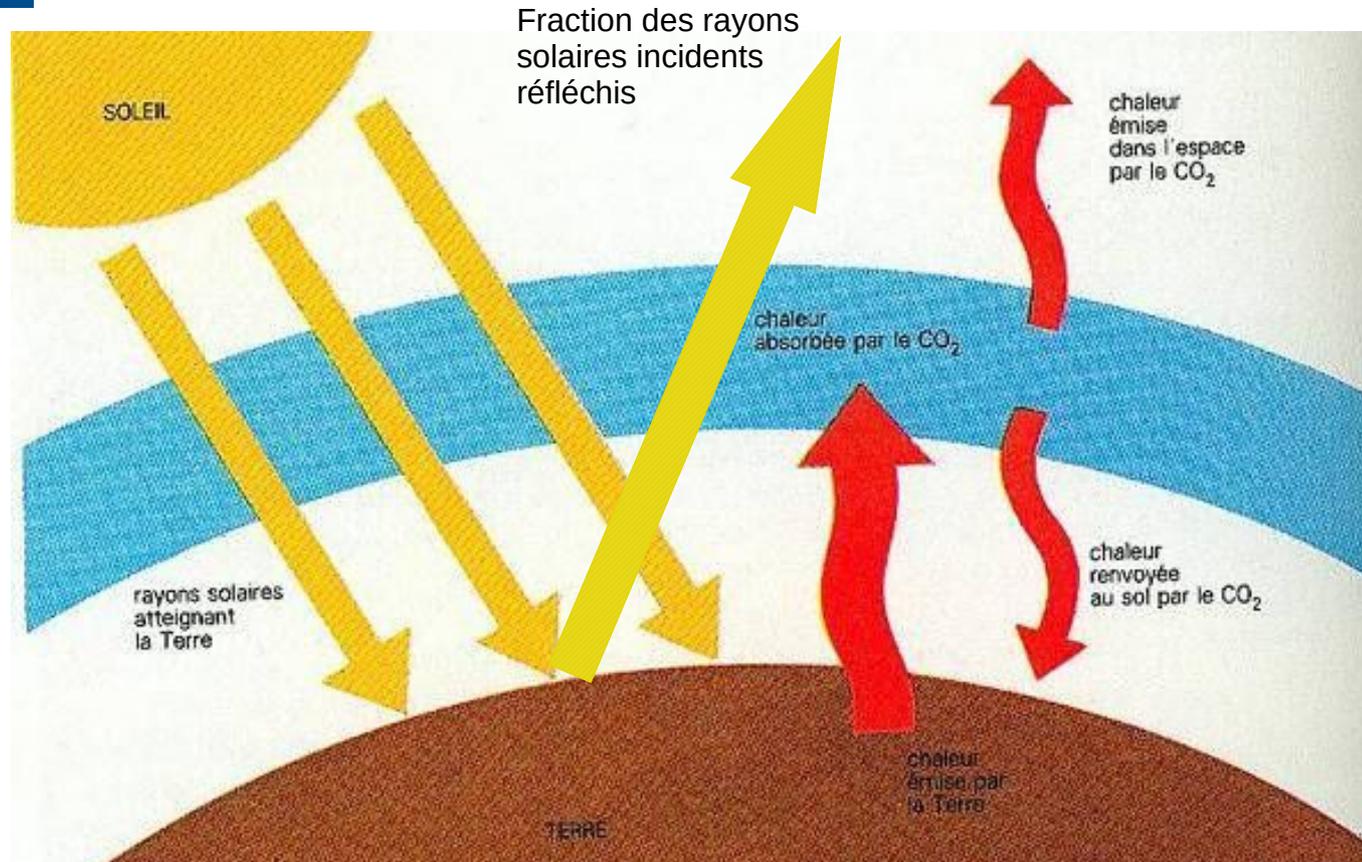
- 1. Les grands équilibres du climat**
- 2. Le changement climatique actuel**
- 3. Quelques exemples de changements climatiques passés**
- 4. L'étonnante stabilité de l'Holocène**
- 5. Les changements climatiques à venir et leurs conséquences**

# Plan

---

- 1. Les grands équilibres du climat**
- 2. Le changement climatique actuel**
- 3. Quelques exemples de changements climatiques passés**
- 4. L'étonnante stabilité de l'Holocène**
- 5. Les changements climatiques à venir et leurs conséquences**

# Le bilan radiatif de la Terre et l'effet de serre



Pièce en trois actes avec trois acteurs : le Soleil, la Terre et l'atmosphère.

Acte 1 : une partie des rayons du Soleil traverse l'atmosphère. Une partie est réfléchiée vers l'espace et l'autre partie chauffe la Terre.

Acte 2 : la Terre chauffée émet un rayonnement infrarouge

Acte 3 : ce rayonnement infrarouge est en partie arrêté par les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère

Paramètres qui modifient ce bilan radiatif : la **puissance solaire**, l'**albédo** de la planète (sols et aérosols) et la **quantité de gaz à effet de serre** qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la Terre.

# Albédo de la planète = pouvoir réfléchissant

Albédo de la Terre = 0,31 31 % de la lumière solaire incidente est réfléchi vers l'espace !

Moins il y a de surfaces englacées et plus l'albédo de la planète diminue. C'est une boucle de rétroaction positive.

Les nuages bas des genres Cumulus ou Stratocumulus ont un albédo élevé. Plus il fait chaud et moins il y a de Stratocumulus.

Avec le réchauffement, l'albédo diminue : c'est une boucle de rétroaction positive !



*Cumulus humilis* sur le sud de l'Angleterre



*Stratocumulus stratiformis* à Hong Kong

Crédit : atlas international des nuages

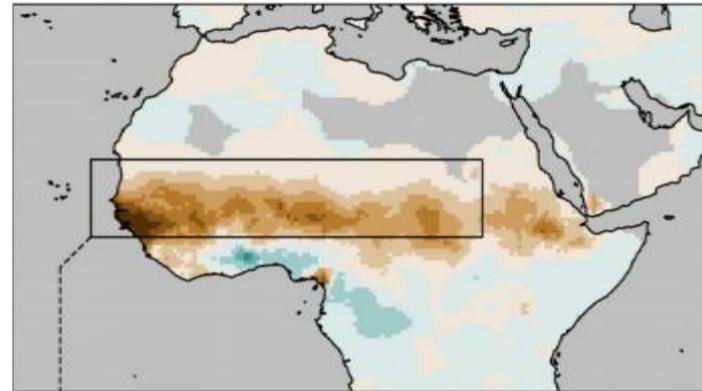
Les aérosols sont des particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Certains aérosols réfléchissent la lumière du soleil, augmentent l'albédo et ont un effet refroidissant (aérosols sulfatés), d'autres ont un effet réchauffant (suies).

# La pollution aux aérosols et la sécheresse au Sahel

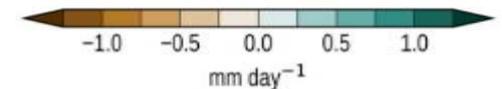
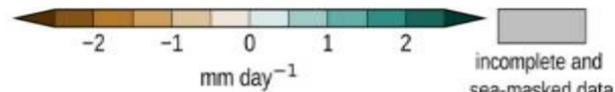
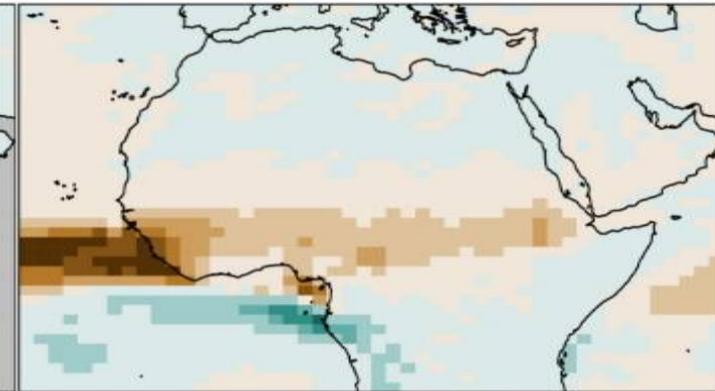
À gauche : réanalyse qui montre l'assèchement pendant les années 80 par rapport aux années 50.

À droite : simulation montrant les conséquences des changements de concentration des aérosols.

(b) Precipitation change over Africa  
CRU TS (1980-1990 – 1950-1960)



(c) 1.5x - 0.2x aerosol scaling (1955-1984)  
HadGEM3-GC3.1 hist-aer scalings



Sahel

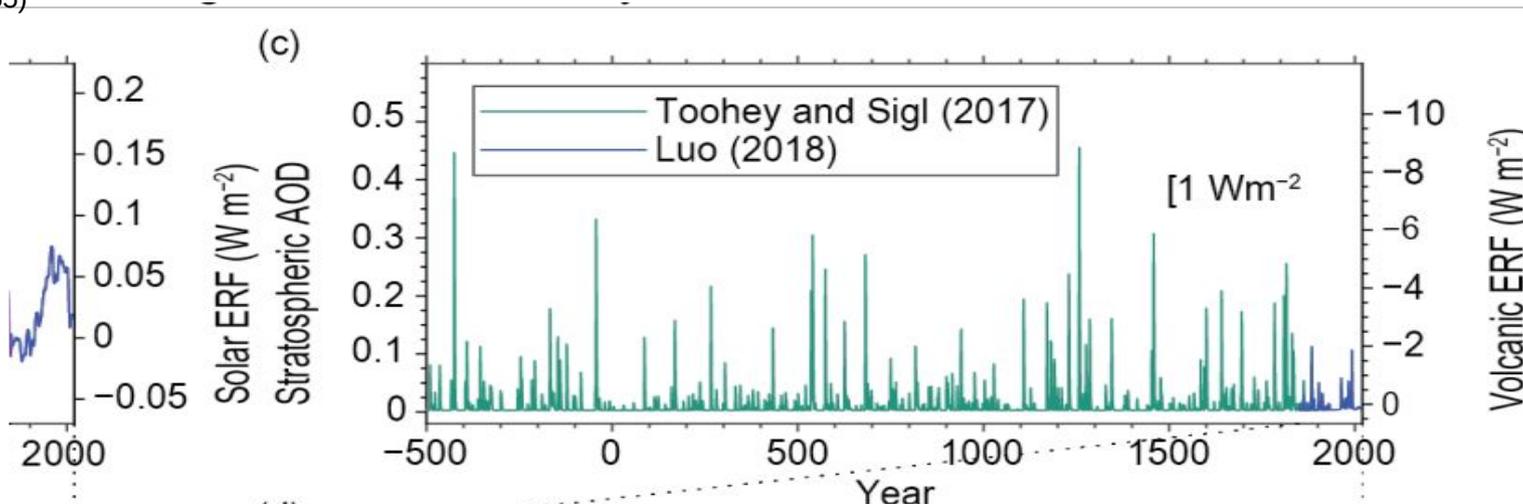
Source : GIEC 2021 chap10

- À partir des années 1970, la sécheresse s'installe durablement au Sahel.
- On attribue cette sécheresse en partie aux émissions d'aérosols sulfatés en Europe et Afrique du Nord (essence riche en soufre).
- Par le jeu de rétroactions et de téléconnexions, ces aérosols affectent la température de surface de la mer, celle du Sahara et la formation des nuages et la mousson de l'Afrique de l'Ouest qui ne remonte plus assez vers le nord.
- Les partisans de la géo-ingénierie voudraient envoyer dans l'atmosphère des aérosols sulfatés pour renvoyer la lumière solaire incidente et augmenter ainsi l'albédo. Une bonne idée ?

# Les volcans : un effet refroidissant... temporaire

– Les éruptions volcaniques sont considérées comme le principal forçage du climat depuis 2 500 ans. (GIEC 2021 chap 4 p.55)

Les effets directs d'une éruption durent relativement peu de temps mais une série d'éruptions peut enclencher des boucles de rétroaction qui ont des effets à plus long terme.



Source : GIEC 2021 AR6 chap 2  
 ERF = Effective radiative forcing  
 (forçage radiatif effectif)

– Peu de volcanisme pendant l'**Optimum climatique romain** entre -250 et +400 et l'**Optimum climatique médiéval 950-1350**.

– Série d'éruptions entre 536, 540 (–2 °C !) et 547. **Petit âge glaciaire de l'antiquité tardive** jusqu'en 660, peste, famines...

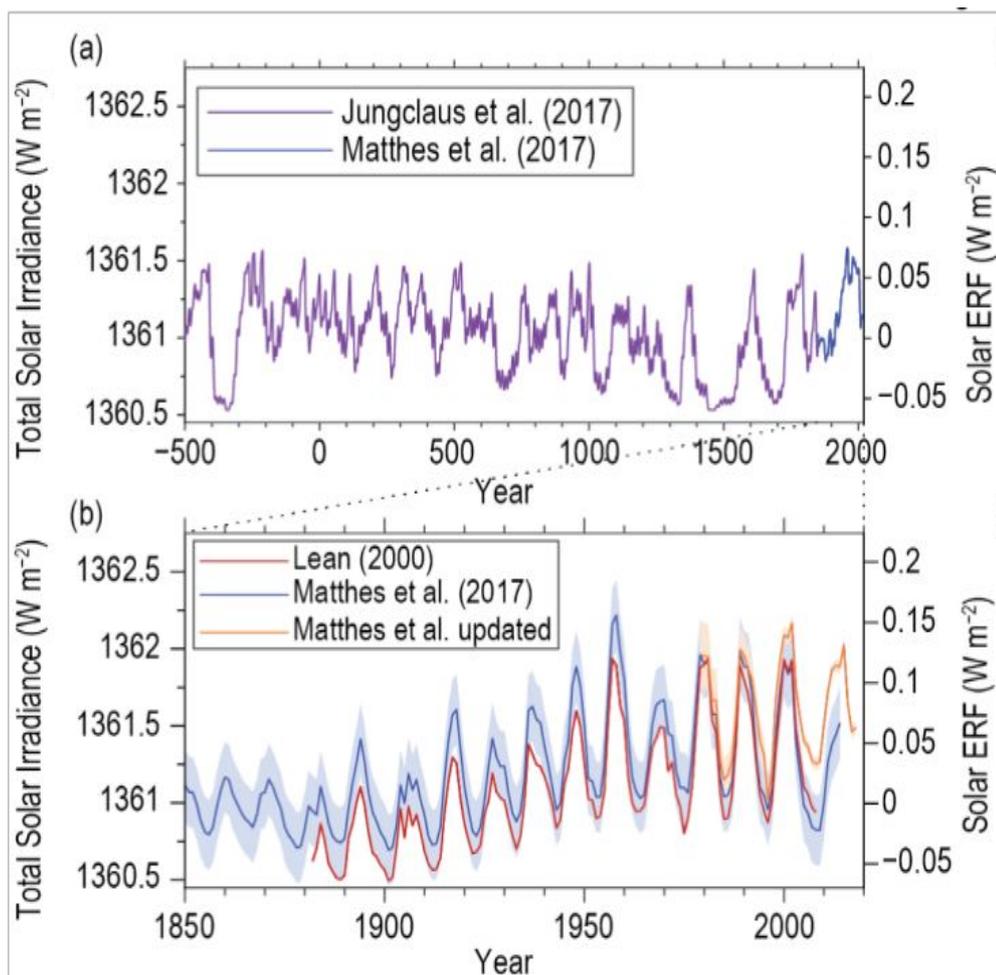
– Samalás (Indonésie) en 1257. **Entrée en Petit âge glaciaire ?** 4 éruptions entre 1275 et 1300.

– Laki (Islande) en 1783.

– Tambora (Indonésie) en 1815 et Fernandéia en 1831 + ? en 1836 retardent la sortie du **PAG**.

# Les forçages naturels : le soleil

– Le flux de rayonnement électromagnétique envoyé par le soleil au sommet de l'atmosphère (on parle d'irradiance) augmente avec le temps de 7 % tous les milliards d'années.



On repère le cycle de 11 ans en bas et les minimums d'activité de Maunder (1645-1715), Wolf (1270-1350), Spörer (1420-1570) et Dalton (1790-1830) en haut.

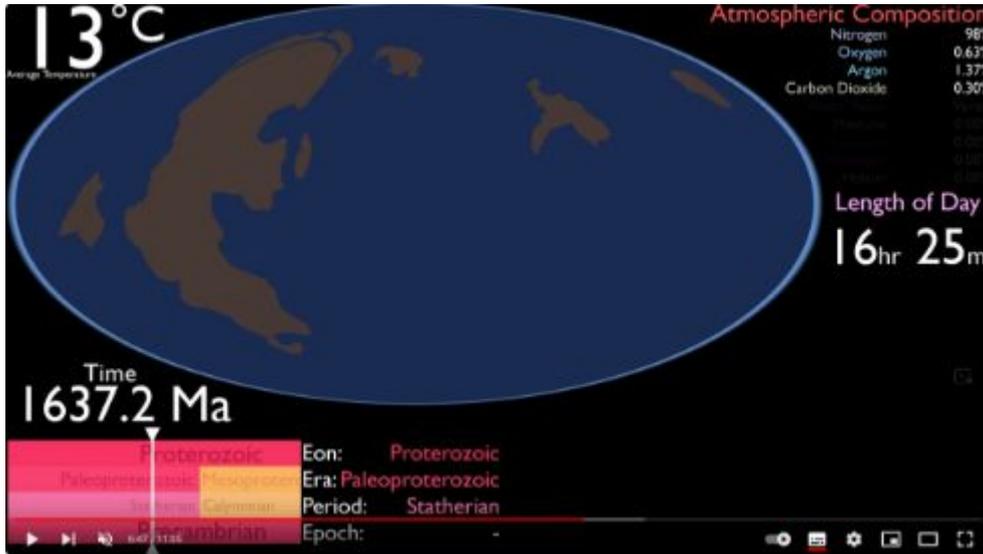
L'activité solaire joue un rôle dans le minimum de température de 1450 à 1850.

# Source et puits de CO<sub>2</sub> à l'échelle géologique

- À l'échelle géologique, les volcans sont la principale source de CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> volcanique a une signature isotopique différente du CO<sub>2</sub> provenant de la combustion des combustibles fossiles (plus riche en C<sup>13</sup>).
- À l'échelle géologique, le principal puits de CO<sub>2</sub> est l'altération des roches silicatées par l'eau de pluie.
- Les roches basaltiques issues du manteau s'épanchent à la surface pour former des trapps lors d'éruptions brèves (1 Ma). Ces roches basaltiques, riches en silicates, sont dissoutes par l'eau de pluie rendue acide par la dissolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique.
- En phase d'orogénèse, l'altération des silicates est favorisée : le puits de carbone est plus efficace.
- Quand il n'y a qu'un seul grand continent, le puits de CO<sub>2</sub> de l'altération des silicates s'enraye à cause de l'aridité continentale.

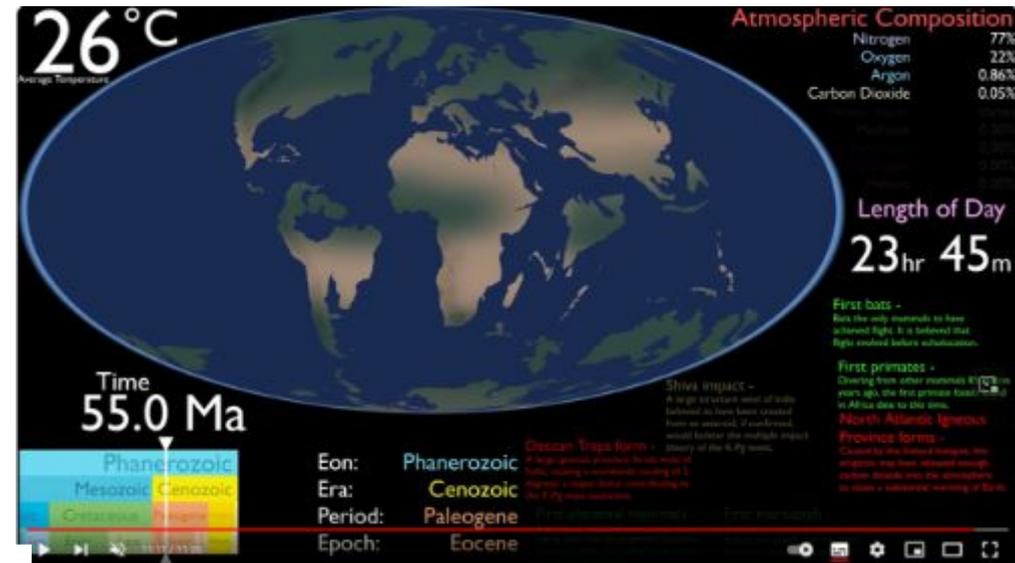
# La position des continents

Pour qu'il y ait des calottes de glace sur des continents polaires, il faut qu'il y ait des continents en position polaire !  
Et que la température reste assez fraîche en été pour ne pas tout faire fondre.



Source : <https://www.youtube.com/watch?v=Q1OreyX0-fw>

Il y a 1,6 milliards d'années, il fait plus frais qu'aujourd'hui mais pas de calottes sur les continents polaires qui n'existent pas.



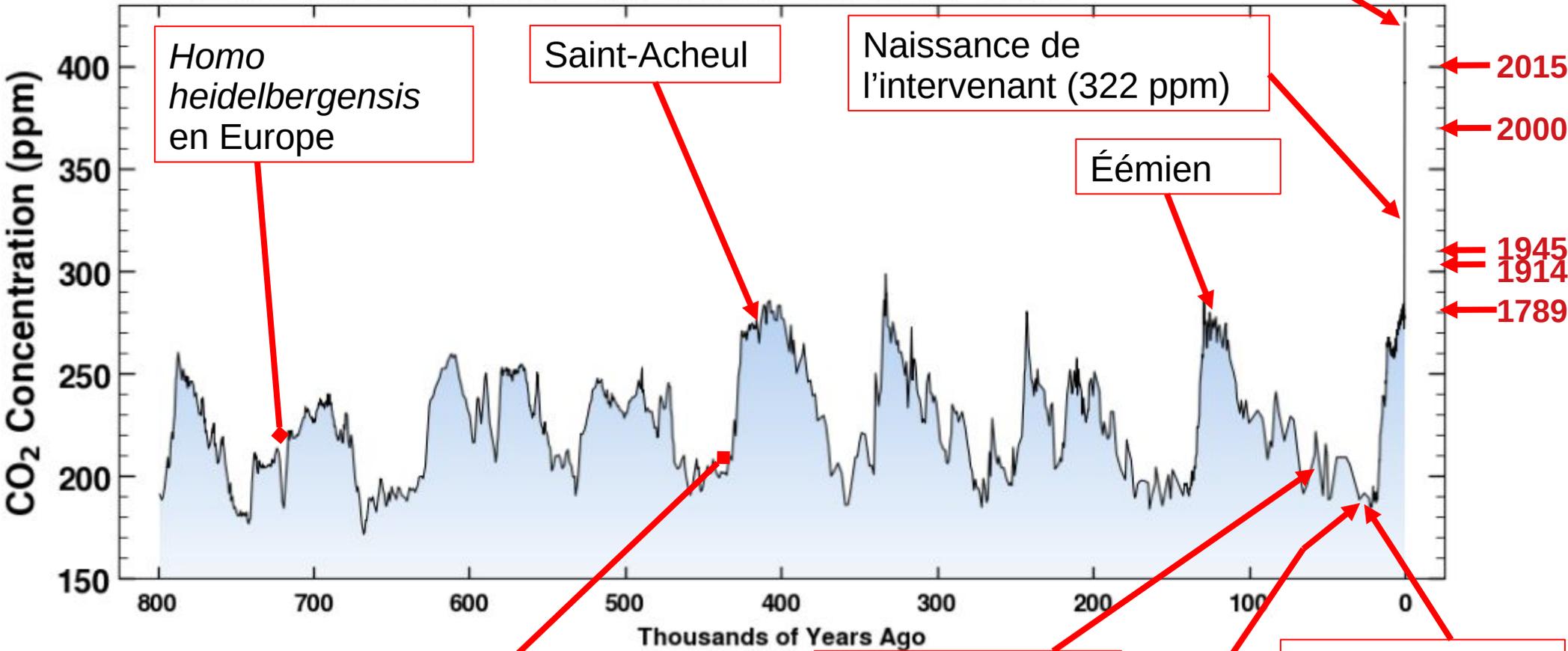
Il y a 55 millions d'années, il y a des continents au pôle sud et au pôle nord mais il fait trop chaud pour que les calottes s'installent.

# Le CO<sub>2</sub> : on n'a jamais connu ça depuis 800 000 ans ! (et même peut-être 2,6 millions d'années)

February 13, 2022

Ice-core data before 1958. Mauna Loa Data after 1958.

Printemps 2024  
(425 ppm)



*Homo heidelbergensis*  
en Europe

Saint-Acheul

Naissance de l'intervenant (322 ppm)

Éémien

*Homo neanderthalensis*  
en Europe

*Homo sapiens*  
en Europe

Dernier maximum glaciaire

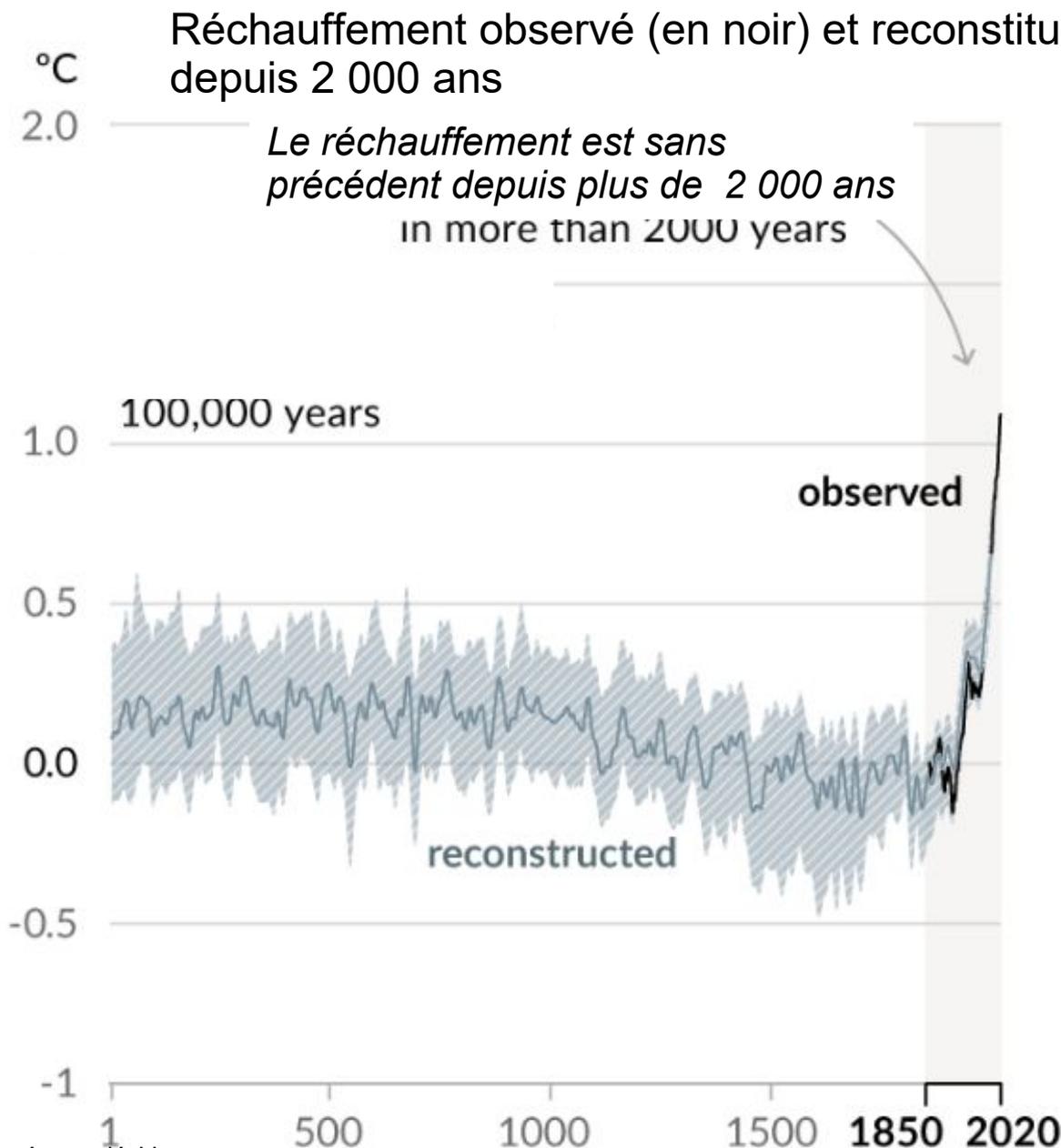
Vénus d'Amiens-Renancourt

# Plan

---

1. Les grands équilibres du climat
2. **Le changement climatique actuel**
3. Quelques exemples de changements climatiques passés
4. L'étonnante stabilité de l'Holocène
5. Les changements climatiques à venir et leurs conséquences

# L'évolution de la température moyenne mondiale depuis 2 000 ans



*Le réchauffement est sans précédent depuis plus de 2 000 ans*  
in more than 2000 years

Période 2011-2020 :  
+1,1 °C au-dessus de la  
moyenne 1850-1900.

**C'est la décennie la  
plus chaude depuis au  
11 700 ans.**

**2023 est l'année la  
plus chaude depuis  
125 000 ans (dernier  
interglaciaire).**

**Sur 12 mois glissants,  
on est à +1,6 C.**

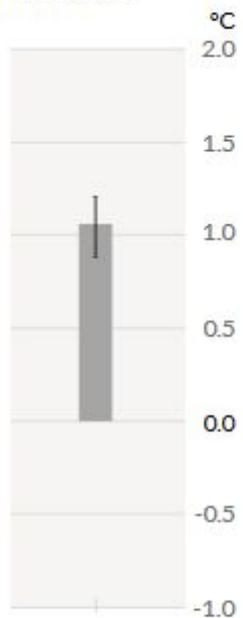
**Le 22 juillet 2024 est le  
jour les plus chaud  
jamais enregistré.  
17,16 °C en moyenne  
sur la planète.**

**2023 : 14,98 °C  
d'après Copernicus**

# Le réchauffement observé est dû à la combinaison de l'action des GES et de celle des aérosols

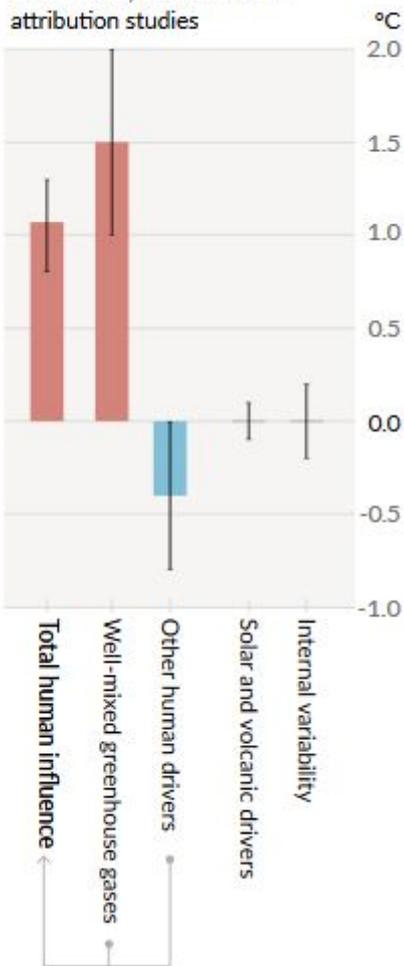
## Observed warming

a) Observed warming 2010-2019 relative to 1850-1900



## Contributions to warming based on two complementary approaches

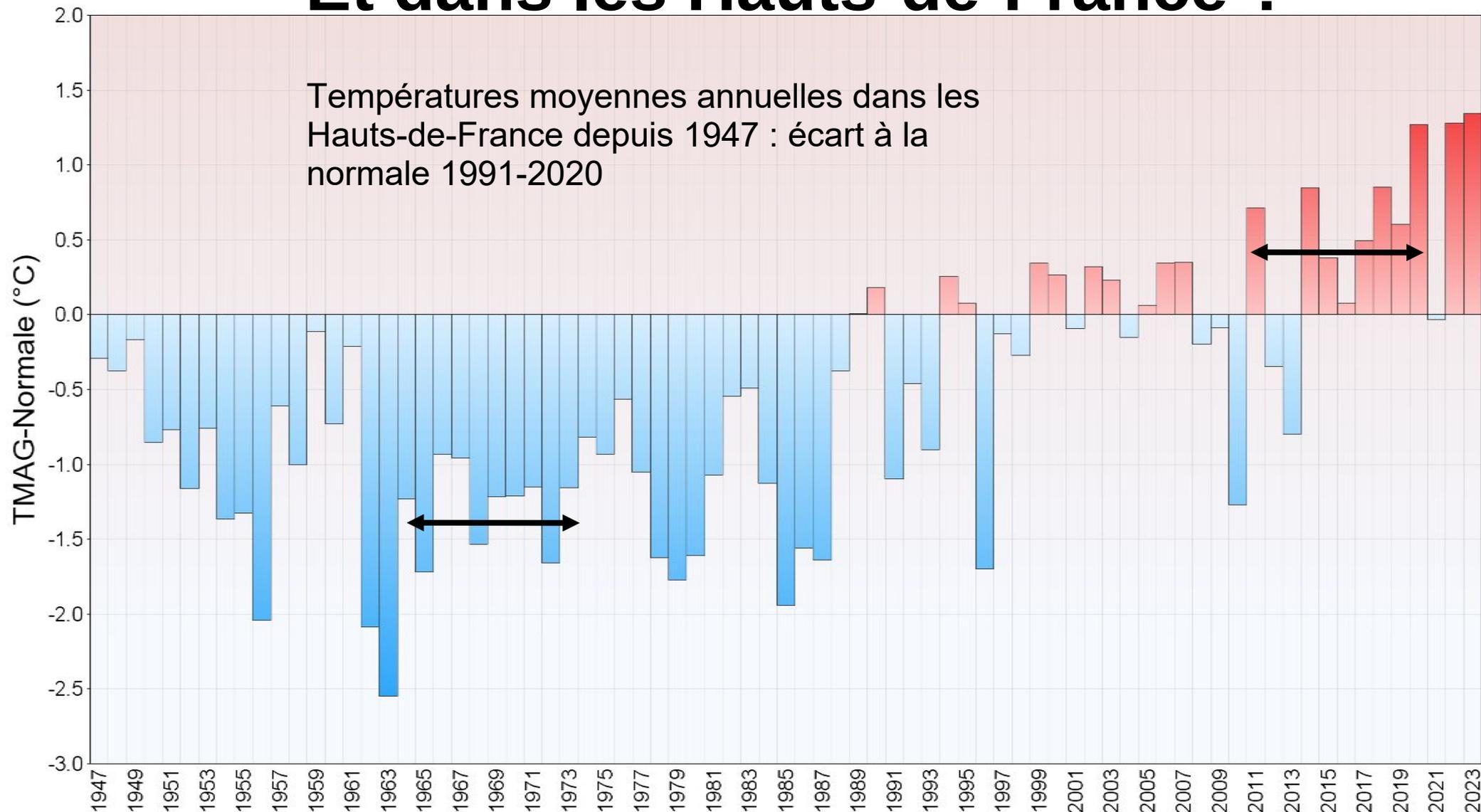
b) Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from attribution studies



Contributions au réchauffement observé sur la période 2010-2019 par rapport à la période 1850-1900

Les aérosols émis masquent une partie du réchauffement créé par les GES.

# Et dans les Hauts-de-France ?



Depuis 60 ans, chaque décennie est plus chaude que la précédente.

1961-1970 : 9,6 °C

2011-2020 : 11,4 °C

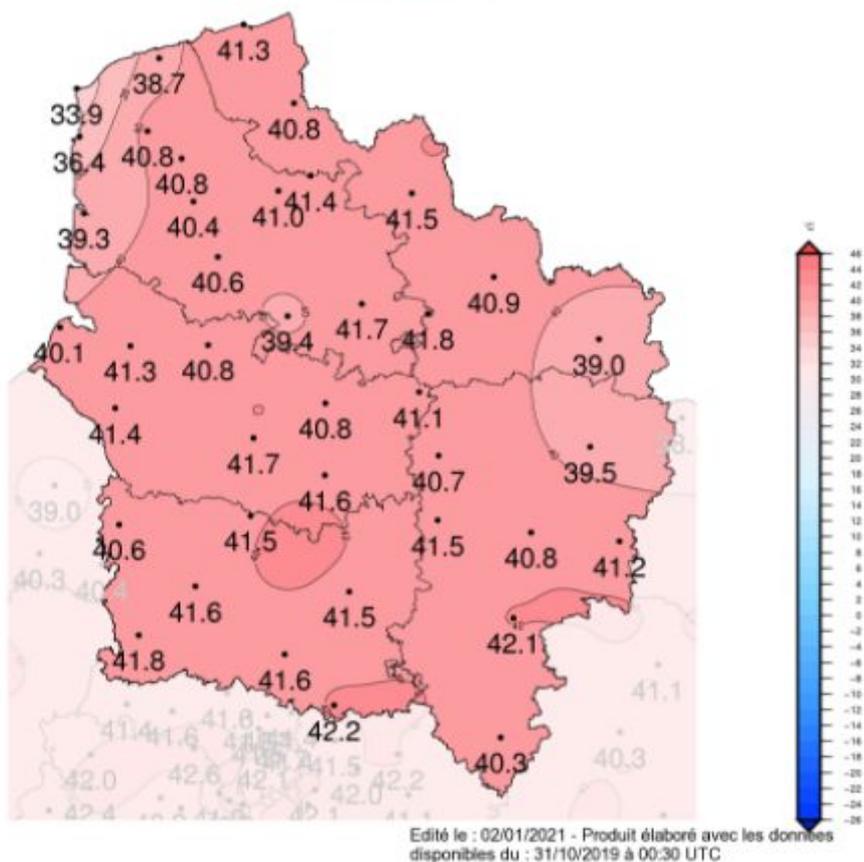
**Lille 1961-1970** Record = 33 °C

**2011-2020** Record = 41,5 °C

33 fois Tmax ≥ 33,0 °C

# La canicule de juillet 2019 dépend-elle de l'influence humaine ?

25 juillet 2019



**Sans influence humaine, la durée de retour de cet événement aurait été de plus de 1000 ans !**

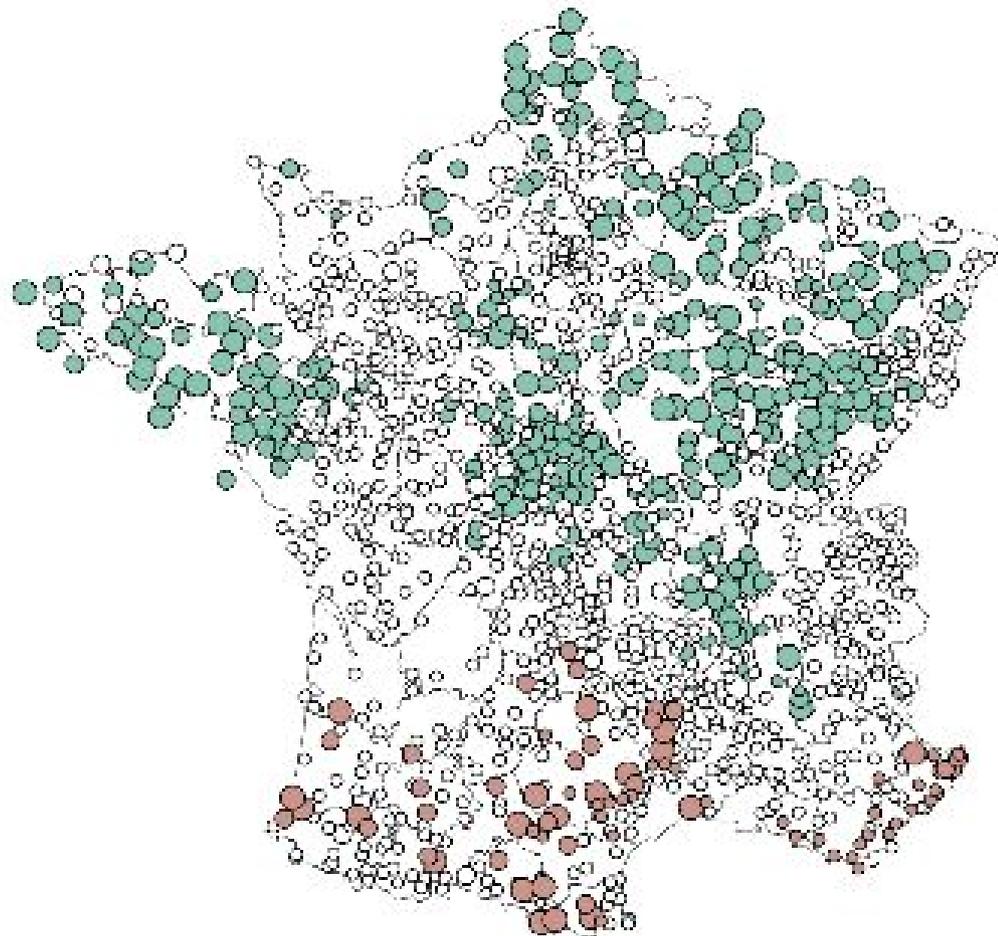
Le changement climatique a multiplié par 10 la probabilité de vivre cet événement.

**D'ici 2040, cet événement sera 4 fois plus fréquent encore par rapport à 2019.**

Vulnérabilité de la région : les îlots de chaleur urbains

# Évolution des précipitations

Évolution en France entre 1961 et 2012  
Cumul annuel en mm



**Loi de Clausius-Clapeyron :**  
l'air plus chaud **peut** contenir plus de  
vapeur d'eau.  
Quand les conditions sont favorables  
à la pluie, celle-ci est plus  
abondante.

Couleur des symboles

- Augmentation
- Augmentation faible
- Pas d'évolution
- Diminution faible
- Diminution

Taille des symboles

- Confiance élevée
- Confiance modérée
- Confiance faible



Source : Météo-France

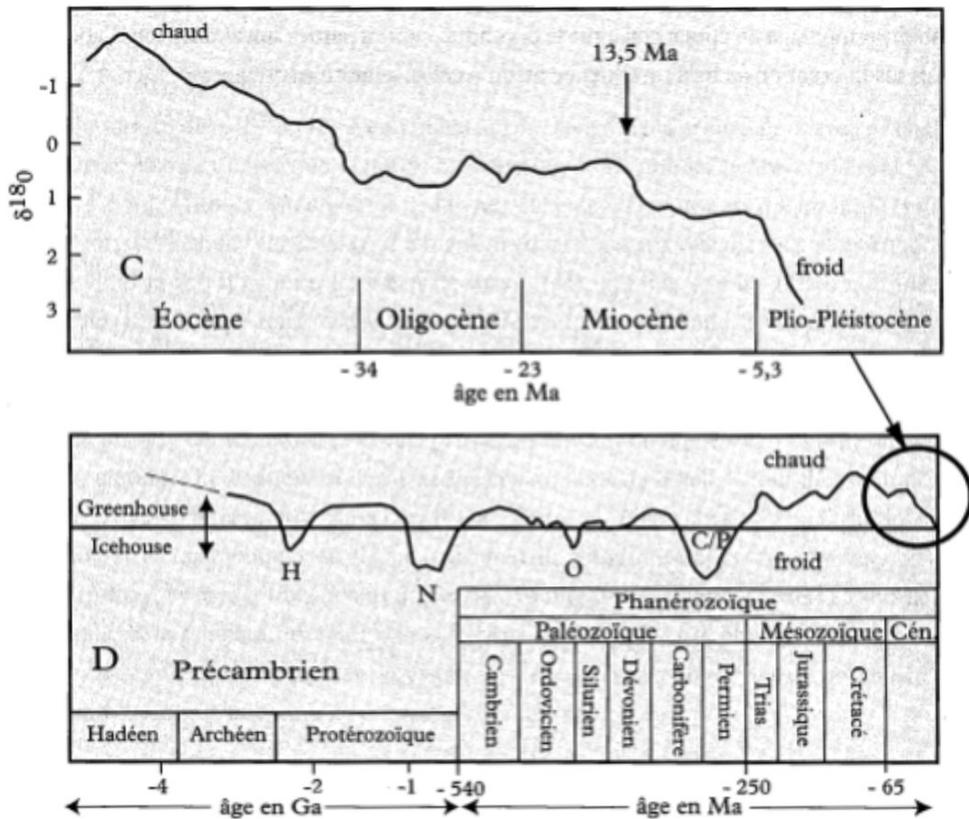
© Météo-France

# Plan

---

1. Les grands équilibres du climat
2. Le changement climatique actuel
3. **Quelques exemples de changements climatiques passés**
4. L'étonnante stabilité de l'Holocène
5. Les changements climatiques à venir et leurs conséquences

# Les climats anciens de la Terre



– La terre a essentiellement connu un environnement plus chaud qu’aujourd’hui. 85 % de l’histoire de la planète se déroulent dans un climat de type « Greenhouse »

– Les phases froides de type « Icehouse » sont des épisodes, parfois longs, mais qui restent minoritaires.

– Ces épisodes froids ou ères glaciaires ont une caractéristique commune : la présence d’au moins une calotte de glace permanente sur un continent en position proche d’un des deux pôles.

– Nous vivons depuis 34 millions d’années dans l’ère glaciaire du Cénozoïque récent.

– Le climat du premier milliard d’années à l’Hadéen et au début de l’Archéen nous est quasiment inconnu.

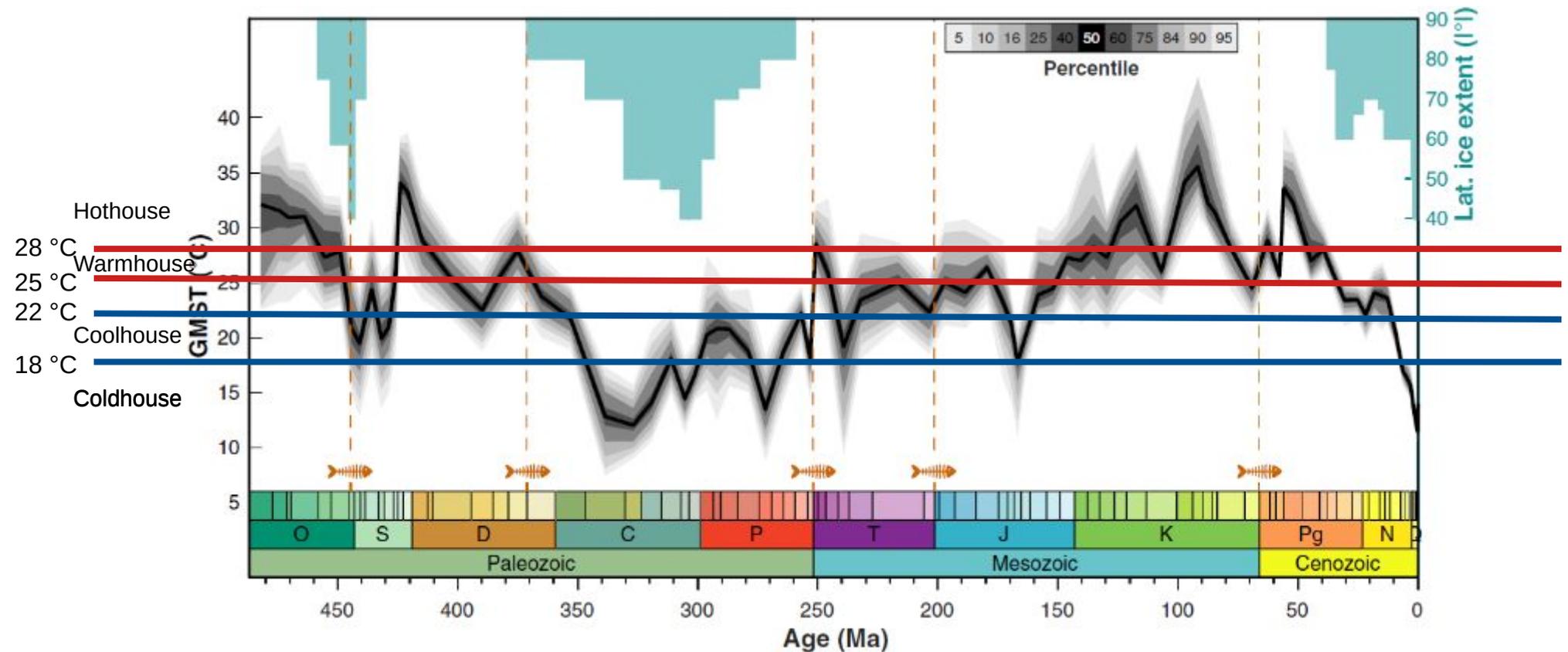
- H : glaciation huronienne
- N : glaciation du Néoprotérozoïque
- O : glaciation de l’Ordovicien
- C/P : glaciation Carbonifère/Permien ou LPIA Late Paleozoic Ice Age

Courbe δ<sup>18</sup>O réalisée sur le carbonate des foraminifères benthiques

# L'Archéen : chaud malgré un soleil froid

- À l'Archéen, la puissance du soleil est inférieure de 25 % à ce qu'elle est aujourd'hui. La Terre aurait dû être gelée. Pourquoi ne l'était-elle pas ?
- Grâce à un effet de serre surpuissant. Les gaz à effet de serre responsables de la non-glaciation sont le  $\text{CO}_2$  et surtout le méthane  $\text{CH}_4$ .
- La source principale de  $\text{CH}_4$  est l'activité des archées méthanogènes qui apparaissent il y a 3,5 milliards d'années. Le méthane émis ne s'oxyde pas en l'absence d'oxygène. C'est donc l'activité biologique qui empêche la glaciation.
- Vers 2,4 milliards d'années, les cyanobactéries commencent à émettre du dioxygène en quantité significative : c'est le « grand événement d'oxydation ». L'oxygène va oxyder tout le fer des océans puis le méthane de l'atmosphère et chasser les archées méthanogènes dans des endroits pauvres en oxygène.
- Le taux de GES dans l'atmosphère s'effondre, les températures chutent et c'est la glaciation huronienne.
- C'est encore l'activité biologique de bactéries qui est responsable d'un énorme changement climatique.

# Estimations de la température sur une bonne partie du Phanérozoïque (485 millions d'années sur les 539 millions)

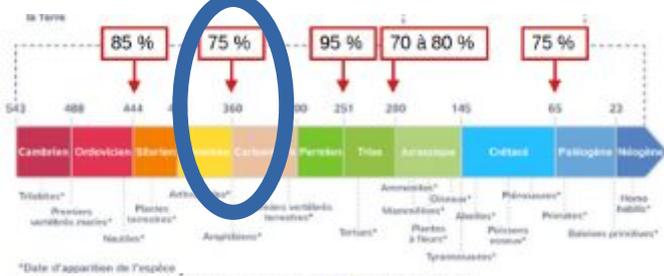


Source : E. J. Judd et al., Science 385, eadk3705 (2024). DOI: 10.1126/science.adk3705  
A 485-million-year history of Earth's surface temperature

La ligne noire représente la médiane d'un ensemble de simulations (80) et les zones grisées la distribution en quantiles.

En haut, l'extension maximale en latitude de la glace.

# L'extinction massive (2<sup>e</sup>) du Dévonien il y a 360 millions d'années



Au Dévonien, la vie est essentiellement marine. C'est l'âge des poissons.

Néanmoins, c'est au Dévonien qu'apparaissent les premiers arbres : les sols se forment.

Les nutriments issus de ces sols sont entraînés par les fleuves en mer : l'activité microbienne consomme tout l'oxygène. L'océan côtier devient anoxique.

Cette extinction se serait produite en plusieurs phases et pendant plusieurs millions d'années. 75 % des espèces disparaissent.

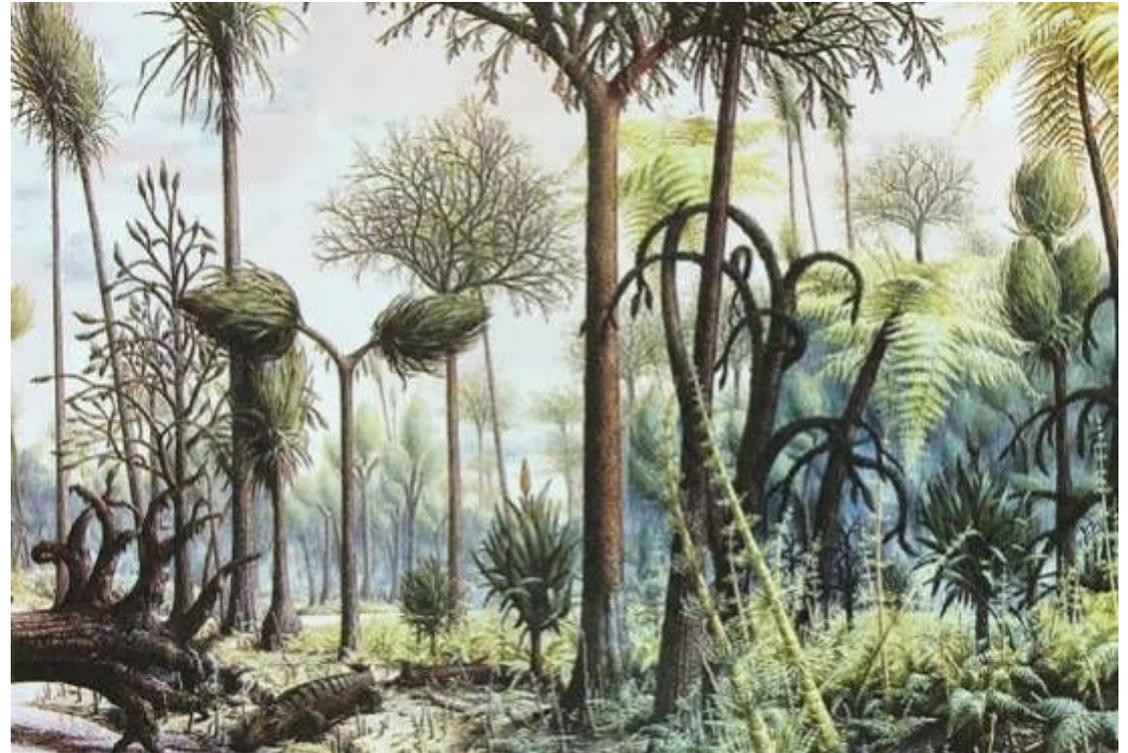
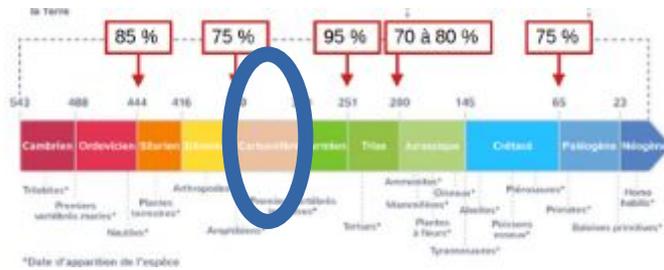


Reconstitution d'Archeopteris, le premier arbre fossilisé. Il a été trouvé dans des sédiments du Maroc. Il pouvait atteindre 30 mètres de haut et son tronc avait plus de 1,50 mètre de diamètre. Ses rameaux tombaient en automne et formaient une litière comparable à celle des forêts actuelles. Ses racines profondes contribuaient à la fracturation et à l'aération des roches sur lesquelles il vivait. Son mode de reproduction était en revanche archaïque et le contraignait à vivre dans les zones humides : cela se faisait par spores et non par graines.  
@ Khaidu / DeviantArt.



Le Dunkleosteus était une espèce de poisson cuirassé du Dévonien pouvant atteindre 10 mètres de longueur ! Crédit représentation : R.J Palmer.

# Les glaciations du Paléozoïque : le Carbonifère-Permien

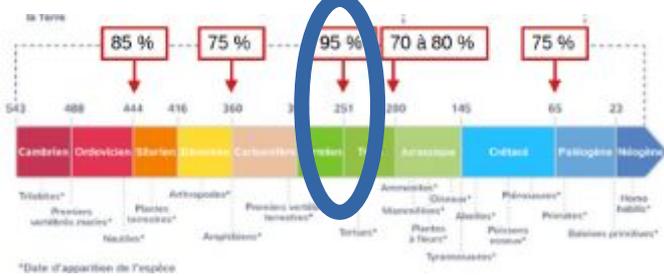


– Au Carbonifère (360-299 Ma), les premiers arbres ligneux se décomposent mal (les champignons xylophages capables de décomposer la lignine n'apparaîtront qu'au Trias). Au pied des montagnes de la chaîne Hercynienne et au bord de la mer, la forêt est régulièrement submergée. En s'enfonçant, la végétation se transforme progressivement en charbon. 400 veines de charbon = 400 forêts englouties pendant 20 millions d'années il y a environ 300 millions d'années.

– Cette extraction massive de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère fait baisser la concentration jusque 300 à 400 ppm. Le changement d'albédo ne suffit pas à compenser cette chute de CO<sub>2</sub>.

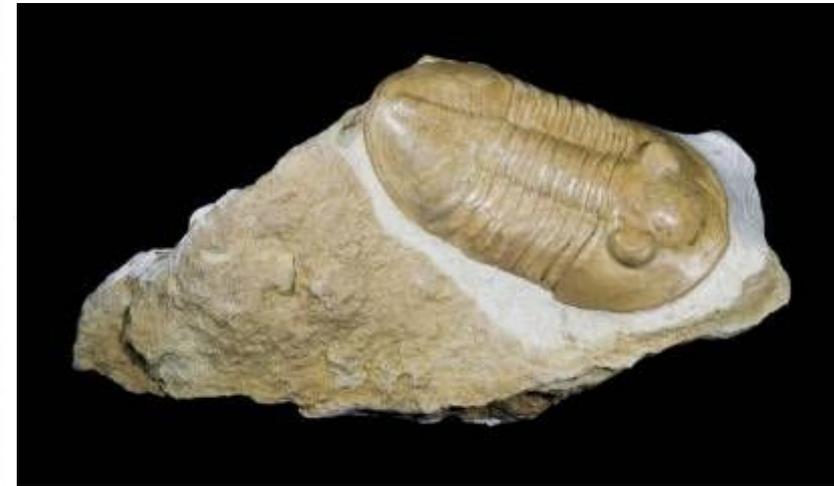
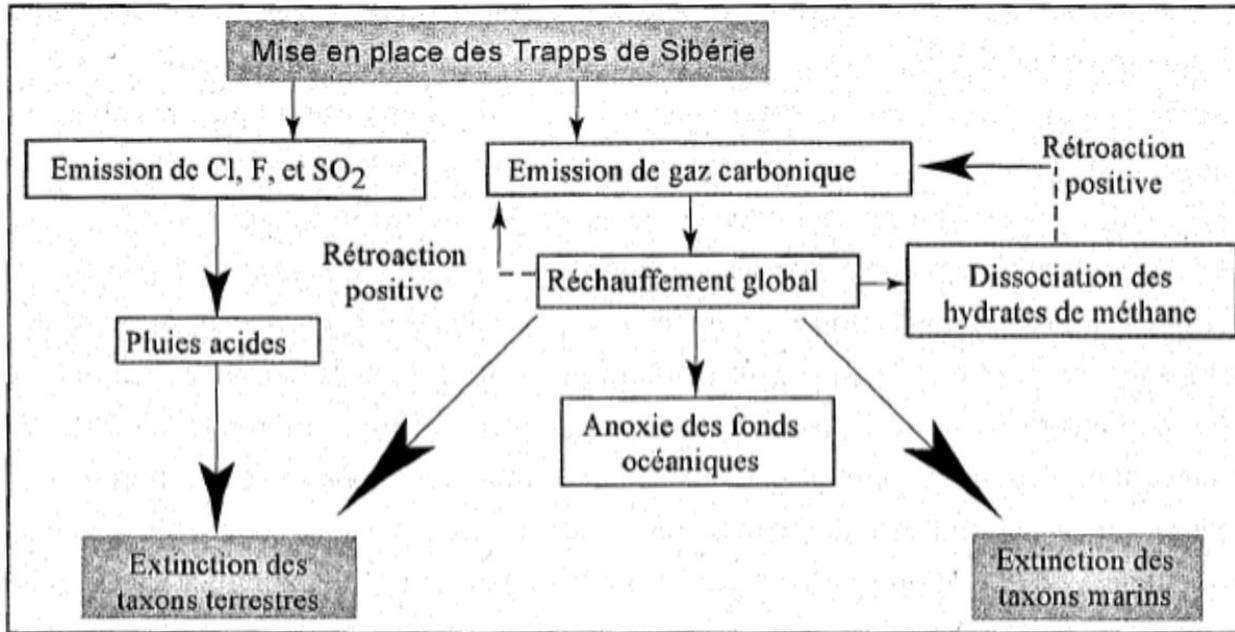
– Entre le Carbonifère et le Permien, se produit une longue glaciation entre 320 Ma et 270 Ma avec une calotte glaciaire dans l'hémisphère sud (d'après les chercheurs qui considèrent que le LPIA n'est pas toujours englacé)

# La grande extinction du Permien-Trias : un gros coup de chaud



- À la fin du Permien, il y a 251 millions d'années, de vastes épanchements magmatiques, les trapps de Sibérie se mettent en place pendant 1 million d'années et recouvrent 4 à 7 millions de km<sup>2</sup>.
- Les conséquences sont terribles : 95 % des espèces terrestres et 70 % des espèces marines disparaissent. C'est la pire extinction de l'histoire de la Terre.

– Comment en est-on arrivé là ? Par un jeu de boucles de rétroactions.



Trilobite *Pseudoasaphus*  
Museum de Toulouse

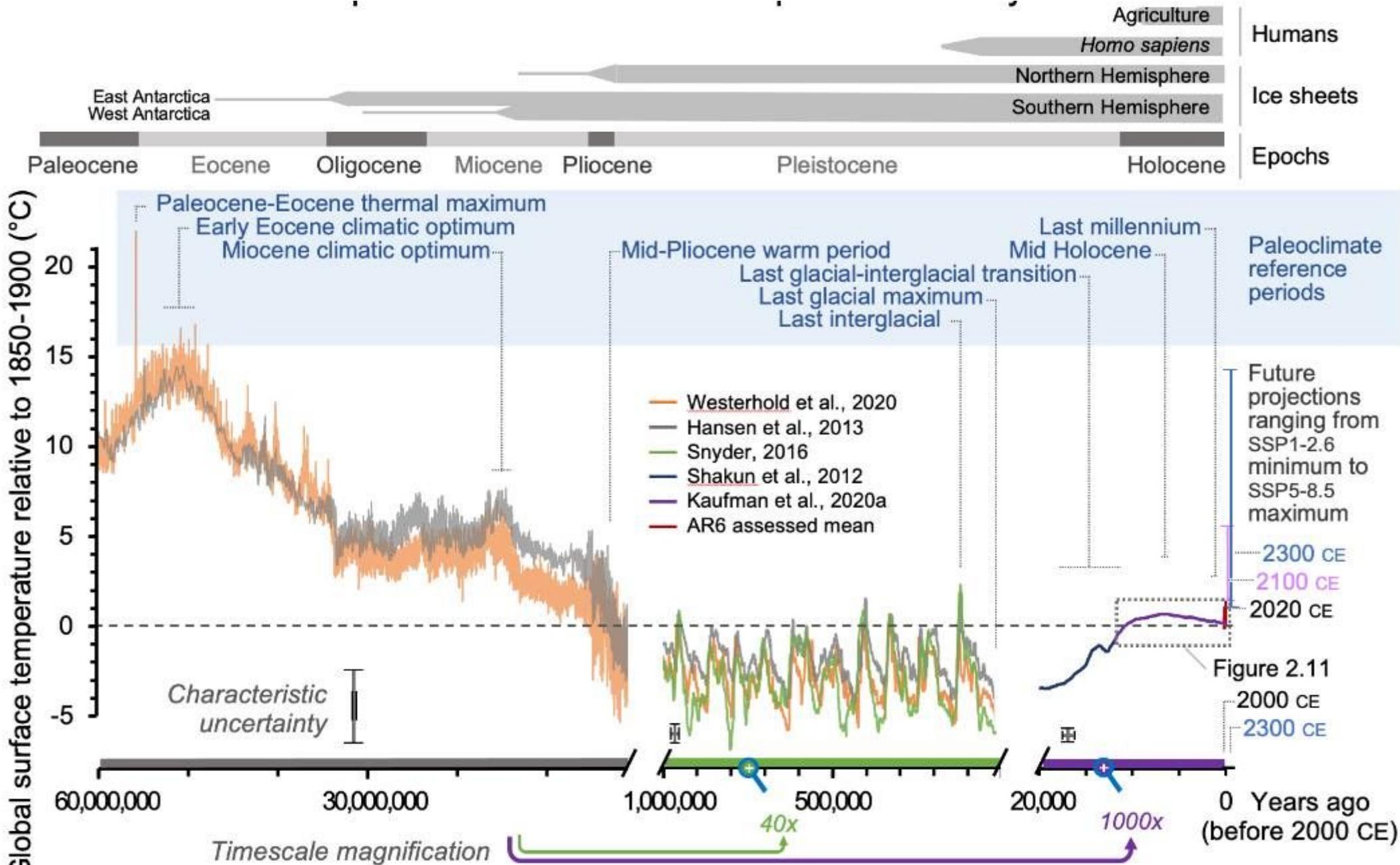
Tous les trilobites disparaissent lors de la crise Permien-Trias

Figure 77. Changements environnementaux liés à la mise en place des trapps de Sibérie, et scénario conduisant à l'extinction massive des taxons continentaux et marins (d'après Wignall 2001 simplifié)

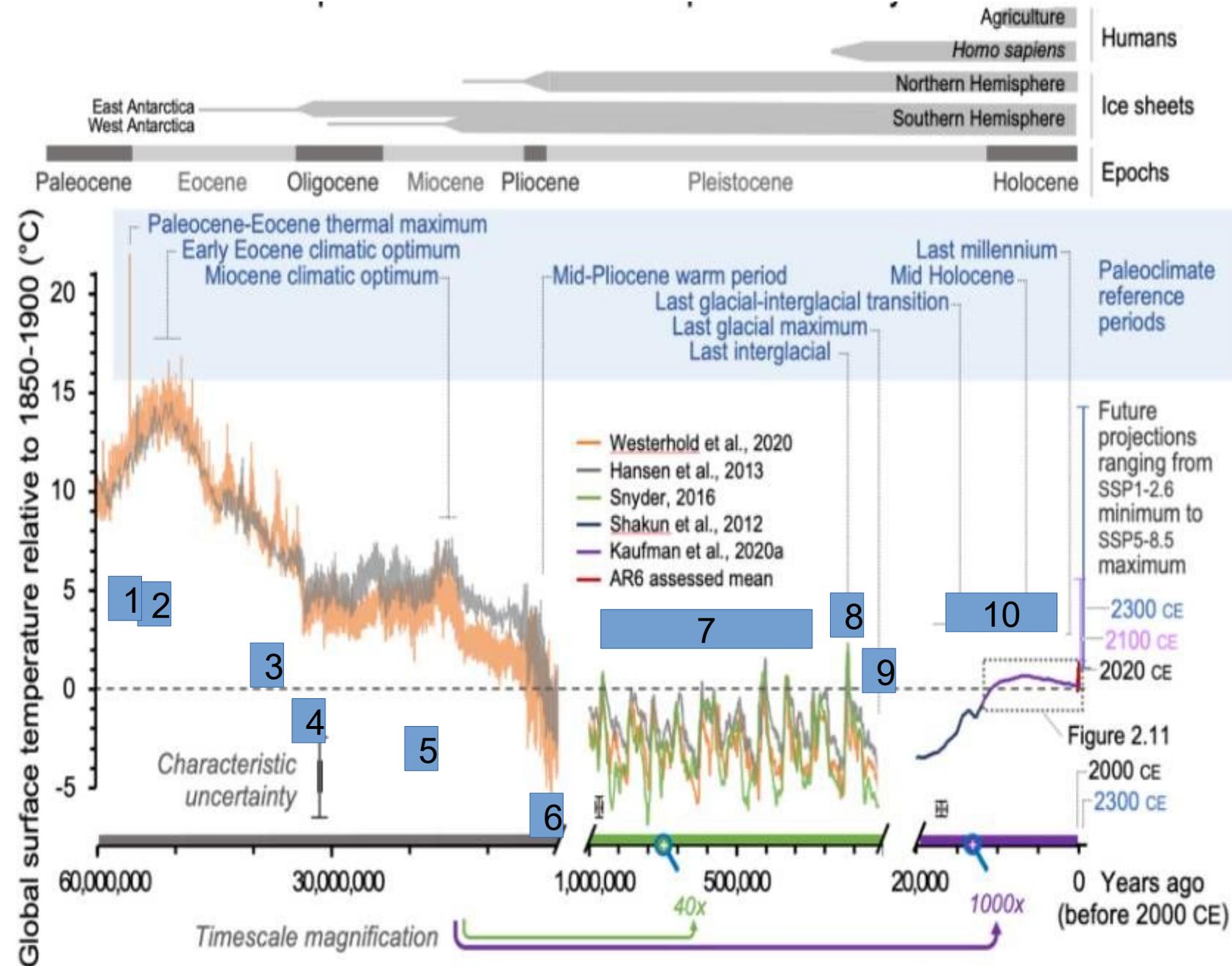
Source : J.-F. Deconninck, *Paléoclimats*, Vuibert, Paris 2014, page 137

– La température moyenne de la Terre dépasse les 30 °C. Sur les continents, les températures atteignent 50 à 60 °C et les océans superficiels chauffent jusqu'à 40 °C.

# Climat et biodiversité depuis 60 millions d'années



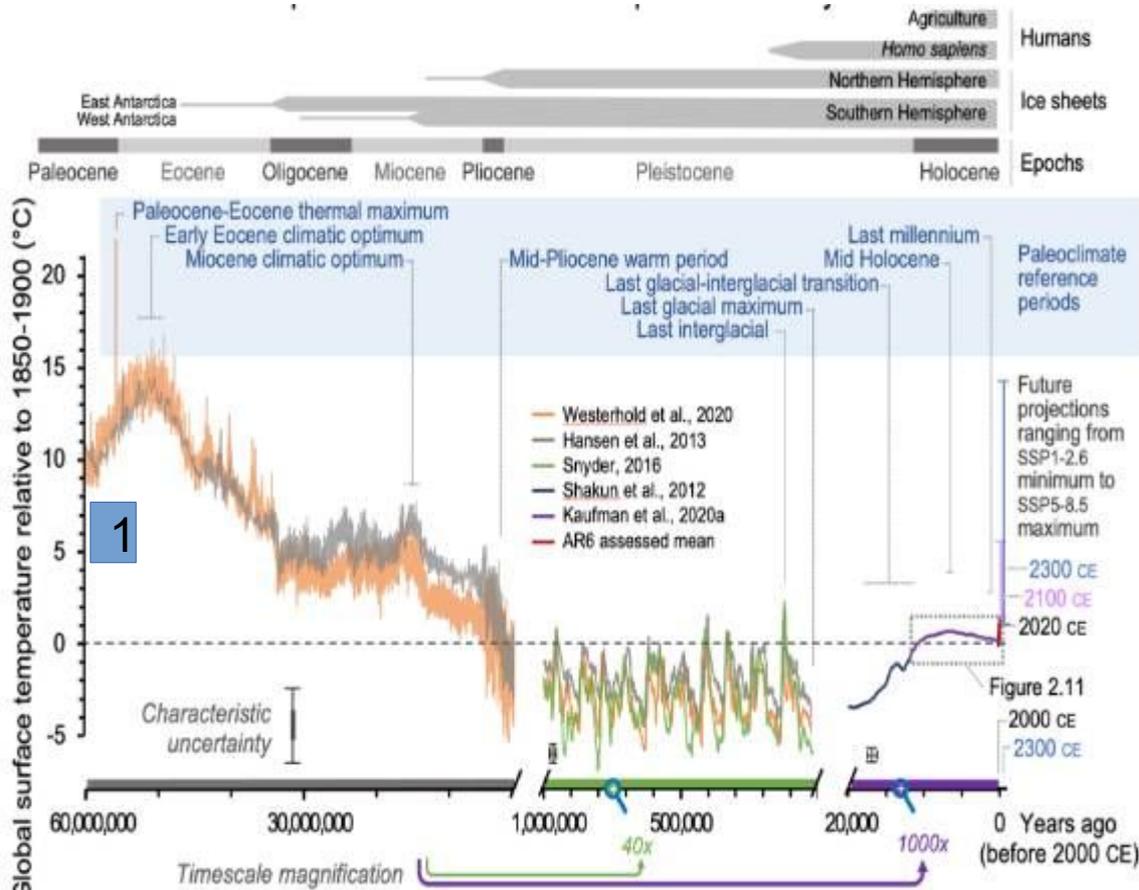
# Climat et biodiversité depuis 60 millions d'années



- 1 – PETM
- 2 – Optimum climatique du début de l'Éocène
- 3 – Grande coupure
- 4 - Plantes en C4
- 5 – Optimum climatique du Miocène
- 6 – Englacement Groenland
- 7- cycles de Milankovitch
- 8 – Émien
- 9 – Dernier maximum glaciaire
- 10 - Holocène

# Le Cénozoïque, d'abord chaud au Paléocène et à l'Éocène : le PETM

– La première époque du Cénozoïque, le Paléocène (66-55 Ma) est encore bien chaude. Il y a 55 millions d'années, c'est la transition Paléocène-Eocène, un épisode très chaud mais assez bref (200 000 ans). Une perturbation des courants marins provoque un dégazage de méthane (les clathrates ou hydrates de méthane). Ce maximum thermique Paléocène-Eocène (PETM) voit la température monter de 5 à 8 °C en 20 000 ans. Épisode bref car dû au méthane qui s'oxyde rapidement dans l'atmosphère.

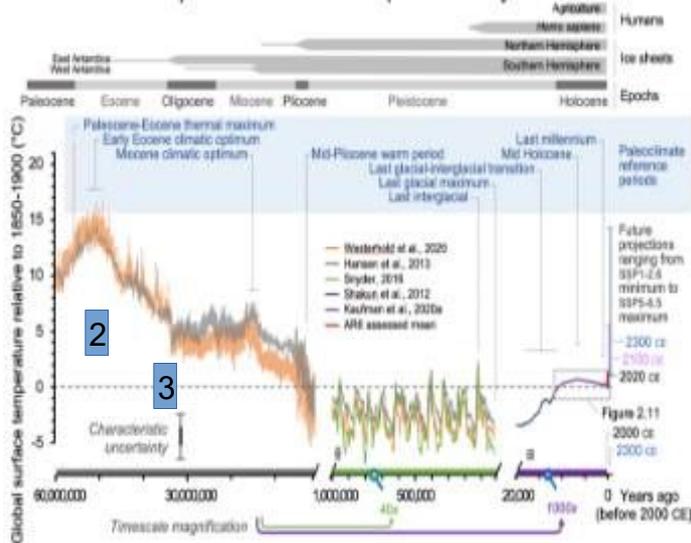


– Les populations benthiques s'effondrent mais les mammifères se diversifient.

– On estime les émissions à 1 Gt de carbone par an à l'époque soit 10 fois moins que les émissions anthropiques actuelles.

– La température du fond des océans (3 à 4 °C aujourd'hui) dépasse les 12 °C partout et atteint une vingtaine de degrés dans l'océan Arctique. Dans l'air, la température mondiale monte à 32 °C.

# Le Cénozoïque : un optimum puis une plongée vers le froid



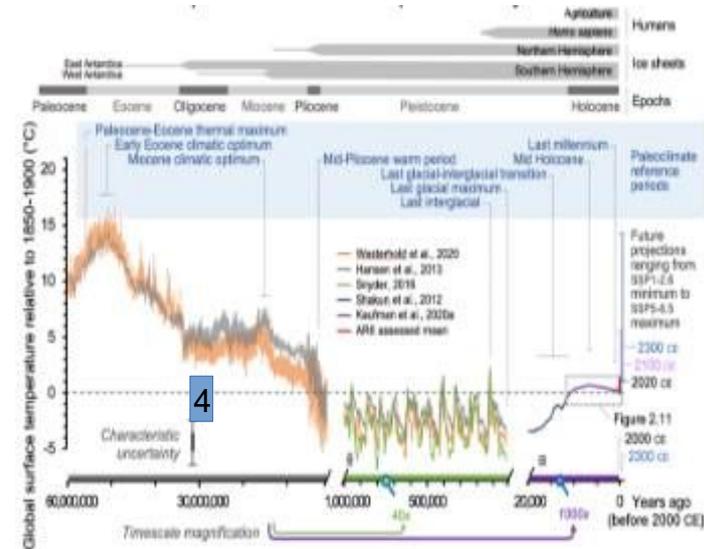
- Pendant l'optimum de l'Éocène, des fougères aquatiques qui aiment la chaleur et les eaux plutôt douces, du genre *Azolla* se multiplient dans l'océan Arctique sur 4 millions de km<sup>2</sup>. A leur mort, elles se déposent dans le fond de l'océan Arctique anoxique et enfouissent du carbone.
- Pendant 800 000 ans, l'enfouissement du carbone par les *Azollas* fait baisser progressivement le taux de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

- La température chute, on sort de cet optimum climatique de l'Éocène. Les pluies s'atténuent et les *Azollas* disparaissent de l'Arctique.
- Entre 49 et 34 Ma, les températures baissent tendanciellement. L'orogénèse des Alpes et de l'Himalaya favorise l'altération des silicates.
- Vers 34 millions d'années, le taux de CO<sub>2</sub> est encore voisin de 850 ppm mais le détroit de Tasmanie entre l'Australie et l'Antarctique s'ouvre, suivi plus tard par le détroit de Drake entre l'Amérique du Sud et l'Antarctique.
- Un courant circumpolaire se met en place. Il isole l'Antarctique dont la température chute : une calotte permanente apparaît sur l'Antarctique de l'Est. C'est la grande coupure qui marque l'entrée dans l'ère glaciaire dans laquelle nous vivons.



*Azolla filiculoides* au jardin botanique de Münster en Allemagne  
Crédit : Daniel J. Layon, Wikipédia

# Le Cénozoïque : Les plantes réagissent au climat et à la diminution du CO<sub>2</sub>



– Les plantes évoluent dans un environnement chaud en général « greenhouse » et dans une atmosphère riche en CO<sub>2</sub>. Le mécanisme de la photosynthèse de ces plantes est bien décrit : on l'appelle mécanisme en C3.

– Pendant le Cénozoïque, le taux de CO<sub>2</sub> a tendance à diminuer. La température moyenne de la planète diminue mais dans les zones intertropicales, il peut faire très chaud.

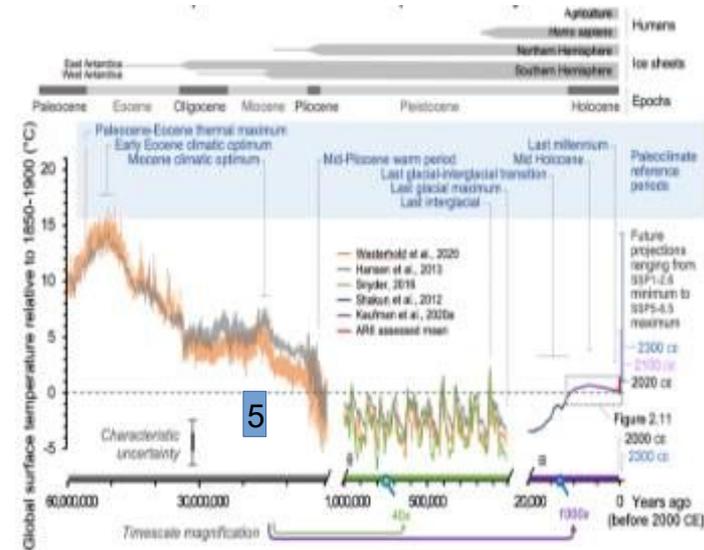
– De grosses chaleurs et un taux de CO<sub>2</sub> insuffisant font baisser la capacité des plantes à réaliser la photosynthèse. Les plantes doivent ouvrir davantage de stomates pour laisser entrer le CO<sub>2</sub> mais cela favorise la transpiration des plantes et donc la perte d'eau.

– Il y a environ 30 millions d'années, un nouveau mécanisme de photosynthèse apparaît. Ce sont les plantes en C4 qui peuvent se contenter d'une concentration en CO<sub>2</sub> plus faible quand il fait très chaud. Elles ont besoin de moins d'eau mais de plus de soleil et sont moins efficaces que les plantes en C3 quand la température est inférieure à 25 °C.

– Plantes en C3 : blé, riz, orge, vigne, épinards, tomates, pommes de terre, pommiers...

– Plantes en C4 : maïs, mil, sorgho, canne à sucre...

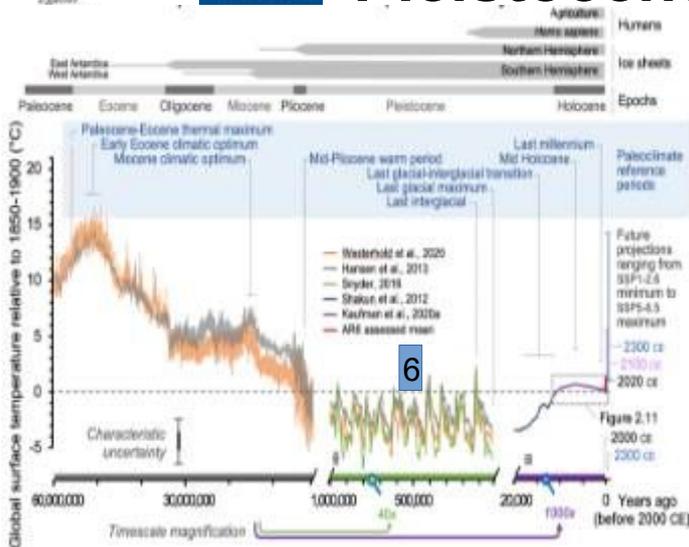
# Le Cénozoïque récent : ère glaciaire mais avec un petit coup de chaud au Miocène moyen



- L'Antarctique est présente en position polaire depuis plus de 90 Ma. La partie Est s'englace il y a 34 Ma. Il y a une fonte partielle avant un nouveau refroidissement il y a 13,5 Ma et l'englacement de l'Antarctique de l'Ouest.
- Pendant cette descente vers le froid se produit un épisode chaud remarquable au Miocène moyen entre 17 et 15 millions d'années : le MMCO Mid Miocene climate optimum.

- Le MMCO voit la première sortie d'Afrique de nos ancêtres. Les hominoïdes (famille regroupant gibbons, grands singes et humains) existent depuis environ 25 millions d'années mais restent cantonnés aux forêts tropicales.
- Pendant le MMCO, la forêt subtropicale s'installe dans le sud de l'Europe jusqu'en Allemagne. Les hominoïdes, ces singes sans queue, migrent en Europe avant d'atteindre l'Asie du Sud-Est au bout de 2 millions d'années. Quand le froid s'installe à nouveau, la forêt subtropicale disparaît d'Europe et les hominoïdes régressent.
- La présence de la forêt subtropicale en Europe n'est possible qu'à certaines conditions : chaleur, absence de gel en hiver et cumuls de pluies importants.

# Le Cénozoïque récent : l'apparition du genre Homo au Pléistocène



– Les Australopithèques disparaissent tous vers 2,5 millions d'années. À peu près au même moment, les premiers représentants du genre Homo et ceux du genre Paranthropus apparaissent.

– Ces bouleversements correspondent à des changements de climat très importants : englacement du Groenland et mise en place des cycles glaciaire/interglaciaires.

– Le genre Homo est-il une créature du froid ? Il est né en zone intertropicale mais dans une ère glaciaire avec deux calottes aux pôles, ce qui est une occurrence extrêmement rare dans l'histoire de la planète.

– Les groupes d'humains non sapiens occupent l'Afrique. En période de Sahara vert, ils restent en contact tandis qu'en période aride, les groupes survivants sont isolés. L'hominisation serait alors un processus lié en partie au climat et on ne pourrait attribuer d'endroit spécifique à l'apparition d'*Homo sapiens*. Ce serait toute l'Afrique qui serait le berceau de l'humanité.

– C'est la thèse développée par Jean-Jacques Hublin. Ce dernier a identifié en 2017 les restes d'*Homo sapiens* découverts à Djebel Irhoud au Maroc comme vieux de 300 000 ans.

– Le Sahara vert serait aussi responsable des « sorties d'Afrique ». Il ne s'agit pas en réalité de migrations mais d'une diffusion de l'espèce *Homo sapiens* dans son biotope qui s'est provisoirement agrandi.

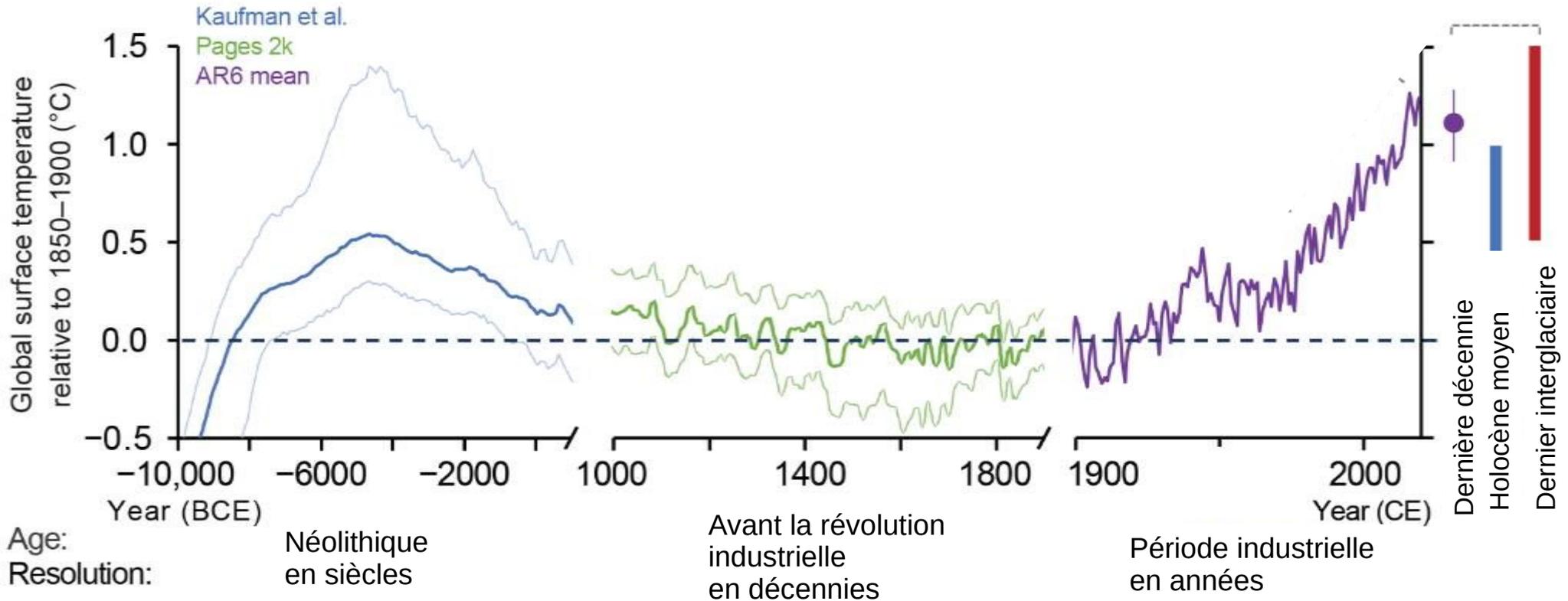
# Plan

---

1. Les grands équilibres du climat
2. Le changement climatique actuel
3. Quelques exemples de changements climatiques passés
4. **L'étonnante stabilité de l'Holocène**
5. Les changements climatiques à venir et leurs conséquences

# La stabilité générale du climat de l'Holocène

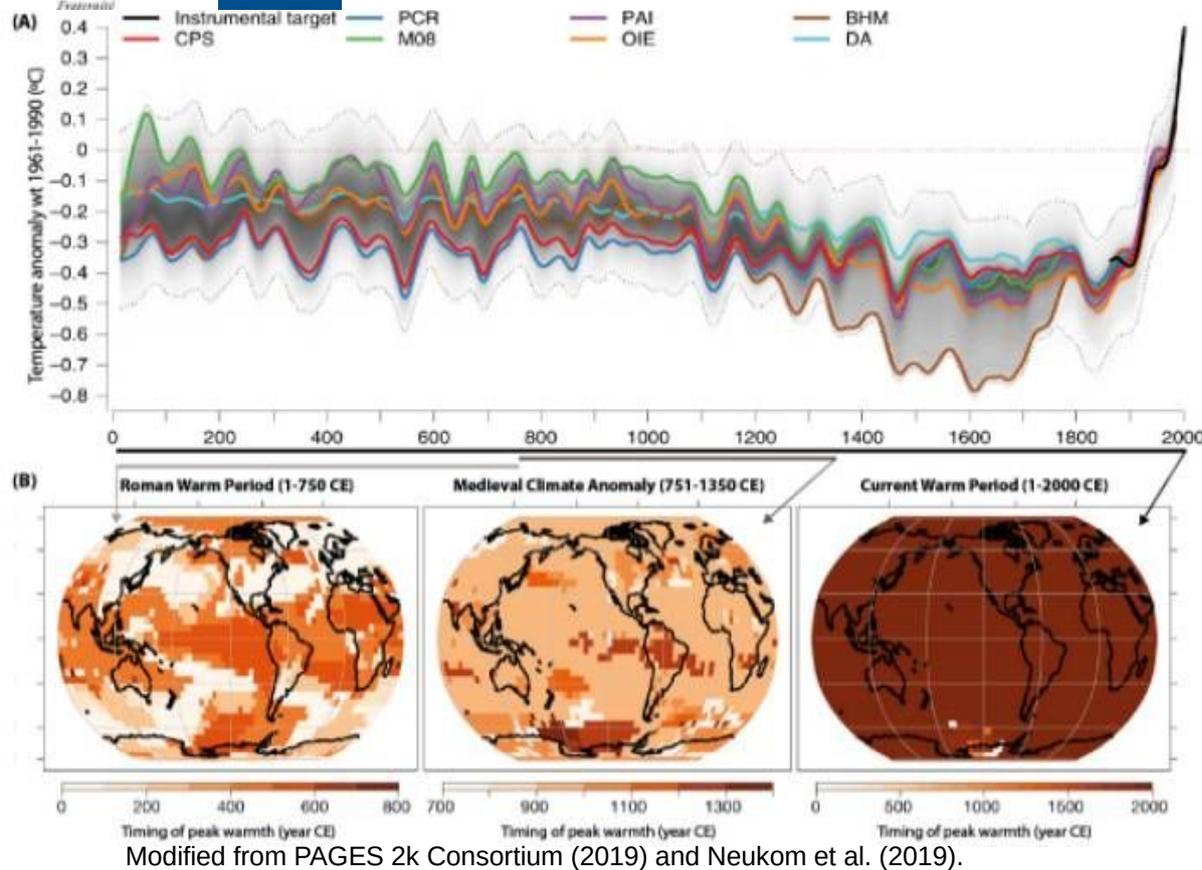
Température mondiale depuis la dernière déglaciation



Un pic d'insolation dans l'hémisphère nord est passé depuis 10 à 11 000 ans. La température mondiale est passée par un pic à l'Holocène moyen (dernier épisode de Sahara vert) et depuis la tendance est à la baisse jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

Source : GIEC 2021 AR6 chapitre 2

# Le climat de l'Holocène et des 2 000 dernières années



Le petit âge glaciaire (PAG) ?

Sa fin correspond au recul des glaciers à partir de 1860 mais son début diffère selon les auteurs : 1190, 1257, 1300, 1350, 1420, 1550 ?

Pourquoi de telles différences ? Les auteurs sont des historiens et ils cherchent quelque chose qui n'existe pas. Les travaux scientifique du PAGES concluent qu'il n'existe aucune période chaude ou froide d'échelle globale identifiable avant la révolution industrielle.

Il n'y a qu'une tendance à la baisse avec des fluctuations régionales d'échelles de temps variées. De 1450 à 1850, on connaît la période multi-séculaire la plus froide depuis 8 000 ans avec  $-0,3\text{ °C}$  par rapport à la période 1850-1900, loin des  $-1\text{ °C}$  avancés pour l'Europe.

Seul le réchauffement récent est global et synchrone.

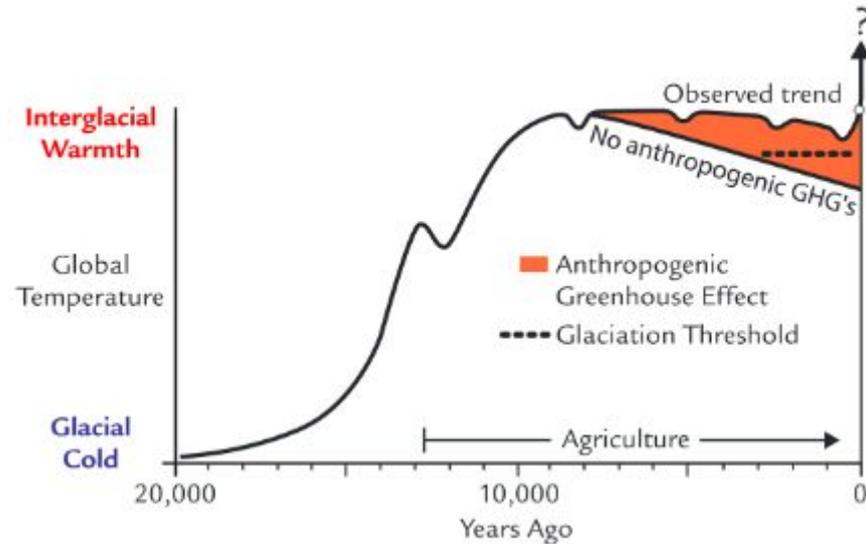
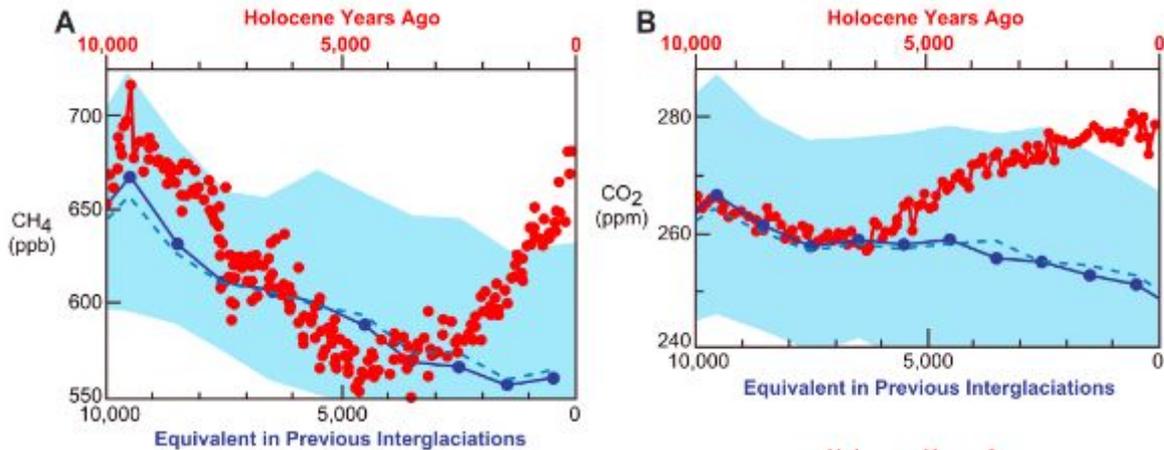
Le volcanisme est le principal responsable de la variabilité naturelle depuis 2 500 ans.

- Abram N. et al. Past Global Changes Magazine 29(1) 16-17 2021  
- GIEC 2021 chap 2, p. 34

On peut cependant identifier des périodes intéressantes en Europe :

- la période romaine chaude ( $-250$  à  $+150$  ou  $+400$  ?) proposé en 1995
- le petit âge glaciaire de l'antiquité tardive (536 – 660) proposé en 2015
- l'anomalie climatique médiévale (ACM) ou optimum de l'an Mil (950 – 1250/80) (période d'AMO+ et de NAO+)
- une poussée froide à partir de 1300 puis une douceur relative de 1500 à 1550 avant le PAG proprement dit (période d'AMO- et de NAO-)

# Qu'avons-nous fait à l'Holocène ? Ou devrait-on dire l'Anthropocène ?



Évolution du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> pendant l'Holocène (rouge) et la moyenne de ces évolutions pendant les autres interglaciaires (trait bleu). La zone bleu claire donne l'écart-type de la variation de l'ensemble des interglaciaires.

Schéma conceptuel de l'Holocène. Les émissions anthropiques de GES depuis le néolithique ont empêché la baisse de température.

- Une théorie intéressante est développée par Bill Ruddiman un paléoclimatologue américain, qui incrimine les activités humaines.
- Agriculture, déboisement, culture du riz, élevage des ruminants, assèchement des zones humides et puis la révolution industrielle ont provoqué des apports massifs de GES dans l'atmosphère. L'élévation de température associée a suffi à empêcher le refroidissement imposé par les paramètres astronomiques.

Voir William F. Ruddiman, *Plows, Plagues, and Petroleum*, Princeton, 2005

Graphique : Ruddiman, W. F., et al. (2016), Late Holocene climate: Natural or anthropogenic?, *Rev. Geophys.*, 54, 93–118,

doi:10.1002/2015RG000503

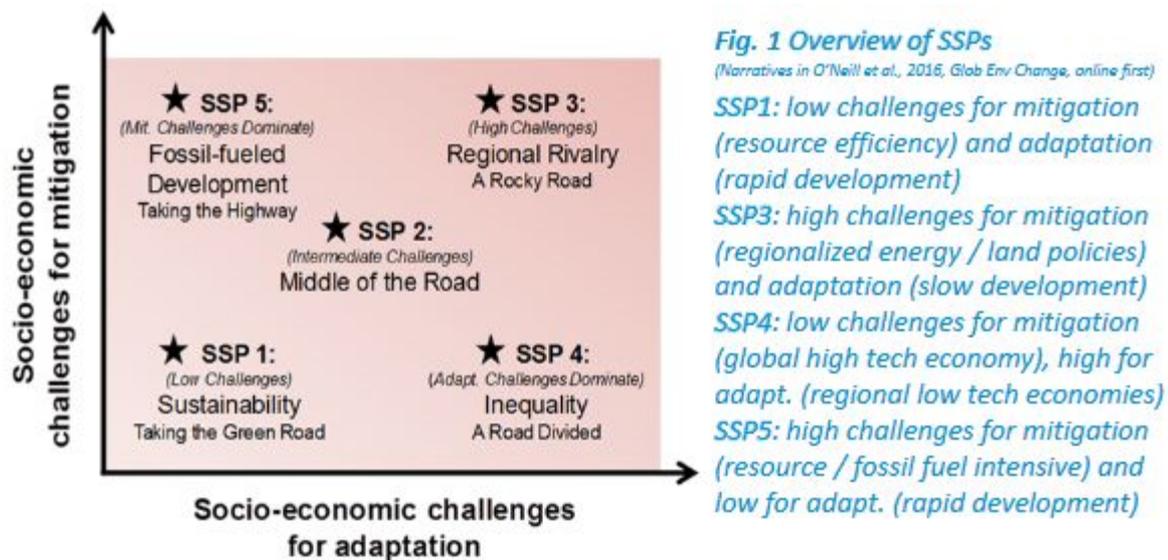
- Les émissions anthropiques ont détraqué les cycles de Milankovitch. La prochaine période glaciaire n'aura probablement pas lieu. Et la suivante ? C'est encore l'objet de débats.

# Plan

---

1. Les grands équilibres du climat
2. Le changement climatique actuel
3. Quelques exemples de changements climatiques passés
4. L'étonnante stabilité de l'Holocène
5. **Les changements climatiques à venir et leurs conséquences**

# Les projections dépendent de scénarios socio-économiques et de trajectoires des émissions de GES retenus par le GIEC AR6



Les scénarios du GIEC s'appuient sur des schémas de développement économique et de relations internationales réunis en famille.  
SSP : Shared Socioeconomics Pathways

SSP1 : développement durable

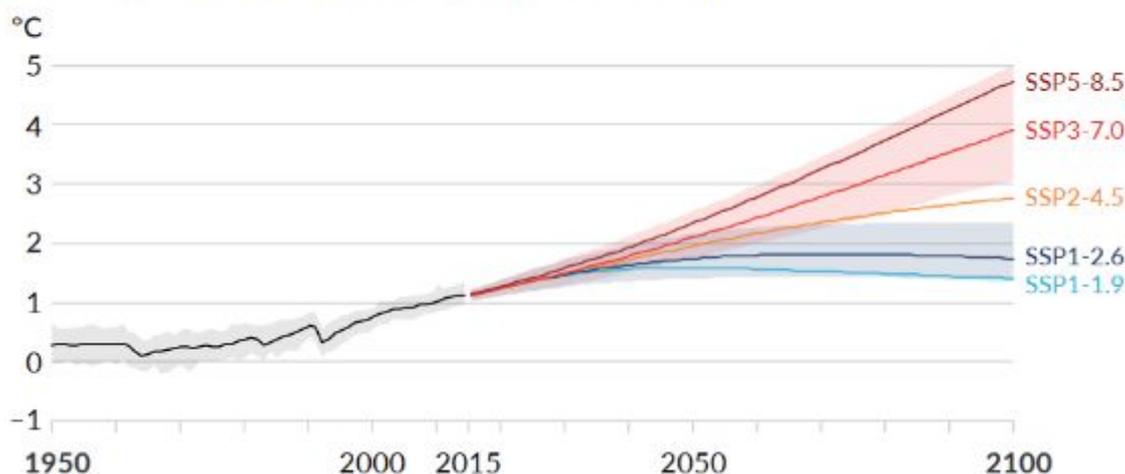
SSP2 : poursuite des tendances actuelles

SSP3 : rivalités régionales (politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle)

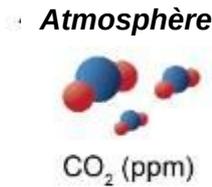
SSP4 : un monde inéquitable

SSP5 : croissance économique (pétrole + charbon)

(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900



# Des épisodes passés qui peuvent servir de guides ou d'analogues



Époque	CO <sub>2</sub> (ppm)	Taux de variation en ppm par siècle	Températures par rapport à 1850-1900	Extension des glaciers par rapport à 1850-1900	Extension nord des arbres par rapport à 1850-1900 en ° lat	Niveau des mers par rapport à 1900 en m	Vitesse de changement du niveau des mers en mm/an
<i>younger</i> Passé récent (1995-2014)	360 → 397	192 to 198	0.66 to 1.00		0.5 to 1.0	0.15 to 0.25	2.9 to 3.6
Pré-industriel approximatif (1850-1900)	286 → 296	17 to 27	-0.15 to +0.11		0	-0.03 to 0.00	0.4 to 0.6
Dernier millénaire (850-1850)	278 to 285	-7~5	-0.14~0.24		-1.5 to 1.5	-0.05 to 0.03	-1.1~0.7
Holocène moyen (6500 - 5500)	260 to 268		0.2 to 1.0		1 to 3	-3.5 to 0.5	
Tardiglaciaire (18 à 11 000 BP)	193 → 271	10			-6 → 1	-120 → -50	24 to 44
Dernier maximum glaciaire	188 to 194		-5 to -7		-23 to -17	-134 to -125	
Dernier interglaciaire 123 à 119 000 BP	266 to 282		0.5 to 1.5		8 to 2	5 to 10	
Pliocène moyen 3,3 à 3 Ma	360 to 420		2.5 to 4.0		4 to 10	5 to 25	
Début de l'Éocène 53 à 49 Ma	1150 to 2500		10 to 18			70 to 76	
Maximum thermique Paléocène-Éocène 55,9 à 55,7 Ma	900 → 2000	4 to 42	10 to 25				
<i>older</i>							

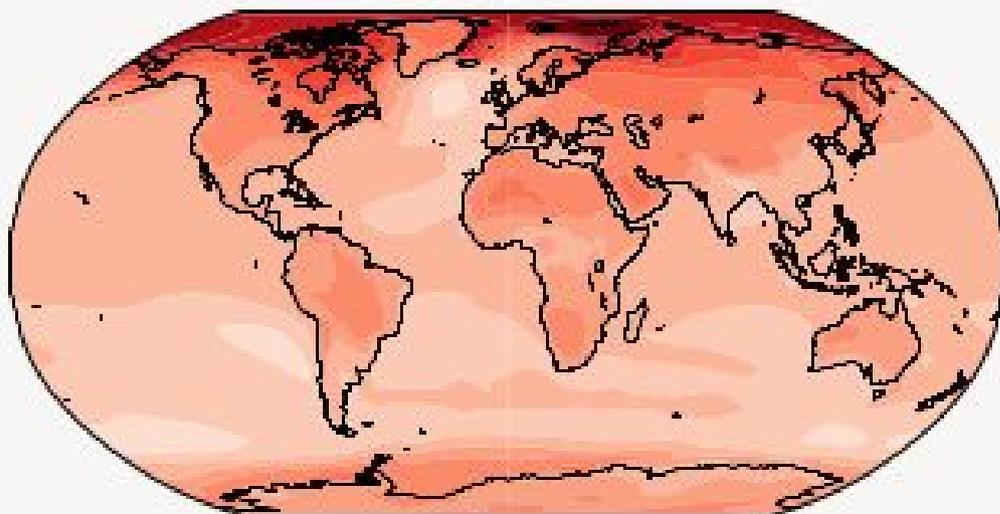
Source : GIEC AR6 2021 GI chap. 2

X to Y : intervalle très probable  
 X → Y : entre le début et la fin de la période sans évaluation de l'incertitude  
 X~Y : min et max des valeurs sans évaluation de l'incertitude

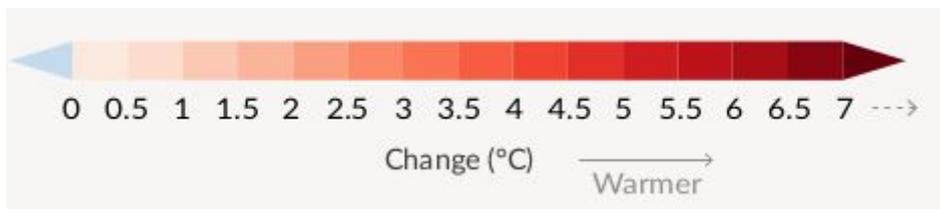
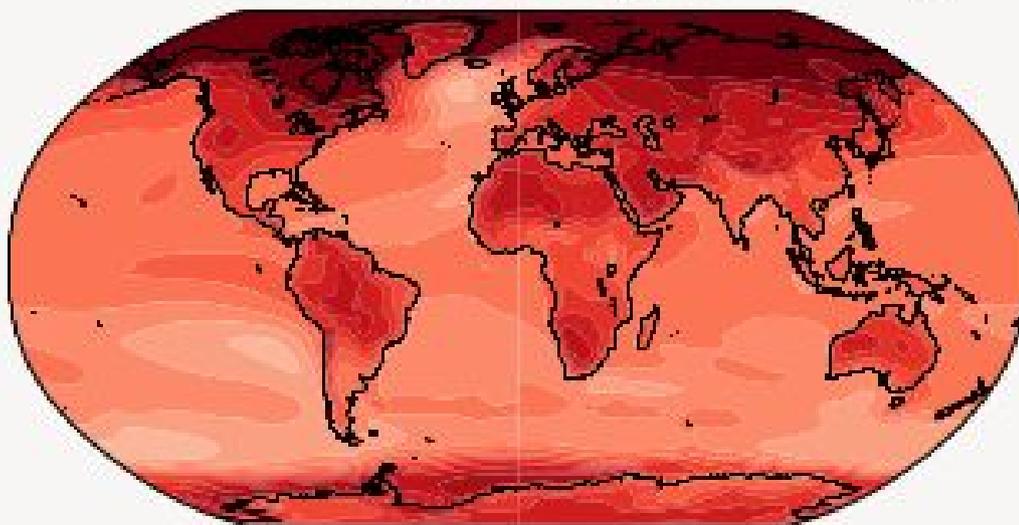


# Évolution des températures au XXI<sup>e</sup> siècle changement en °C par rapport à 1850-1900

Simulated change at 2 °C global warming



Simulated change at 4 °C global warming



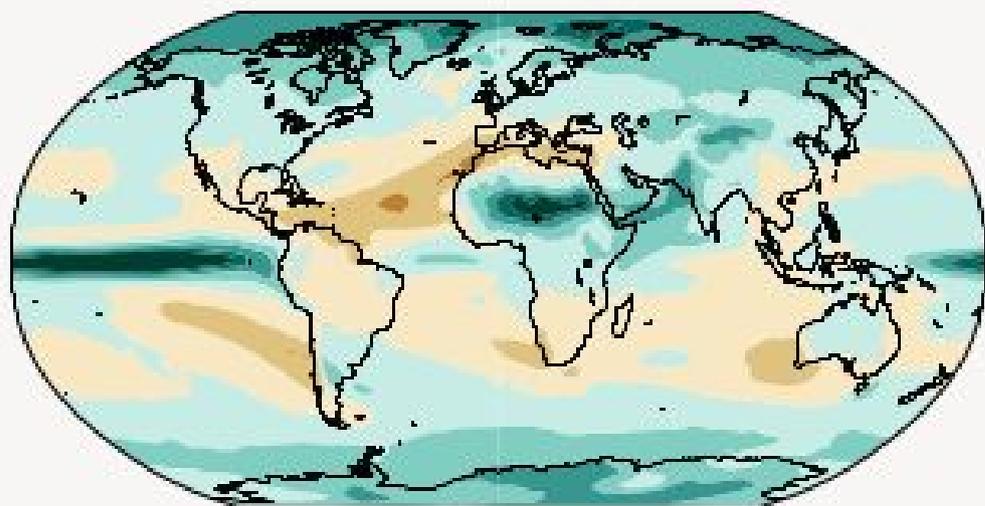
**TOUT DÉPEND DU SCÉNARIO SUIVI !**

Source GIEC AR6 2021 GI SPM

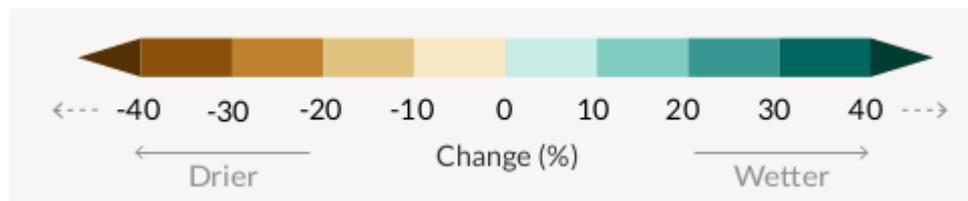
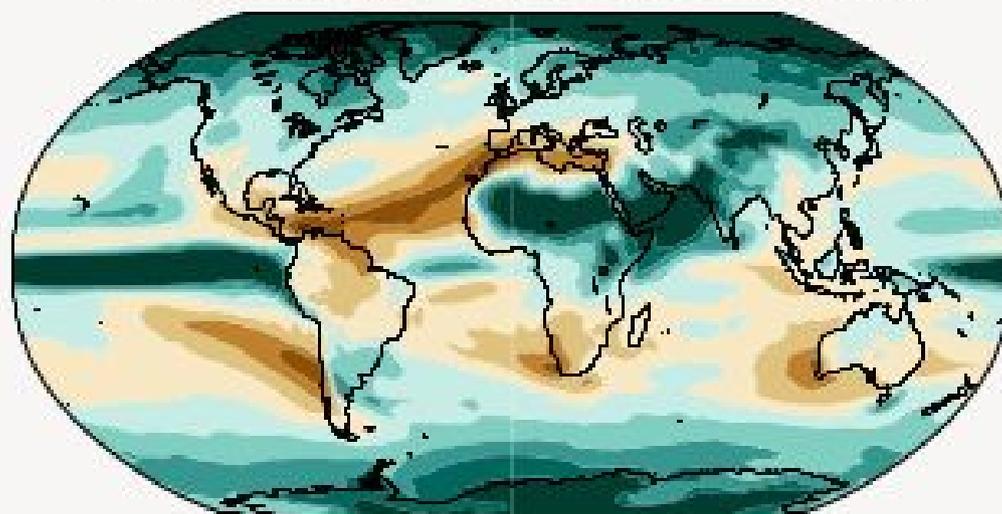
# Évolution des précipitations au XXI<sup>e</sup> siècle

## Changement en % par rapport à 1850-1900

Simulated change at 2 °C global warming



Simulated change at 4 °C global warming



# Événements extrêmes : plus fréquents et plus intenses

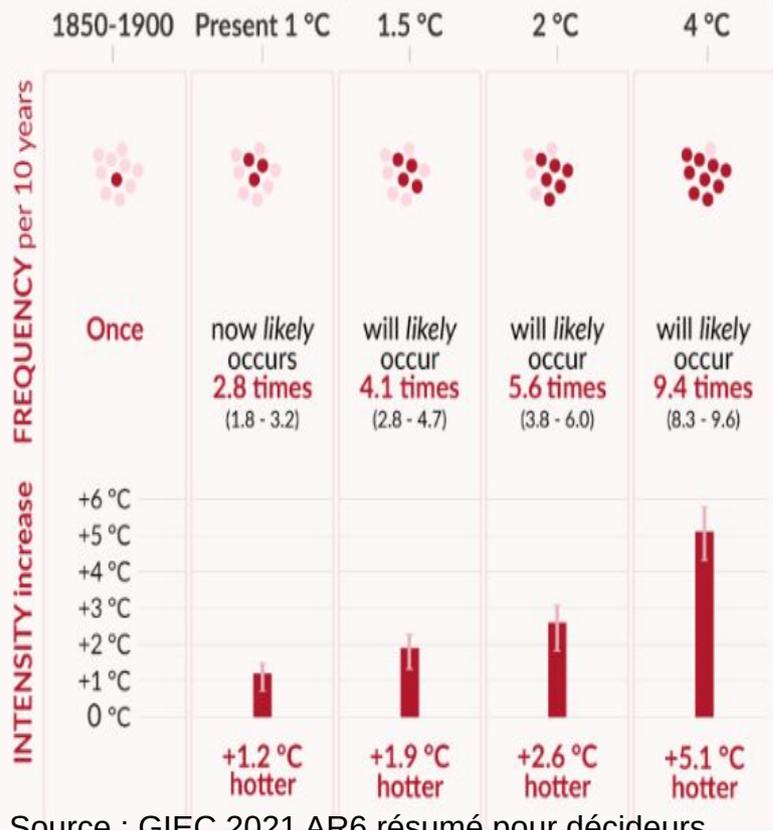
Extrêmes de températures sur les terres

Extrêmes de précipitations sur les terres

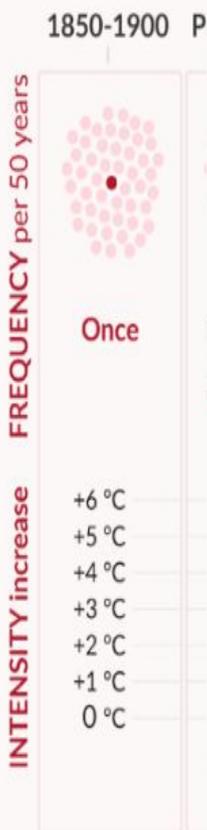
## 10-year event

Frequency and increase in intensity of extreme temperature event that occurred **once in 10 years** on average in a climate without human influence

Future global warming levels



Frequency :  
event



## 10-year event

Frequency and increase in intensity of heavy 1-day precipitation event that occurred **once in 10 years** on average in a climate without human influence

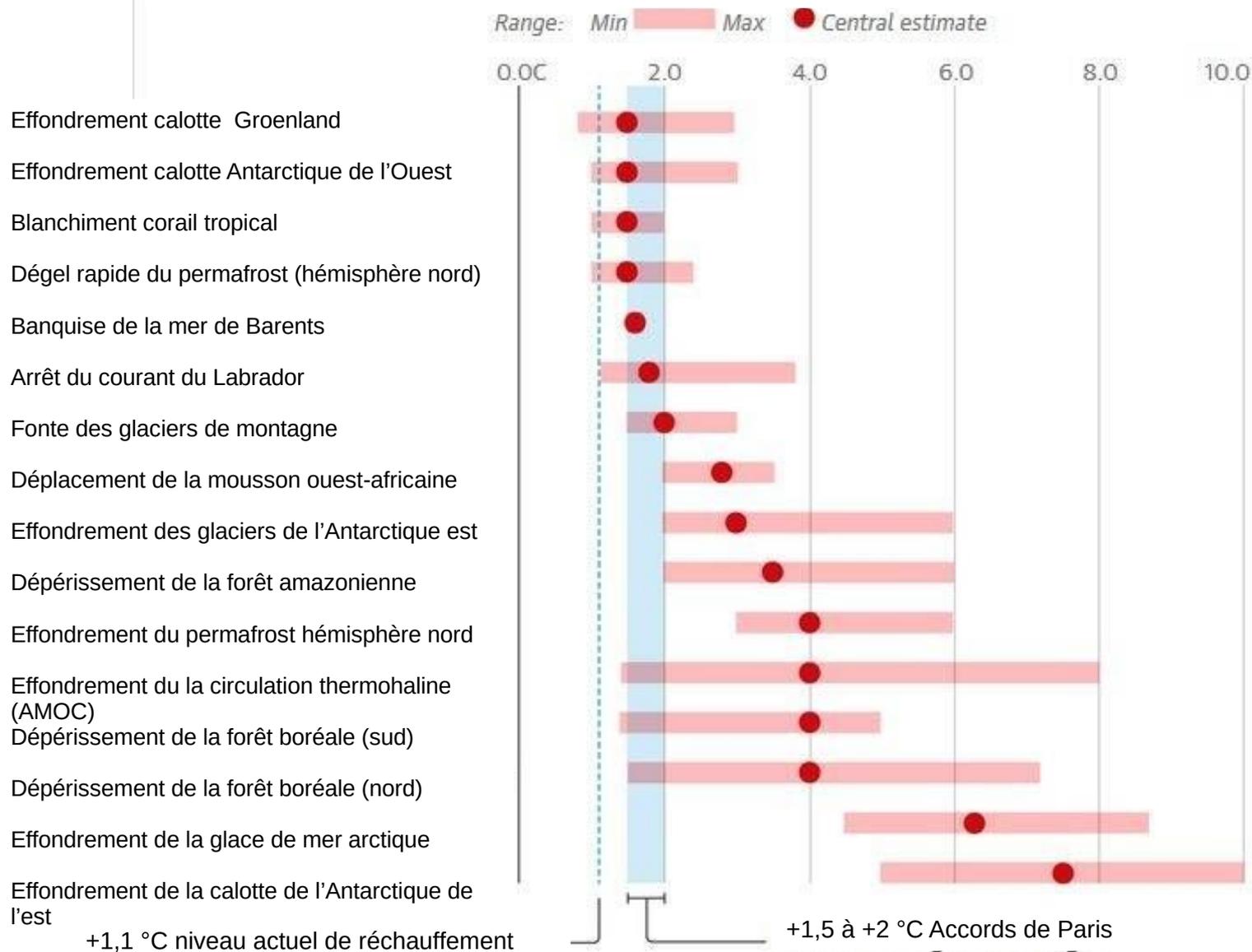
Future global warming levels



Source : GIEC 2021 AR6 résumé pour décideurs

# Les points de basculement d'après l'AR6

Fourchette estimée du réchauffement nécessaire pour passer des points de basculements

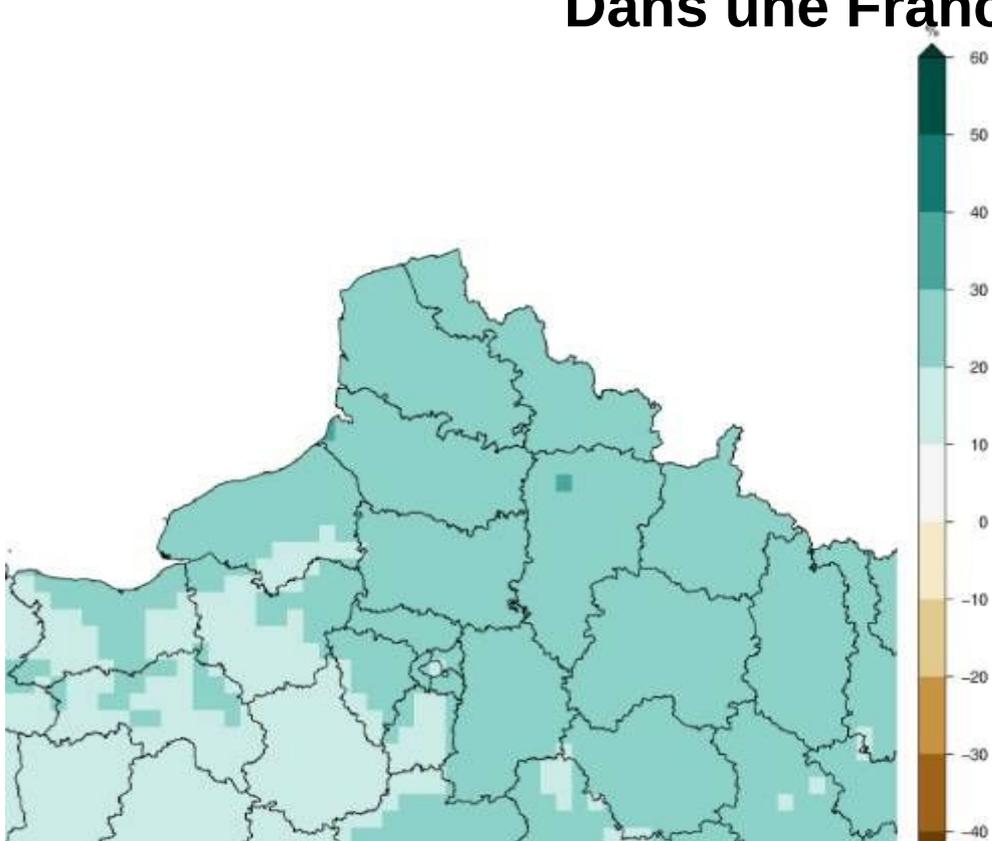


Guardian graphic. Source: Armstrong McKay et al, Science, 2022. Note: Current global heating temperature rise 1.1°C Paris agreement targets 1.5-2.0°C

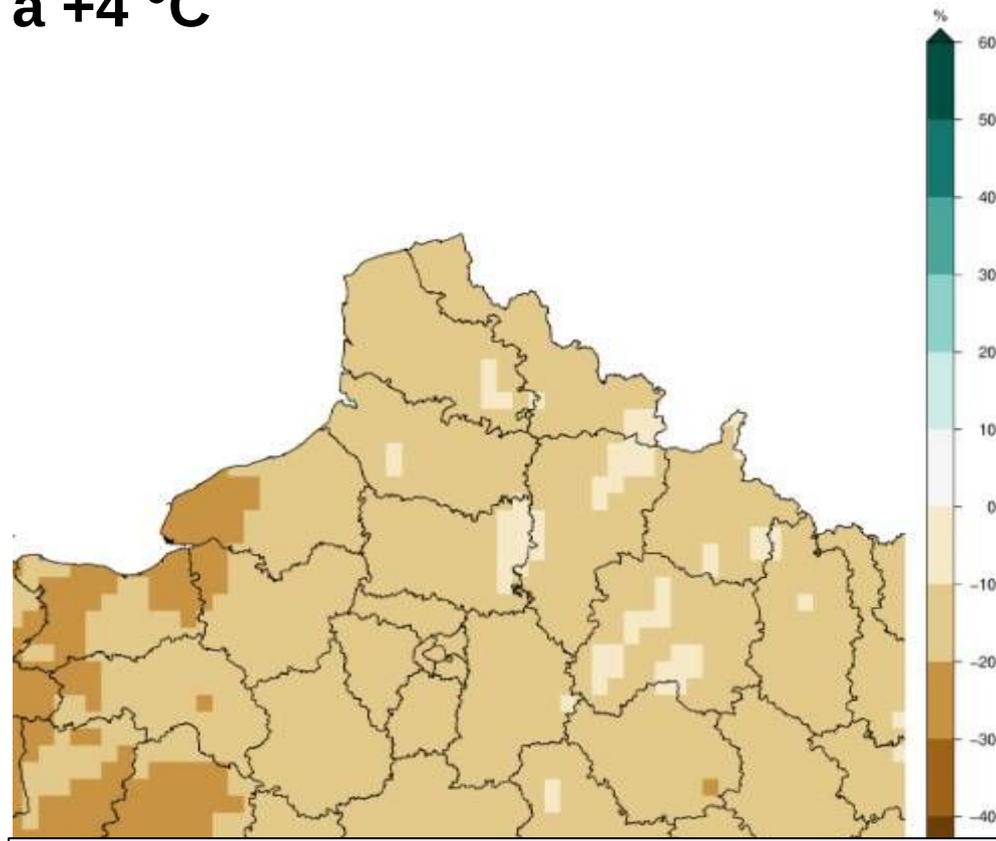
# Les cumuls de pluies sur les Hauts-de-France

## Anomalies par rapport à la période 1976/2005

### Dans une France à +4 °C



Anomalie relative du cumul de précipitations  
**hivernales (DJF),**  
(médiane d'un ensemble de modèles)  
+20 à +25 % de pluie

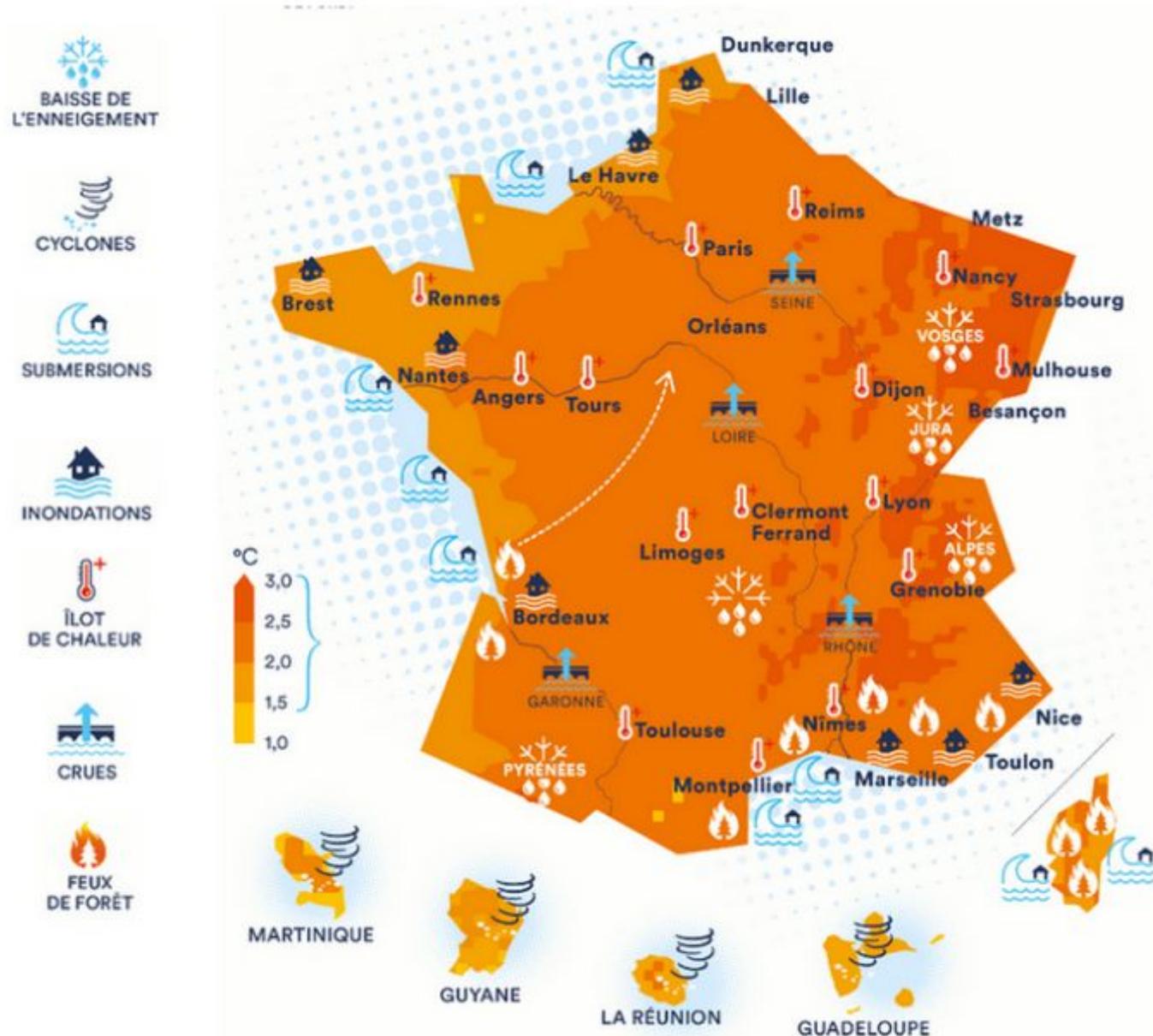


Anomalie relative du cumul de précipitations  
**estivales (JJA),**  
(médiane d'un ensemble de modèles)  
-10 à -15 % de pluies (presque -20 % sur les  
côtes)

Sur l'année complète : +10 % de pluie

Les inondations de cet hiver dans le Pas-de-Calais ne sont donc pas une surprise !  
Les sécheresses estivales de 2018, 2019, 2020, 2022 et 2023 non plus !  
Double peine : inondations en hiver et sécheresses en été !

# « Qui aurait pu prédire la crise climatique ? »

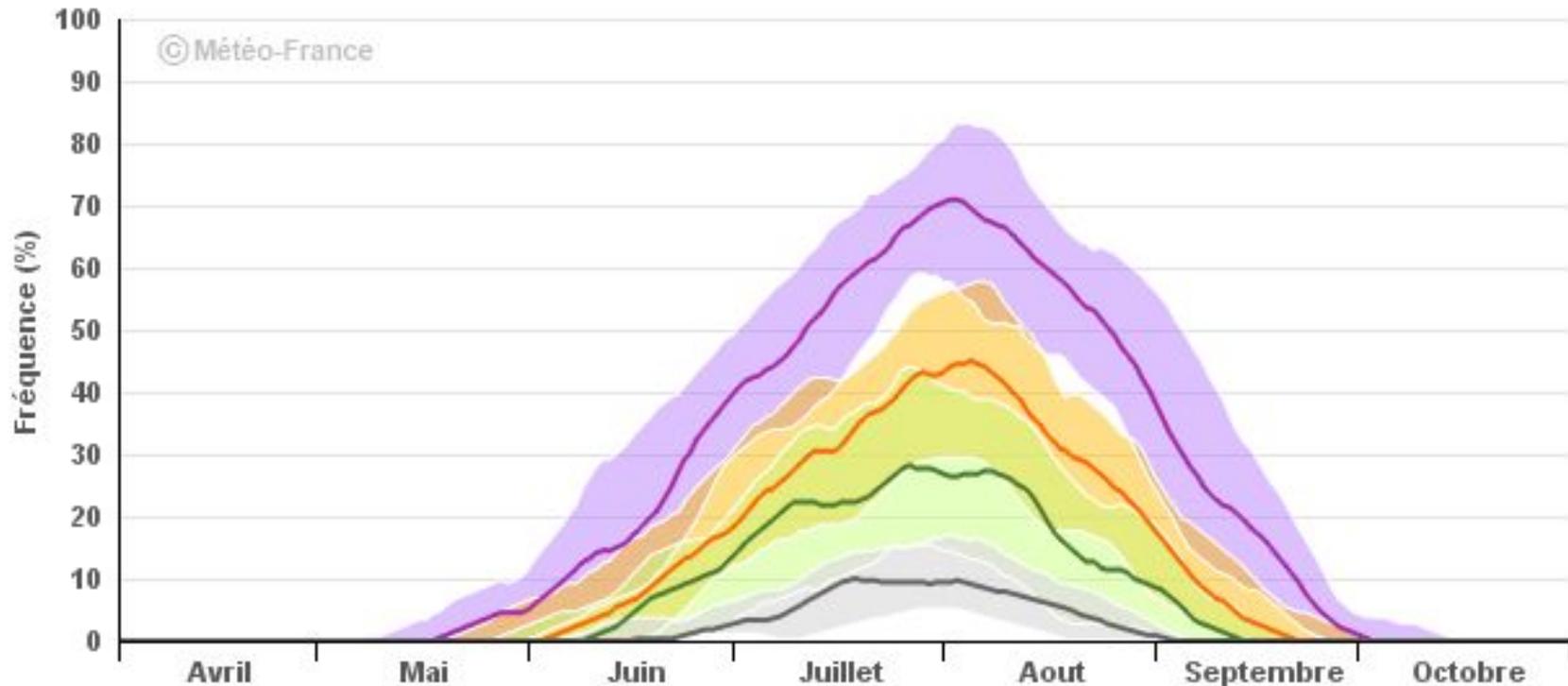


# Projections des vagues de chaleur selon la TRACC

## Trajectoire de référence de réchauffement pour l'adaptation au changement climatique

La TRACC examine les conséquences d'une France plus chaude de +2 °C, +2,7 °C ou +4 °C

Calendrier de la fréquence d'occurrence d'une vague de chaleur en France  
Climat passé et horizons de la TRACC autour de 2030, 2050 et 2100



Source drias-climat.fr

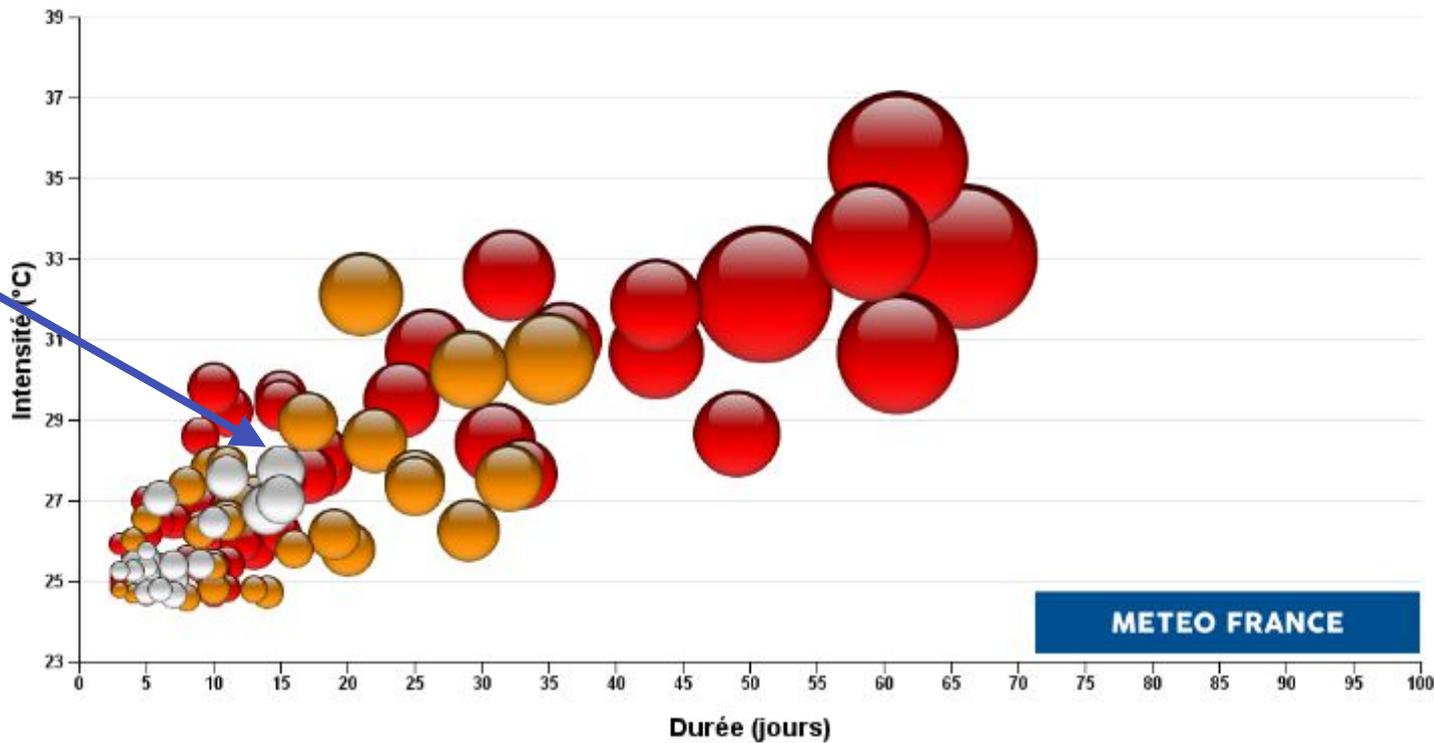
■ Climat passé : 1976-2005  
■ Climat futur TRACC : 2030 (France à +2.0 °C), 2050 (France à +2.7 °C), 2100 (France à +4.0 °C)

# Projections des vagues de chaleur selon la TRACC Trajectoire de référence de réchauffement pour l'adaptation au changement climatique

La TRACC examine les conséquences d'une France plus chaude de +2 °C, +2,7 °C ou +4 °C

Vagues de chaleur en France : climat passé et horizons TRACC autour de 2050 et 2100

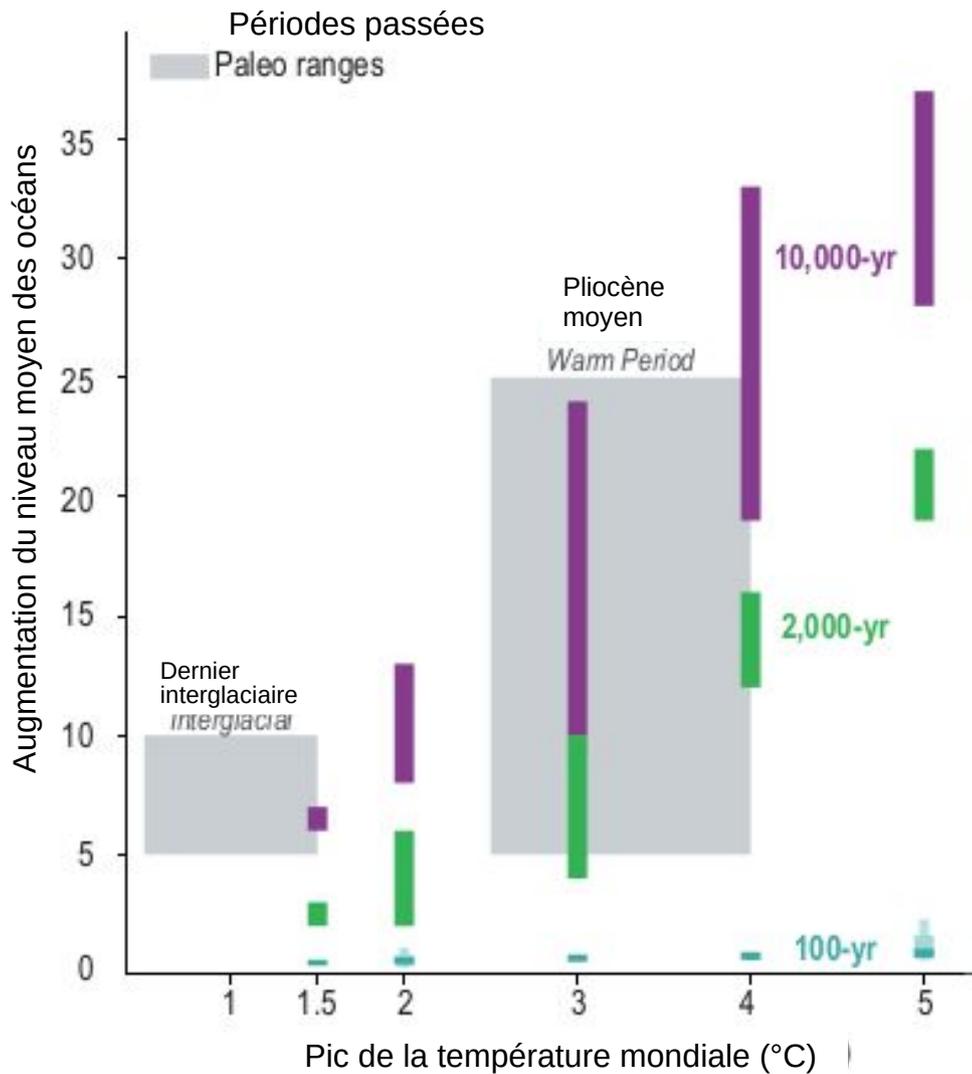
Simulation SMHI-RCA4\_ICHEC-EC-EARTH



METEO FRANCE

○ Période de référence (1976-2005)    ● 2050 - France à +2.7 °C    ● Fin de siècle : France à +4.0 °C

# La montée des océans ne s'arrêtera pas en 2100 !



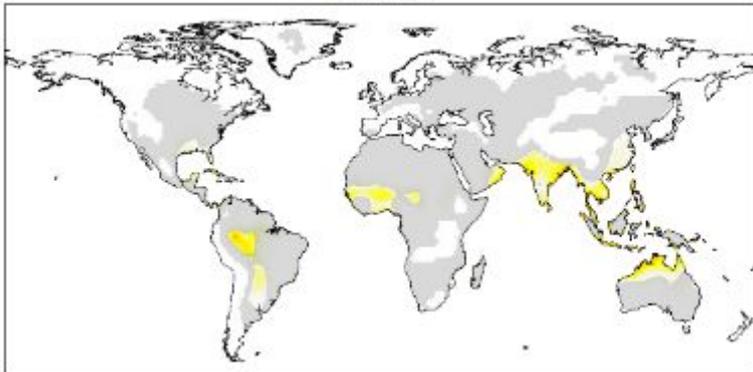
Nous avons créé un déséquilibre du système Terre.

Il faudra des millénaires pour que les océans retrouvent un niveau d'équilibre même après la stabilisation de la température mondiale.

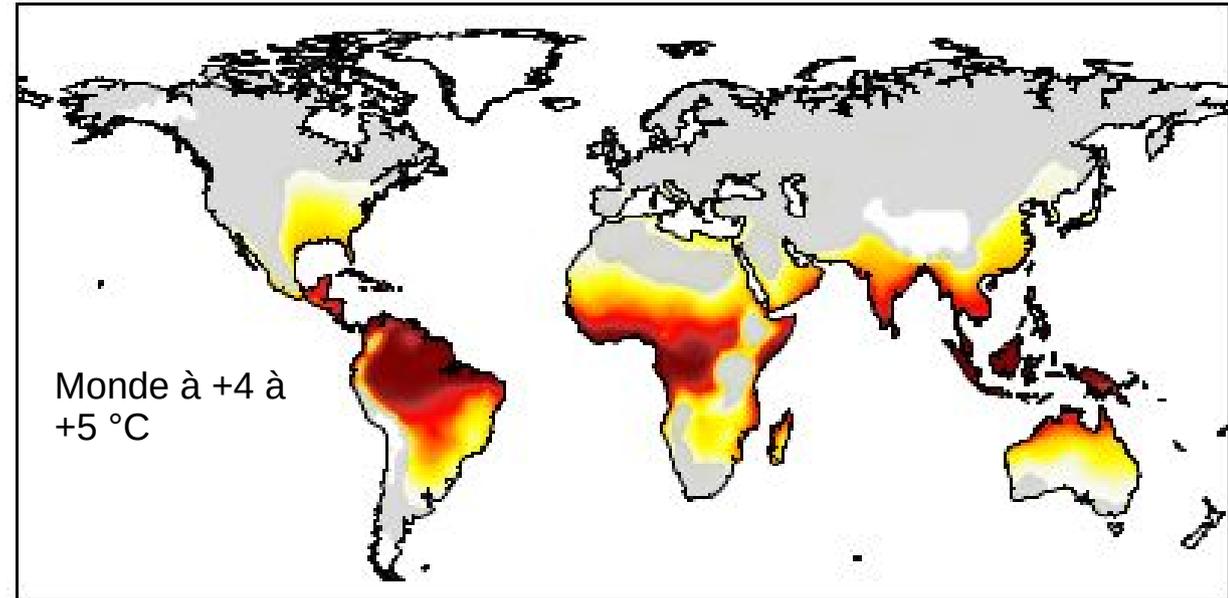
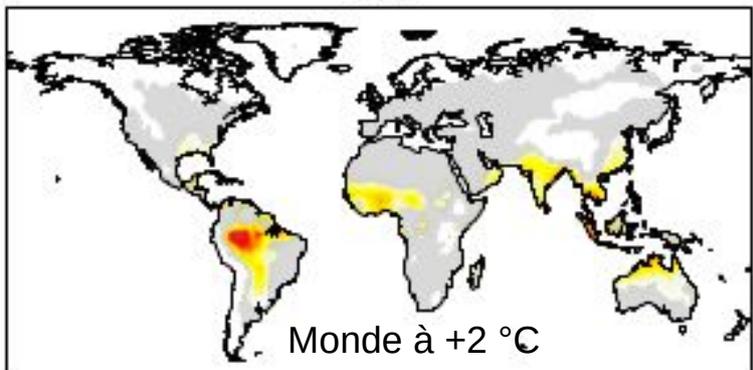
# Des conséquences : températures et humidités rendent des zones inhabitables (étude de 2017)

Nombre de jours par an avec un dépassement du seuil de létalité : conditions de températures et d'humidités incompatibles avec la vie humaine prolongée sur la période 2090-2100

Historical 1950-2005



PLT 2.0

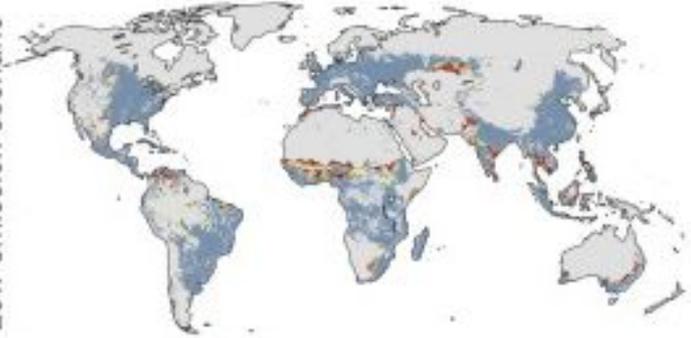


Nombre de jours par an au-dessus du seuil de létalité

# Évolution de la production agricole d'ici la fin du siècle

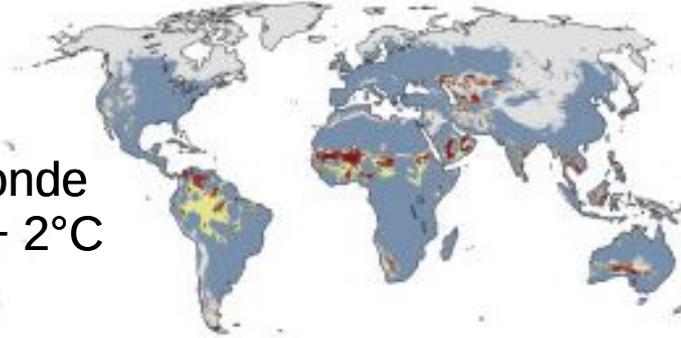
**A** Production végétale

Low emission scenario



**B** Production animale

Monde à + 2°C

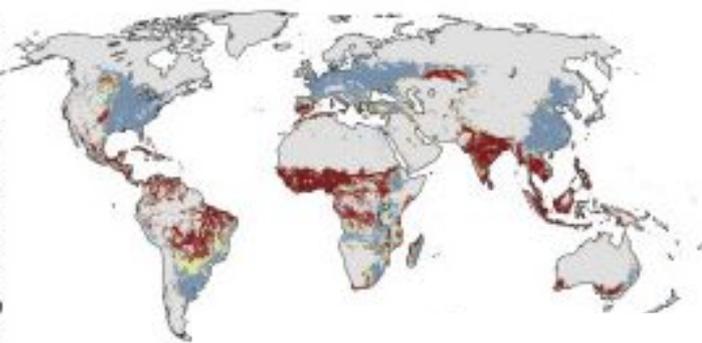


- Actuellement, 95 % de la production agricole se fait dans une zone optimale pour l'agriculture.

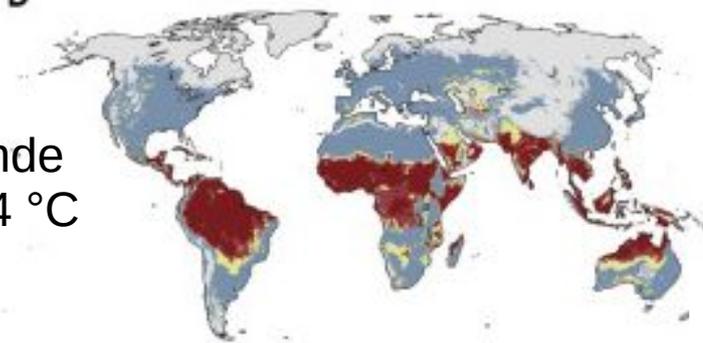
- Avec un scénario à 2°C à la fin du siècle, certains territoires quittent cette zone optimale.

Low emission scenario:  
8% 5%  
outside SCS by 2090

High emission scenario



Monde à +4 °C



- Avec un scénario à 4 °C pour la fin du siècle, l'ensemble de la bande intertropicale quitte la zone optimale pour l'agriculture.

High emission scenario:  
31% 34%  
outside SCS by 2090

Territoires à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone climatique sûre



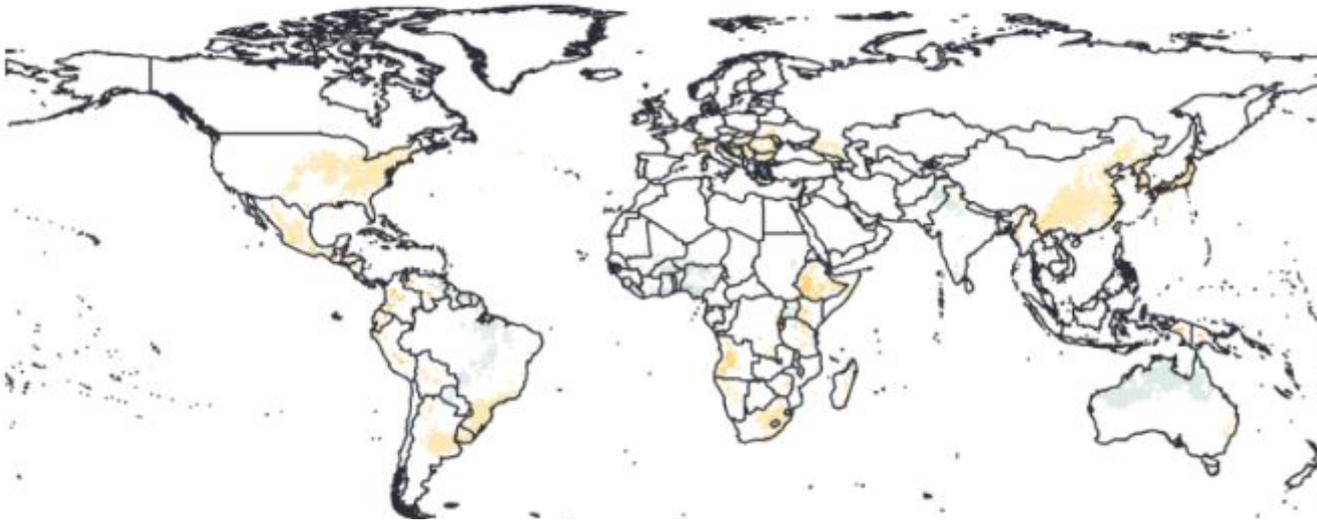
3 ( Source : Kummu et al., Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space, One Earth (2021), <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.017>

# Malaria



Monde à +2 °C

RCP2.6-SSP1



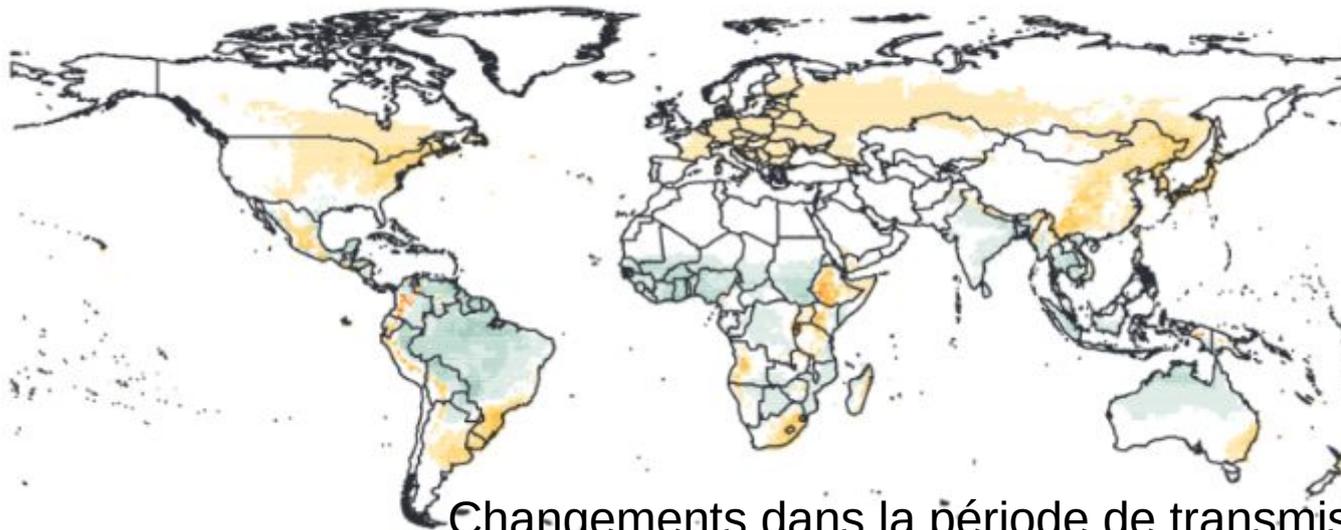
Malaria nécessite un cumul annuel supérieur à 80 mm, une température moyenne annuelle entre 18 et 32°C et une humidité relative supérieure à 60%.

Dans le passé récent (1970-1999), une moyenne de **3,7 milliards de personnes** étaient exposés à la malaria. Dans un monde à +4°C, **8,4 milliards de personnes** seront exposés en 2071-2078.

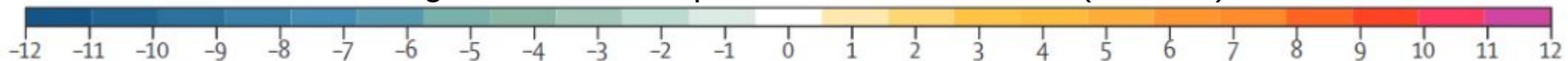
Certains territoires deviennent moins sensibles à la malaria (trop chaud, trop sec pour les moustiques)

Monde à +4 °C

RCP8.5-SSP5

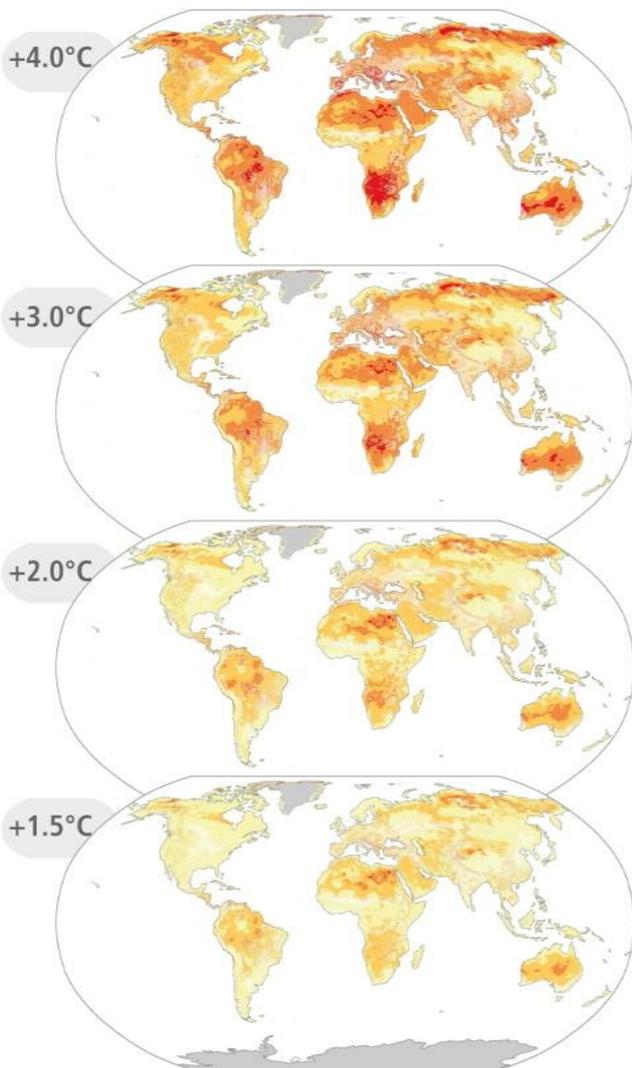


Changements dans la période de transmission (en mois)

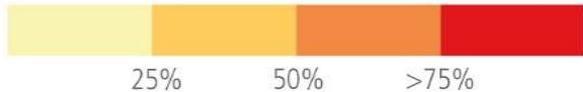


# Menaces sur la biodiversité

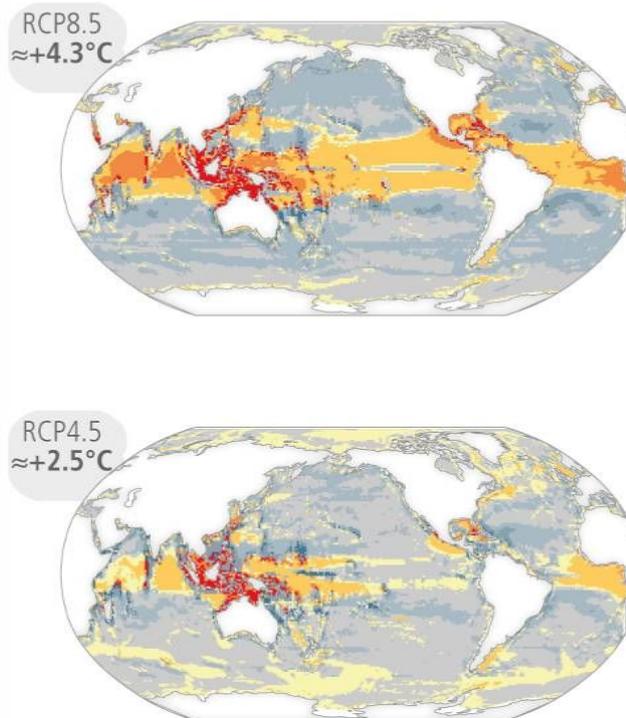
Projected loss of terrestrial and freshwater biodiversity compared to pre-industrial period



Percentage of biodiversity loss

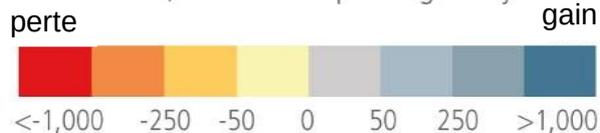


Projected changes in global marine species richness in 2100 compared to 2006



Change in species richness

for a suite of taxonomic groups based on 12,796 marine species globally



Source : GIEC AR6 WGII

# Conclusion

---

**Nous vivons une quadruple crise : crise climatique, crise du vivant, crise des inégalités, crise de la démocratie.**

**On ne peut pas résoudre une crise sans s'attaquer aux autres en même temps.**

**Il faut trouver un récit de notre temps qui permettent de résoudre ces quatre crises qui sont chacune capables d'emporter la civilisation !**

**C'est le moment de poser les questions !**