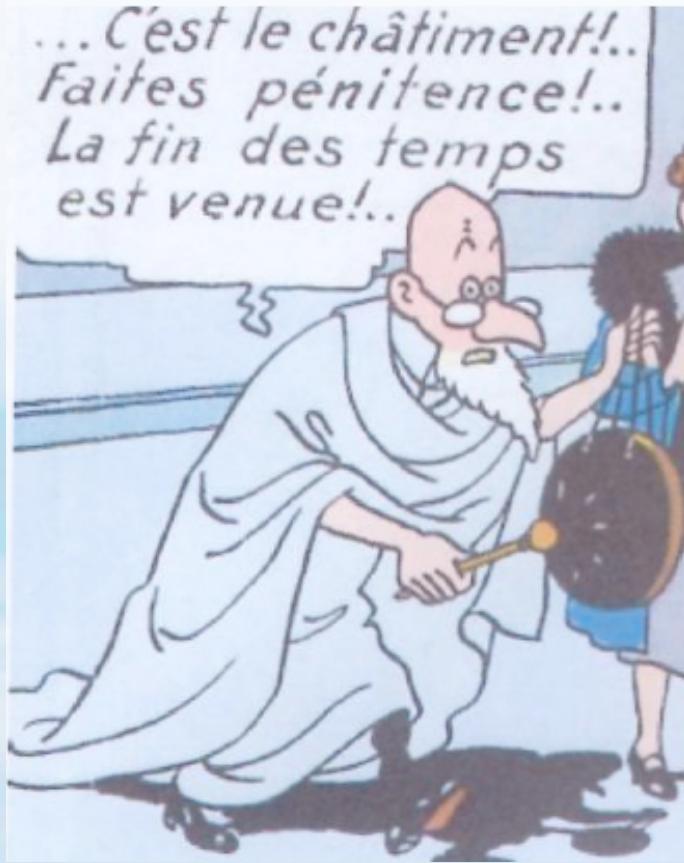
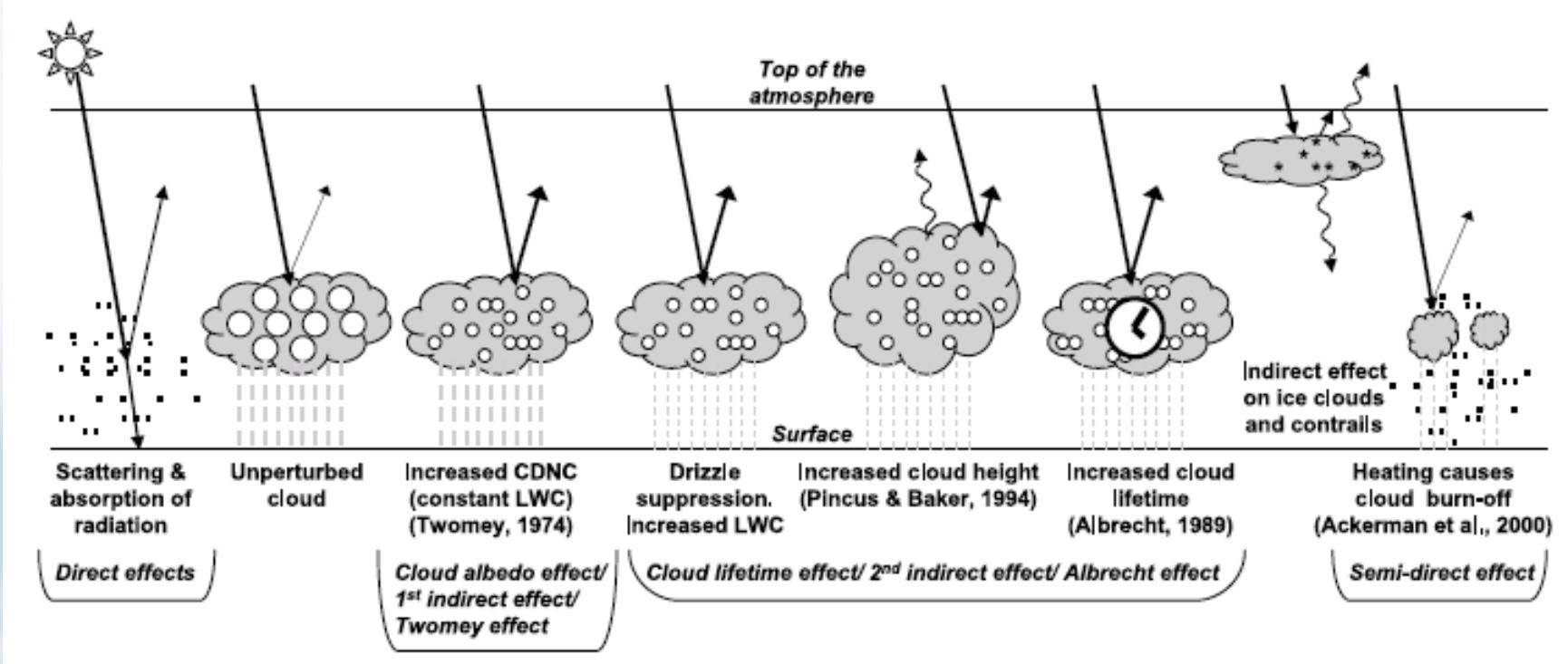


Eléments de base sur l'énergie au 21è siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech 2021
Partie 4 - Quel climat pour demain (bis) ?**

Chaud seulement, ou froid aussi ?



Effet d'autres émissions humaines : les aérosols ou précurseurs d'aérosols.

Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

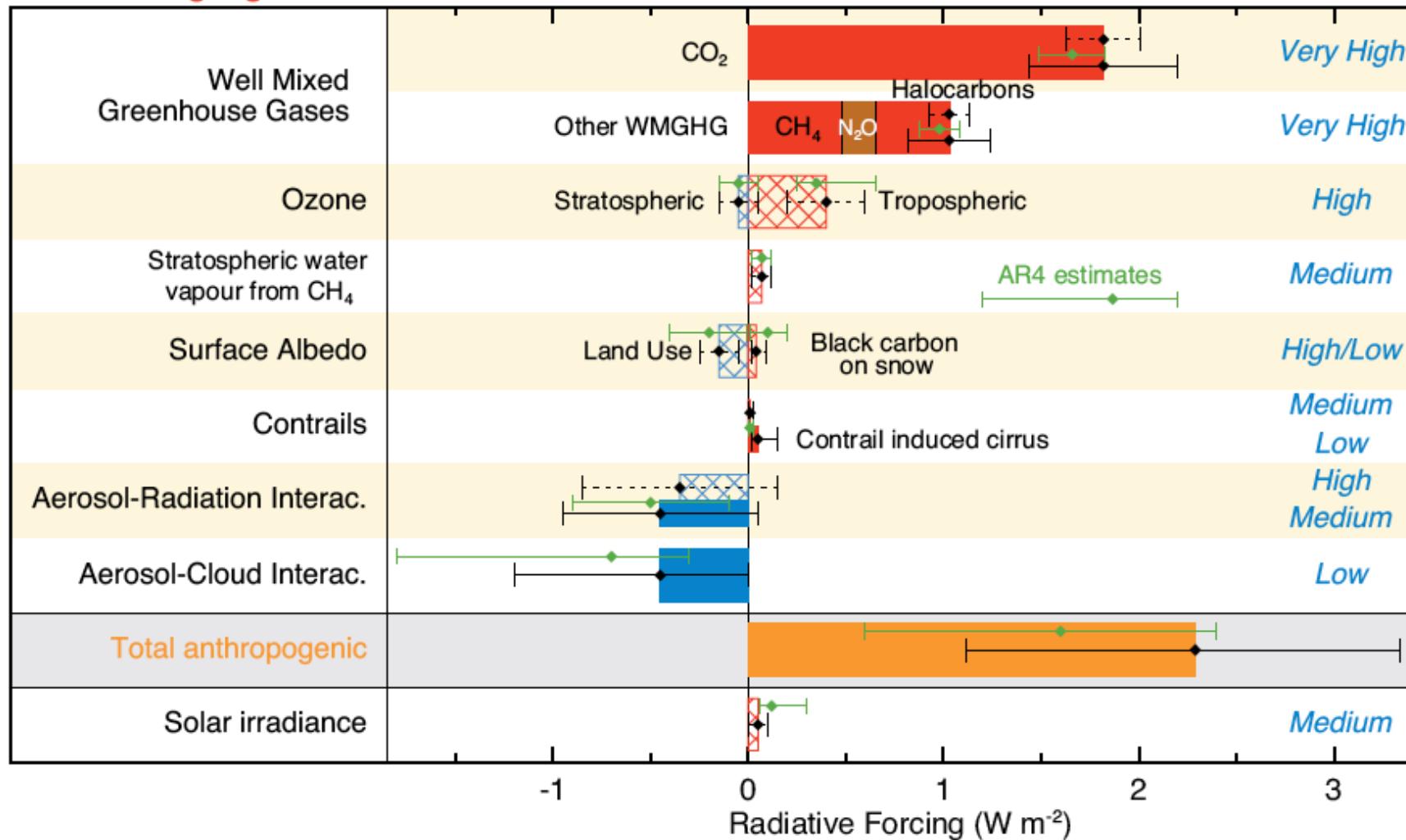
Les gaz chauffent ; les aérosols refroidissent... quel bilan ?

Radiative forcing of climate between 1750 and 2011

Confidence Level

Forcing agent

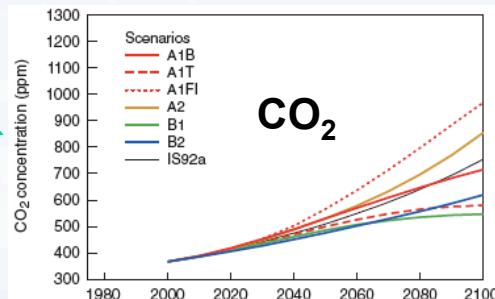
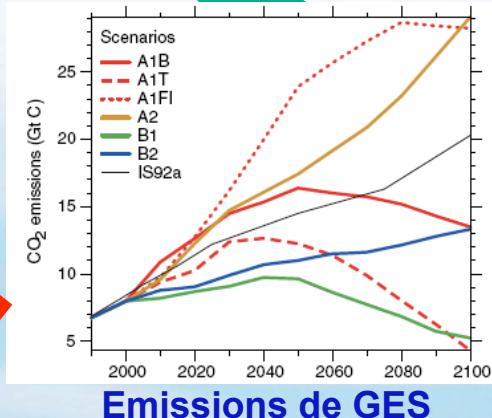
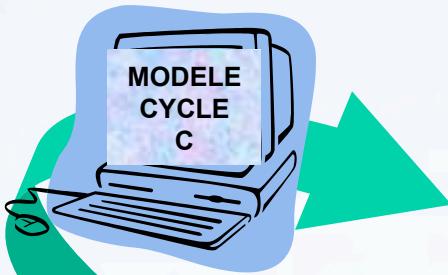
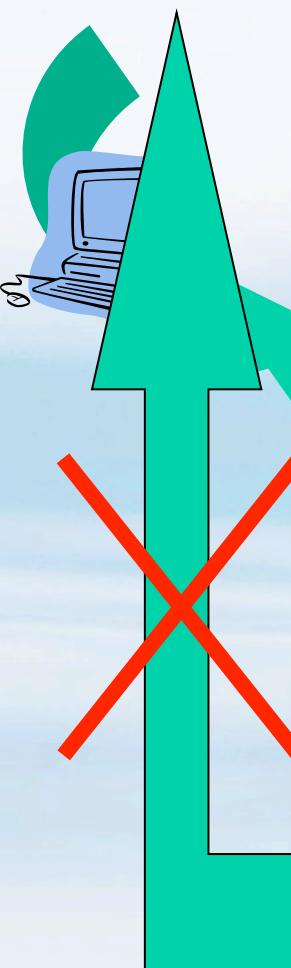
Anthropogenic



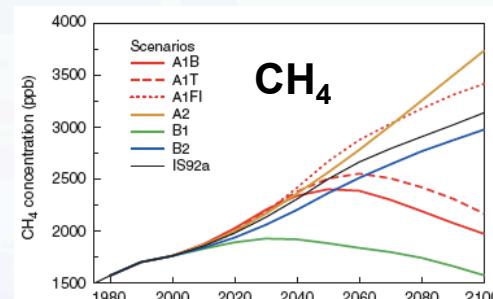
Contribution de chaque impact humain au forçage radiatif à fin 2011. Total : 3 W/m² , à comparer à un chauffage solaire moyen de 235 W/m² au niveau du sol (source GIEC, 2014)

Simuler le climat, pas plus fiable qu'un pronostic boursier ?

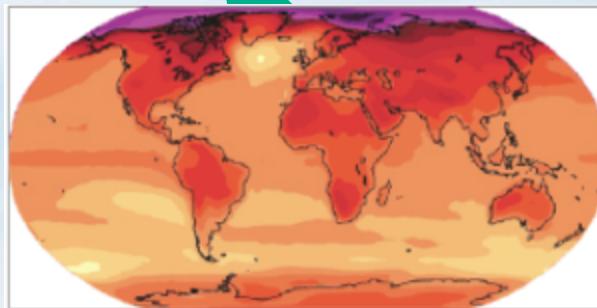
HYPOTHESES ECONOMIQUES ET DEMOGRAPHIQUES



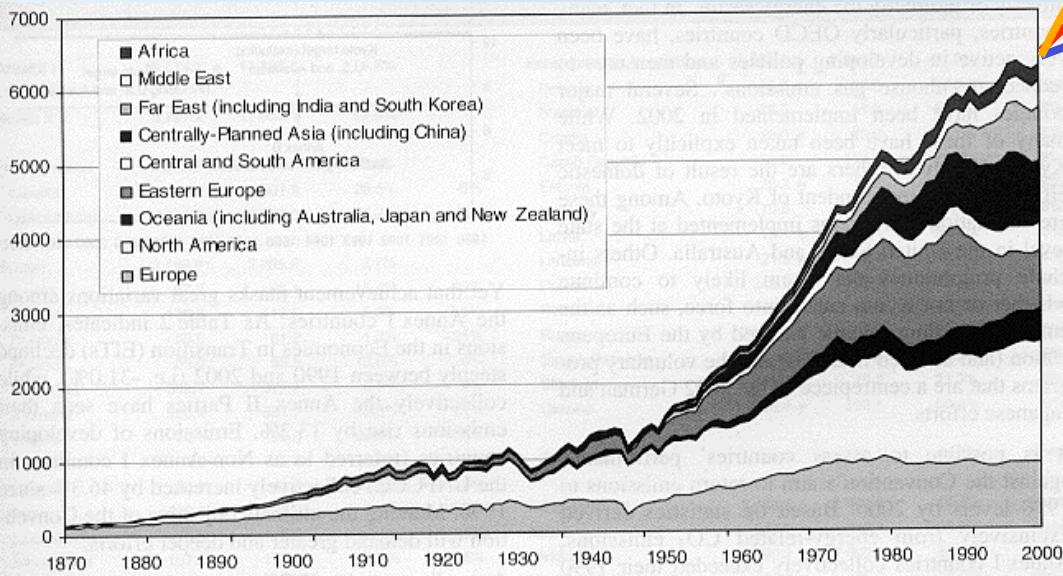
Concentration en GES



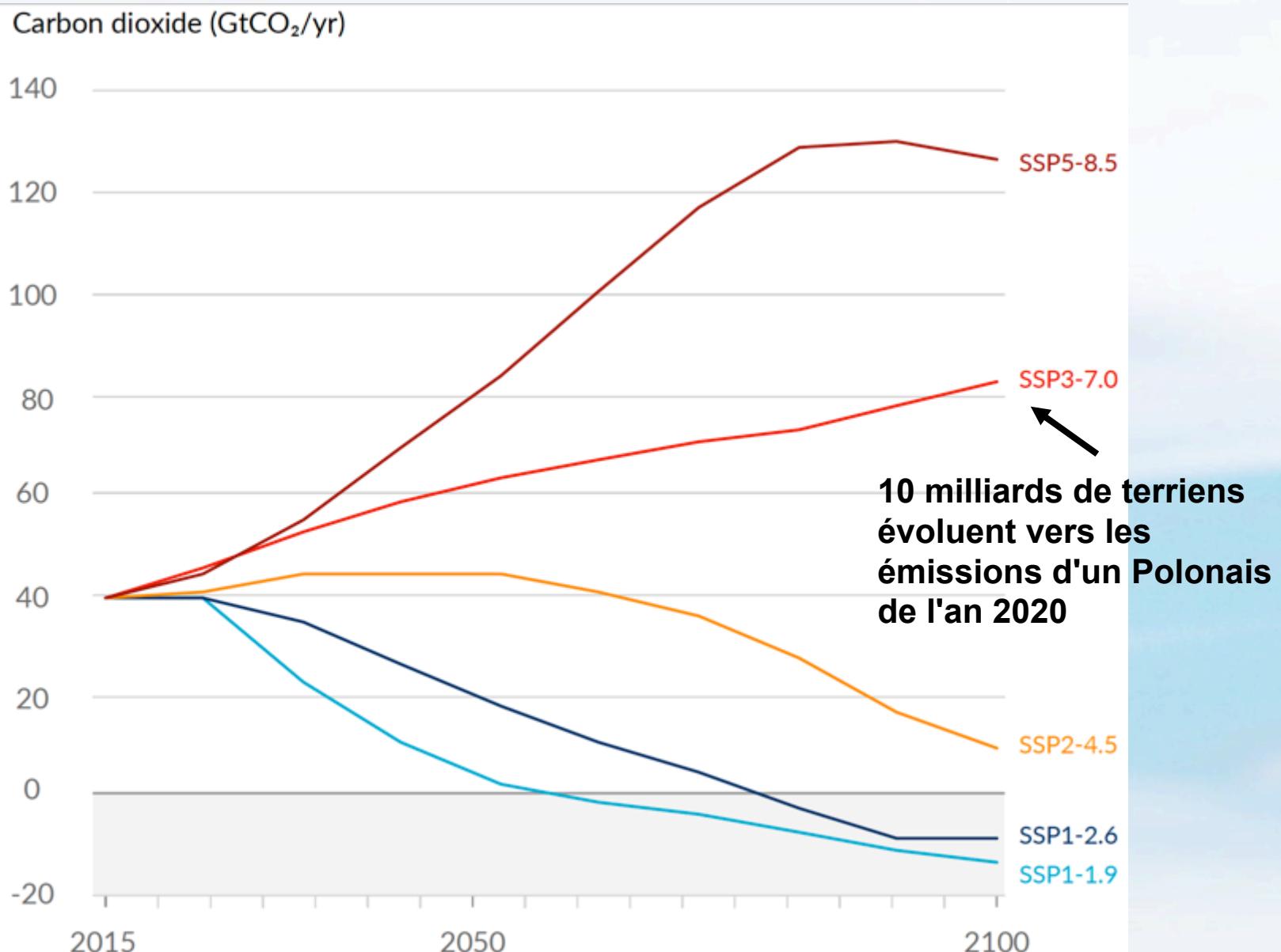
MODELES
CLIMATIQUES
(~15)



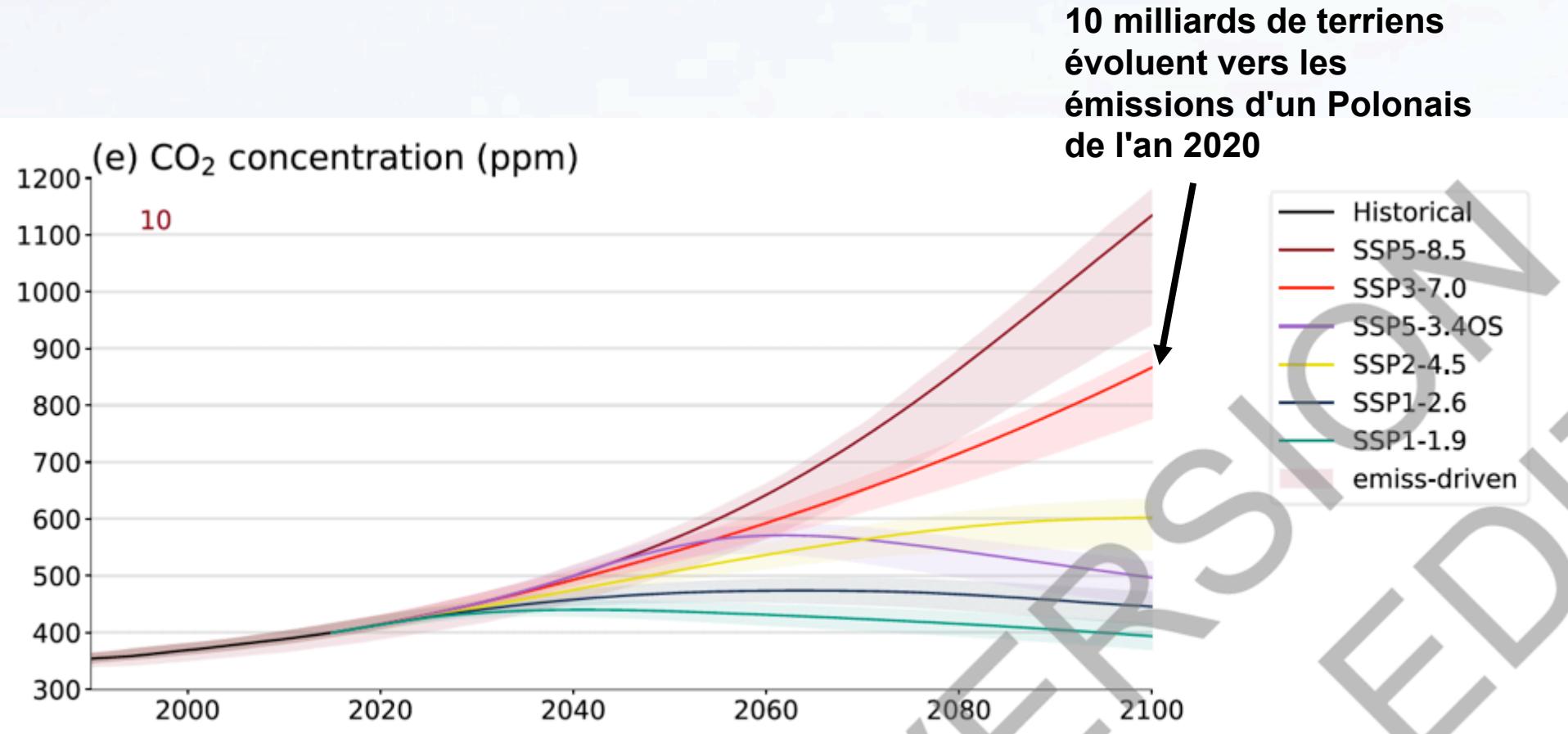
Climat Futur



De plus en plus, ou de moins en moins ?

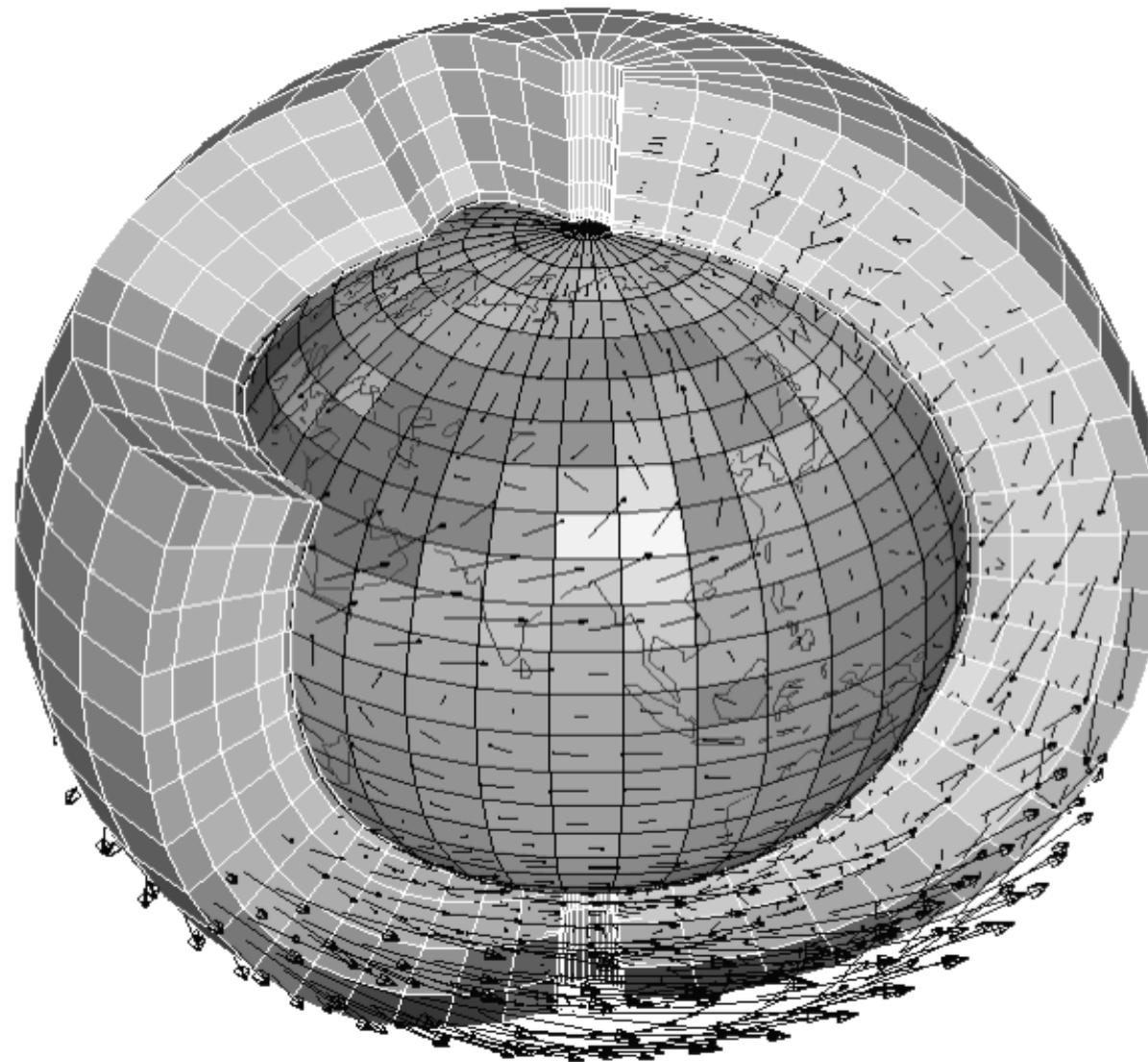


Source : summary for policymakers, AR6, IPCC, 2021



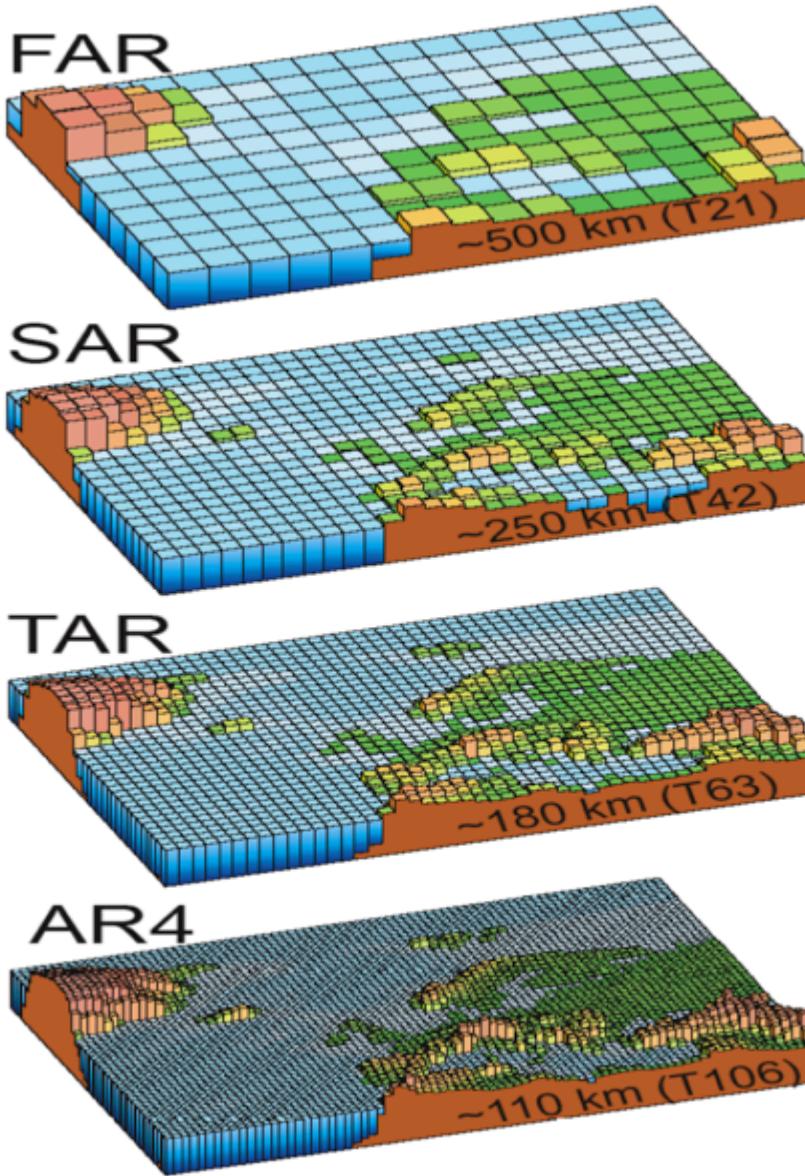
Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC, 2001

Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?



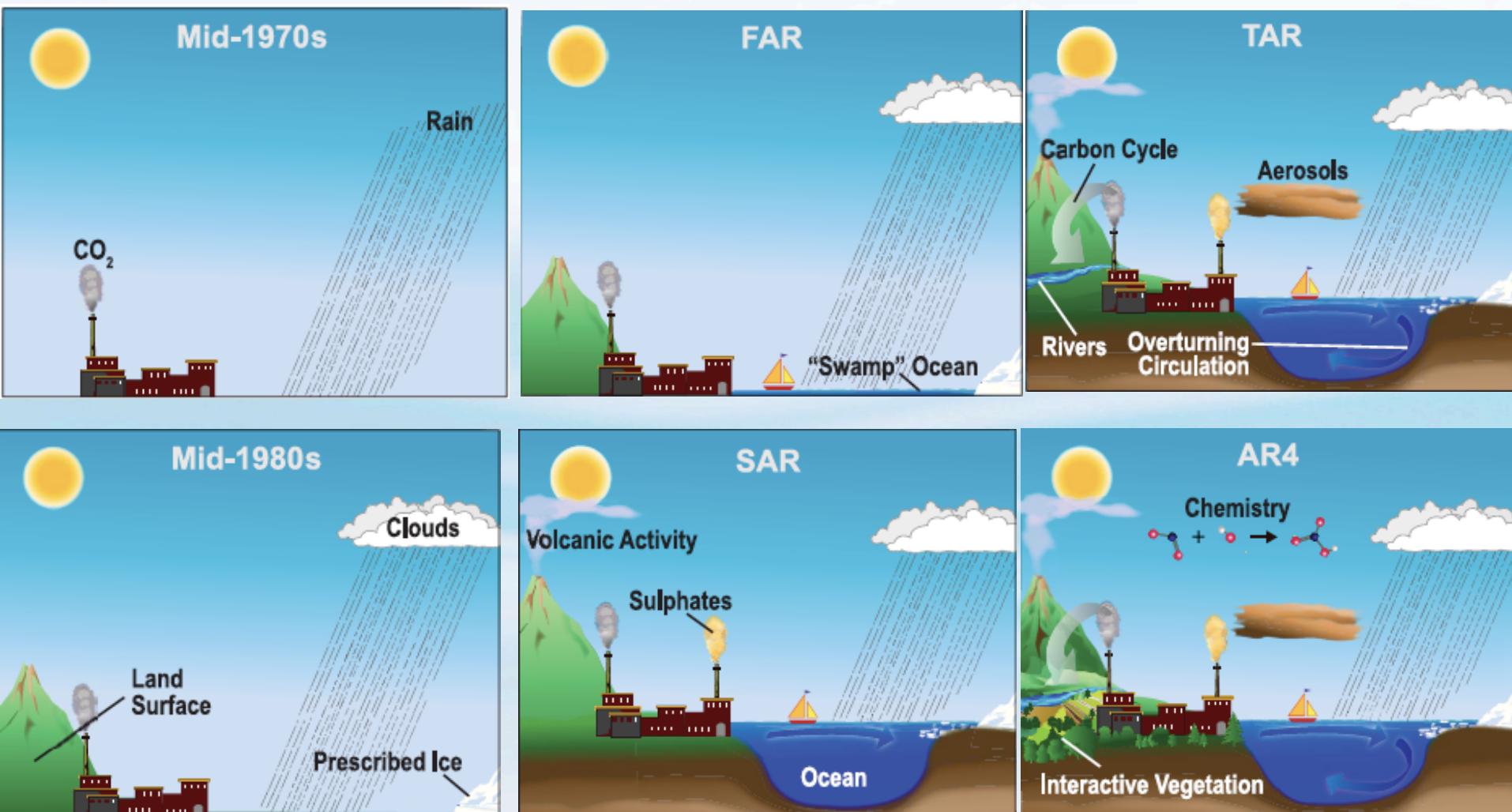
Source : L. Fairhead, LMD/IPSL

Amélioration en complexité, mais aussi en résolution



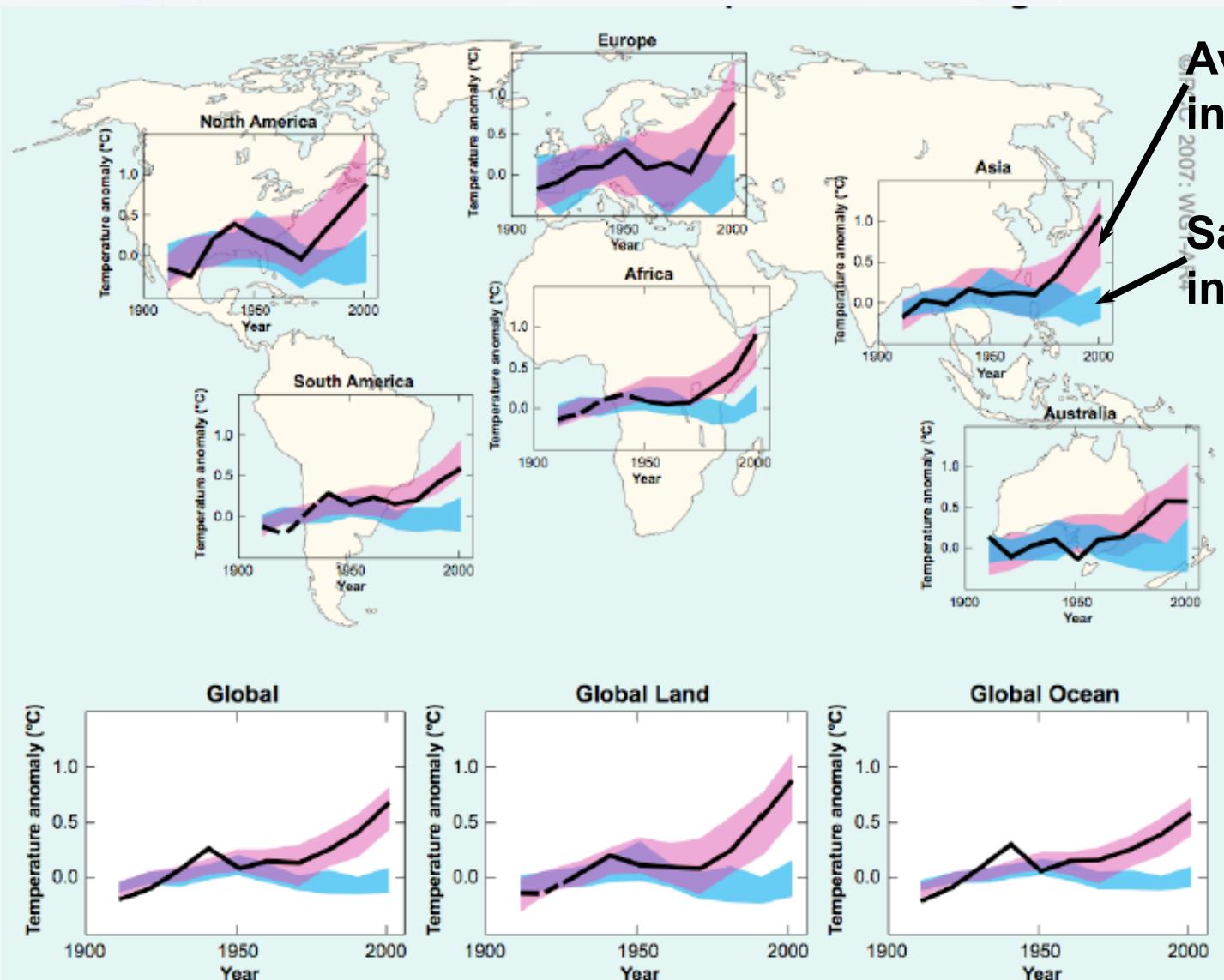
Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Les modèles font aussi l'objet d'améliorations continues !



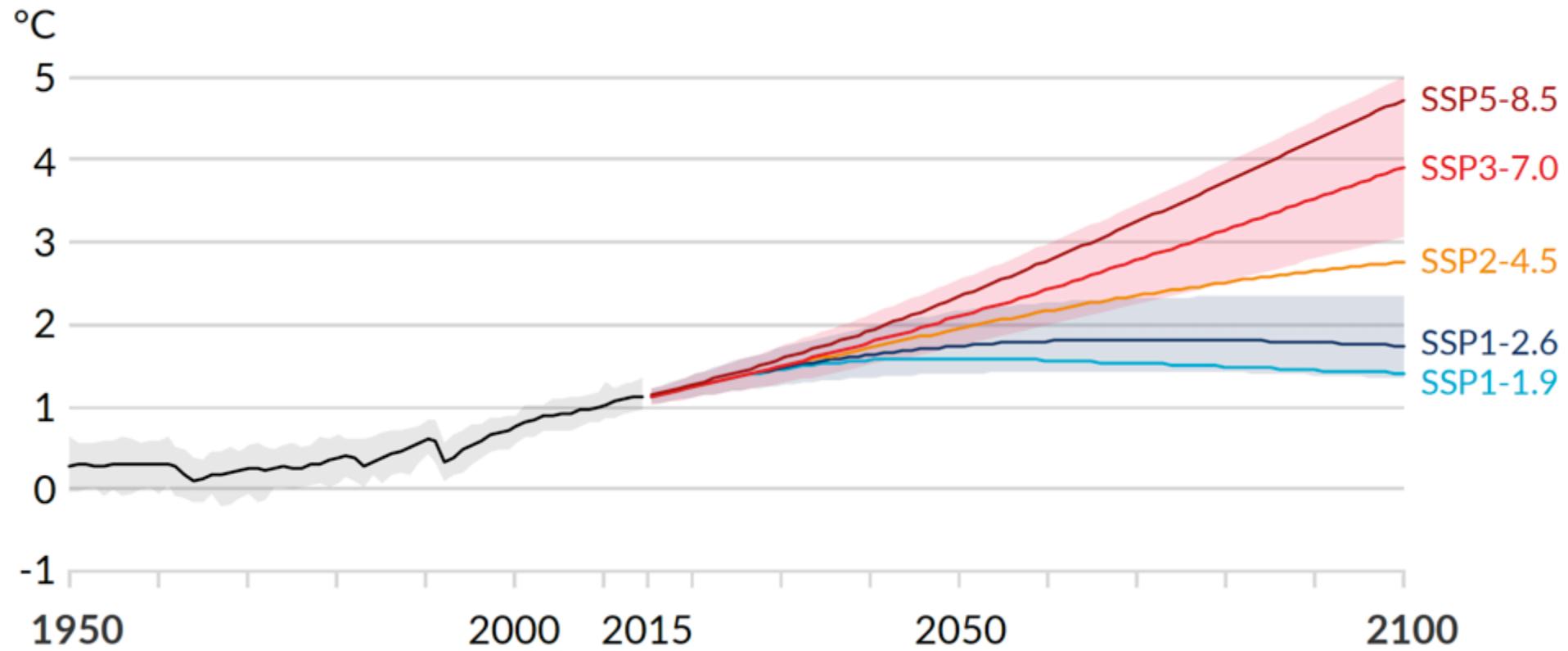
Evolution de la complexité des modèles. Source : GIEC, 2007

Des modèles testés avant d'être « vendus »



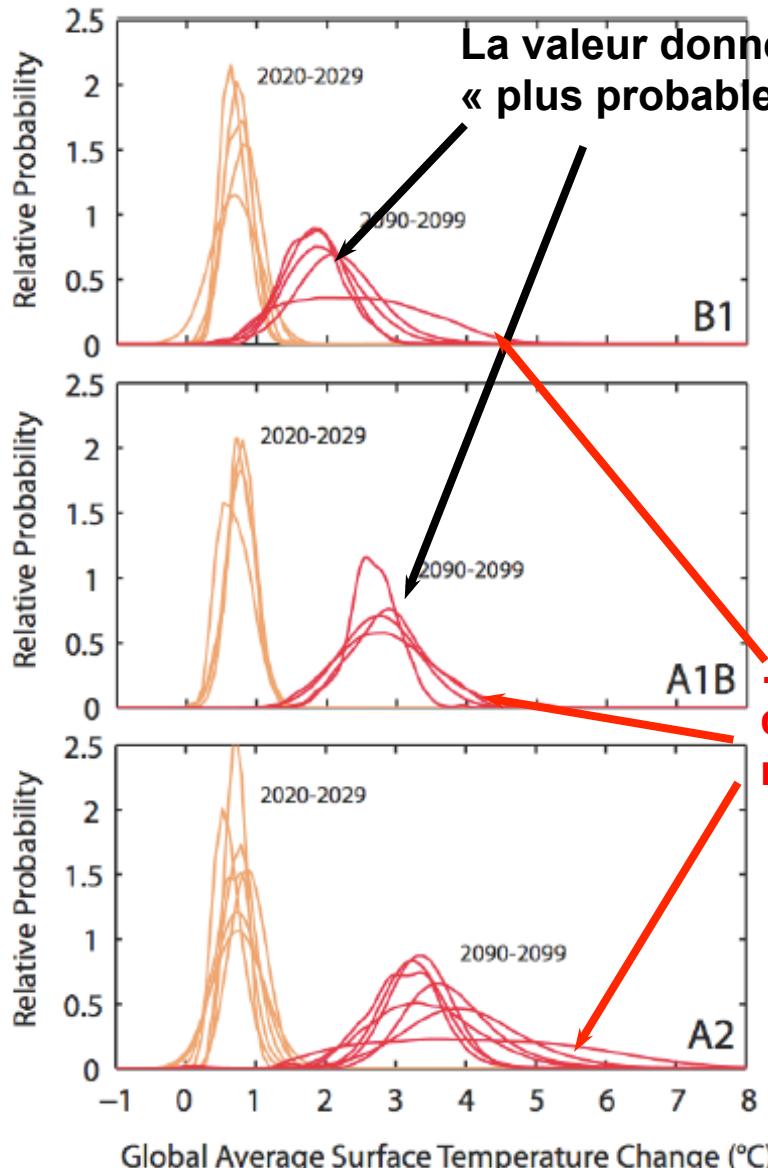
Évolution régionale de la température moyenne de l'air au niveau du sol (ligne noire, 0 = moyenne 1901-1950), et enveloppe des élévations simulées par les modèles, avec et sans influence humaine. Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid ?



Moyenne inter-modèles de l'augmentation de la température moyenne de l'air au niveau du sol en 2100 par rapport à la moyenne 1850-1900, selon les scénarii (pas de couplage avec le cycle du carbone). Source : GIEC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Existe-t-il réellement un haut de fourchette ?

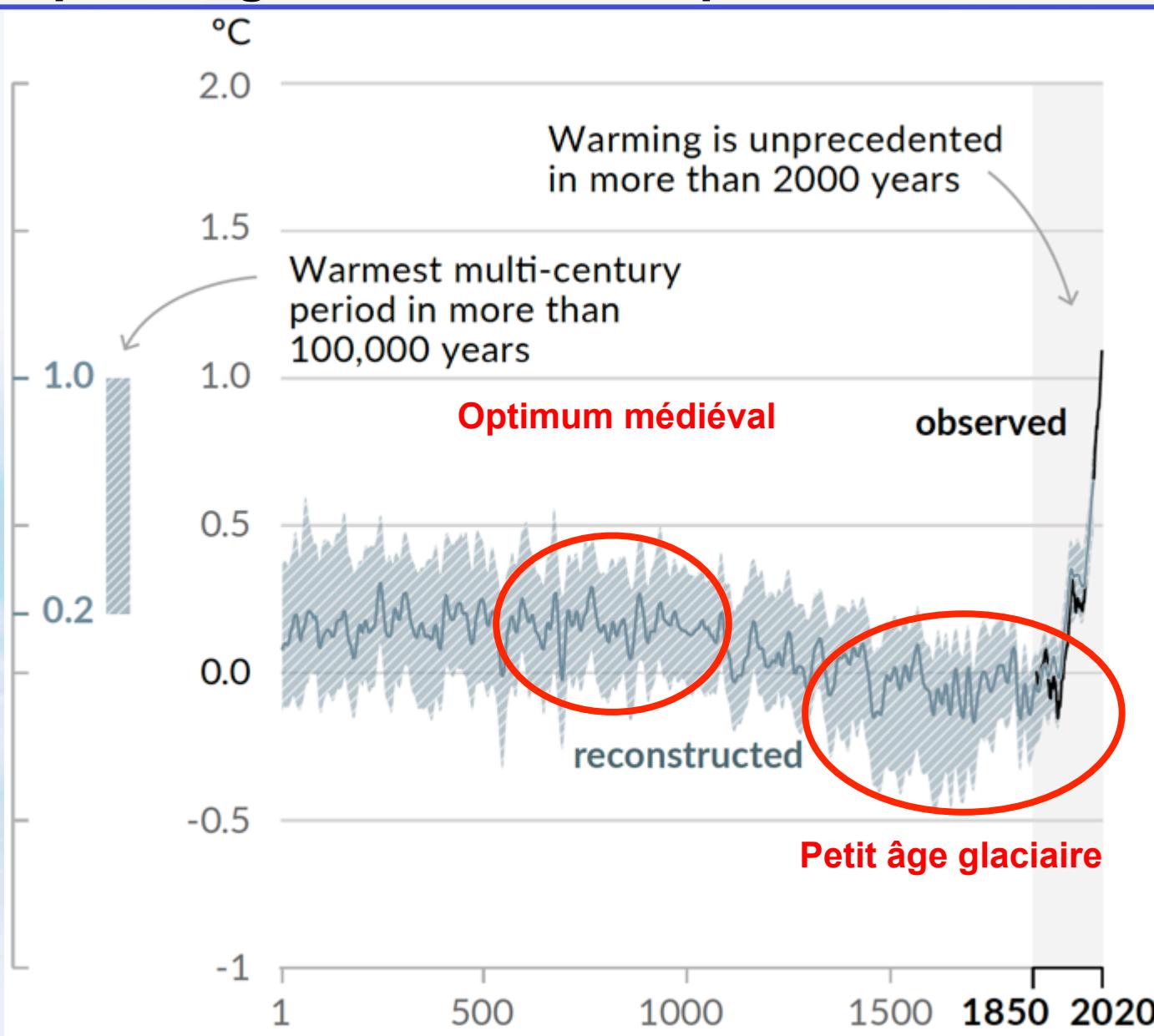


La valeur donnée est la
« plus probable », là...

...mais les simulations disent
qu'il existe une probabilité non
nulle que ce soit là !

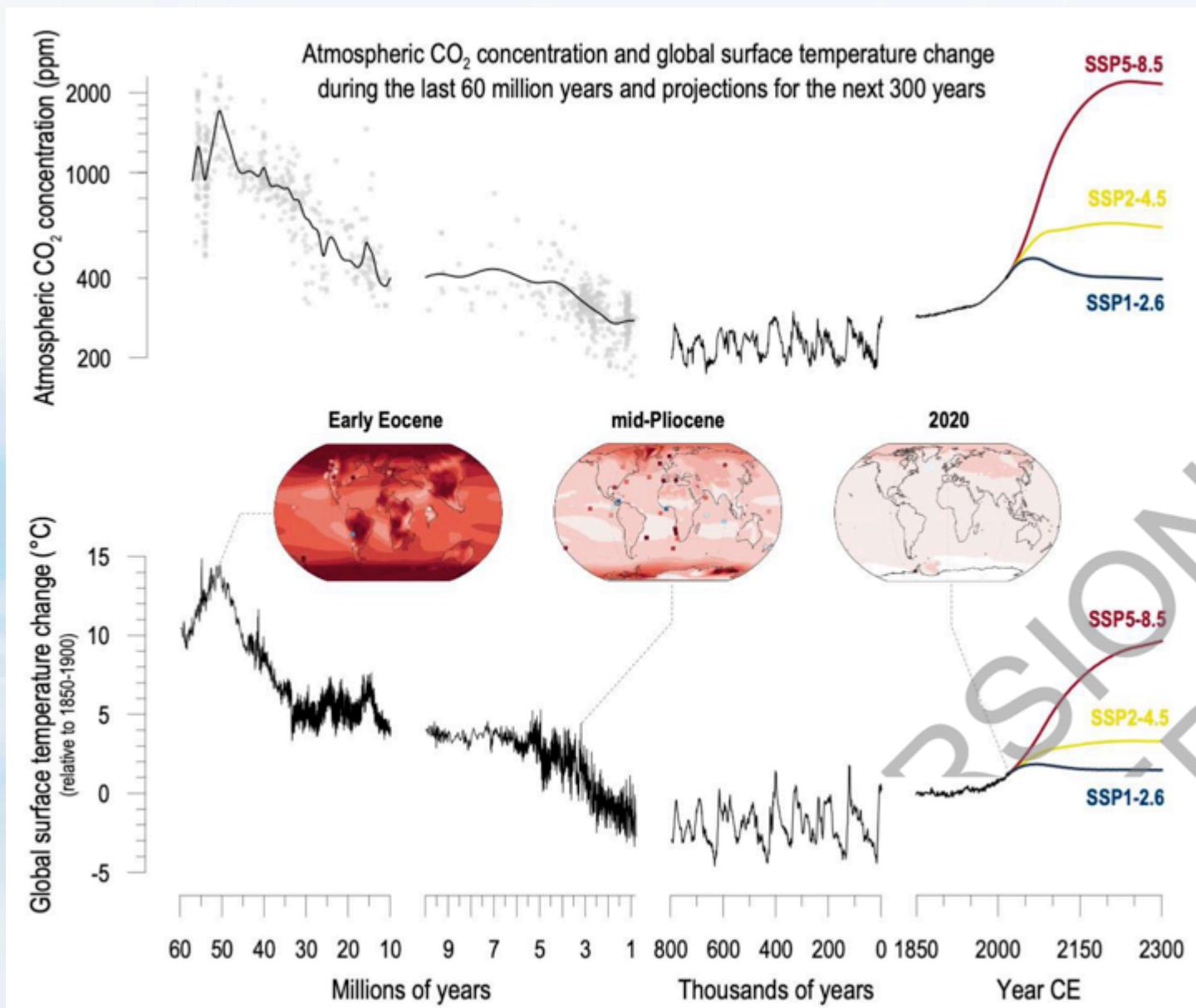
Signification des « fourchettes » d'élévation de température en 2090-2099 par rapport à
1980-1999 GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Quelques degrés en un siècle, pas une affaire courante...



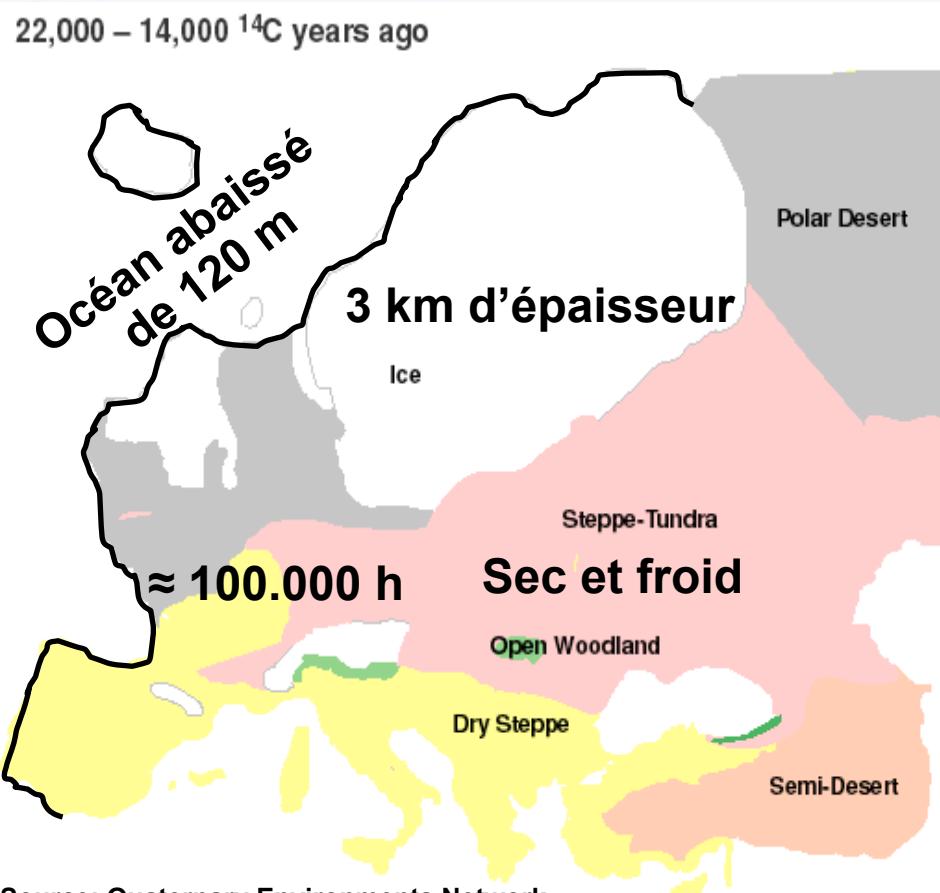
Évolution de la température moyenne de l'air au niveau du sol. Source IPCC, 2021

Quelques degrés en un million d'années, déjà plus



Source : IPCC, AR6, 2021

5 °C de plus en un siècle, juste un pull en moins ?



Source: Quaternary Environments Network

L'Europe il y a 20.000 ans

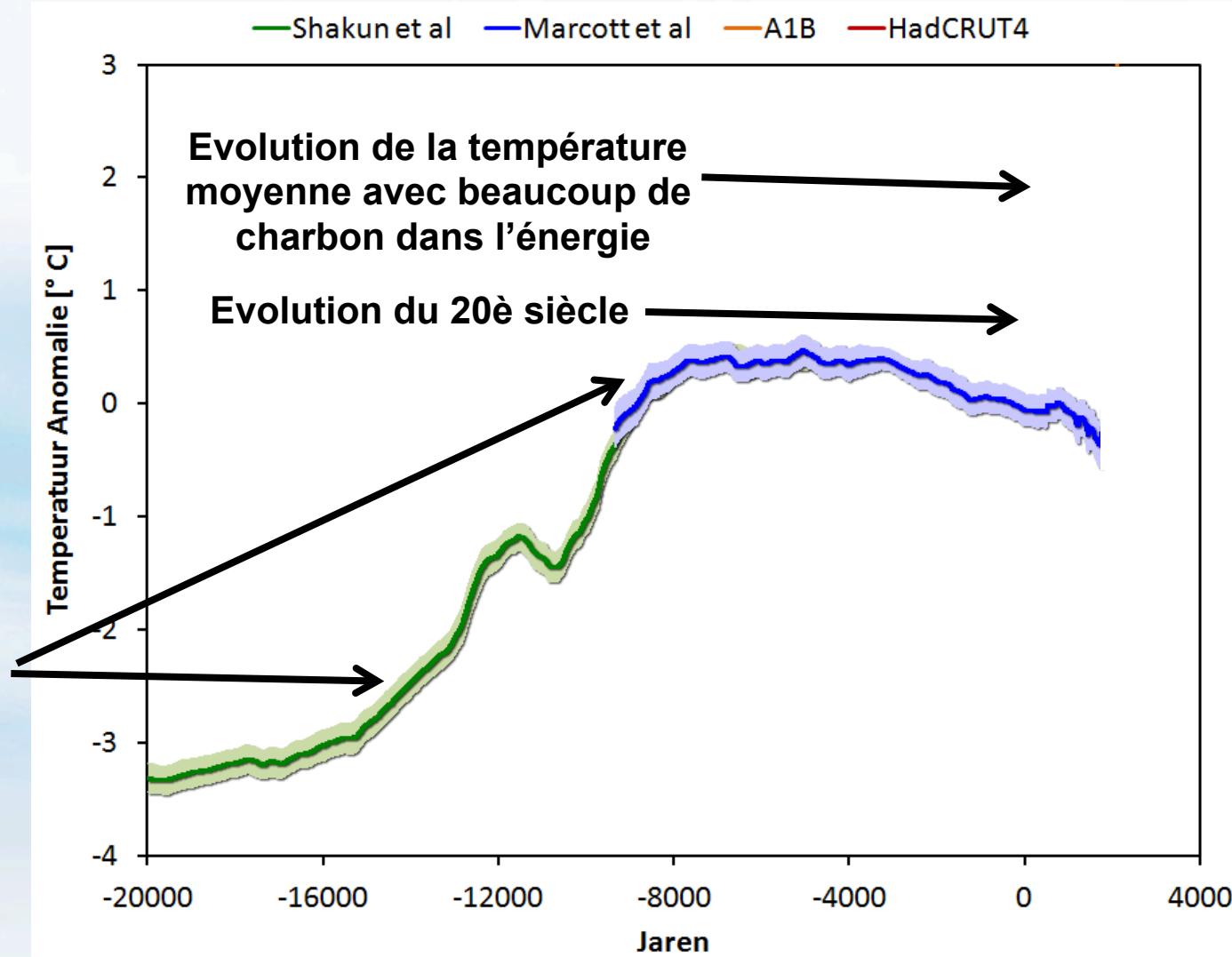
Moyenne ↗ +5°C

Present Potential Vegetation

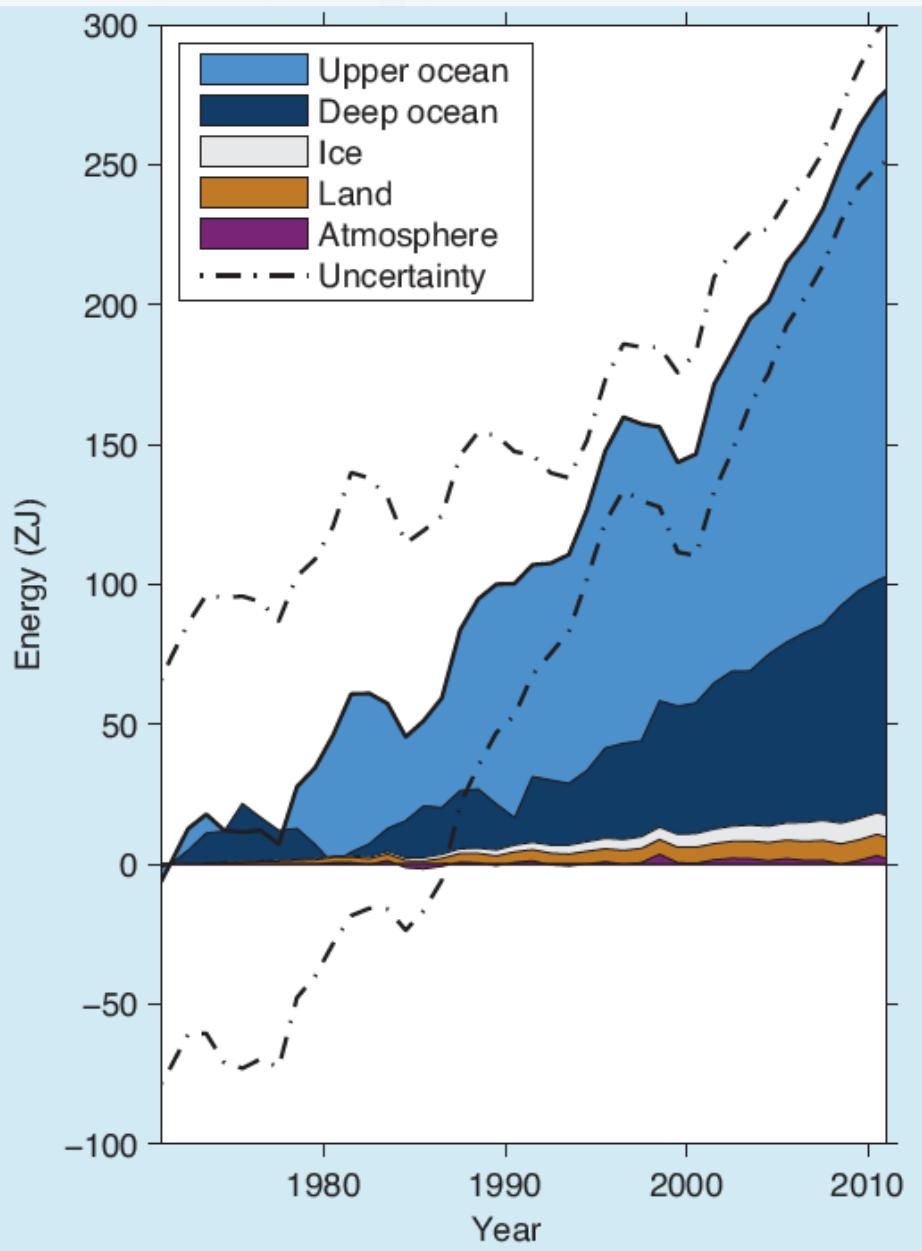


L'Europe actuelle

Et pour quelques degrés de plus...



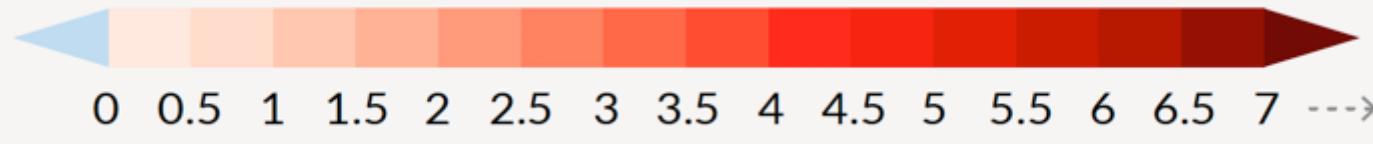
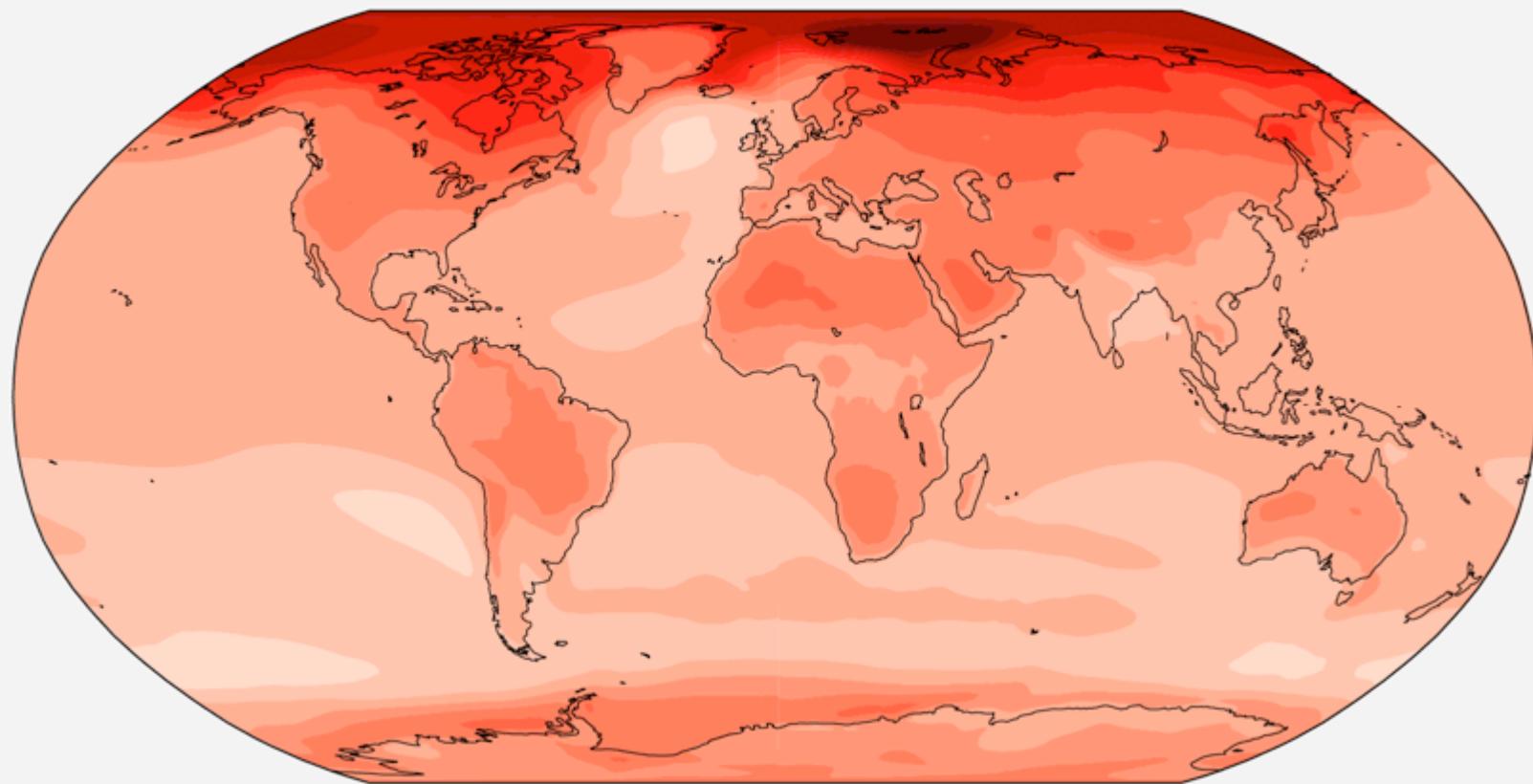
Ca chauffe surtout là où nous ne « voyons » pas



≈ 90%

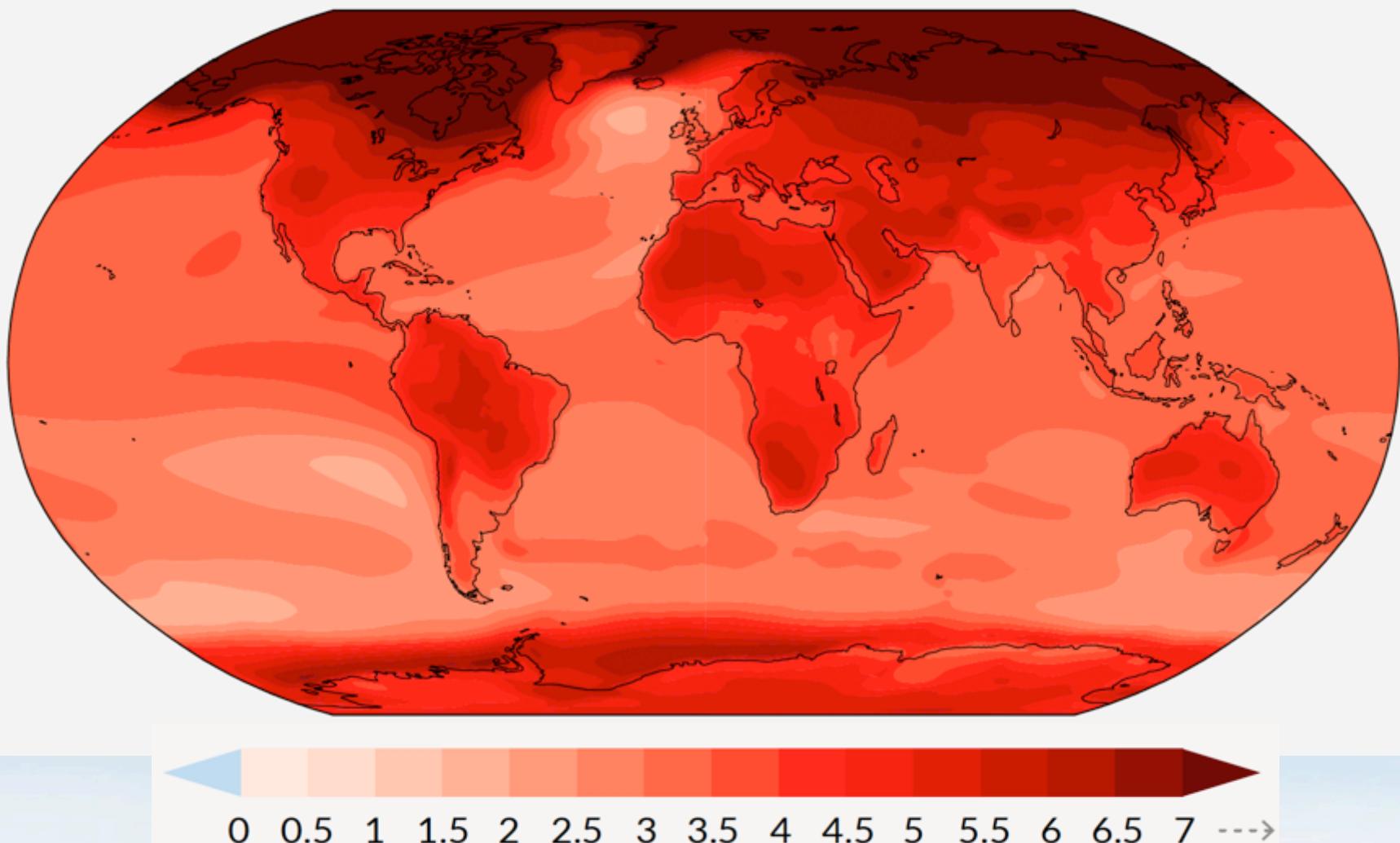
Accumulation d'énergie dans les divers compartiments du système climatique depuis 1971 (1 ZJ = 10^{21} J)
Source : IPCC, AR5, 2014

Simulated change at 2 °C global warming



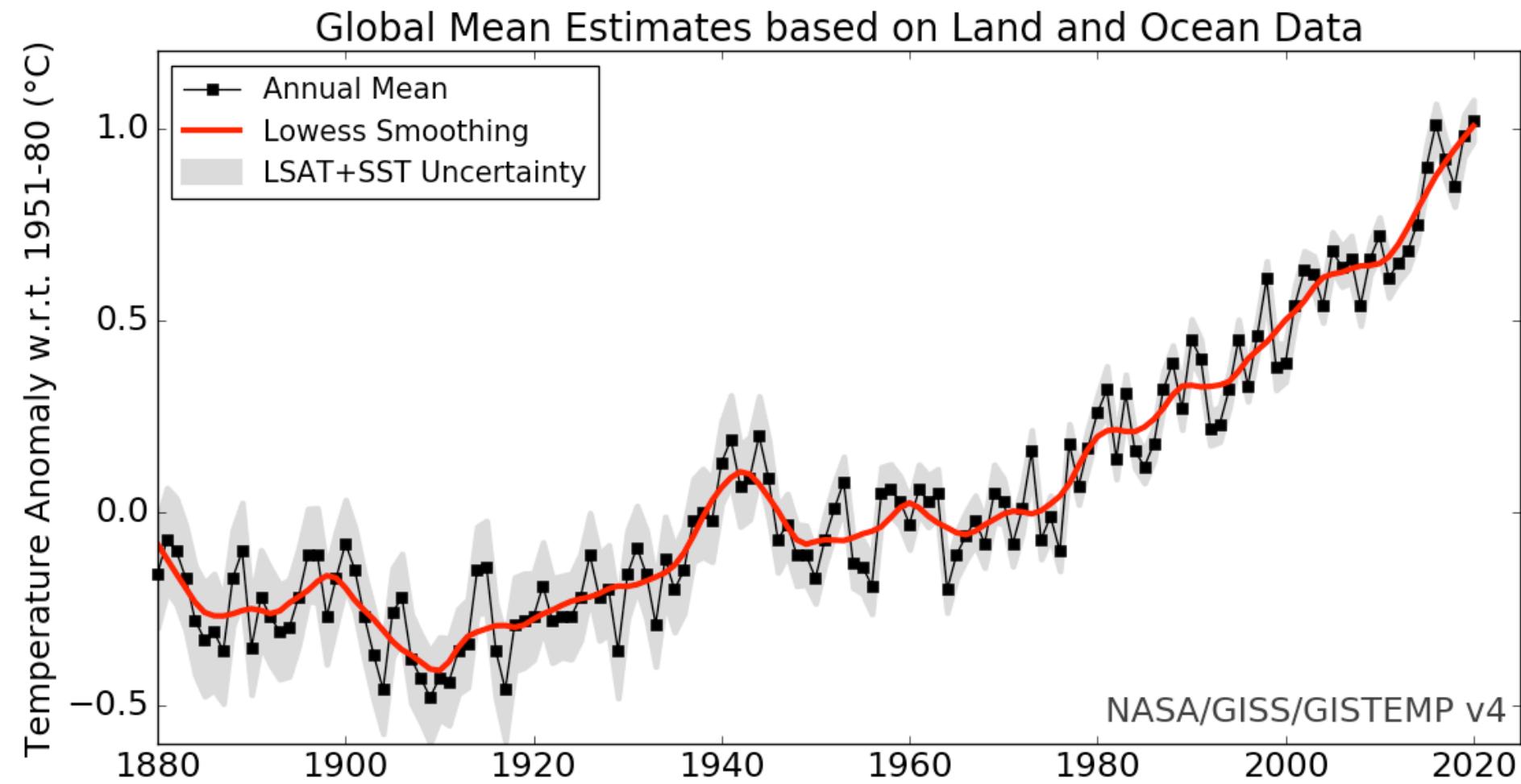
Évolution régionale de la température ($^{\circ}\text{C}$) pour 2°C de réchauffement. Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Simulated change at 4 °C global warming



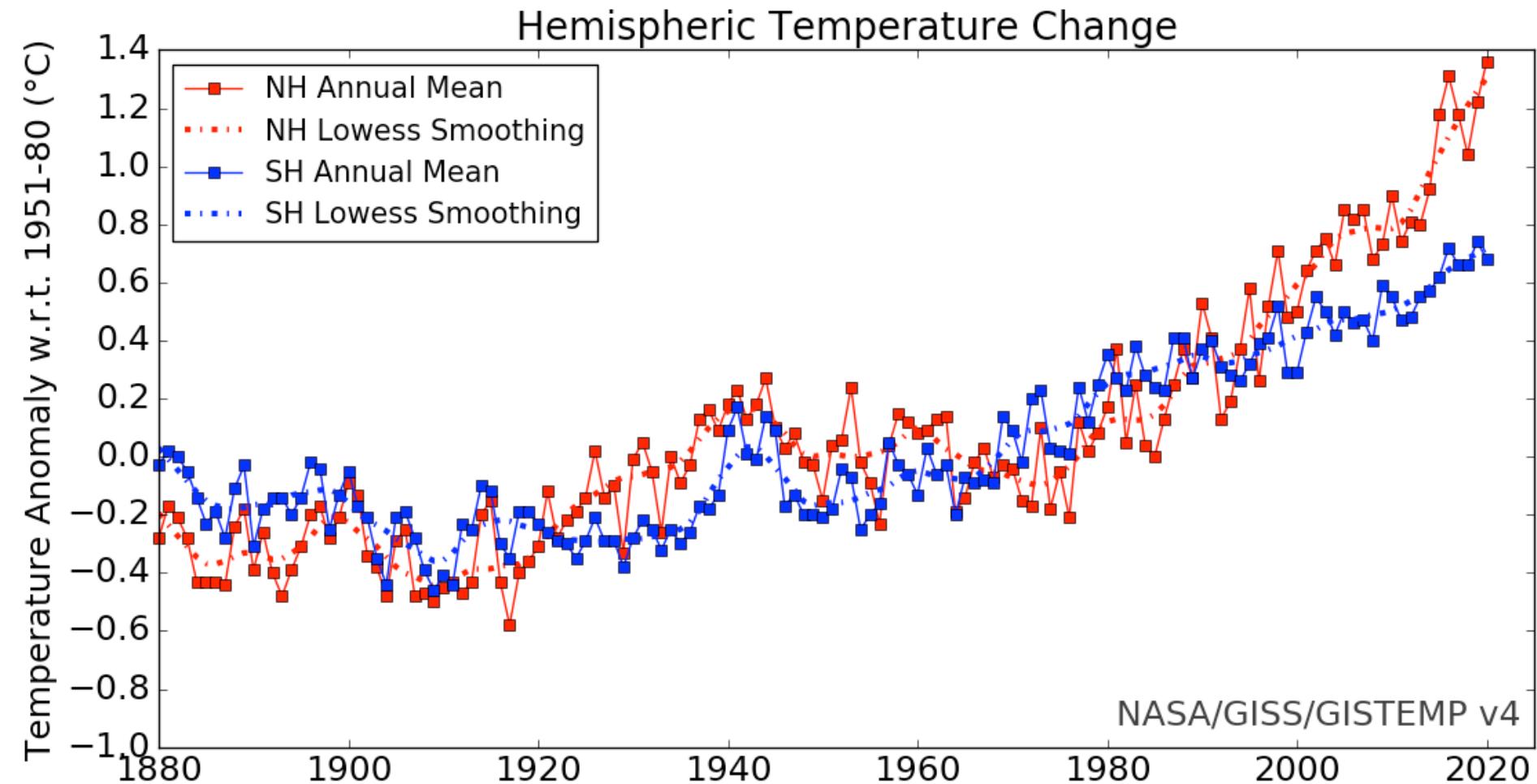
Évolution régionale de la température (°C) pour 4°C de réchauffement. Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Notre affaire a déjà commencé ?



Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées). La barre bleue représente l'incertitude. Source : GISS/NASA, 2019

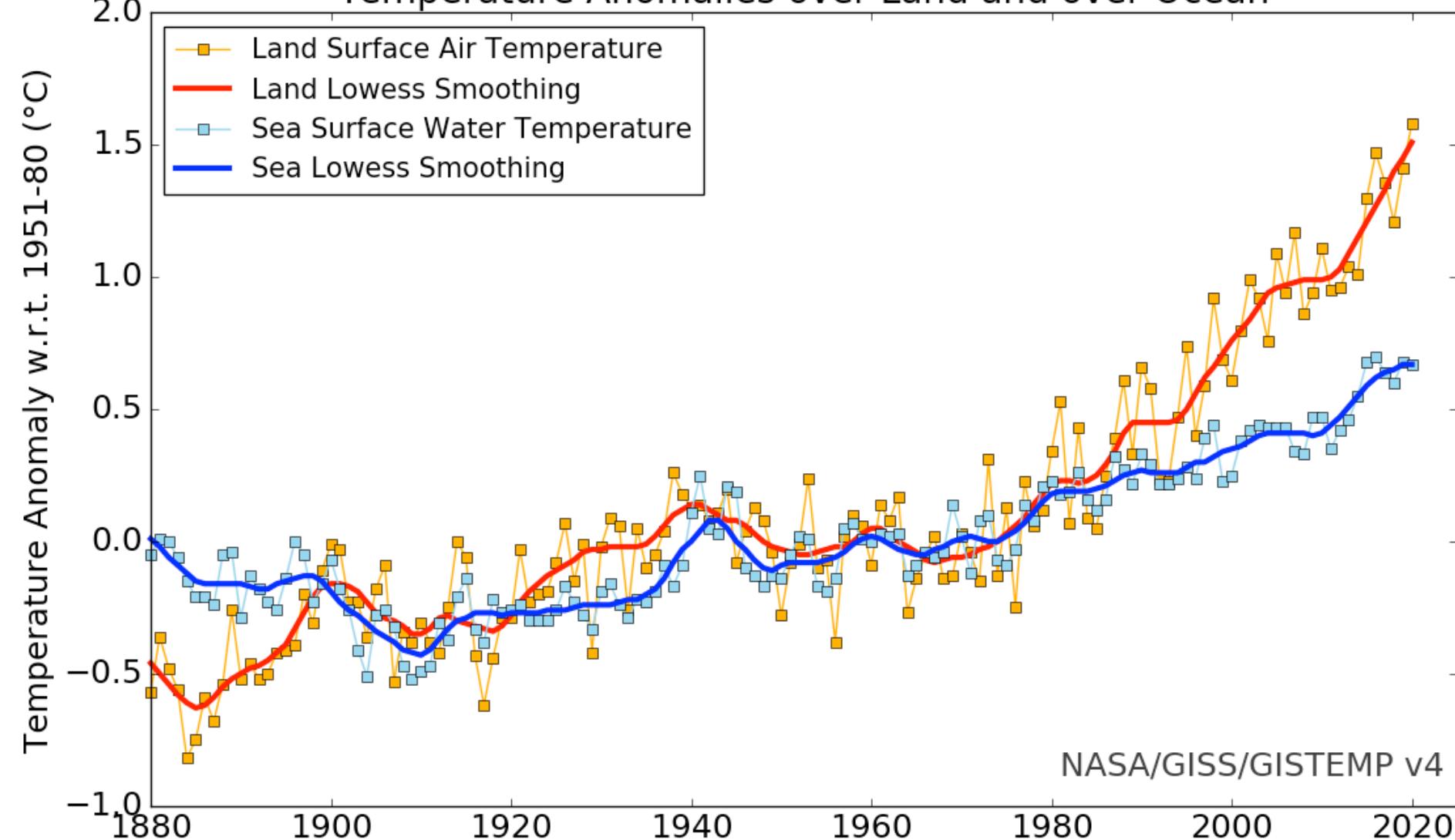
Notre affaire a déjà commencé ?



Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées), pour chaque hémisphère. Source : GISS/NASA, 2021

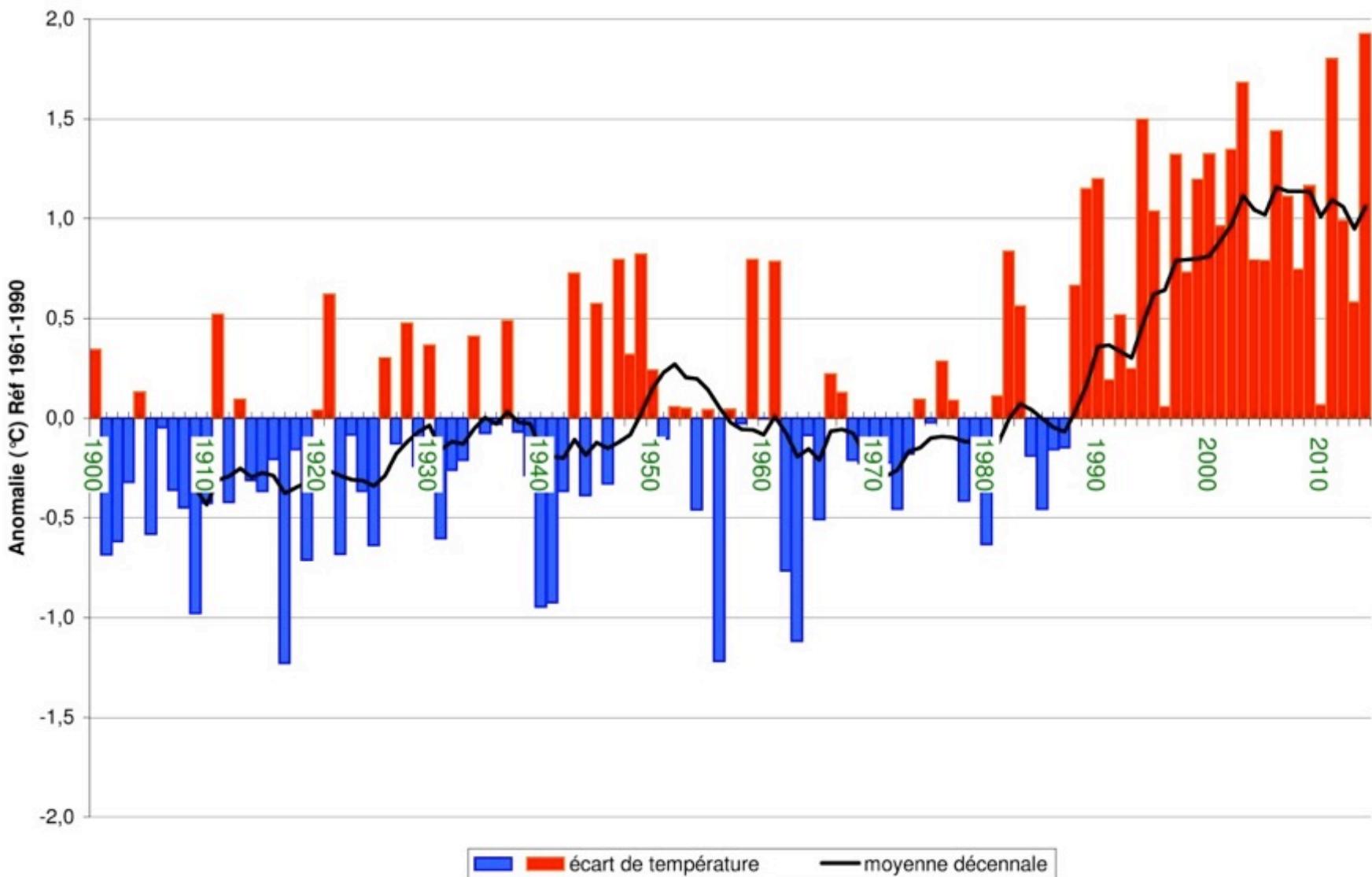
Notre affaire a déjà commencé ?

Temperature Anomalies over Land and over Ocean



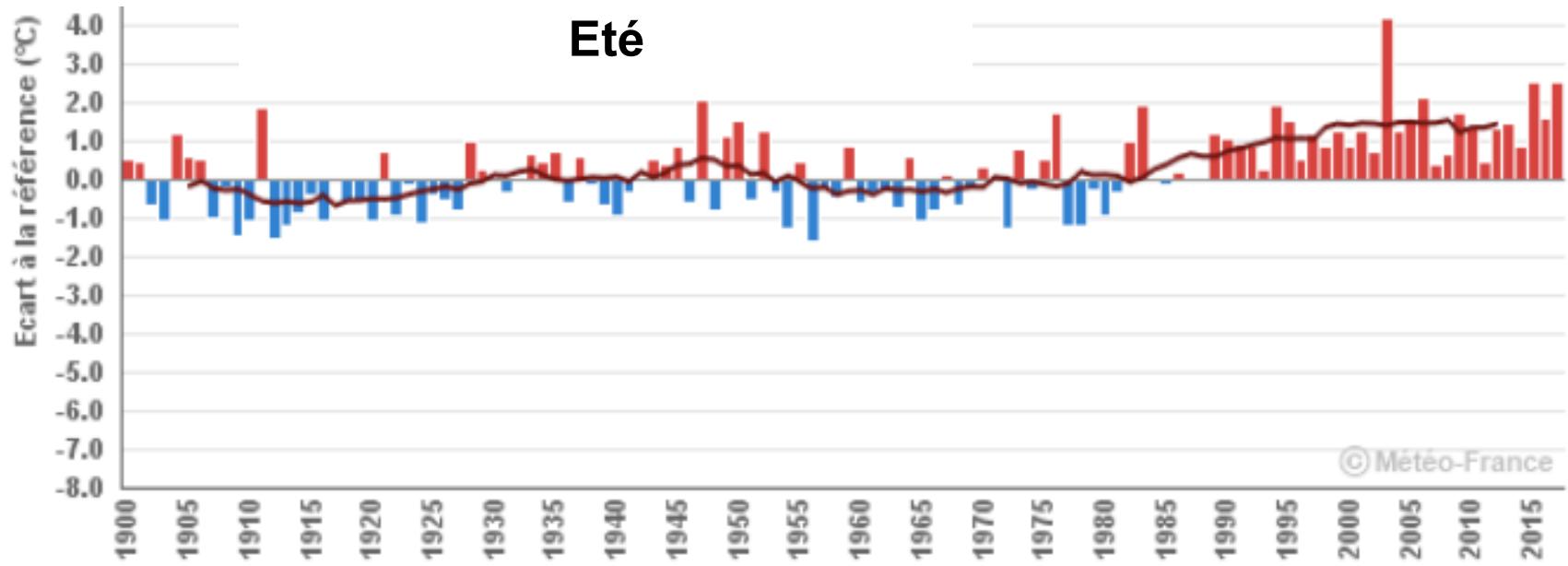
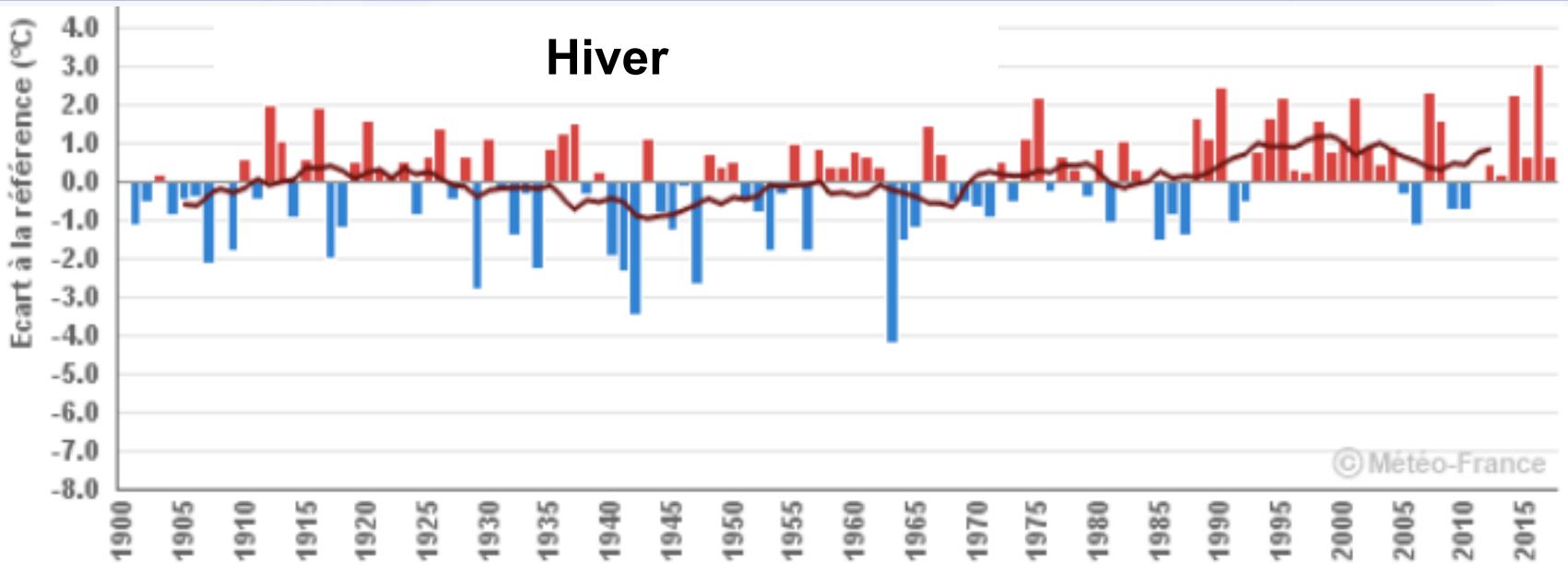
Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées), pour l'océan et les terres émergées. Source : GISS/NASA, 2021

Notre affaire a déjà commencé ?



Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1961-1990 (0 des ordonnées), pour la France. Source : Météo France

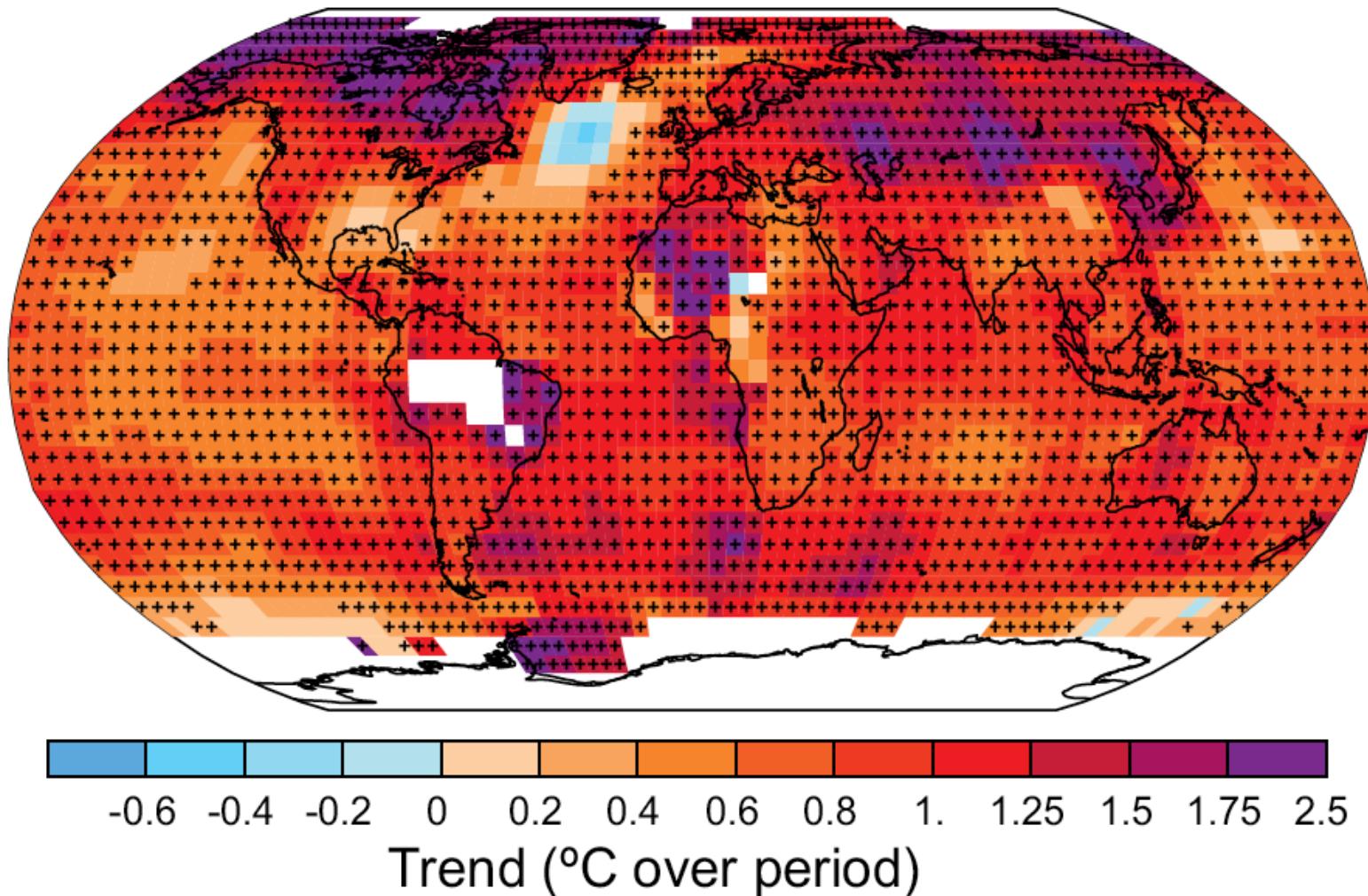
Notre affaire a déjà commencé ?



Ecart à la normale saisonnière en hiver et été pour la métropole. Source : Météo France

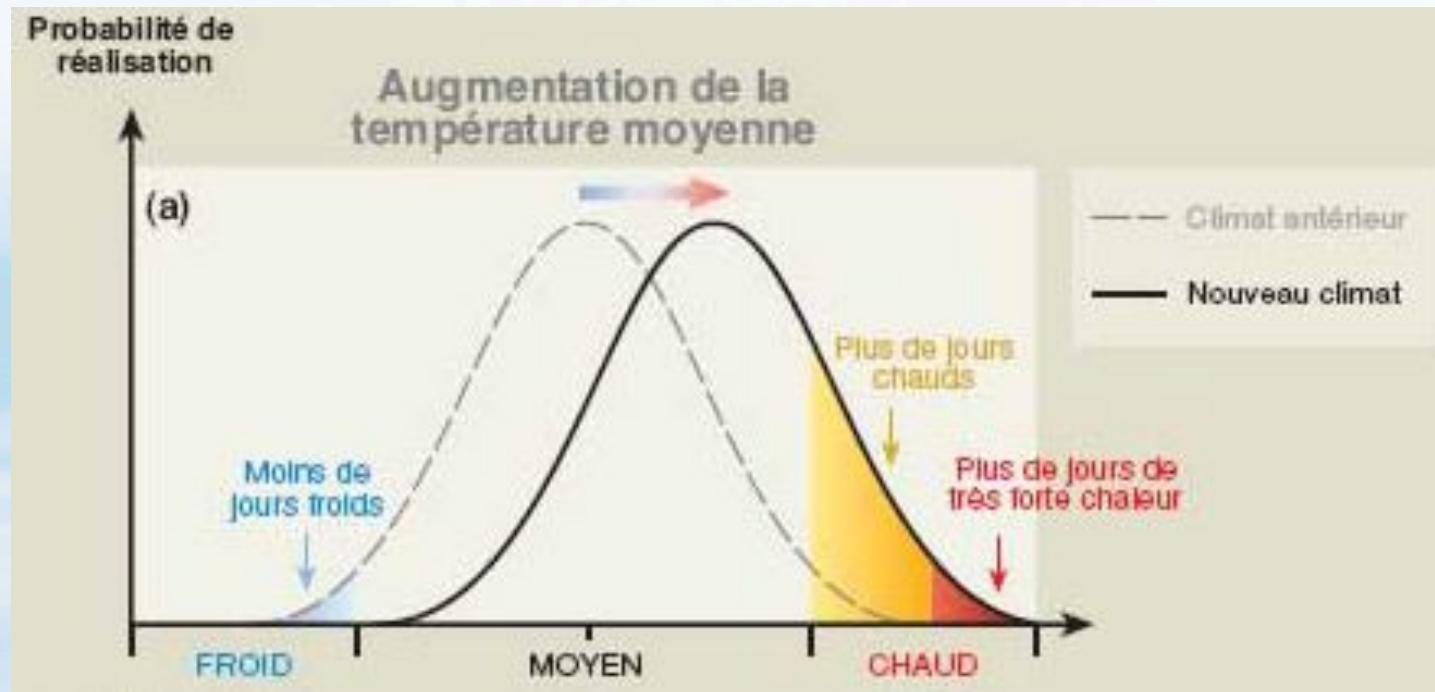
Un changement déjà décelable ?

GISS 1901-2012



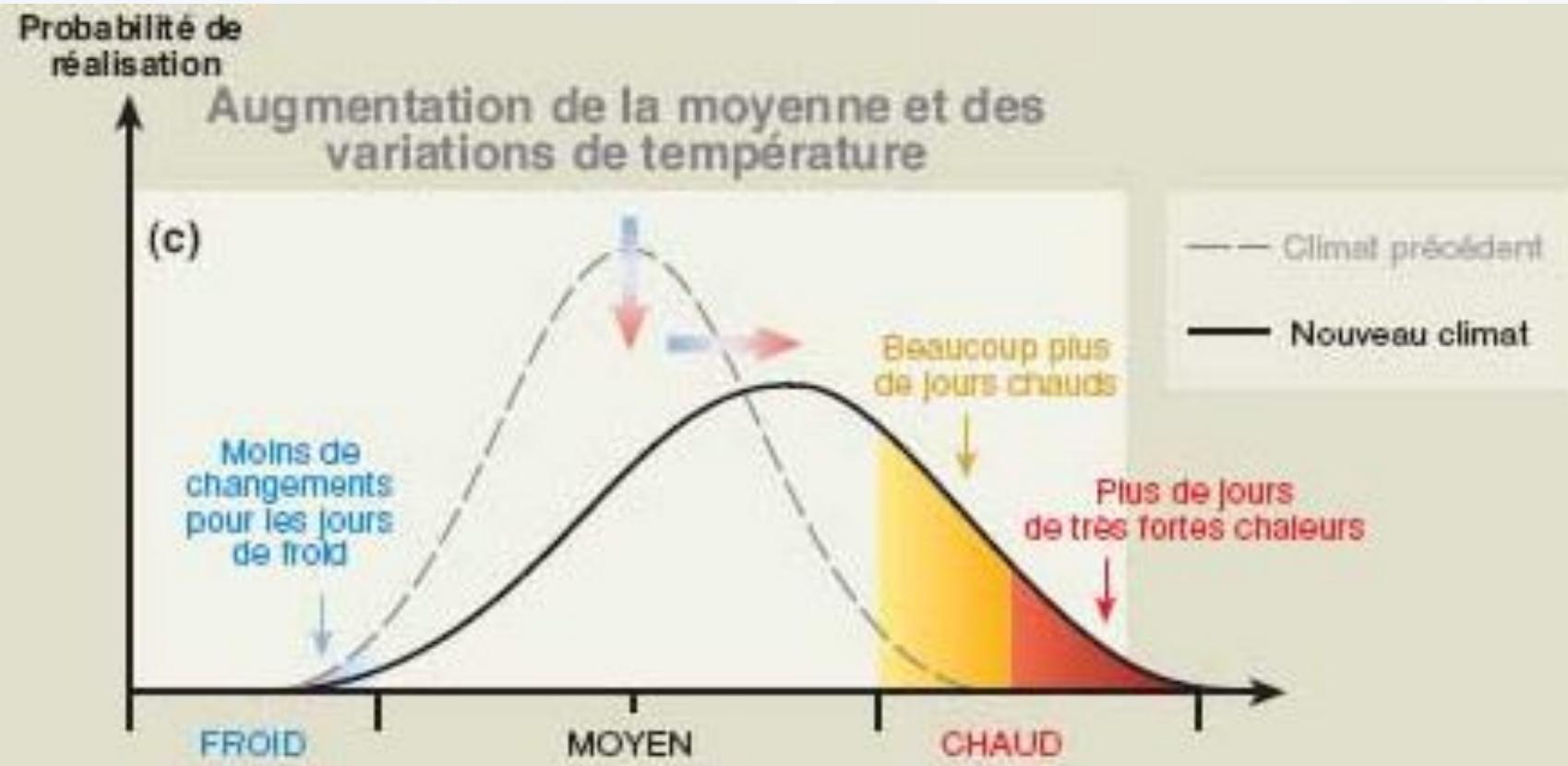
Différence de température moyenne entre 1901 et 2012 reconstituée par le Global Institute for Space Studies (NASA). Les zones blanches correspondent à des endroits où il n'y a pas assez de données. Source : 5th Assessment Report, IPCC, 2014

Un simple déplacement de moyenne sera déjà un problème



Elevation probable des épisodes de canicule. Source : Climate Change 2001,
the scientific Basis, GIEC

Et en plus la variabilité peut s'en mêler !

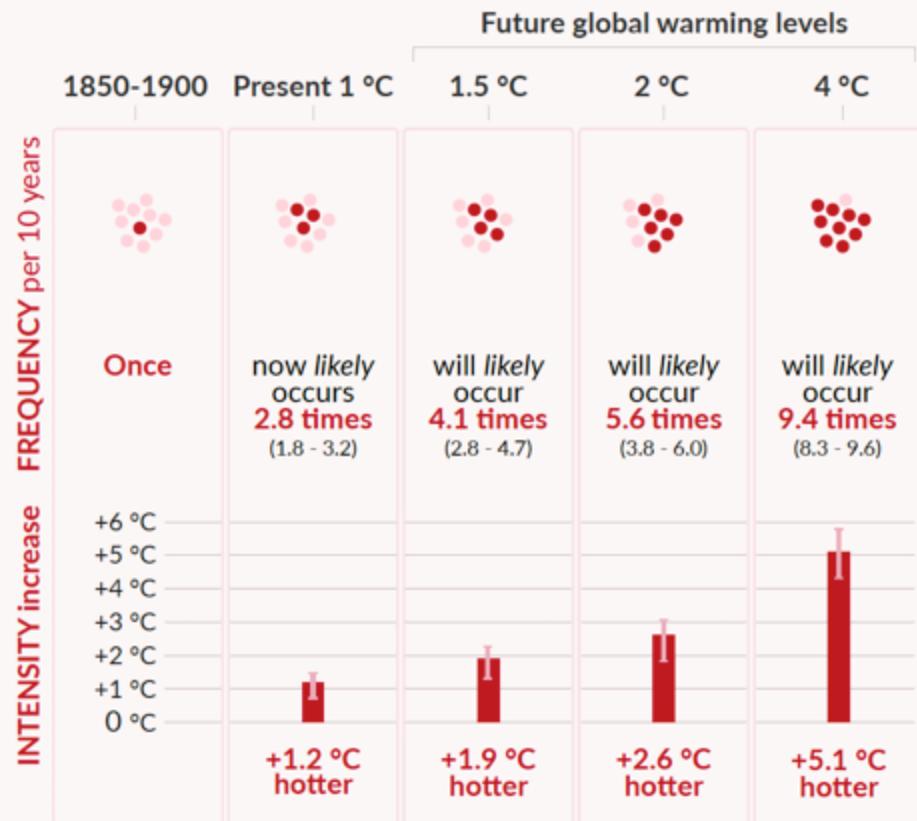


Forte élévation possible des épisodes de canicule. Source : Climate Change
Source GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Chauffe plus souvent Marcel

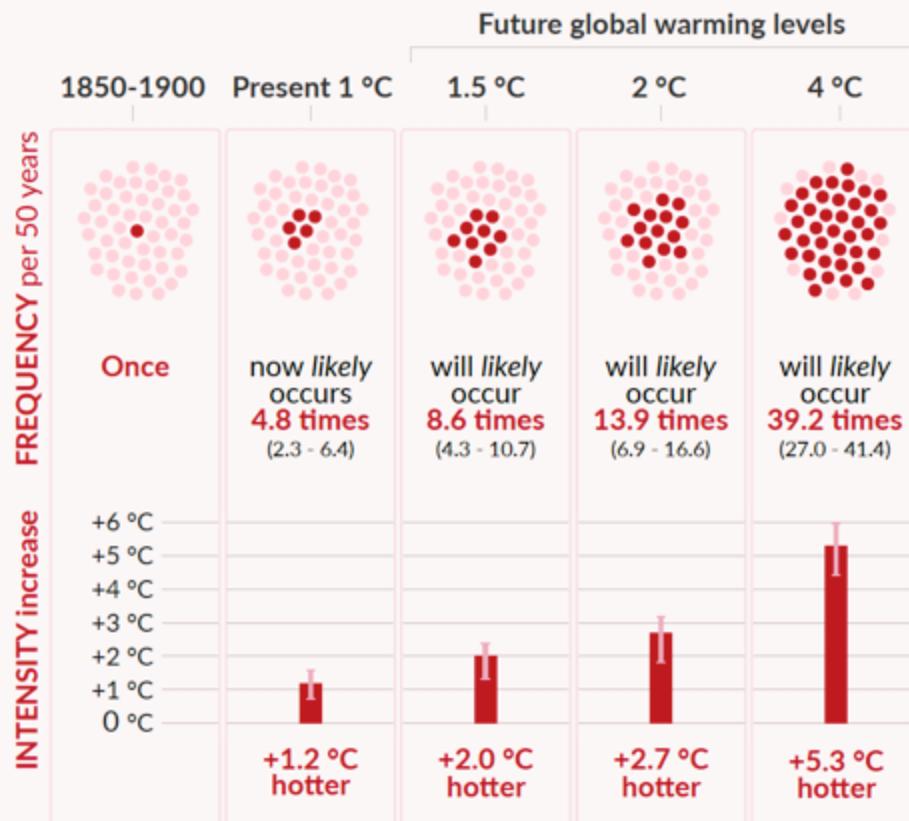
10-year event

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



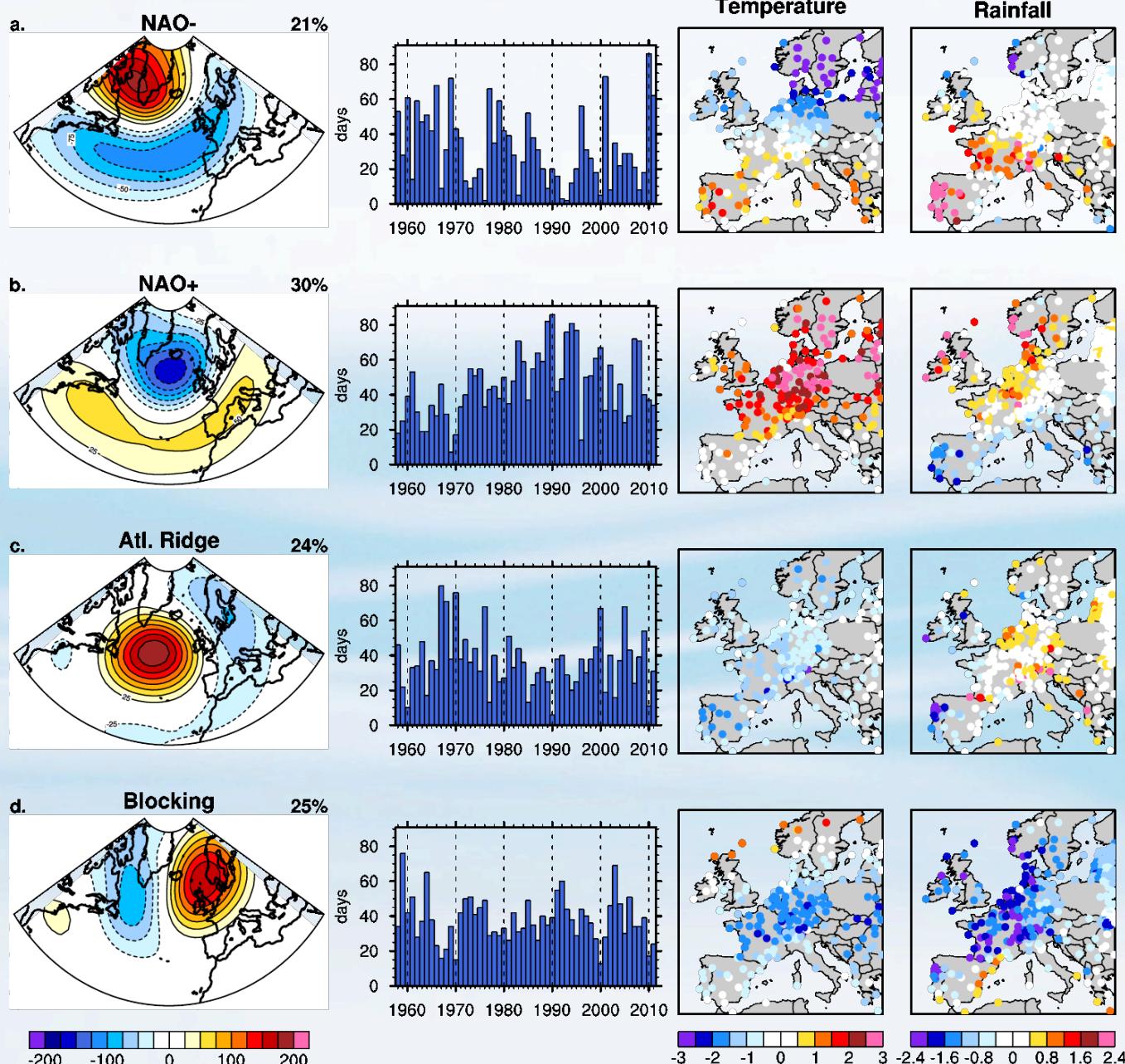
50-year event

Frequency and increase in intensity of extreme temperature event that occurred once in 50 years on average in a climate without human influence

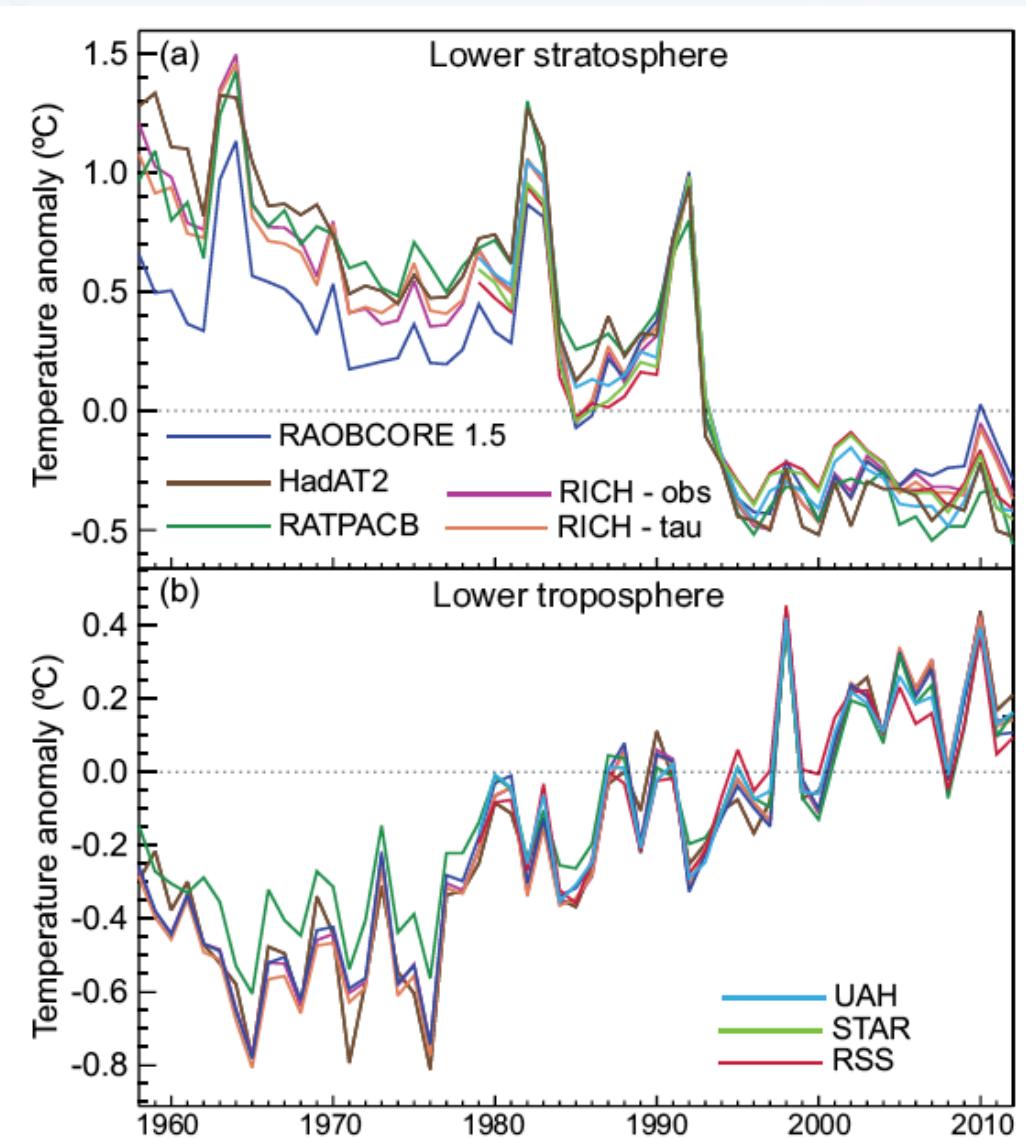


Évolution globale des températures dépassant le 10^e décile et les deux premiers centiles de température dans le climat préindustriel. Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Du global au local : une autre paire de manches



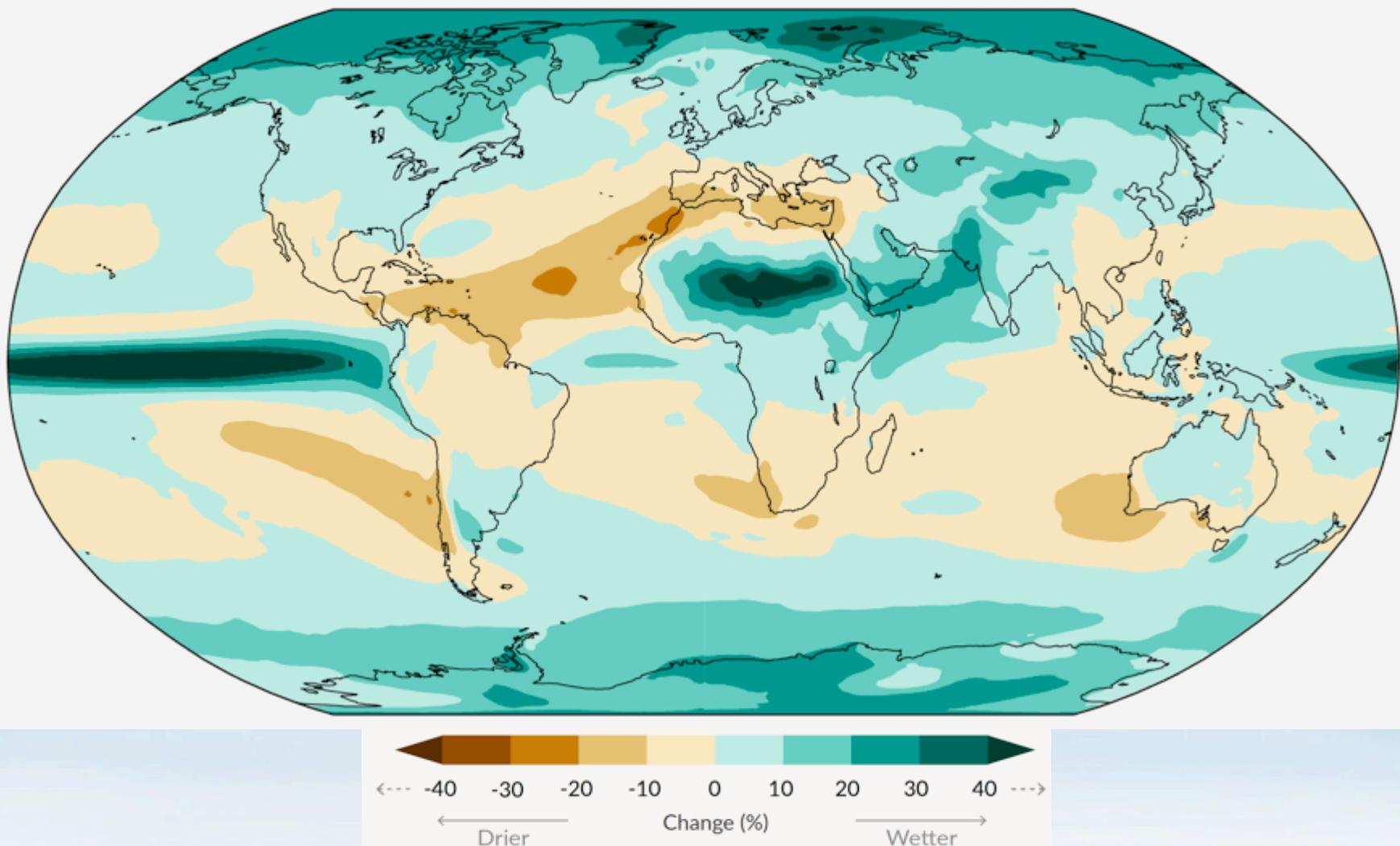
Chaud aux pieds mais froid à la tête



Evolution des températures moyennes près du sol (lower troposphere) et dans la partie basse de la stratosphère. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne

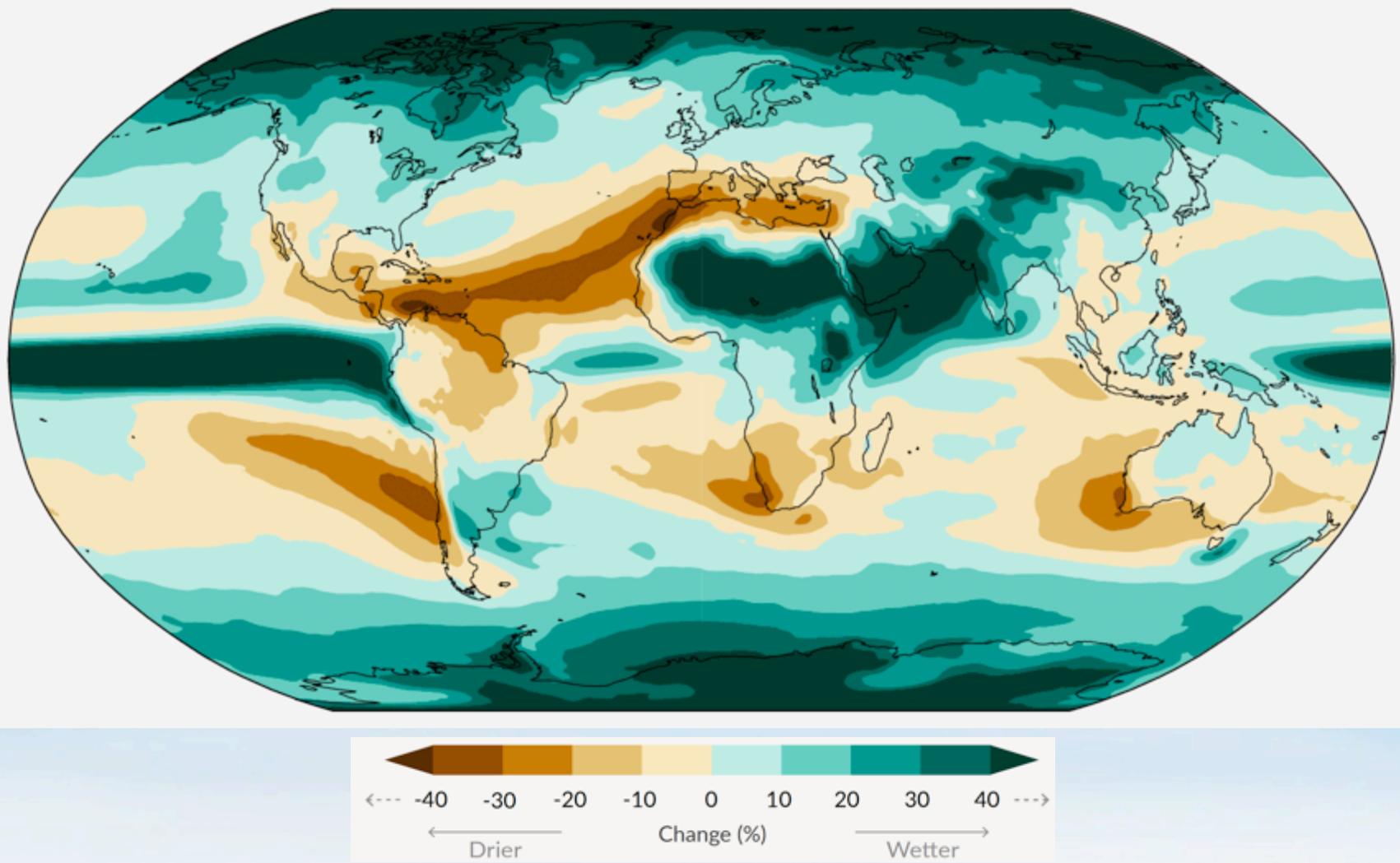
Simulated change at 2 °C global warming



Evolution des précipitations pour une élévation de 2°C de la température moyenne.
Source : GIEC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

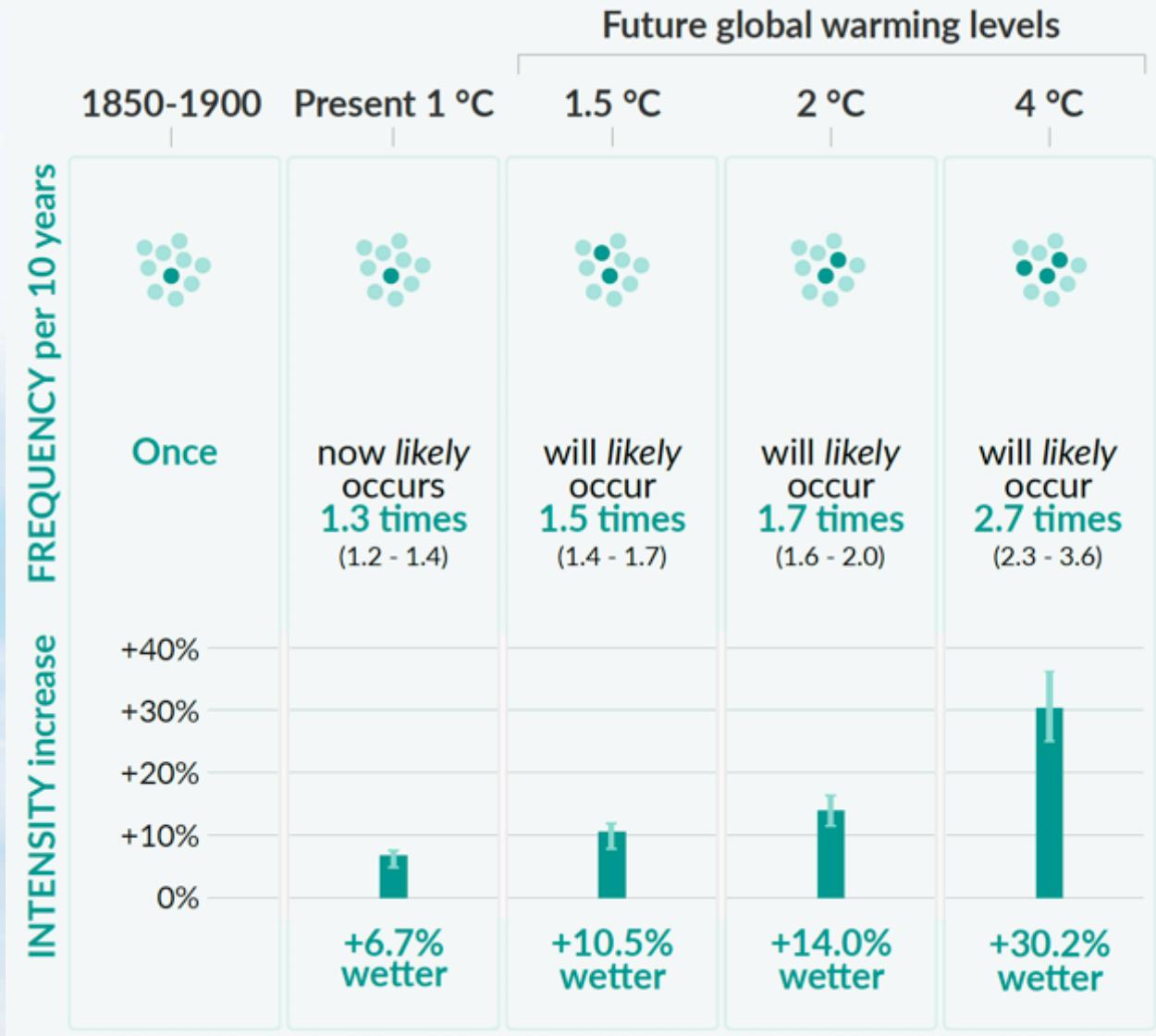
Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne

Simulated change at 4 °C global warming



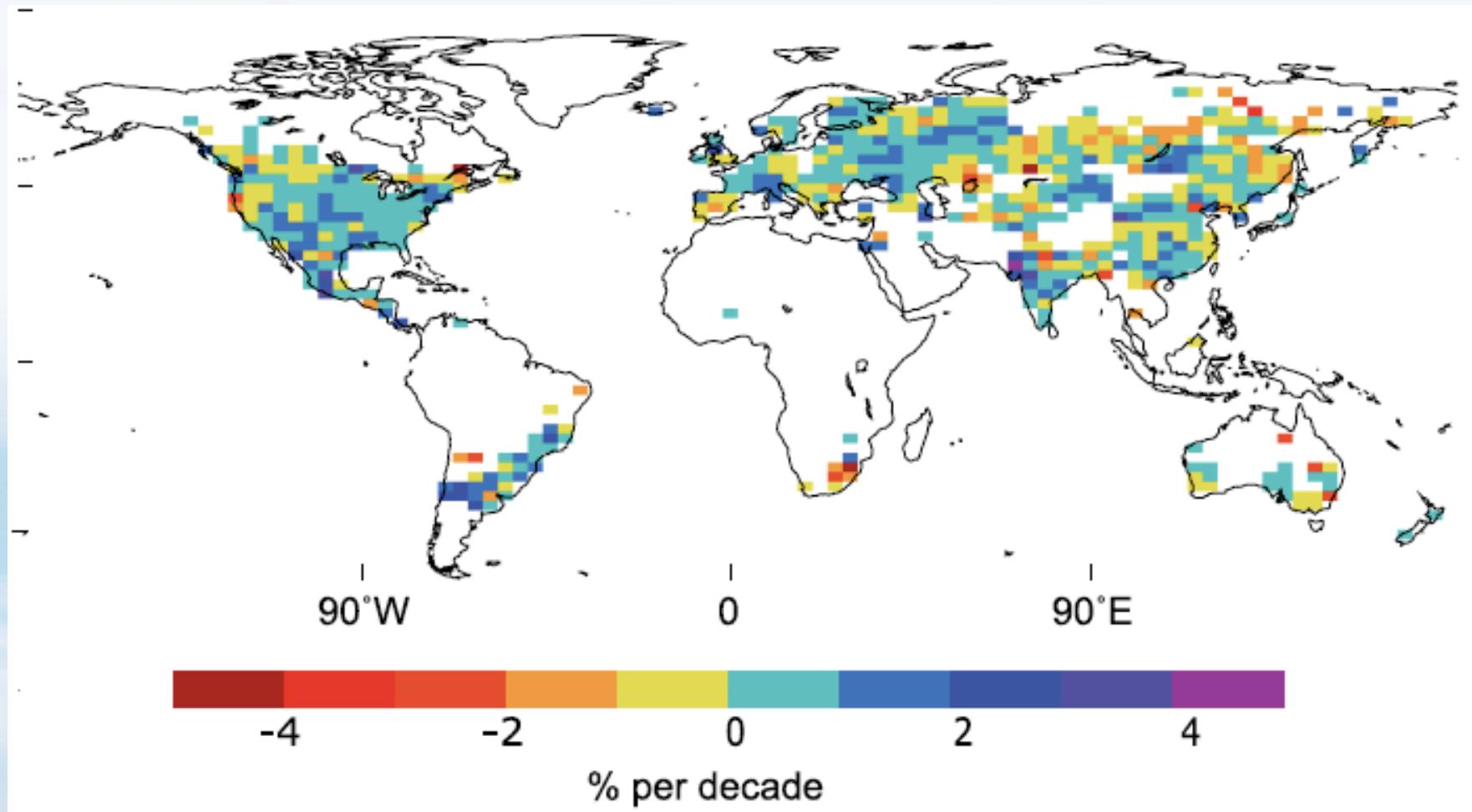
Evolution des précipitations pour une élévation de 2°C de la température moyenne.
Source : GIEC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Bientôt plus d'épisodes pluvieux intenses



Fréquence des jours pluvieux dépassant le 10^e décile de pluviométrie en une journée dans le climat préindustriel. Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

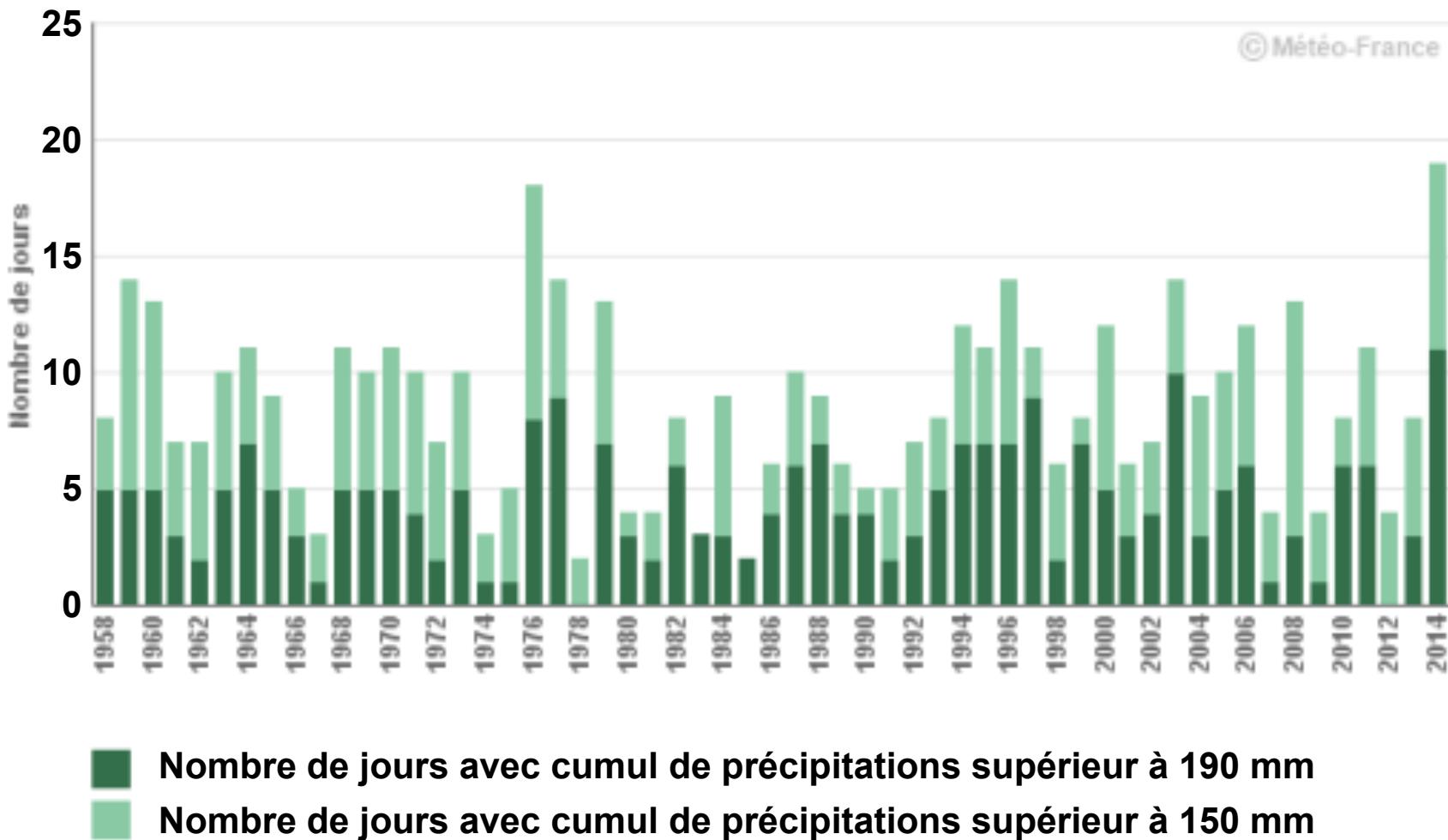
Déjà plus d'épisodes pluvieux intenses ?



Variation décennale moyenne, sur la période 1951 - 2003, des épisodes pluvieux intenses dans le monde (seules les zones colorées sont suffisamment documentées pour permettre l'établissement d'une série longue).
Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

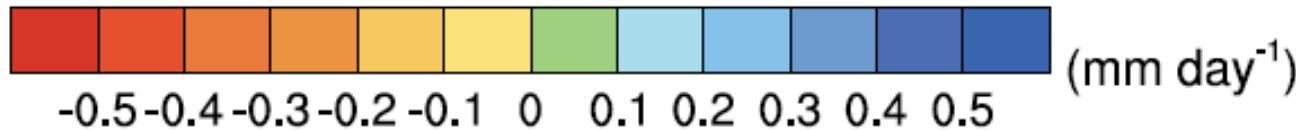
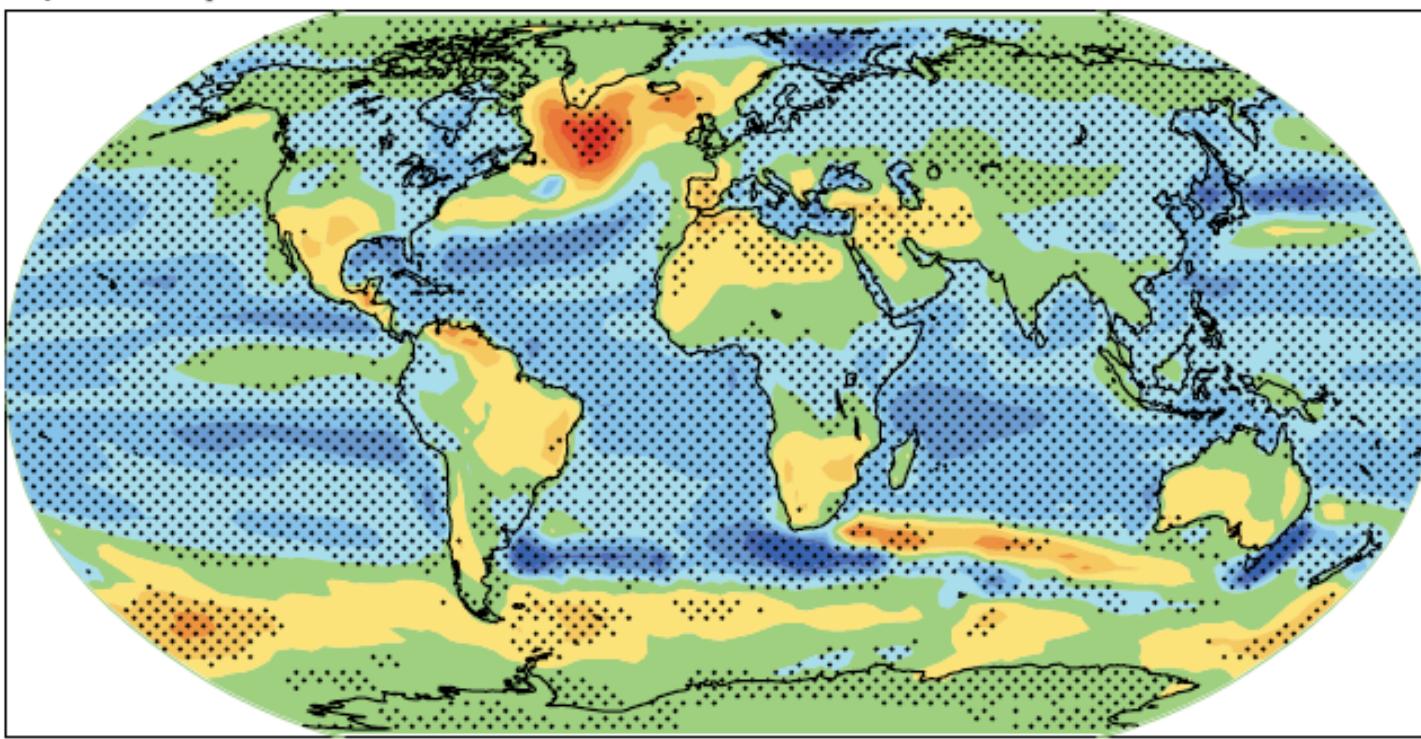
Plus « d'épisodes cévenols » en France ? : pas clair

Pluies diluviales en région méditerranéenne



Nombre annuel d'épisodes pluvieux intenses dans le Sud-Est de la France depuis 1958.
Source : Météo France

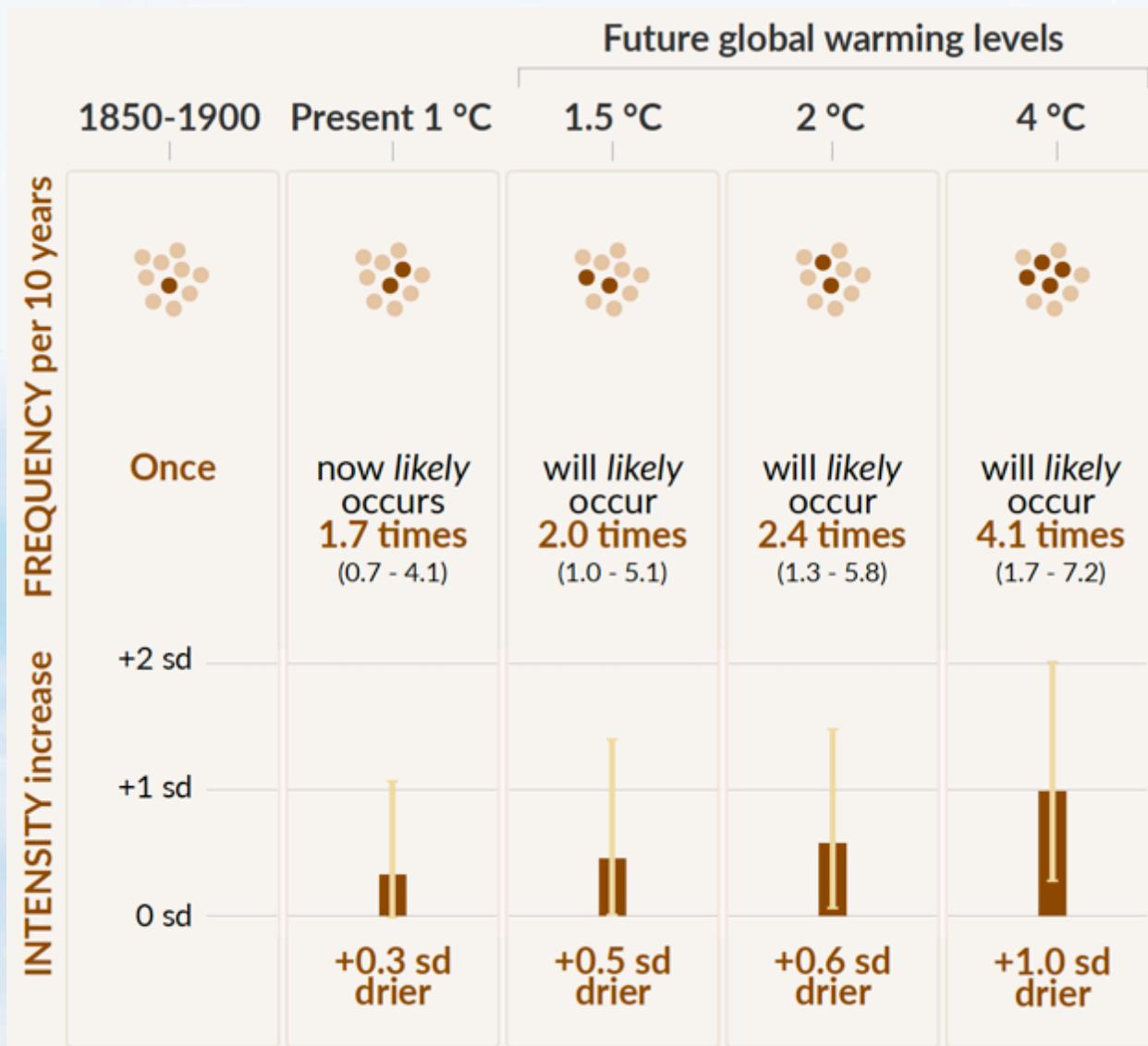
Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (ter)



Moyenne inter-modèles de l'évolution de l'évaporation en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, pour deux saisons et un scénario « charbon haut » (pas de couplage avec le cycle du carbone). Attention ! La couleur bleue signifie une augmentation de l'évaporation, donc un assèchement toutes choses égales par ailleurs

Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

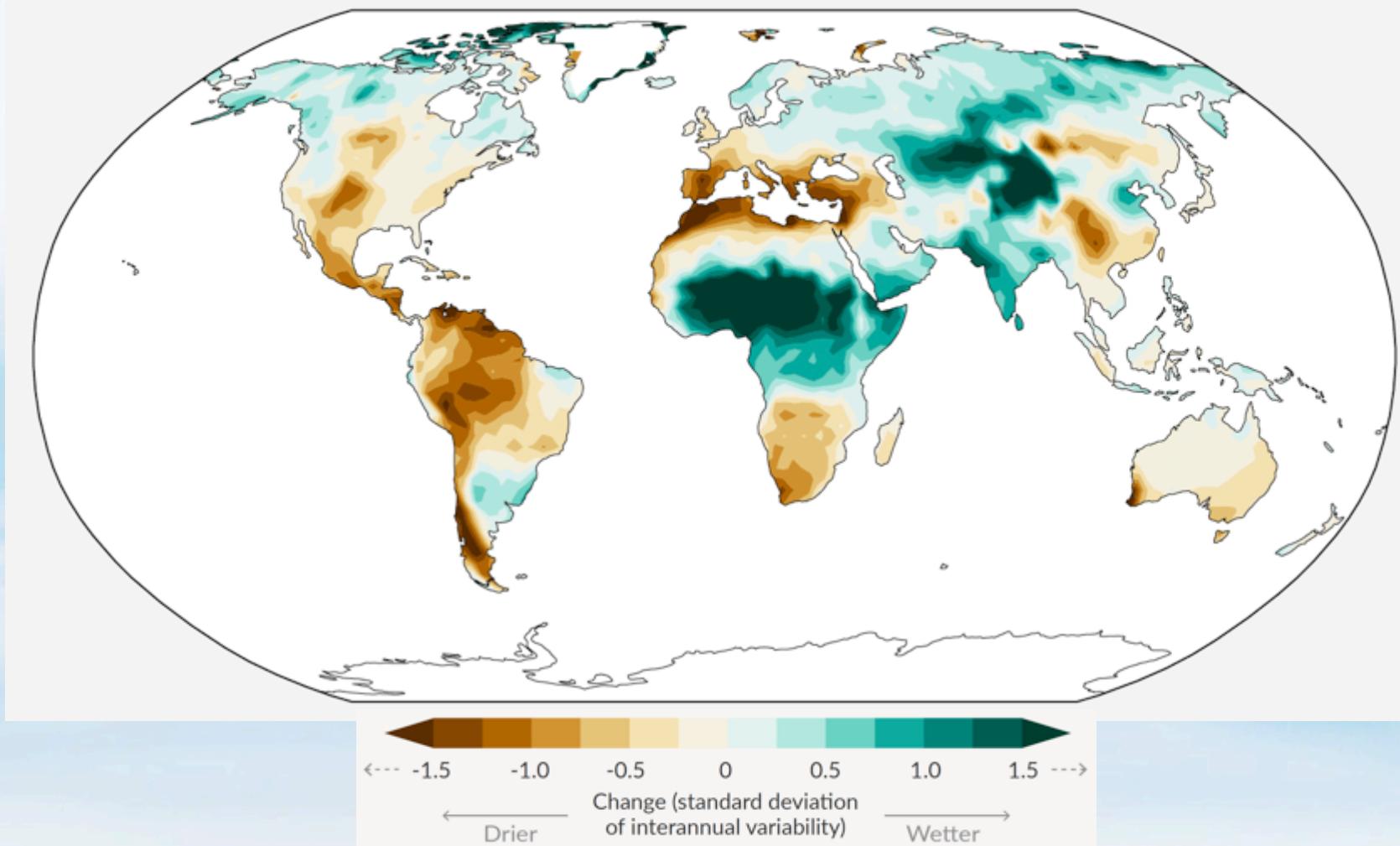
Bientôt plus de sécheresses



Évolution globale des sécheresses dépassant le 10^e décile d'épisodes secs dans le climat préindustriel. Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (quater)

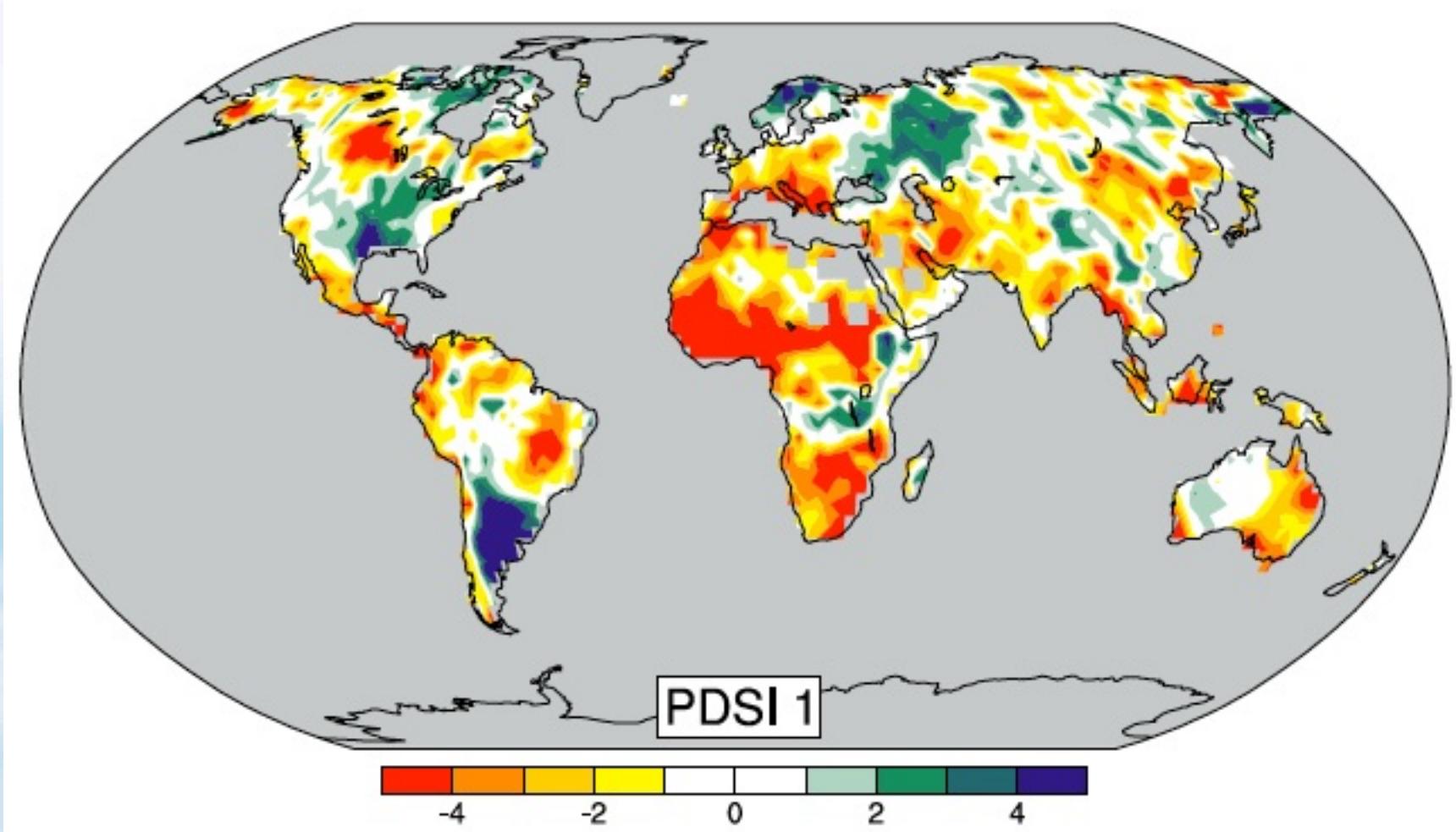
Simulated change at 2 °C global warming



Evolution de l'humidité des sols pour 2°C de réchauffement. Une unité de déviation standard signifie que les conditions survenant une fois tous les 6 ans deviennent standard

Source : GIEC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Déjà des sols plus secs ?



Evolution de 1900 à 2005 de l'index utilisé pour évaluer l'état de sécheresse d'une région, l'index Palmer (en anglais : PDSI, pour Palmer Drough Severity Index). Le sol des régions en jaune et rouge s'est asséché, le sol des régions en bleu et vert humidifié.

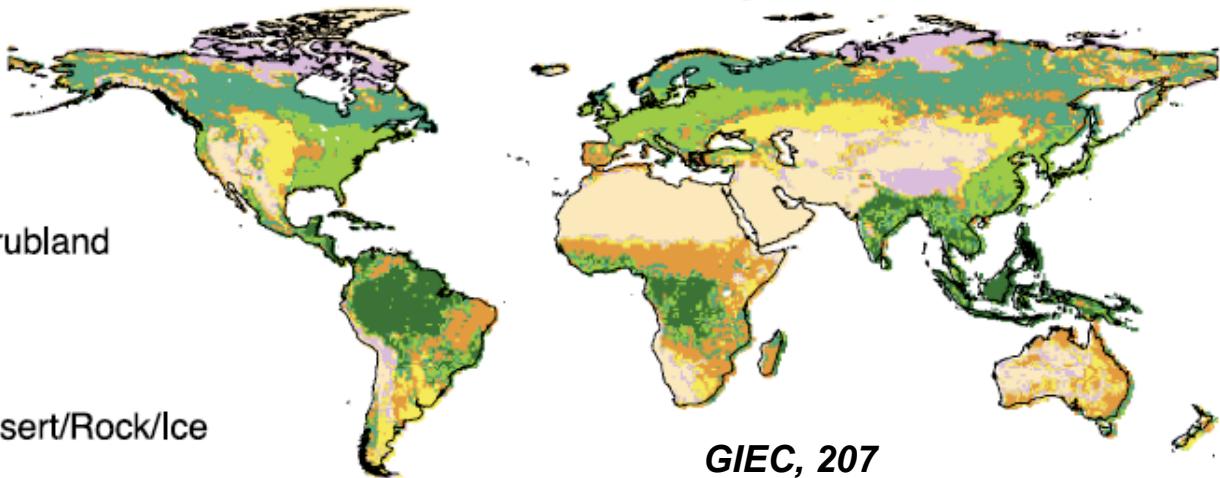
Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Atteintes des écosystèmes continentaux et de l'agriculture

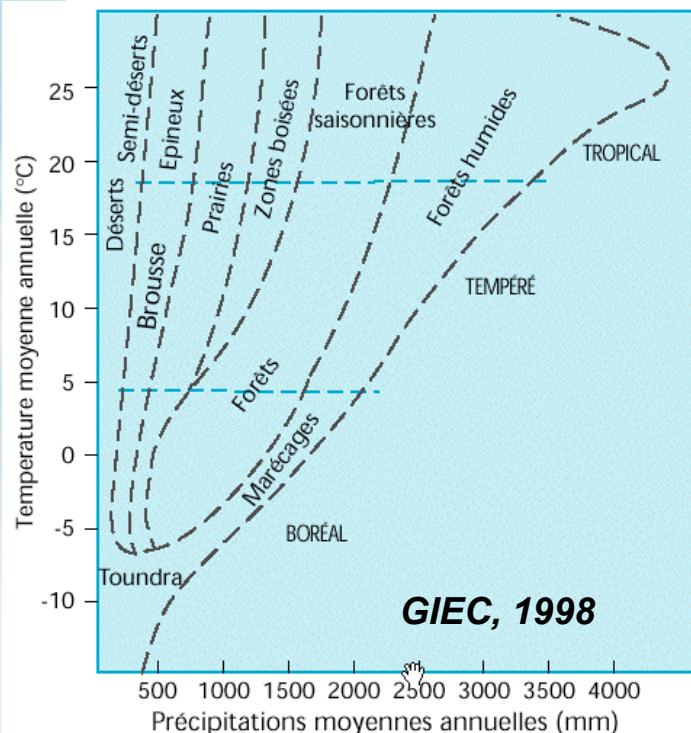
Biome Type

	Tropical Forest
	Temperate Forest
	Boreal Forest
	Savanna/Dense Shrubland
	Grassland/Steppe
	Tundra
	Open Shrubland/Desert/Rock/Ice

Potential Natural Vegetation

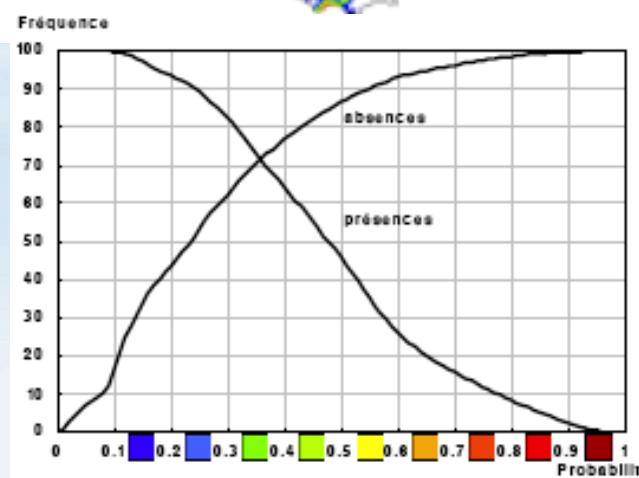
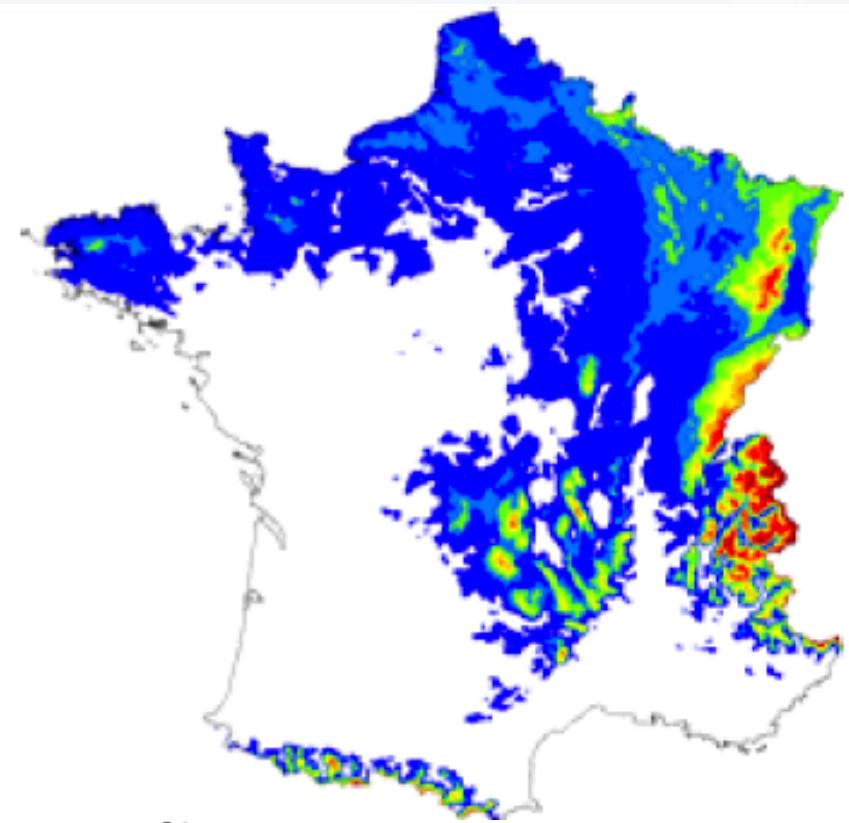
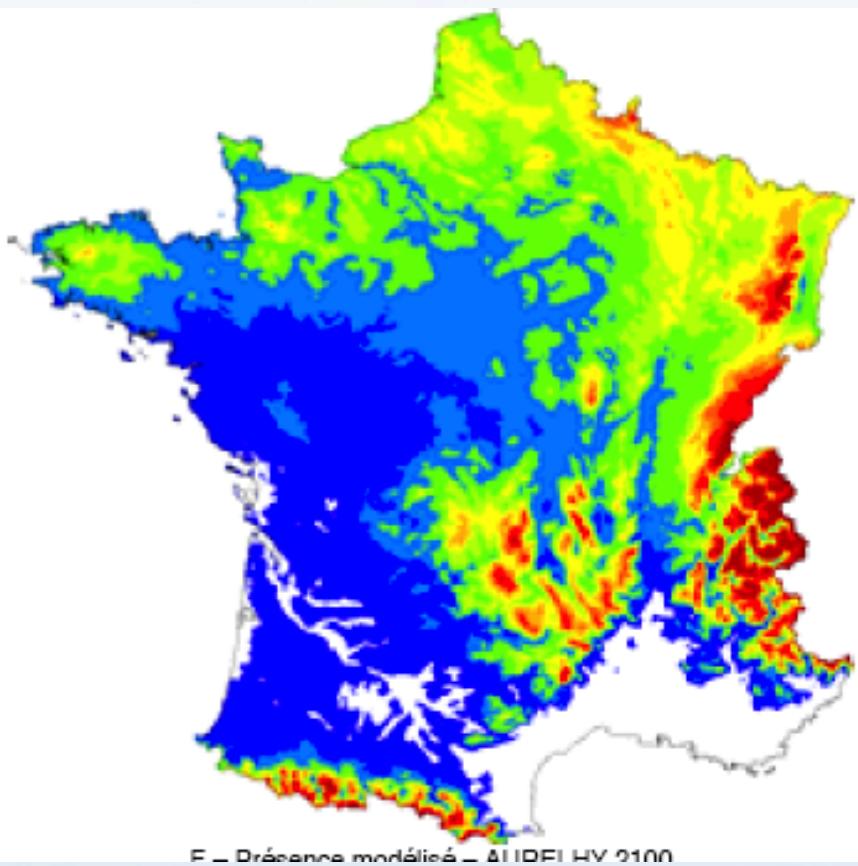


GIEC, 207



- **Diminution des récoltes agricoles et forestières ?**
- **Diminution du nombre d'écosystèmes (désertification par endroits ?)**
- **Appauvrissement des écosystèmes survivants ?**
- **Invasions d'espèces exotiques ?**

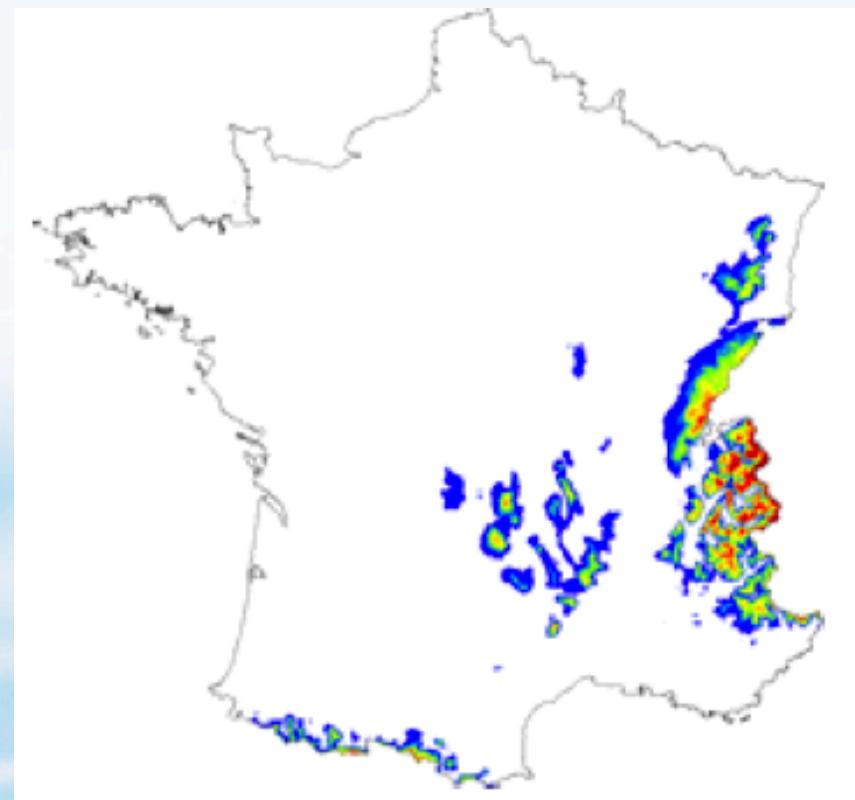
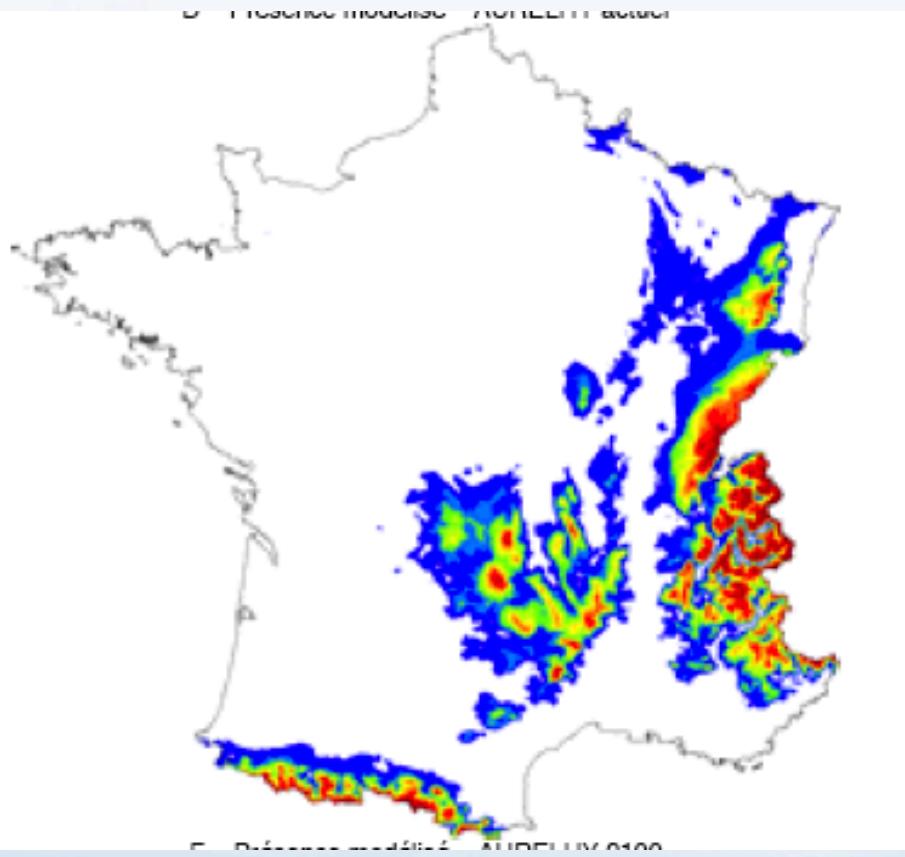
Exemple : le hêtre en France



Aire de répartition du hêtre aujourd'hui (à gauche) et potentiel en 2100 (à droite) avec un scénario « peu émissif » (B2).

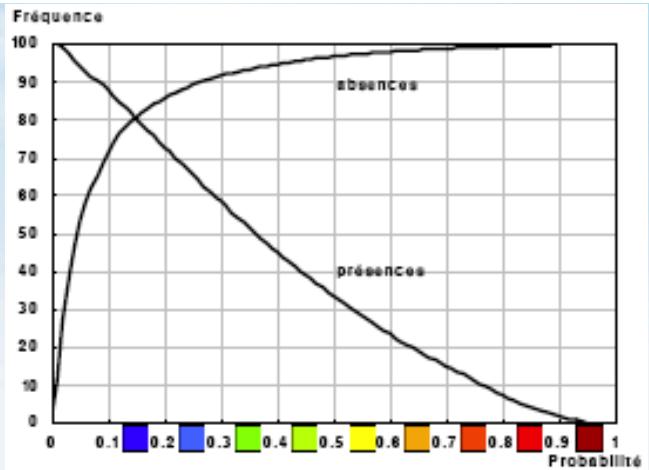
Source : Badeau et al., CARBOFOR, INRA Nancy, 2004

Exemple (2): le sapin en France



Aire de répartition du sapin aujourd'hui (à gauche) et potentiel en 2100 (à droite) avec un scénario « peu émissif » (B2).

Source : Badeau et al., CARBOFOR, INRA
Nancy, 2004

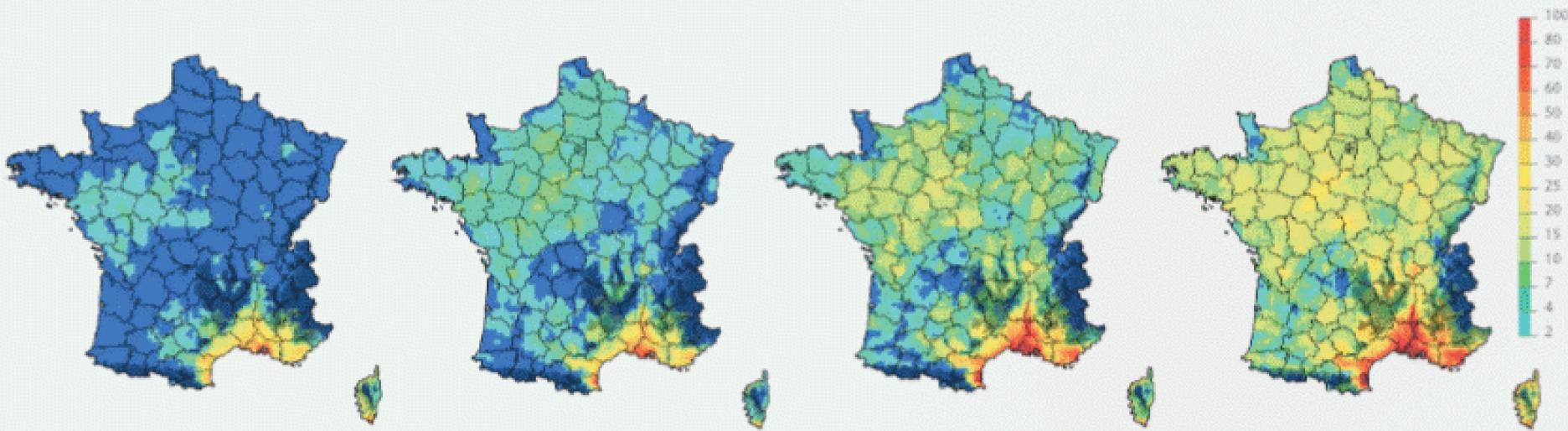


Référence
1989 - 2008

Horizon proche
2031 - 2050

Horizon moyen
2051 - 2070

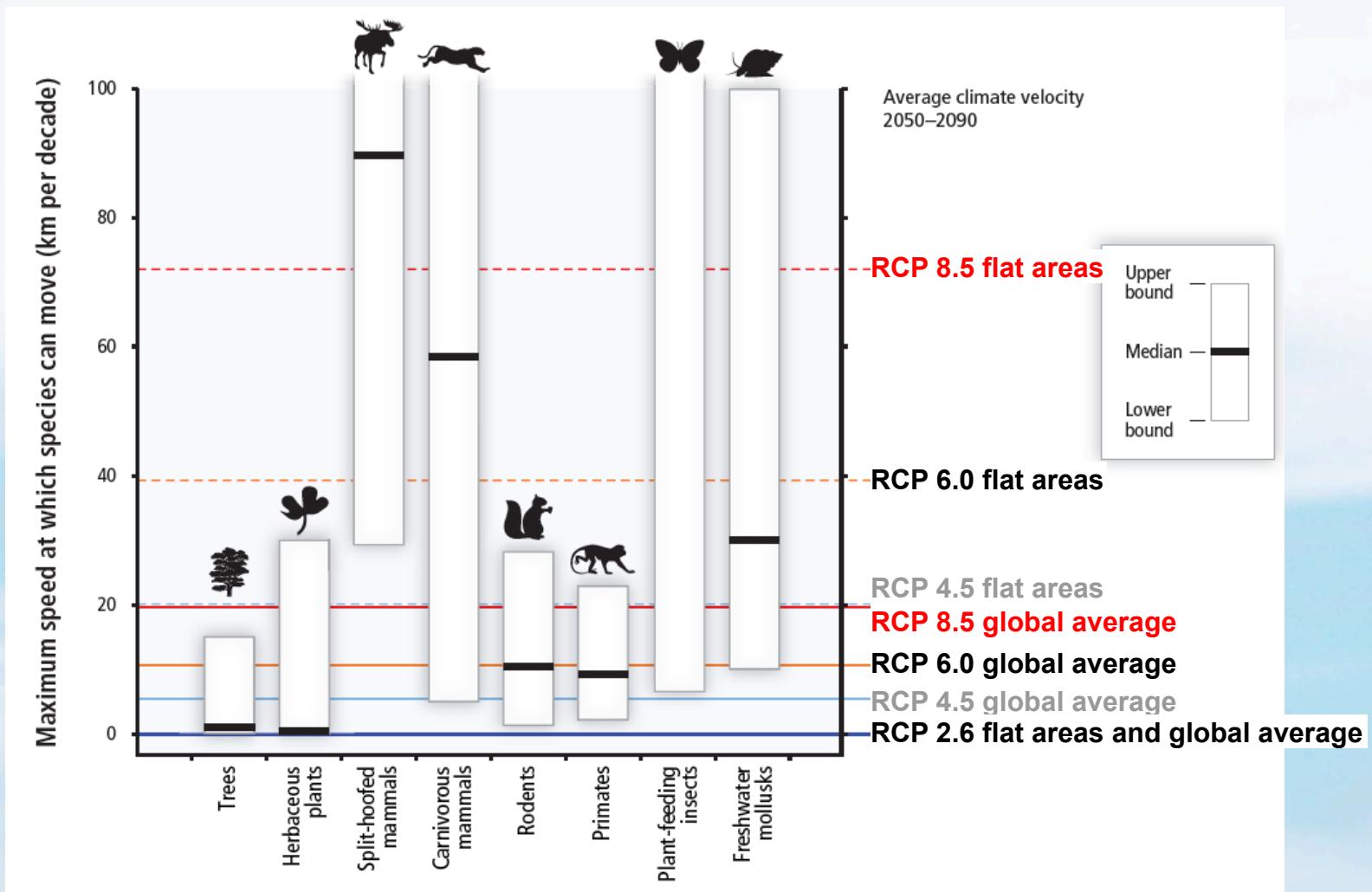
Horizon lointain
2081 - 2100



© DRIAS les futurs du climat (Météo-France, CNRM-GAME, IPSL, CERFACS)

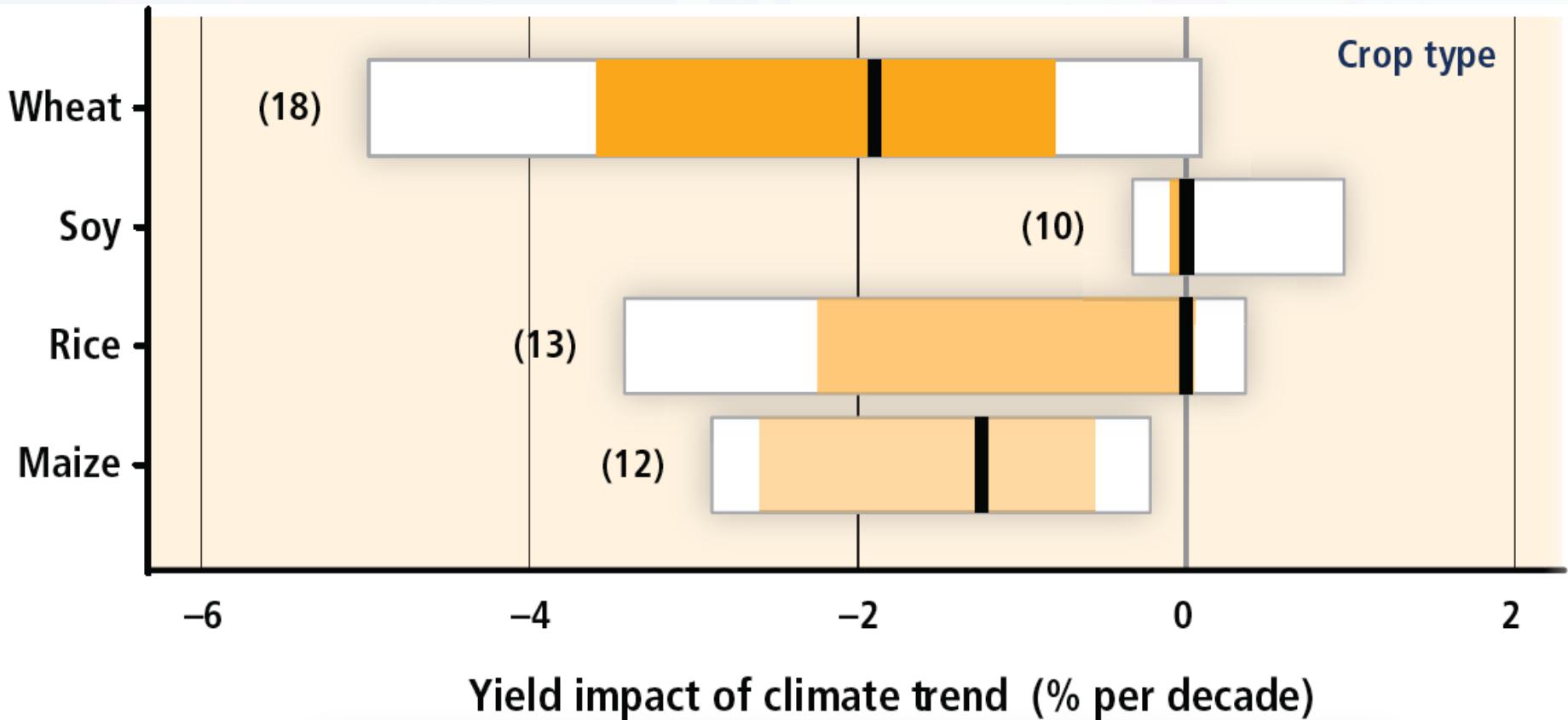
Nombre de jours avec un index > 40 (RCP 8.5). Source : Meteo France

Survivra, survivra pas ?

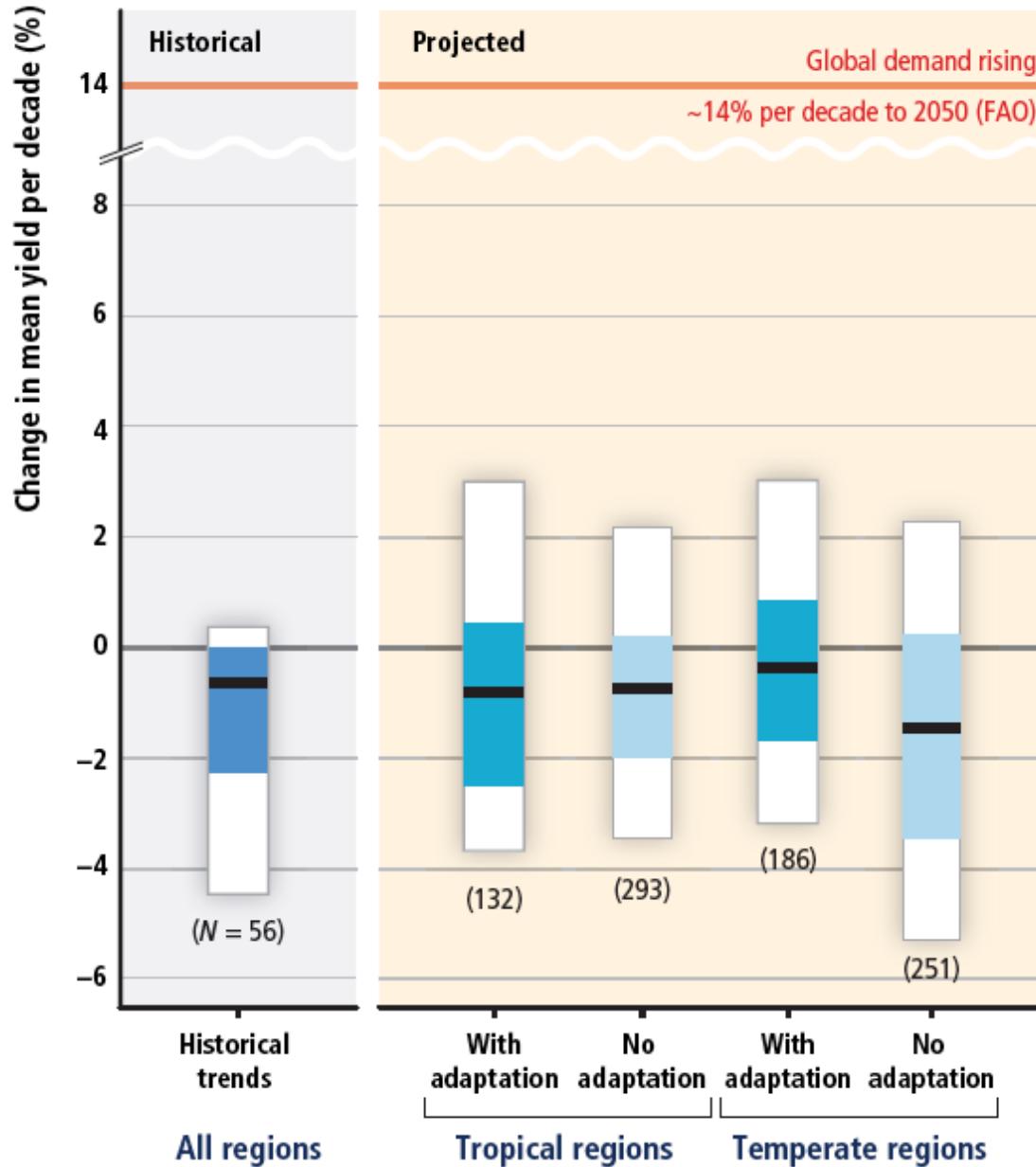


Vitesse de migration possible de diverses classes d'espèces, et vitesse de déplacement des zones climatiques vers les pôles.

Source GIEC, 5^e rapport d'évaluation, 2014



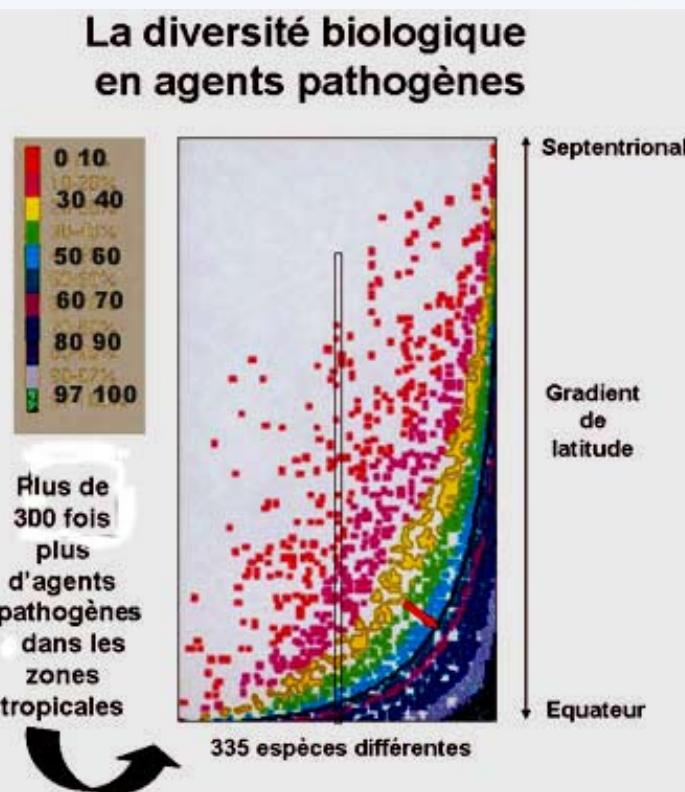
Tendance actuelle sur la variation décennale des rendements par type de production (moyenne mondiale). Source GIEC, 5^e rapport d'évaluation, 2014



Variation des rendements (% par décennie) des cultures selon la zone climatique et l'existence ou non de mesures d'adaptation.

Source GIEC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Impacts sur la santé : fichue biodiversité !

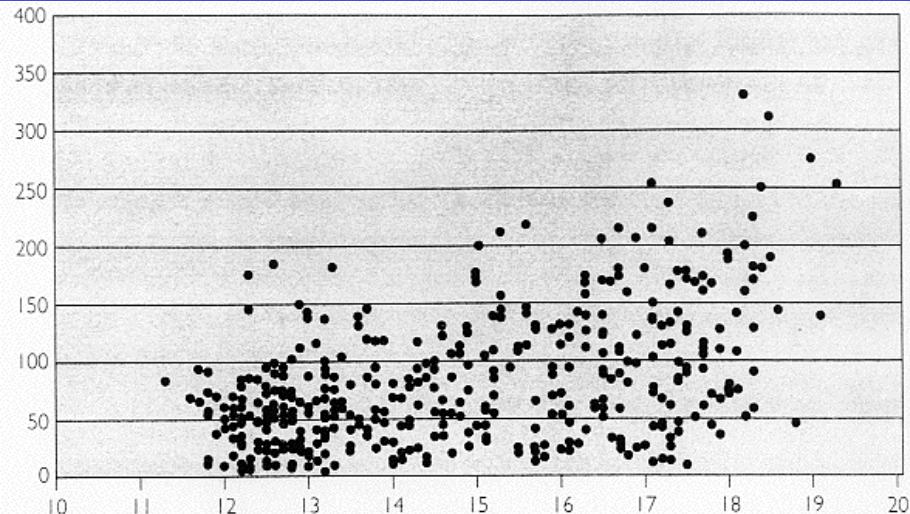


Source Weber, 2006

La chaleur est généralement favorable aux micro-organismes, ce qui s'applique aussi à ceux qui sont pathogènes. Les risques évoqués concernent :

- L'augmentation des zones concernées par les maladies à vecteurs (paludisme, fièvre jaune, dengue, fièvre de la vallée du Rift...) aussi bien dans la population que pour les animaux sauvages ou domestiques (Lucilie bouchère, maladie de la langue bleue, etc),
- la remontée vers le Nord de pathologies des plantes et animaux (et des termites...)
- Augmentation de la virulence des micro-organismes pathogènes en général ?

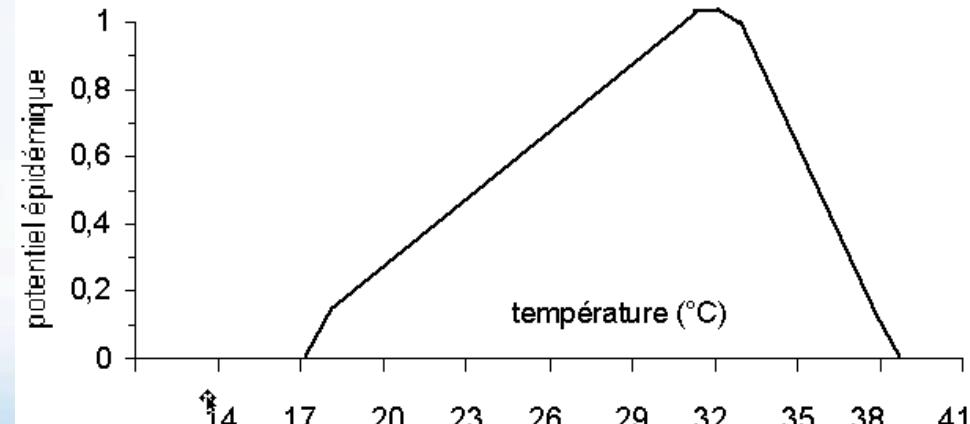
Impacts sur la santé : exemples



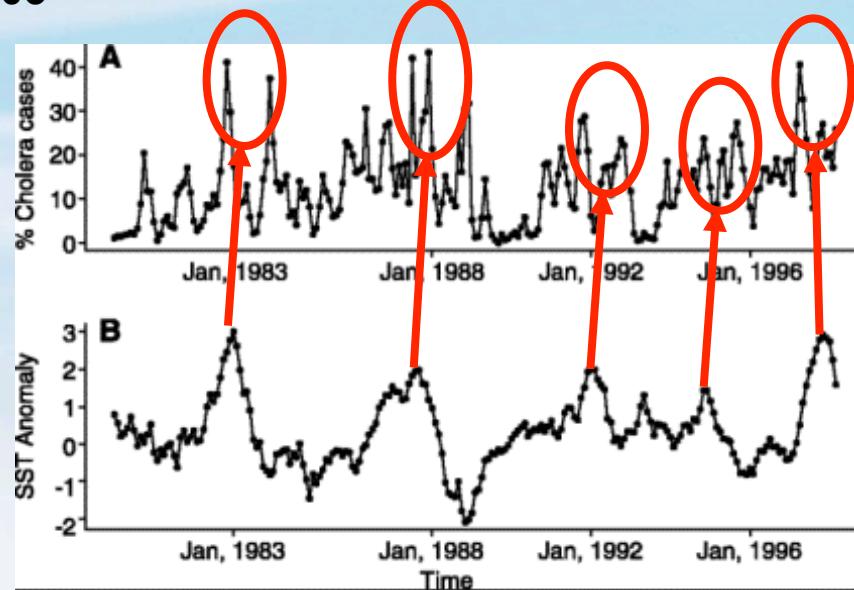
Nombre de cas mensuels de salmonellose en Nouvelle Zélande en fonction de la température moyenne. Source OMS, 2003

Corrélation entre les cas de choléra et la température de surface de l'océan pacifique est.

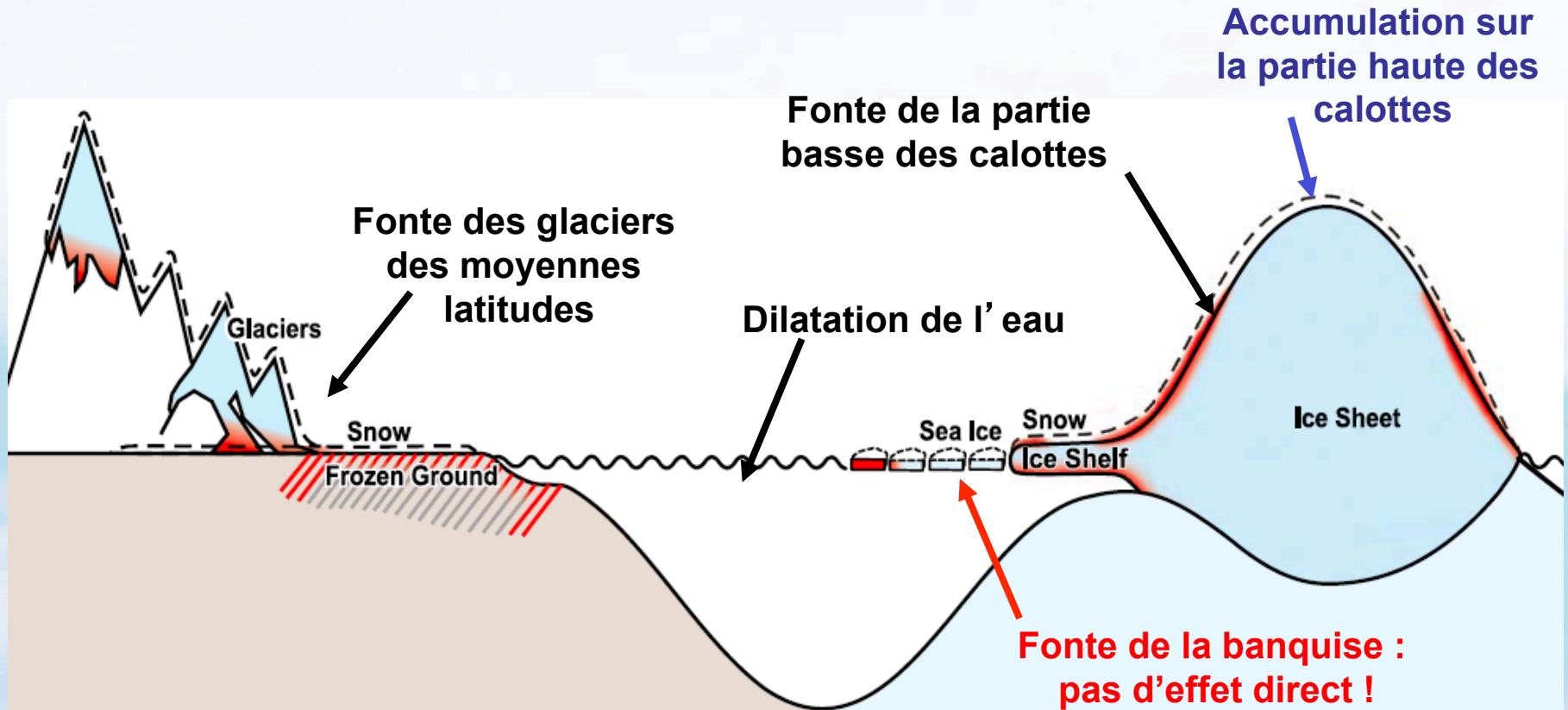
Source : Colwell, Science, 1996 et Pascual et col., Science, 2000.



Potentiel épidémique du paludisme en fonction de la température. J.-P. Besançonot, La jaune et La Rouge, 2000



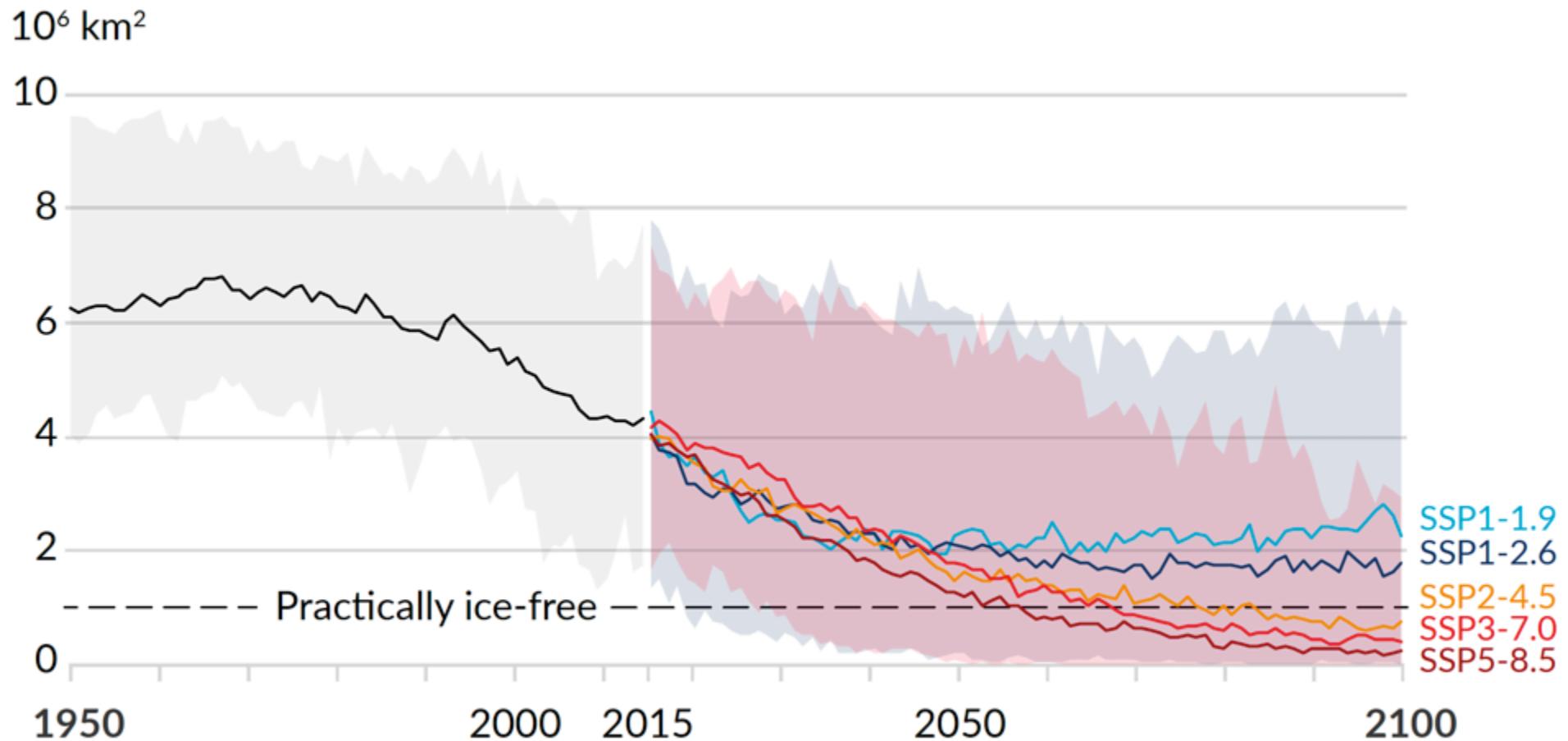
Élévation du niveau des océans : Archimède or not ?



Facteurs contributeurs à la hausse du niveau de la mer.

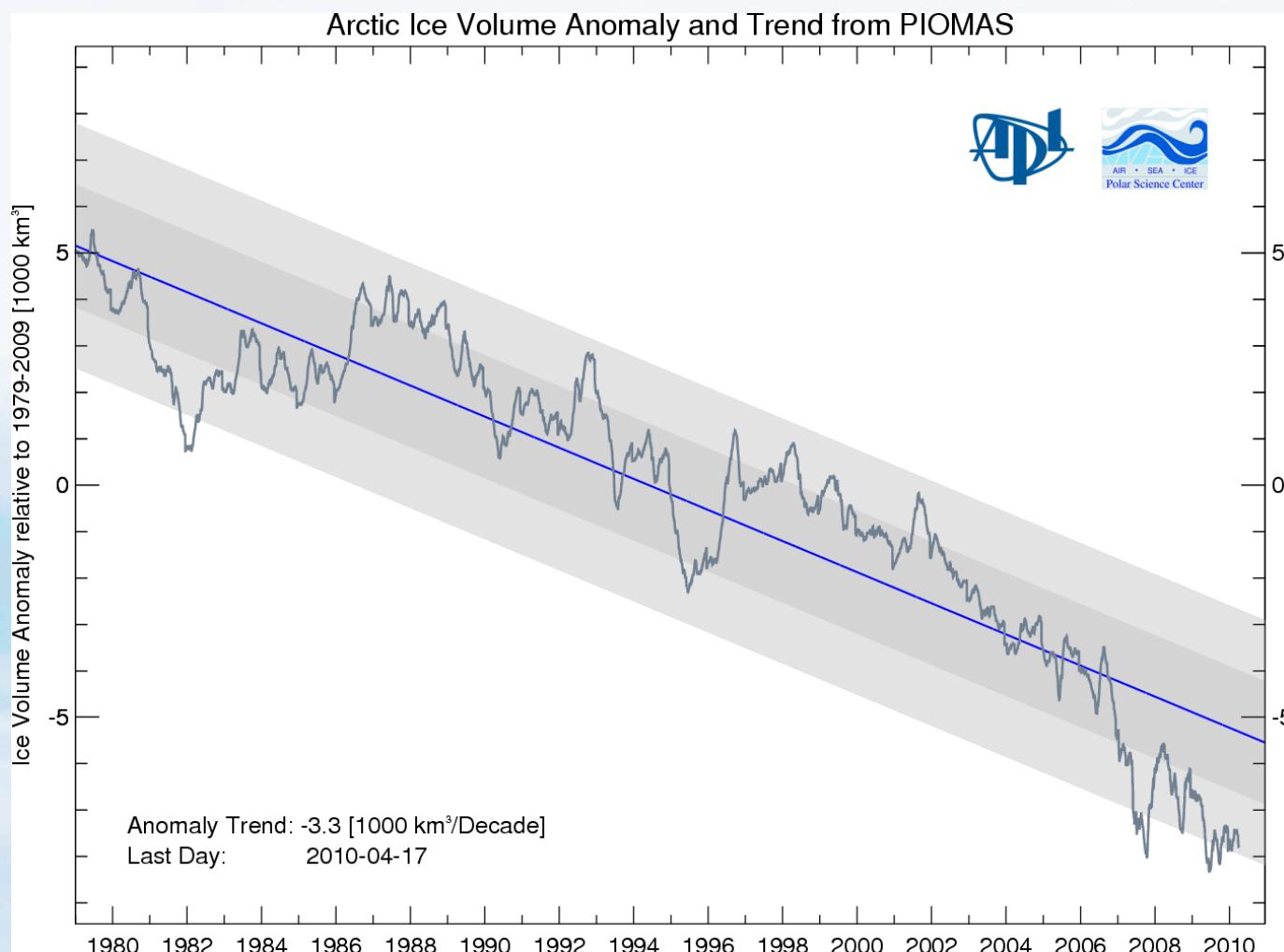
D'après GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Not Archimède : la banquise fond



Evolution de l'étendue minimale de la banquise dans l'hémisphère Nord depuis 1950 et projections. Source : IPCC, AR6, 2021

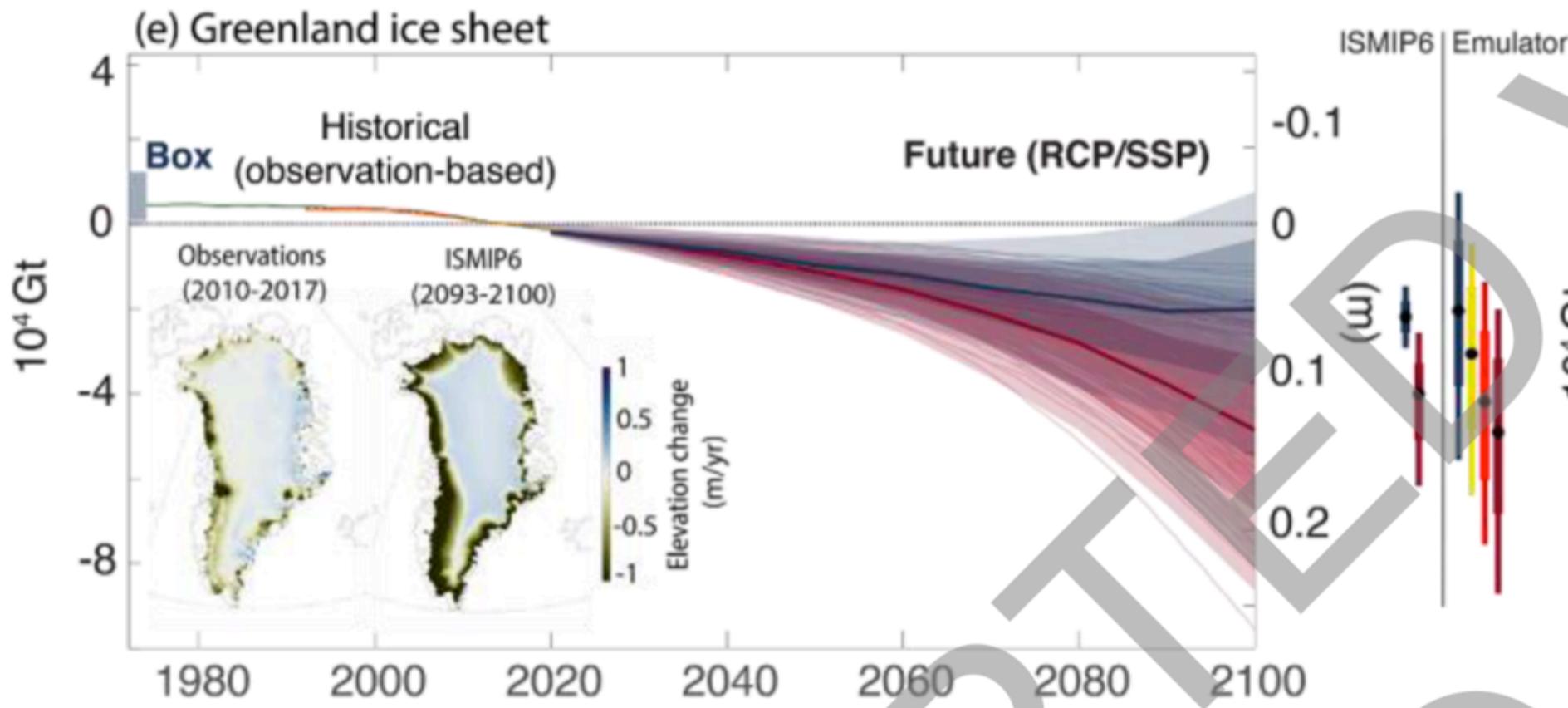
Not Archimède again : la banquise mincit aussi



Evolution du volume calculé de la banquise de l'hémisphère Nord depuis 1979, en milliers de km³ (c'est l'anomalie par rapport à la moyenne 1979-2009 qui est représentée).

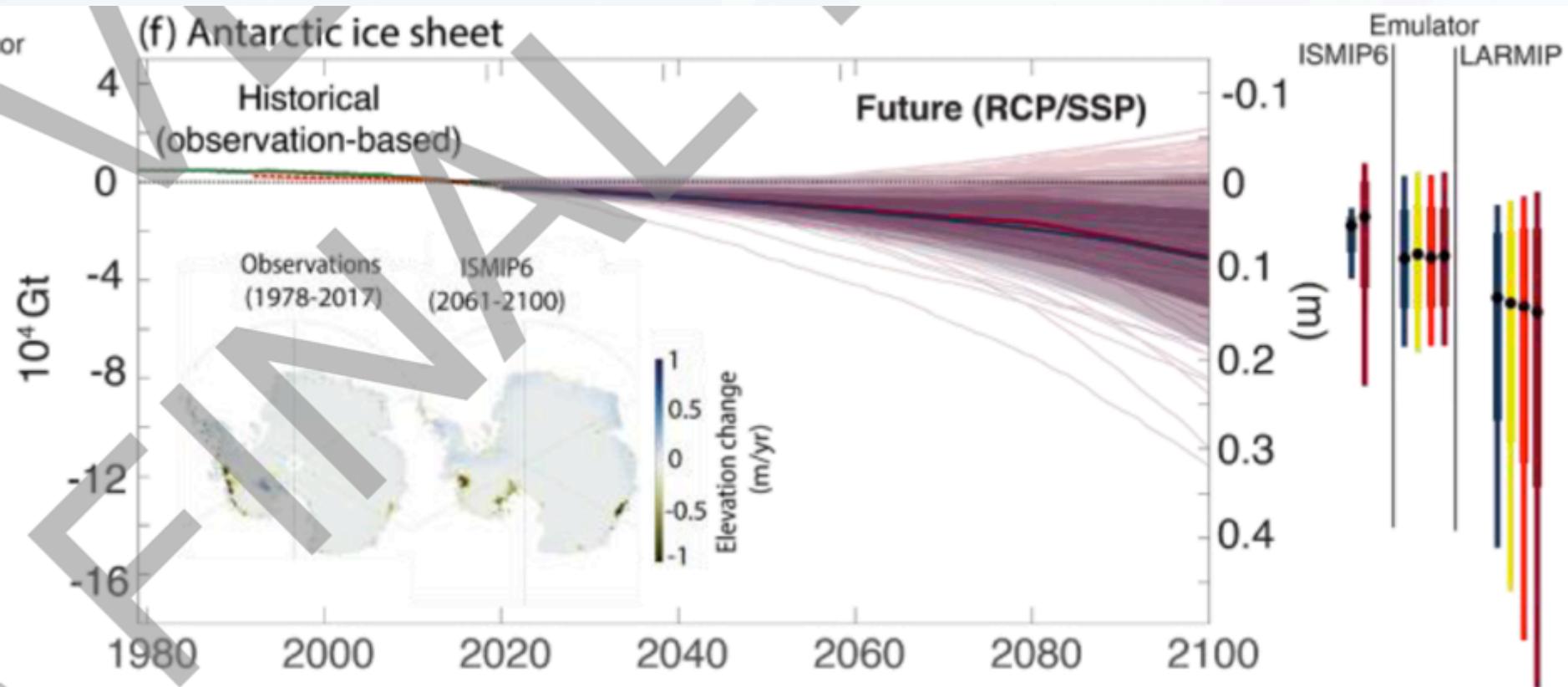
Source : Polar Science Center, University of Washington, 2010

Mais beaucoup d'Archimède se profile peut-être à l'horizon



Evolution passée et à venir de perte de masse du Groenland. Source : IPCC, AR6, 2021

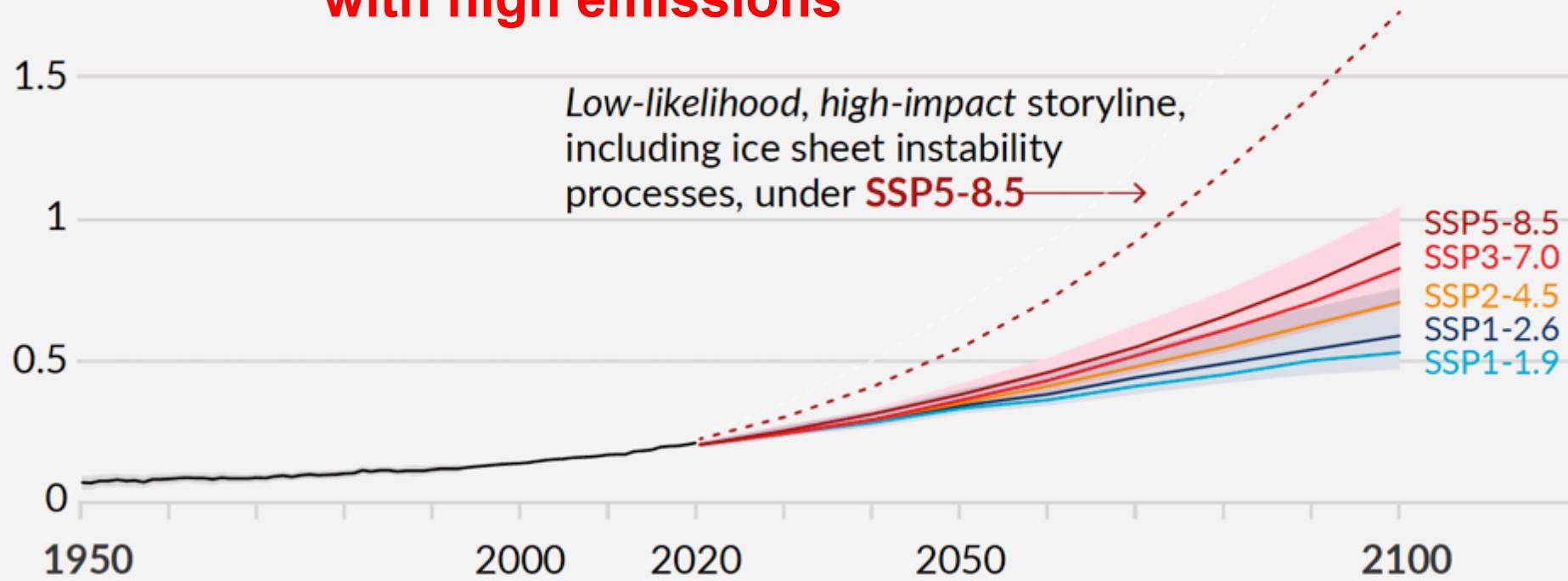
Mais beaucoup d'Archimède se profile peut-être à l'horizon



Evolution passée et à venir de perte de masse de l'Antarctique. Source : IPCC, AR6, 2021

La grosse bête va monter de toute façon

Sea level rise greater than
15m cannot be ruled out
with high emissions



Evolution passée et à venir du niveau de l'océan. Source : IPCC, AR6, 2021

Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué



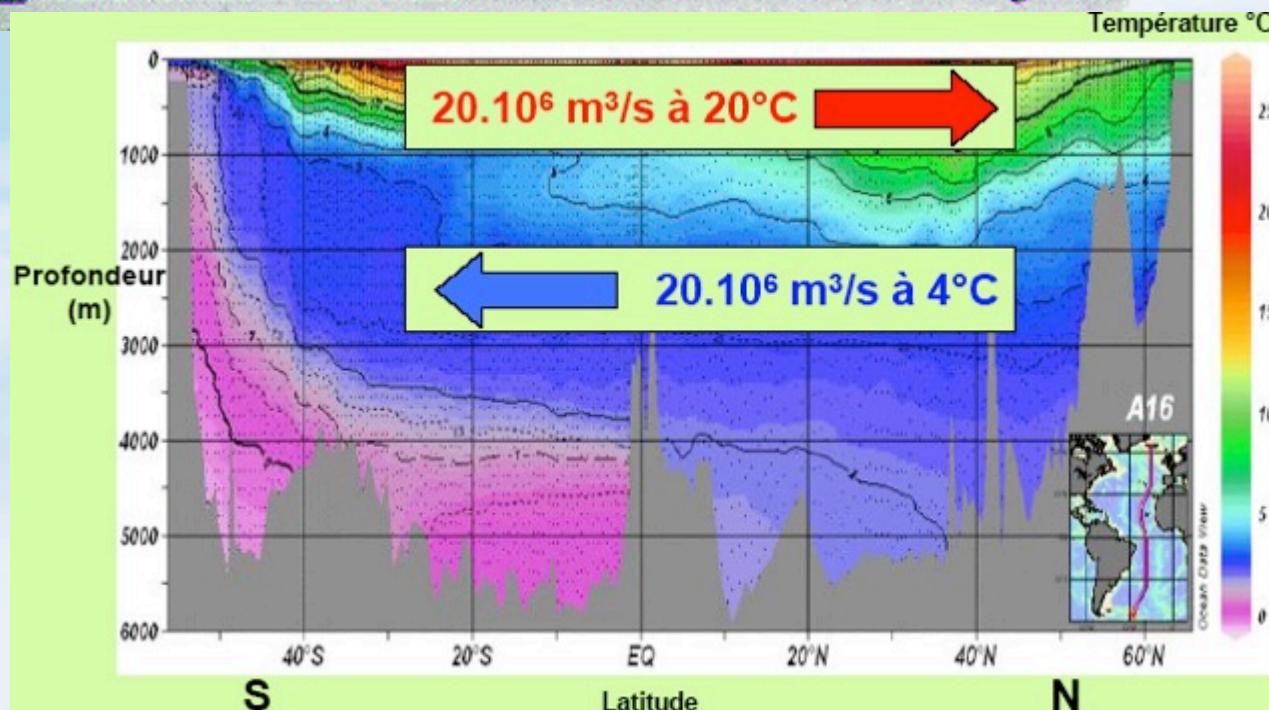
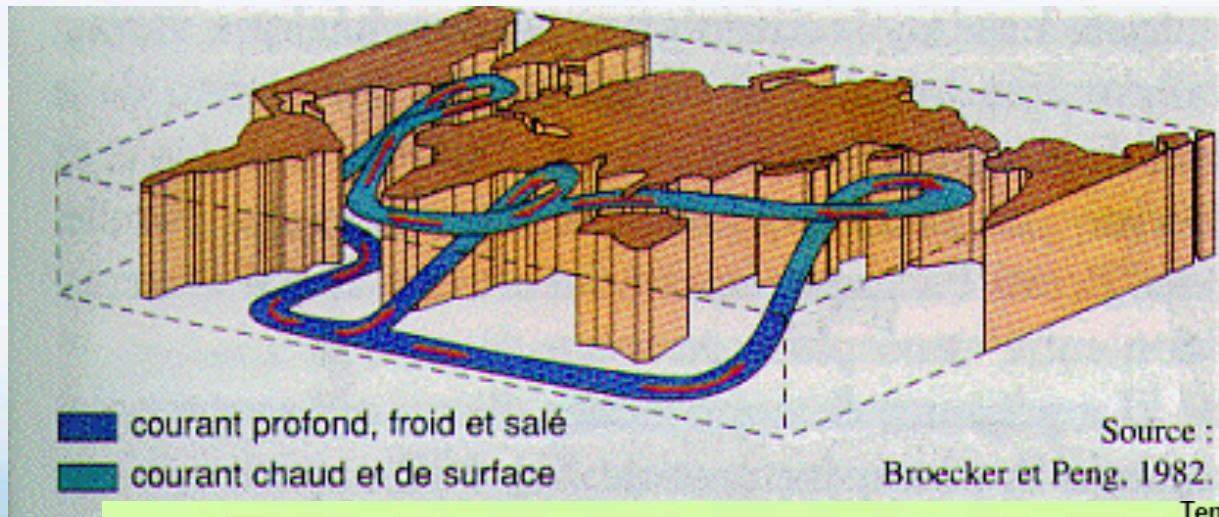
Zones inondées avec un océan plus haut de 9 m

Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué



Zones inondées avec un océan plus haut de 9 m

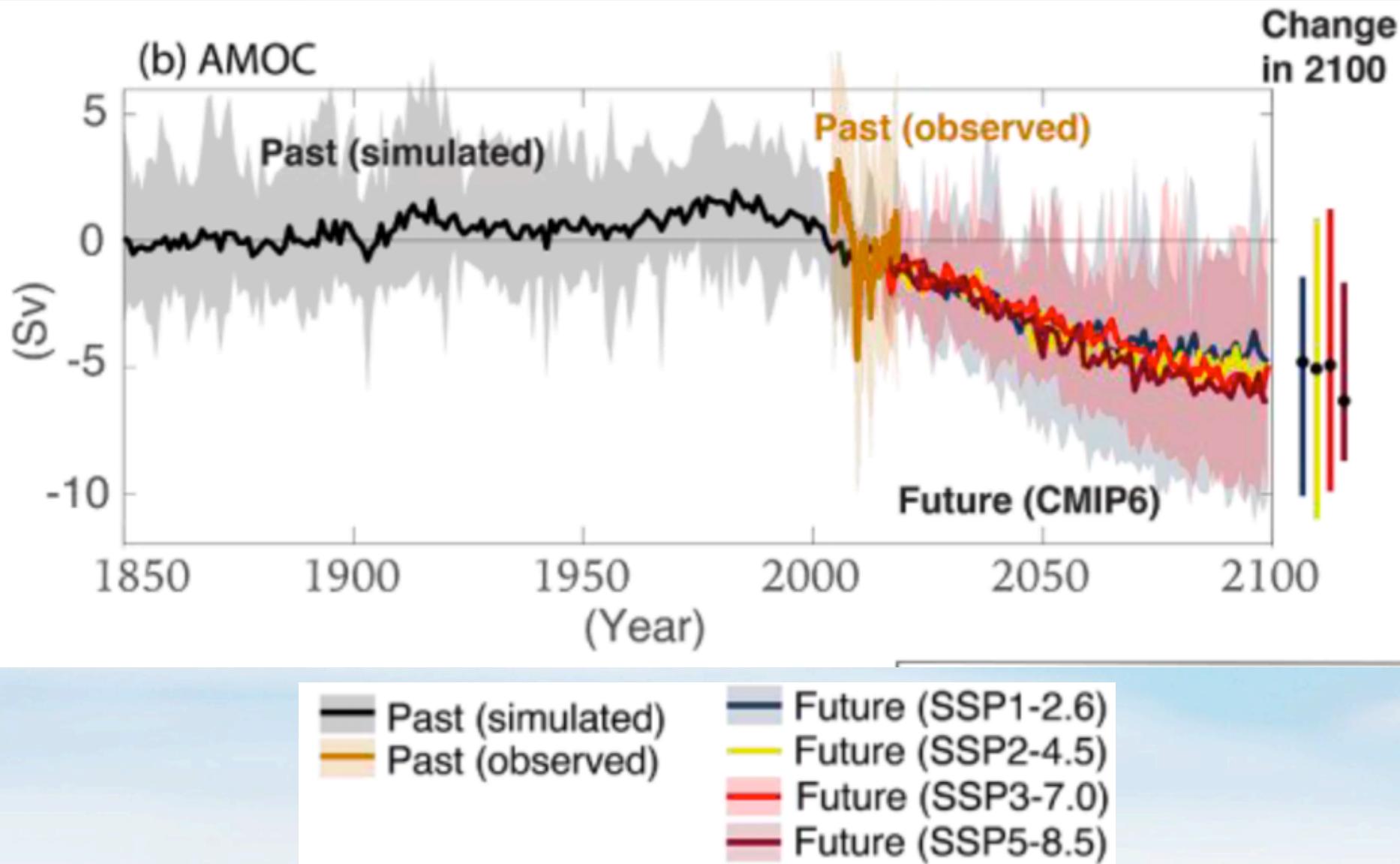
Le Jour d'Après est-il pour demain ?



Une plongée des eaux a lieu en permanence près du Groenland. Cela influe de manière déterminante sur les transports de chaleur entre les latitudes.

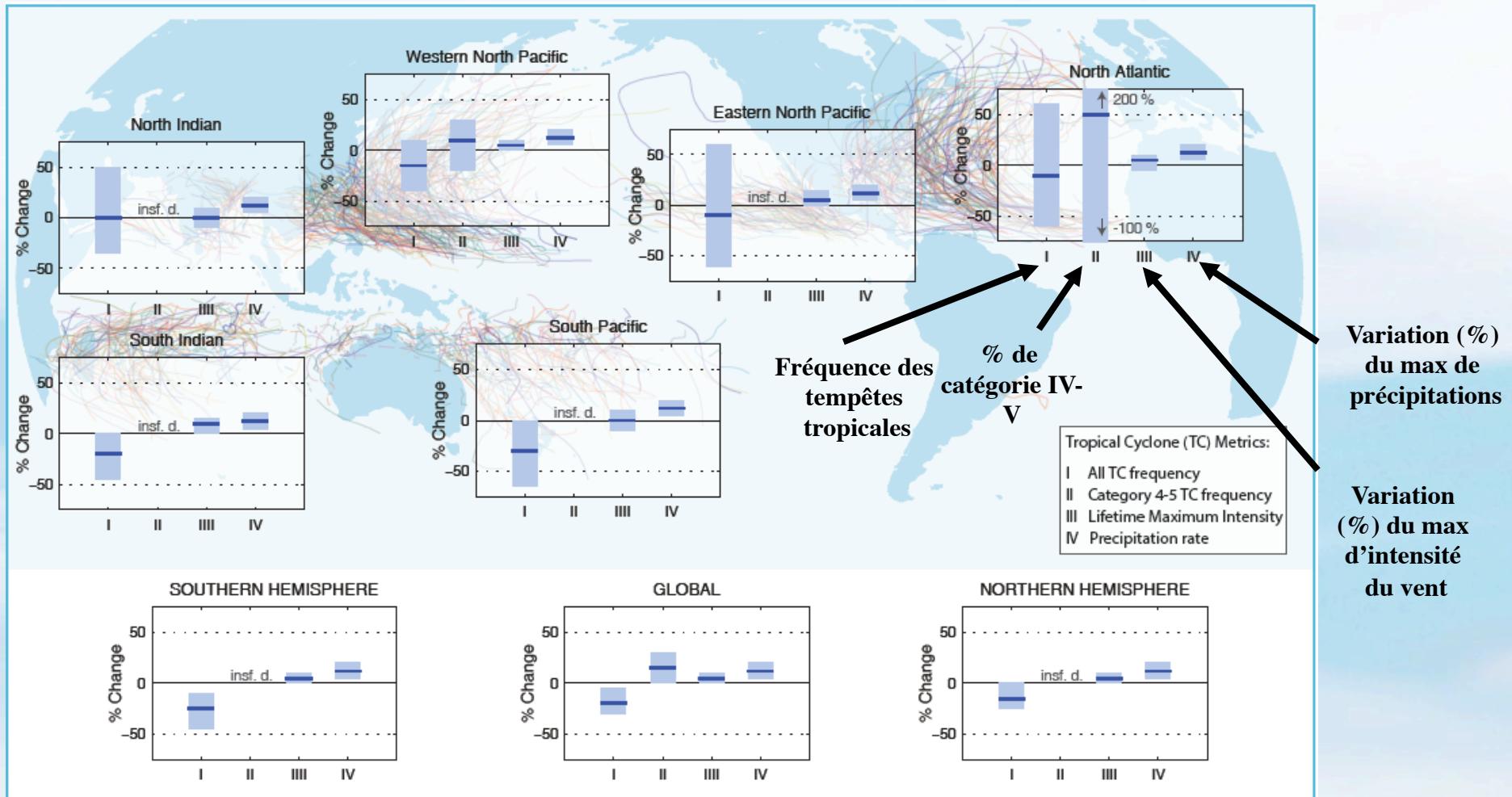
Les eaux profondes remontent également les éléments nutritifs (sels minéraux) indispensables à la faune marine de surface.

Petit coup de frein ou gros crash, là est la question



Évolution du flux nord atlantique ($1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). Le niveau actuel est de 20 à 25 SV.
Source : IPCC, AR6, 2021

Tourne (et monte) Marcel

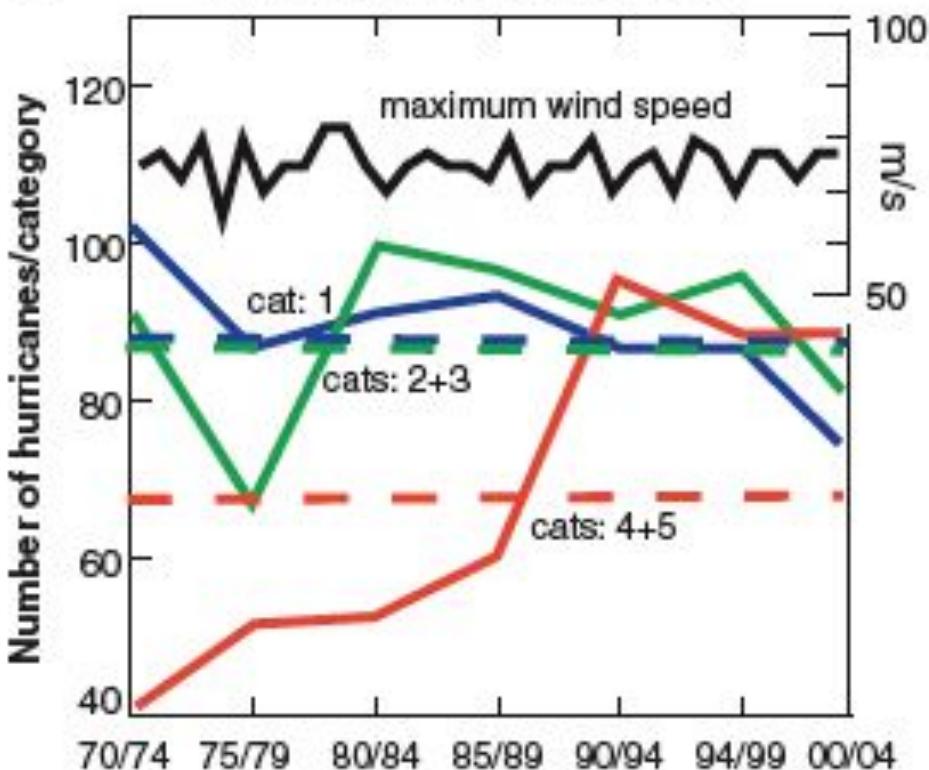


Variation en 2080-2100 (par rapport à 2000-2019) de caractéristiques diverses des tempêtes tropicales. Source GIEC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Une puissance cyclonique accrue ? P'têt ben qu'oui....

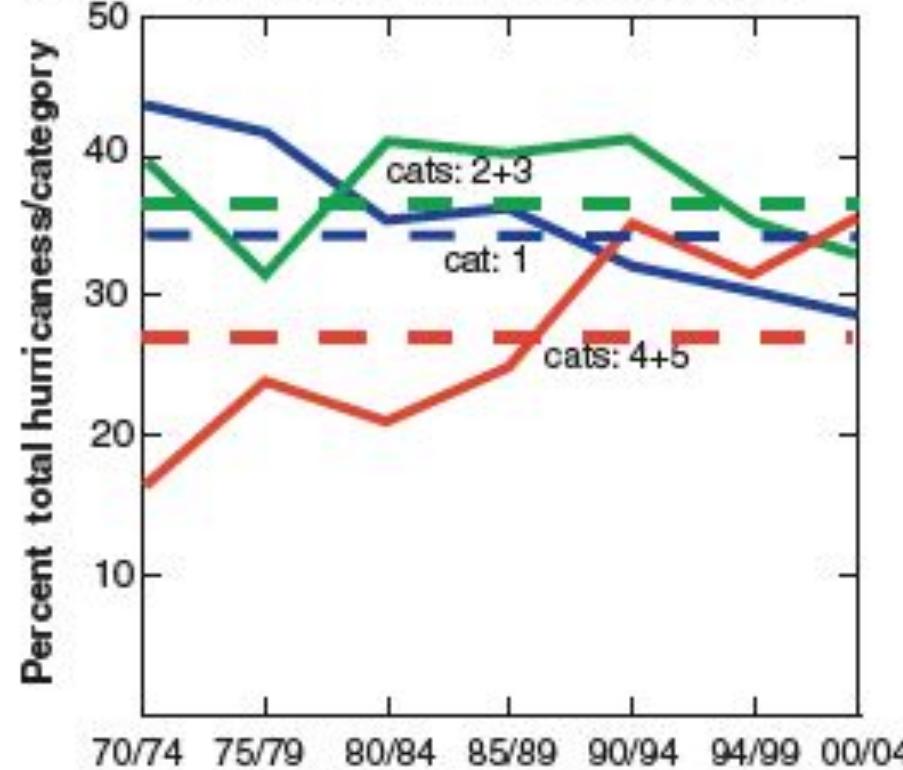
A

Number of intense hurricanes



B

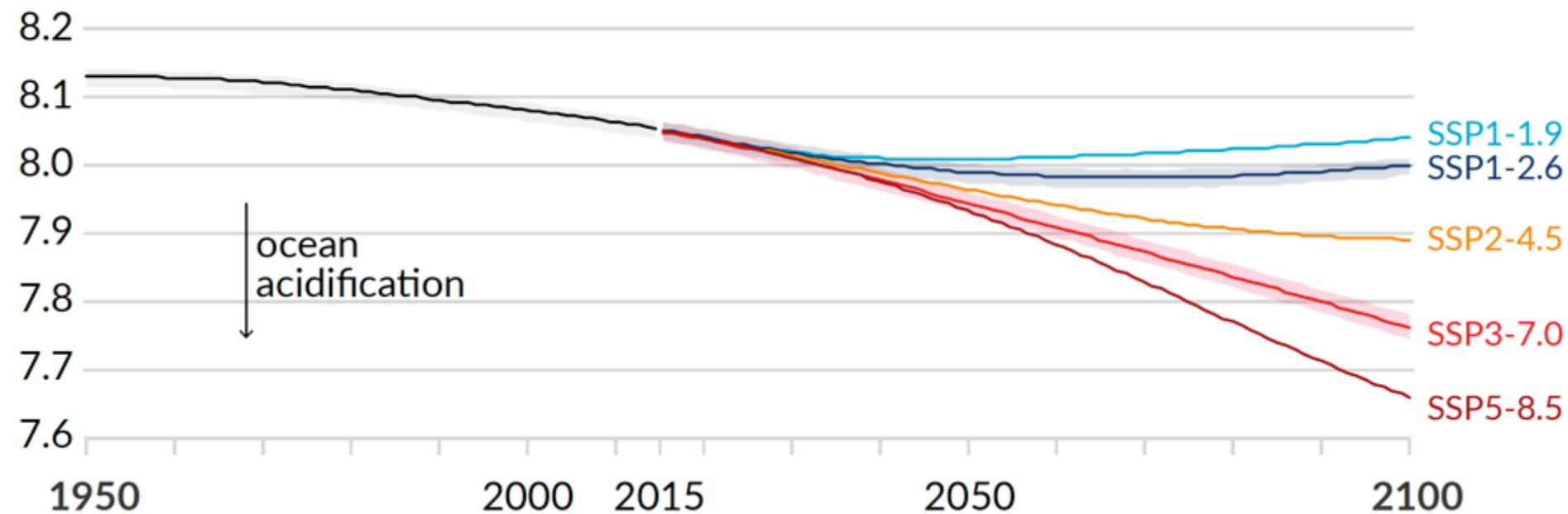
Percentage of intense hurricanes



Evolution sur 30 ans du nombre de cyclone dans le monde par catégorie (gauche), et proportion de chaque catégorie dans le total (droite). Source Science, 2005

Il n'est pas toujours souhaitable d'être acide

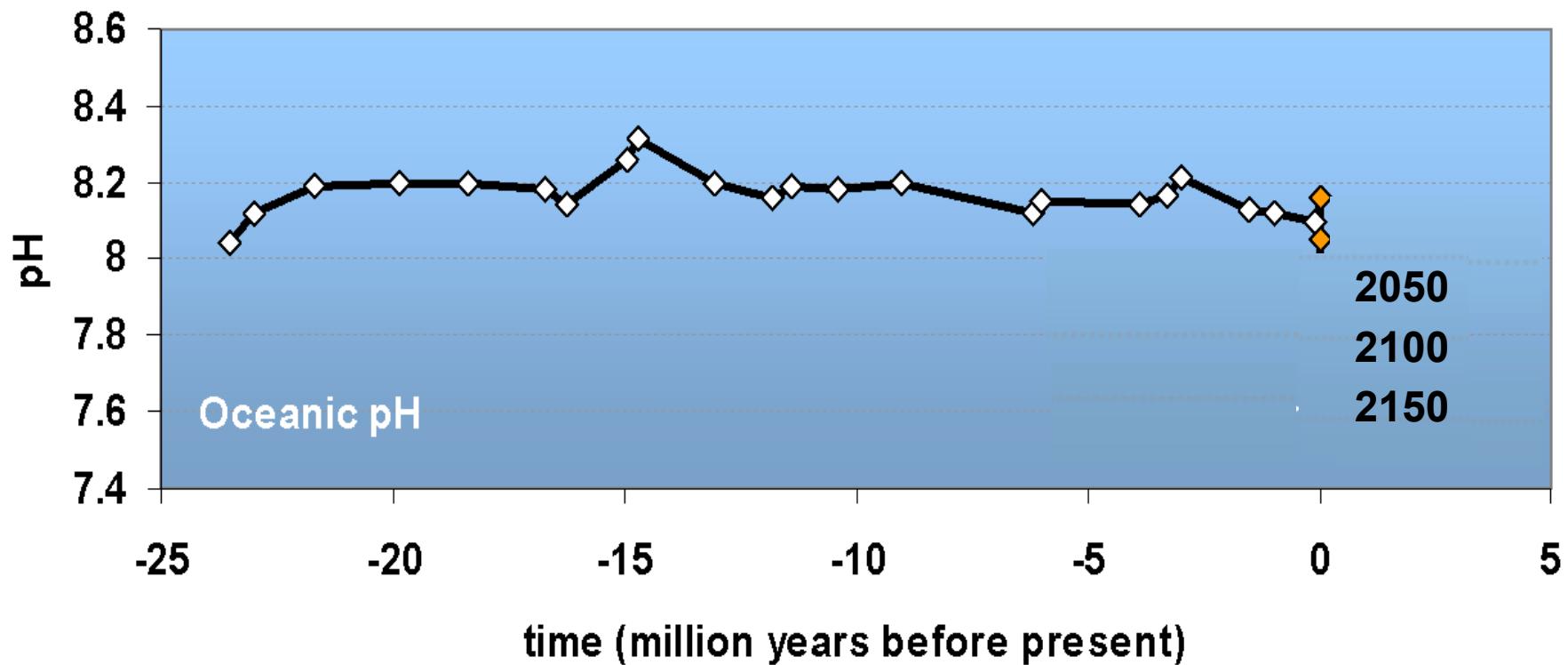
c) Global ocean surface pH (a measure of acidity)



Simulation de variation du pH de l'océan d'ici 2100 en fonction du scénario.

Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

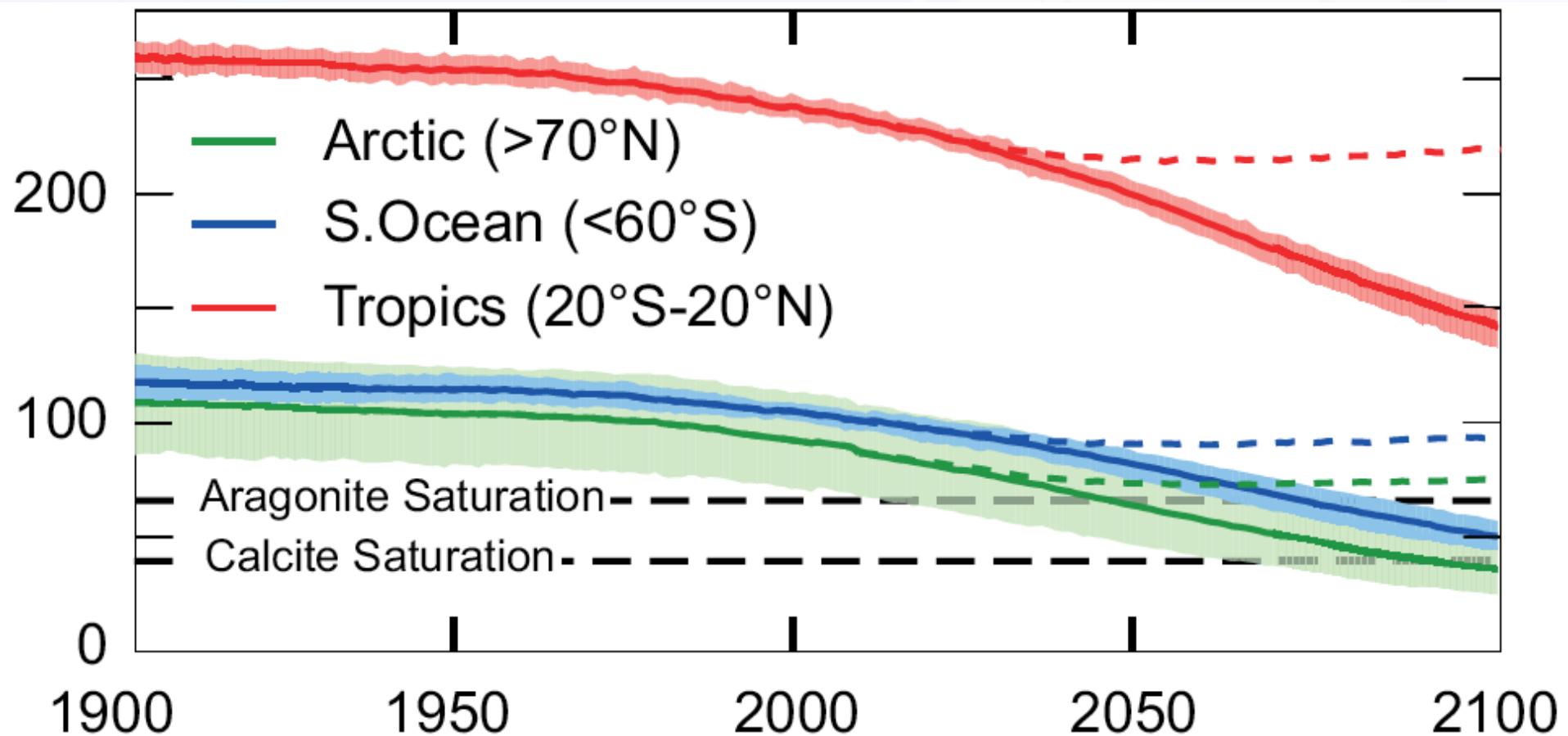
Le pH de l'océan, bien plus stable que tout régime politique !



Variation du pH de l'océan reconstruite depuis 24 millions d'années, et évolution possible à l'avenir.

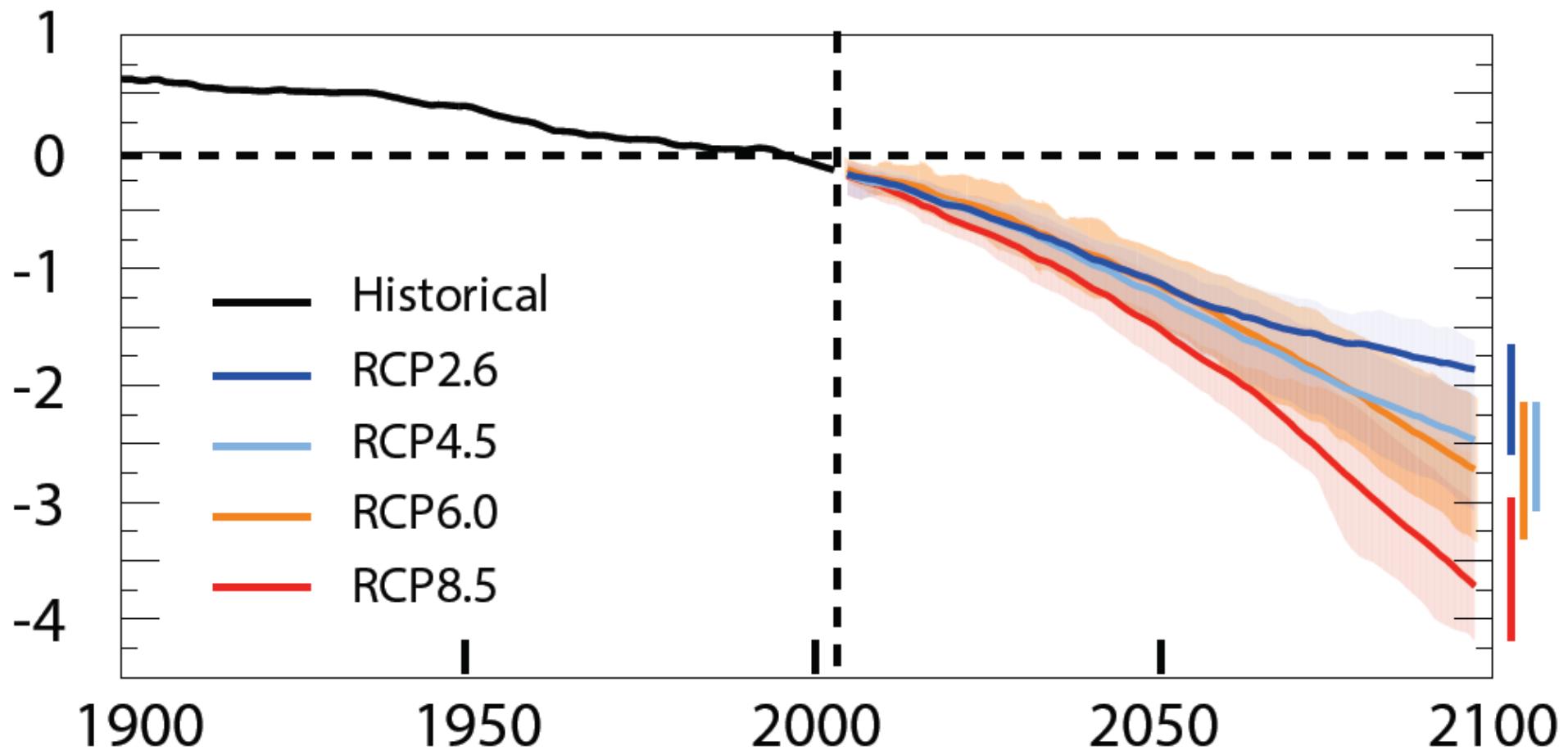
Source Turley et al. 2006

Moins de calcaire produit = pas de pot pour les coraux



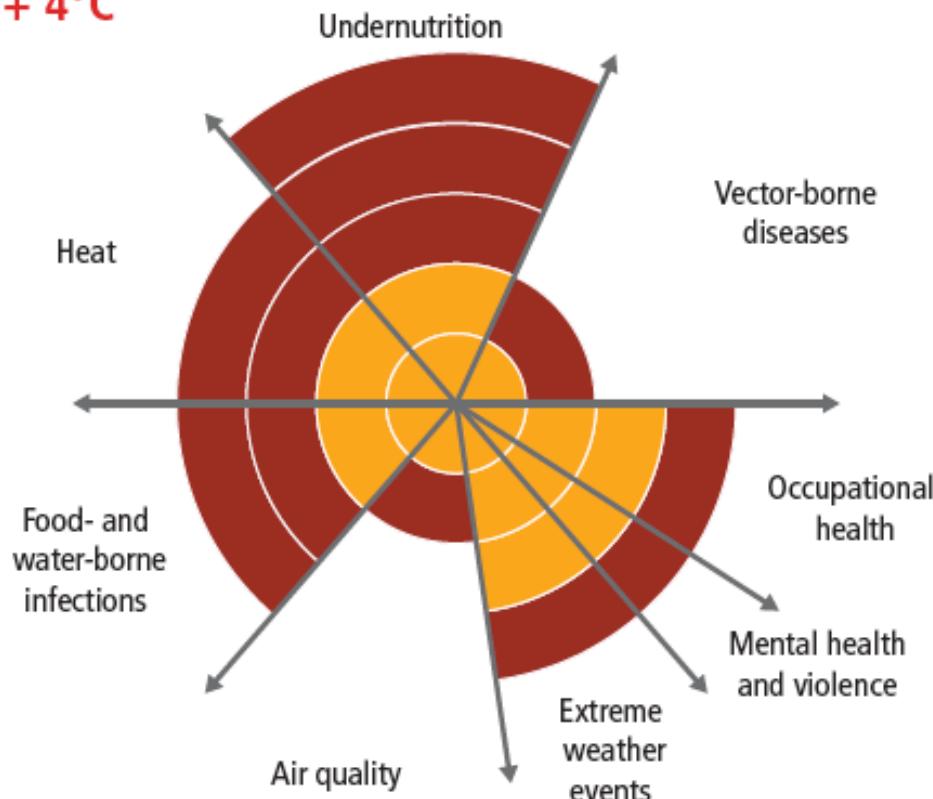
Concentration océanique en ions CO_3^{2-} ($\mu\text{moles par kg}$) en fonction de la concentration atmosphérique en CO_2 . Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Dissous, ou pas dissous ?



Variation (en %) du contenu de l'océan en oxygène dissous selon les scénarios de forçage radiatif. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

+ 4°C



Risk and potential for adaptation

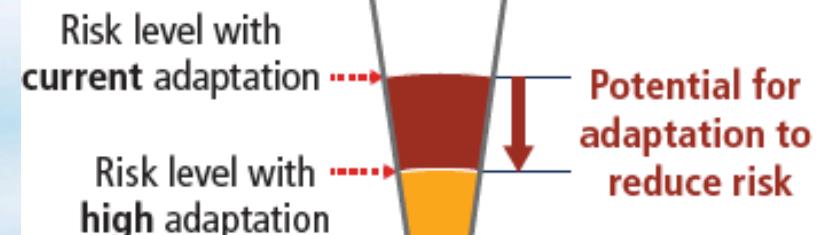
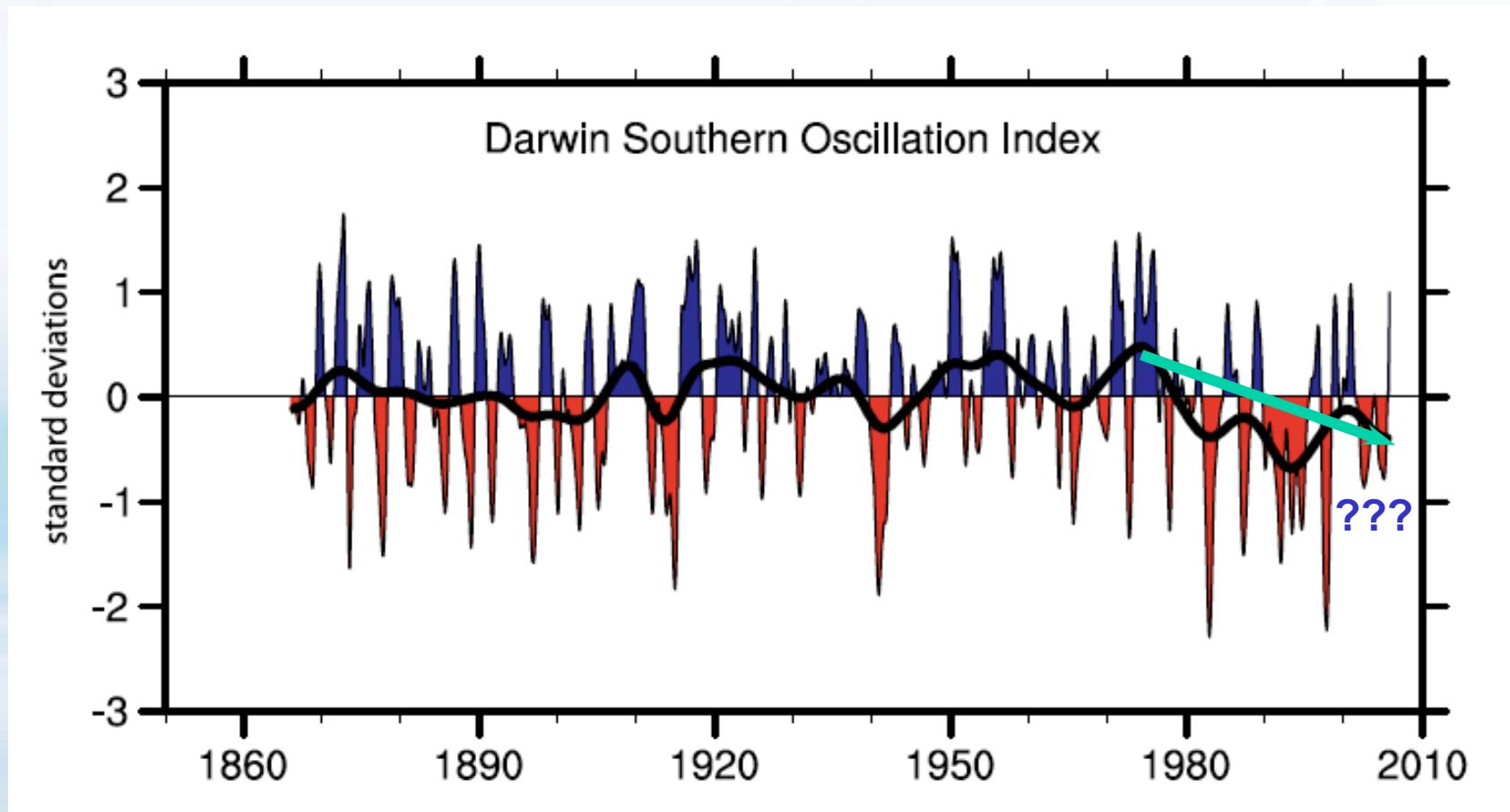


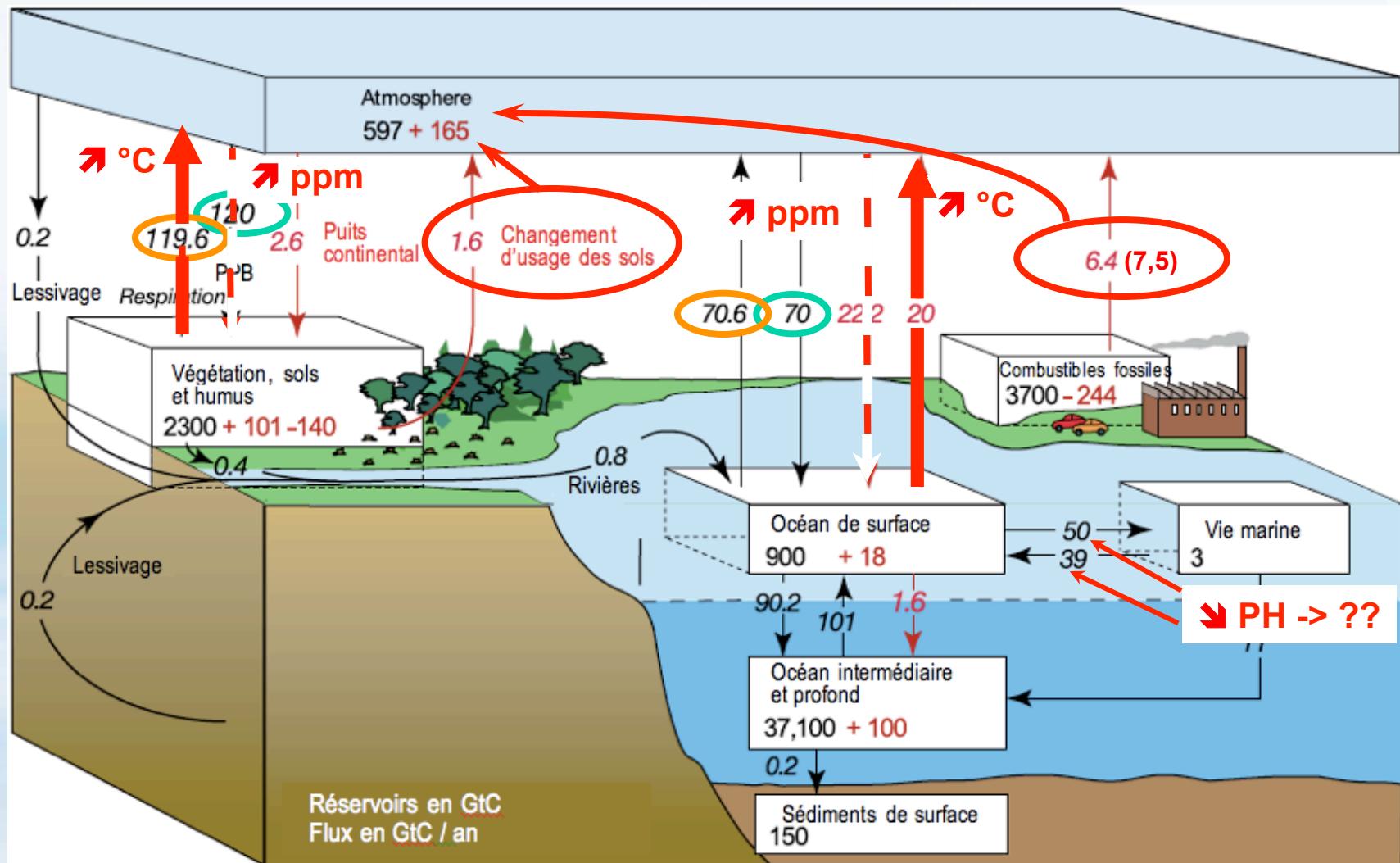
Illustration des divers risques sanitaires liés au changement climatique à l'horizon du siècle. Source GIEC, 5è rapport d'évaluation, 2014



Evolution de l'indice mesurant l'intensité de l'oscillation El Nino-La Nina. Le bleu correspond à une situation « La Nina », le rouge à une situation « El Nino ».

Source : GIEC, AR4, 2007

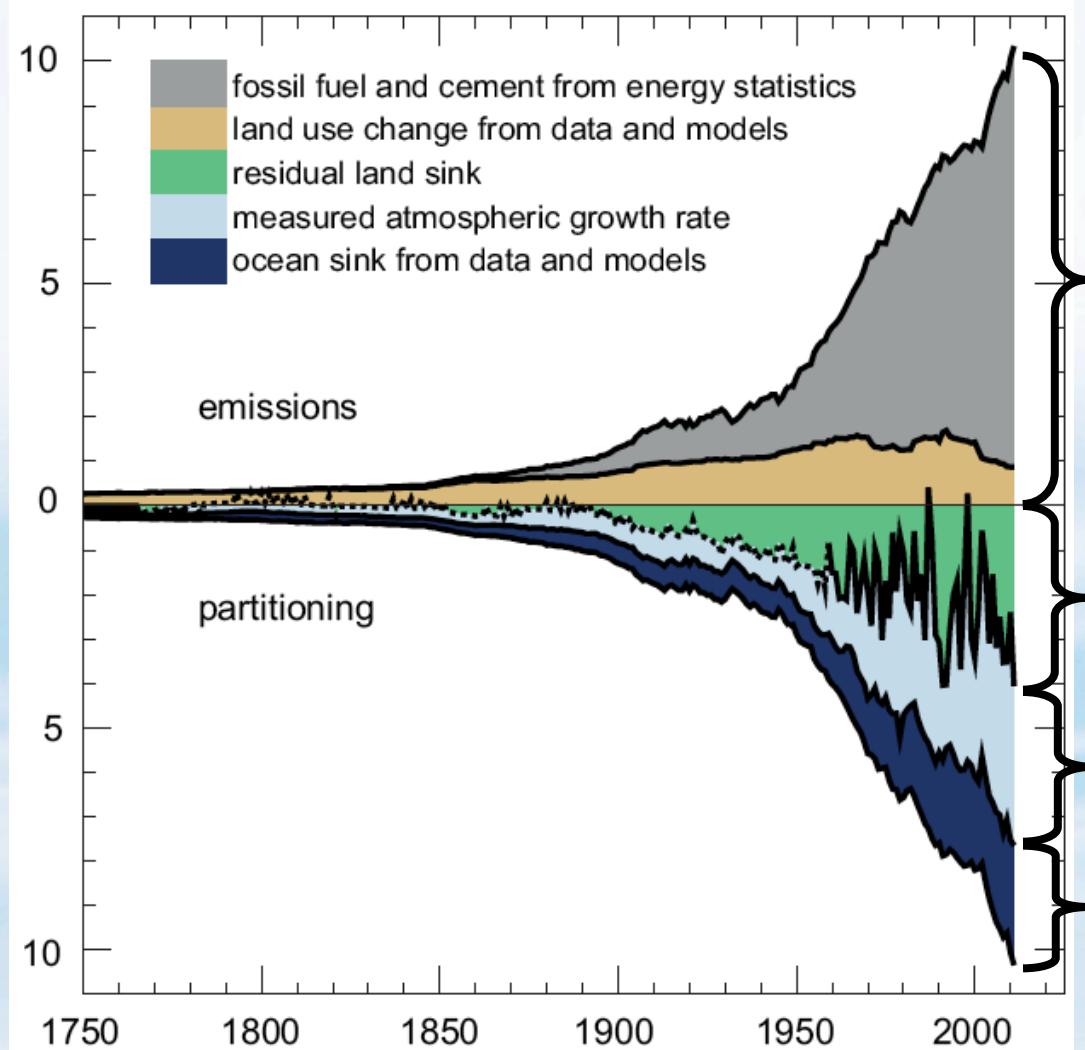
Plus de CO₂ = plus chaud, mais l'inverse est vrai aussi !



Chiffres en noir : stocks et flux préindustriels, en milliards de tonnes de carbone. Chiffres en rouge : modifications d'origine anthropique (flux pour la moyenne de la décennie 1990 ; modifications des stocks sur la période 1750-1994). Source GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Le CO₂ dans l'air : un petit tour et puis s'en va... ou pas ?

Milliards de tonnes de carbone



Emissions de CO₂ passées de 8
à presque 40 milliards de tonnes
depuis 1950

L'atmosphère conserve
environ 45% des émissions ↗

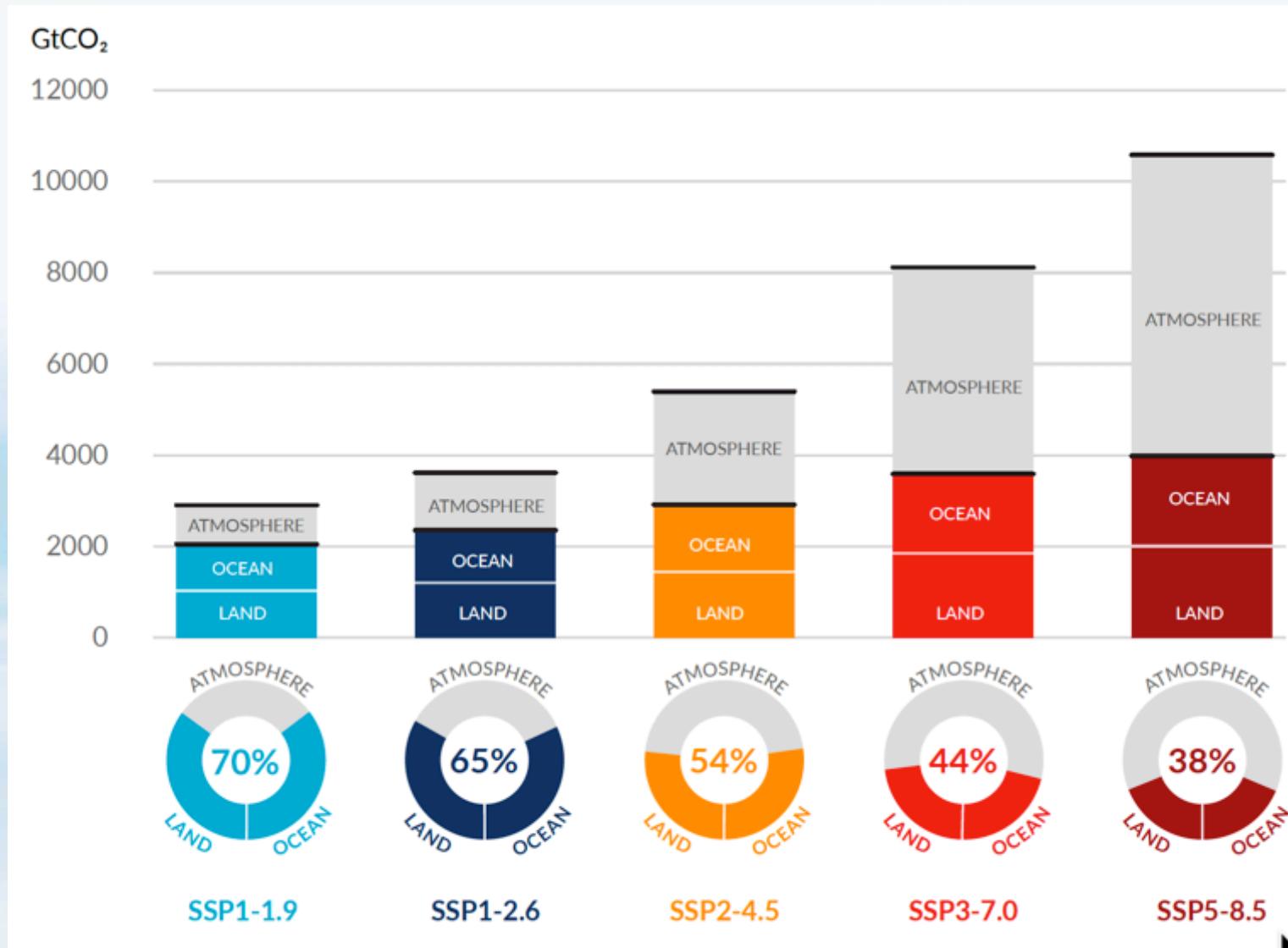
Les végétaux absorbent
environ 30% des émissions →

L'océan absorbe environ 25%
des émissions, ↘

Evolution des émissions de CO₂ depuis 1750 (en haut), et accroissement du stock de carbone de chaque compartiment de la planète sur la même période (en bas).

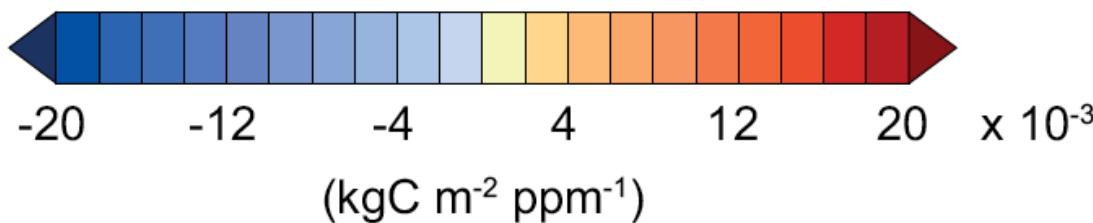
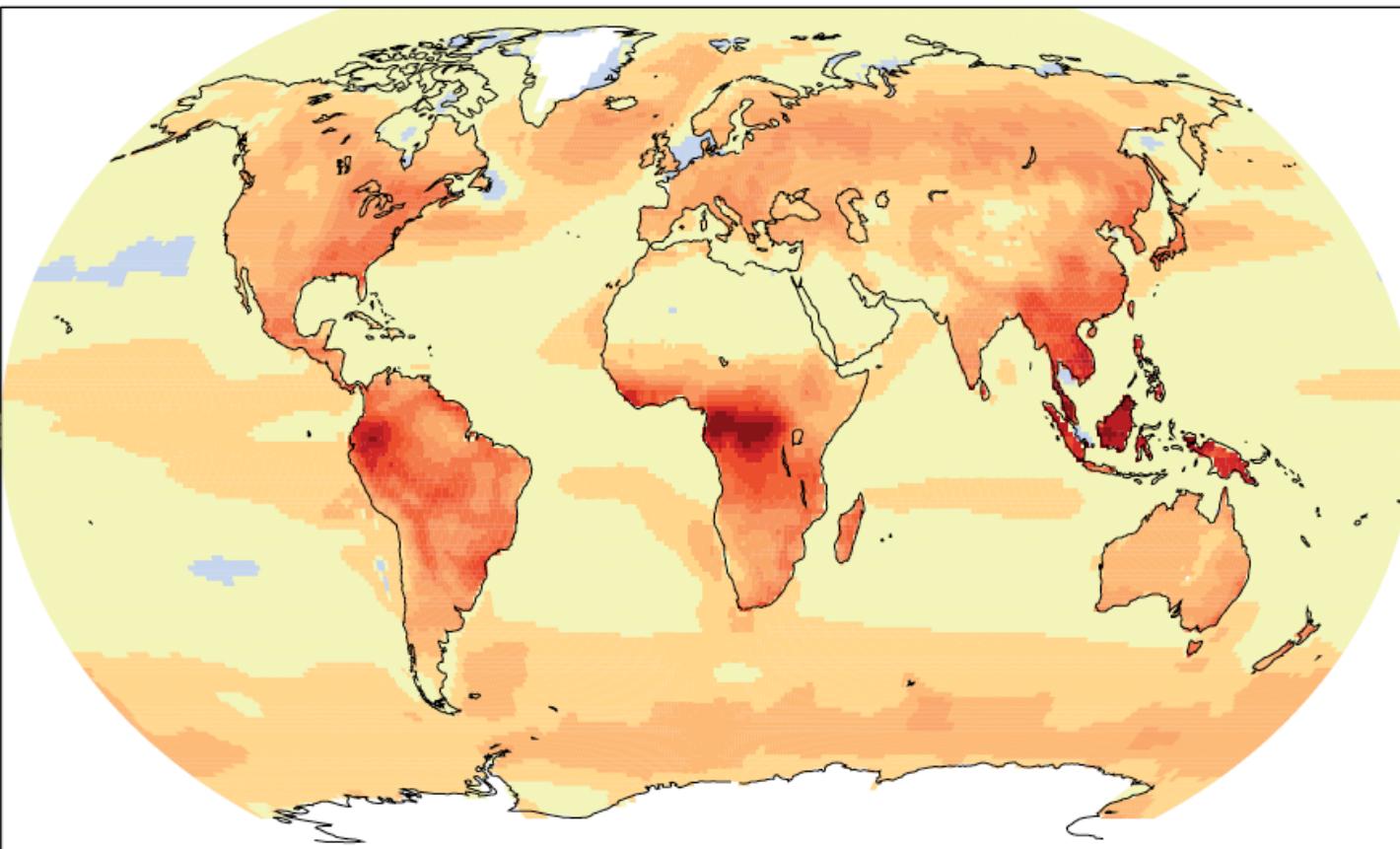
Source : IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2013

Plus j'en mets, plus il en reste



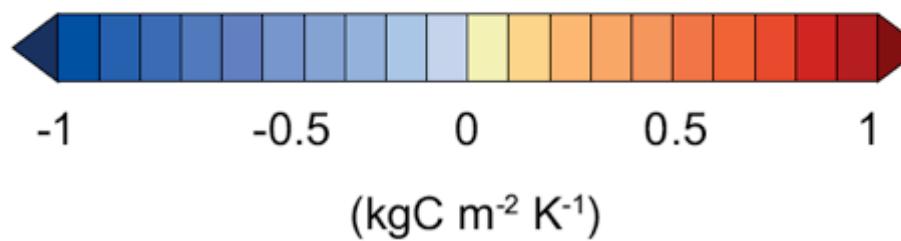
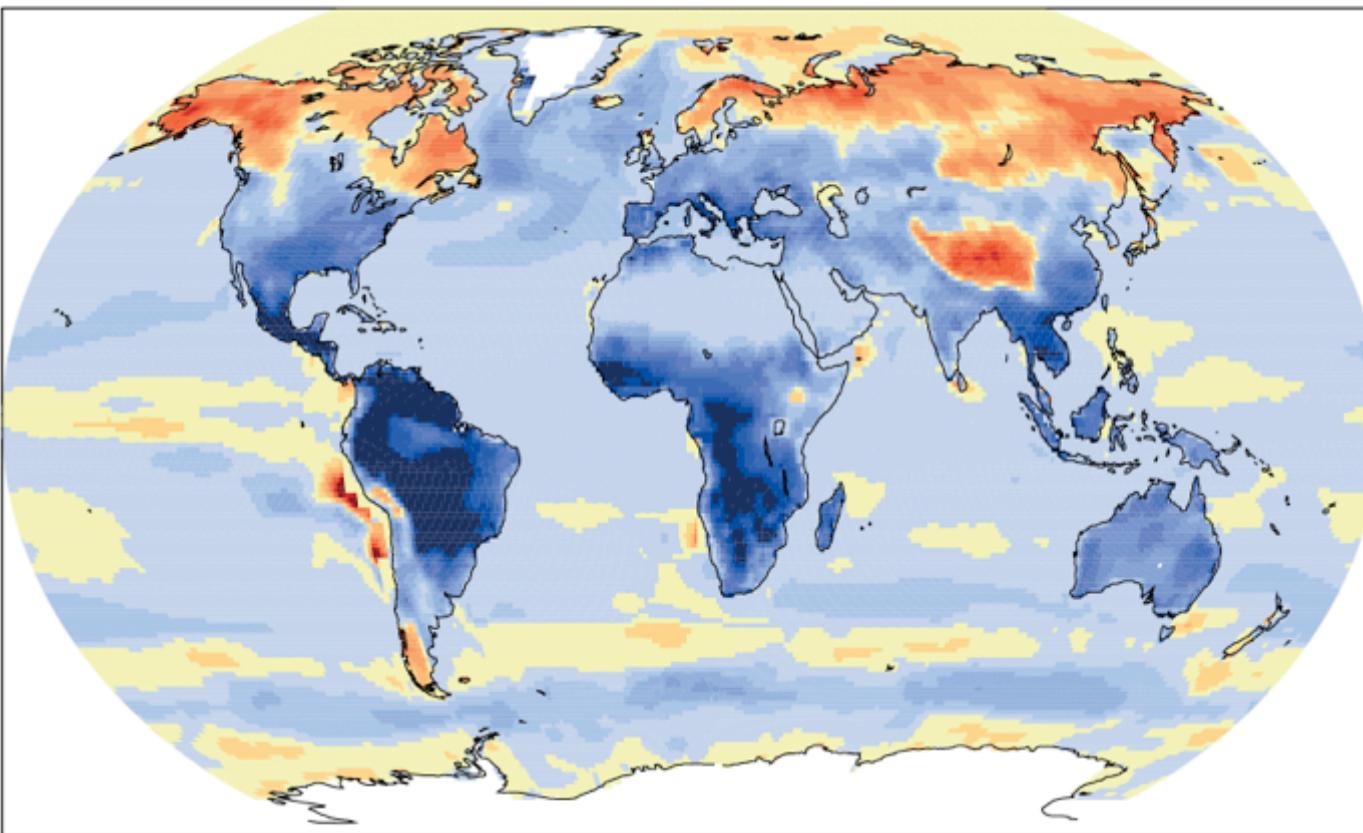
Fraction des émissions cumulées restant dans l'atmosphère par scénario. Source IPCC, 6^e rapport d'évaluation, 2021

Mets la pression ! (partielle)



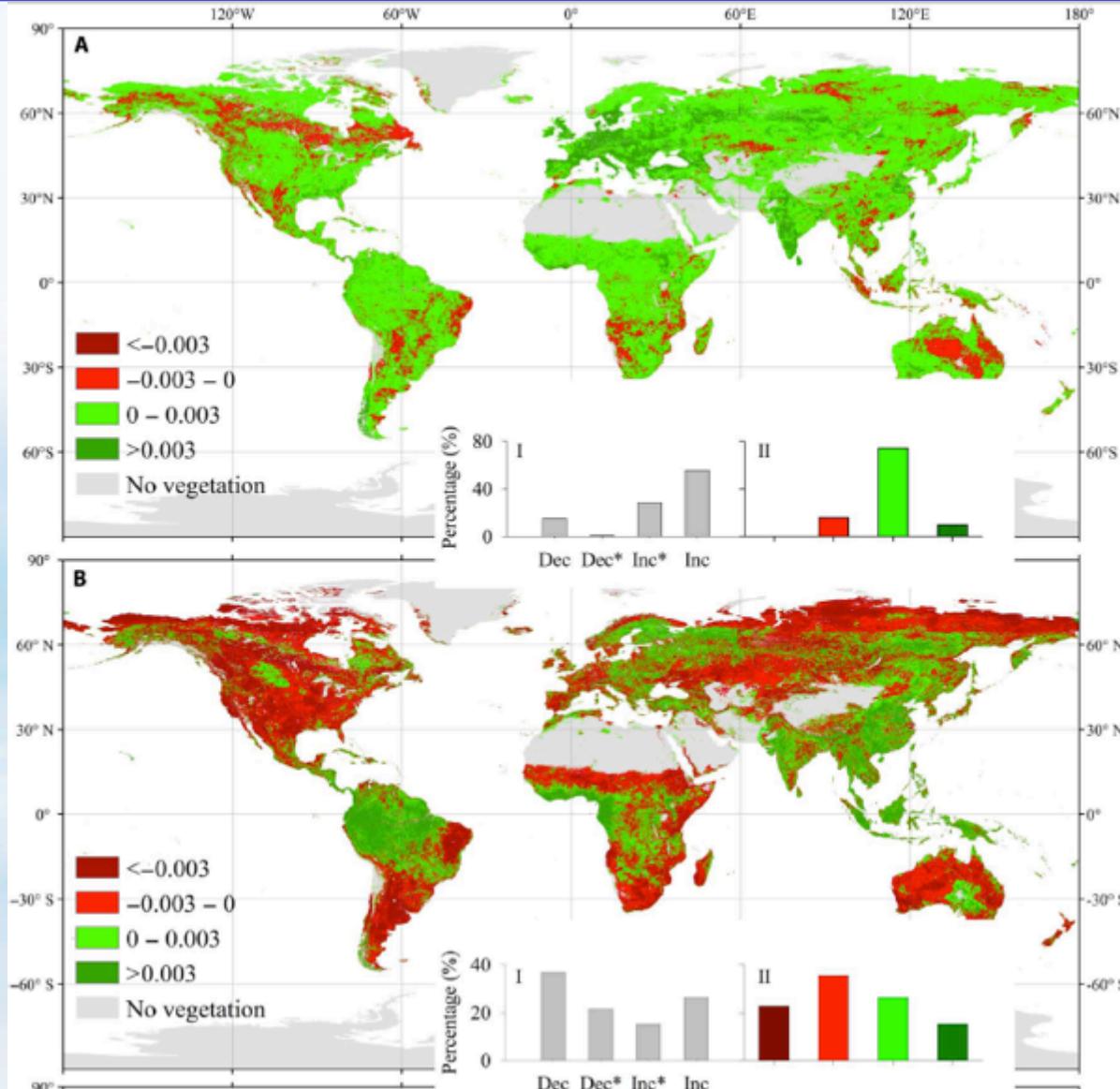
Réponse du flux net de carbone vers le sol par ppm additionnel de CO₂ (à climat constant).
Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

L'amortisseur amortit un peu moins bien



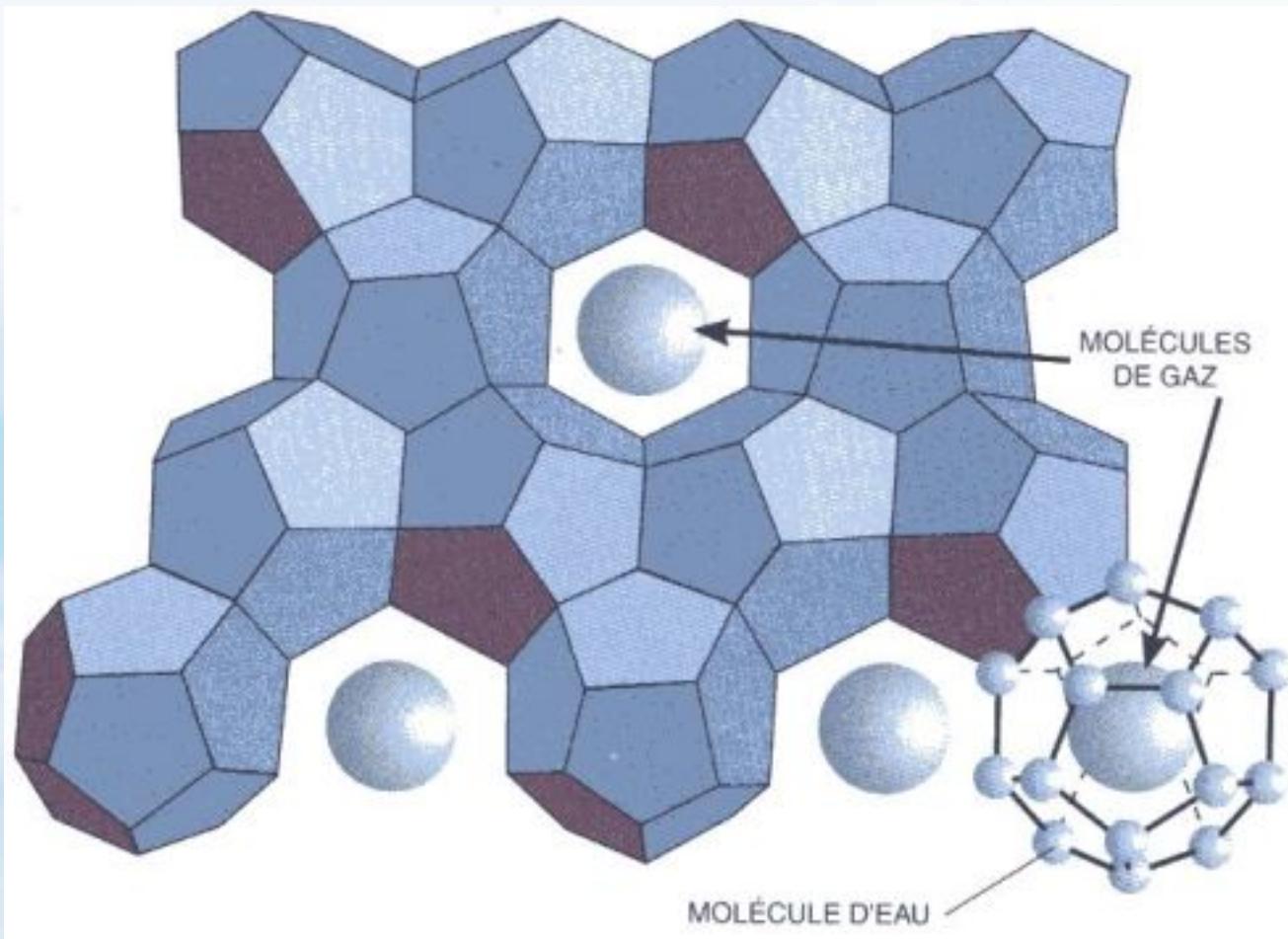
Réponse du flux net de carbone vers le sol par K de température additionnelle. Source
IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Le déstockage est-il pour bientôt ?



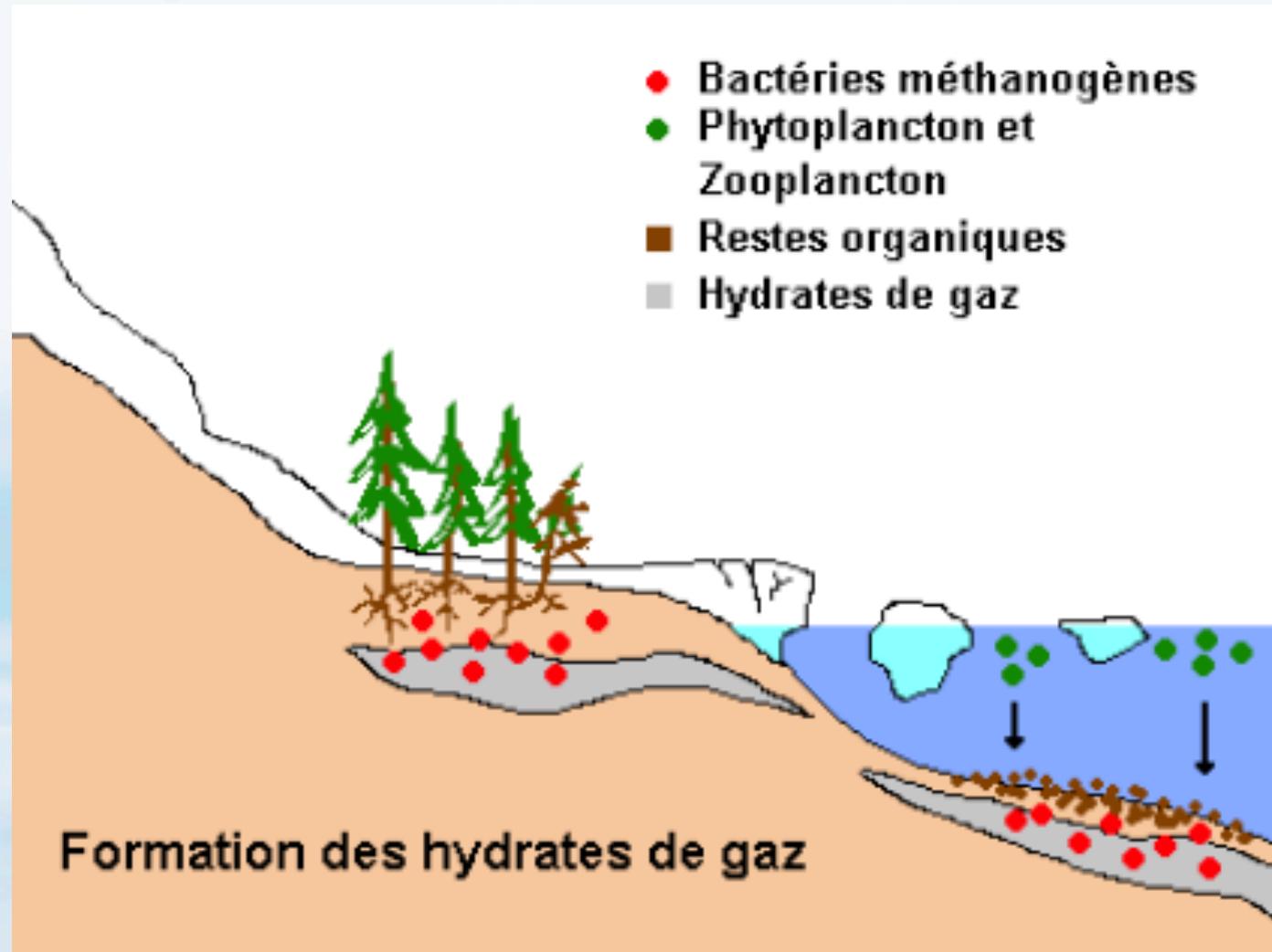
Variation du « normalized difference vegetation index » sur la période 1982–1998 (haut) et 1999–2015 (bas). Source Wenping Yuan et al., Science Advances, Aout 2019

Encore plus fort : les hydrates de méthane

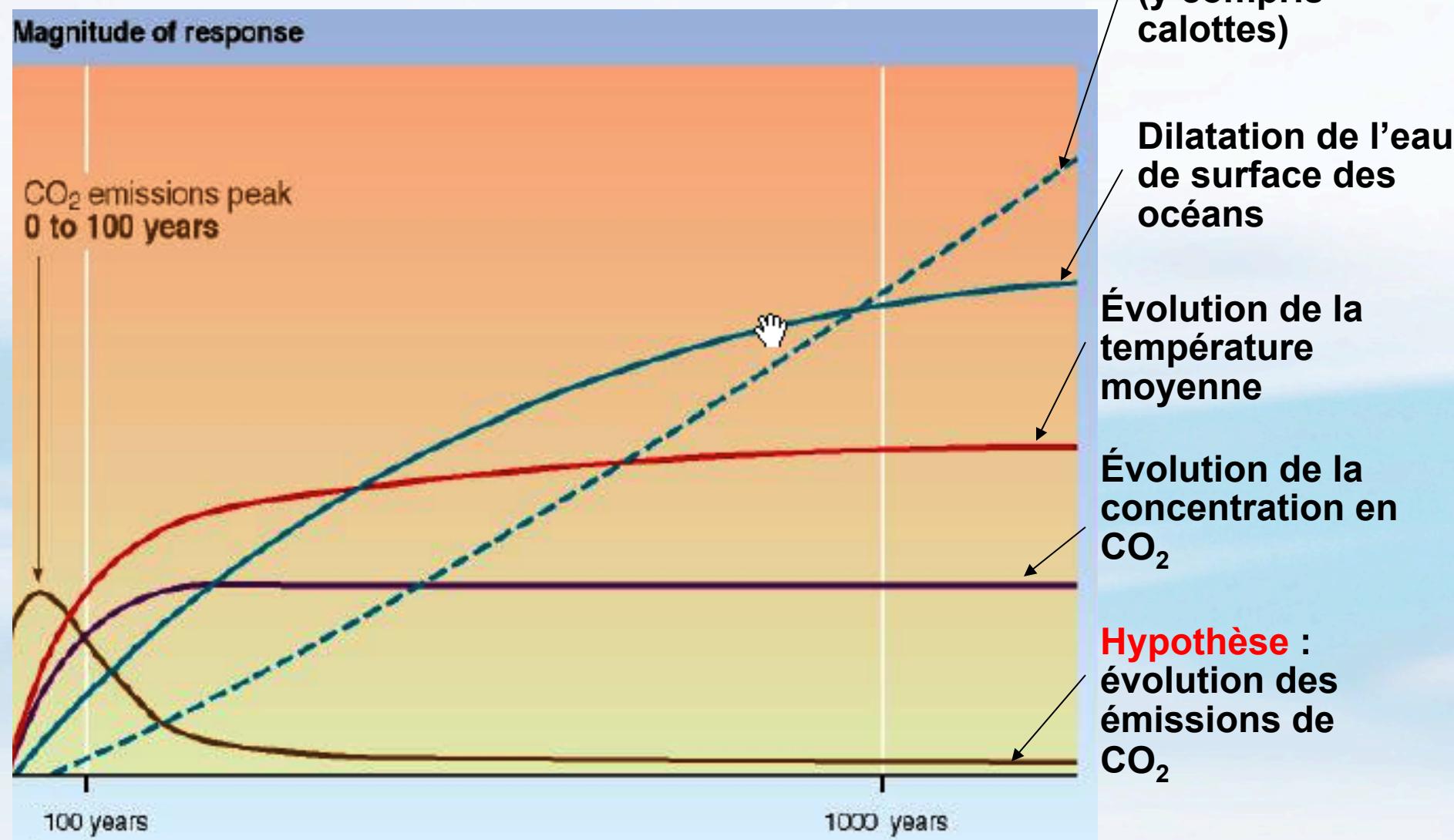


Structure d'un hydrate de méthane

Les hydrates de méthane, c'est où ?



Au secours ! Où est le bouton « reset » ?



Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Quels seront les impacts du changement climatique ?

Nous ne ferons jamais le tour de toutes les mauvaises surprises possibles à l'avance, puisque la situation est inédite

La connaissance des risques **restera** toujours partielle. Il faut faire avec.

Attention à ne pas confondre conditionnels et futurs simples : tout ce qui est possible n'arrivera pas nécessairement, mais plus nous émettons, et plus le risque est sérieux

Attention aussi à ne pas confondre « ignorance » et « garantie qu'il ne se passera rien » ! **L'ignorance n'est pas une police d'assurance.**

Attention enfin à **ne pas raisonner à capacité de réaction constante** : ce qui fait notre capacité de résistance à l'adversité aujourd'hui, c'est essentiellement l'abondance de l'énergie, et ce qu'il restera de cette abondance dans un siècle est un énorme point d'interrogation