INTRODUCTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE



Benjamin I Cook

CONSIGNES POUR AUJOURD'HUI

OBJECTIF : donner une compréhension physique fondamentale du changement climatique et des incertitudes associées, et montrer comment la science peut éclairer l'adaptation et l'atténuation

POSEZ VOS QUESTIONS au fur et à mesure
dans le chat Zoom

QUESTION D'ÉCHAUFFEMENT

QUEL POURCENTAGE DU RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE PEUT ÊTRE ATTRIBUÉ (IMPUTÉ) AUX ACTIVITÉS HUMAINES ?

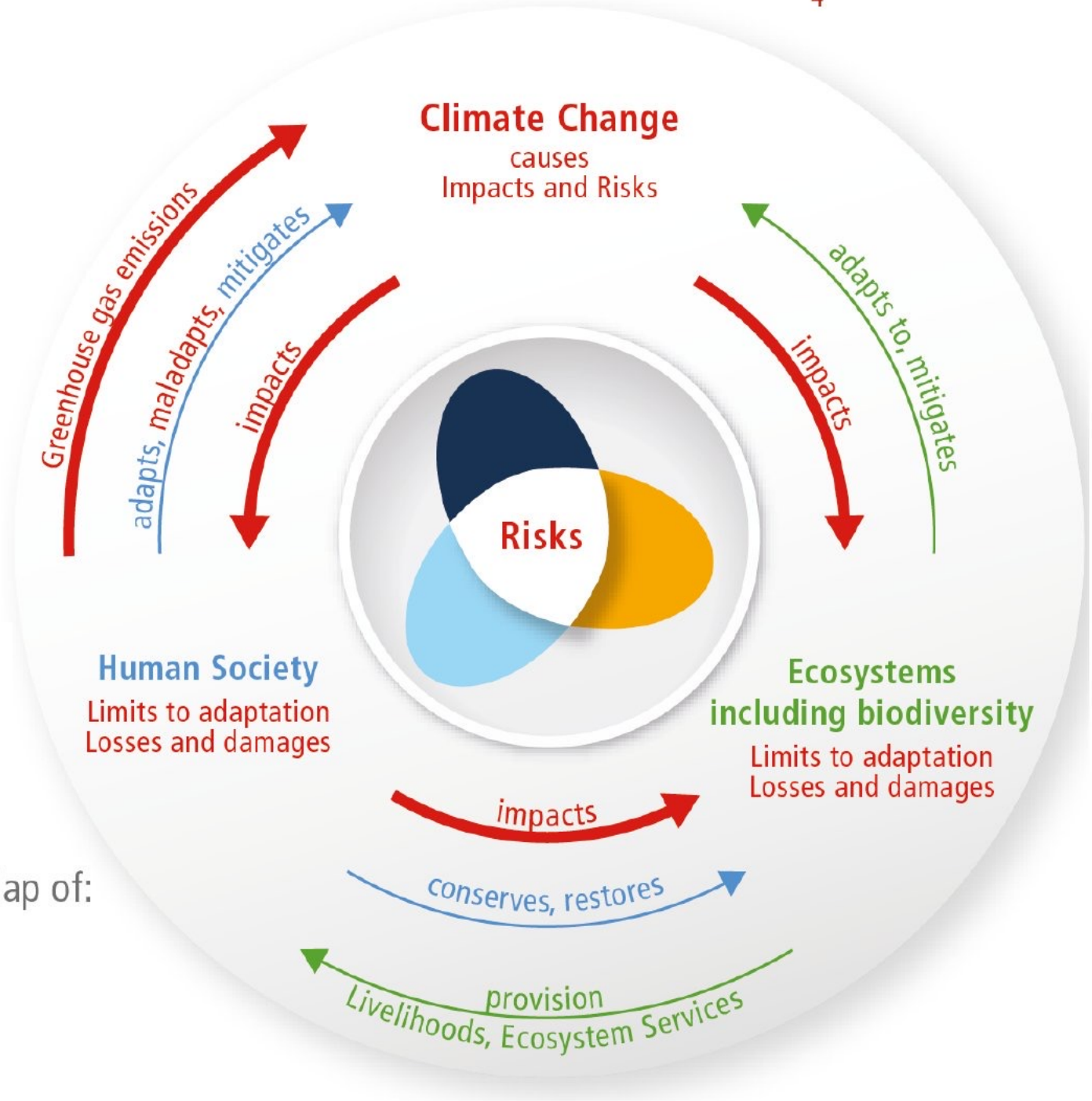
Le changement

climatique est

un facteur

clé

des risques futurs



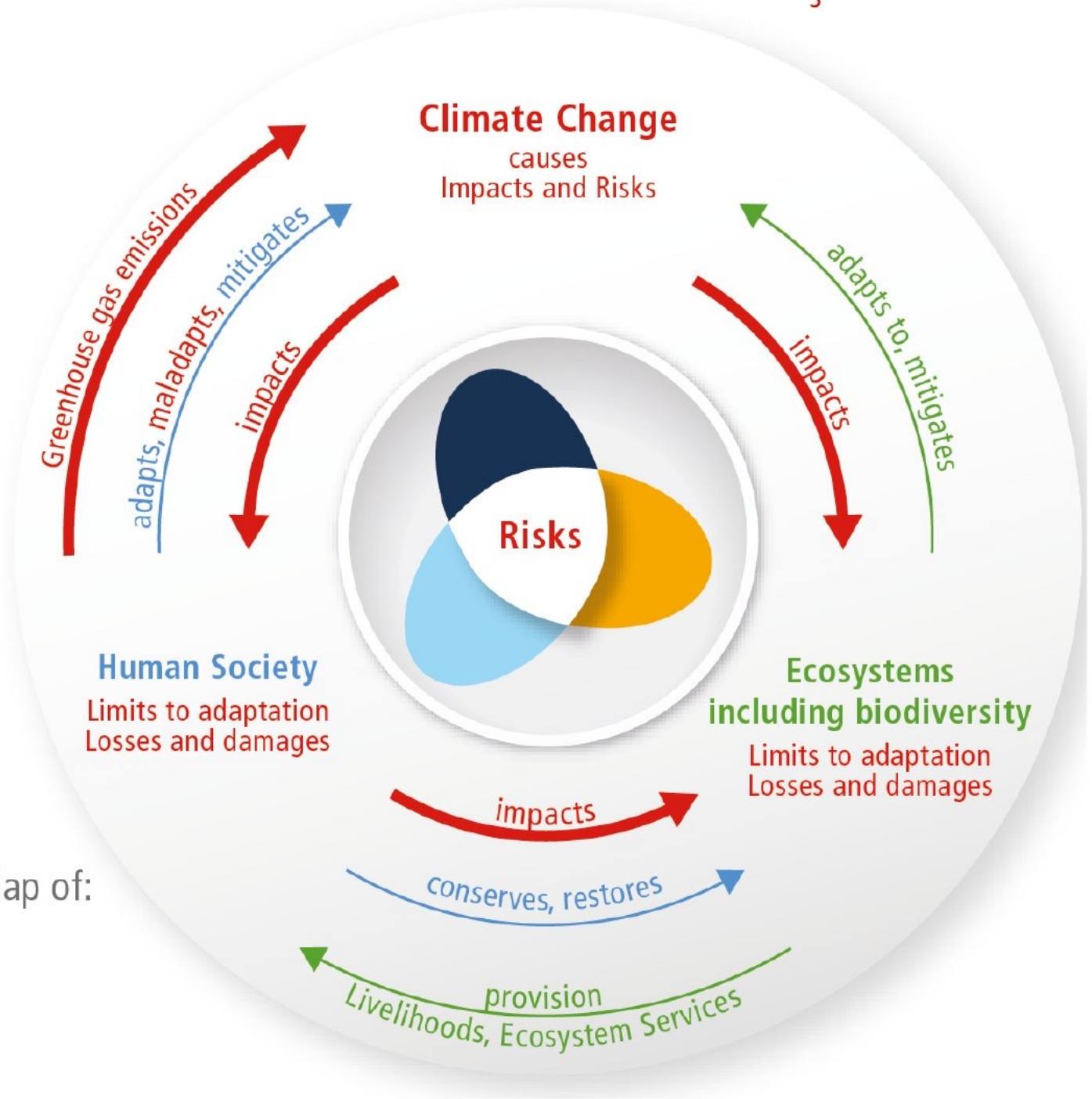
The risk propeller shows that risk emerges from the overlap of:

Climate hazard(s) Vulnerability Exposure

...of human systems, ecosystems and their biodiversity

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Les impacts dépendent AUSSI : du lieu de vie (exposition) et du degré d'adaptation (vulnérabilité)



The risk propeller shows that risk emerges from the overlap of:

Climate hazard(s) | Vulnerability | Exposure

...of human systems, ecosystems and their biodiversity

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Gérer les risques climatiques implique de

Comprendre ce qui se passe

(science du climat)

Gérer les risques climatiques implique de

Comprendre ce qui se passe

(science du climat)

Éviter autant de réchauffement que possible

(atténuation)

Gérer les risques climatiques implique de

Comprendre ce qui se passe

(science du climat)

Éviter autant de réchauffement que possible

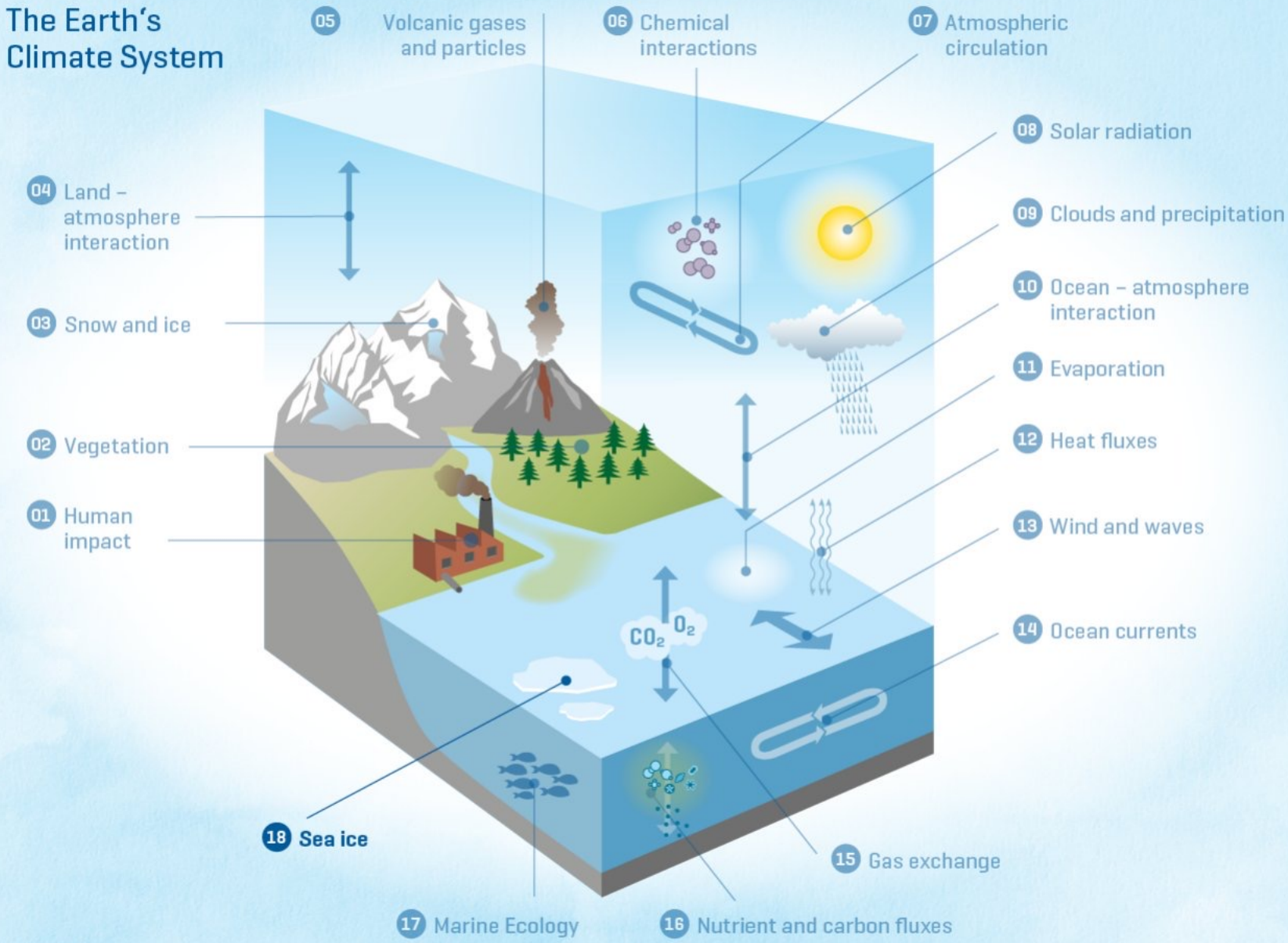
(atténuation)

Faire face aux changements qui surviennent

(adaptation)

SCIENCE DU CLIMAT

Le système climatique terrestre



https://www.geomar.de/en/discover/ocean-and-climate/model-simulations/the-earths-climate-system

Qu’est-ce que le climat ?

WEATHER

WHAT YOU GET

CONDITIONS OF THE ATMOSPHERE OVER A SHORT PERIOD OF TIME

CAN CHANGE WITHIN MINUTES OR HOURS



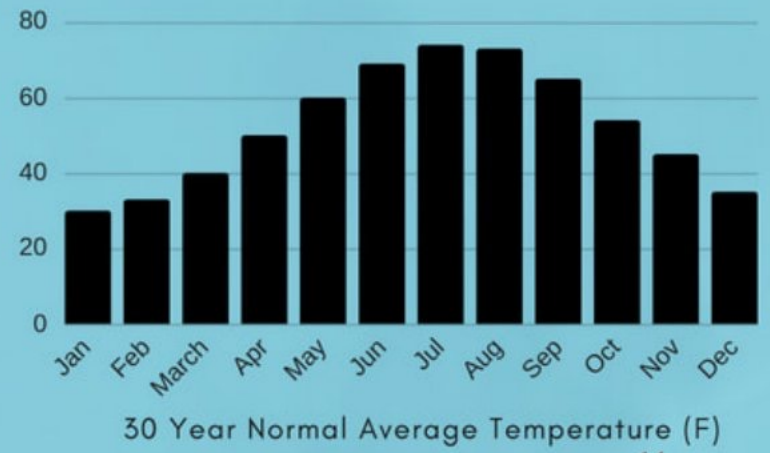
VS

CLIMATE

WHAT YOU EXPECT

HOW THE ATMOSPHERE BEHAVES OVER A LONG PERIOD OF TIME AND SPACE

AVERAGE REGIONAL WEATHER PATTERN OVER DECADES



https://www.alabamawx.com/wp-content/uploads/2019/06/weather-vs-climate_orig.jpg


CLIMAT
c’est ce qu’on attend
LA MÉTÉO
c’est ce qu’on obtient

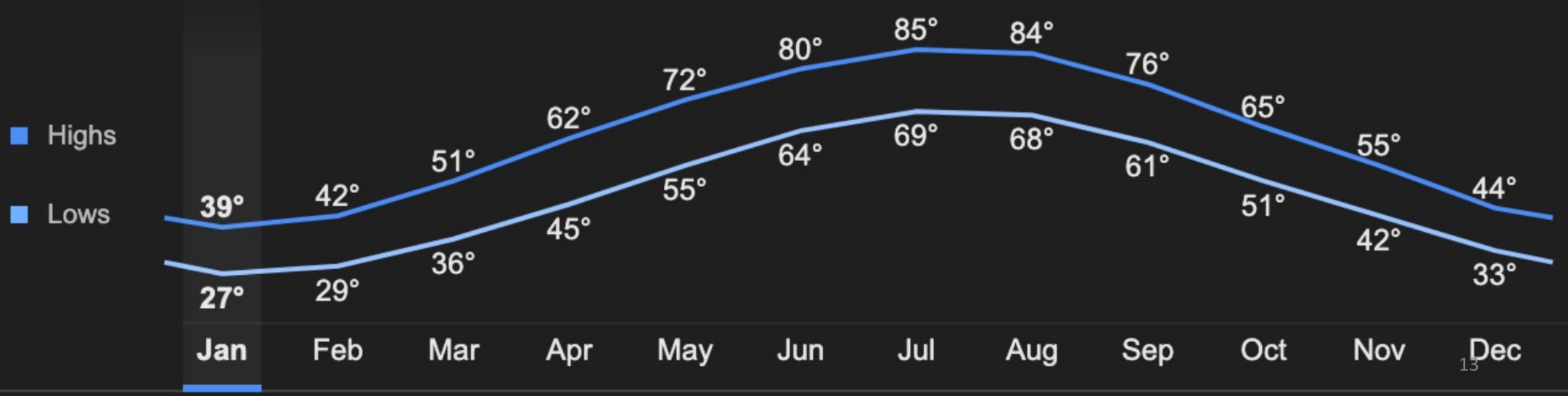
21 °F | °C
Precipitation: 0%
Humidity: 50%
Wind: 14 mph

Weather

Tuesday 2:00 PM
Sunny

Temperature | Precipitation | Wind

Temperatures (°F)



QUAND ON PARLE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, ON NE CHERCHE PAS À PRÉVOIR LA MÉTÉO

Pleuvra-t-il le 14 avril 2091 ?

Quelle chaleur fera-t-il le 21 juillet 2085 ?

QUAND ON PARLE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, ON NE CHERCHE PAS À PRÉVOIR LA MÉTÉO

Pleuvra-t-il le 14 avril 2091 ?

-> Quelle sera la pluviométrie moyenne

d'avril dans les années 2090 ?

Quelle chaleur fera-t-il le 21 juillet 2085 ?

QUAND ON PARLE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, ON NE CHERCHE PAS À PRÉVOIR LA MÉTÉO

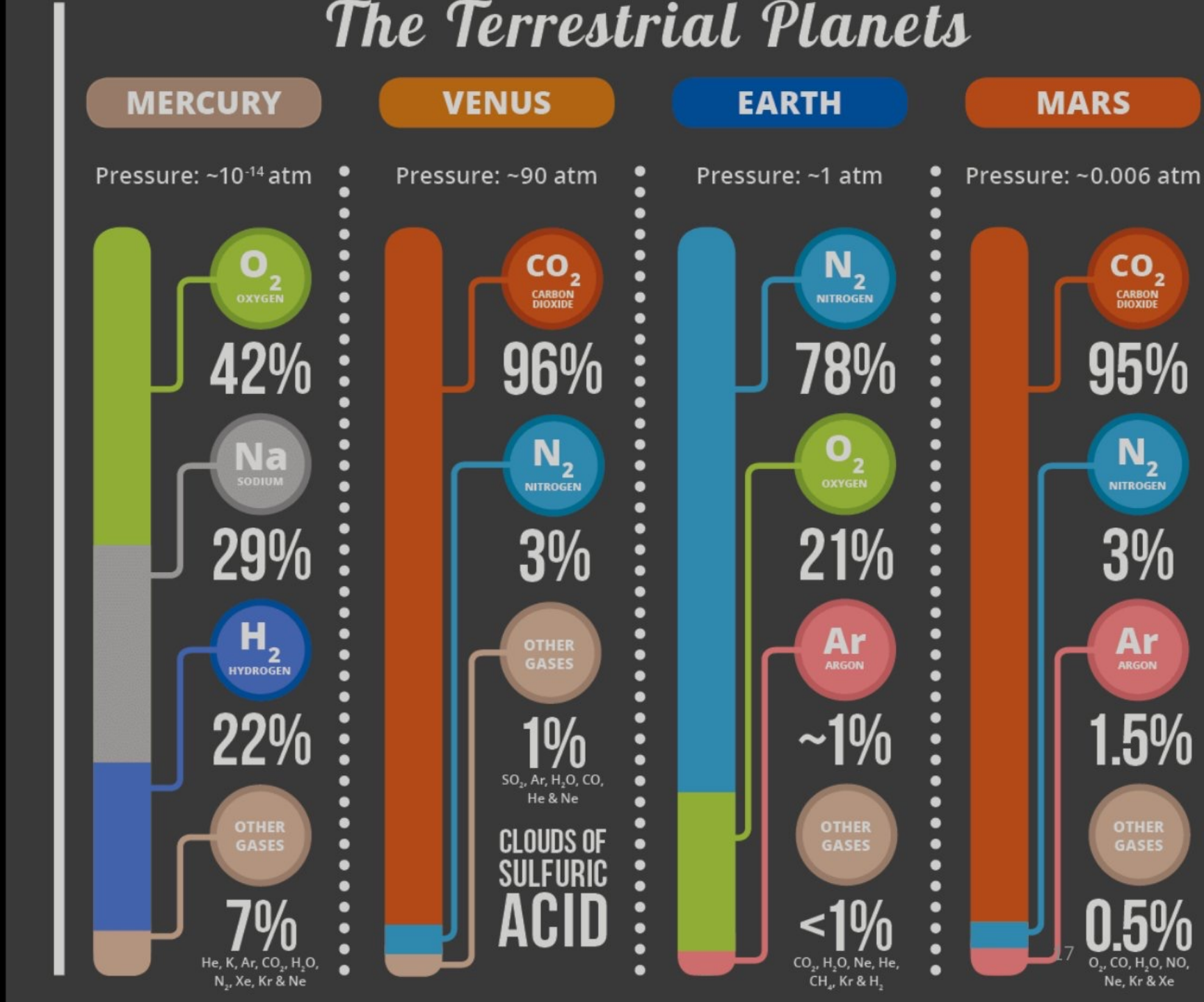
Pleuvra-t-il le 14 avril 2091 ?

-> Quelle sera la pluviométrie moyenne d'avril dans les années 2090 ?

Quelle chaleur fera-t-il le 21 juillet 2085 ?

-> De combien le risque et la gravité des vagues de chaleur à la fin du XXIe siècle ?

L’atmosphère terrestre



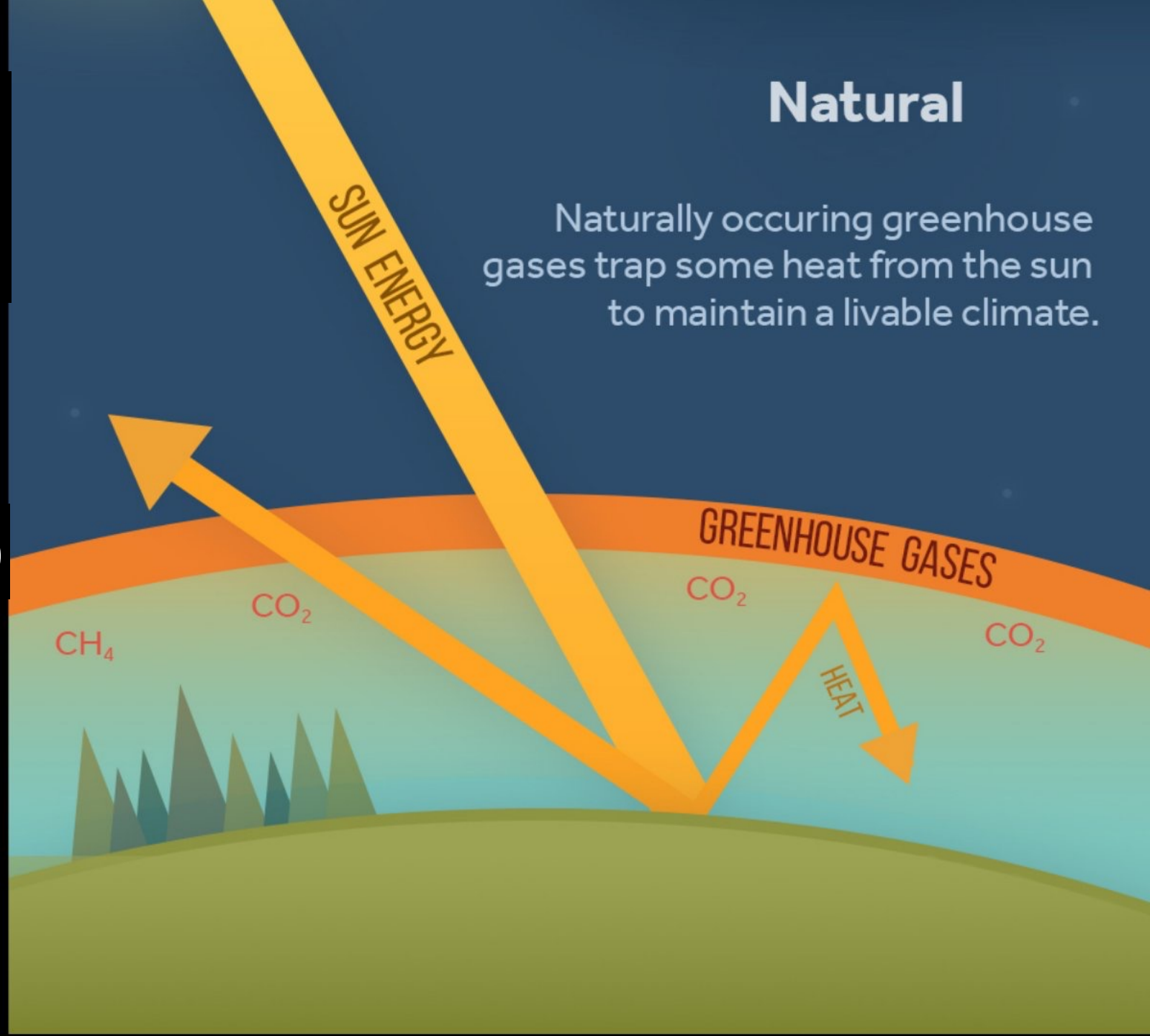
L’effet de serre

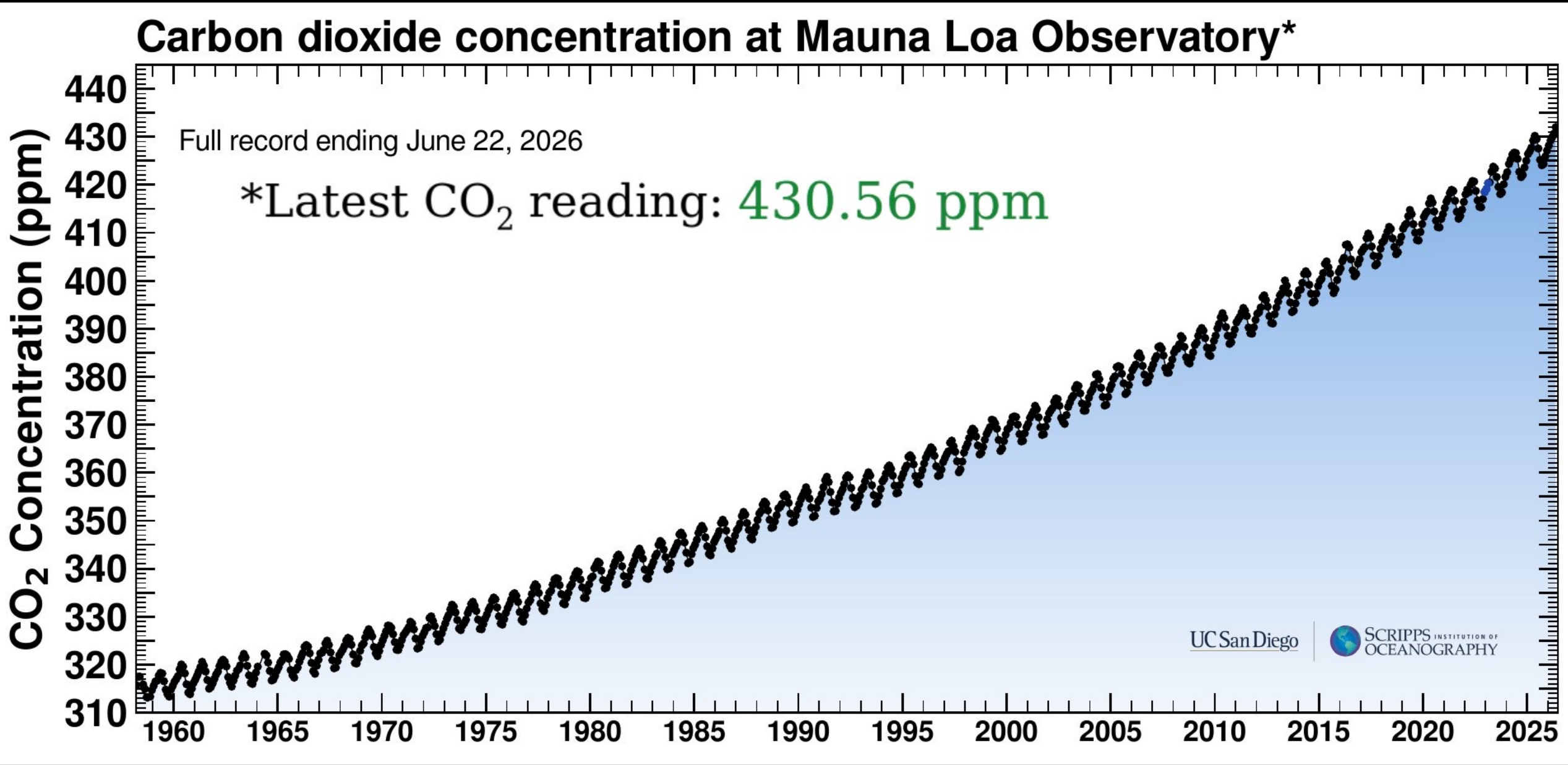
vapeur d’eau

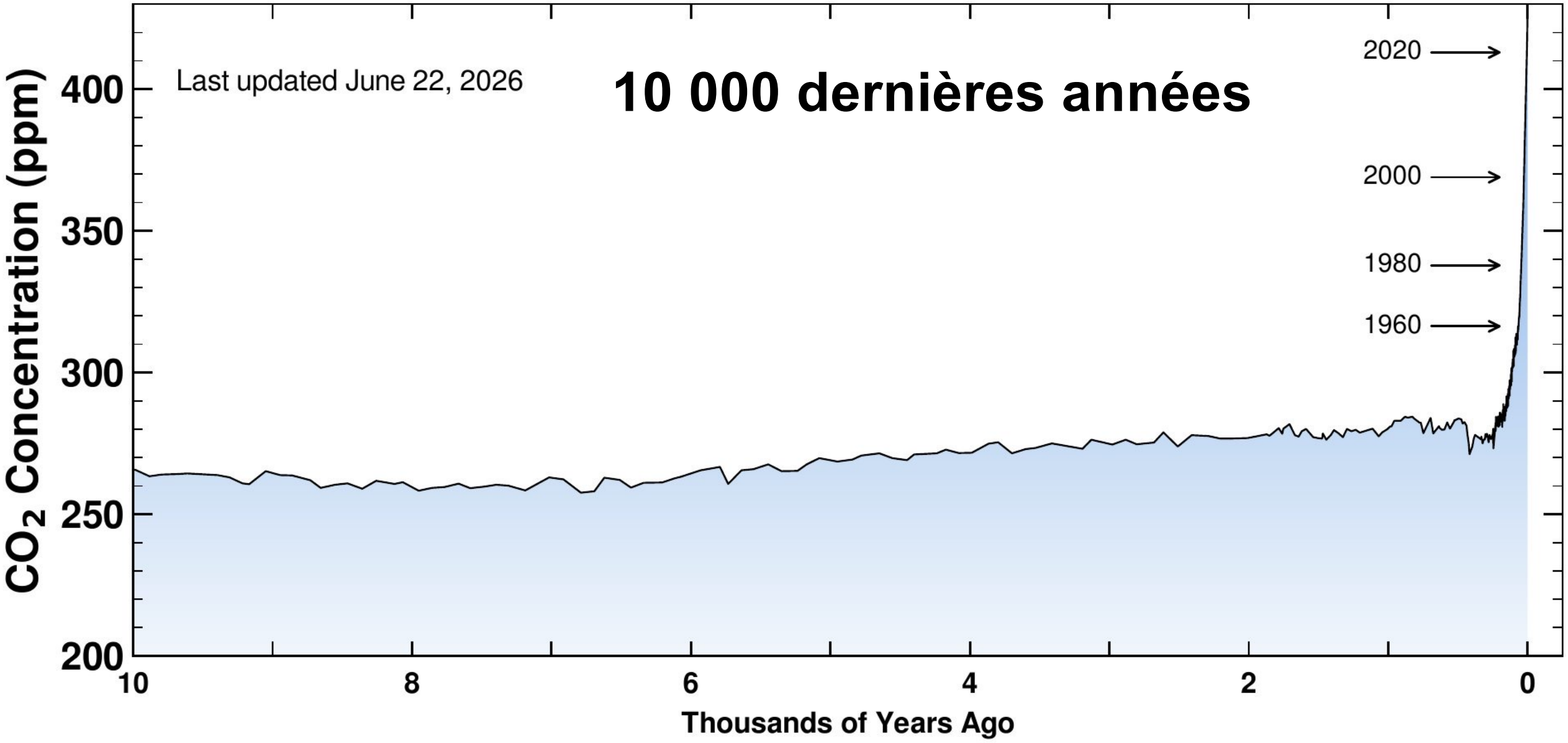
dioxyde de carbone (CO_2)

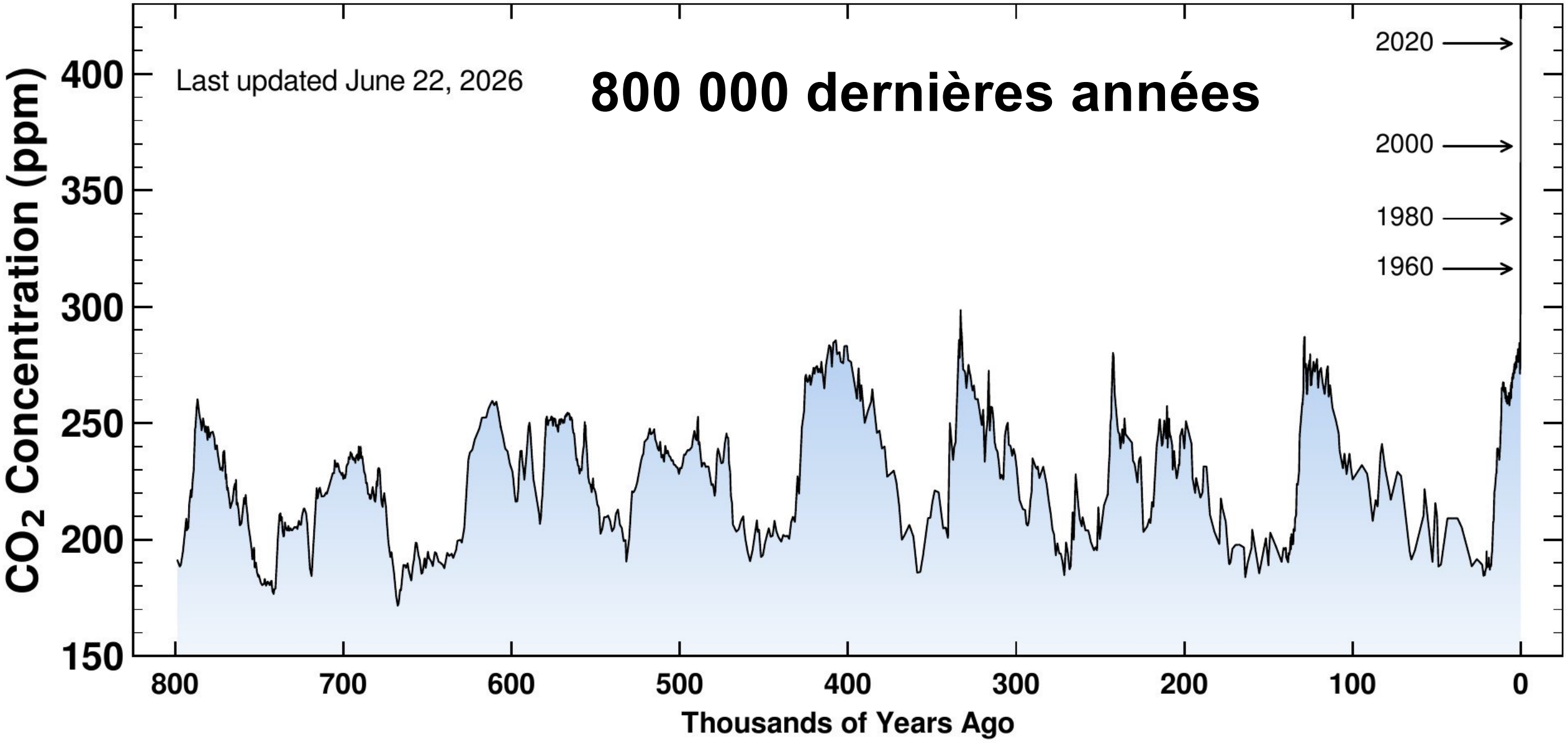
méthane (CH_4)

protoxyde d’azote (N_2O)

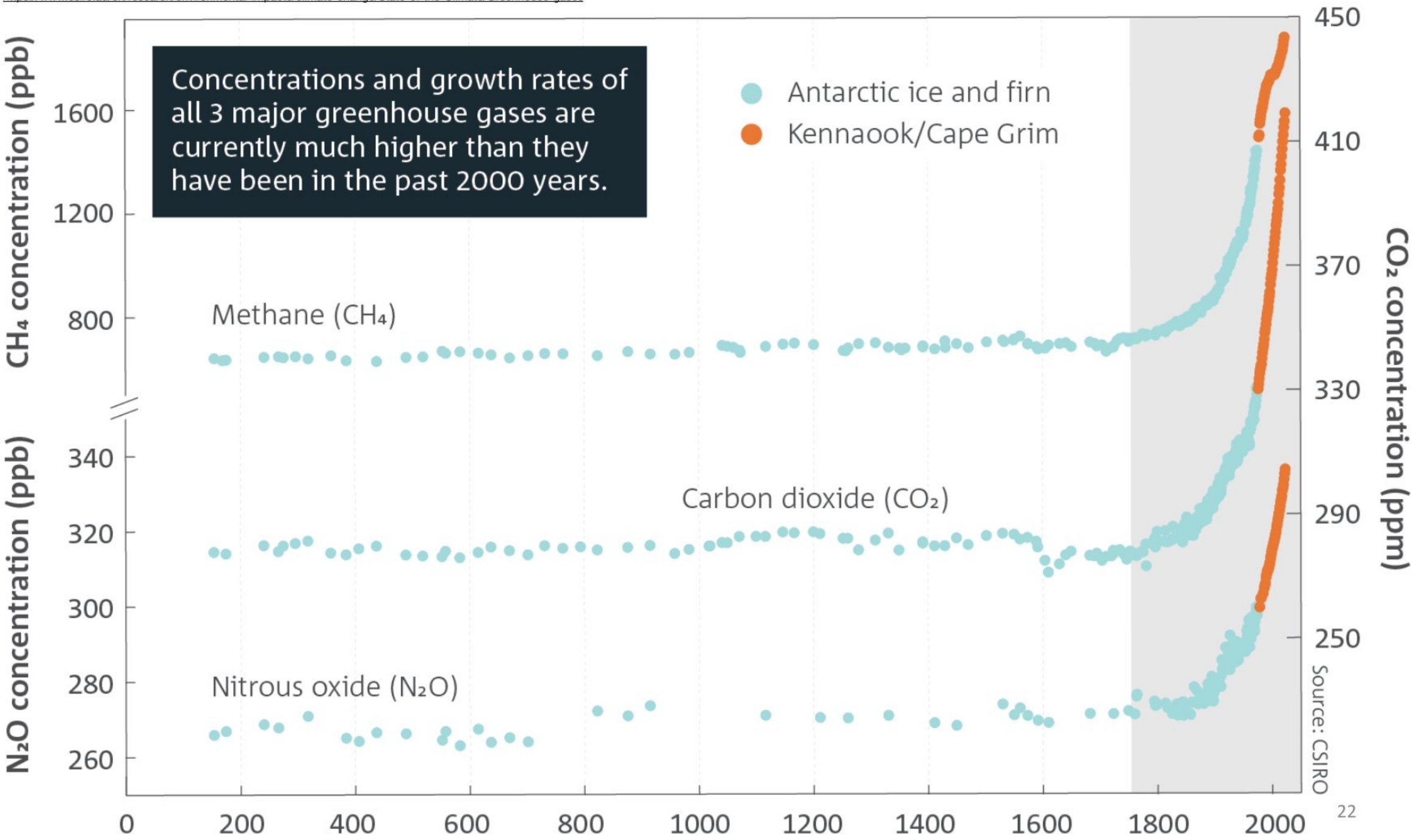



Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory*
Full record ending June 22, 2026
*Latest CO_2 reading: 430.56 ppm
CO_2 Concentration (ppm)
440
430
420
410
400
390
380
370
360
350
340
330
320
310
1960
1965
1970
1975
1980
1985
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020
2025
UC San Diego
SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY

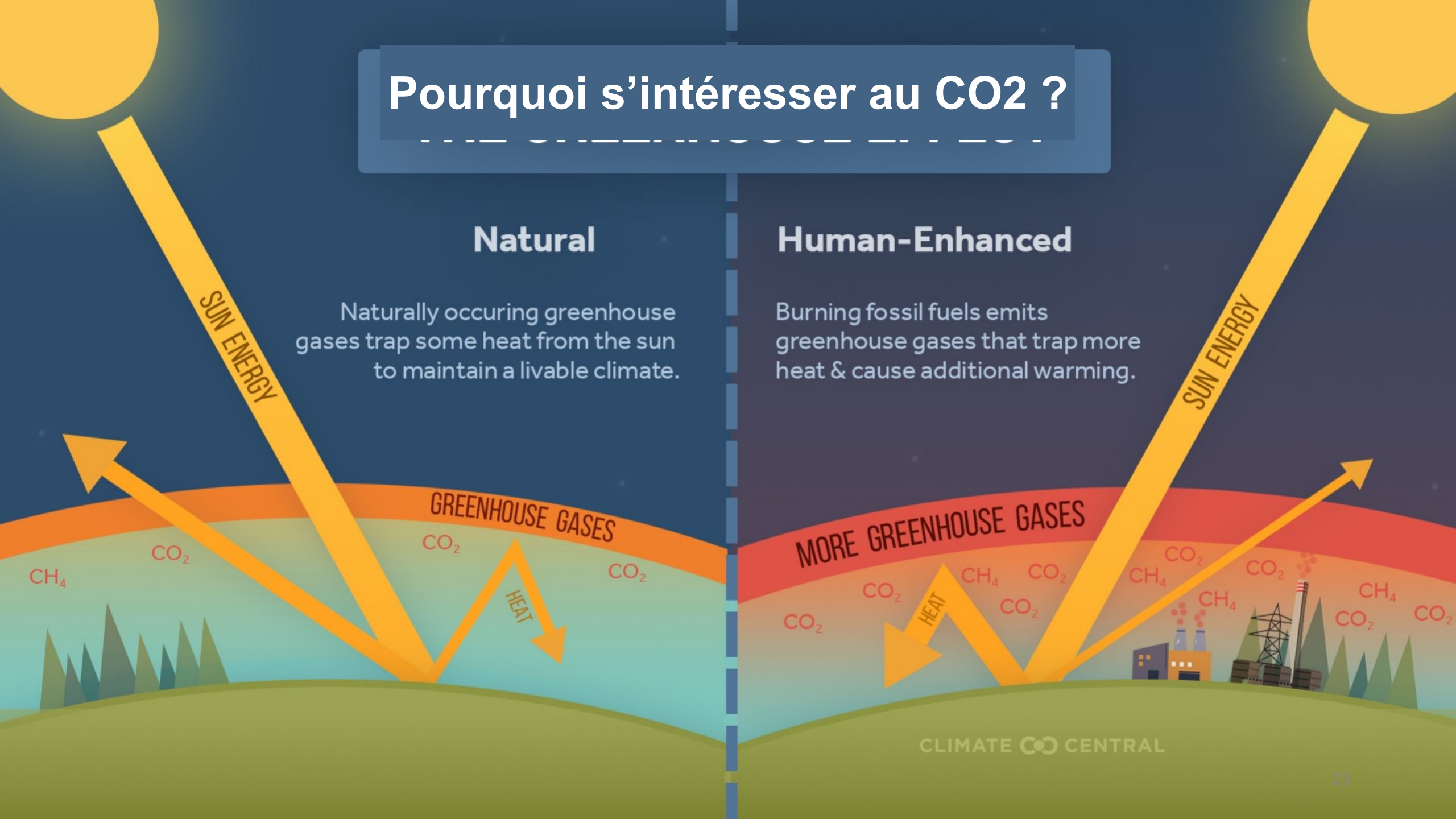

Last updated June 22, 2026
10 000 dernières années
2020
2000
1980
1960
CO2 Concentration (ppm)
400
350
300
250
200
10
8
6
4
2
0
Thousands of Years Ago


Last updated June 22, 2026
800 000 dernières années
2020
2000
1980
1960
CO2 Concentration (ppm)
400
350
300
250
200
150
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Thousands of Years Ago

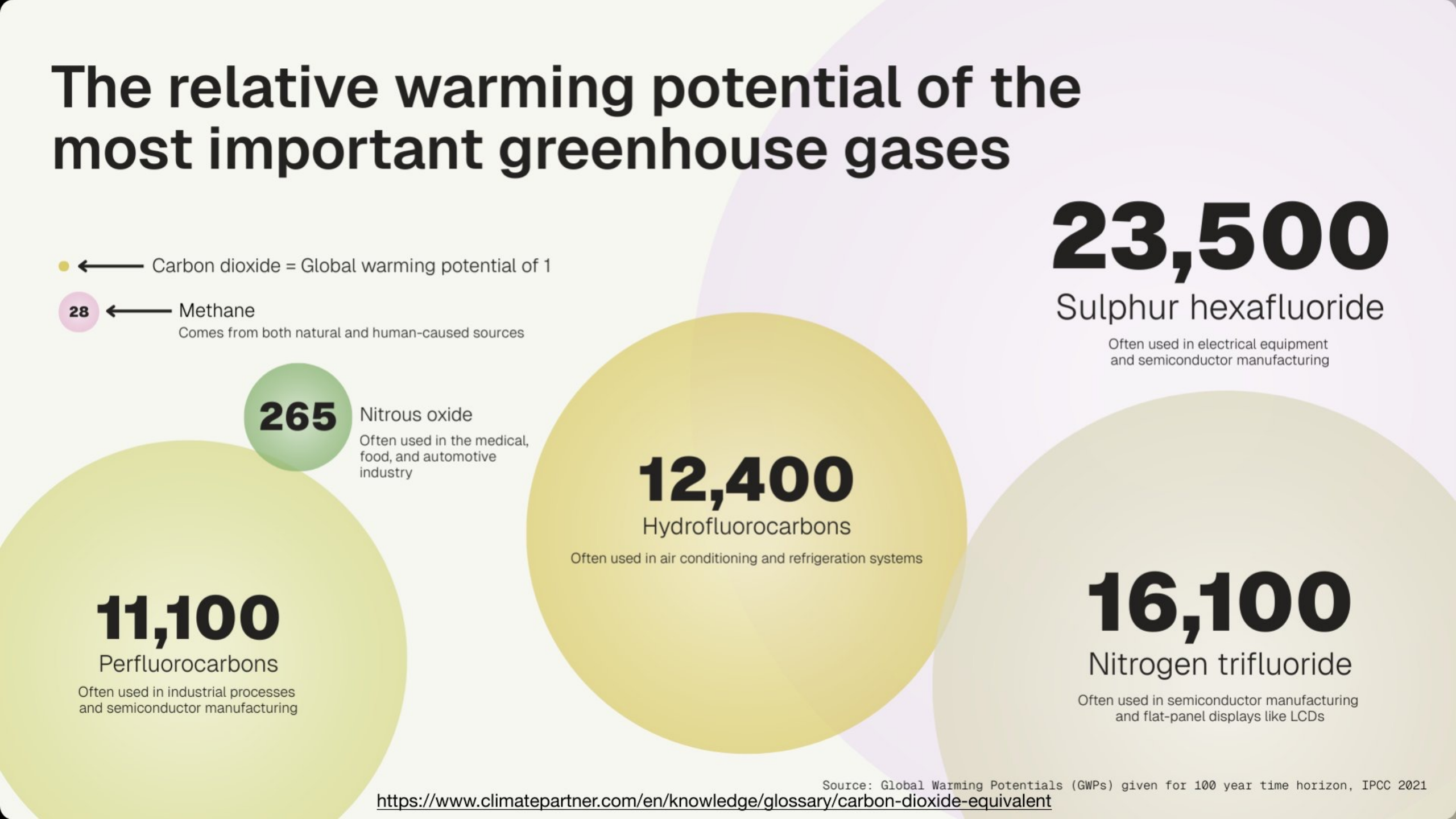
https://www.csiro.au/en/research/environmental-impacts/climate-change/State-of-the-Climate/Greenhouse-gases



Pourquoi s’intéresser au CO2 ?



The relative warming potential of the most important greenhouse gases



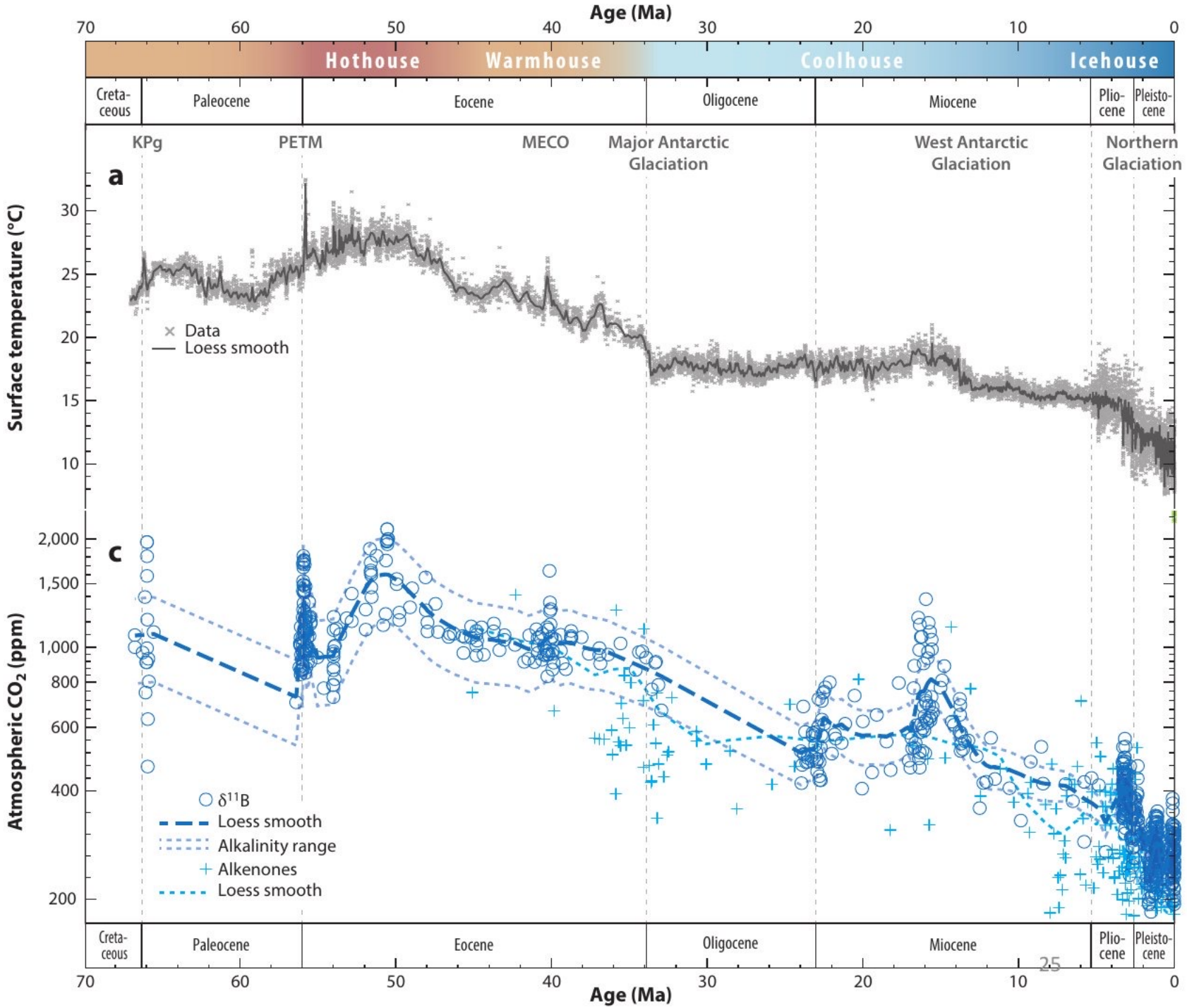
Source: Global Warming Potentials (GWPs) given for 100 year time horizon, IPCC 2021

https://www.climatepartner.com/en/knowledge/glossary/carbon-dioxide-equivalent

Dans le passé, quand le CO2 est

élevé, les températures

sont élevées

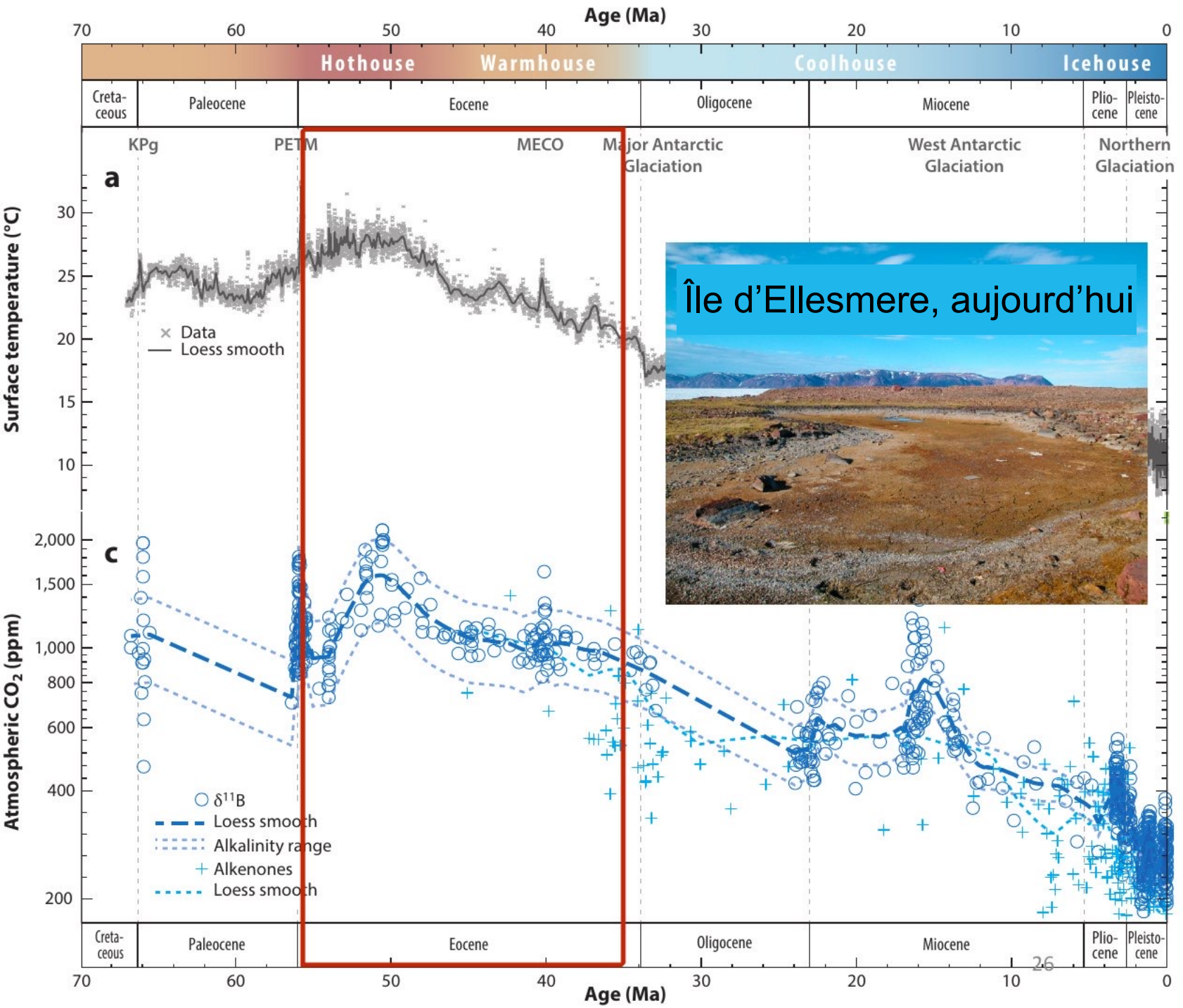


https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-082420-063026

L’Éocène (56-33,9 Ma)

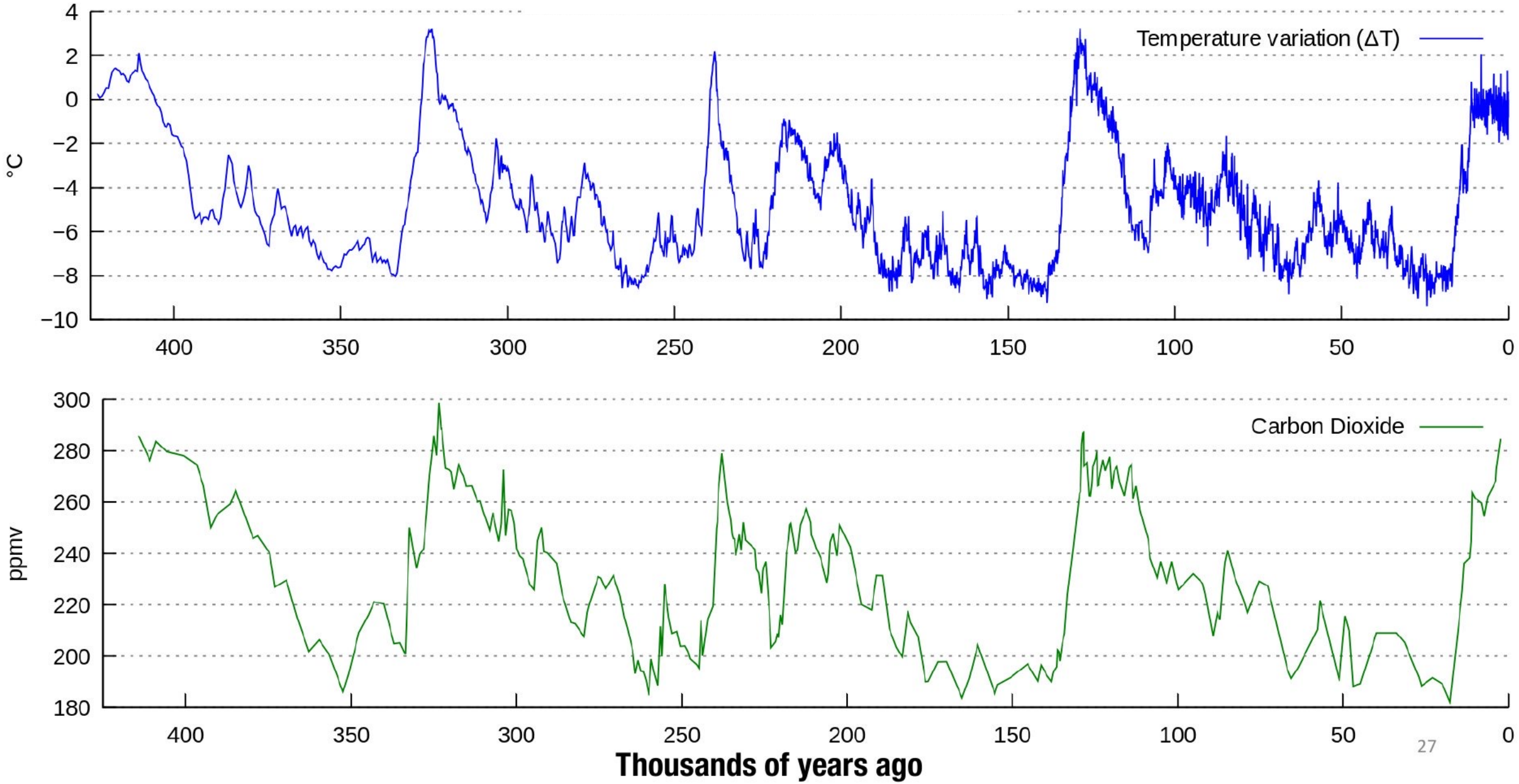
Île d’Ellesmere, il y a 50 Ma



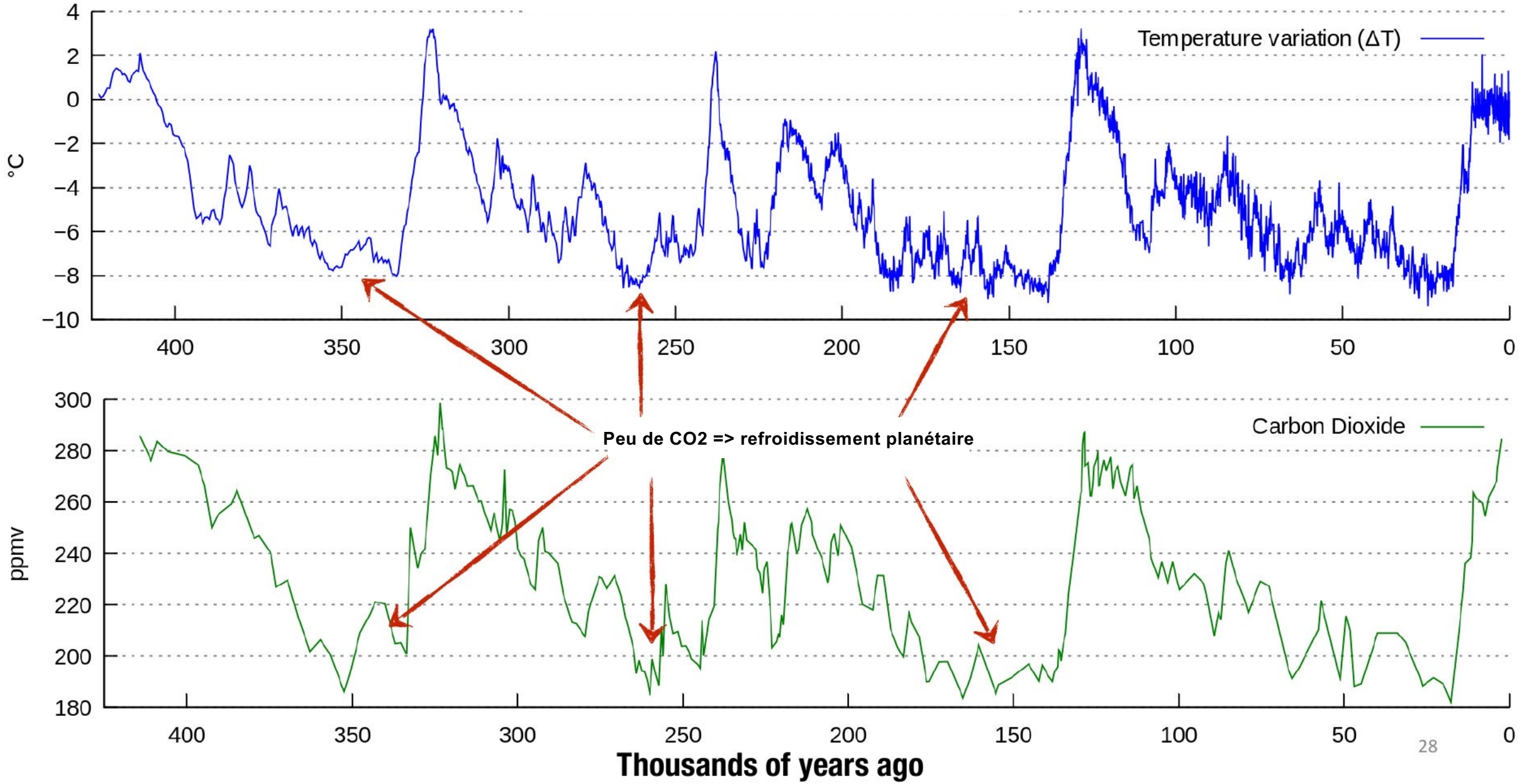


https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-082420-063026

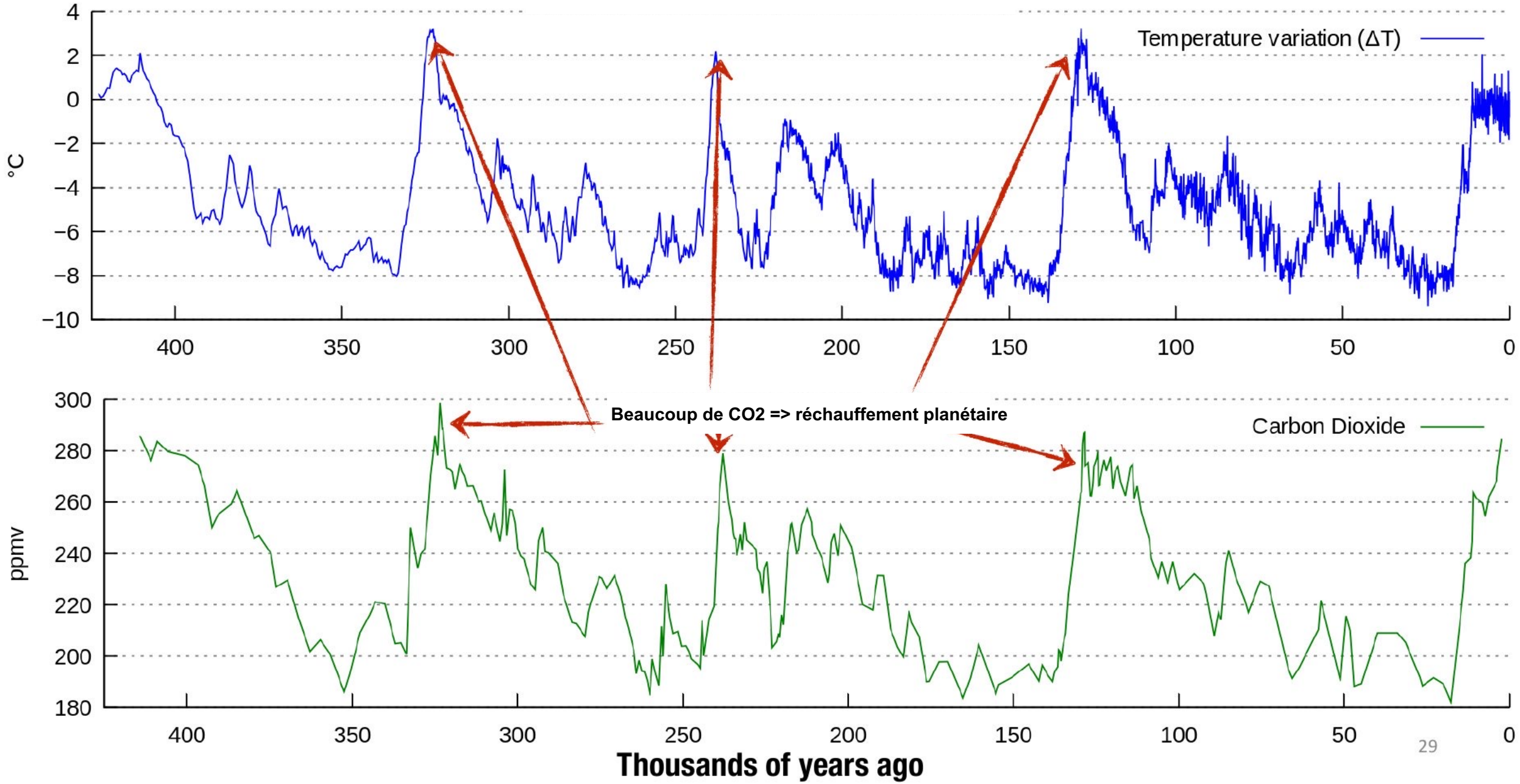
Cycles glaciaires



Cycles glaciaires



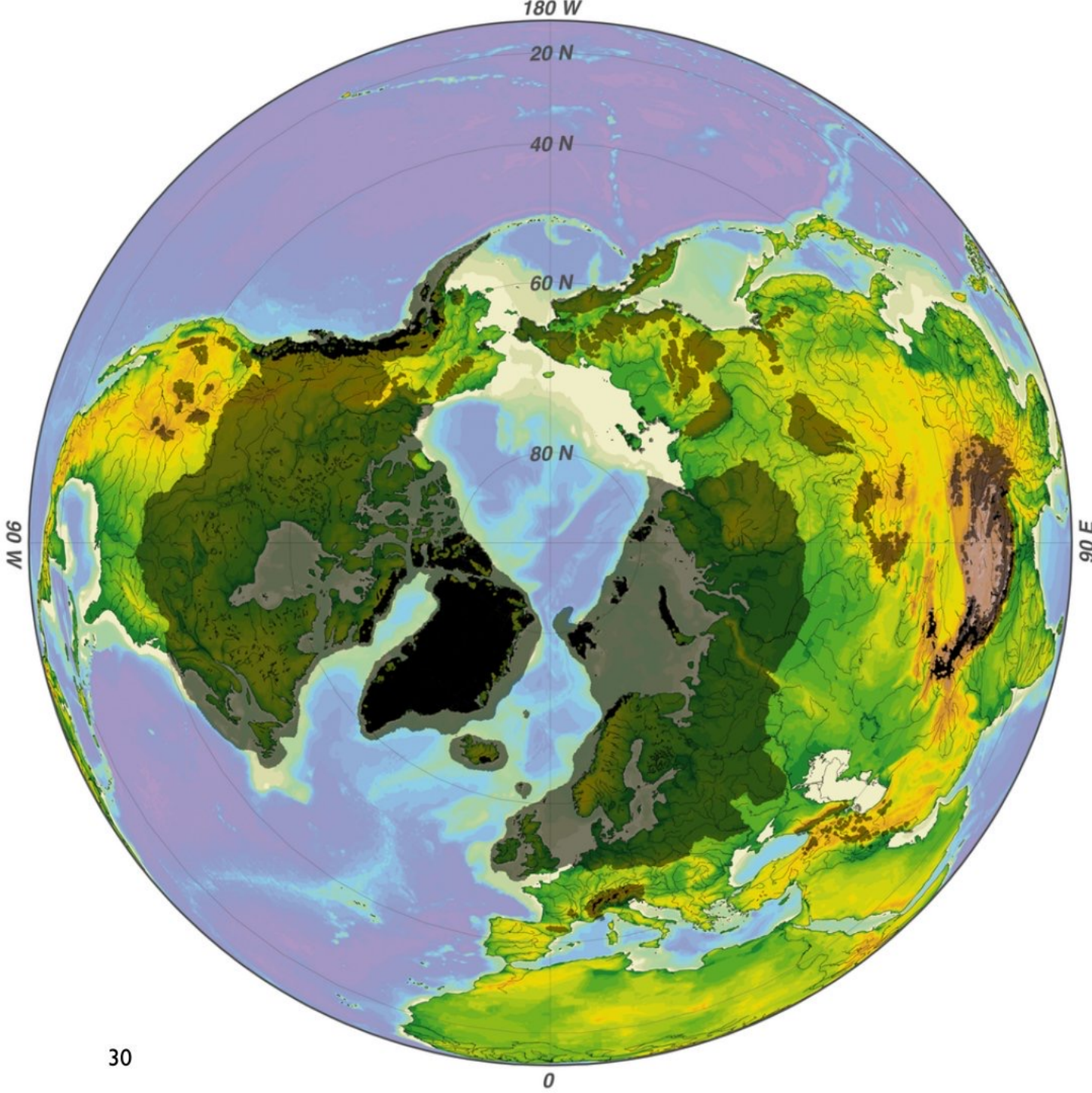
Cycles glaciaires



Calottes glaciaires lors du DMG

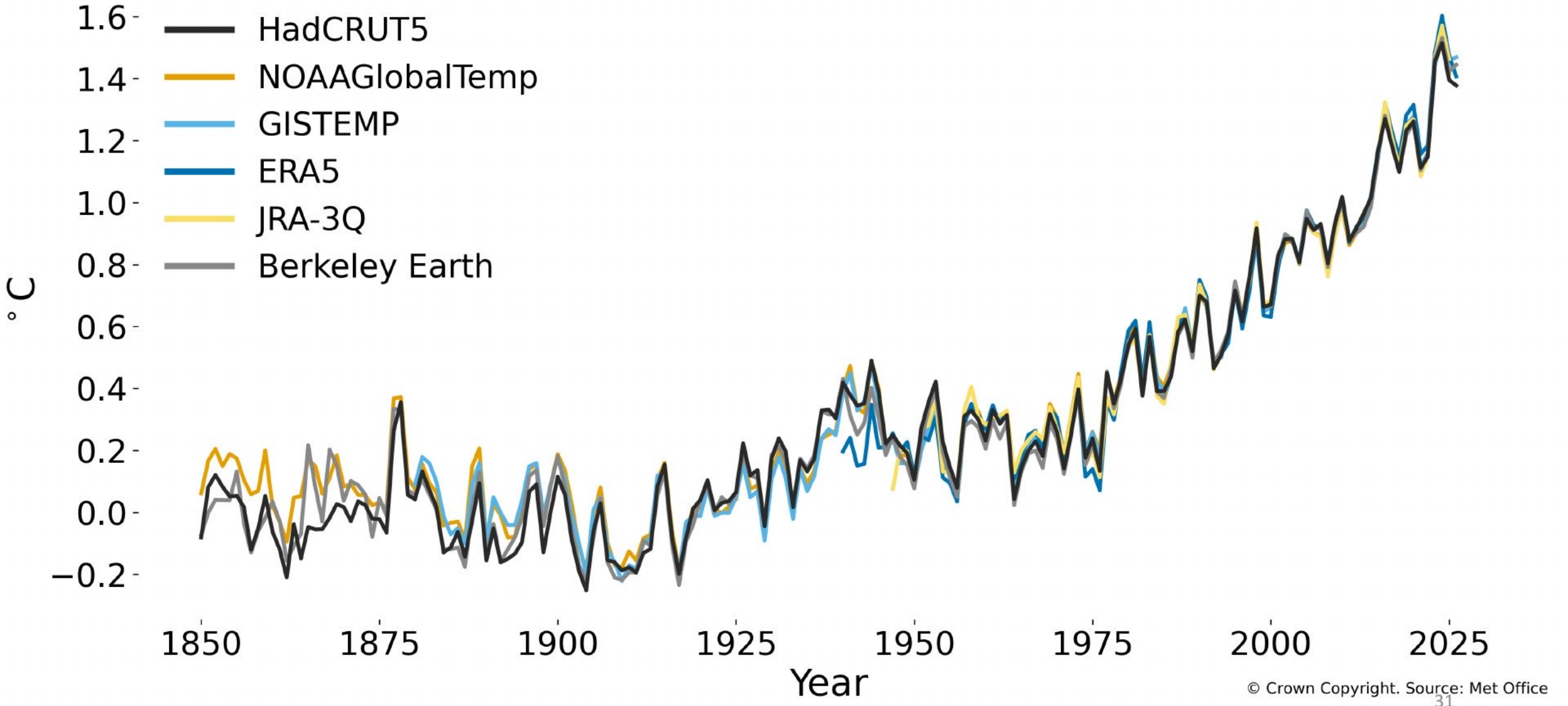
sombre = aujourd'hui

clair = il y a ~25 000 ans



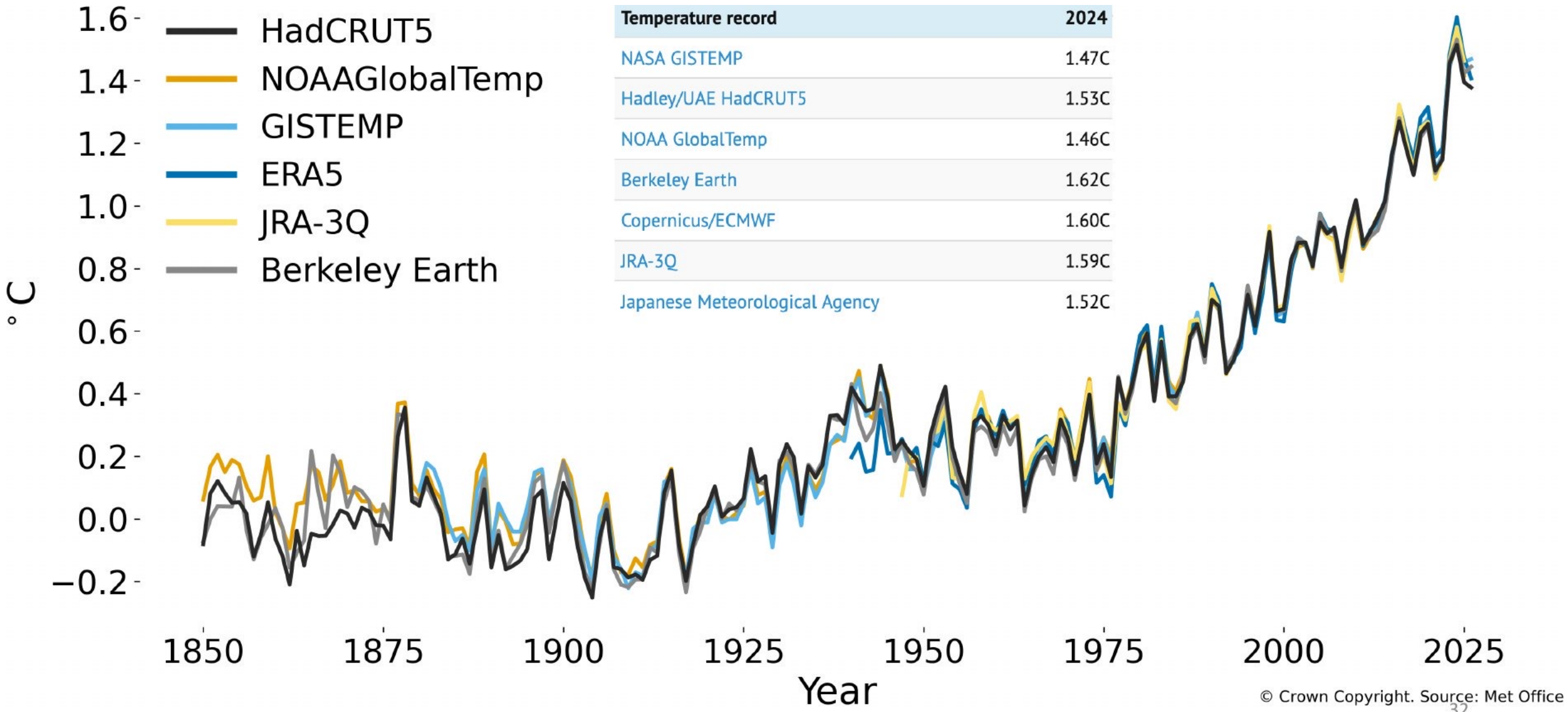
images from: http://en.wikipedia.org/wiki/Ice_age

LA PLANÈTE SE RÉCHAUFFE



© Crown Copyright. Source: Met Office
Figure updated: 09/06/2026

RECORD DE CHALEUR : 2024



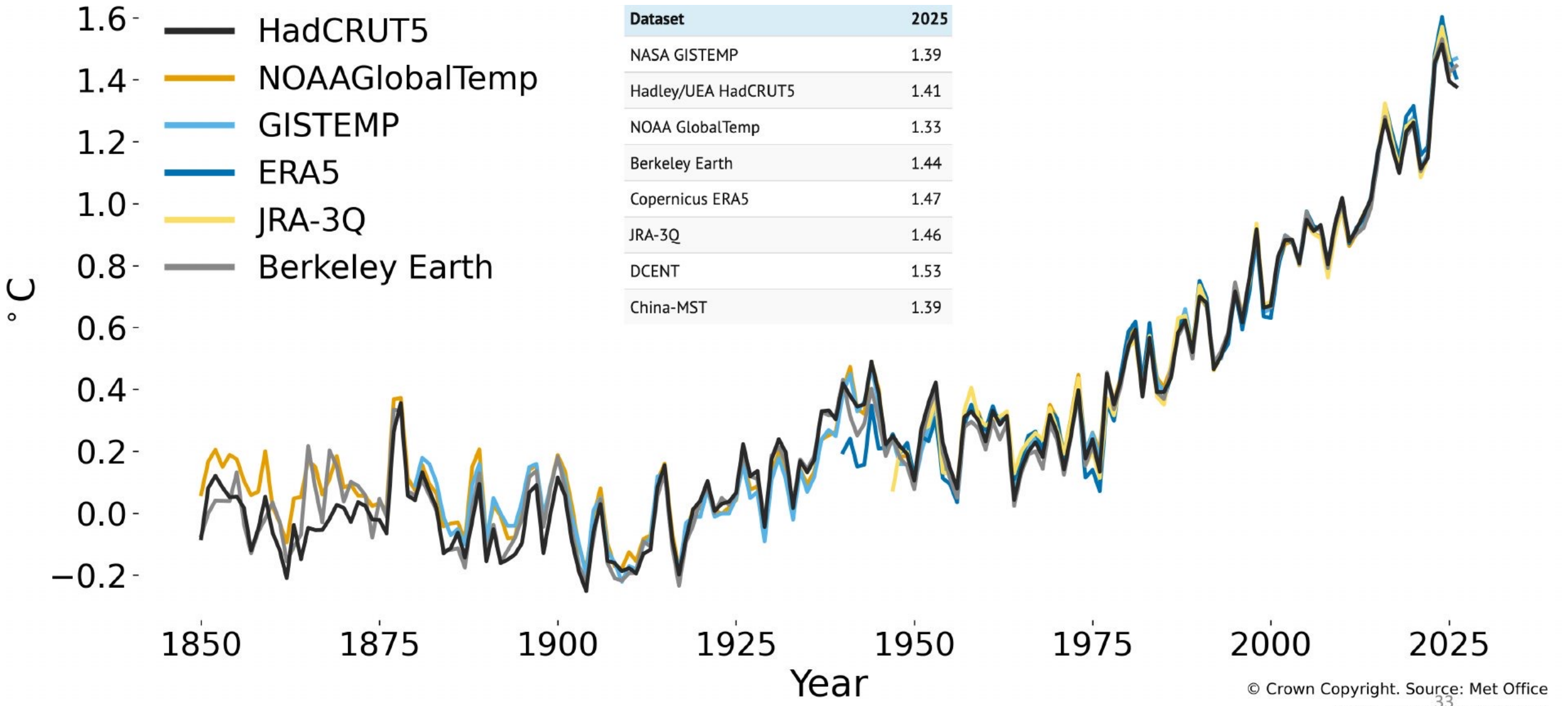
Temperature record	2024
NASA GISTEMP	1.47C
Hadley/UAE HadCRUT5	1.53C
NOAA GlobalTemp	1.46C
Berkeley Earth	1.62C
Copernicus/ECMWF	1.60C
JRA-3Q	1.59C
Japanese Meteorological Agency	1.52C

© Crown Copyright. Source: Met Office
Figure updated: 09/06/2026

https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-2024-sets-a-new-record-as-the-first-year-above-1-5c/

2025 : 2E OU 3E RANG

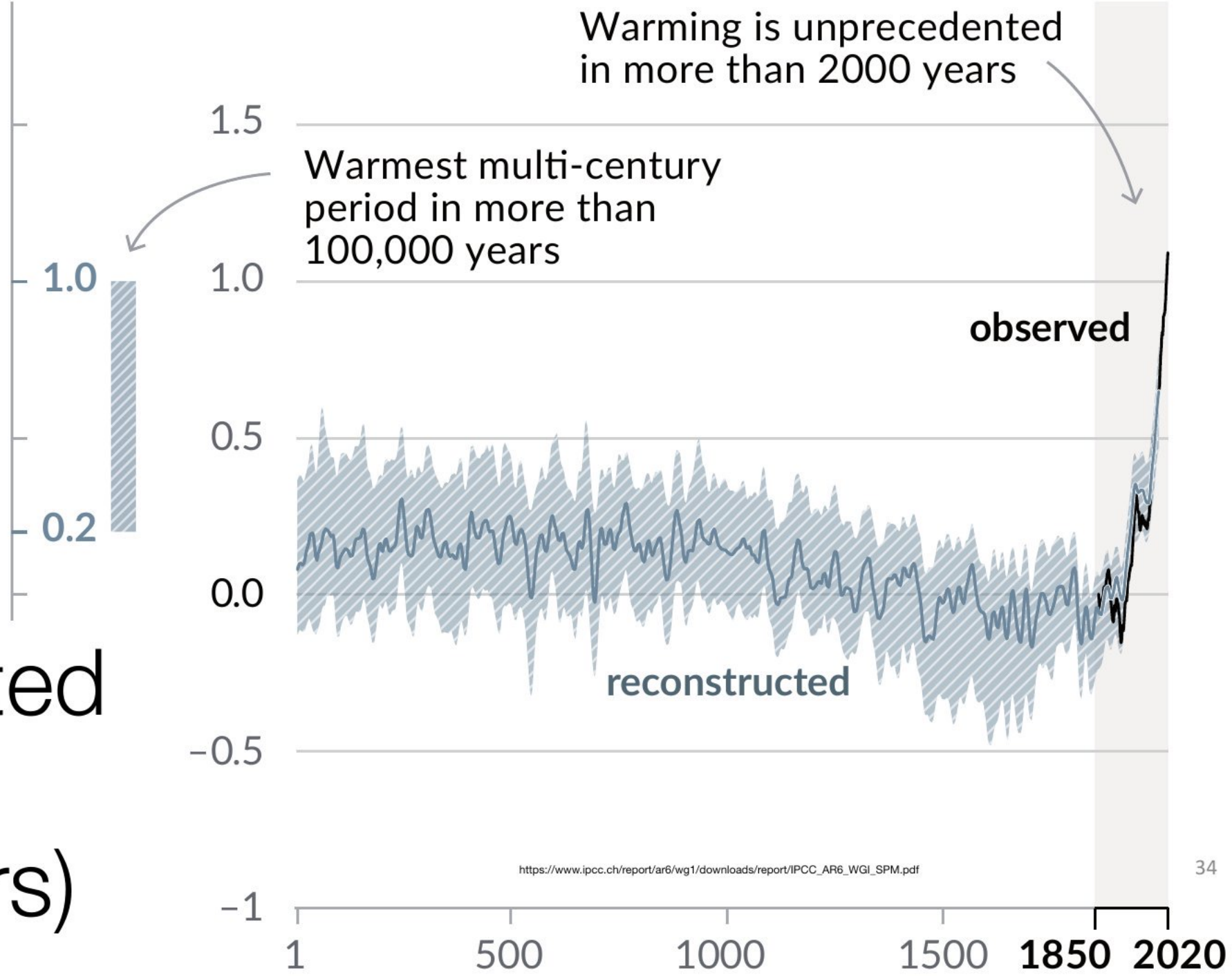
Dataset	2025
NASA GISTEMP	1.39
Hadley/UEA HadCRUT5	1.41
NOAA GlobalTemp	1.33
Berkeley Earth	1.44
Copernicus ERA5	1.47
JRA-3Q	1.46
DCENT	1.53
China-MST	1.39



© Crown Copyright. Source: Met Office
Figure updated: 09/06/2026

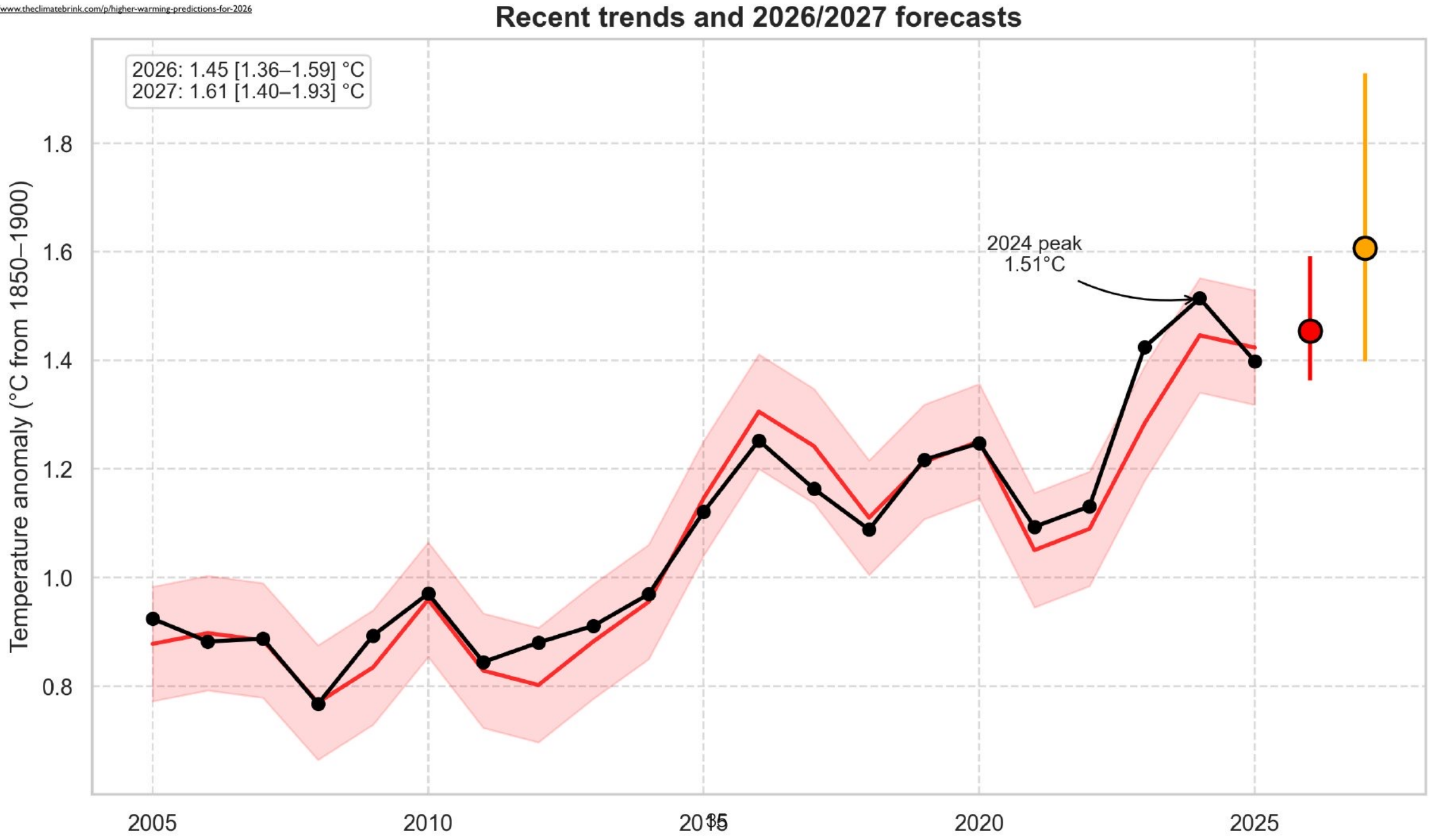
https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-2025-in-top-three-hottest-years-on-record-as-ocean-heat-surges/

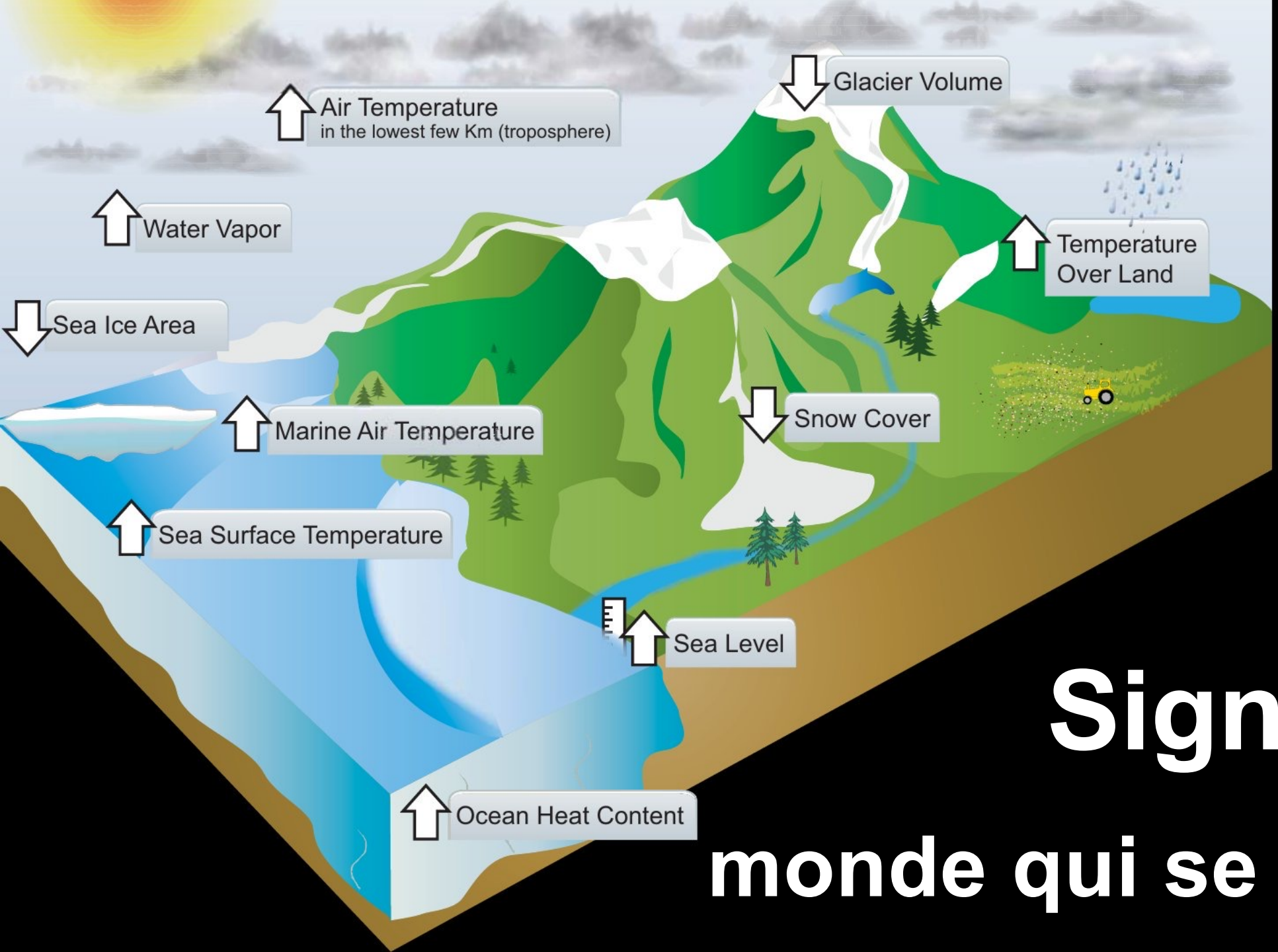
Unprecedented warming (last 2000 yrs)



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

https://www.theclimatebrink.com/p/higher-warming-predictions-for-2026

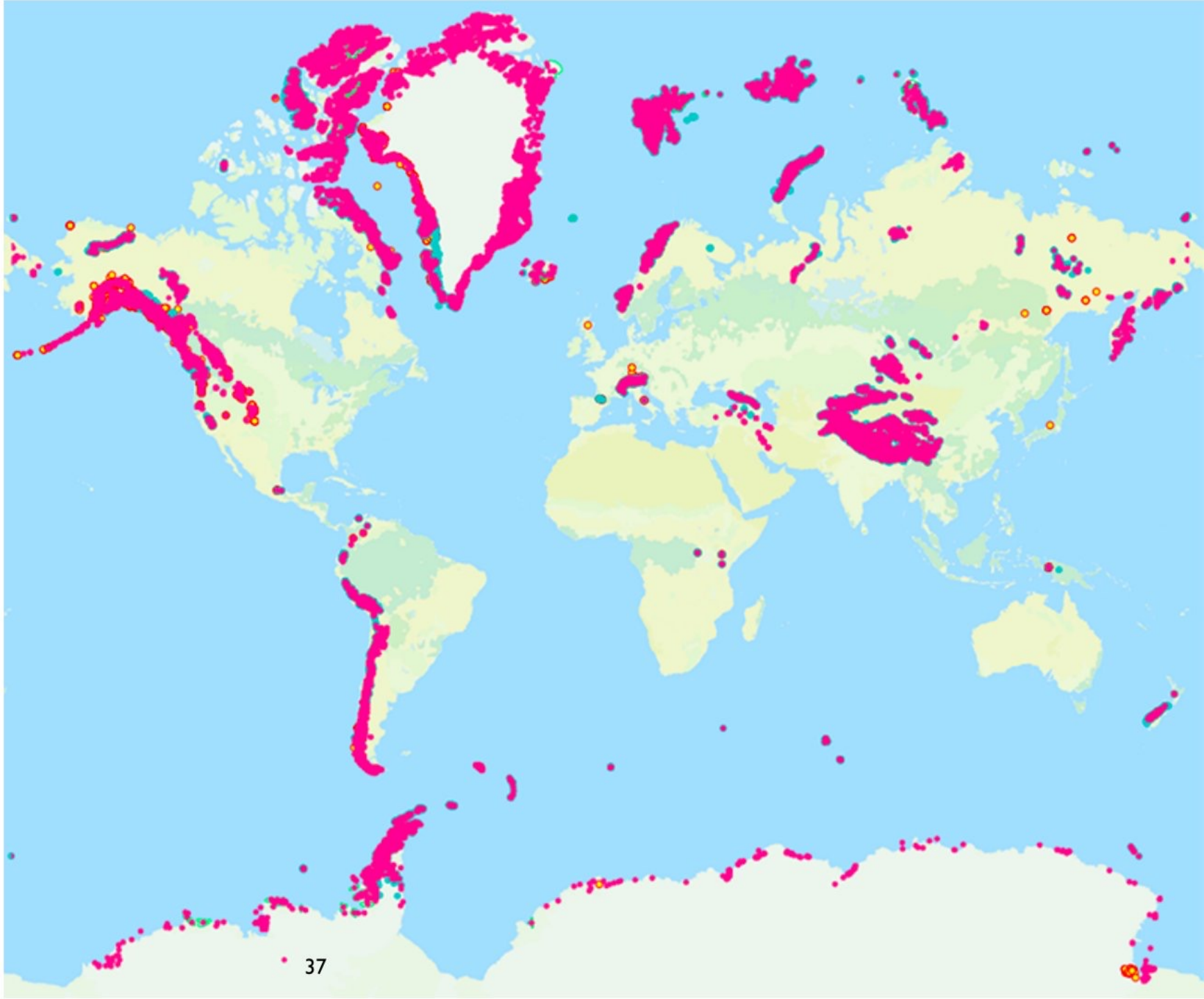




Signes d'un monde qui se réchauffe

Glaciers / calottes glaciaires

D’immenses masses de glace qui se déplacent lentement sur terre



https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/questions/located.html

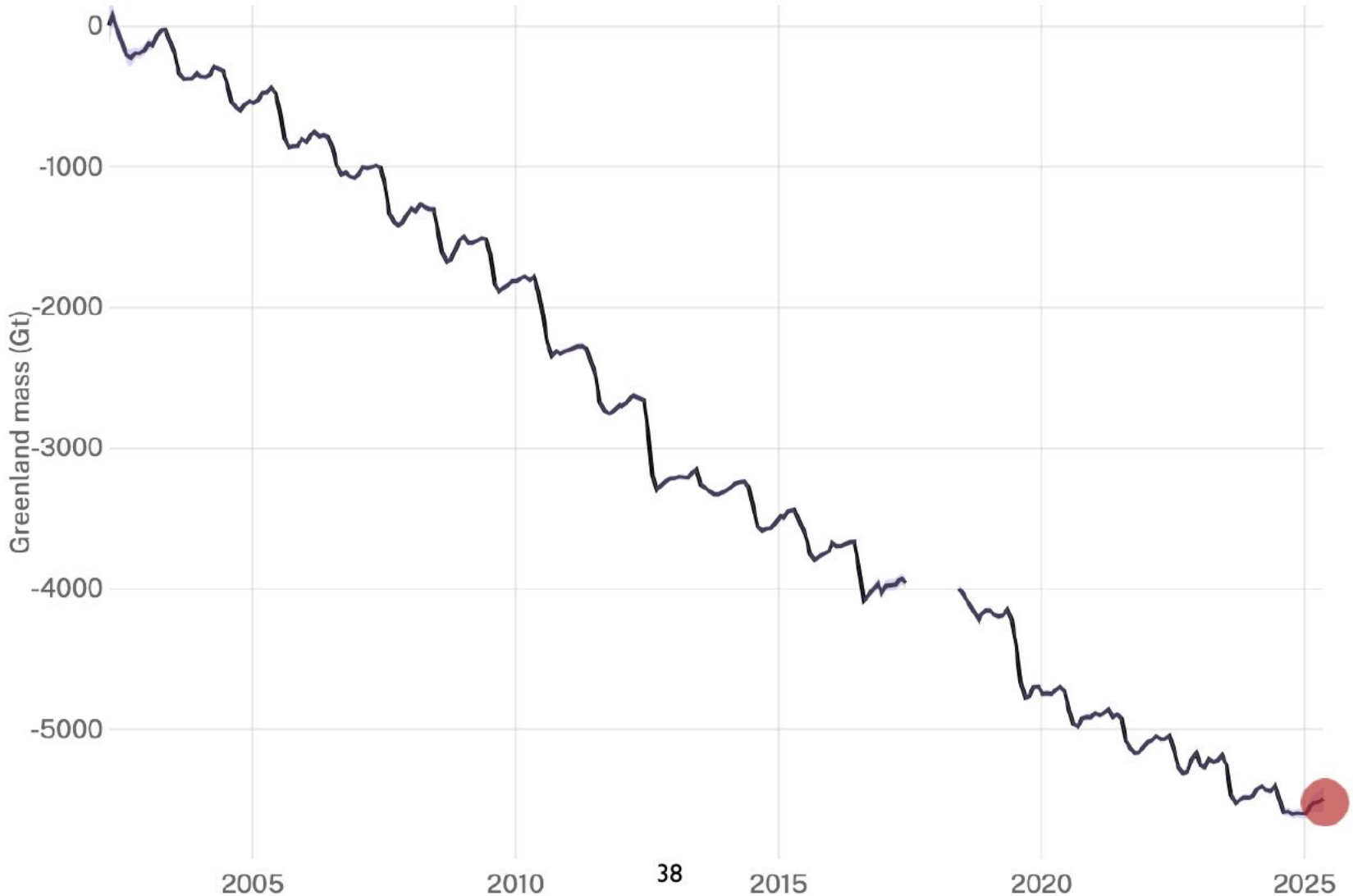
GREENLAND MASS VARIATION SINCE 2002

Data source: Ice mass measurement by NASA's GRACE satellites. **Gap represents time between missions.**
Credit: NASA

RATE OF CHANGE

↓264

billion metric tons per year since 2002

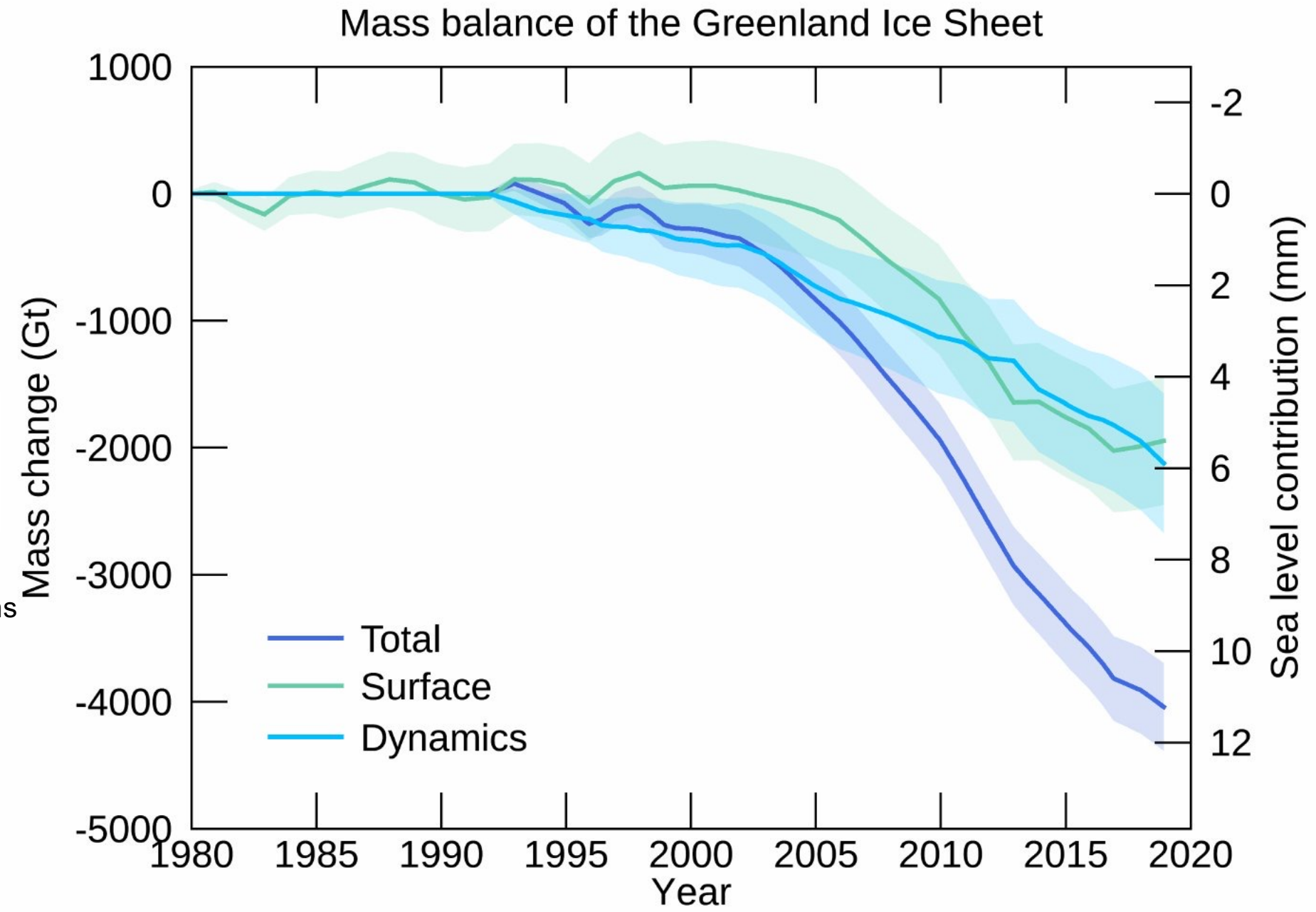


https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/

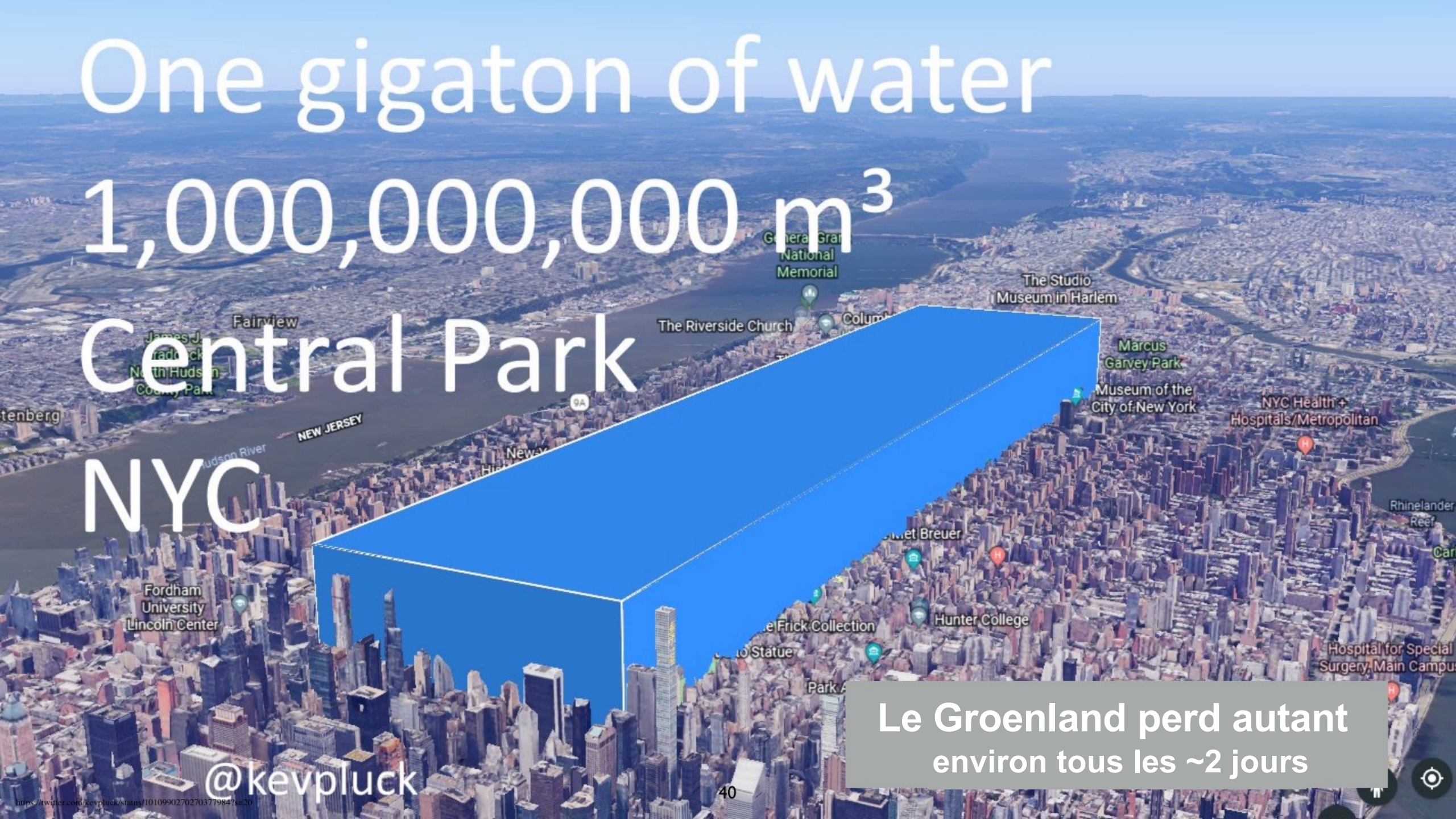
Calotte du Groenland

1 Gt =

- Masse de tous les mammifères terrestres (hors humains)
- 2X la masse de tous les humains sur Terre
- 5,5 millions de baleines bleues
- 3 millions de Boeing 747



https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gigatonne
https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/ice-sheets
https://www.nature.com/articles/s41586-019-1855-2.pdf


One gigaton of water
1,000,000,000 m³
Central Park
NYC
@kevpluck
Le Groenland perd autant
environ tous les ~2 jours
https://twitter.com/kevpluck/status/1010990270270377984?s=20

Glacier McCarty, Alaska





http://www.windows2universe.org/teacher_resources/teach_glacier.html

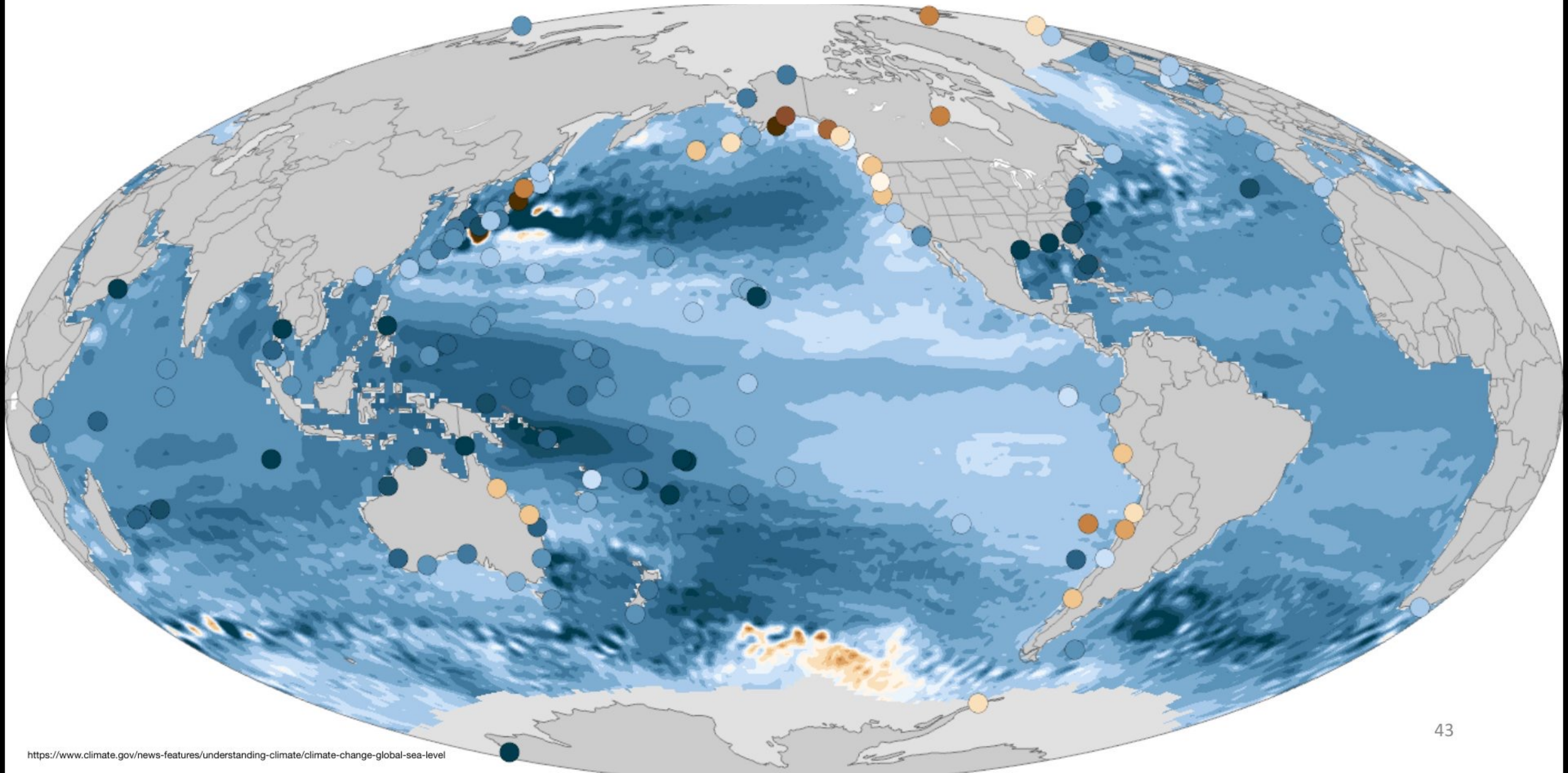
Glacier Blomstrandbreen
Svalbard, Norvège



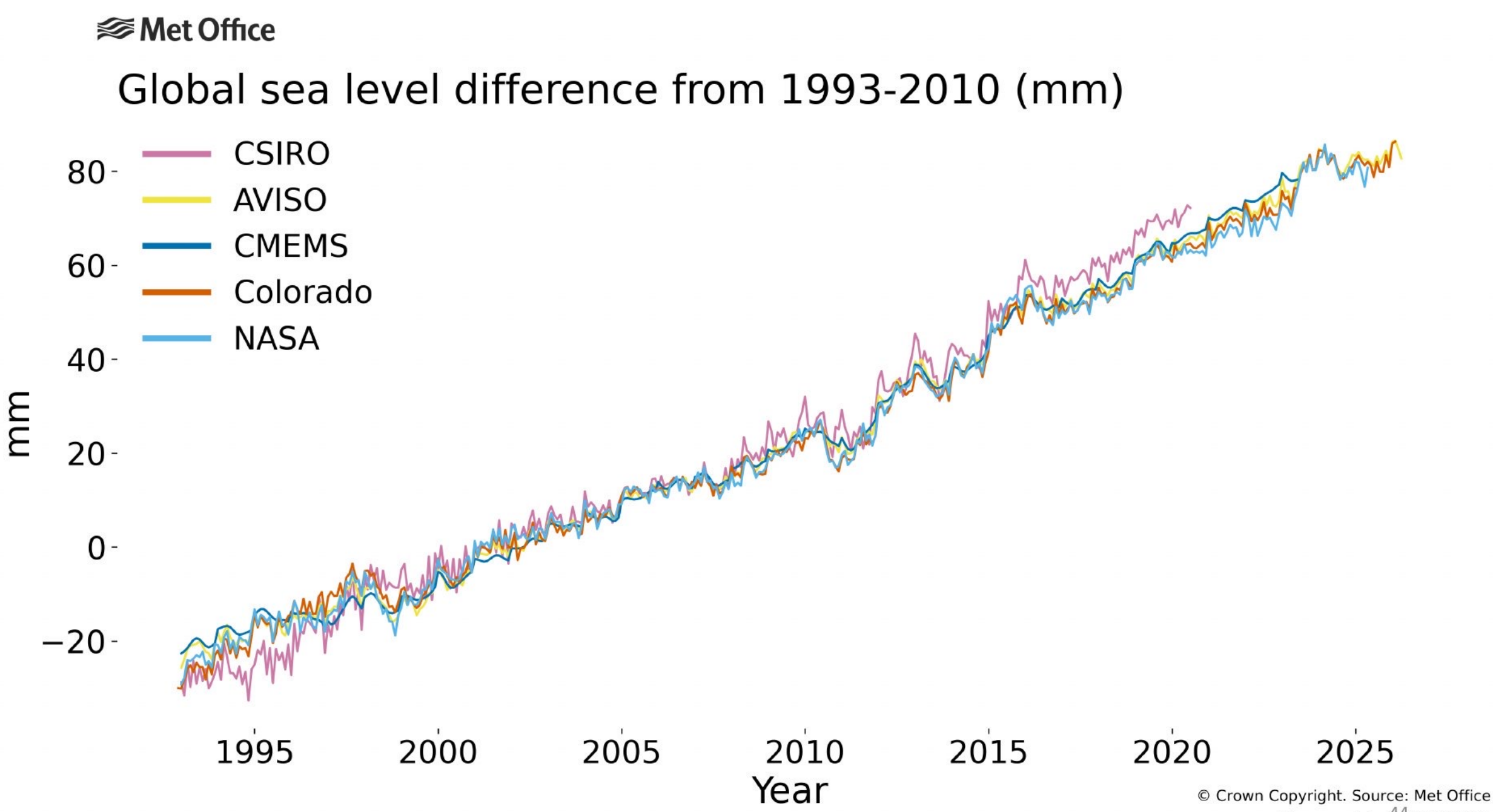


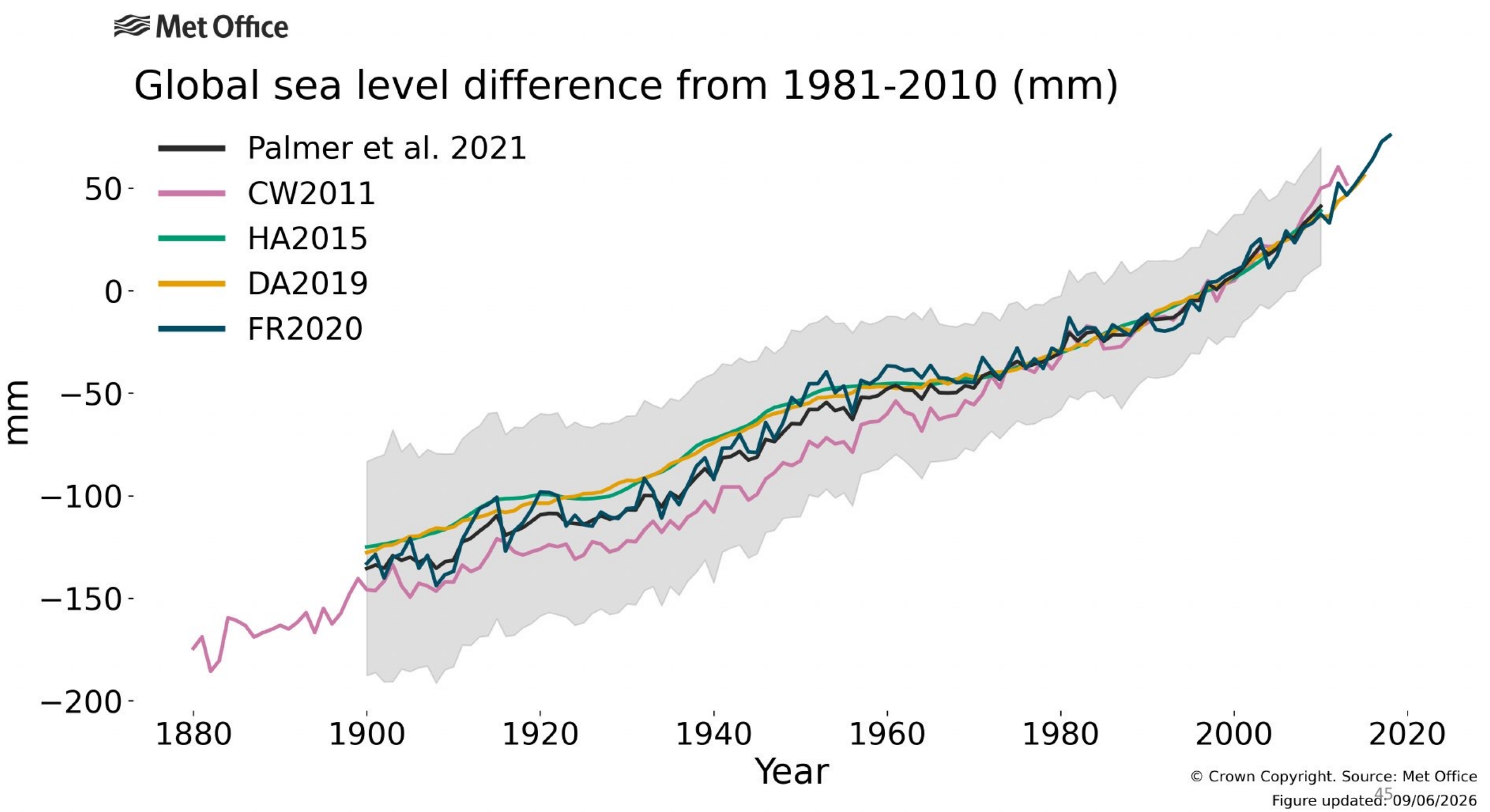
https://www.theguardian.com/environment/2024/nov/05/people-do-not-want-to-believe-it-is-true-the-photographer-capturing-the-vanishing-of-glaciers

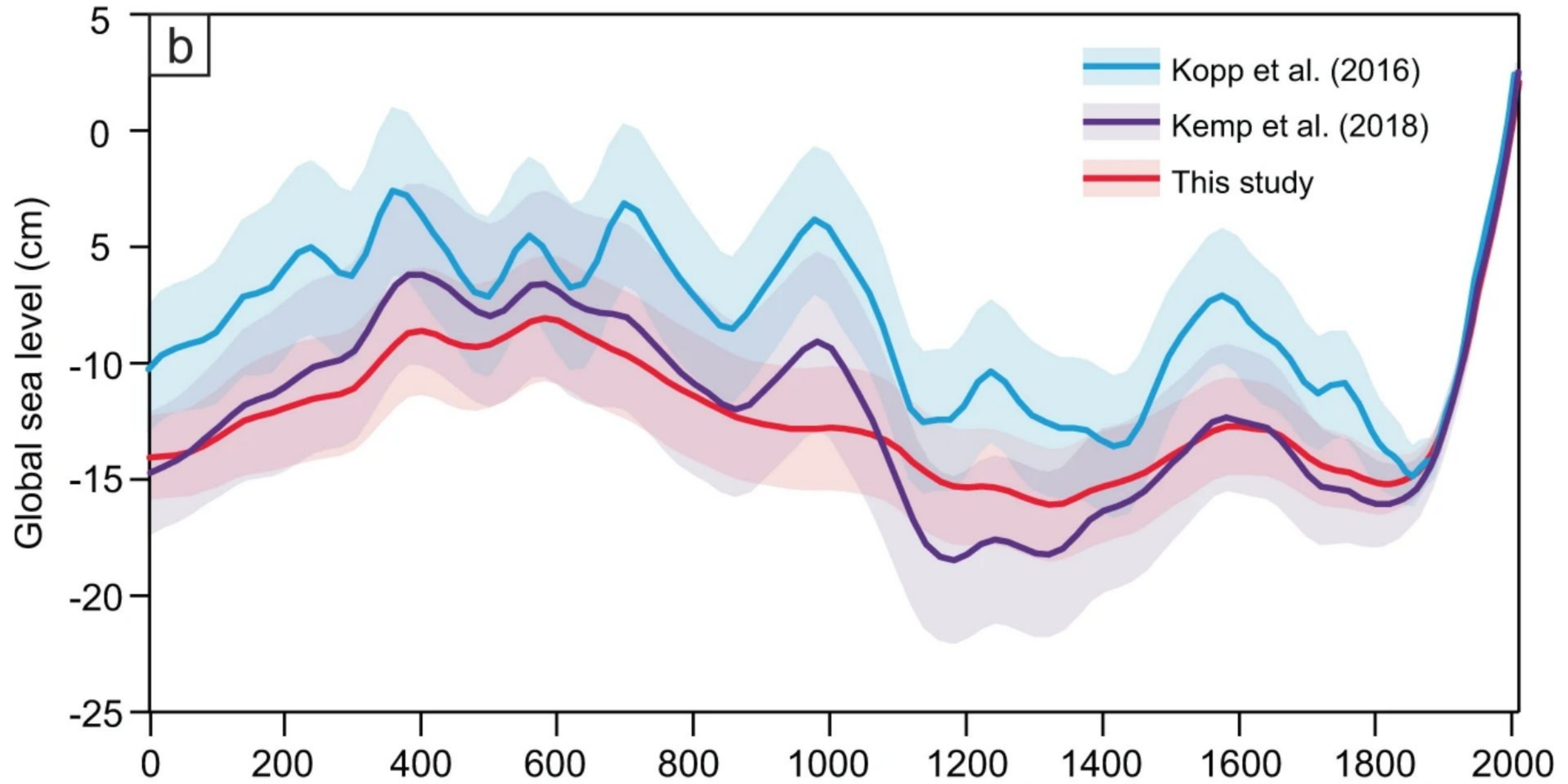
Variation du niveau de la mer (cm, 1993-2023)



https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level


Met Office
Global sea level difference from 1993-2010 (mm)
CSIRO
AVISO
CMEMS
Colorado
NASA
80
60
40
20
0
−20
mm
1995
2000
2005
2010
2015
2020
2025
Year
© Crown Copyright. Source: Met Office
Figure updated: 09/06/2026

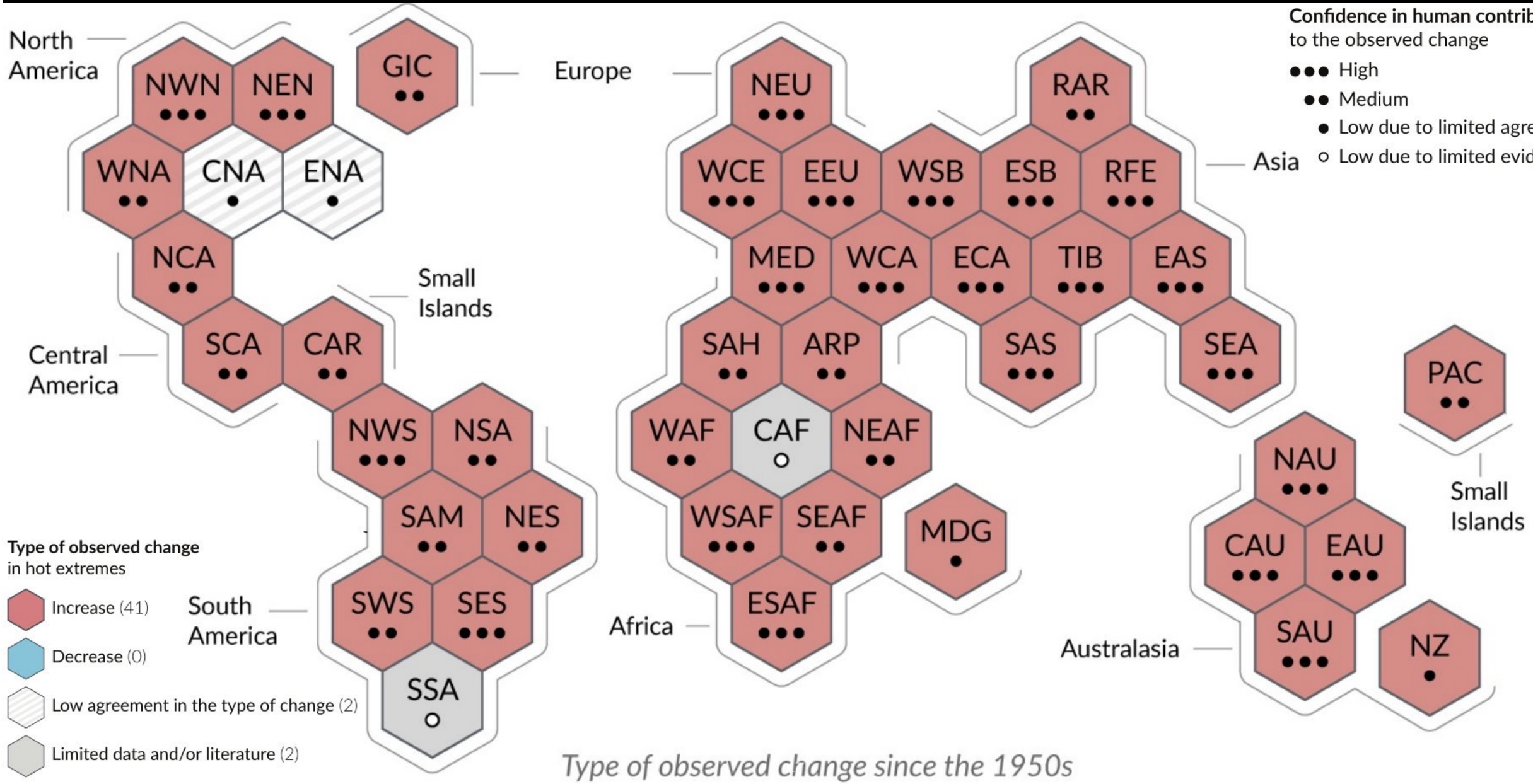

Met Office
Global sea level difference from 1981-2010 (mm)
Palmer et al. 2021
CW2011
HA2015
DA2019
FR2020
50
0
−50
−100
−150
−200
mm
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000
2020
Year
© Crown Copyright. Source: Met Office
Figure updated: 09/06/2026



le plus élevé depuis 2000 ans

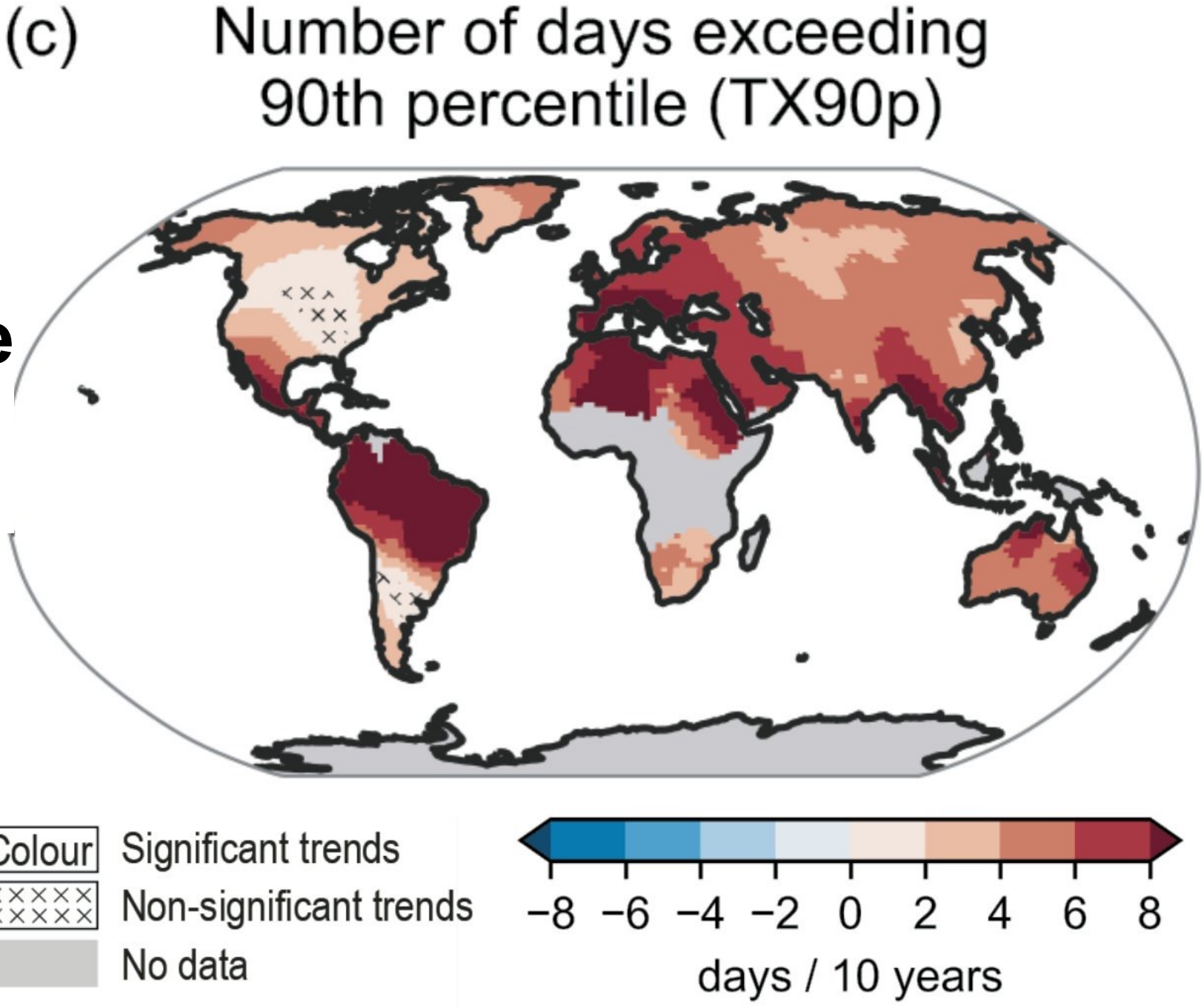
https://www.nature.com/articles/s41467-021-22079-2/

Les vagues de chaleur augmentent presque partout



Type of observed change since the 1950s

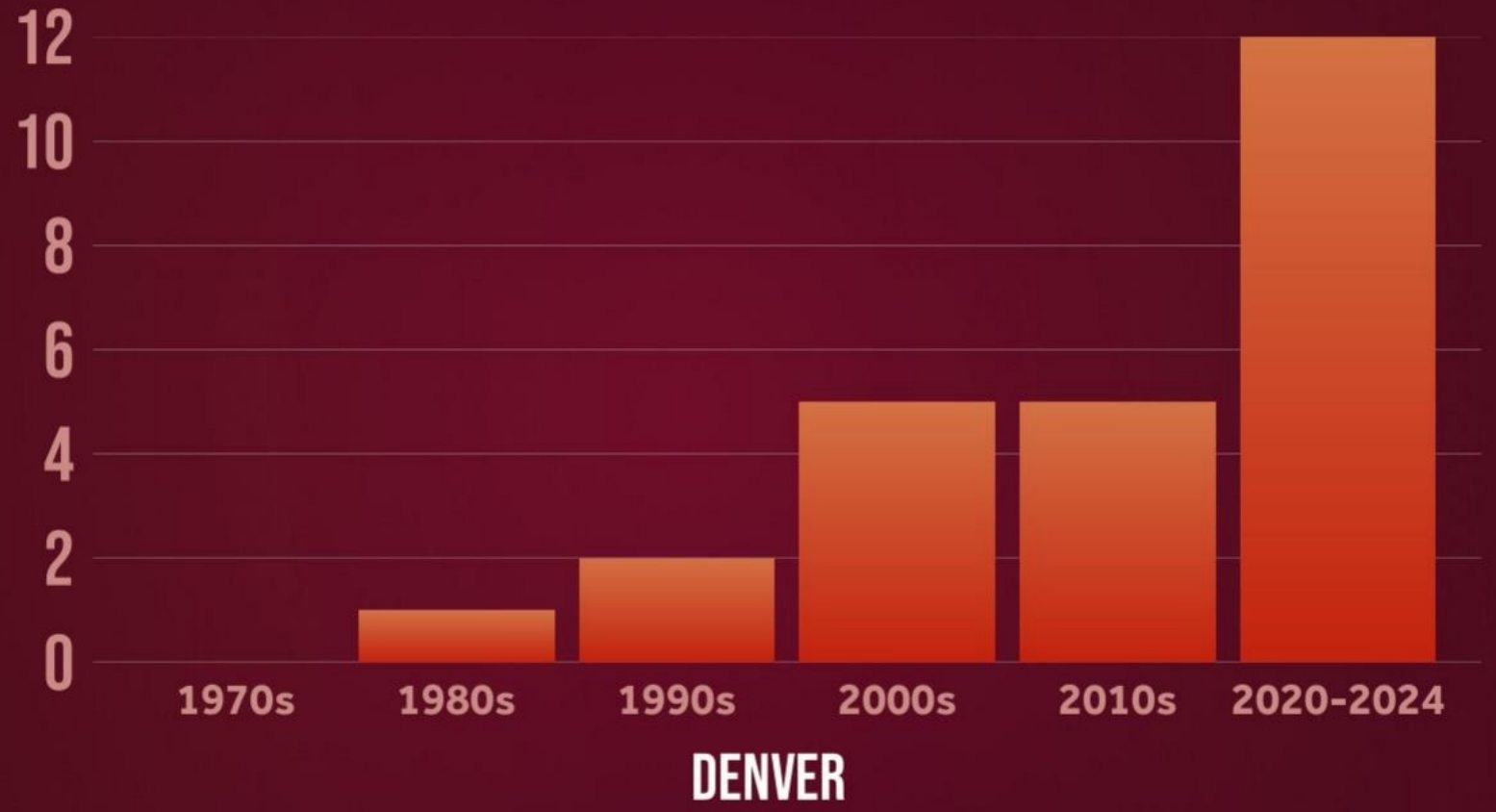
Tendance, jours de chaleur extrême (1960-2018)



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/

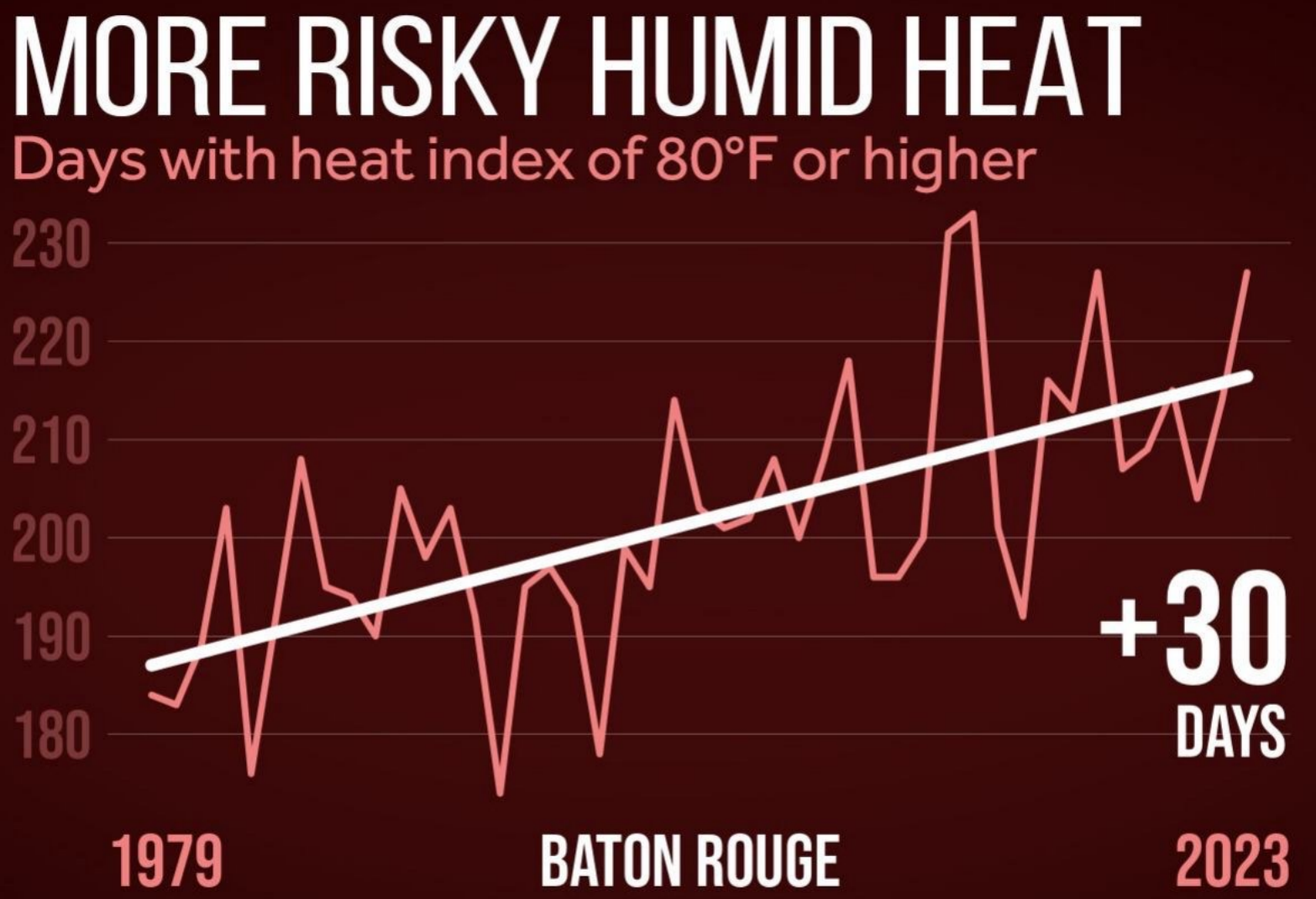
CLIMATE CHANGE-FUELED EXTREME HEAT

Average annual extremely hot summer days made at least 2x more likely by climate change

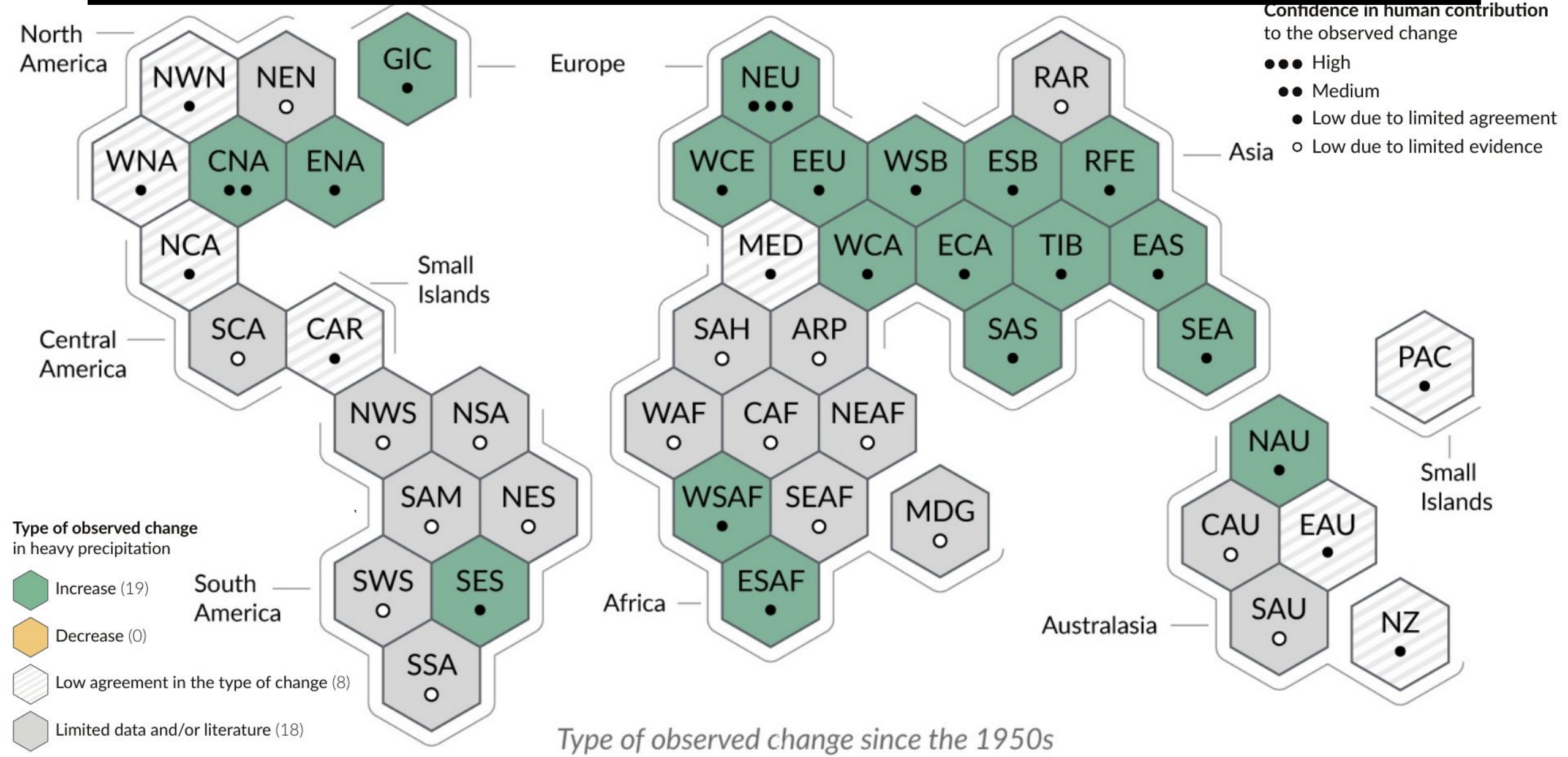


Average annual summer (June-August) days with maximum temperatures at or above 96.1°F (local 95th percentile) and a Climate Shift Index level of 2 or higher.
Source: ERA5 and Climate Central's Climate Shift Index system.

CLIMATE CENTRAL


MORE RISKY HUMID HEAT
Days with heat index of 80°F or higher
230
220
210
200
190
180
+30
DAYS
1979
BATON ROUGE
2023
Annual count of days with a heat index of 80°F or higher.
Source: gridMET
CLIMATE CENTRAL

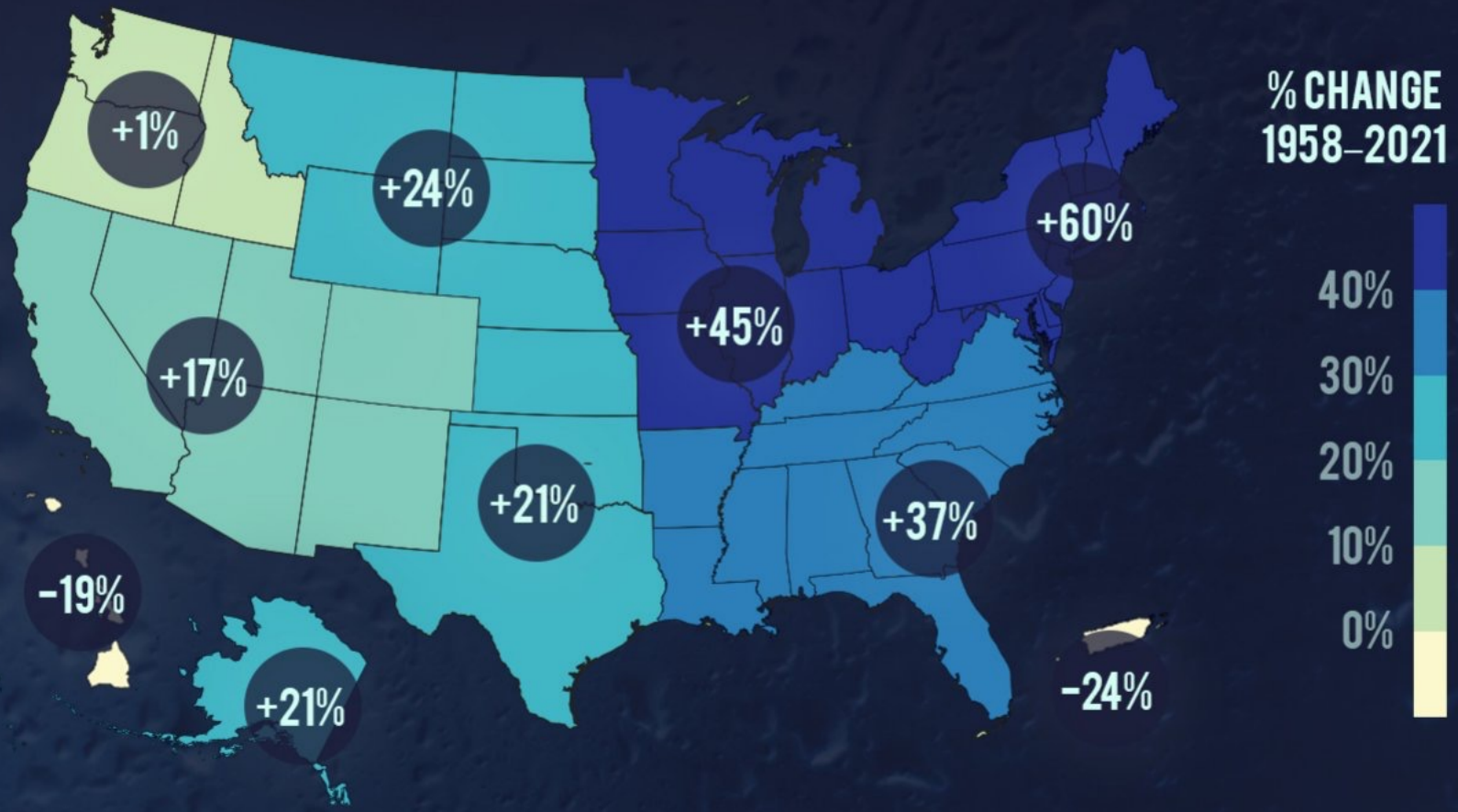
Tempêtes plus intenses dans certaines régions



Type of observed change since the 1950s

HEAVIER DOWNPOURS

Change in precipitation on heaviest 1% of days



Change in total precipitation falling on the heaviest 1% of days, 1958–2021.
Source: USGCRP, 2023: Fifth National Climate Assessment.

CLIMATE CENTRAL

Comment savons-nous que les changements observés viennent des activités humaines ?

Détection : COMMENT les choses ont-elles changé ?
Ex. : fait-il plus chaud ?

Attribution : POURQUOI les choses ont-elles changé ?
Ex. : fait-il plus chaud à cause des émissions anthropiques de gaz à effet de serre ?

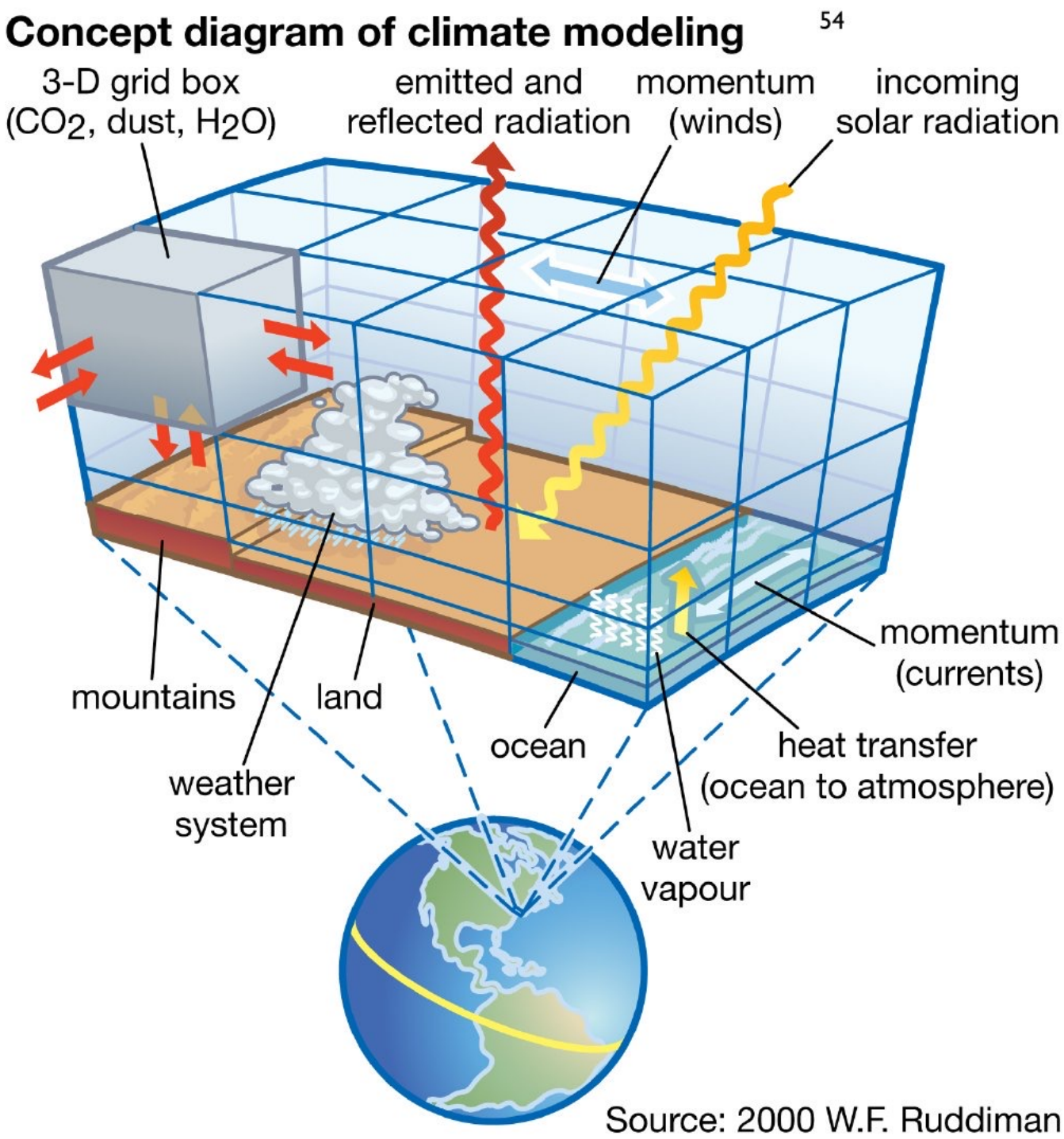
Modèles climatiques

programmes informatiques qui simulent l'état du système climatique à partir de forçages imposés (volcans, GES, variabilité solaire, etc.)

Outils importants pour l'attribution et l'étude du climat futur

la classe de modèles climatiques la plus courante est le modèle de circulation générale (MCG)

https://www.nature.com/articles/s41612-025-00955-8



Hotter

What's Really Warming the World?

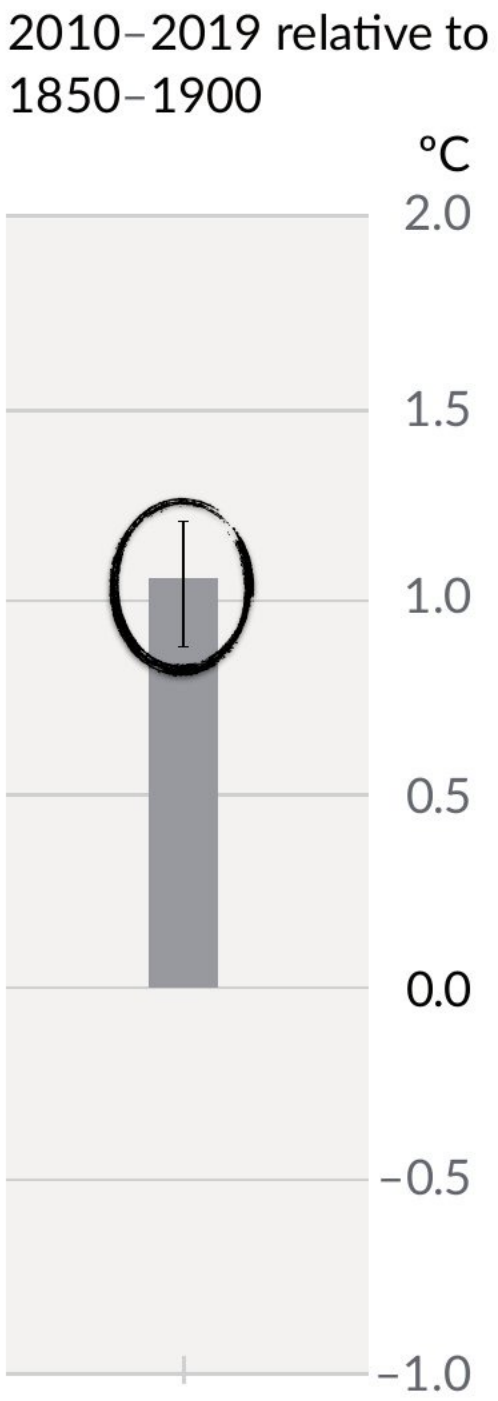
Skeptics of manmade climate change offer various natural causes to explain why the Earth has warmed 1.4 degrees Fahrenheit since 1880. But can these account for the planet's rising temperature? Watch to see how much different factors, both natural and industrial, contribute to global warming, based on findings from NASA's Goddard Institute for Space Studies.

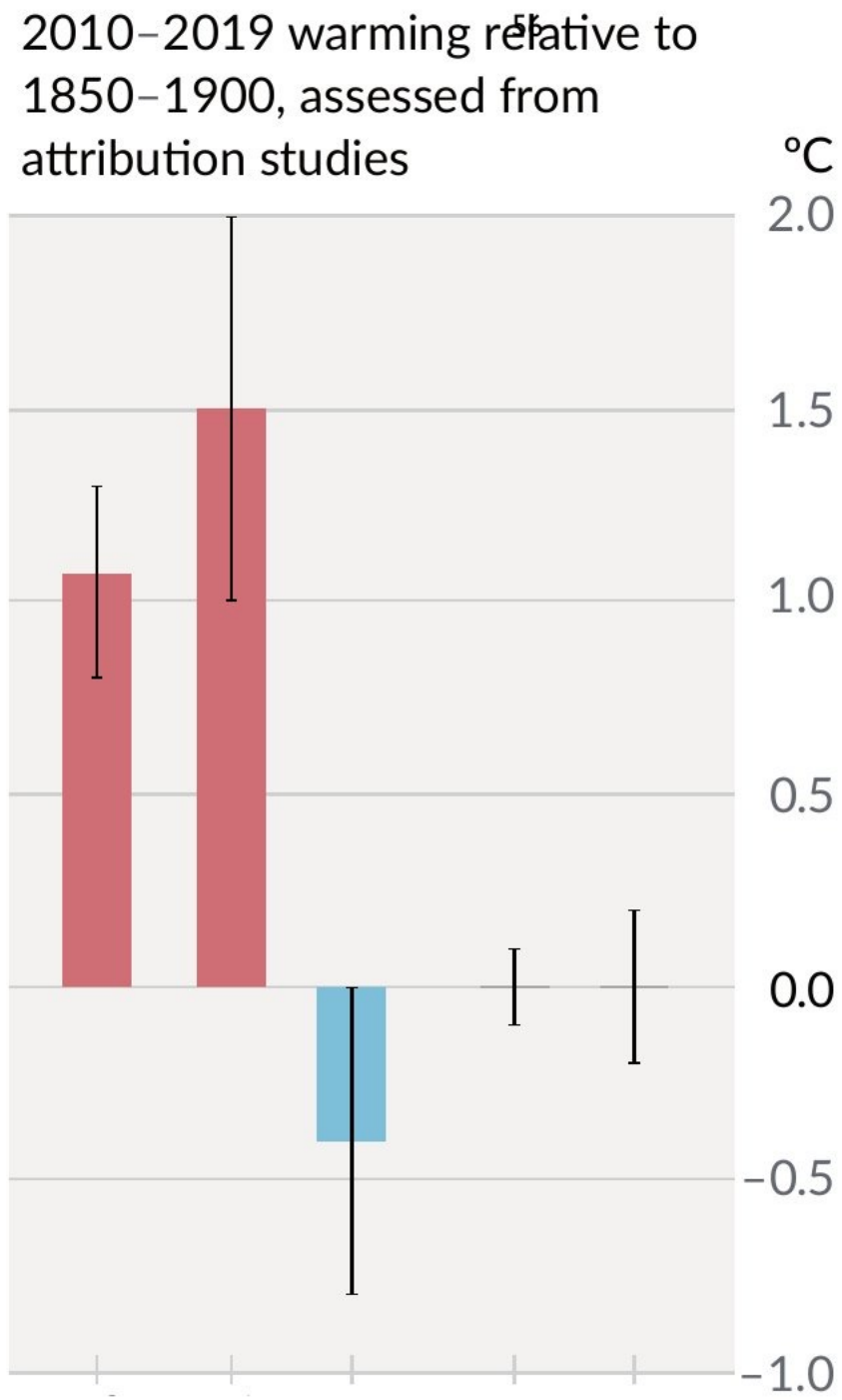


Colder

Based on an interactive by Bloomberg

En 2019, la planète s'était réchauffée de ~1,1 °C depuis 1850-1900

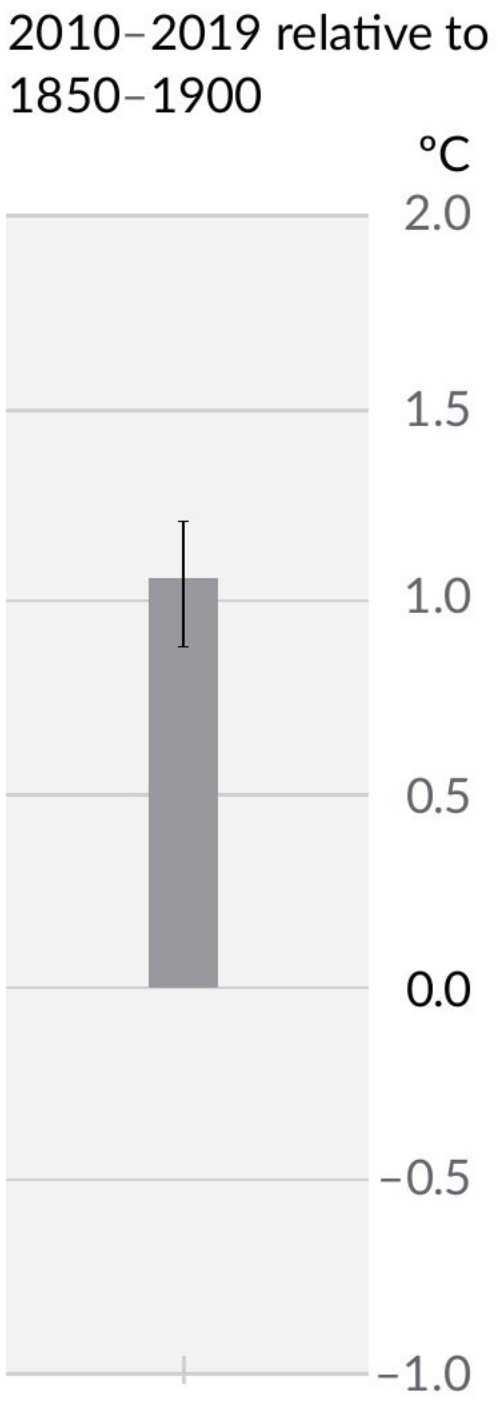


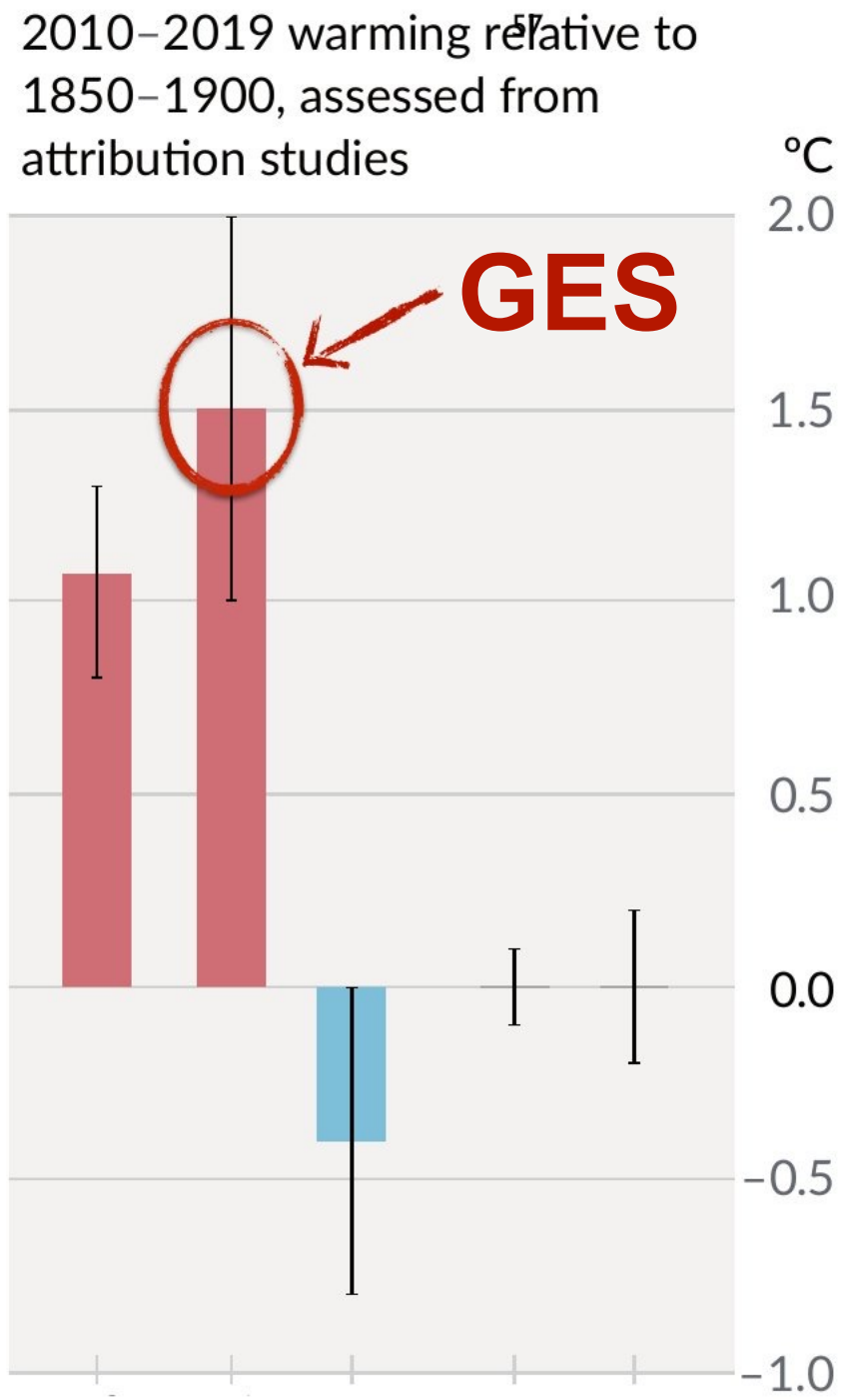


https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

Les GES humains
à eux seuls
auraient
réchauffé
la planète de

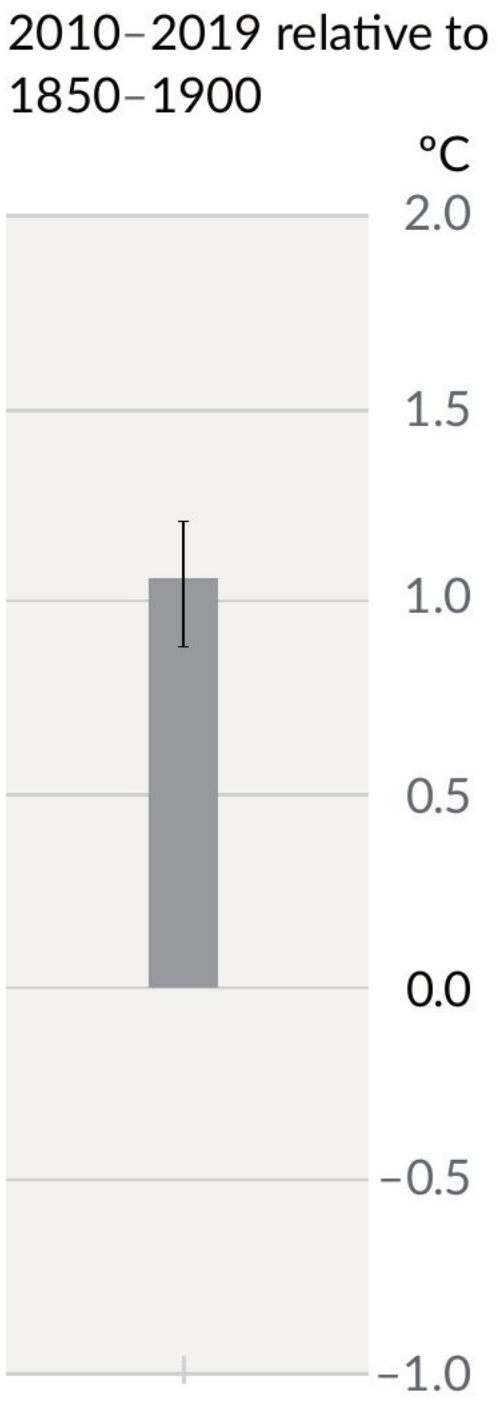
1.5°

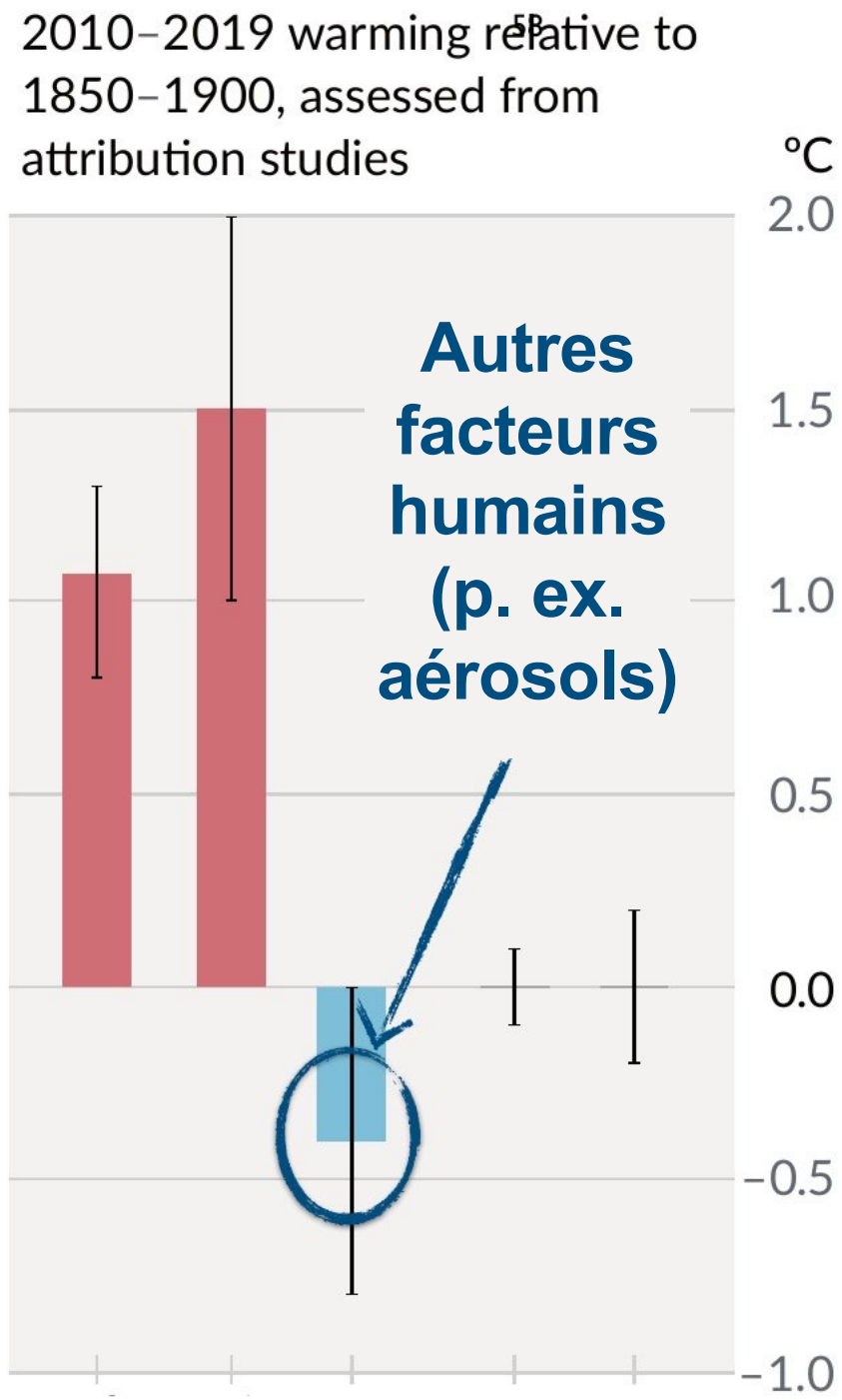




https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

Mais d'autres facteurs humains (aérosols, changement d'usage des sols) ont compensé une partie de ce réchauffement

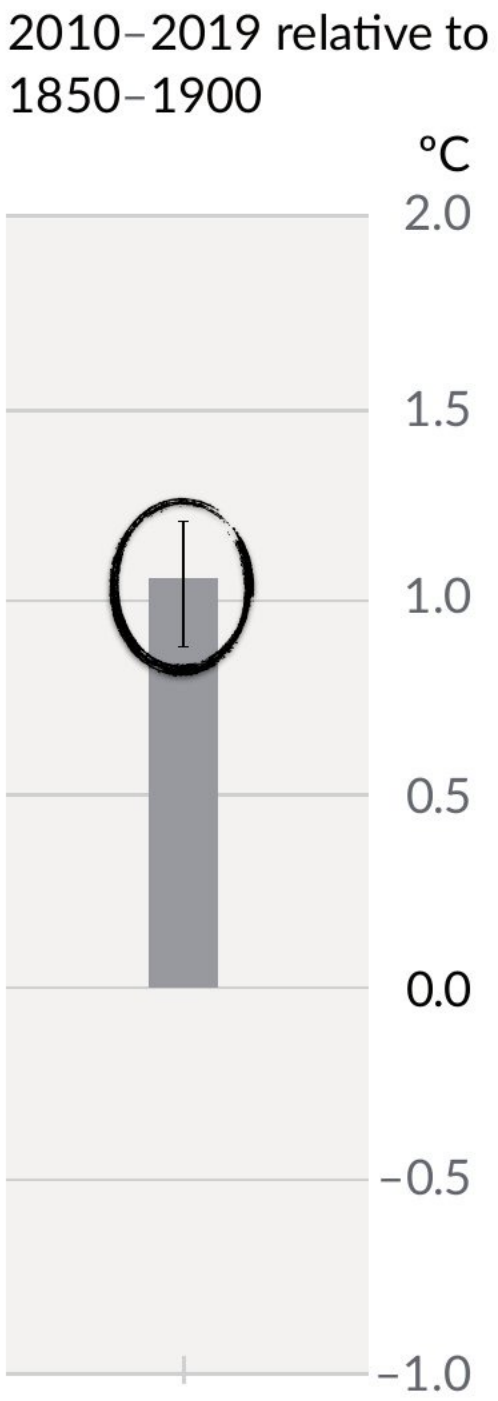


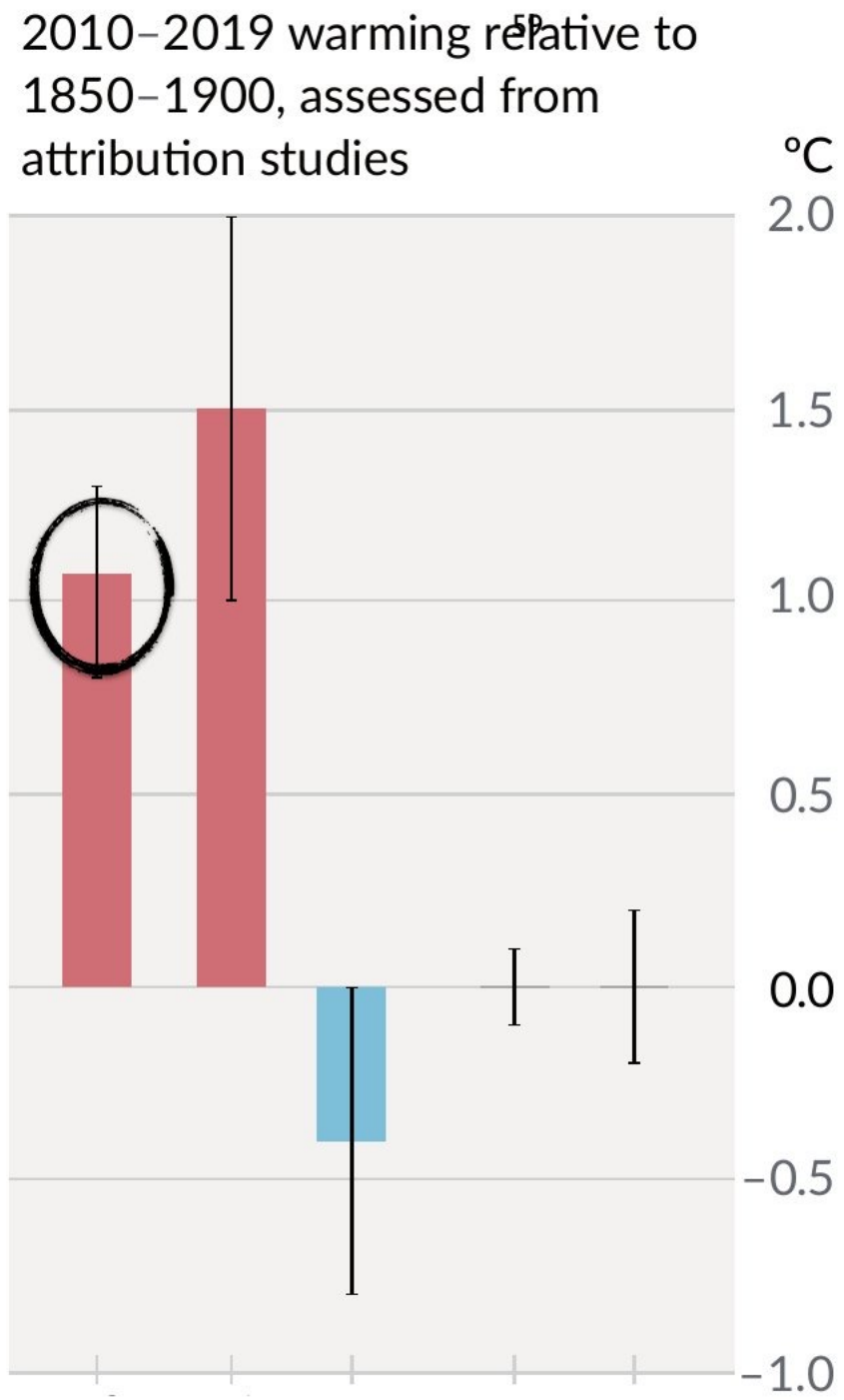


https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

Au total,
l'ensemble des
forçages humains
a réchauffé la

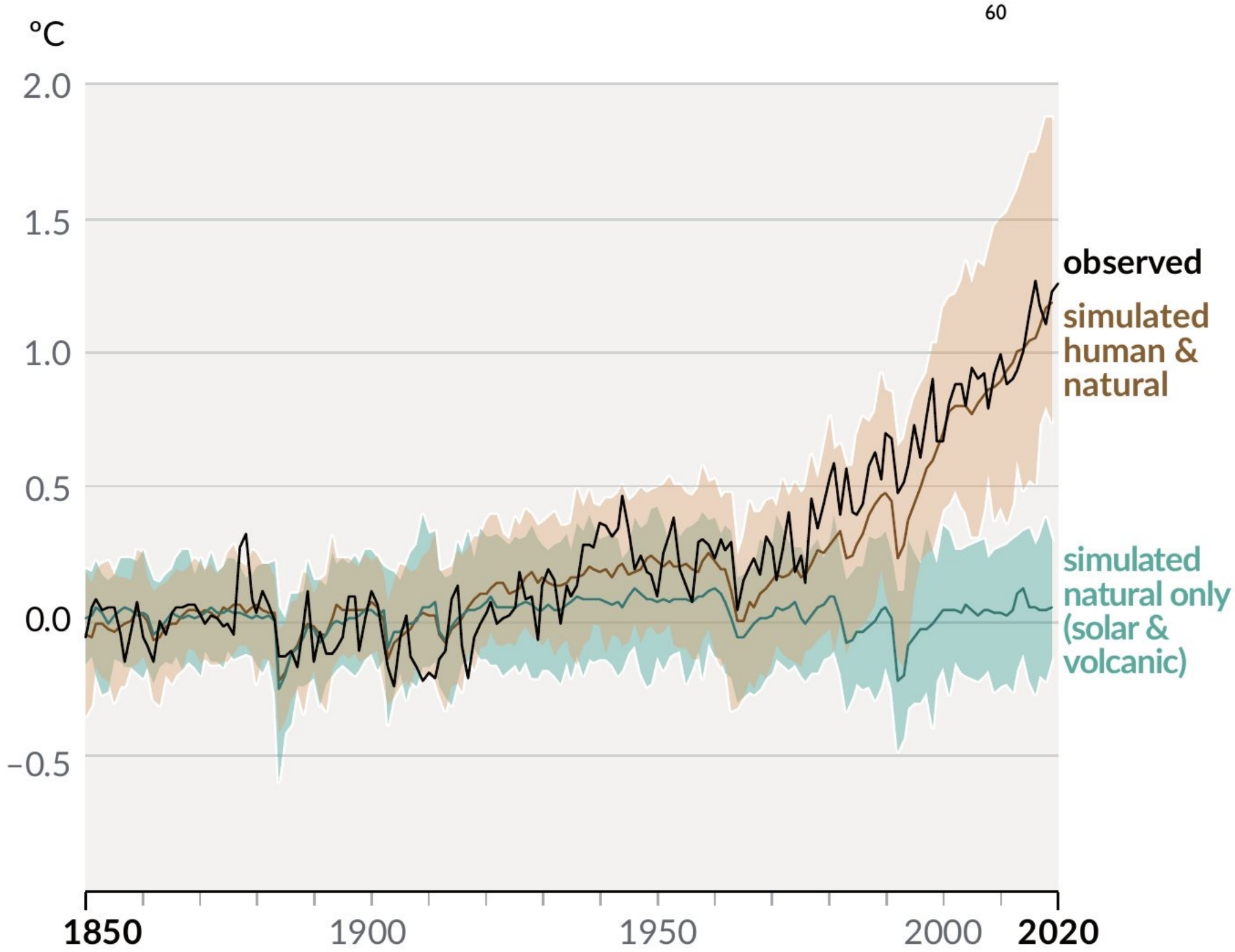
planète de 1,1°C





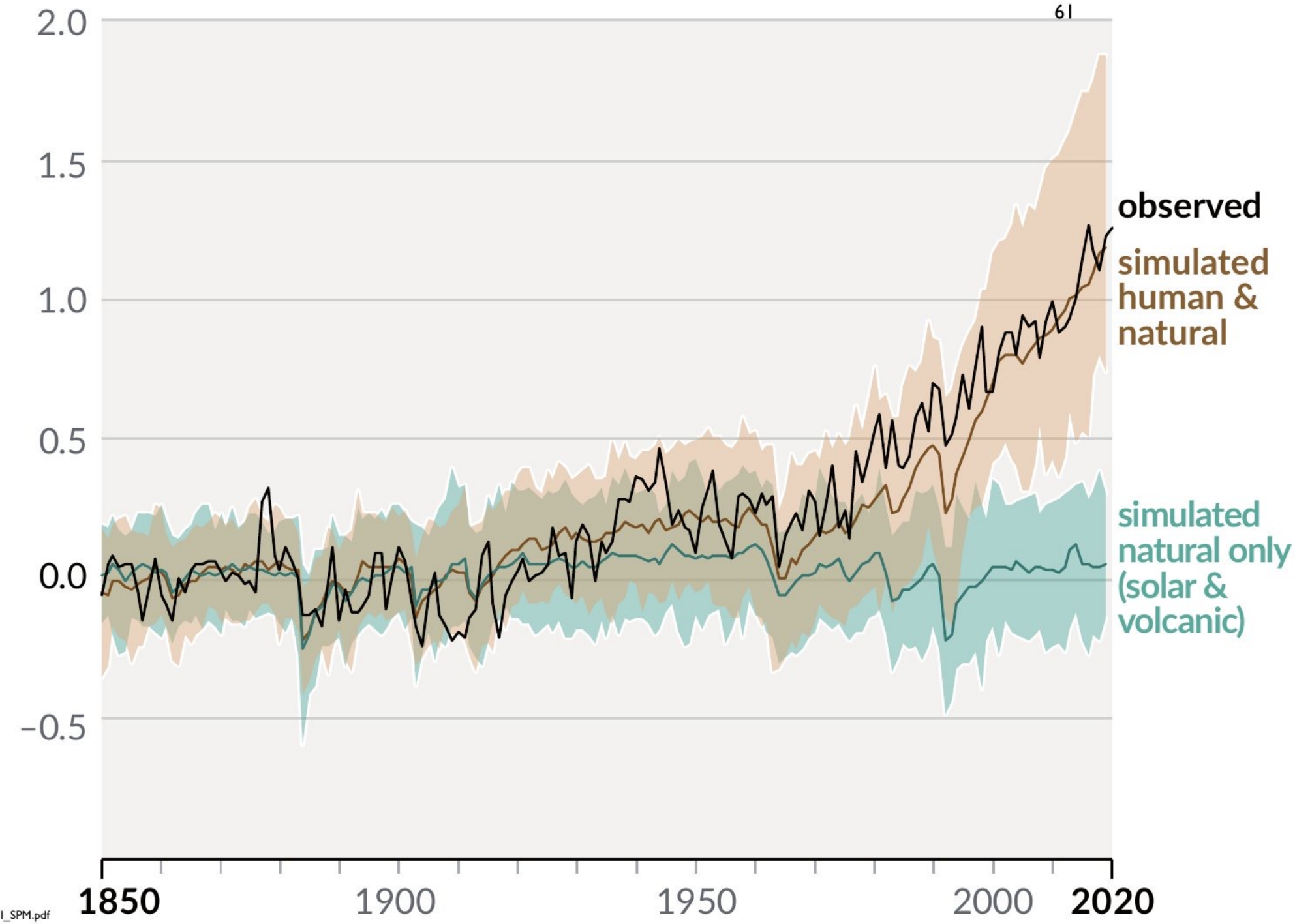
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

SEULS les modèles qui incluent les facteurs humains peuvent reproduire à peu près le réchauffement observé



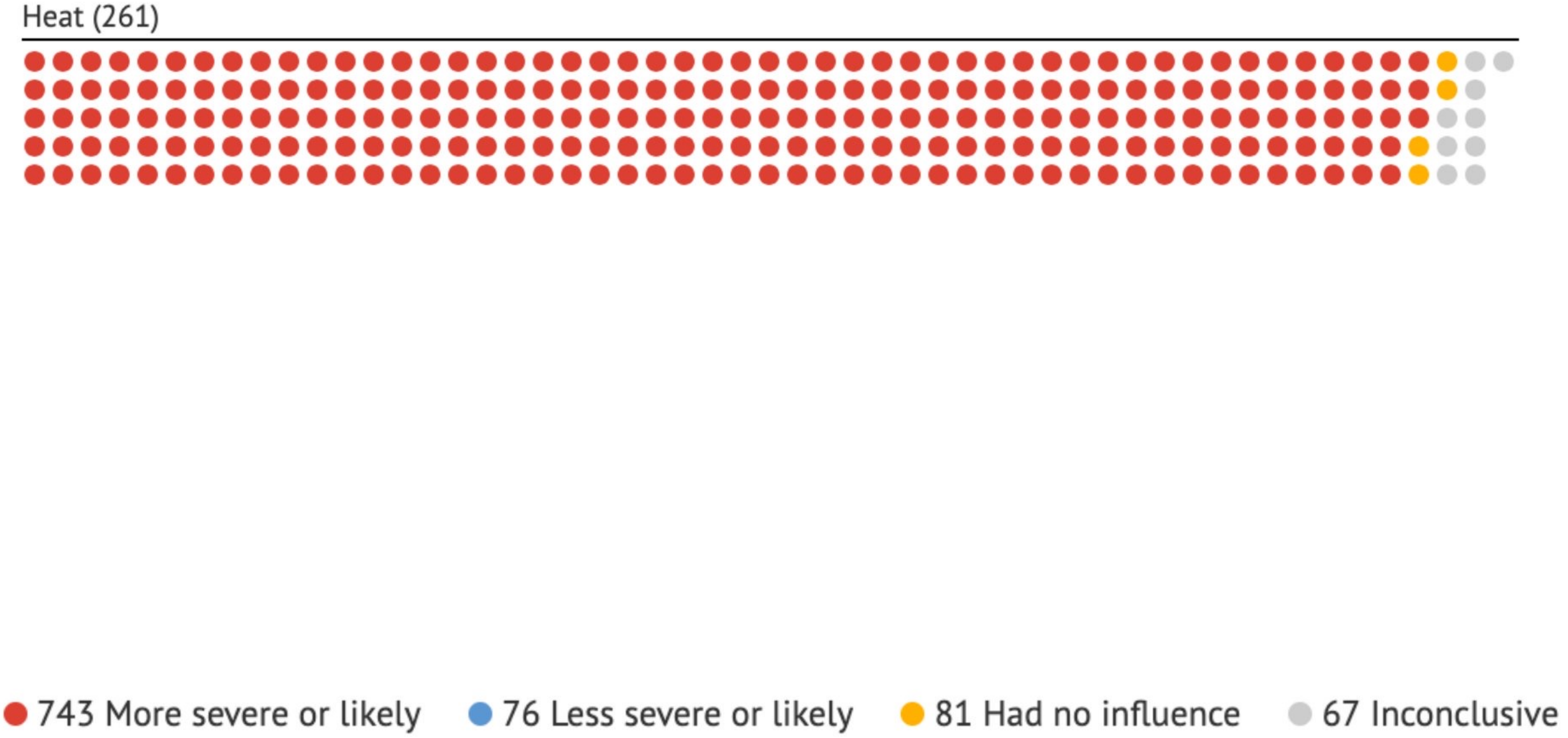
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

SEULS les modèles qui incluent les facteurs humains peuvent reproduire à peu près le réchauffement observé



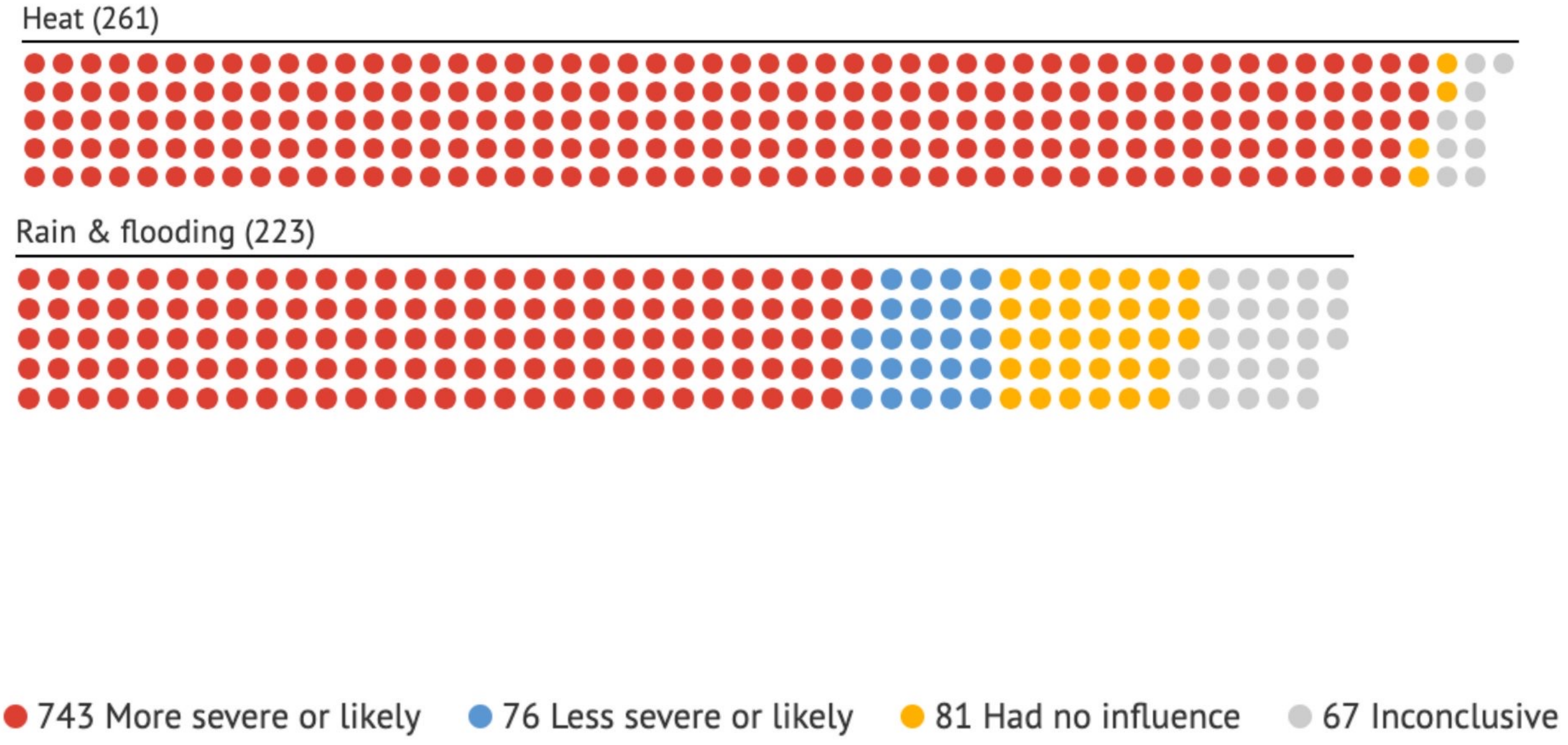
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

Le changement climatique augmente déjà la gravité et le risque de nombreux phénomènes extrêmes



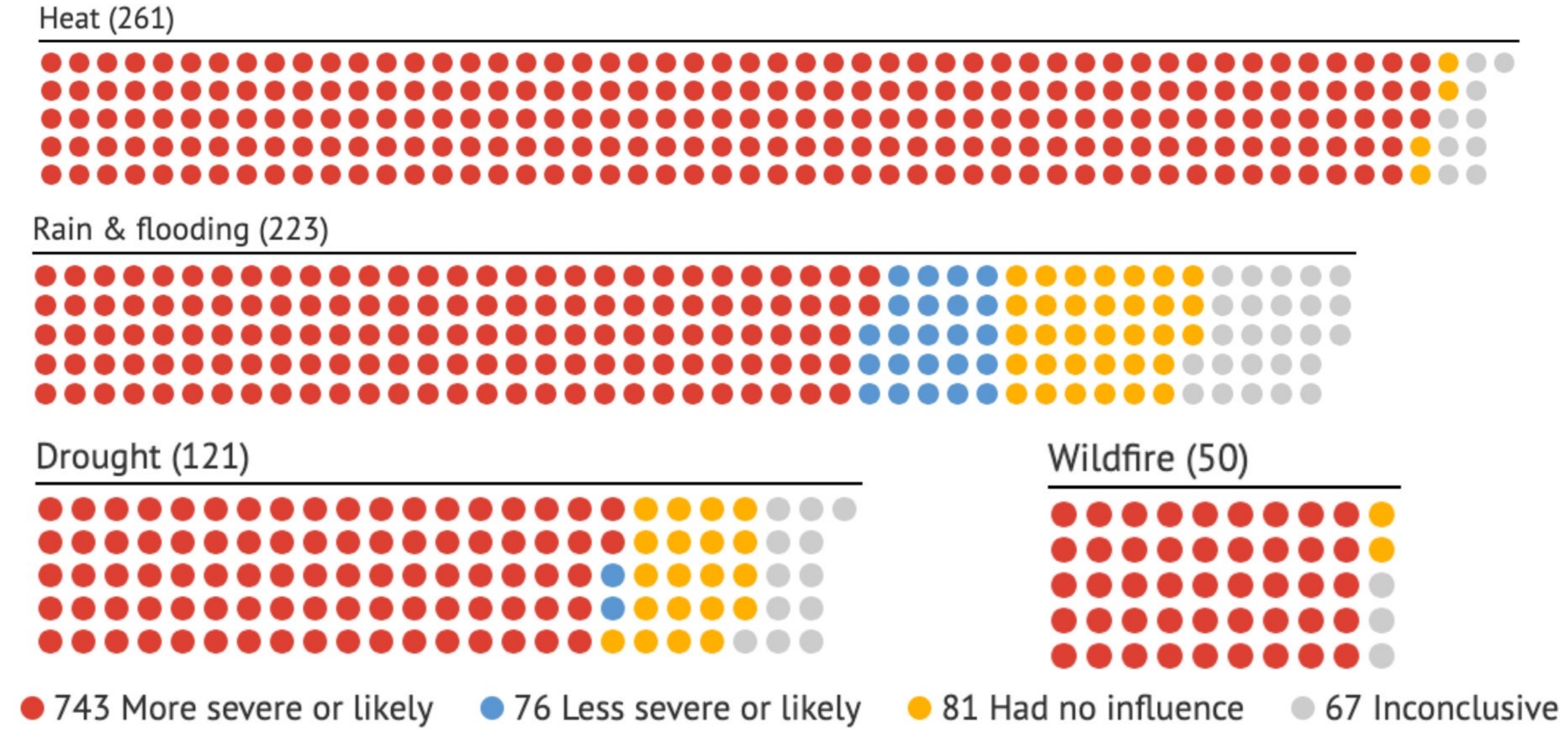
https://interactive.carbonbrief.org/attribution-studies/index.html

Le changement climatique augmente déjà la gravité et le risque de nombreux phénomènes extrêmes



https://interactive.carbonbrief.org/attribution-studies/index.html

Le changement climatique augmente déjà la gravité et le risque de nombreux phénomènes extrêmes



https://interactive.carbonbrief.org/attribution-studies/index.html

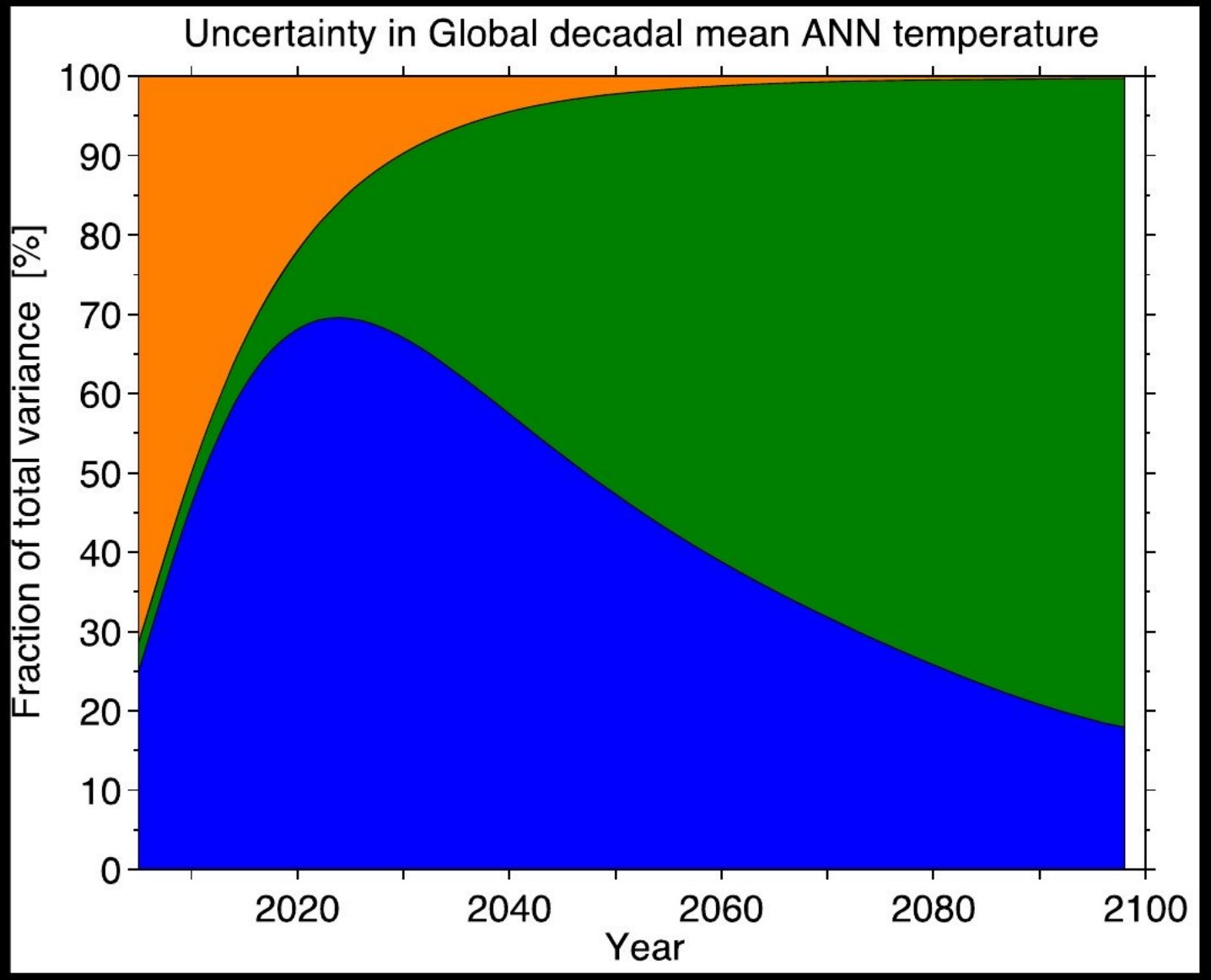
À quoi ressemblera l’avenir ?

Les modèles climatiques

sont notre principal outil
Nombreuses sources

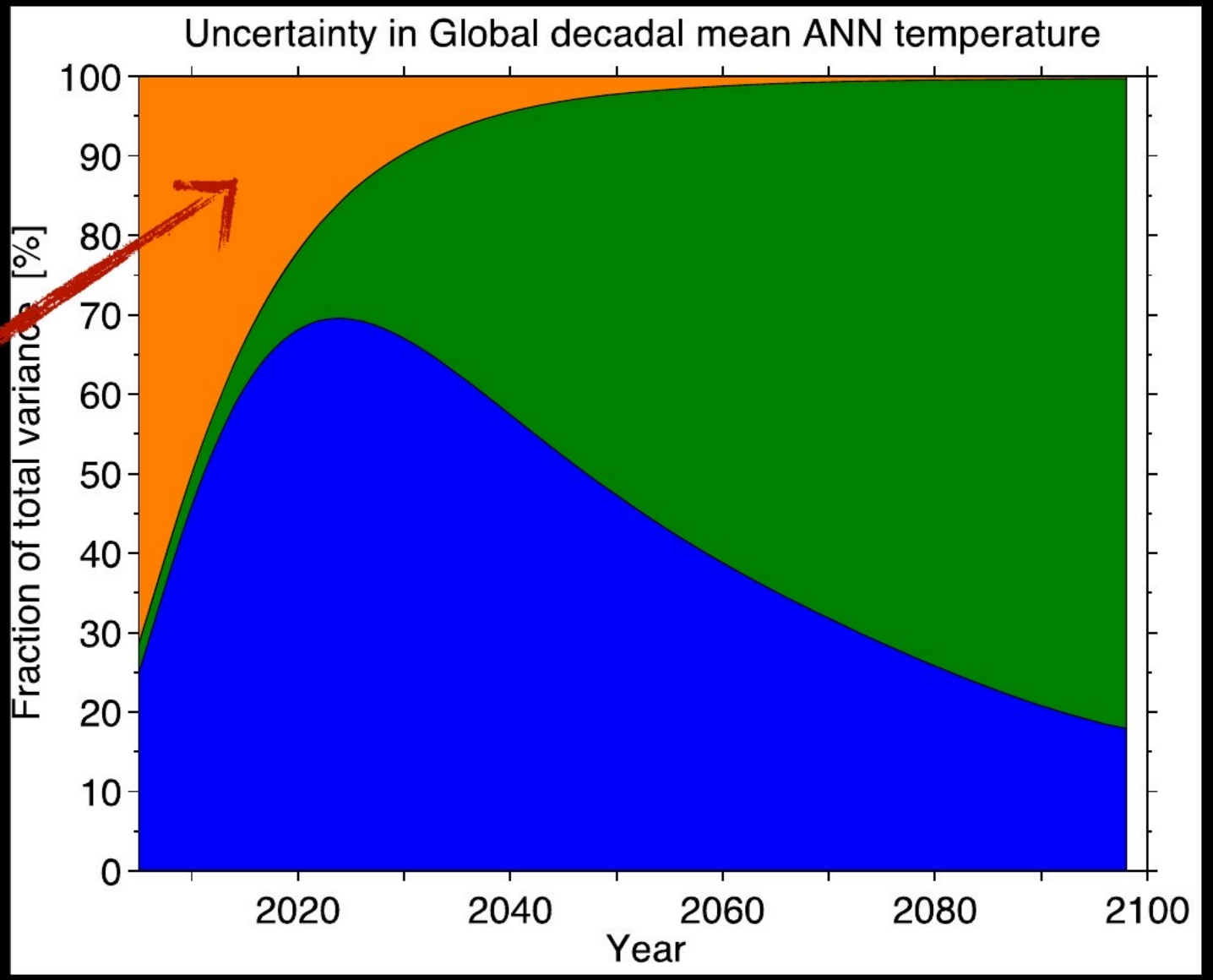
d’incertitude
L’incertitude ne veut

PAS dire que nous
ne savons rien



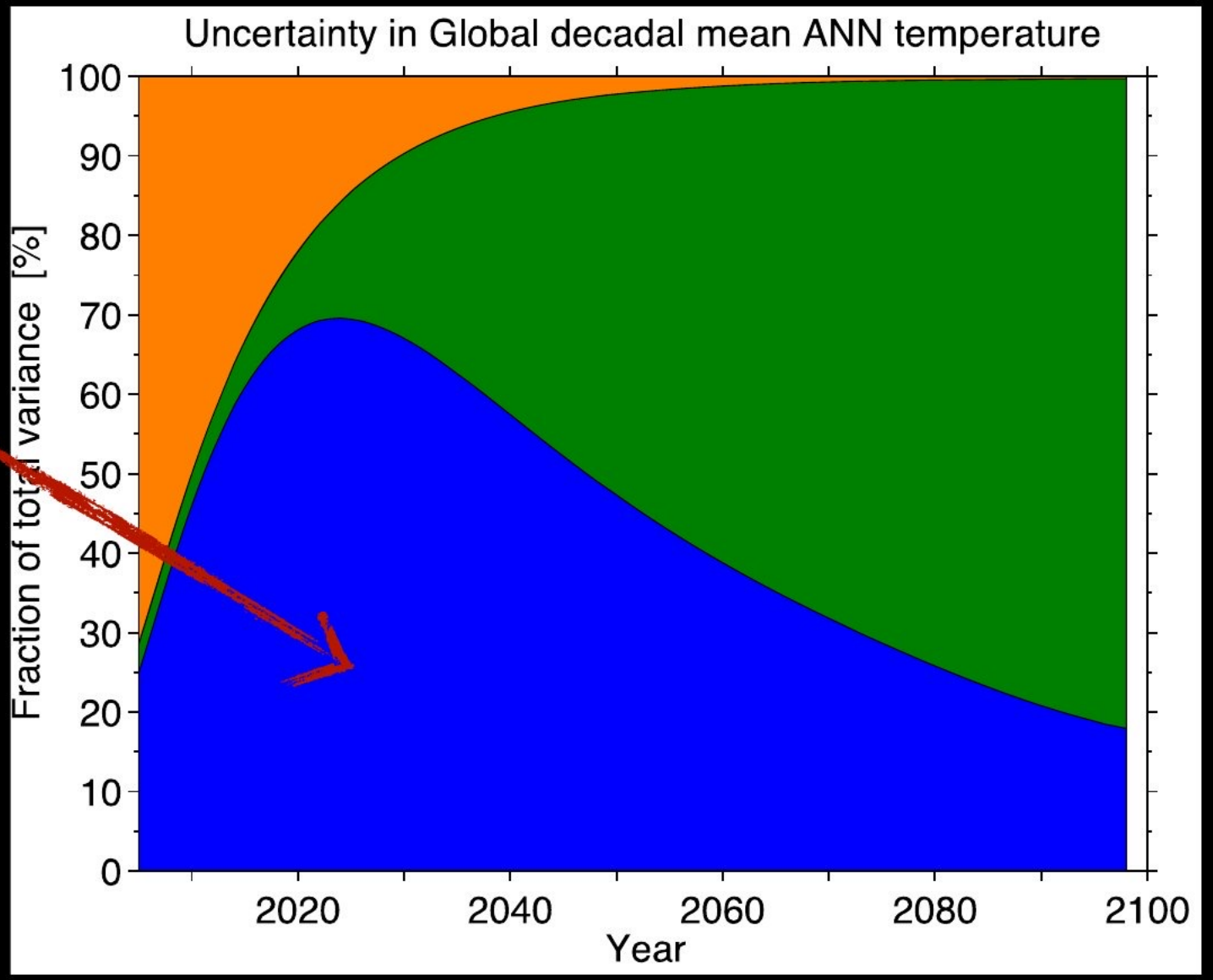
Les principales incertitudes évoluent dans le temps

Variations naturelles de la météo et du climat (variabilité interne)



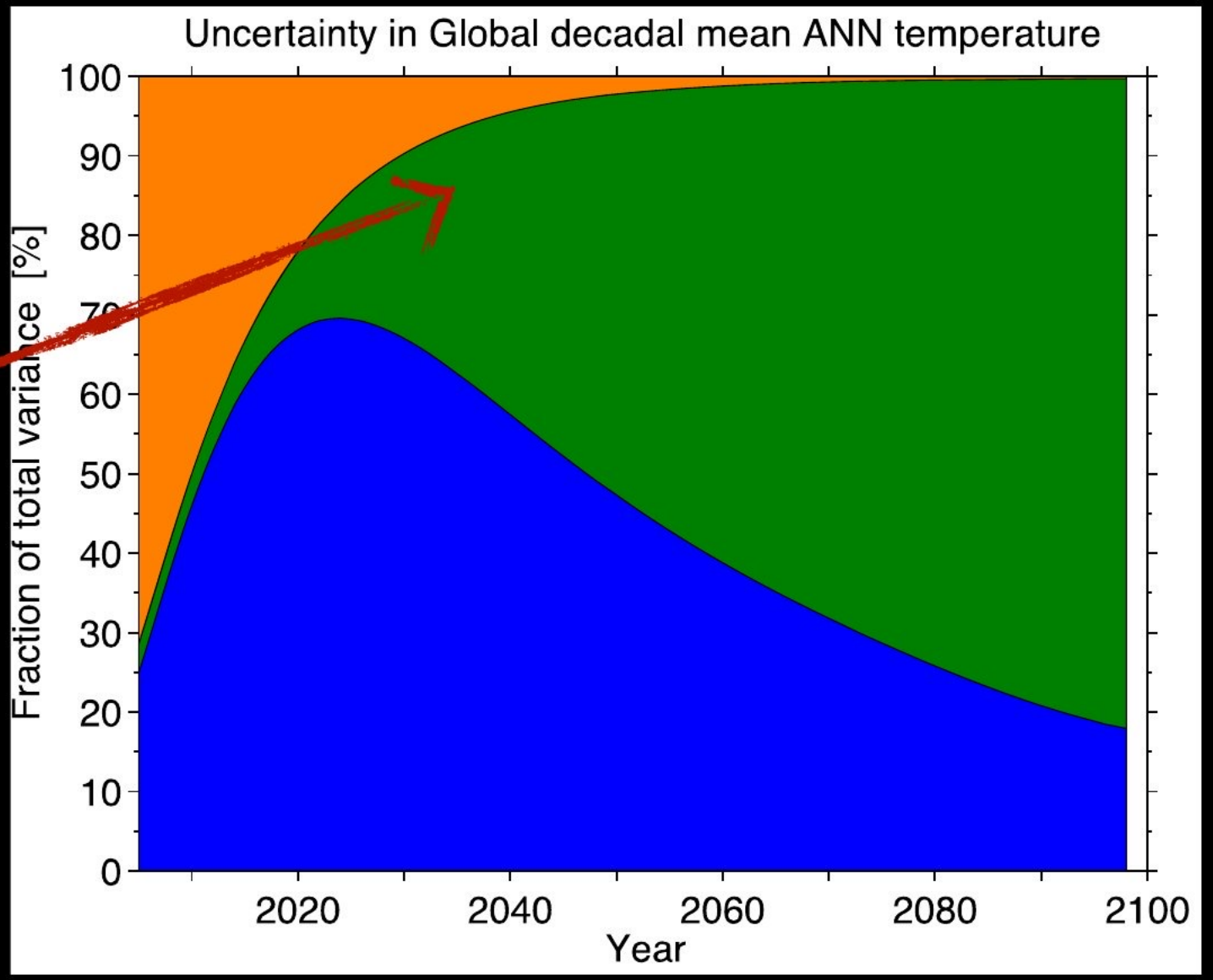
Les principales incertitudes évoluent dans le temps

Le degré d'accord entre nos modèles (incertitude structurelle)



Les principales incertitudes évoluent dans le temps

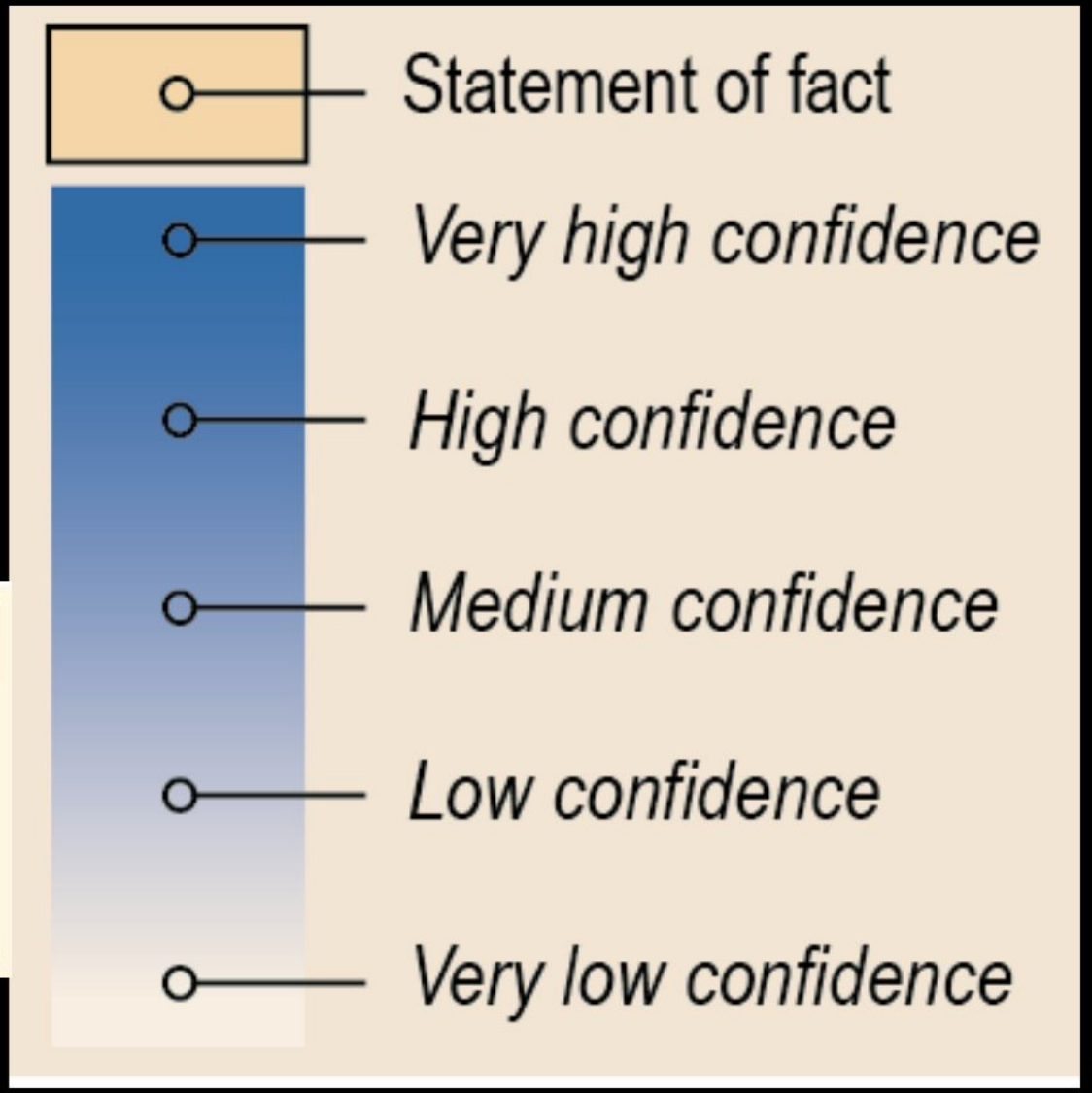
La trajectoire d'émissions de GES que nous suivrons (incertitude de scénario)



Confiance

« Dans les rapports du GIEC, la confiance est exprimée qualitativement et indique notre degré de certitude quant à la validité des résultats scientifiques. Elle dépend du type, de la quantité, de la qualité et de la cohérence des éléments probants »

Confidence Terminology	Degree of confidence in being correct
Very high confidence	At least 9 out of 10 chance
High confidence	About 8 out of 10 chance
Medium confidence	About 5 out of 10 chance
Low confidence	About 2 out of 10 chance
Very low confidence	Less than 1 out of 10 chance



https://theconversation.com/lost-in-translation-confidence-and-certainty-in-climate-science-17181

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-1/

Probabilité

« La certitude des résultats scientifiques est ensuite exprimée par des probabilités. Les résultats sont évalués de façon probabiliste à partir d'observations, de résultats de modélisation ou d'avis d'experts. »

Allison Crimmins :

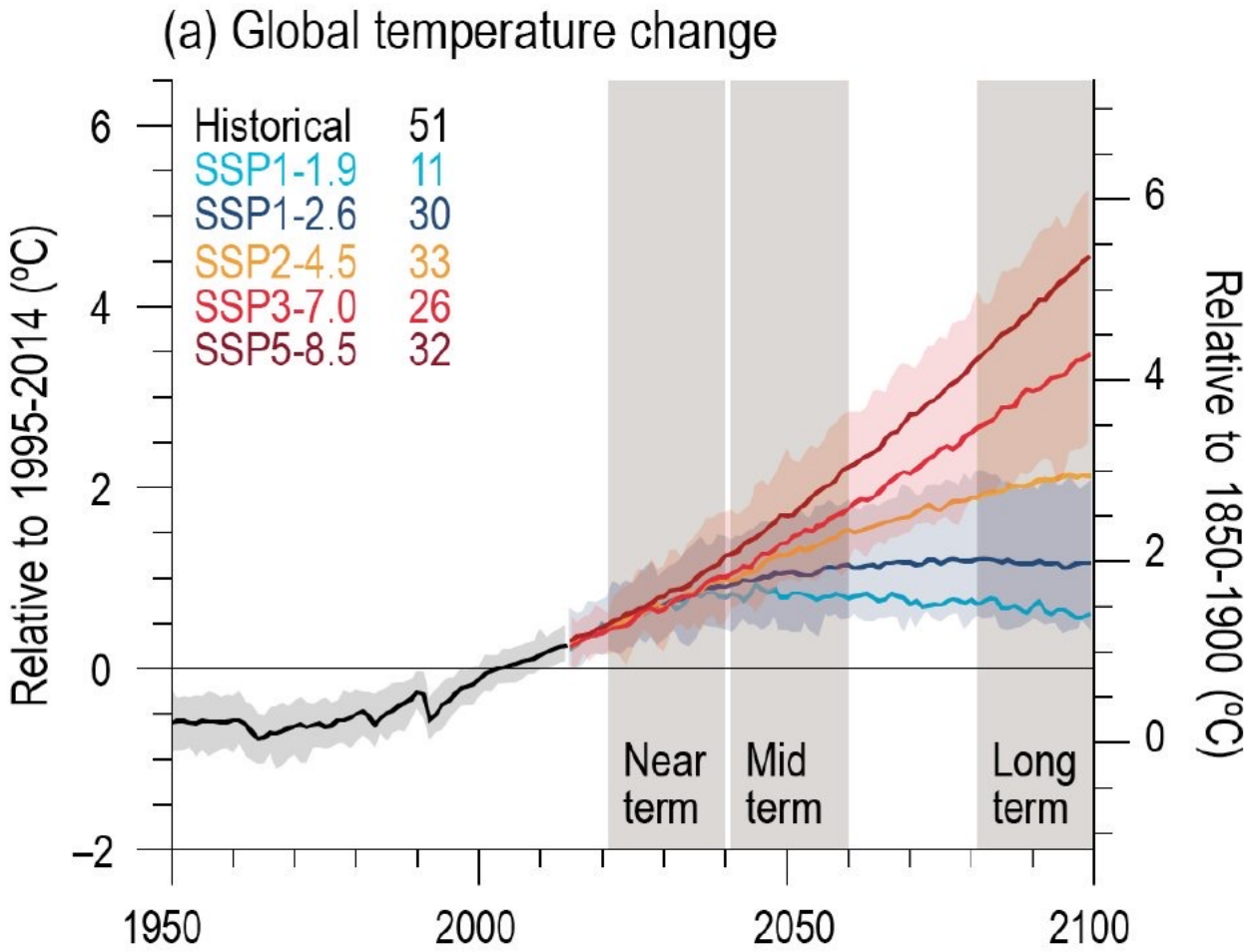
« Quand vous regardez un produit sur Amazon, le nombre d'étoiles correspond à la probabilité et le nombre d'avis à la confiance. »

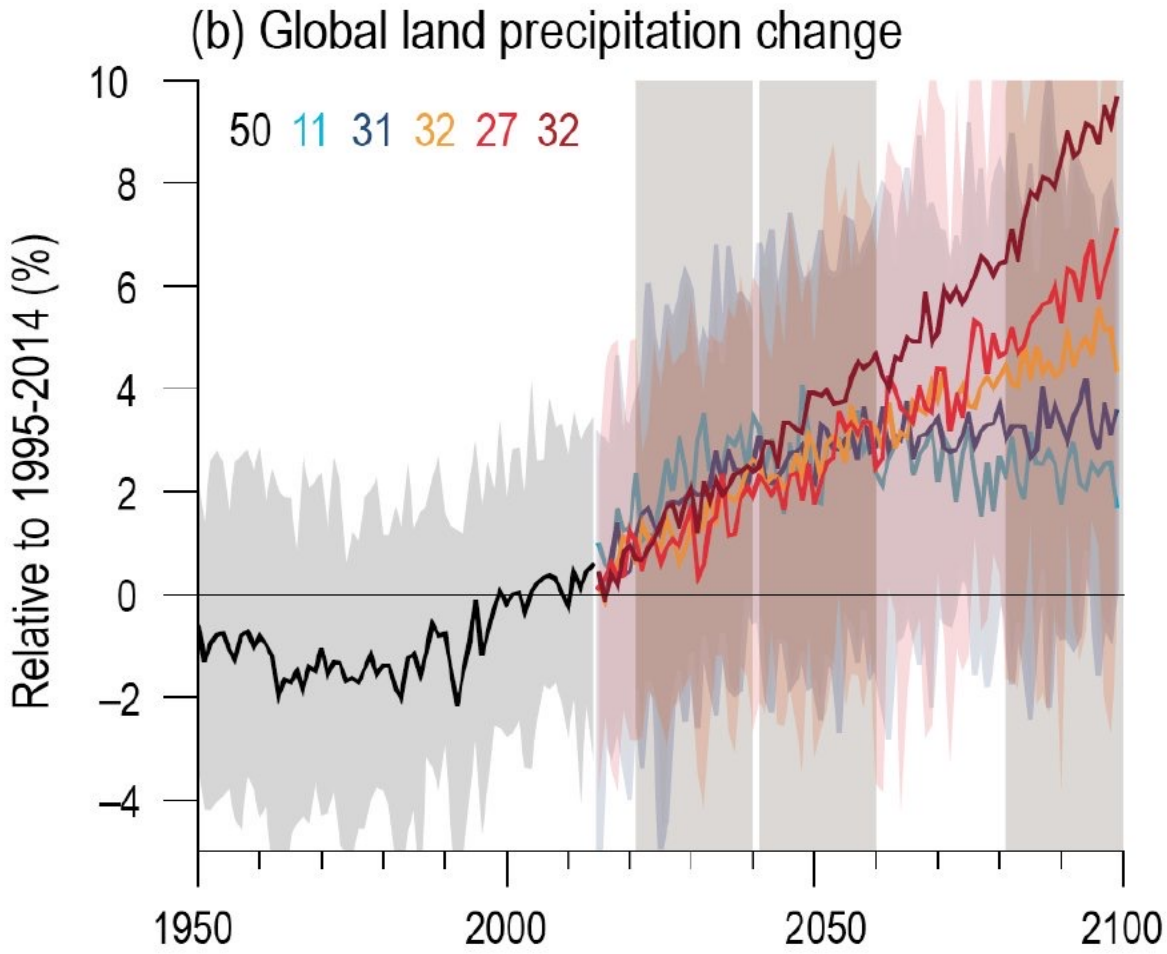
Likelihood	Outcome probability
Virtually certain	99-100%
Extremely likely	95-100%
Very likely	90-100%
Likely	66-100%
More likely than not	>50-100%
About as likely as not	33-66%
Unlikely	0-33%
Very unlikely	0-10%
Extremely unlikely	0-5%
Exceptionally unlikely	0-1%

https://theconversation.com/lost-in-translation-confidence-and-certainty-in-climate-science-17181

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-1/

Température et précipitations (terres)





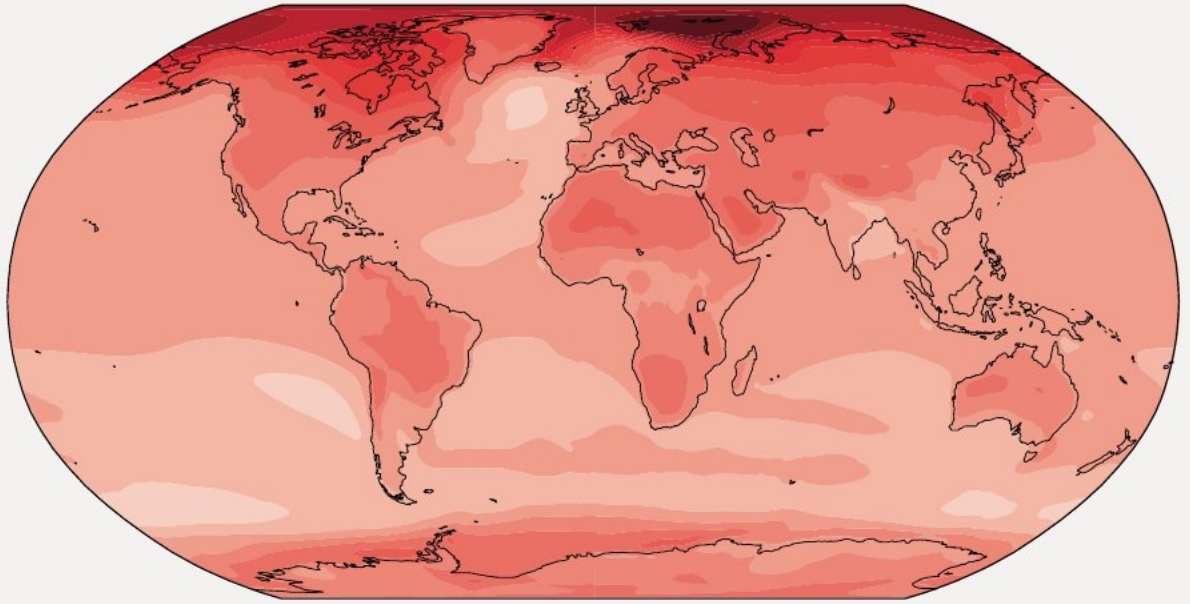
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-4/figure-4-2

Température

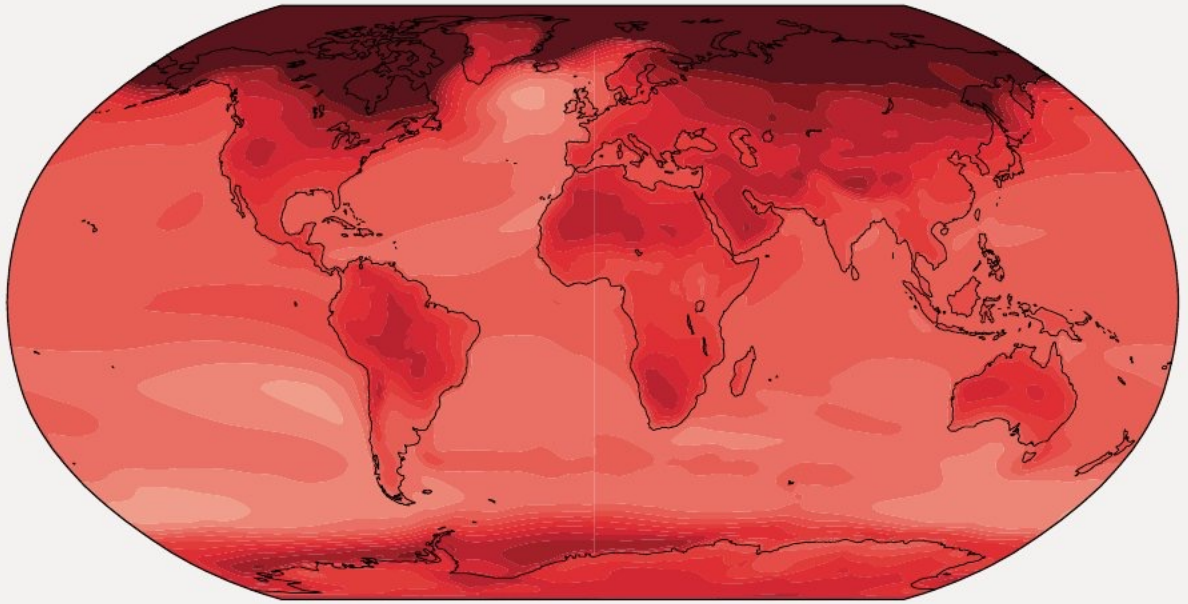
Généralisée, unidirectionnelle ;
réponse robuste des modèles ;

Cohérente avec les tendances observées
(p. ex. réchauffement accru sur les terres,
amplification polaire)

Simulated change at **2°C** global warming



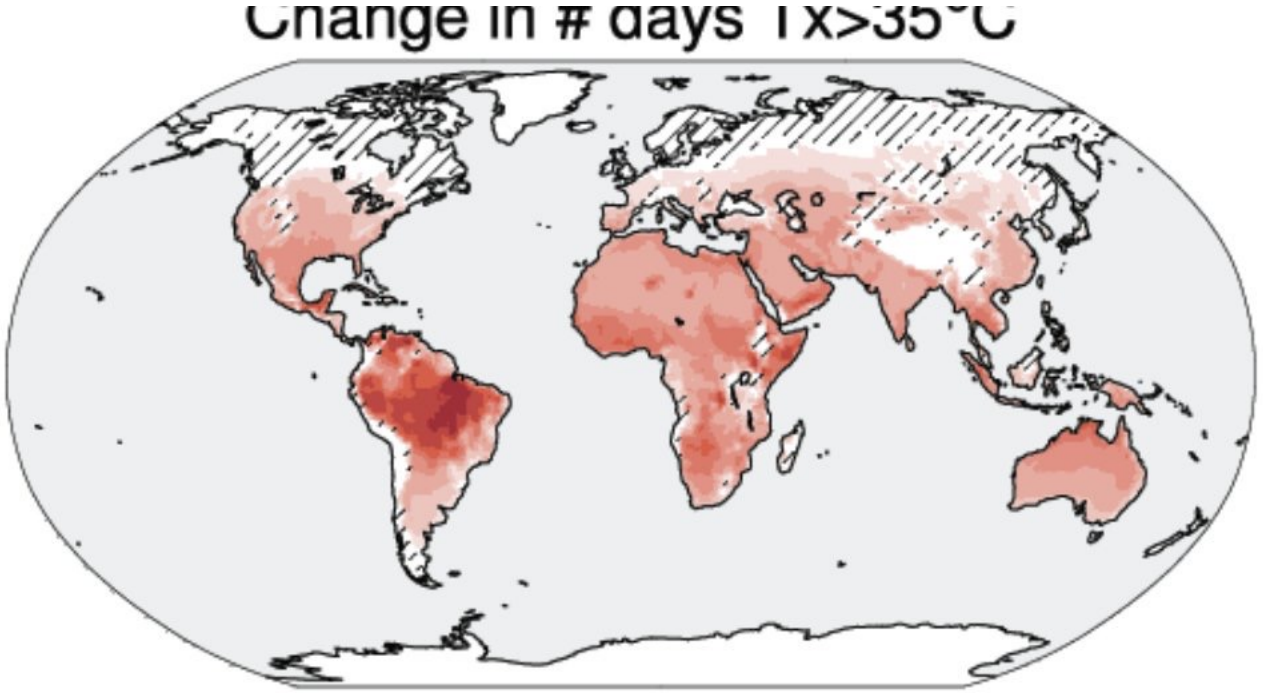
Simulated change at **4°C** global warming

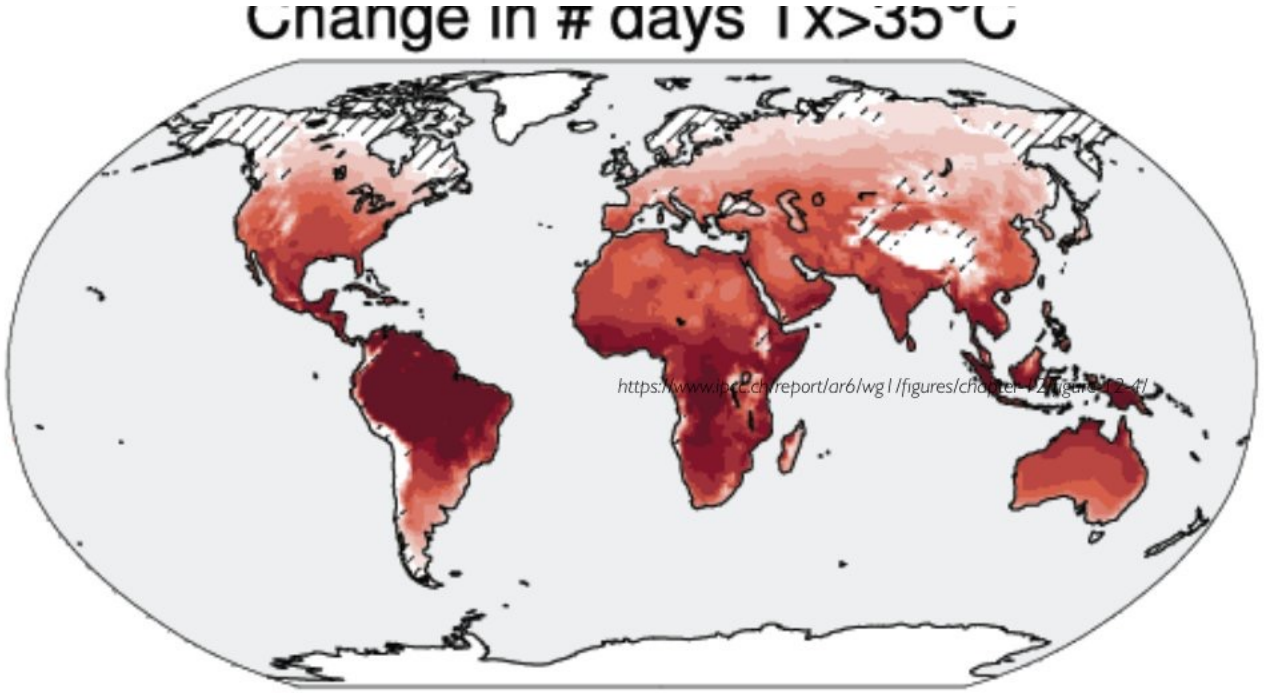


https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM



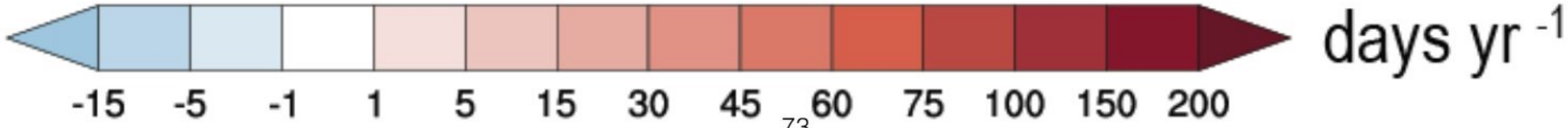
Températures extrêmes



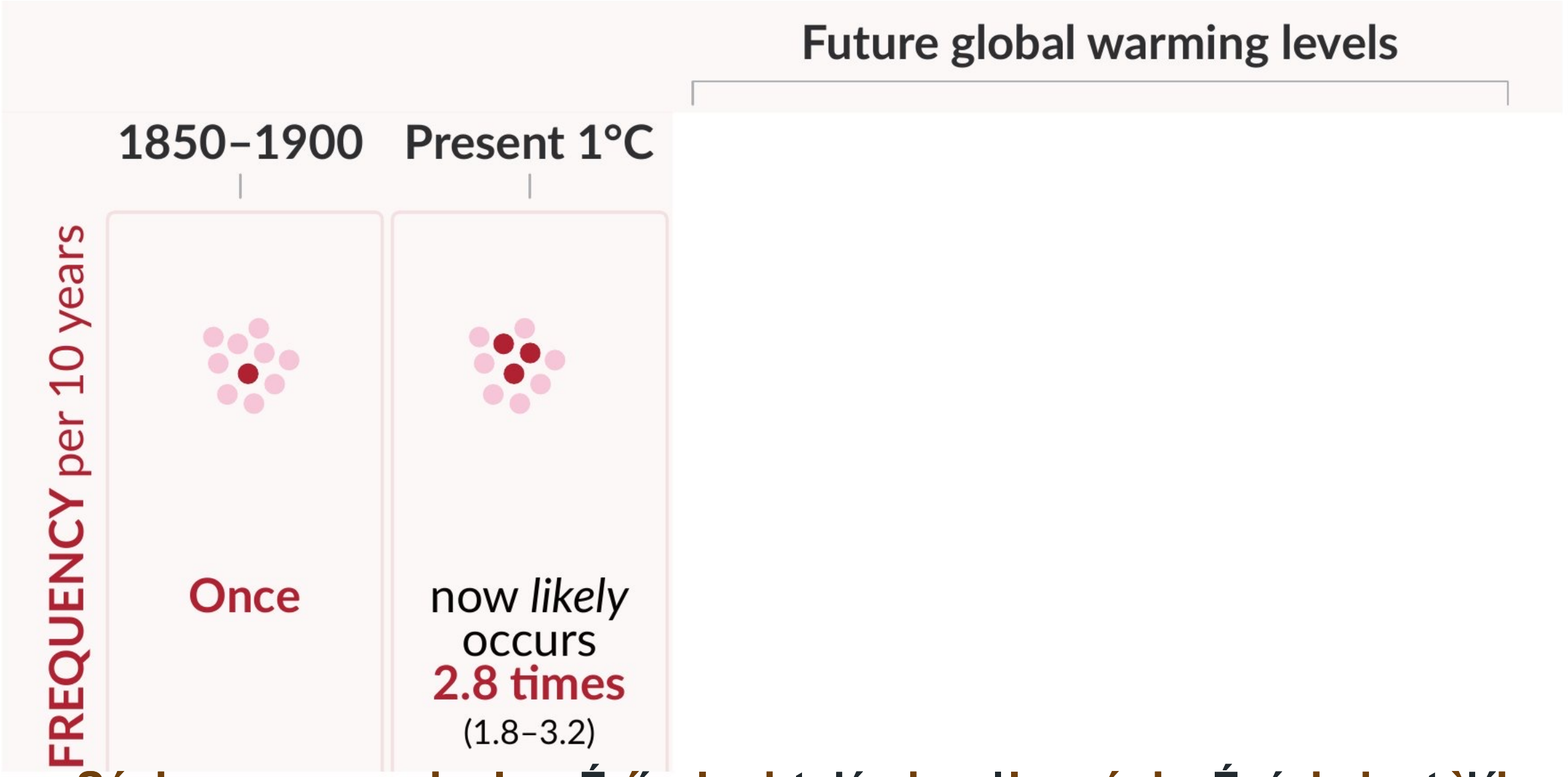


Scénario de faible réchauffement
(2080-2100)

Scénario de fort réchauffement
(2080-2100)



Évolution des chaleurs extrêmes décennales



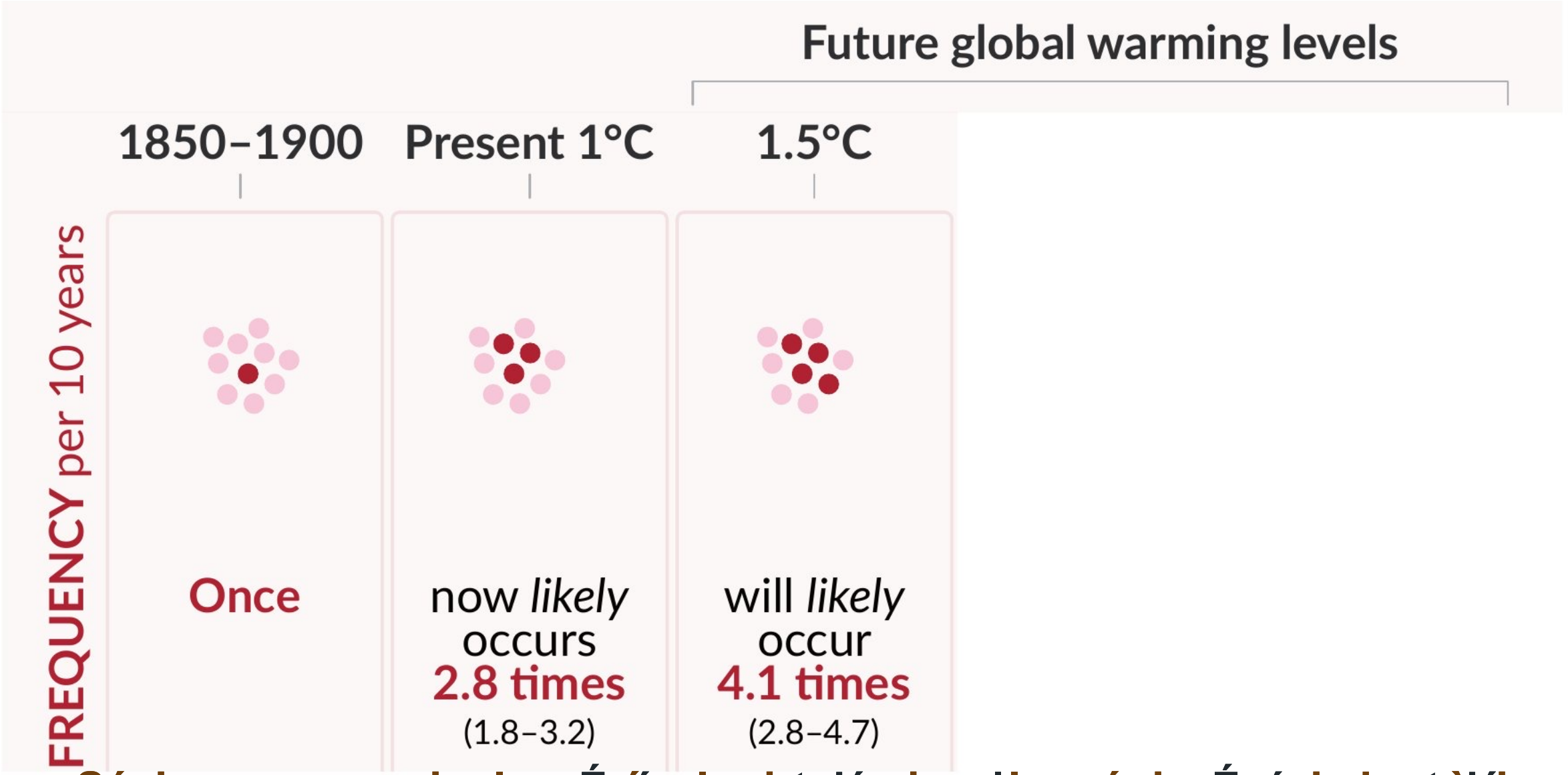
Chaleurs extrêmes sur les terres — Événement décennal — Événement cinquantennal

Sécheresses agricoles et écologiques dans les régions qui s'assèchent — Événement décennal — Événement centennal

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des chaleurs extrêmes décennales

Chaleurs extrêmes sur les terres — Événement décennal — Événement cinquantennal



Sécheresses agricoles et écologiques dans les régions qui se désertifient — Événement décennal — Événement décennal

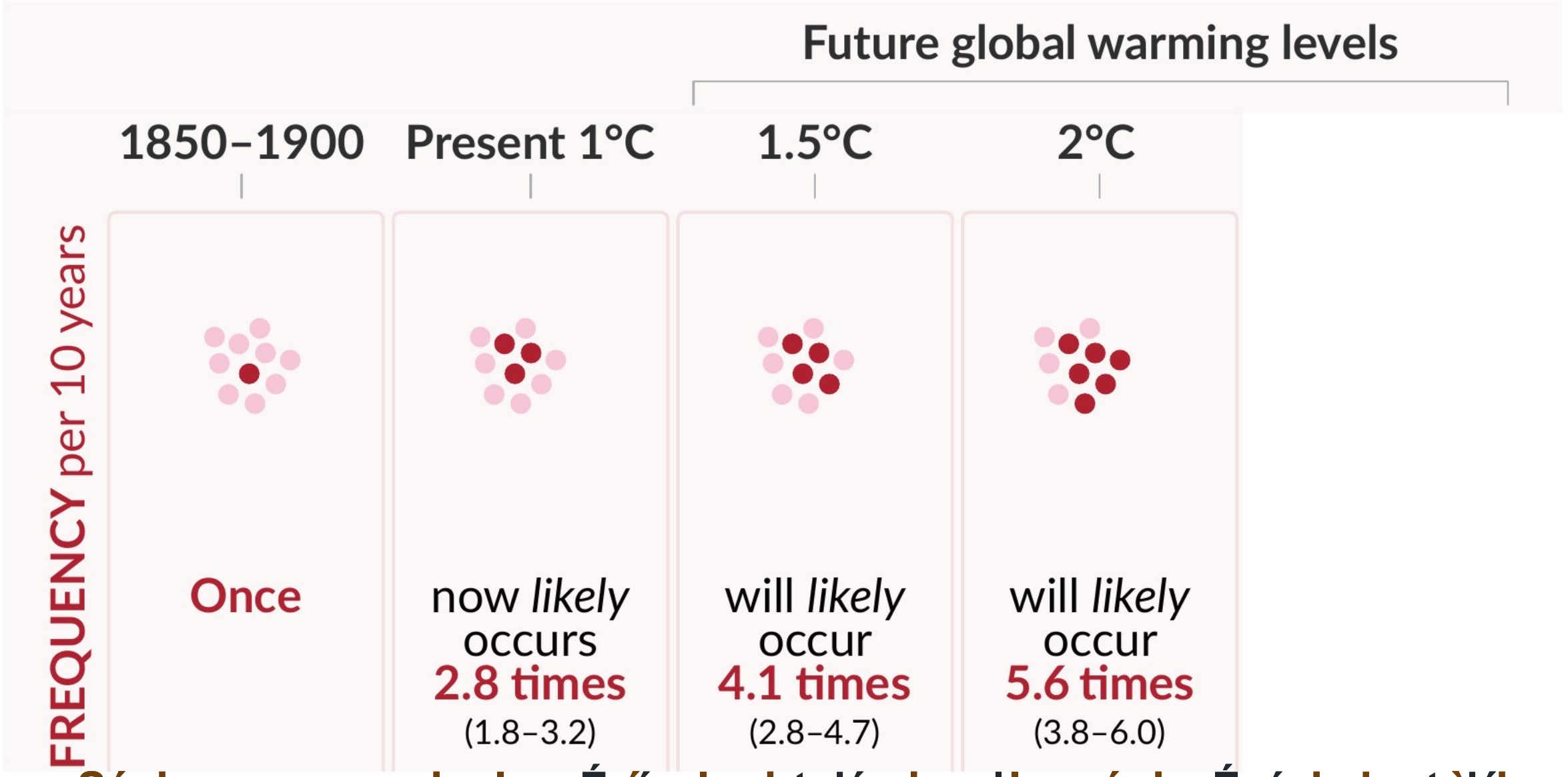
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des chaleurs extrêmes décennales

Chaleurs extrêmes sur le centennal

Événement décennal

Événement cinquantennal



Sécheresses agricoles et écologiques dans les régions qui subissent

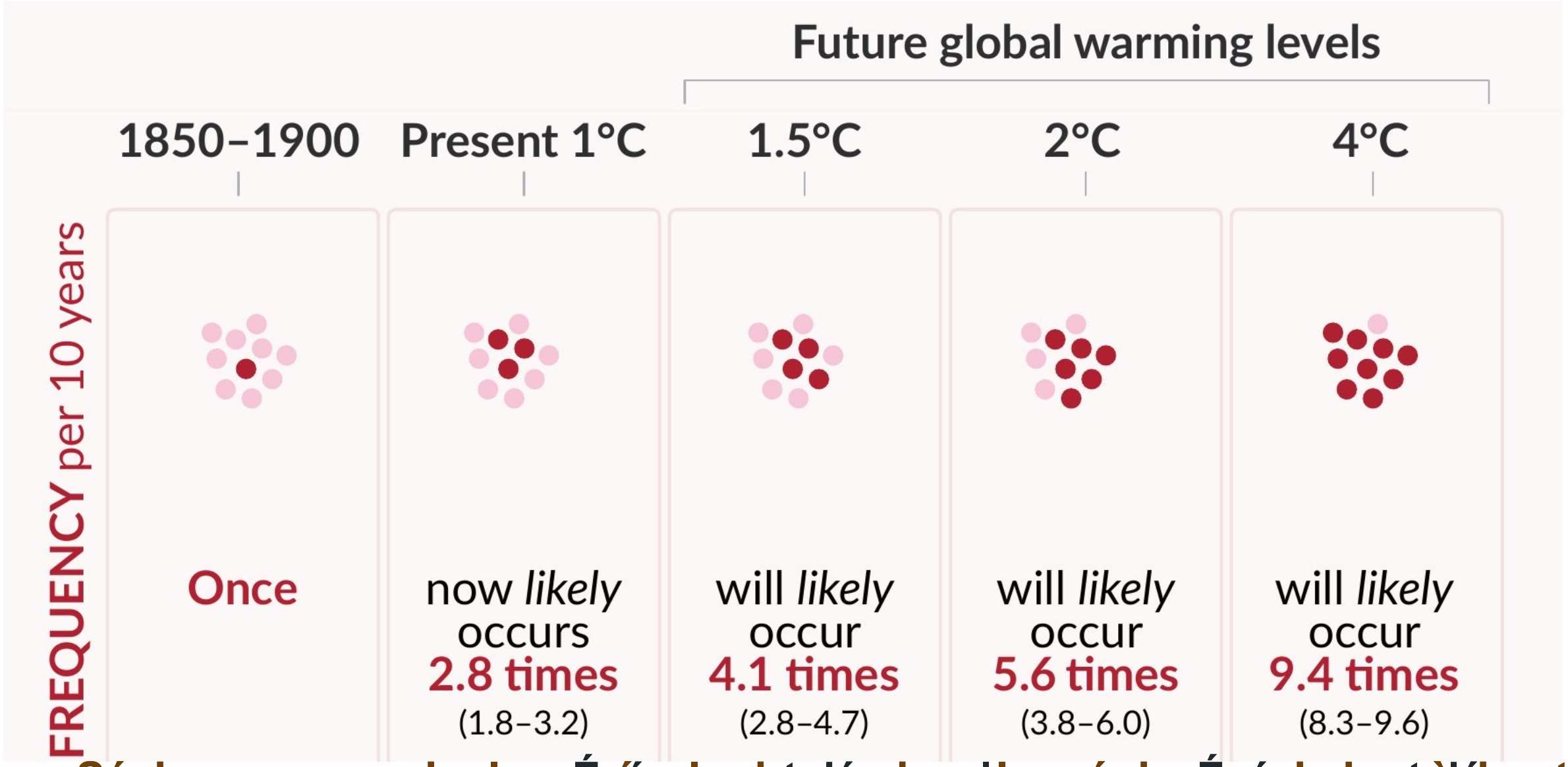
Événement décennal

Événement décennal

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des chaleurs extrêmes décennales

Chaleurs extrêmes sur les terres — Événement décennal — Événement cinquantennal



Sécheresses agricoles et écologiques dans les régions qui s'assèchent — Événement décennal — Événement cinquantennal

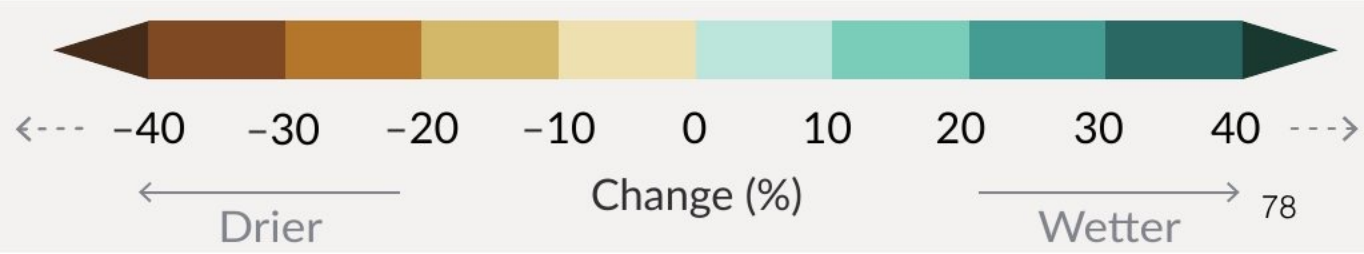
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Précipitations (pluie + neige)

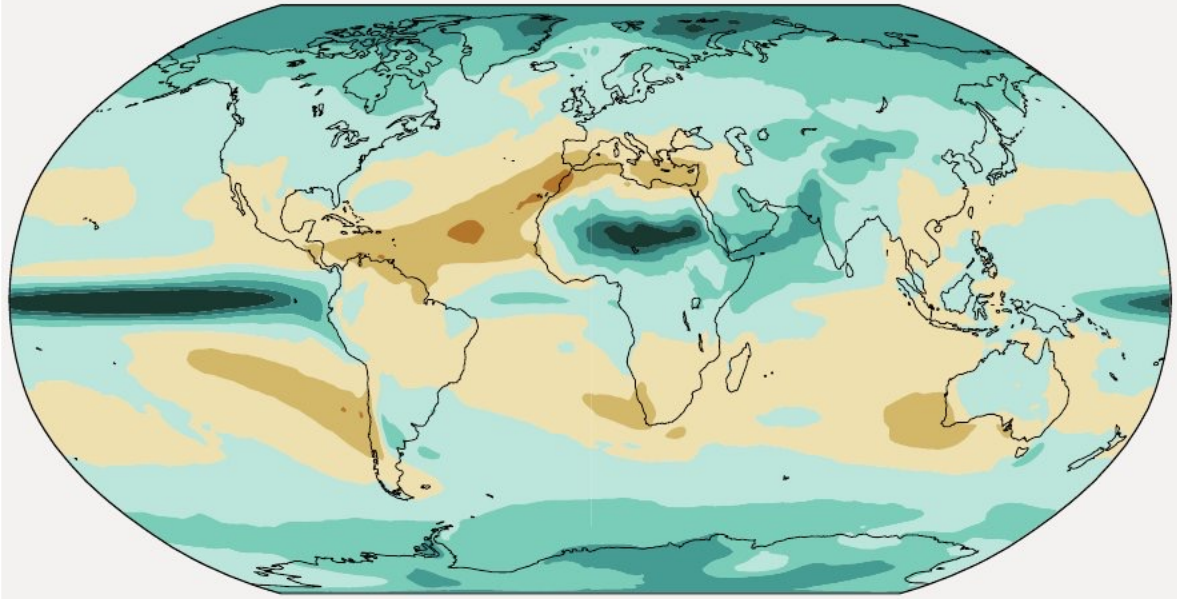
Résultats robustes pour certaines zones : hautes latitudes plus humides, subtropiques plus secs ;

Incertitude plus forte car plus de processus (humidité, stabilité, énergie, etc.)

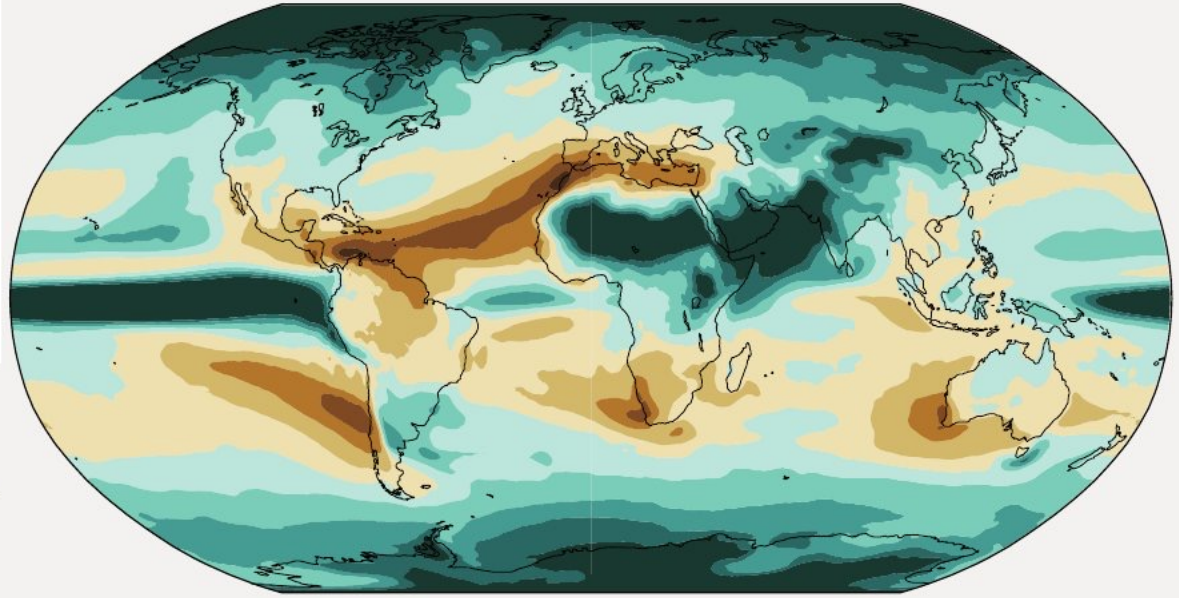
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM



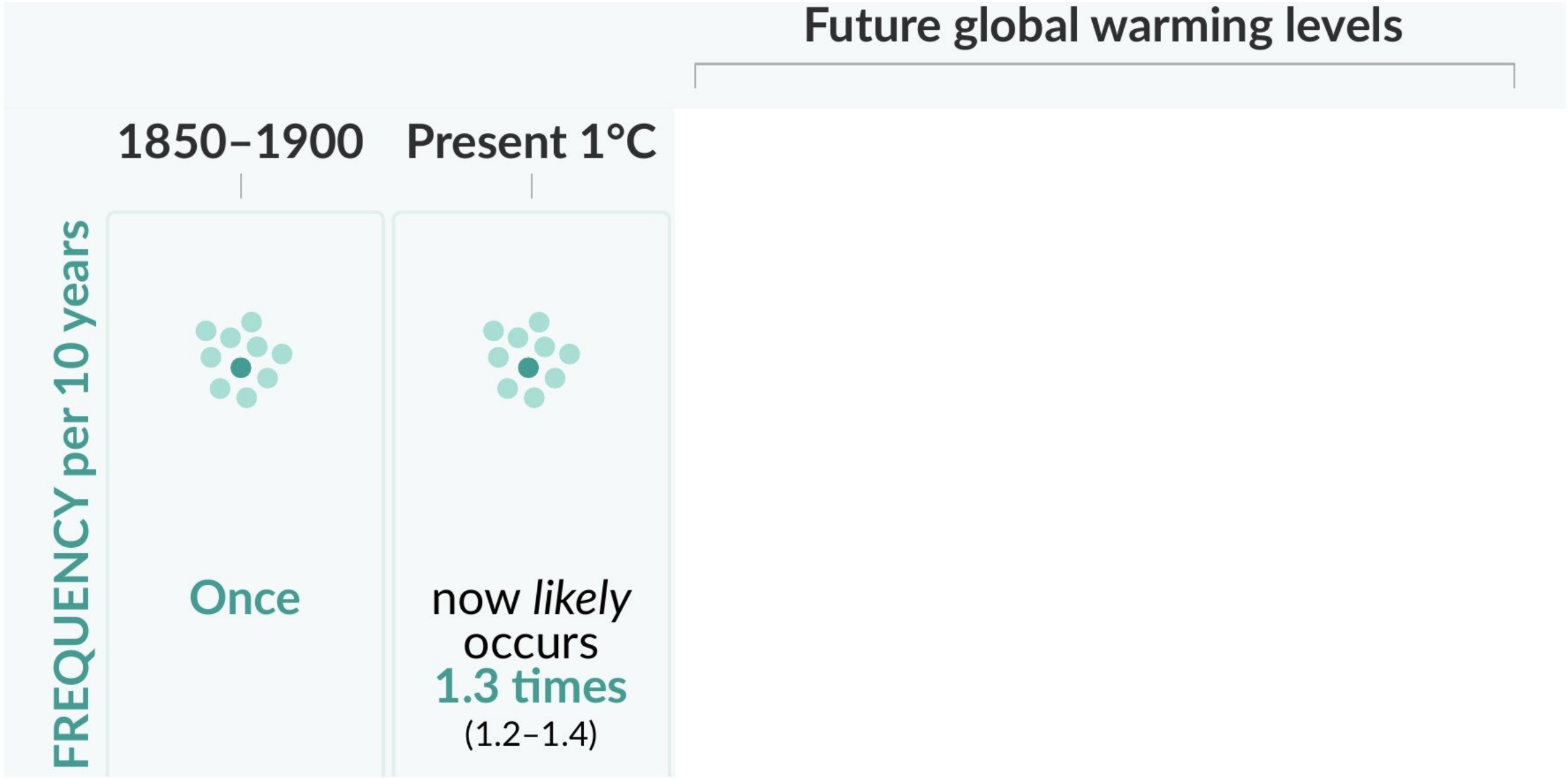
Simulated change at **2°C** global warming



Simulated change at **4°C** global warming

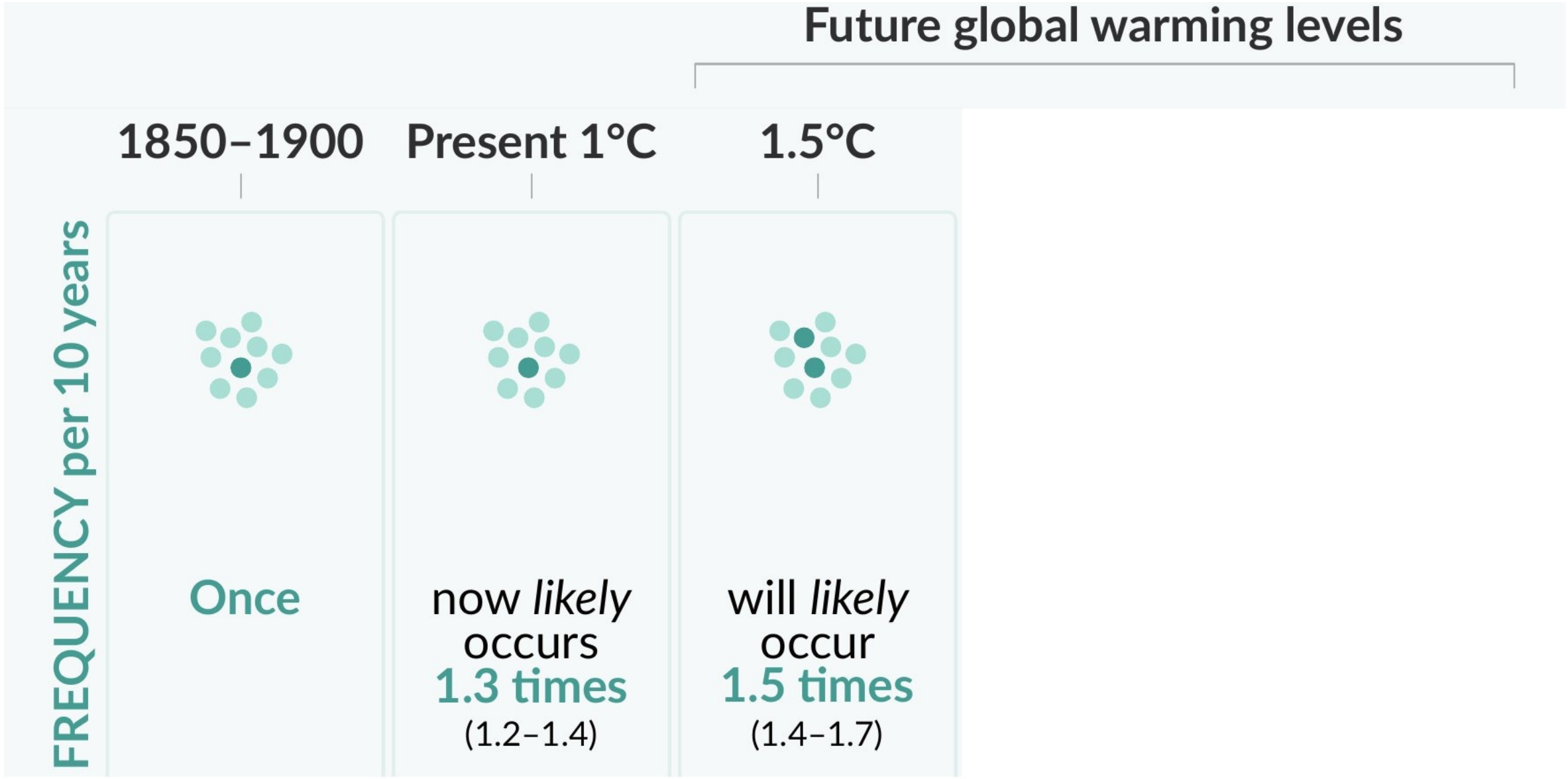


Évolution des fortes pluies décennales



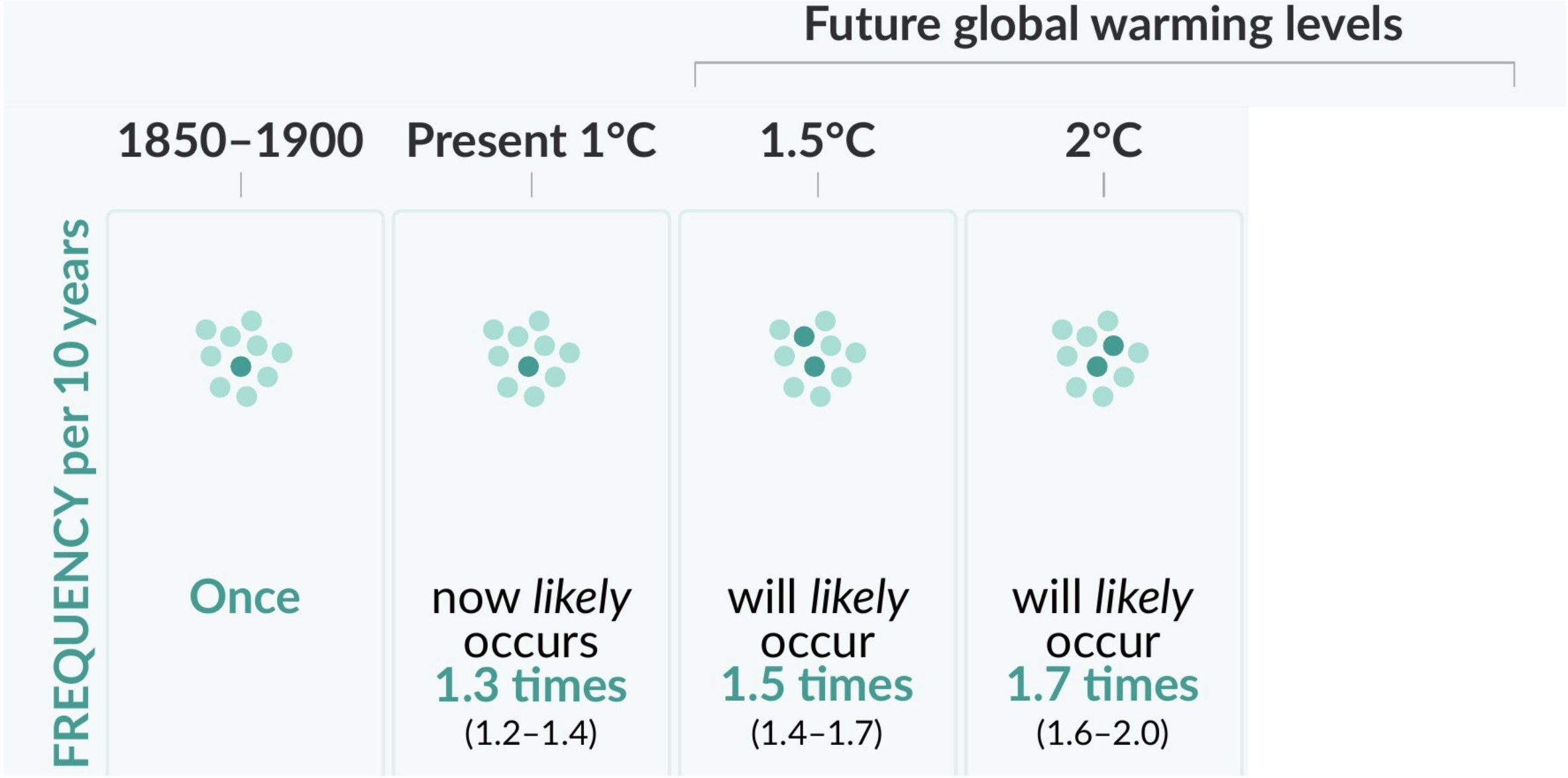
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des fortes pluies décennales



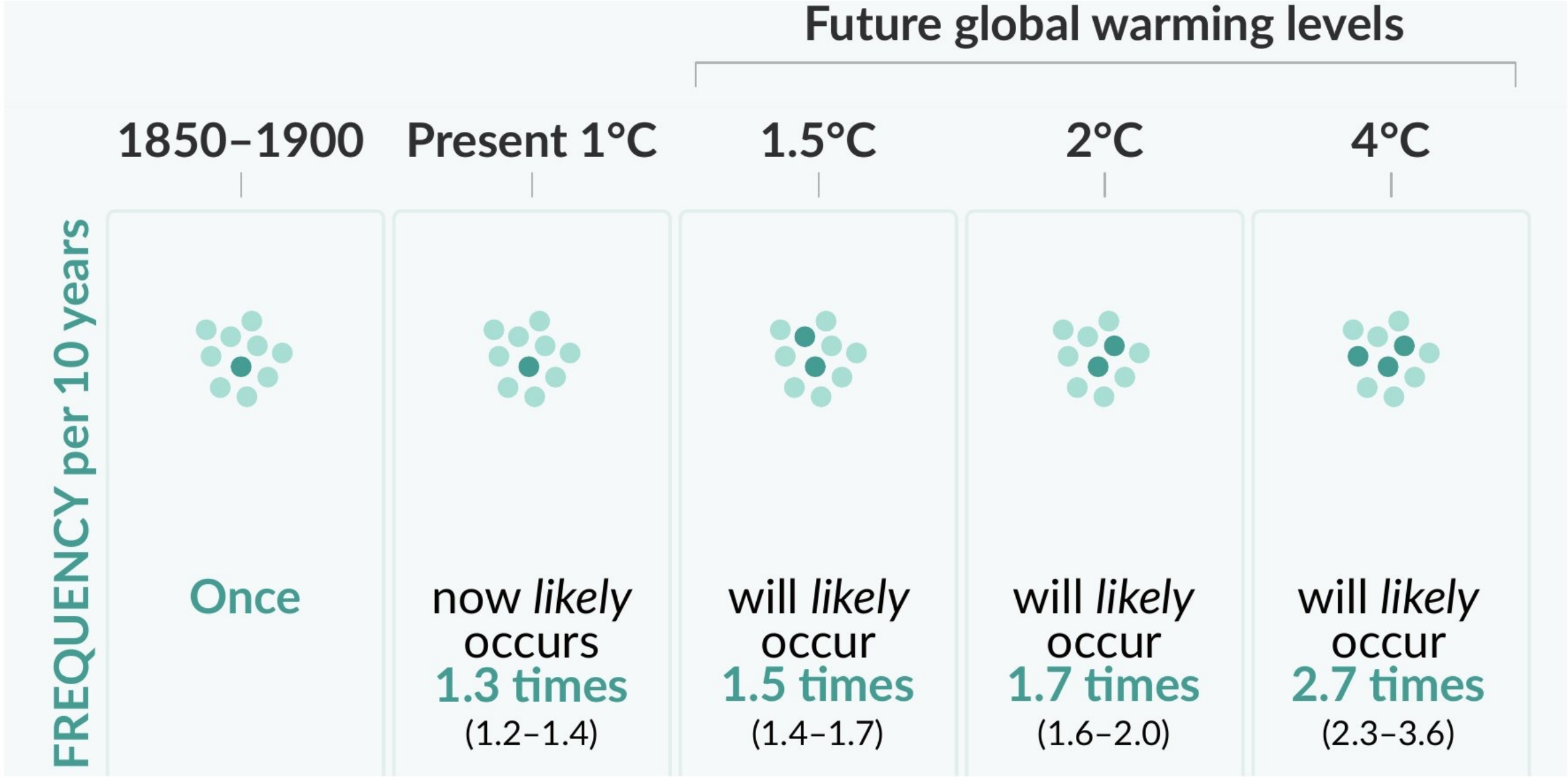
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des fortes pluies décennales



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des fortes pluies décennales

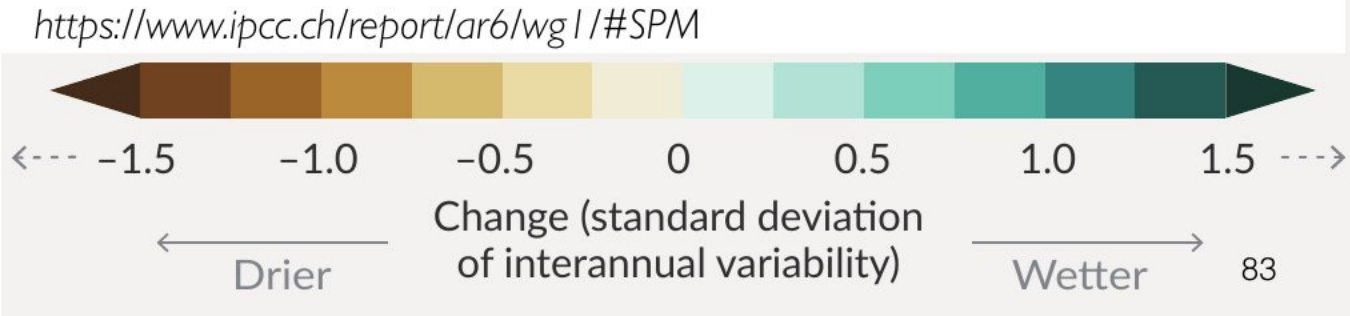


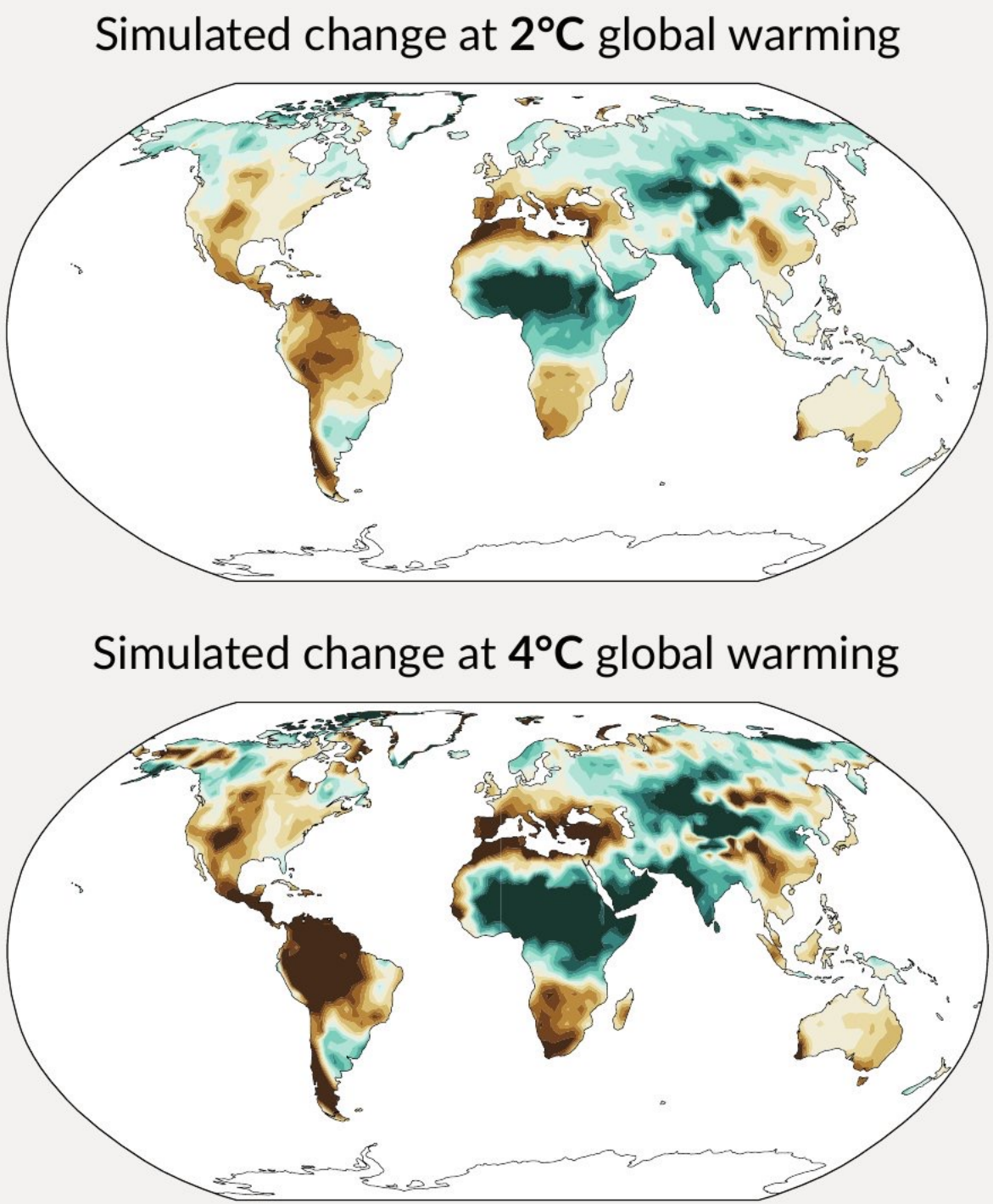
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Humidité des sols et sécheresse

Résultats robustes pour certaines zones : hautes latitudes plus humides, subtropiques plus secs ;

Incertitude plus forte car plus de processus (humidité, stabilité, énergie, etc.)





Évolution des sécheresses décennales des sols



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des sécheresses décennales des sols



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Évolution des sécheresses décennales des sols



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM



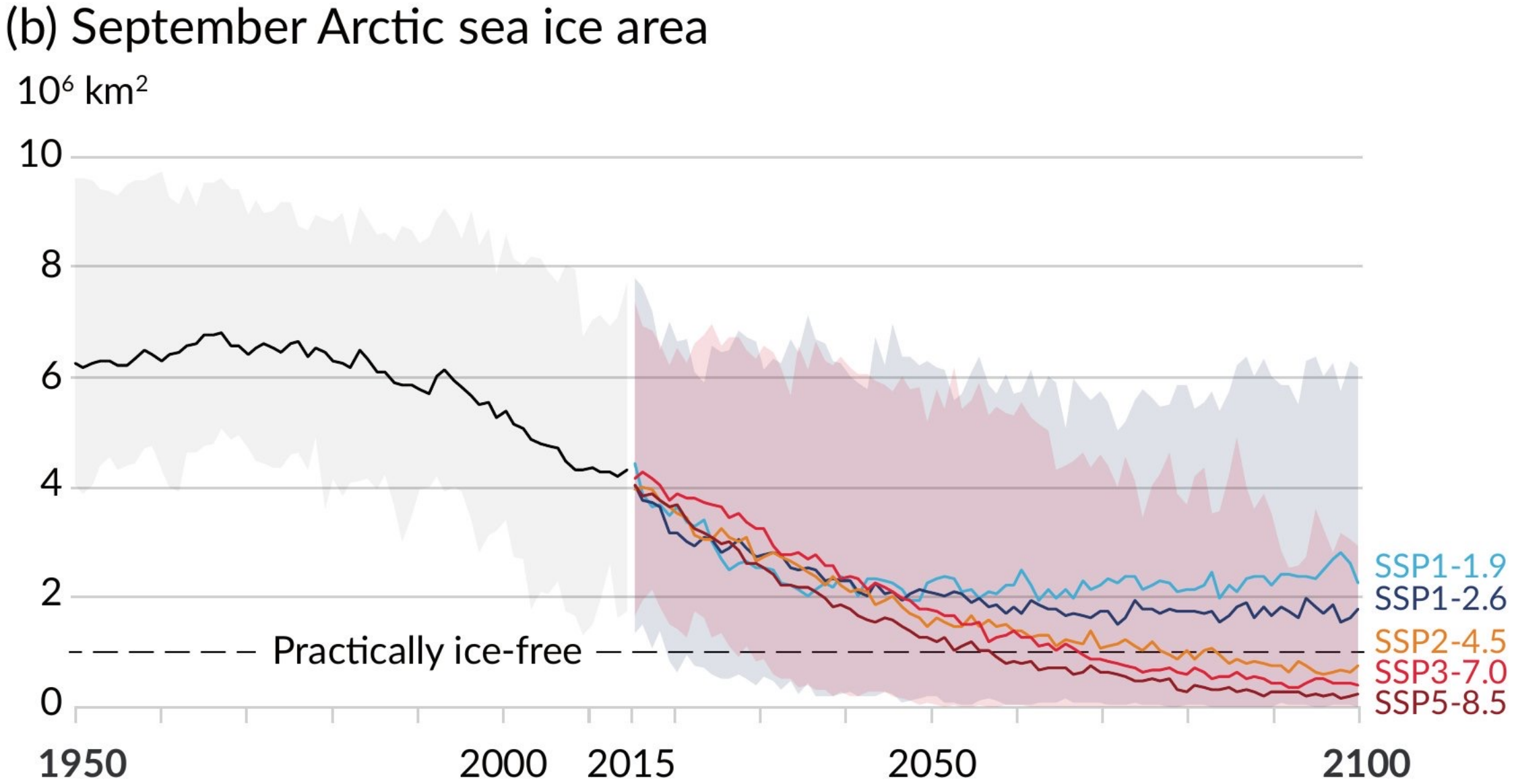
Évolution des sécheresses décennales des sols

Future global warming levels

1850–1900	Present 1°C	1.5°C	2°C	4°C
FREQUENCY per 10 years				
Once	now *likely* occurs **1.7 times** (0.7–4.1)	will *likely* occur **2.0 times** (1.0–5.1)	will *likely* occur **2.4 times** (1.3–5.8)	will *likely* occur **4.1 times** (1.7–7.2)

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Glace de mer arctique



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Élévation du niveau de la mer et submersions côtières

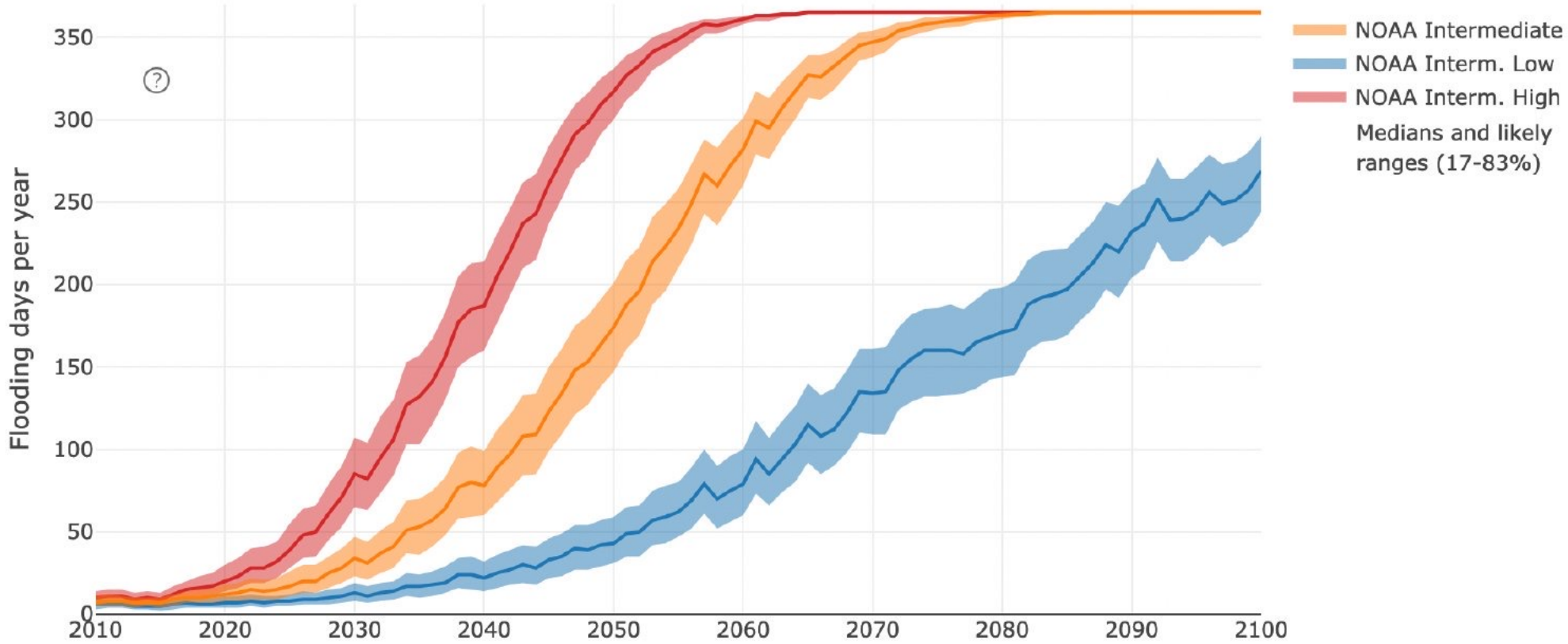
MHHW stands for *Mean Higher High Water*, which is defined as the average of the highest observed water level at the selected location on each tidal day during the period 1983-2001

Flooding days during the 21st century

The graph below shows the number of days per year that sea level in **Montauk, NY** is projected to exceed **53 cm** above MHHW.

▸ **Read more**

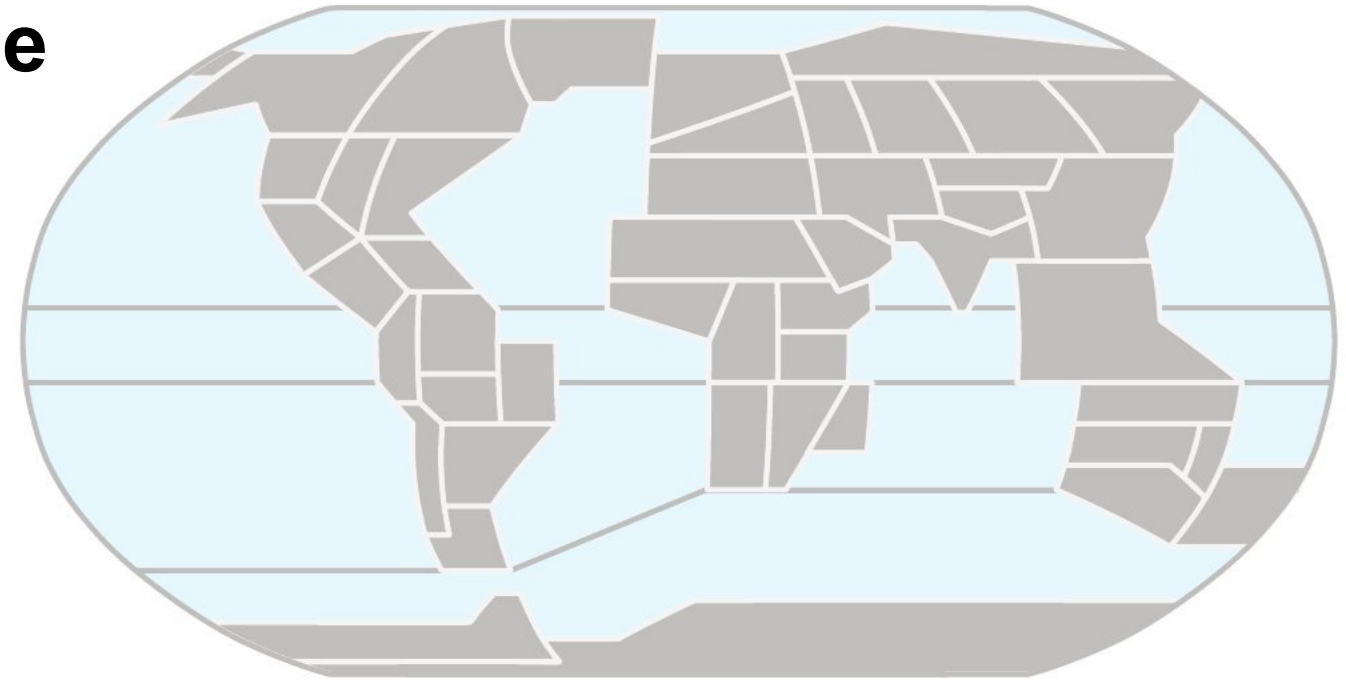
Choose the local mean sea level projection(s) to use: NOAA Sea Level Rise Scenarios

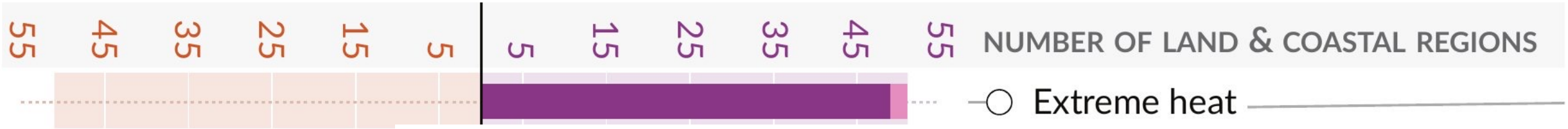


https://sealevel.nasa.gov/flooding-days-projection/

Facteurs d'impact climatique







Exemple : chaleur extrême

50/55 : régions vulnérables

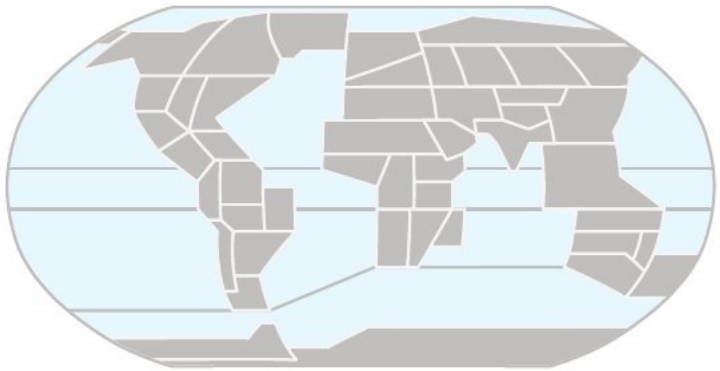
49/50 : confiance élevée dans une hausse du risque

1/50 : confiance moyenne dans une hausse du risque

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

https://interactive-atlas.ipcc.ch/

Facteurs climatique d'impact



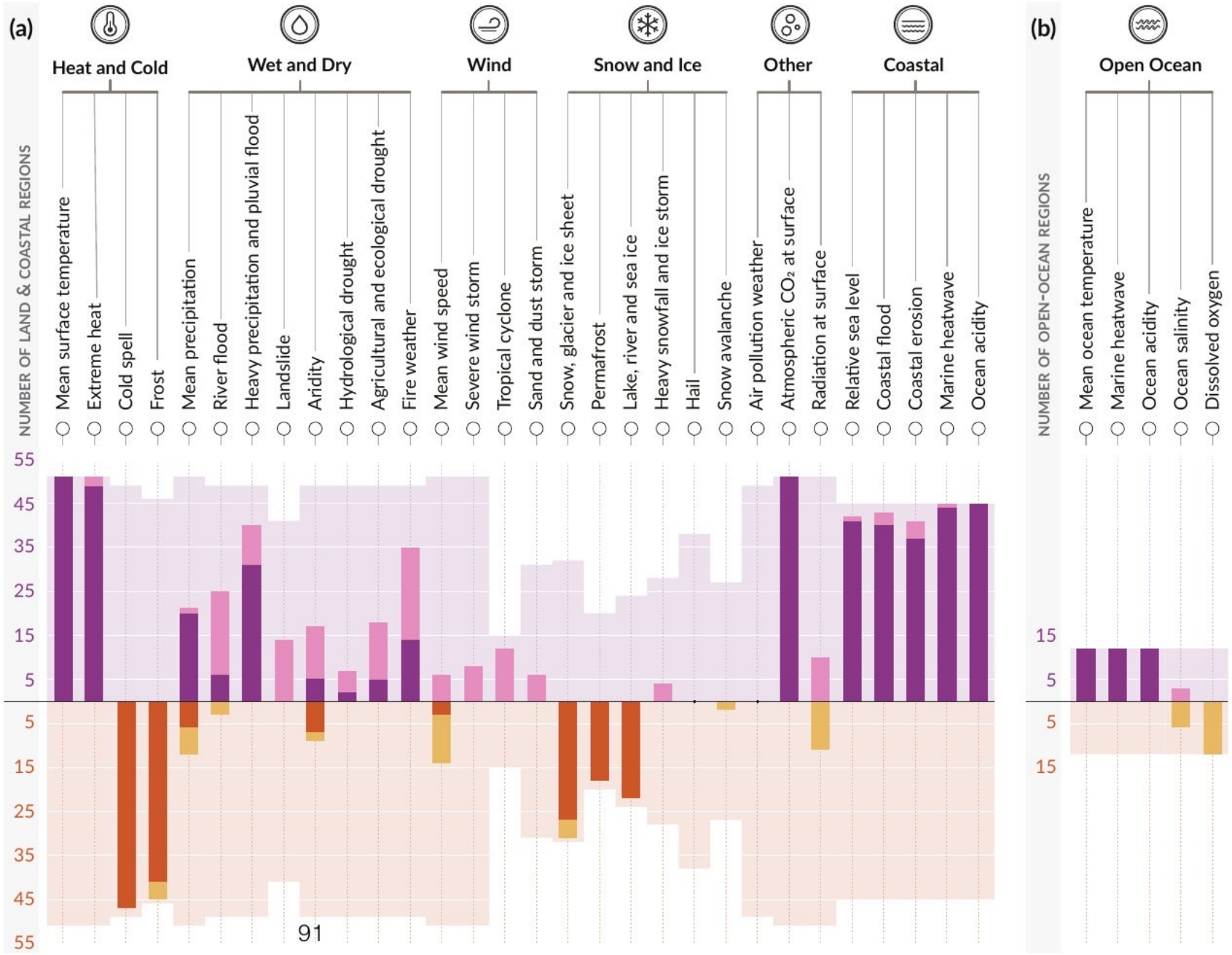
https://interactive-atlas.ipcc.ch/

BAR CHART LEGEND

- Regions with ***high*** *confidence* **increase**
- Regions with ***medium*** *confidence* **increase**
- Regions with ***high*** *confidence* **decrease**
- Regions with ***medium*** *confidence* **decrease**

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

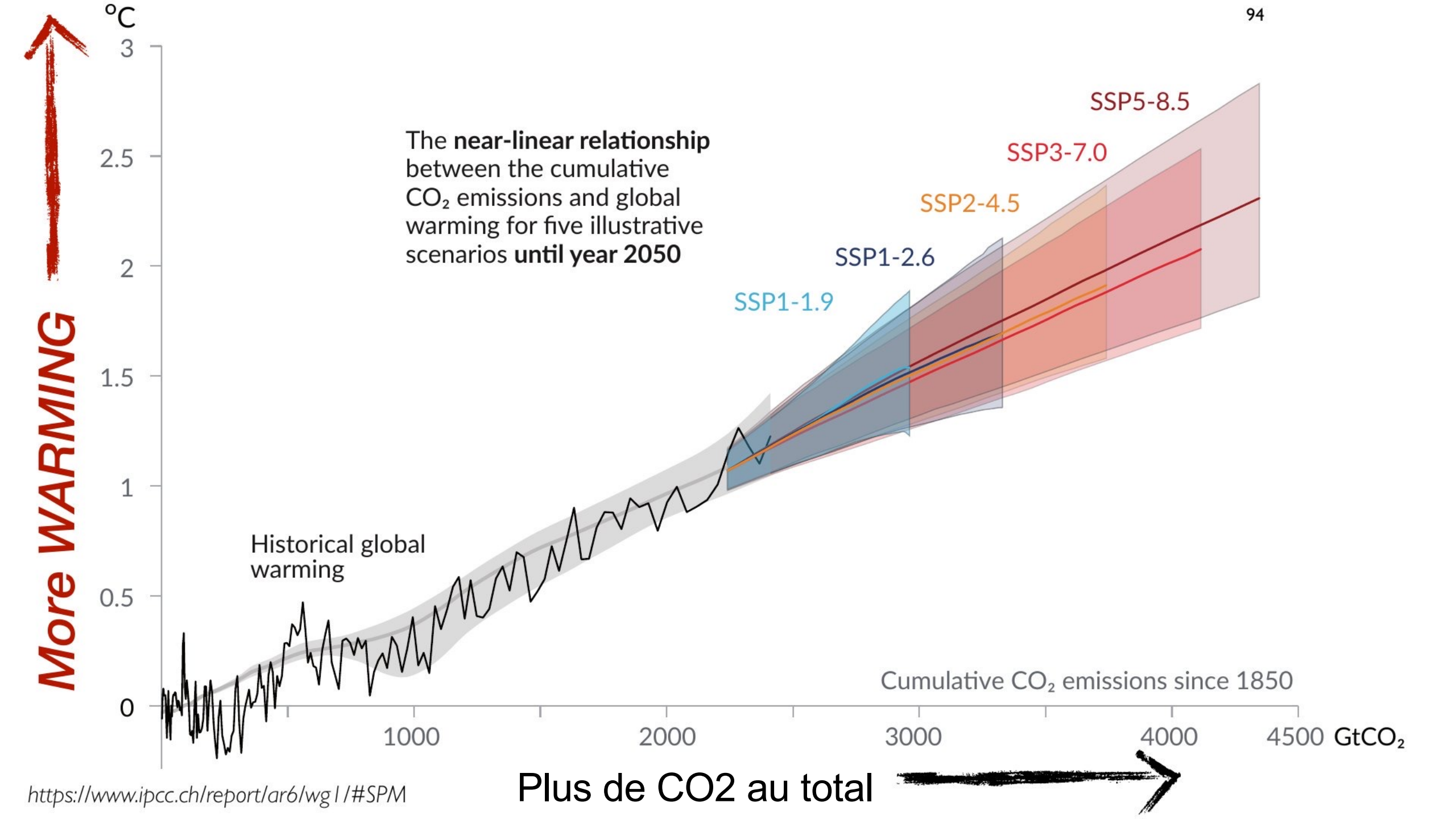
Number of land & coastal regions (a) and **open-ocean regions** (b) where each **climatic impact-driver** (CID) is projected to increase or decrease with ***high*** *confidence* (dark shade) or ***medium*** *confidence* (light shade)



RÉFLEXION

QUEL EST LE POINT LE PLUS FLOU JUSQU'ICI ? AUTREMENT DIT, CE QUI VOUS PARAÎT LE MOINS CLAIR ?

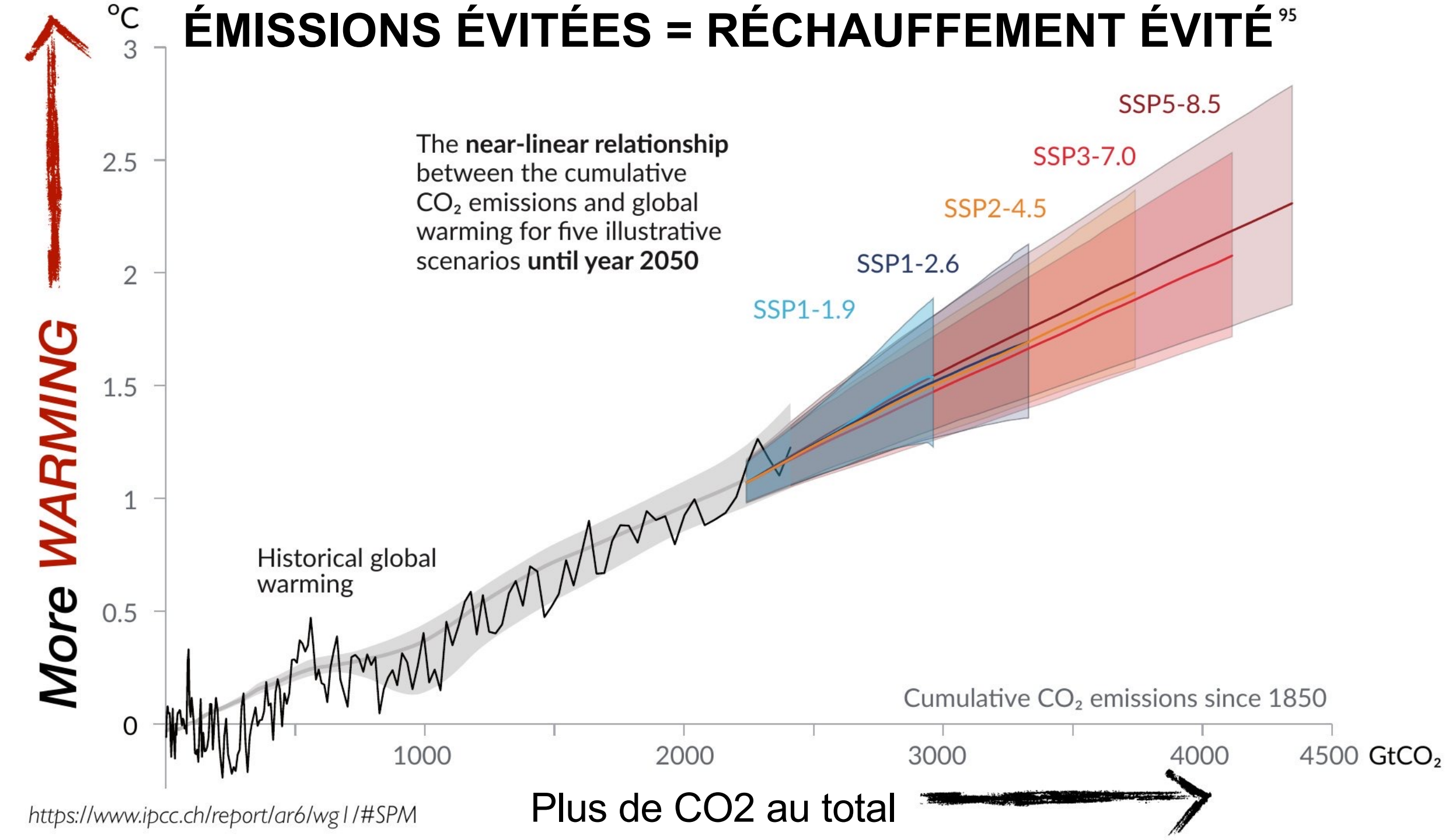
ATTÉNUATION
CHANGEMENT CLIMATIQ



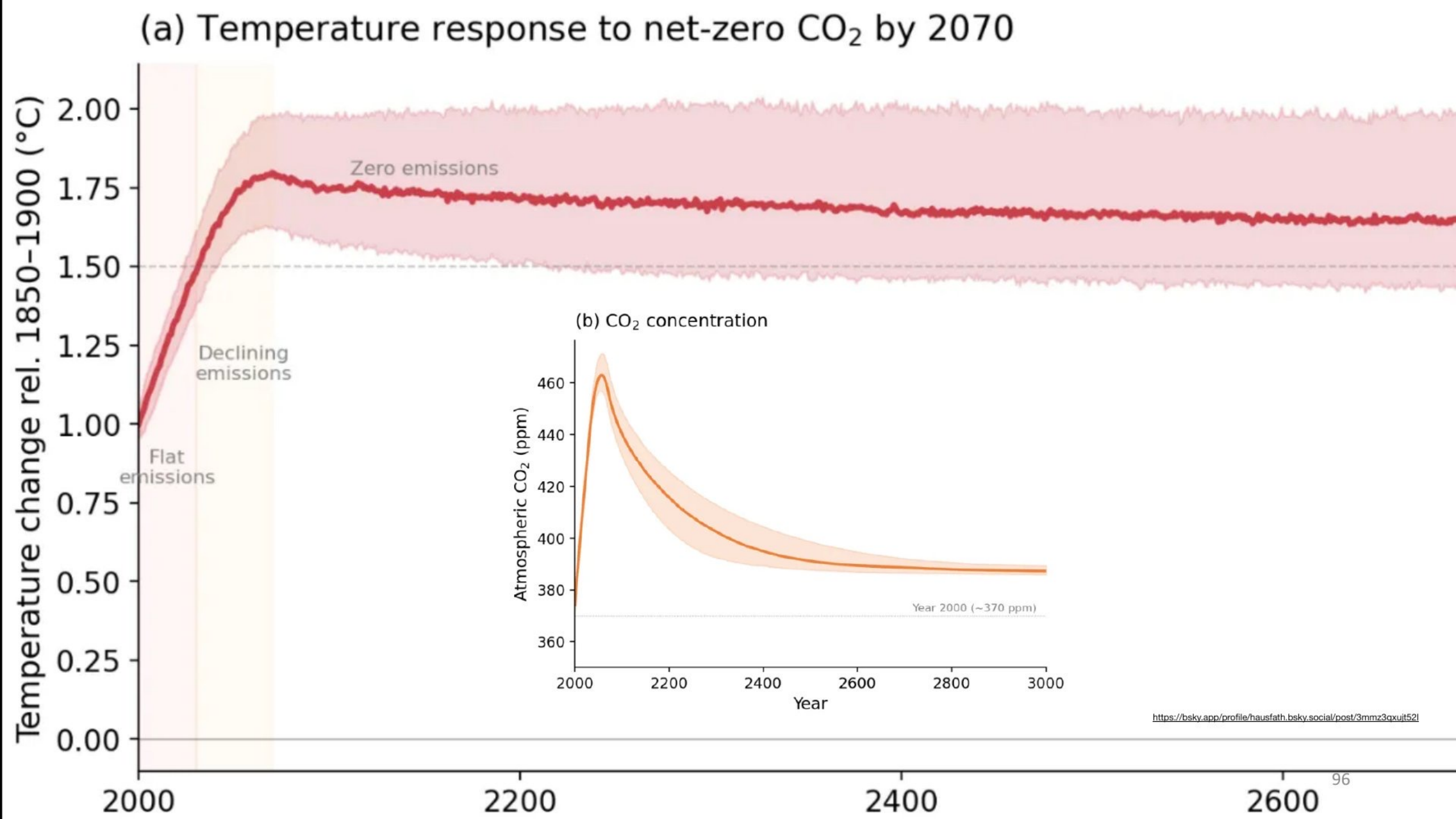
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM

Plus de CO2 au total

ÉMISSIONS ÉVITÉES = RÉCHAUFFEMENT ÉVITÉ



https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM



https://bsky.app/profile/hausfath.bsky.social/post/3mmz3qxujt52l

IDENTITÉ DE KAYA

$$GHG_{\text{émissions}} = P * \frac{G}{P} * \frac{E}{G} * \frac{F}{E}$$

P = population mondiale
G = PIB mondial
E = consommation mondiale d'énergie
F = émissions de GES d'origine humaine (combustibles fossiles)

IDENTITÉ DE KAYA

$$GHG_{\text{émissions}} = P * \frac{G}{P} * \frac{E}{G} * \frac{F}{E}$$

PIB par habitant

(consommation économique)

IDENTITÉ DE KAYA

$$GHG_{\text{émissions}} = P * \frac{G}{P} * \boxed{\frac{E}{G}} * \frac{F}{E}$$

intensité énergétique

(Quantité d'énergie par unité de production économique)

IDENTITÉ DE KAYA

$$GHG_{\text{émissions}} = P * \frac{G}{P} * \frac{E}{G} * \boxed{\frac{F}{E}}$$

intensité d'émissions de l'énergie

(usage des combustibles fossiles)

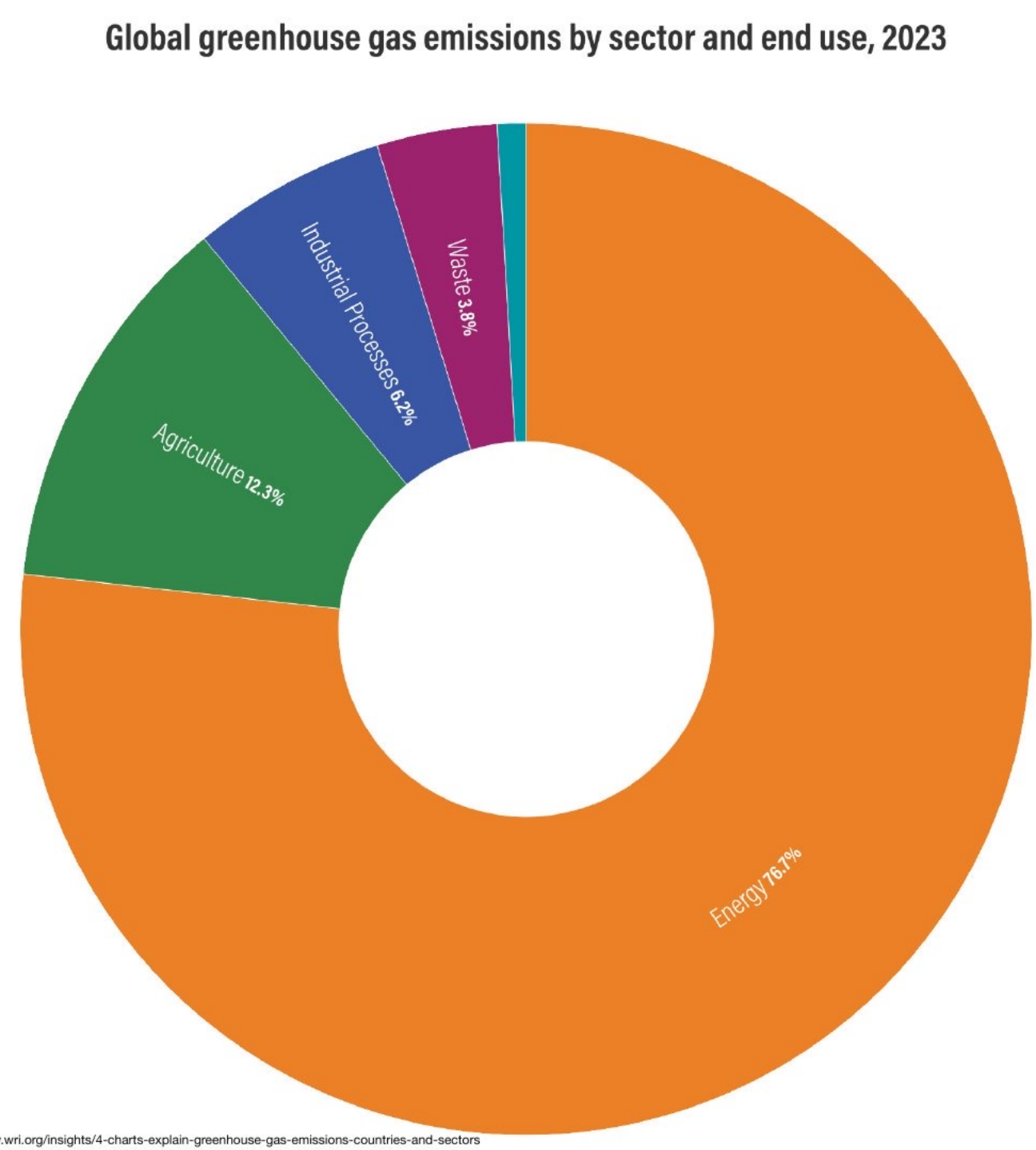
IDENTITÉ DE KAYA

$$GHG_{\text{émissions}} = P * \frac{G}{P} * \frac{E}{G} * \frac{F}{E}$$

réduire la consommation

améliorer l' efficacité

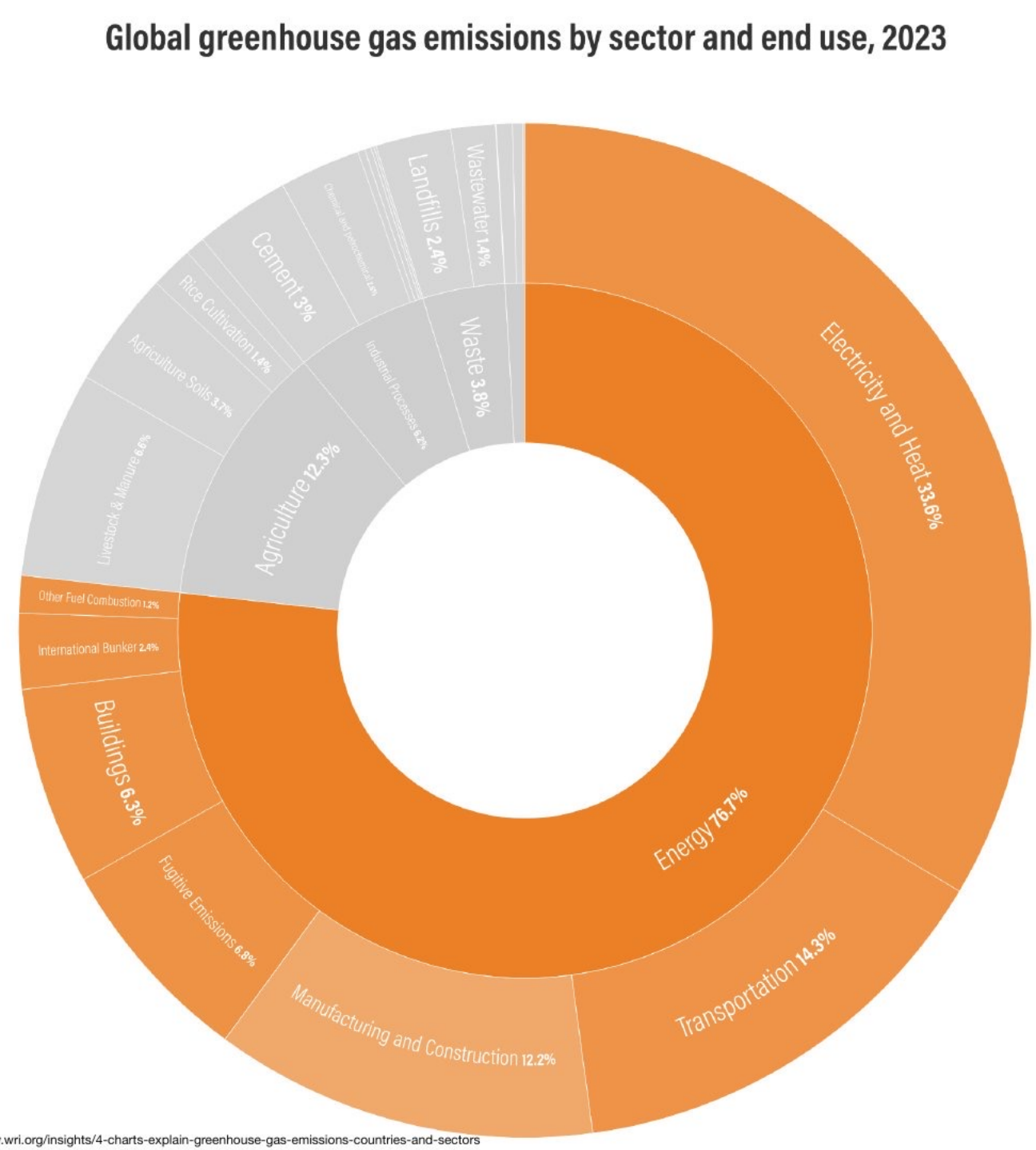
passer aux renouvelables



https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors

>76 % des émissions de GES viennent de l'usage final de l'énergie

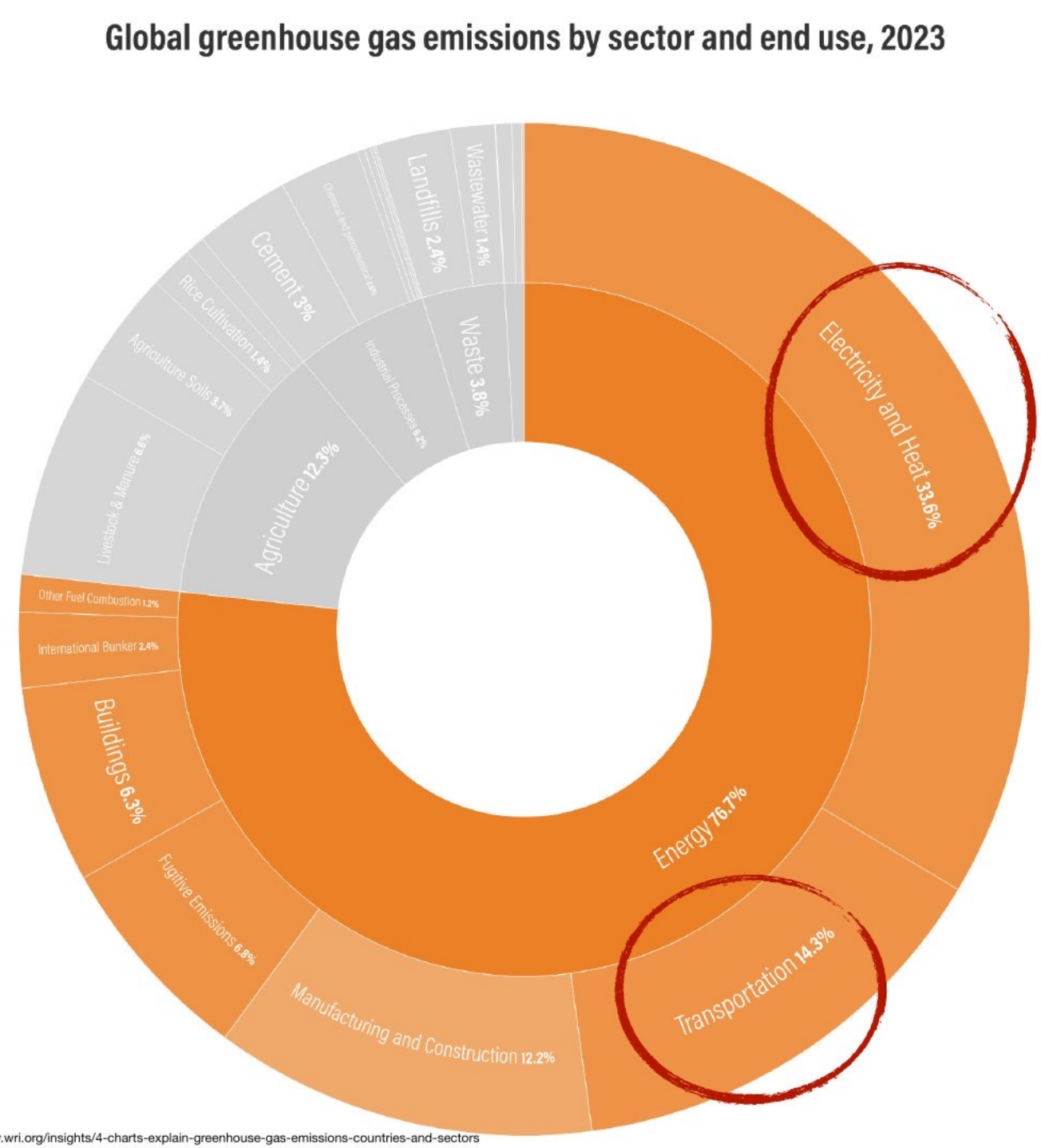
WORLD RESOURCES INSTITUTE



https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors

>76 % des émissions de GES viennent de l'énergie

WORLD RESOURCES INSTITUTE



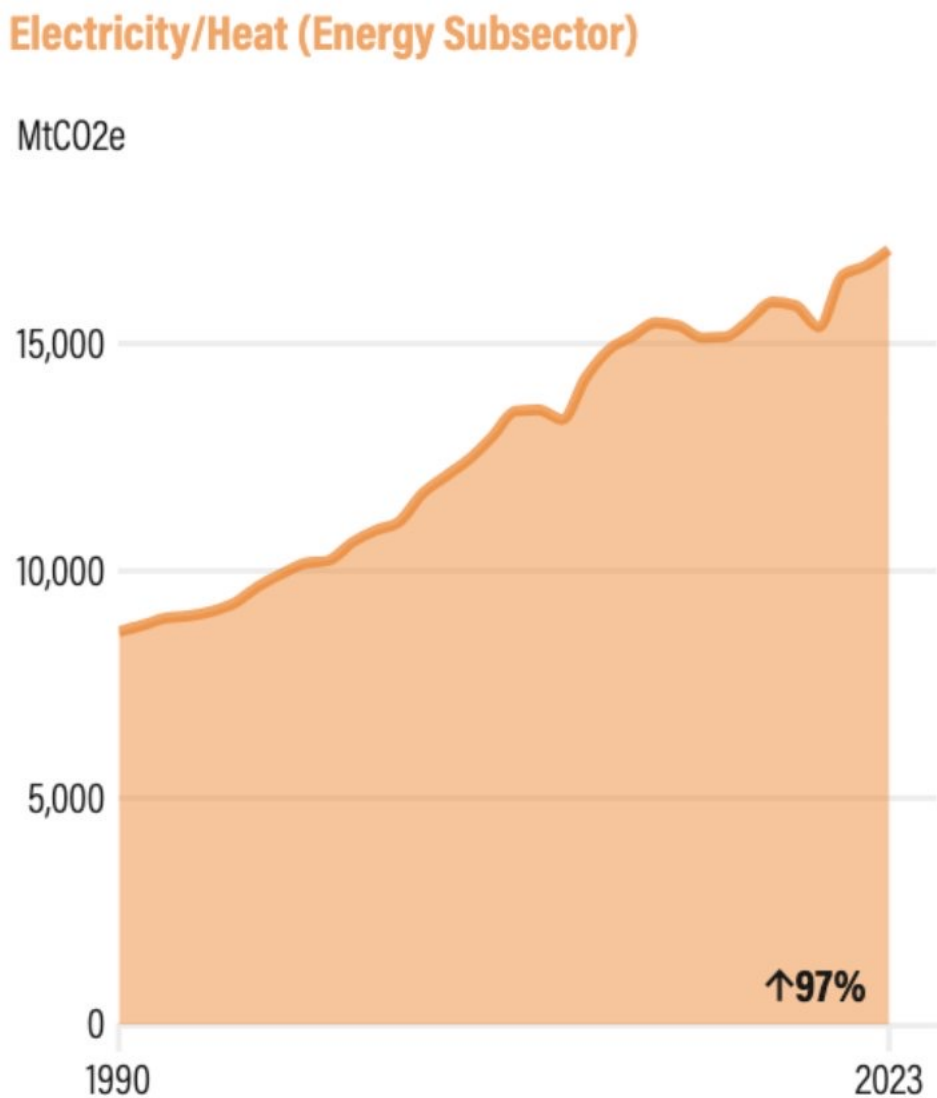
https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors

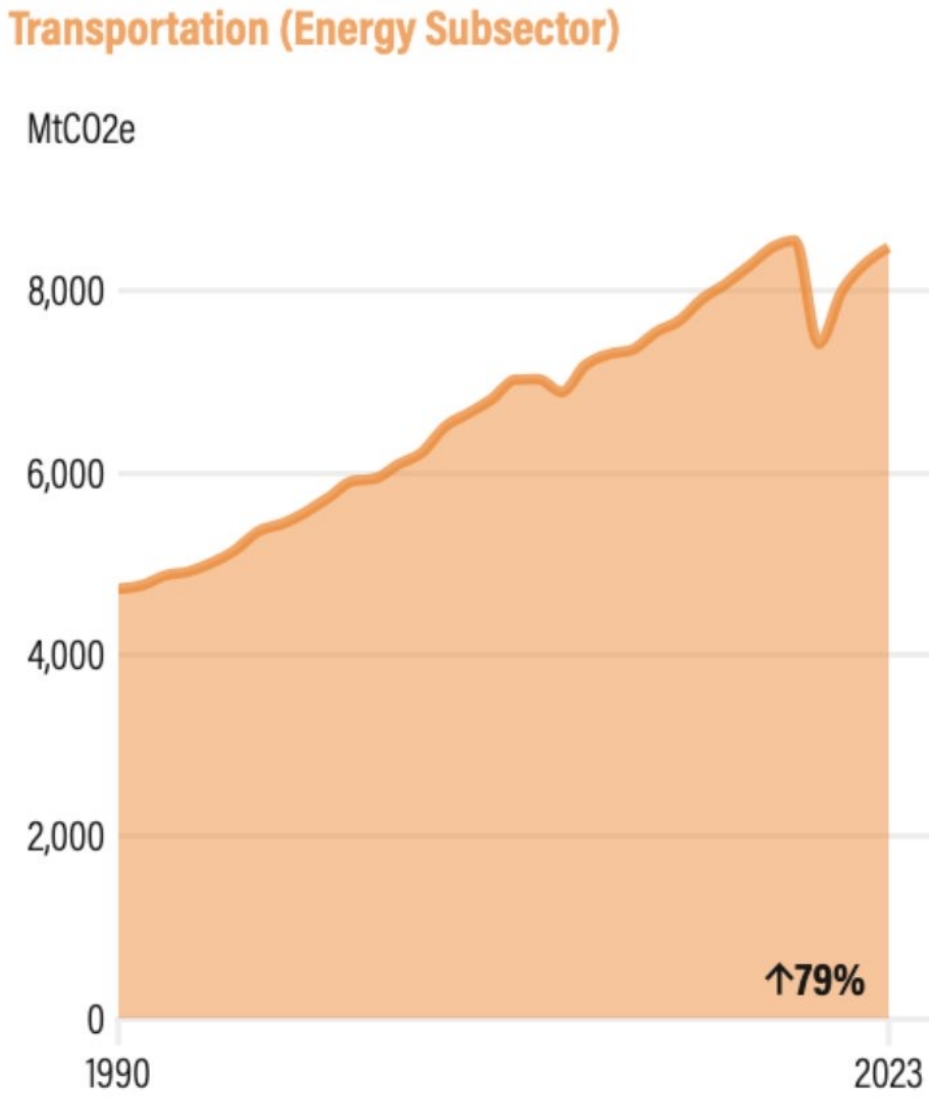
Électricité + chaleur et transports : principale composante des émissions liées à l'énergie

WORLD RESOURCES INSTITUTE

Trends in sectoral emissions, 1990-2023

Emissions for industrial processes, electricity/heat and transportation sectors are growing fastest



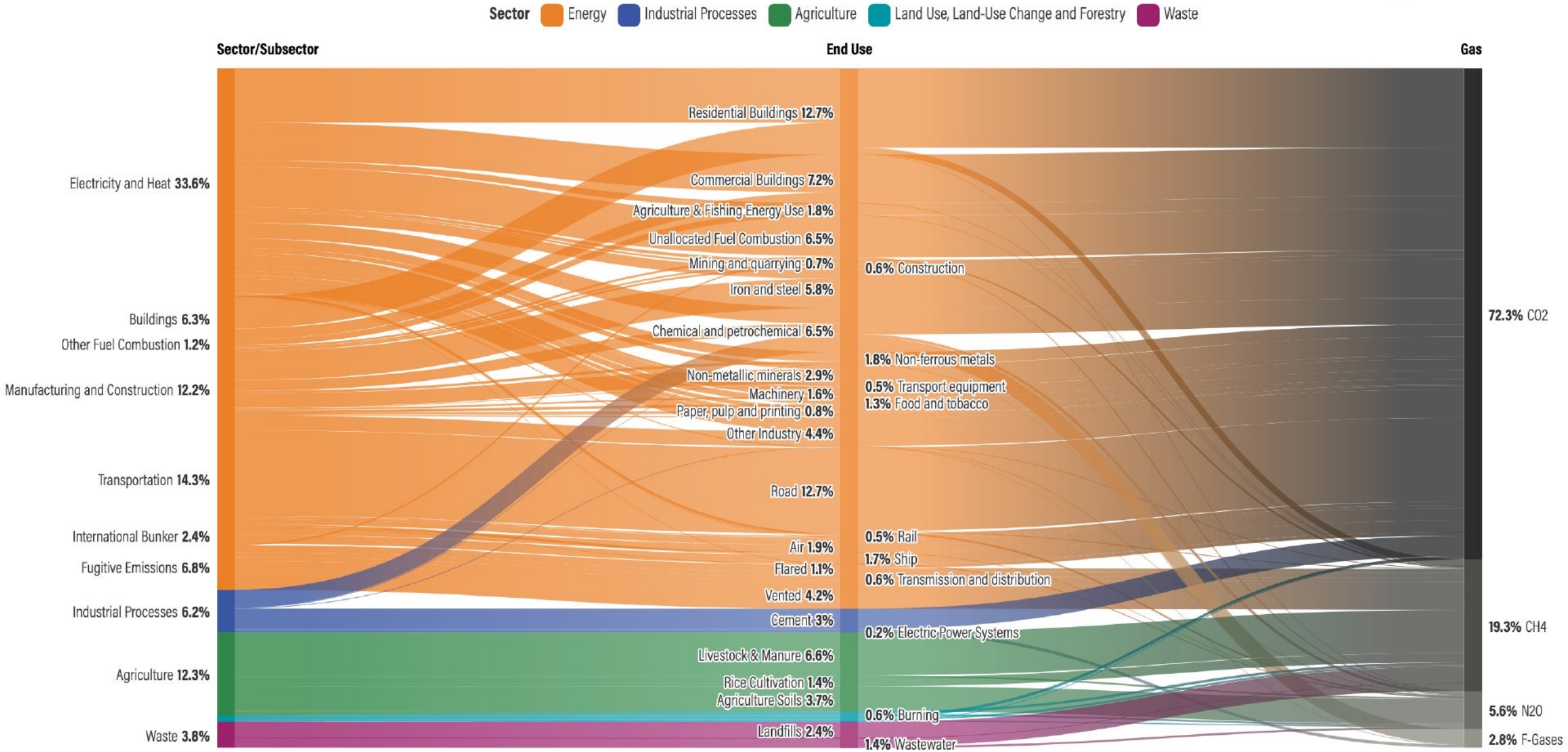


WORLD RESOURCES INSTITUTE

https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors

WORLD RESOURCES INSTITUTE

Flow of global greenhouse gas emissions in 2023



https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors

Agriculture, foresterie et autres usages des sols (AFAT)

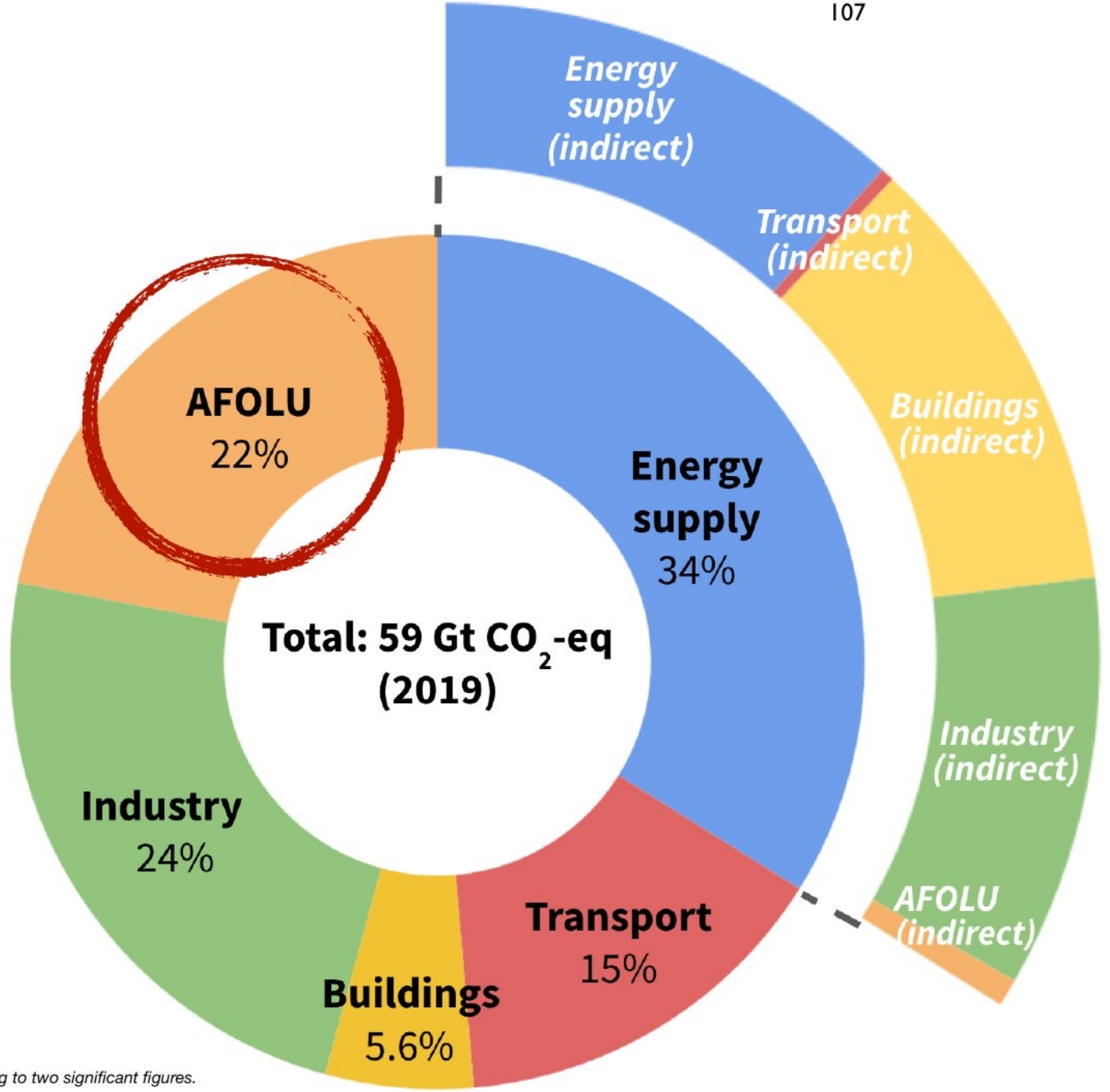
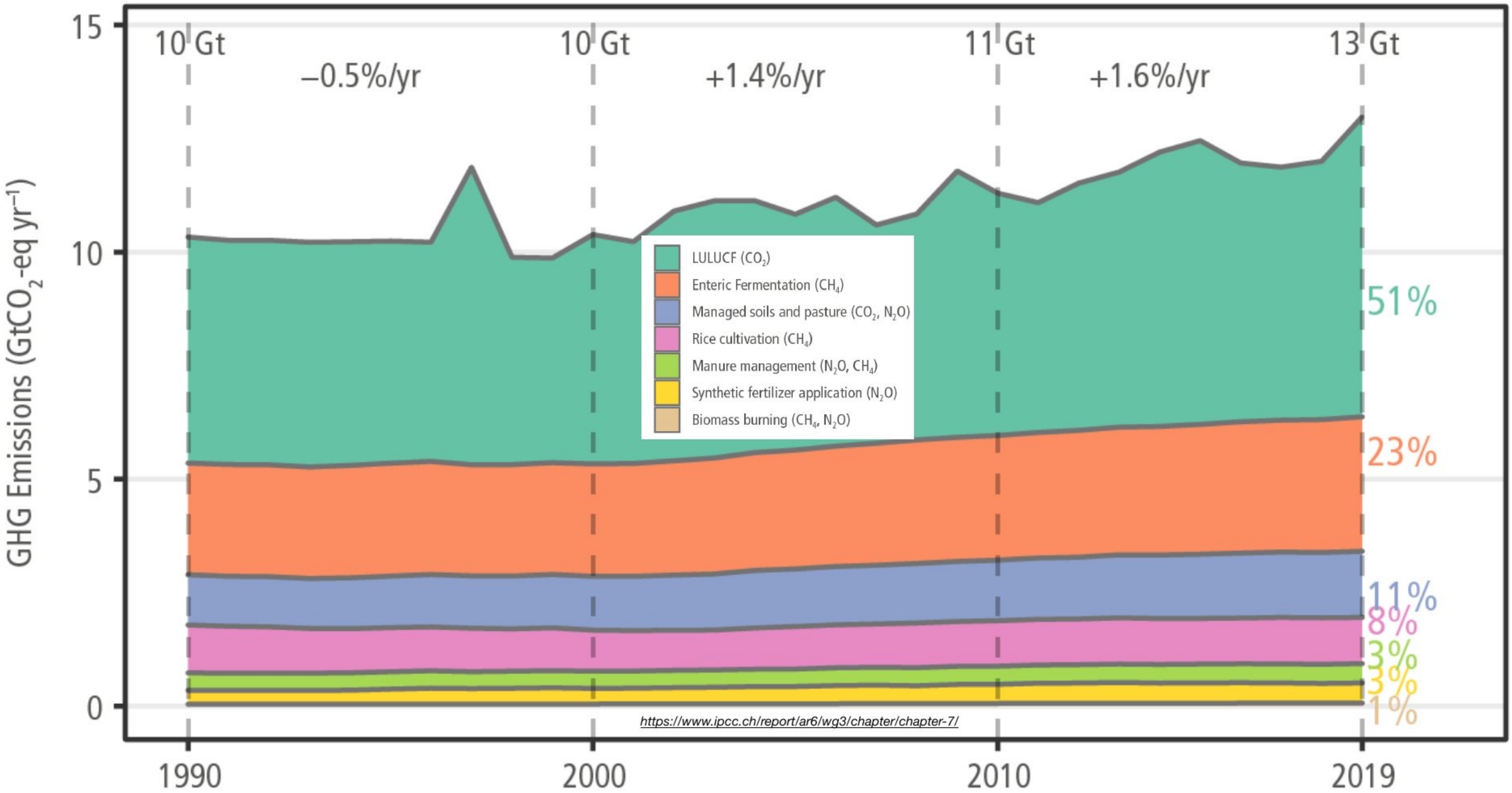


Figure data based on IPCC AR6 WG3 Report (2022). Percentages shown do not add to exactly 100% due to rounding to two significant figures.
Credit: Dr. Priya Donti

a. AFOLU global trends in GHG emissions and removals

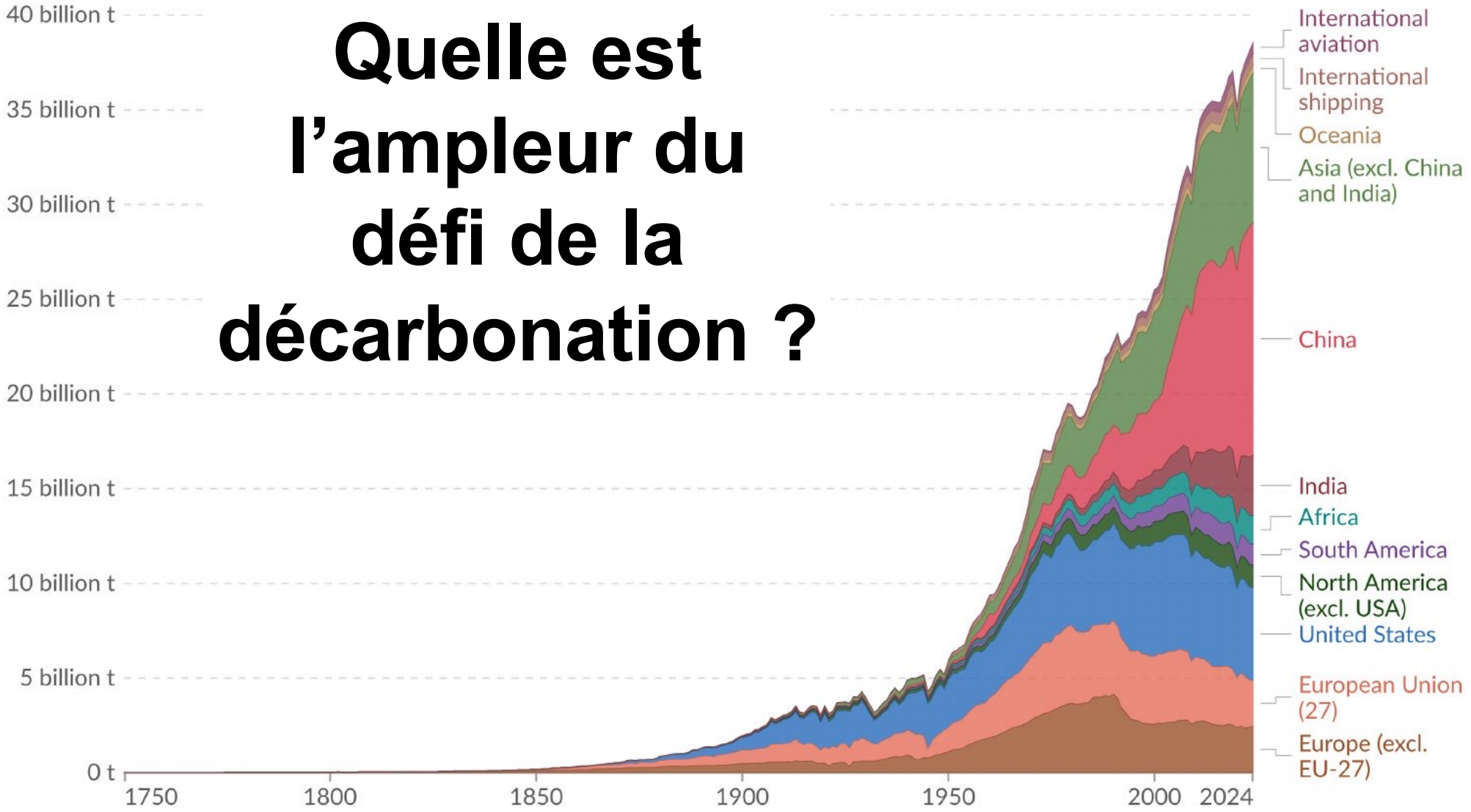


Annual CO_2 emissions by world region

Our World in Data

Emissions from fossil fuels and industry[1] are included, but not land-use change emissions[2]. International aviation and shipping are included as separate entities, as they are not included in any country's emissions.

Quelle est l'ampleur du défi de la décarbonation ?

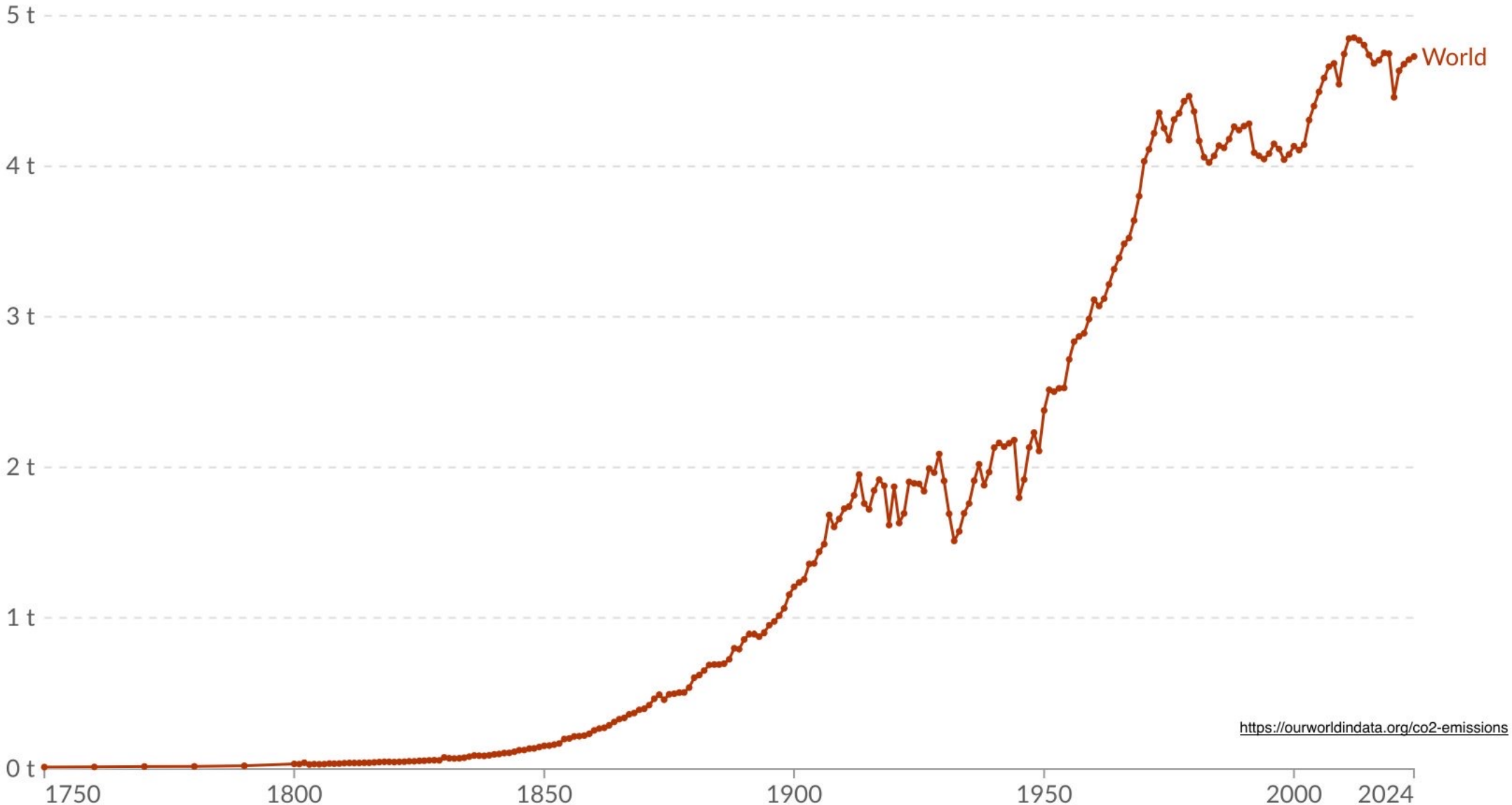


Data source: Global Carbon Budget (2025) https://ourworldindata.org/co2-emissions OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Our World in Data

CO_2 emissions per capita

Carbon dioxide (CO_2) emissions from burning fossil fuels and industrial processes[1]. This includes emissions from transport, electricity generation, and heating, but not land-use change[2].

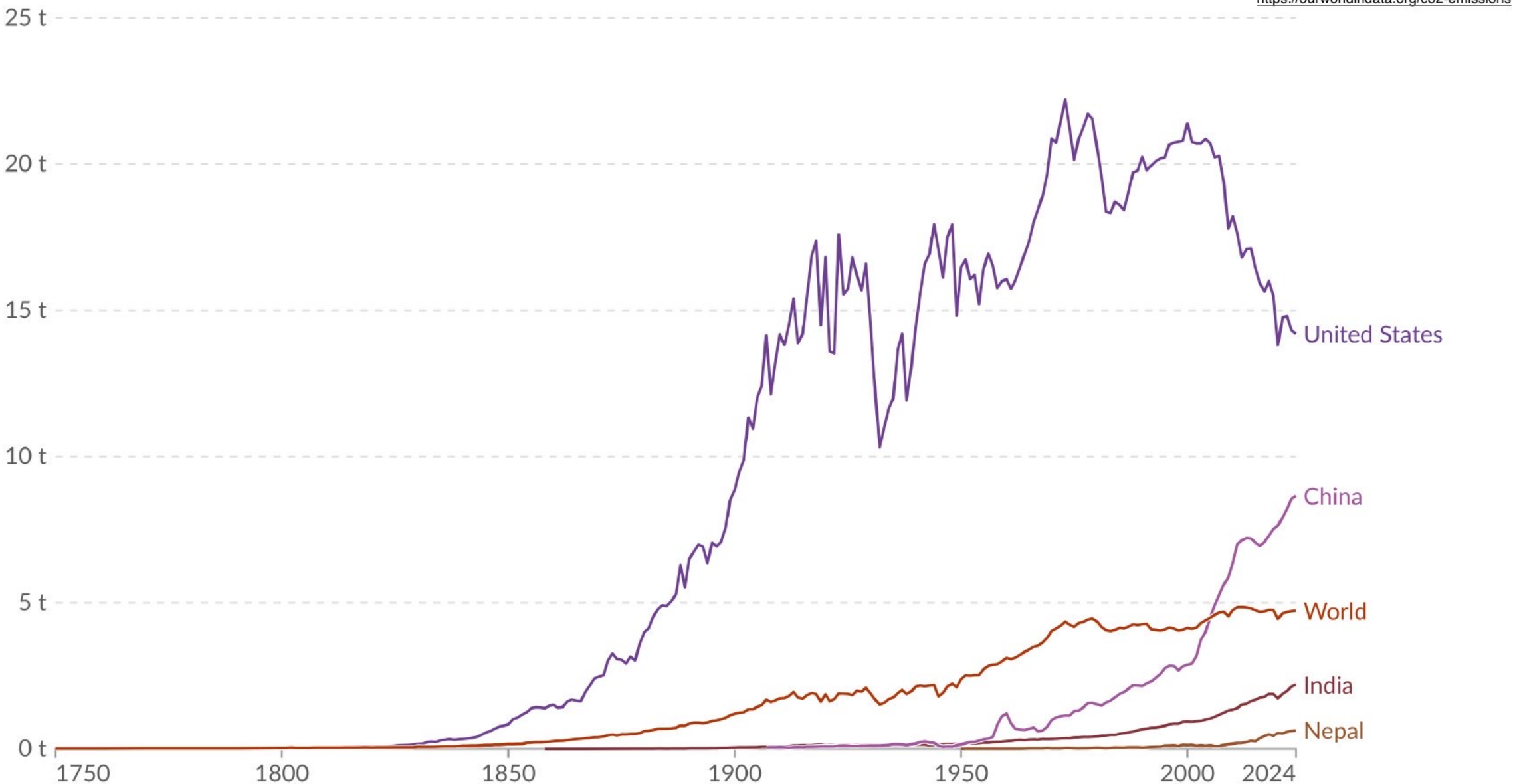


CO_2 emissions per capita

Carbon dioxide (CO_2) emissions from burning fossil fuels and industrial processes[1]. This includes emissions from transport, electricity generation, and heating, but not land-use change[2].

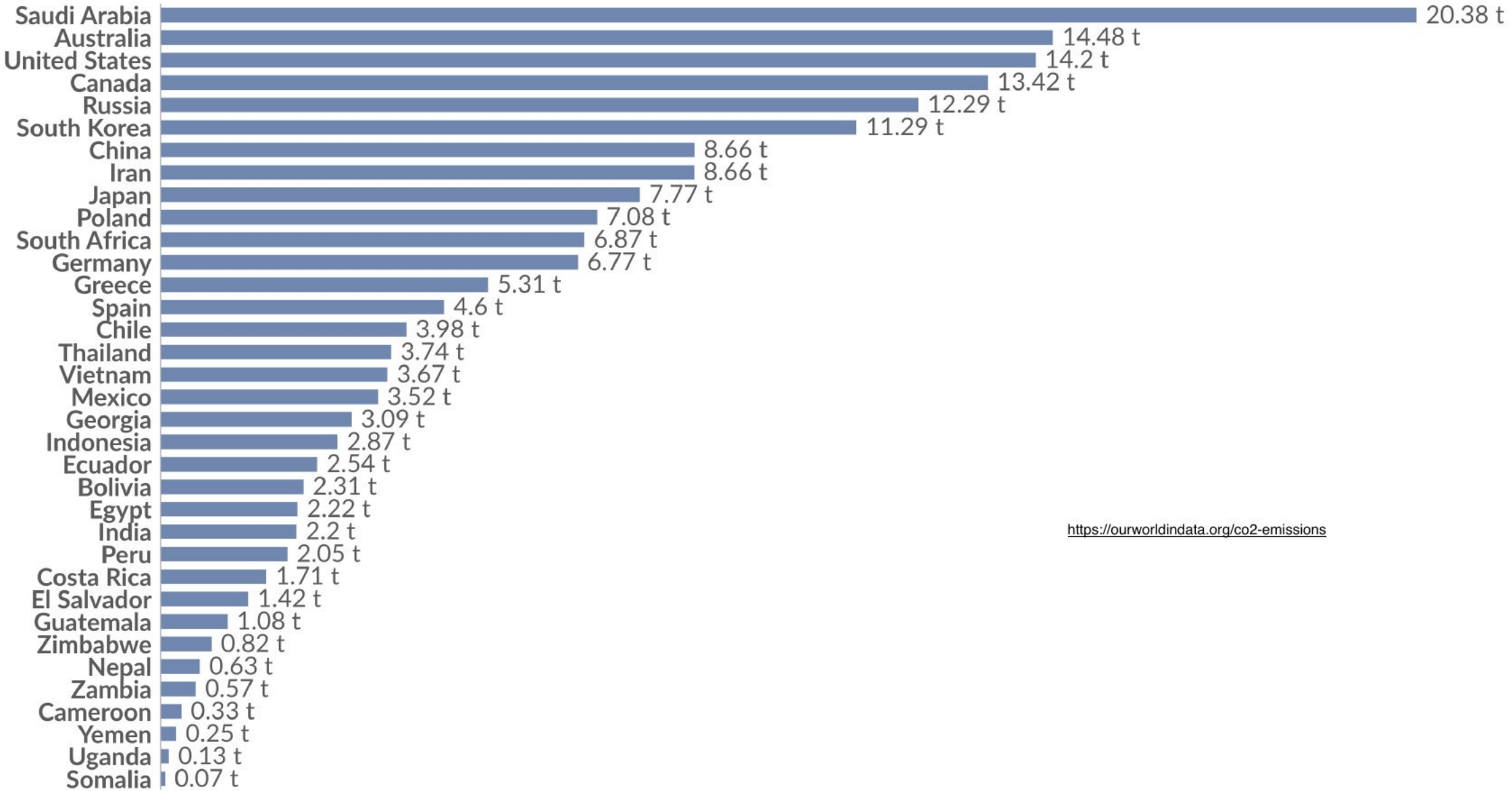
Our World in Data

https://ourworldindata.org/co2-emissions



CO_2 emissions per capita, 2024

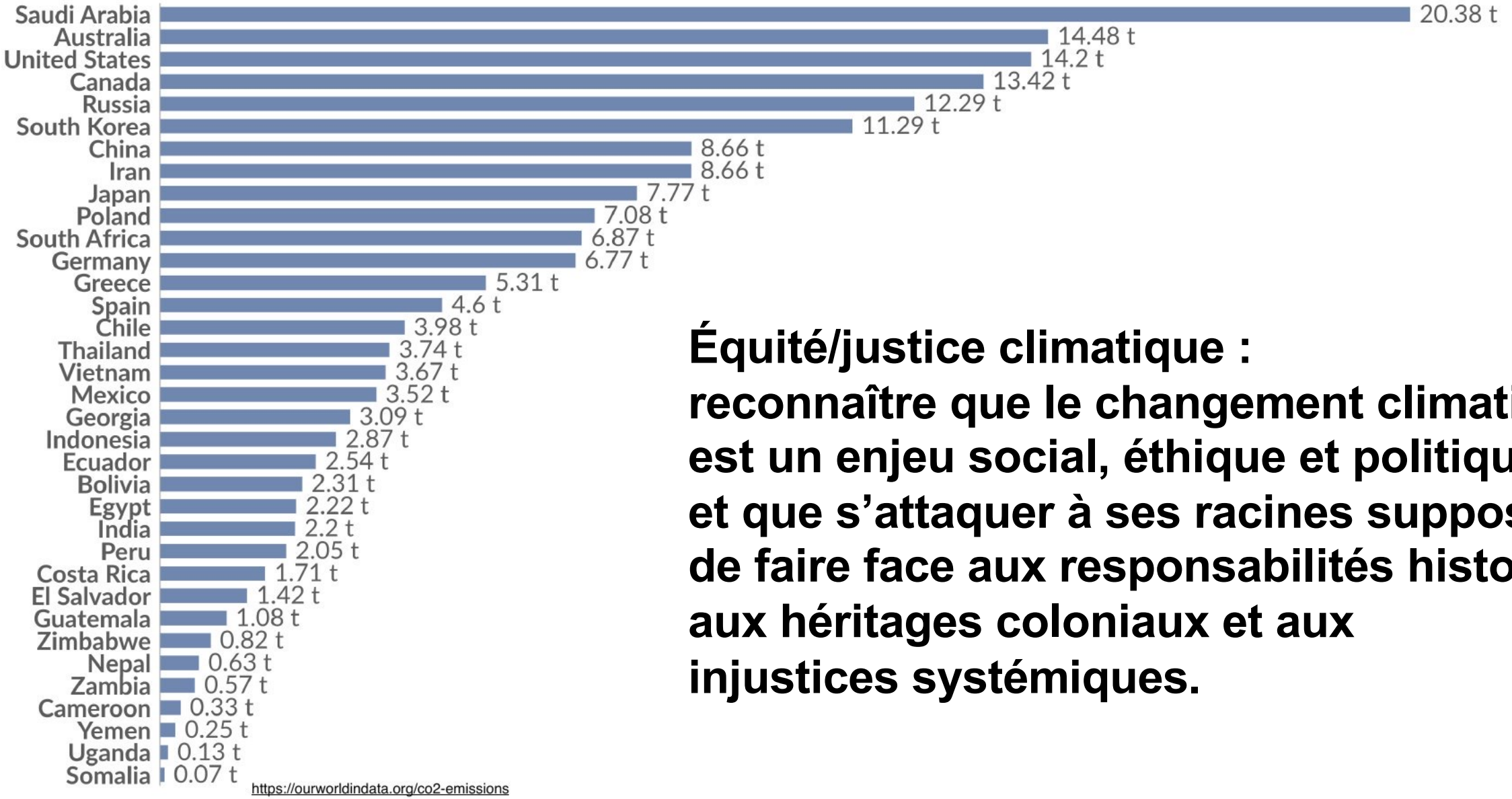
Carbon dioxide (CO_2) emissions from burning fossil fuels and industrial processes[1]. This includes emissions from transport, electricity generation, and heating, but not land-use change[2].



https://ourworldindata.org/co2-emissions

CO_2 emissions per capita, 2024

Carbon dioxide (CO_2) emissions from burning fossil fuels and industrial processes[1]. This includes emissions from transport, electricity generation, and heating, but not land-use change[2].



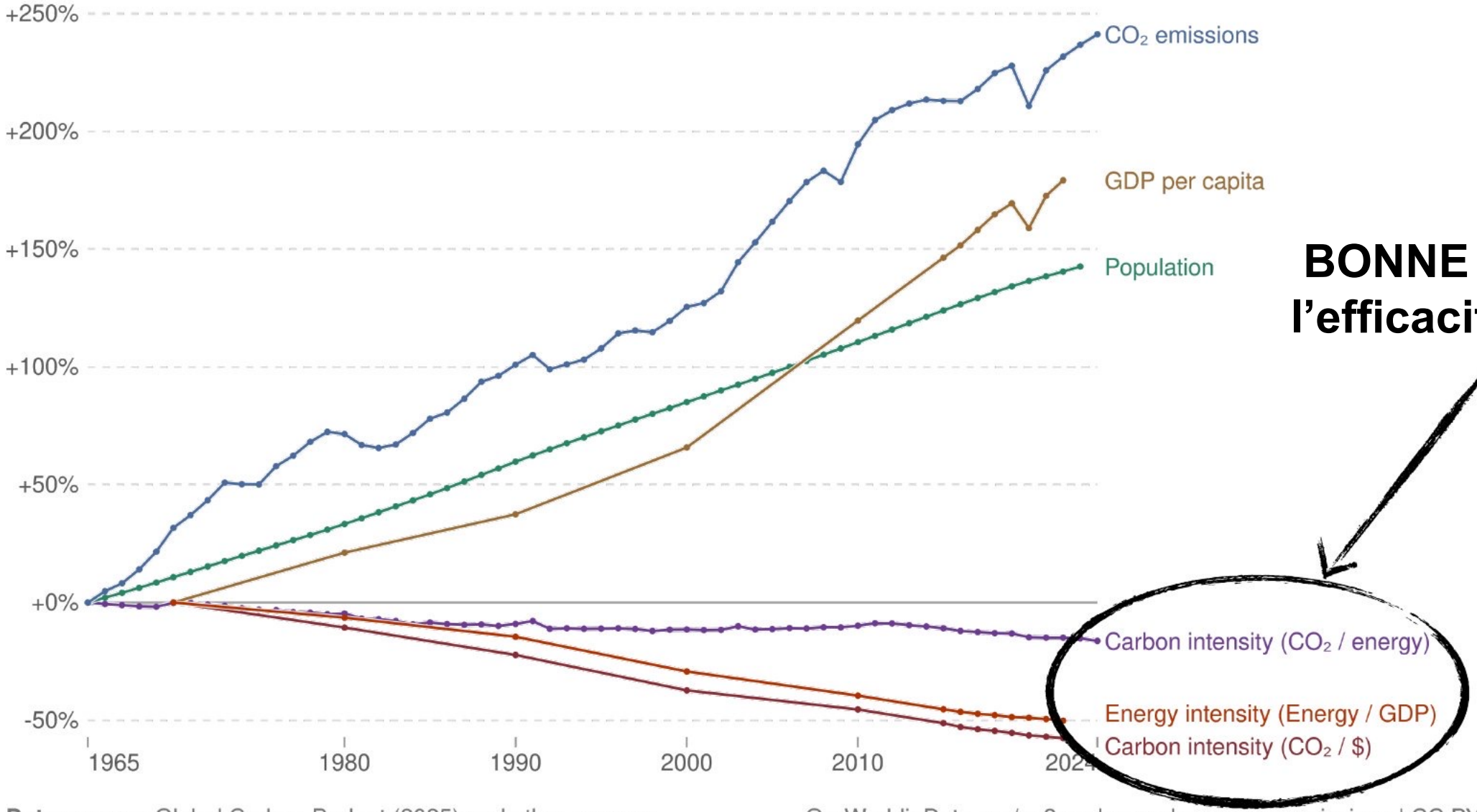
https://ourworldindata.org/co2-emissions

Équité/justice climatique : reconnaître que le changement climatique est un enjeu social, éthique et politique, et que s'attaquer à ses racines suppose de faire face aux responsabilités historiques, aux héritages coloniaux et aux injustices systémiques.

Kaya identity: drivers of CO_2 emissions, World

Our World in Data

Percentage change in the four parameters of the Kaya Identity, which determine total CO_2 emissions. Emissions from fossil fuels and industry are included. Land-use change emissions are not included.



BONNE NOUVELLE
l'efficacité augmente

Data source: Global Carbon Budget (2025) and other sources

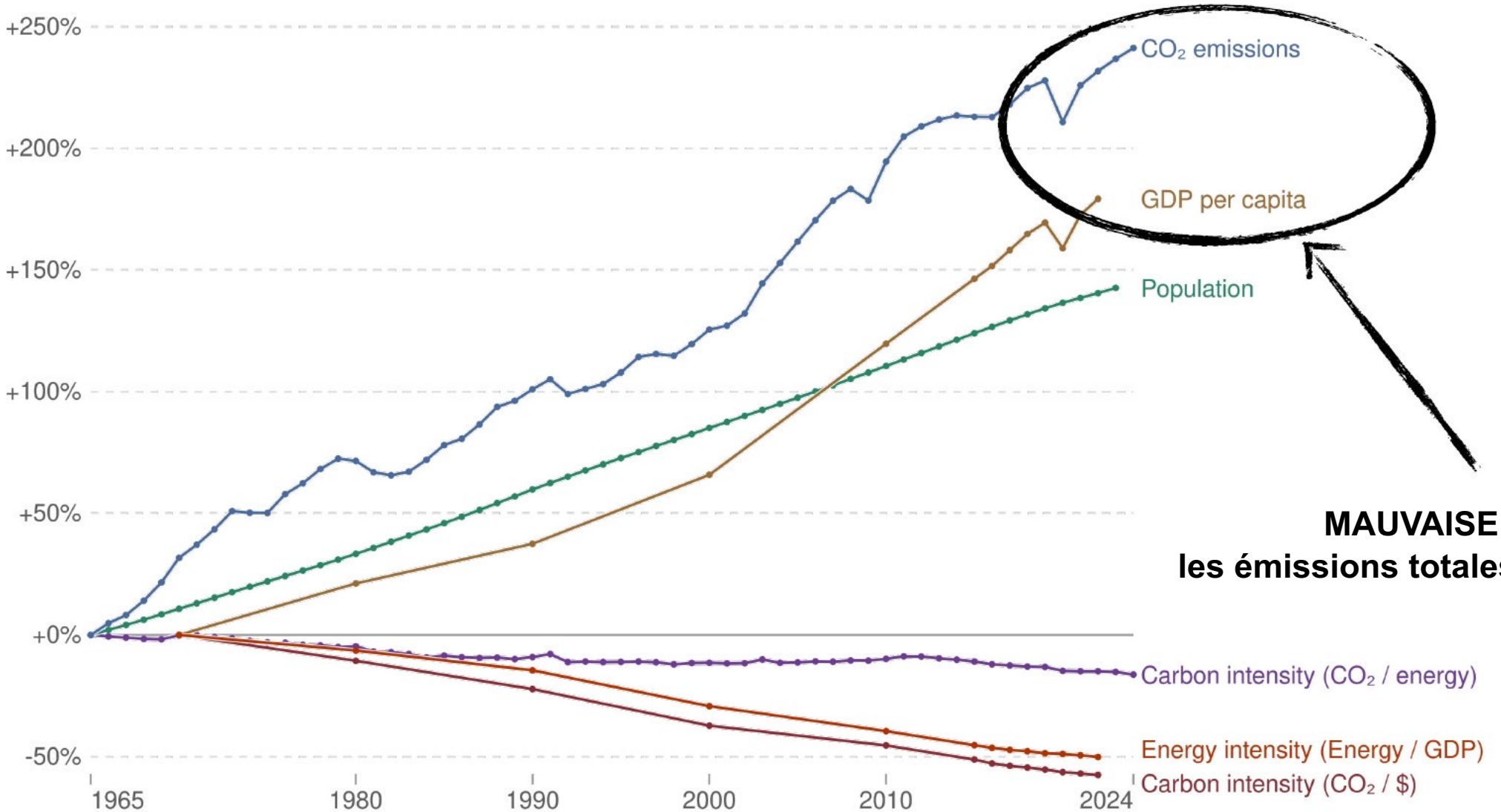
OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Note: GDP per capita is measured in 2011 international-$ (PPP). This adjusts for inflation and cross-country price differences.

Kaya identity: drivers of CO_2 emissions, World

Our World in Data

Percentage change in the four parameters of the Kaya Identity, which determine total CO_2 emissions. Emissions from fossil fuels and industry are included. Land-use change emissions are not included.



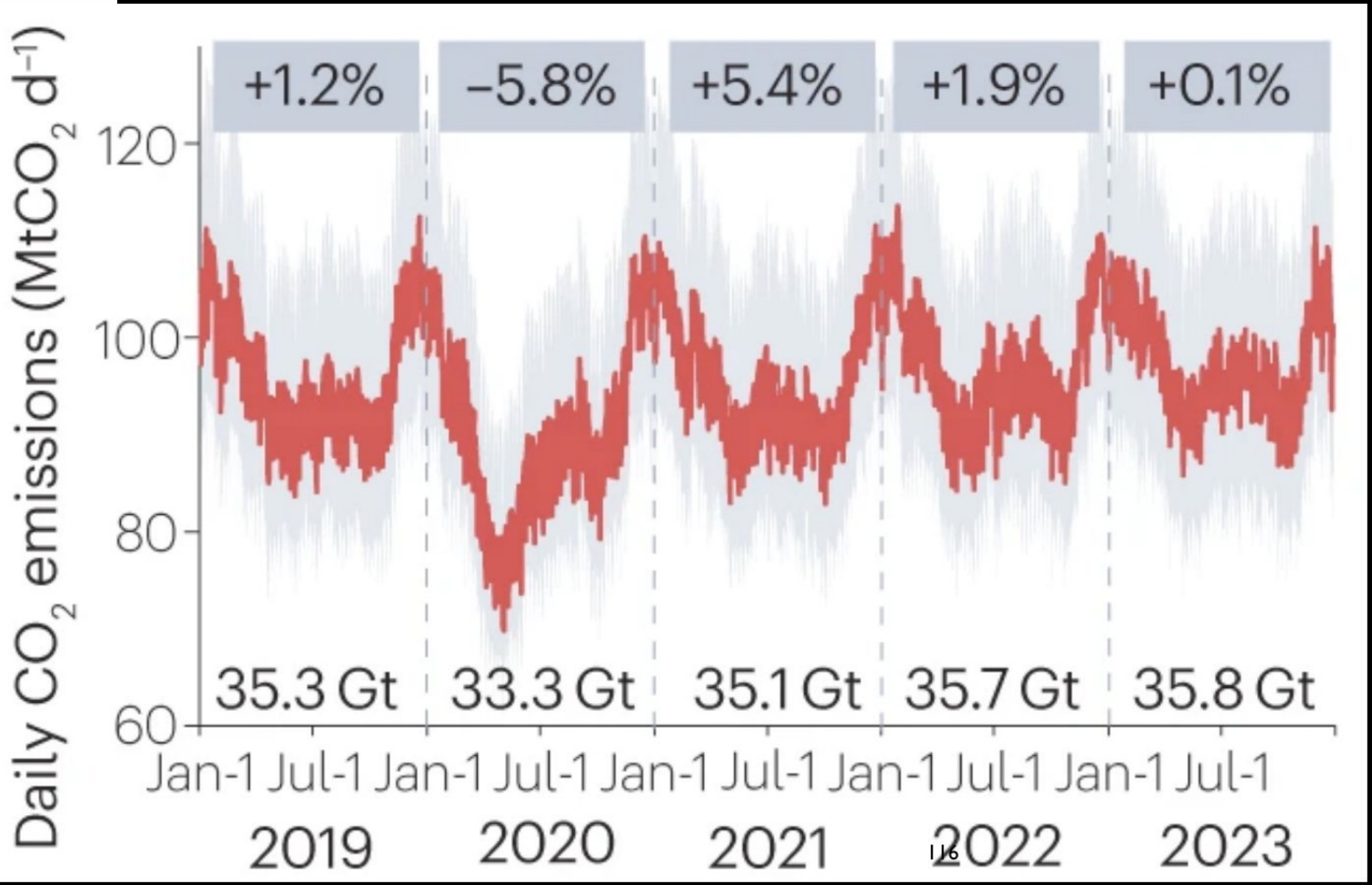
MAUVAISE NOUVELLE
les émissions totales augmentent encore

Data source: Global Carbon Budget (2025) and other sources

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Note: GDP per capita is measured in 2011 international-$ (PPP). This adjusts for inflation and cross-country price differences.

L’ampleur du défi



COVID

Baisse des émissions de 5,8 % seulement sur un an

https://www.nature.com/articles/s43017-024-00532-2#Sec3

L'Accord de Paris (COP 21, déc. 2015)

« L'objectif central de l'Accord de Paris est de renforcer la riposte mondiale à la menace du changement climatique en maintenant la hausse de la température mondiale ce siècle bien en dessous de 2 degrés Celsius au-dessus des niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour la limiter encore davantage, à 1,5 degré Celsius. »

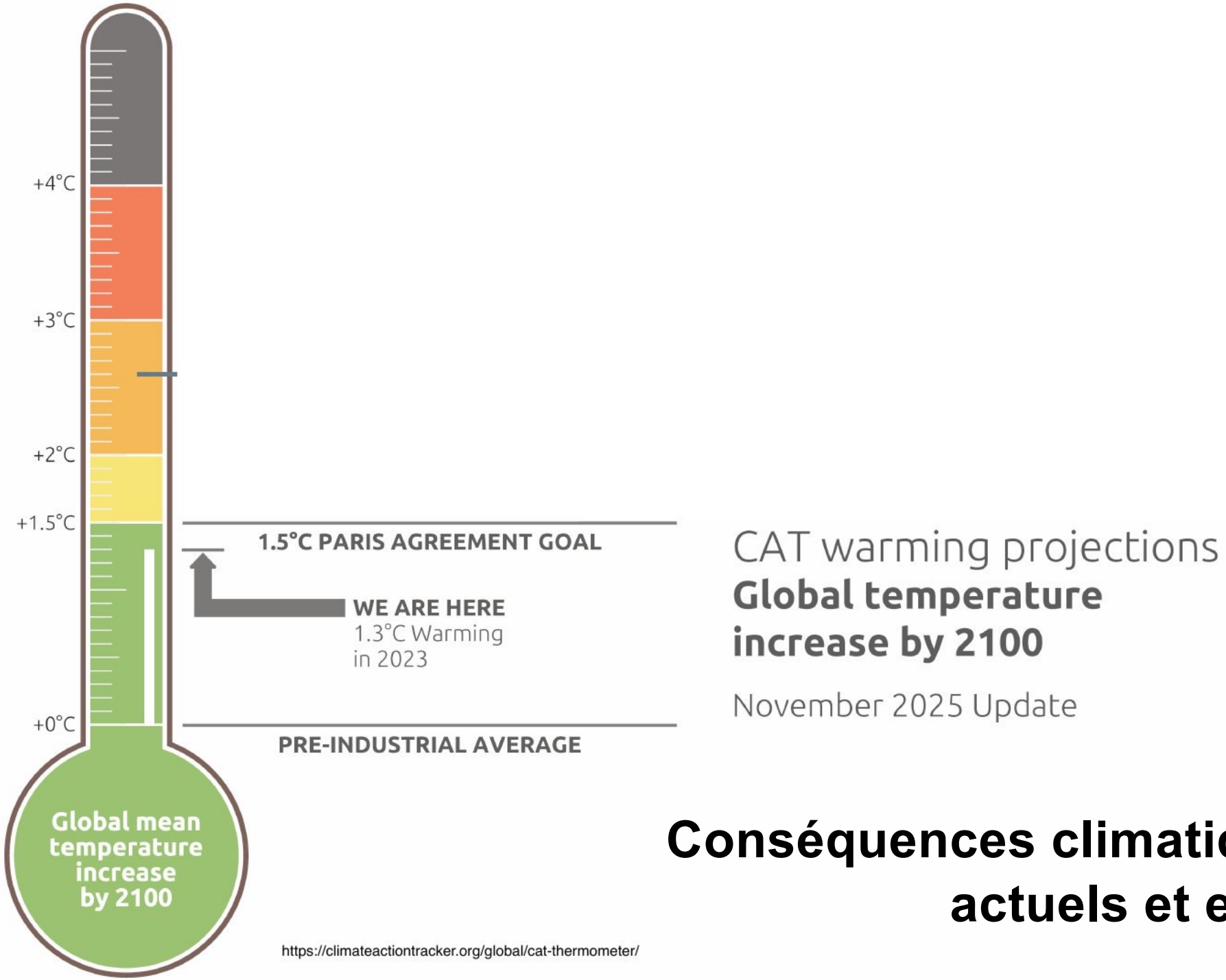
La limite des 2° vient de l'économiste de Yale William Nordhaus dans son article de 1975 : « Can We Control Carbon Dioxide? »

Fondée sur l'idée qu'il serait raisonnable de maintenir le changement climatique dans les limites de la « variation normale »

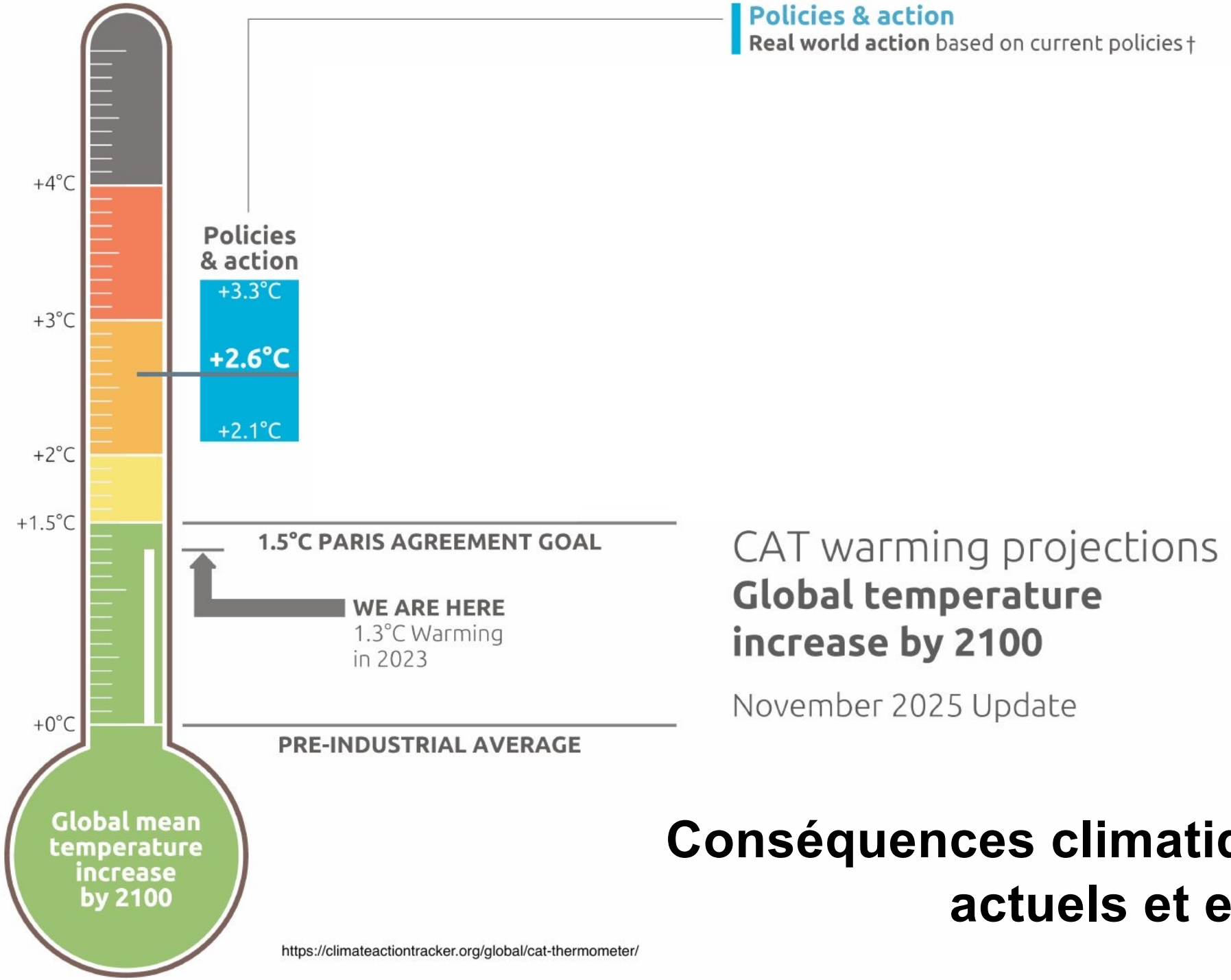
Nordhaus a souligné que son raisonnement était « profondément insatisfaisant »

http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

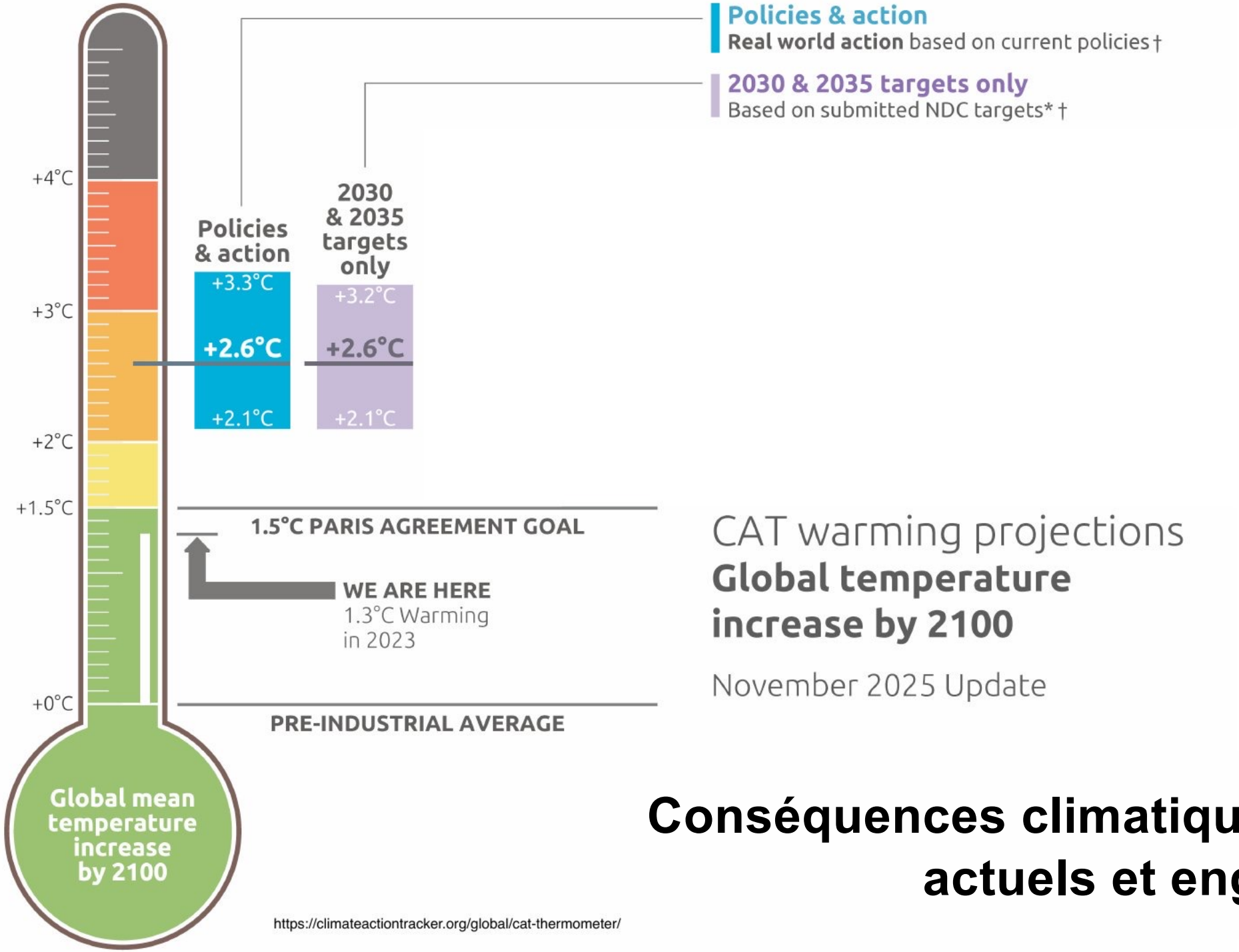
http://theconversation.com/why-is-climate-changes-2-degrees-celsius-of-warming-limit-so-important-82058



Conséquences climatiques des scénarios actuels et engagés

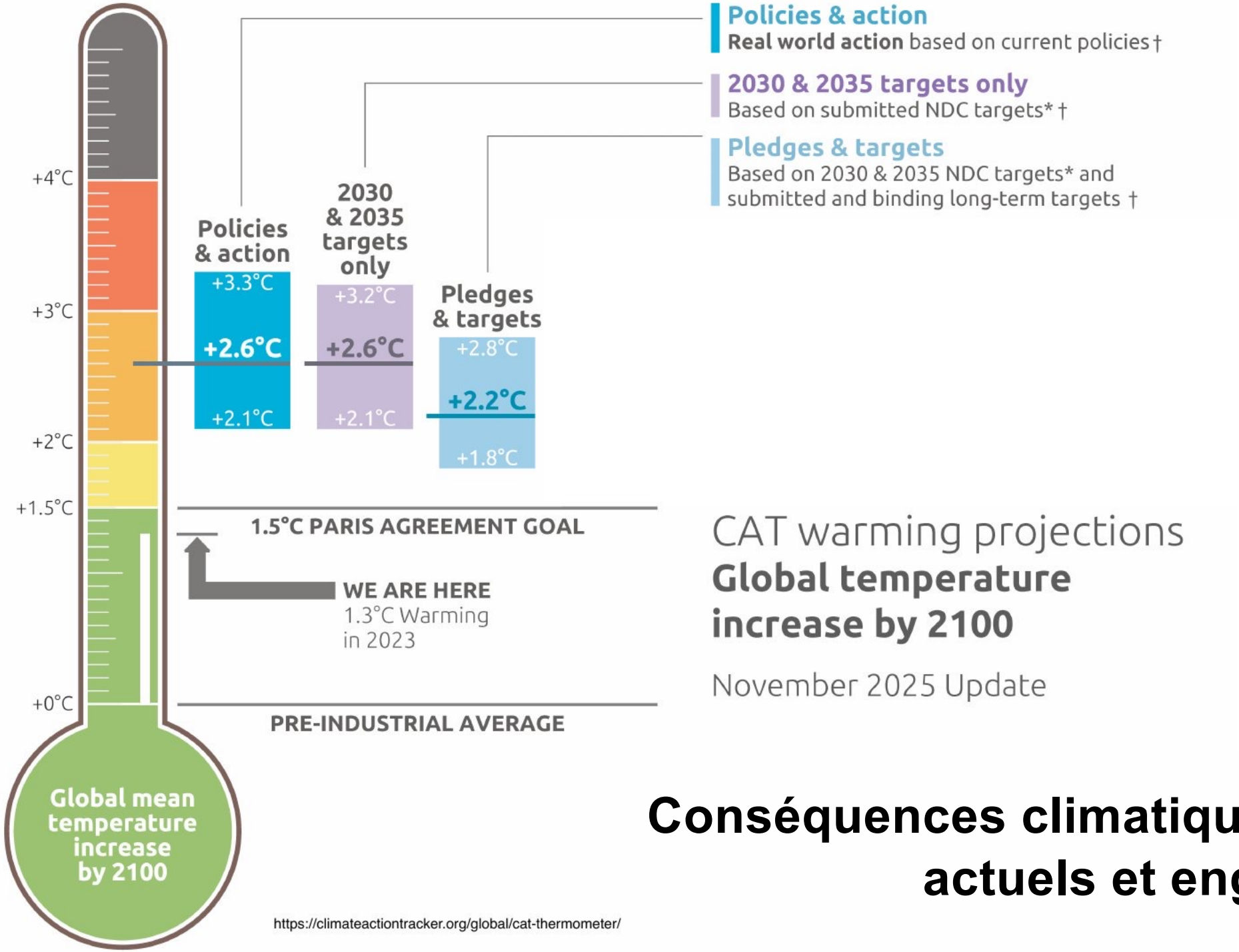


Conséquences climatiques des scénarios actuels et engagés



https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/

Conséquences climatiques des scénarios actuels et engagés

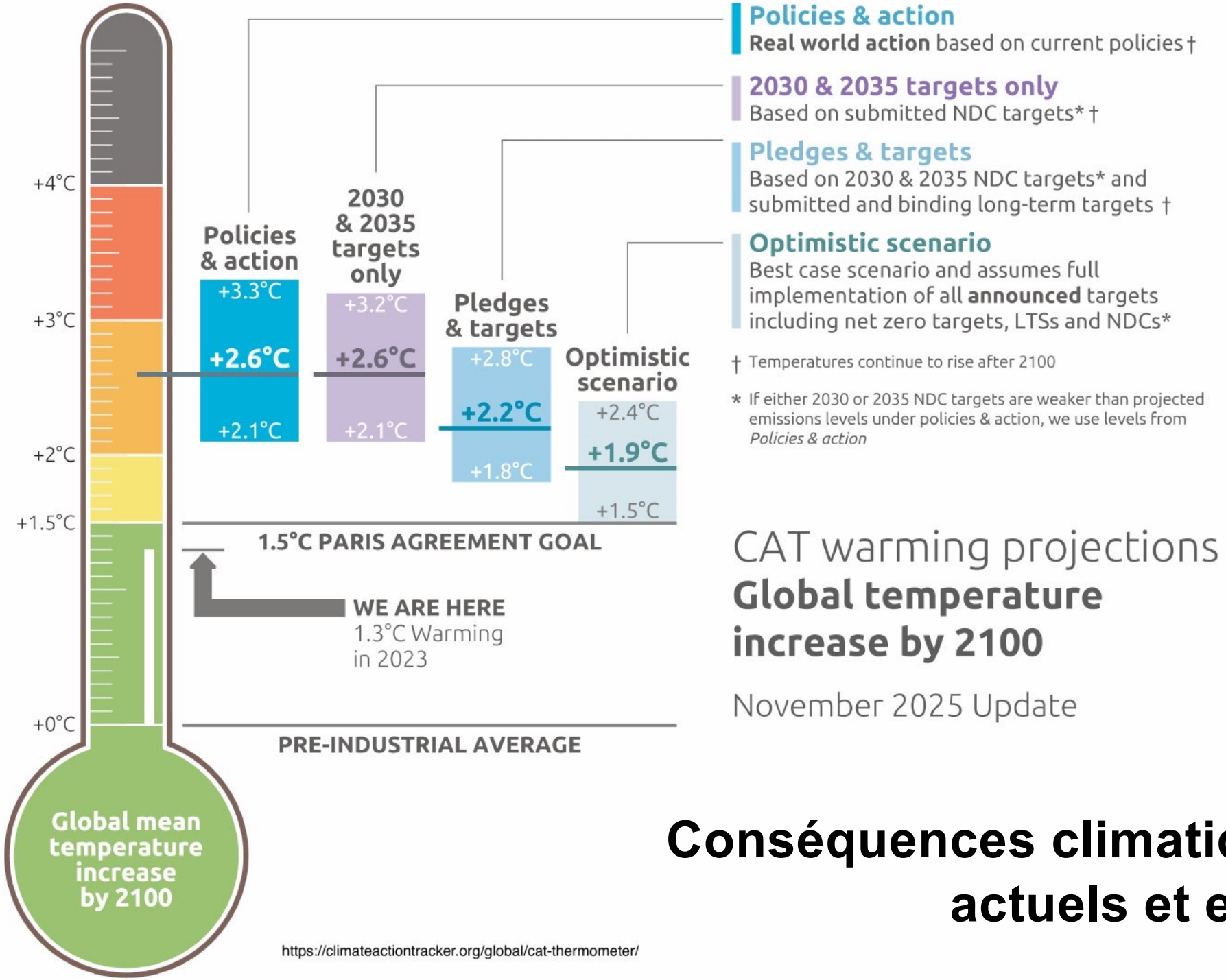


CAT warming projections
Global temperature increase by 2100

November 2025 Update

https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/

Conséquences climatiques des scénarios actuels et engagés



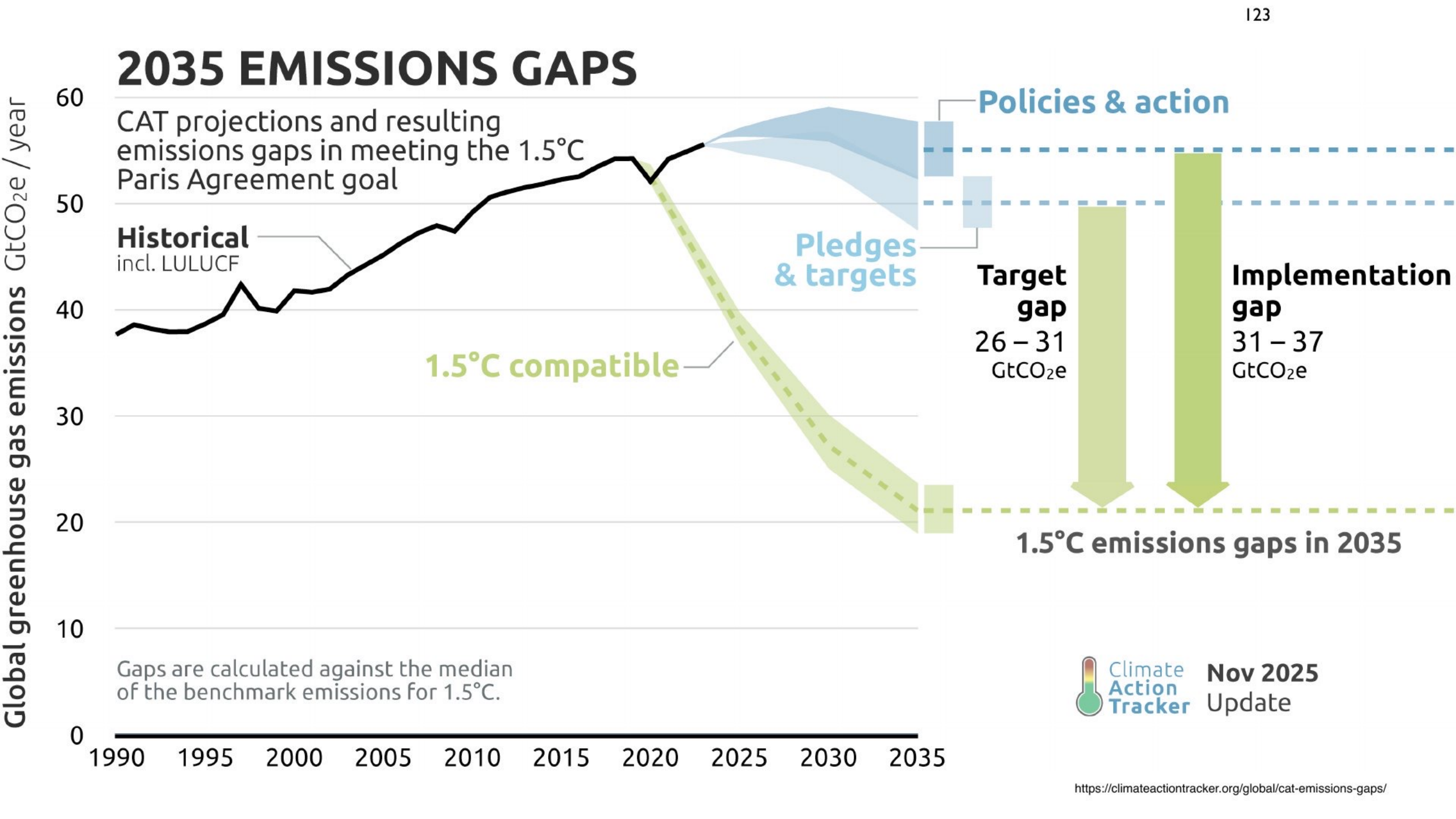
CAT warming projections

Global temperature increase by 2100

November 2025 Update

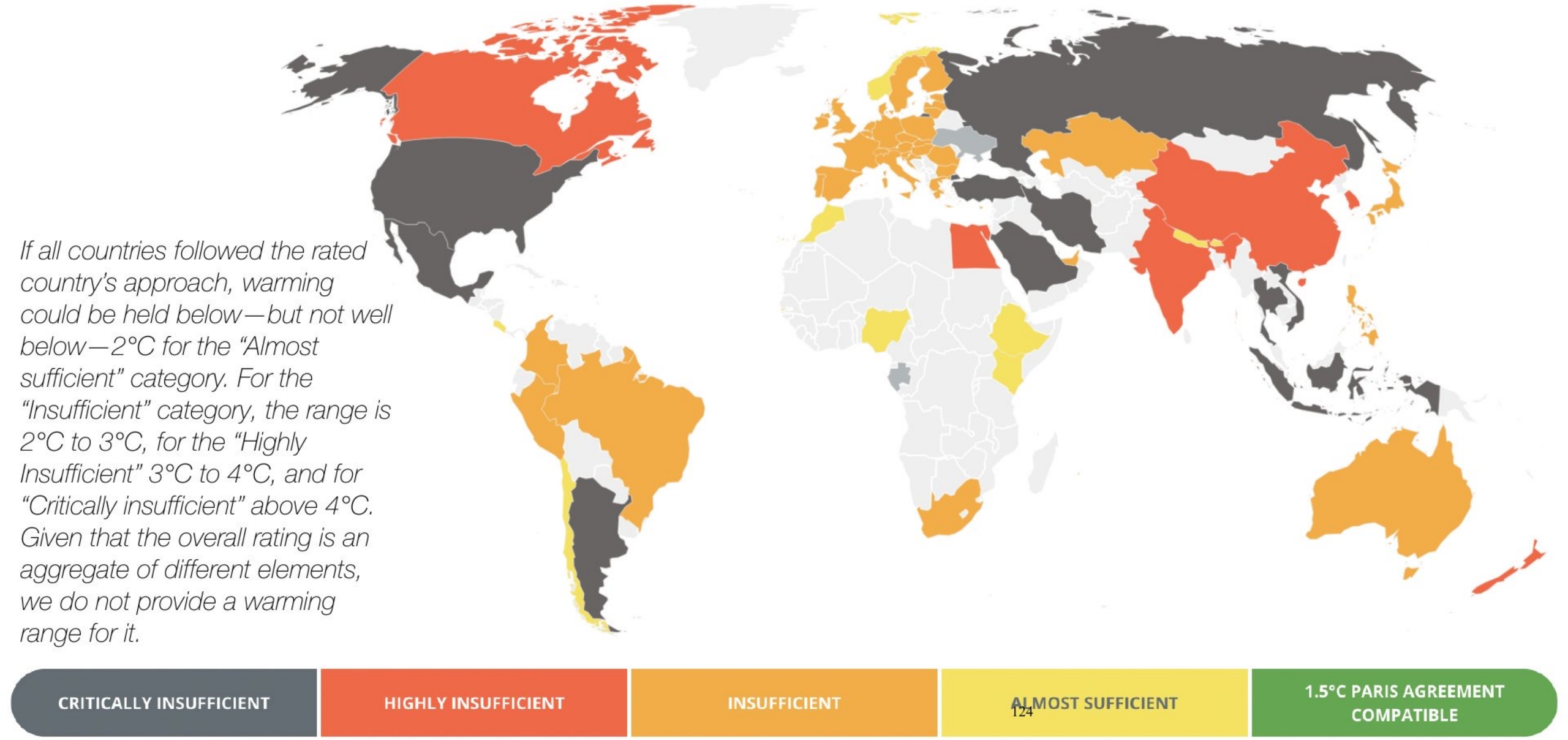
https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/

Conséquences climatiques des scénarios actuels et engagés



https://climateactiontracker.org/global/cat-emissions-gaps/

Pays : contributions proposées



http://climateactiontracker.org/countries.html

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

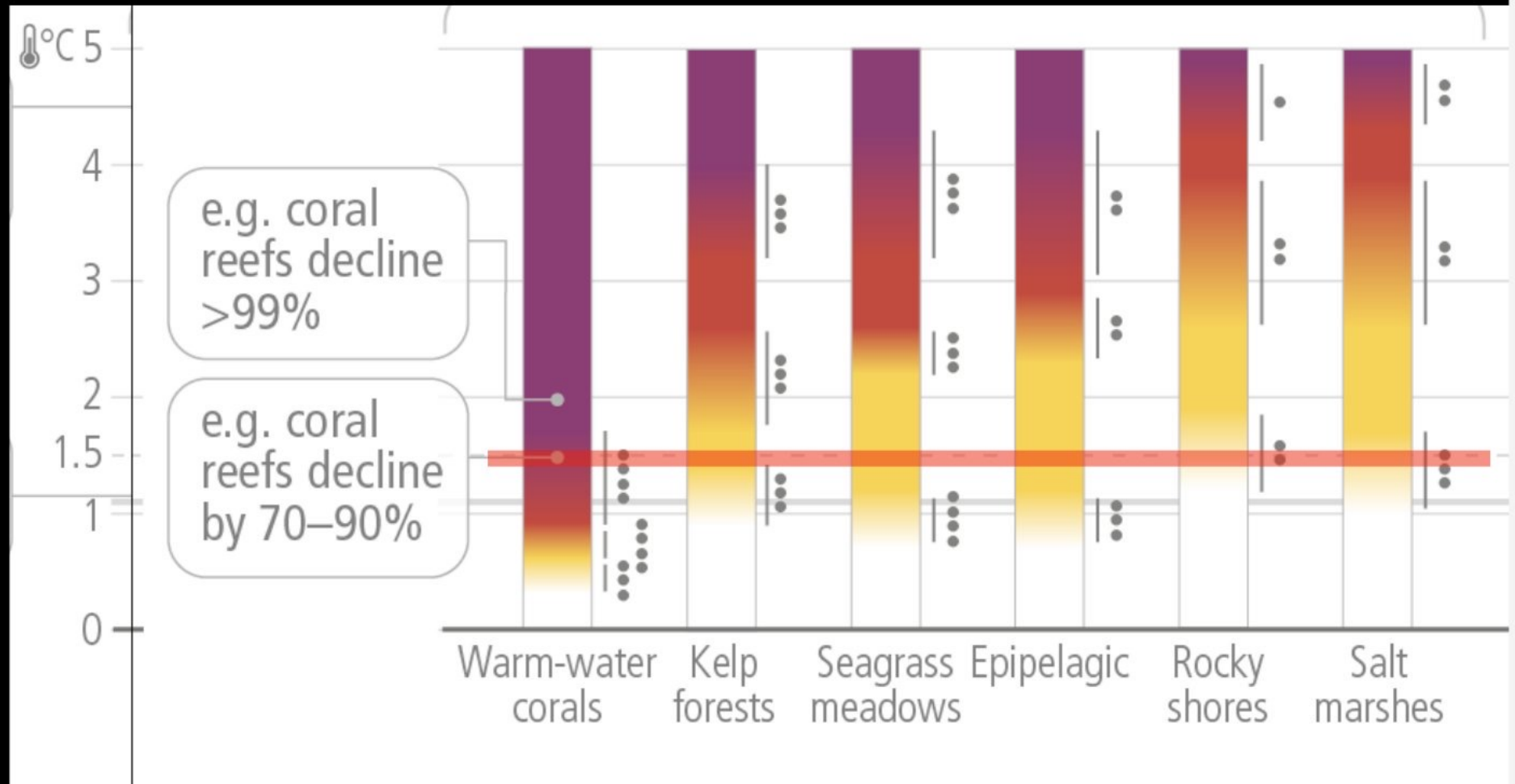
ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Robustesse : résister à toute une série d'issues sans impact ou presque

Résilience : se rétablir vite après un impact

TOUT réchauffement évité est un réchauffement

auquel on n'aura pas à s'adapter
(même si on n'atteint pas les objectifs de Paris)



risk is the potential for adverse consequences

Risk/impact
- Very high
- High
- Moderate
- Undetectable

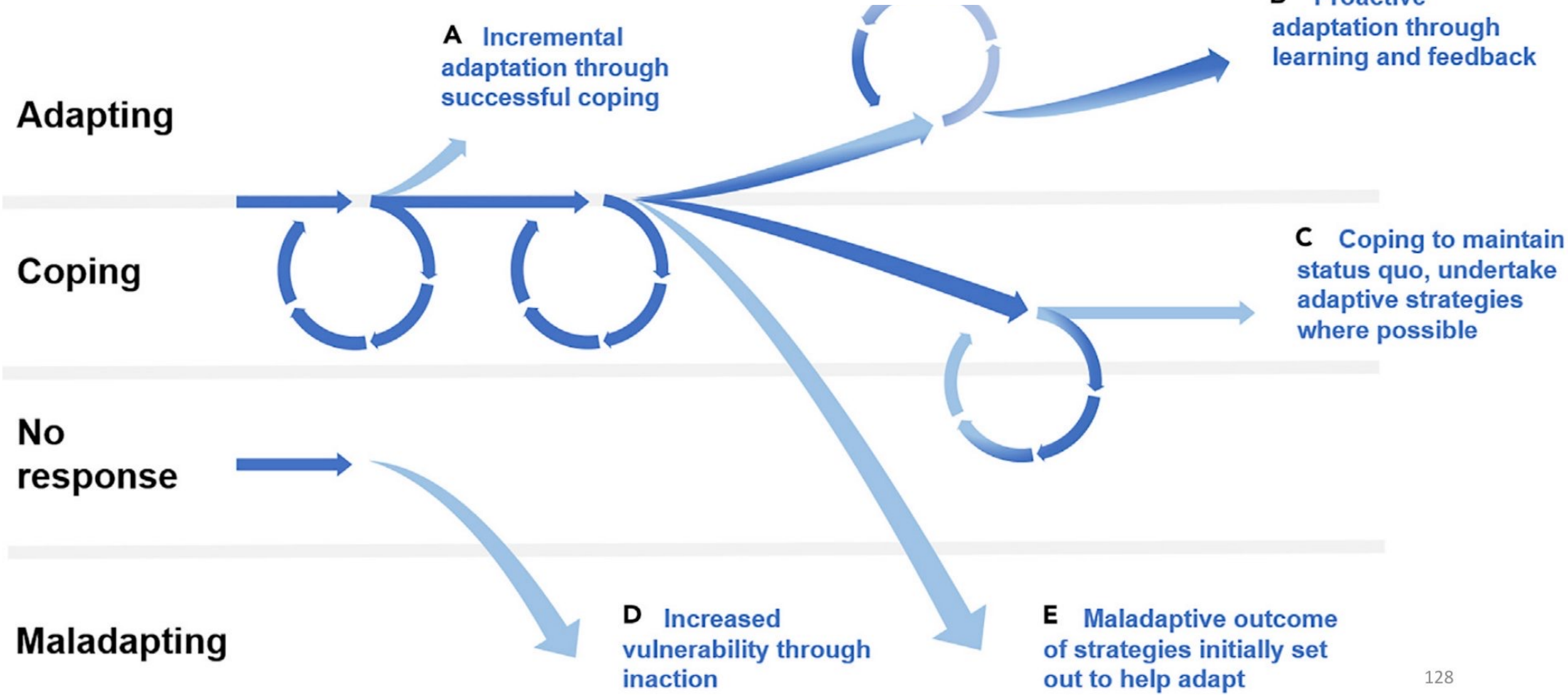
Transition range

Confidence level assigned to transition range

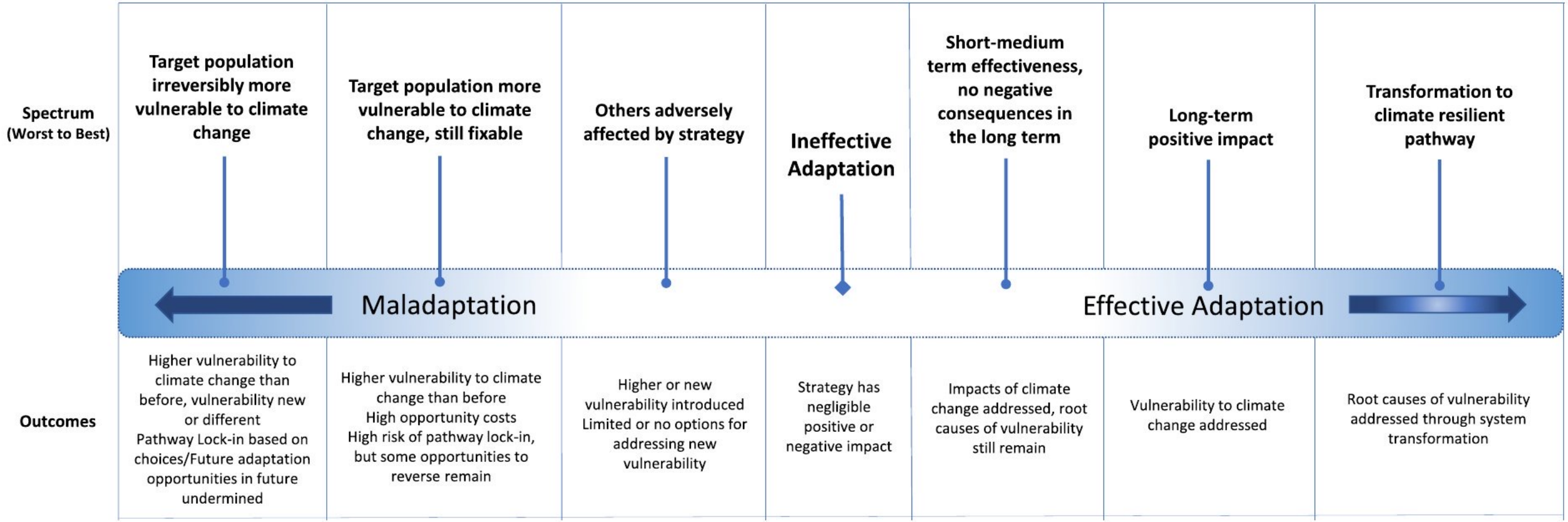
Low → Very high

midpoint of transition

ADAPTATION

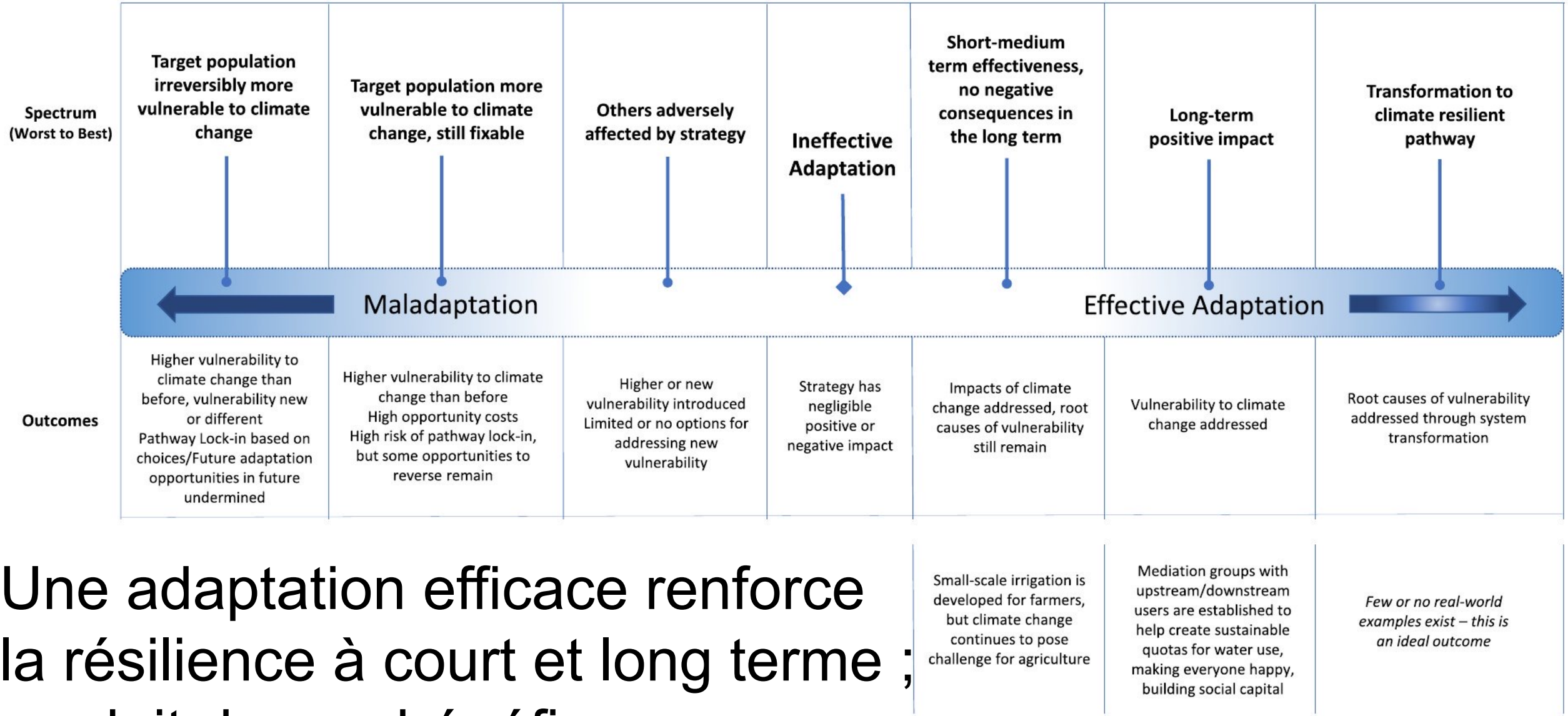


https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220304838#fig2



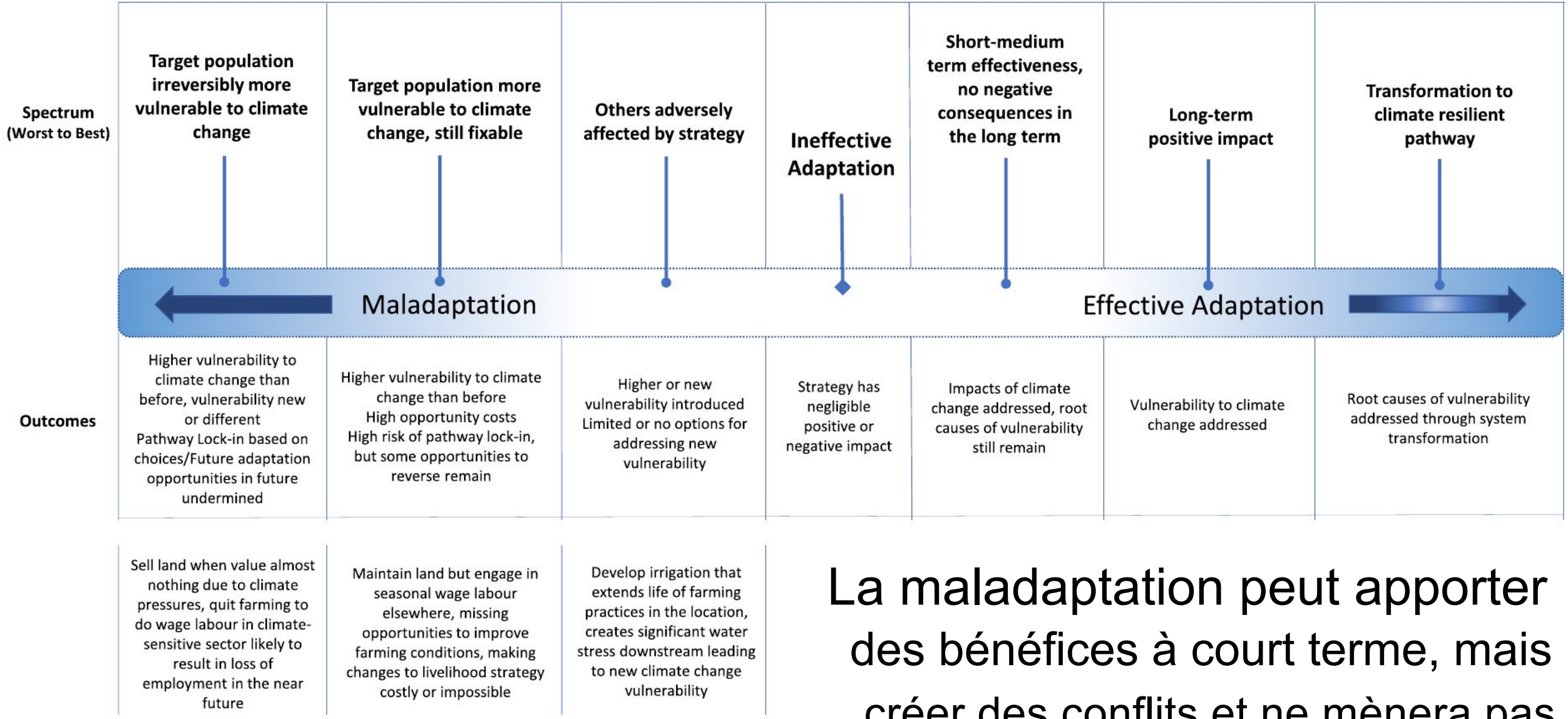
Éventail des issues possibles des stratégies de (mal)adaptation

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220304838#fig2



Une adaptation efficace renforce la résilience à court et long terme ; produit des co-bénéfices et exige de la coopération

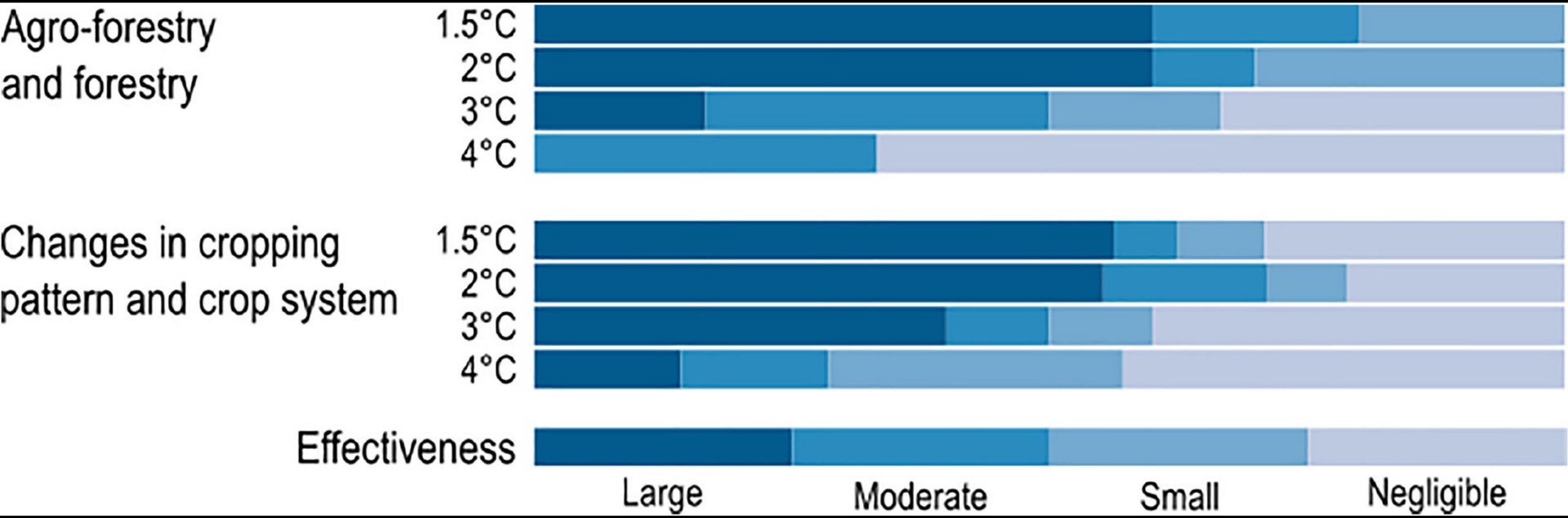
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220304838#fig2



La maladaptation peut apporter des bénéfices à court terme, mais créer des conflits et ne mènera pas à une durabilité à long terme

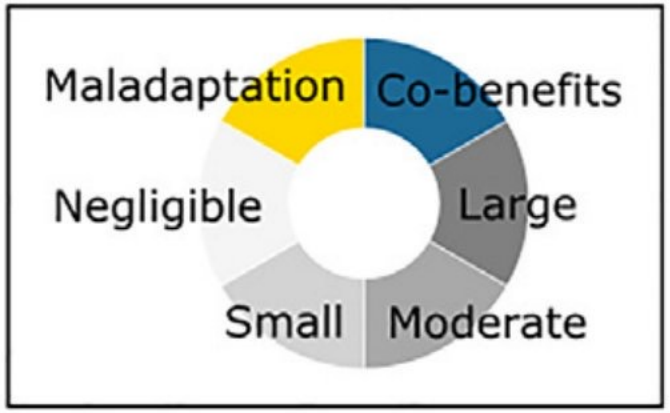
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220304838#fig2

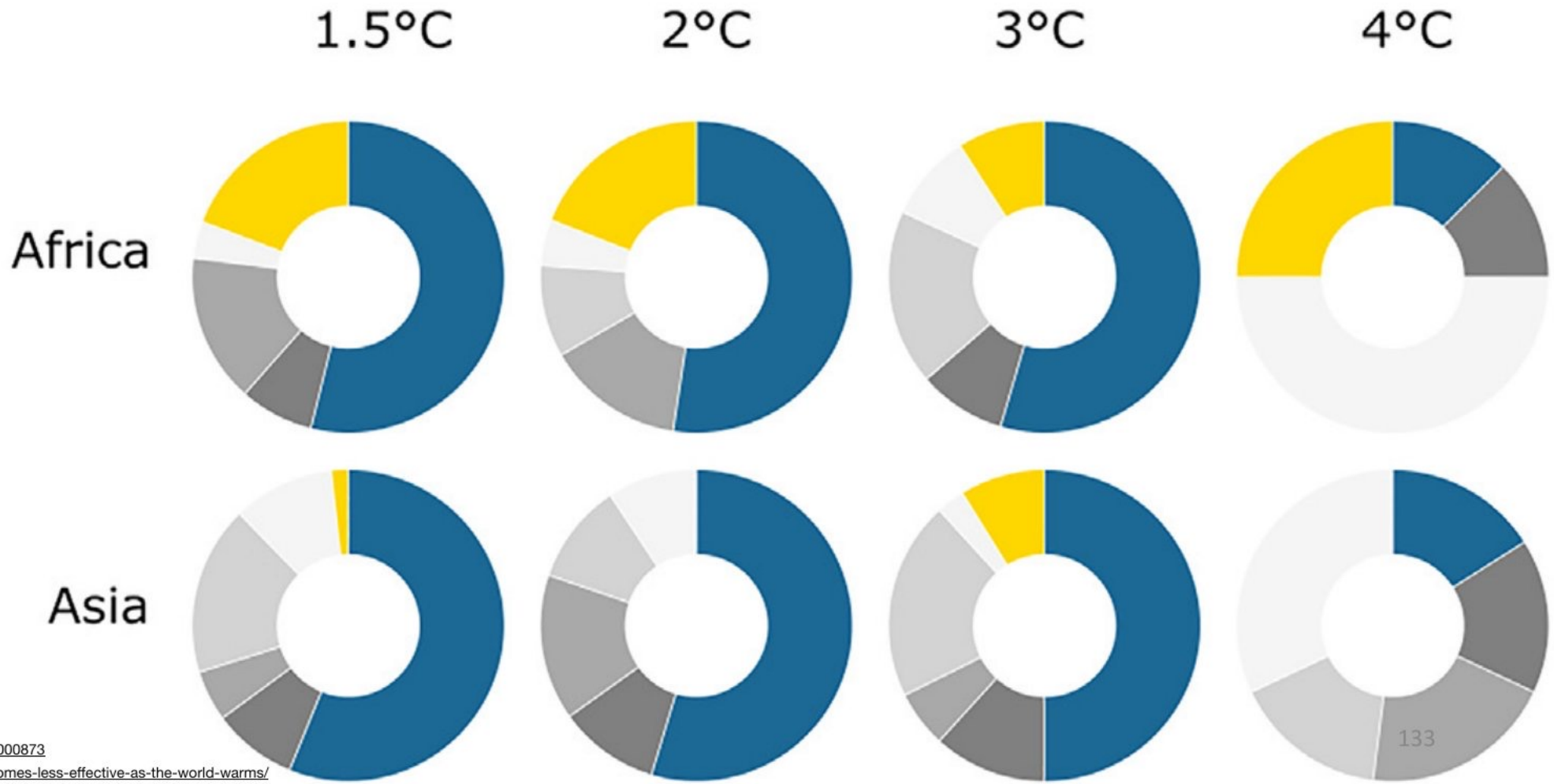
EN OUTRE, l'adaptation est plus facile et plus efficace à des niveaux de réchauffement plus bas



https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332224000873
https://www.carbonbrief.org/guest-post-climate-adaptation-becomes-less-effective-as-the-world-warms/

Co-bénéfices, maladaptation et efficacité





https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332224000873
https://www.carbonbrief.org/guest-post-climate-adaptation-becomes-less-effective-as-the-world-warms/

Co-bénéfices et arbitrages de l'action climatique

Biodiversity measures (& corresponding sections in the main text)	Climate change mitigation
Avoiding deforestation (2.1)	+
Avoiding degradation of permafrost areas (2.1)	+
Reforestation, avoiding forests degradation (2.1)	+
Coastal restoration (2.1)	+
Restoring degraded semi-arid ecosystems (2.1)	?
Restoring inland wetlands (2.1)	?

Contribution to climate change mitigation

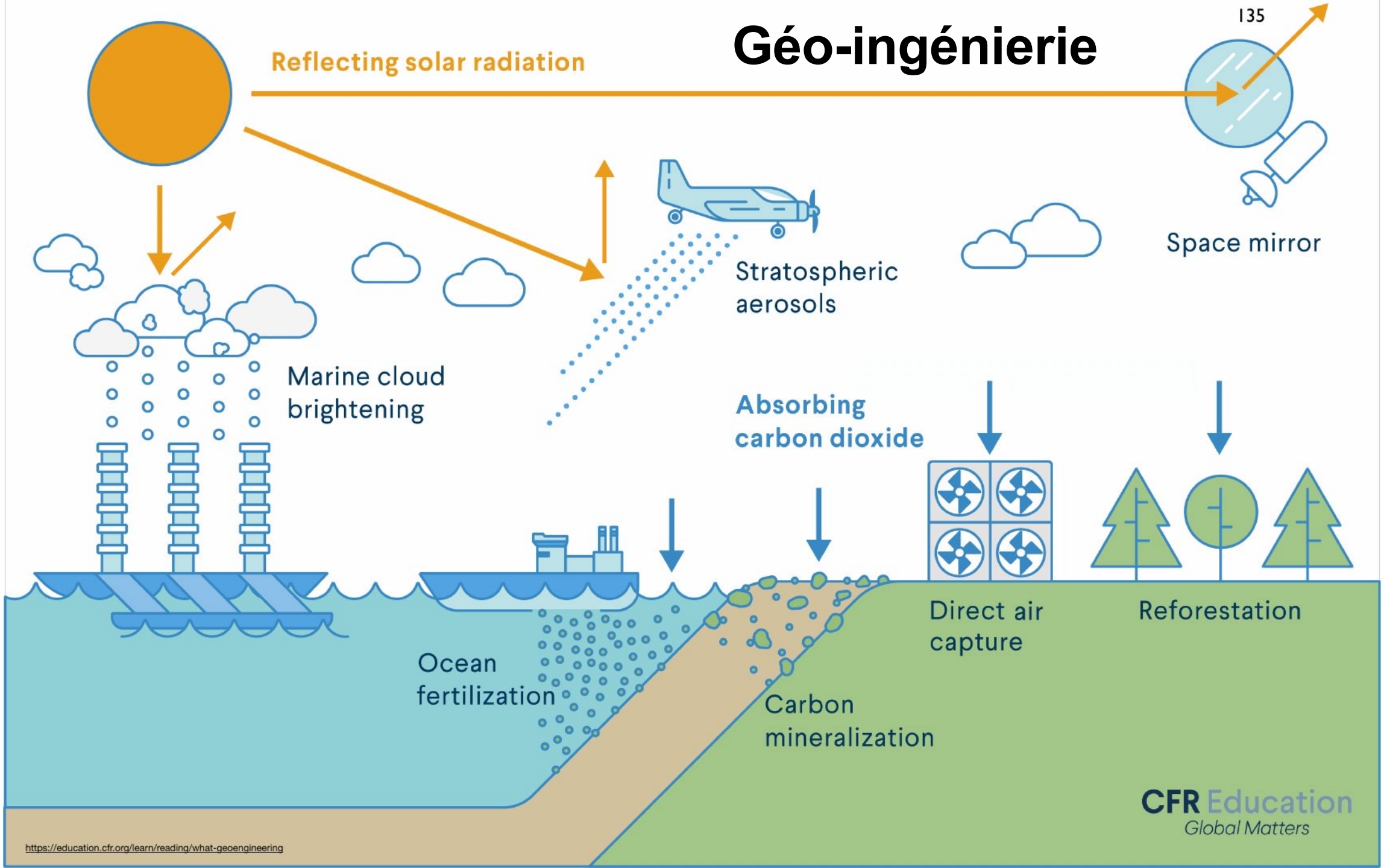
- Significantly positive, strong scientific evidence
- Potentially positive, incomplete evidence & quantification
- Unresolved, lack of evidence, system-dependent, tradeoffs
- Indirect positive
- Loose or non-existent link
- Negative, strong scientific evidence

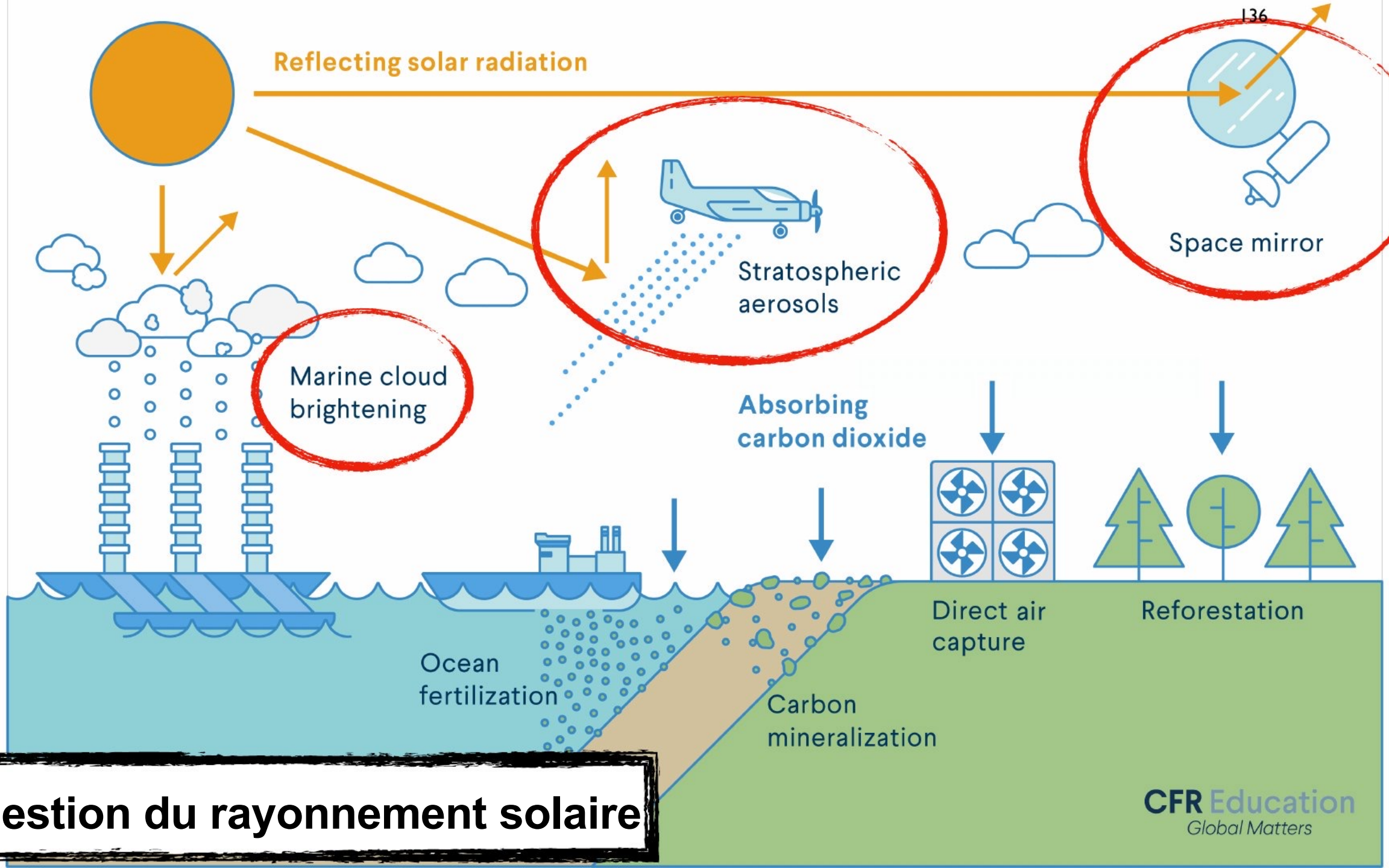
Reliability of the mitigation outcome

- ++ High
- + Medium
- ? Unresolved, lack of evidence

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/gcb.16109

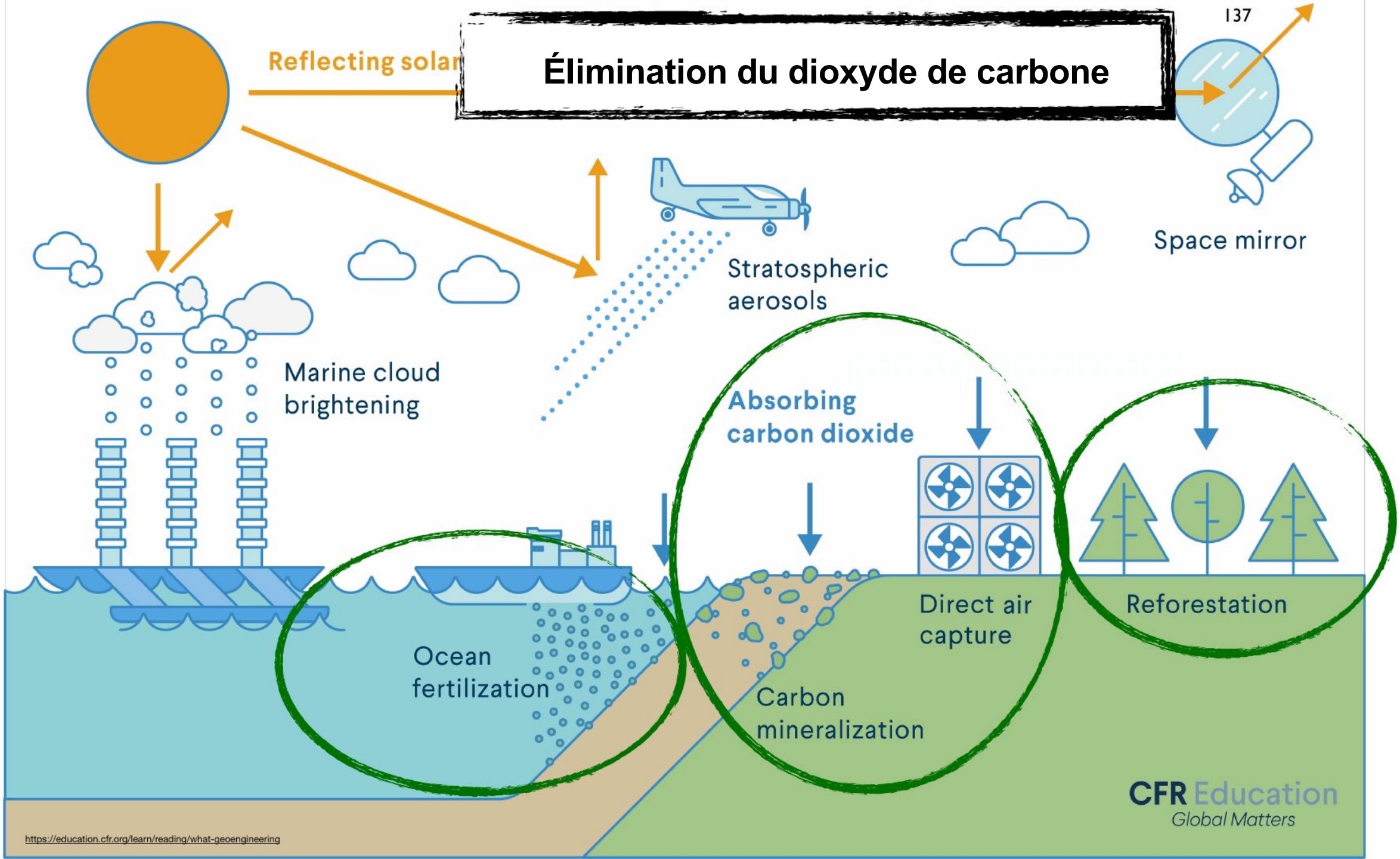
Géo-ingénierie





Gestion du rayonnement solaire

Élimination du dioxyde de carbone



Pas théorique…

Inside Climate News

Pulitzer Prize-winning, nonpartisan r
biggest crisis facing our planet.

Justice & Health

An Indigenous Group's Objection to Geoengineering Spurs a Debate About Social Justice in Climate Science

The Sámi people of Northern Sweden say blocking out the sun with reflective particles to cool the earth is the kind of thinking that produced the climate crisis in the first place.



By Haley Dunleavy
July 7, 2021

PLANET

A Private Company Wants to Block the Sun, Responsibly

Stardust sold geoengineering to investors. Now it needs to sell it to the public.

By Alexander C. Kaufman

Insight: How two weather balloons led Mexico to ban solar geoengineering

By **Cassandra Garrison**

March 27, 2023 4:02 PM EDT · Updated March 27, 2023



Climeworks signs first AI carbon removal deal



By **Molly Burgess**
8 hours ago · 2 min read

Bookmark

ClimeWorks (centrale Mammoth)

Located in Iceland, Mammoth is about ten times bigger than its predecessor plant, Orca.

- Entreprise : ClimeWorks, lieu : Islande
- Alimentée à 100 % par une énergie renouvelable (géothermie) ; capacité maximale visée de 36 000 t de CO_2 par an (un peu moins en réalité)
- Émissions humaines mondiales annuelles de CO_2 : ~38,6 MILLIARDS de tonnes (2024)
- Pour neutraliser ces émissions de CO_2, il faudrait ~1 072 222 de ces centrales fonctionnant à capacité équivalente (p. ex. entièrement alimentées aux renouvelables).



https://climeworks.com/news/the-carbon-removal-production-waterfall

Inconvénients de l'EDC

Peut coûter cher à
mettre en œuvre à grande échelle

Les bénéfices climatiques peuvent
mettre longtemps à apparaître

Peut avoir d'autres
conséquences imprévues
sur les écosystèmes (p. ex.
fertilisation des océans)

Inconvénients de la GRS

Doit être entretenue en permanence,
ce qui peut coûter cher

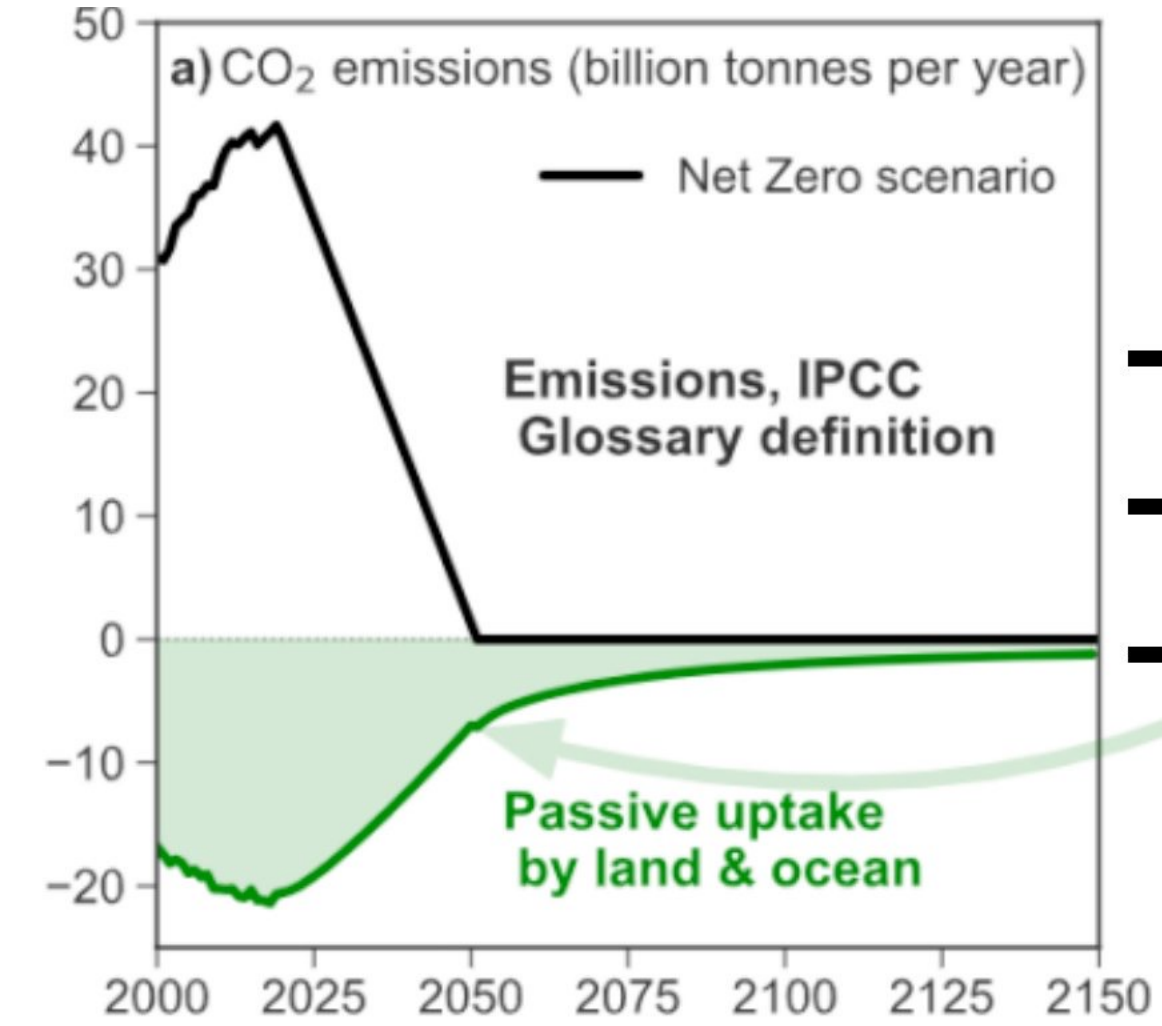
Ne règle pas du tout le problème
de l'acidification des océans

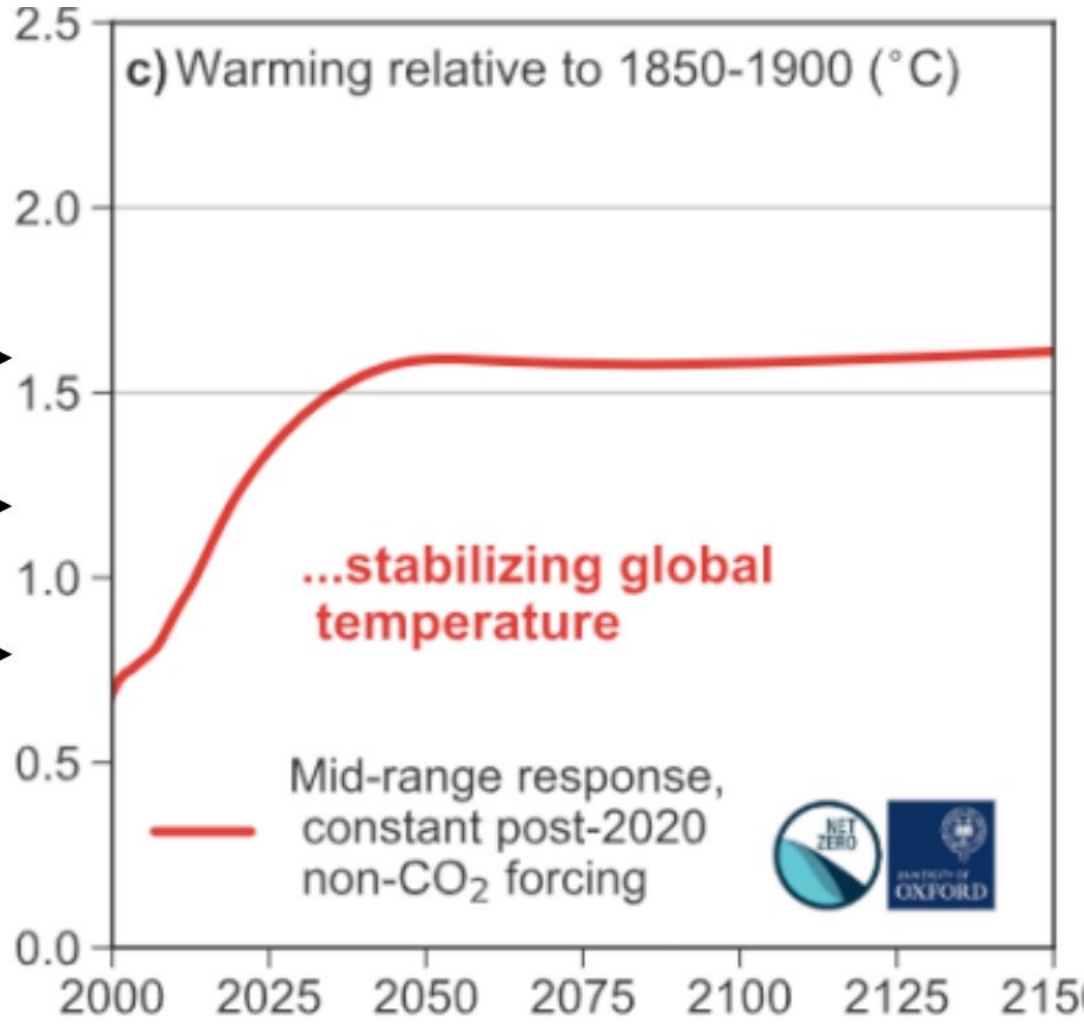
Cauchemar de gouvernance mondiale

Peut avoir d'autres conséquences
climatiques imprévues (p. ex. précipitations)

AUCUNE N'A ÉTÉ DÉMONTRÉE EFFICACE À UNE ÉCHELLE SUFFISANTE POUR CONTRER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE (POUR L'INSTANT).

La seule chose dont on sait qu'elle marche, c'est de laisser les fossiles dans le sol





https://www.nature.com/articles/s41586-024-08326-8

Repensez à la séance. Quelles sont les trois choses que vous voulez le plus retenir ? Prenez 60 secondes

PLUS D'ÉMISSIONS = PLUS DE RÉCHAUFFEMENT

ne s'arrête que quand les émissions s'arrêtent

Éviter le pire exigera À LA FOIS
adaptation et atténuation

Toute décision politique devra tenir compte de nombreuses incertitudes sur la réponse du système climatique, les co-bénéfices et les arbitrages

Les projets de géo-ingénierie sont, au mieux, des palliatifs et n'ont jamais été démontrés efficaces à grande échelle

MERCI