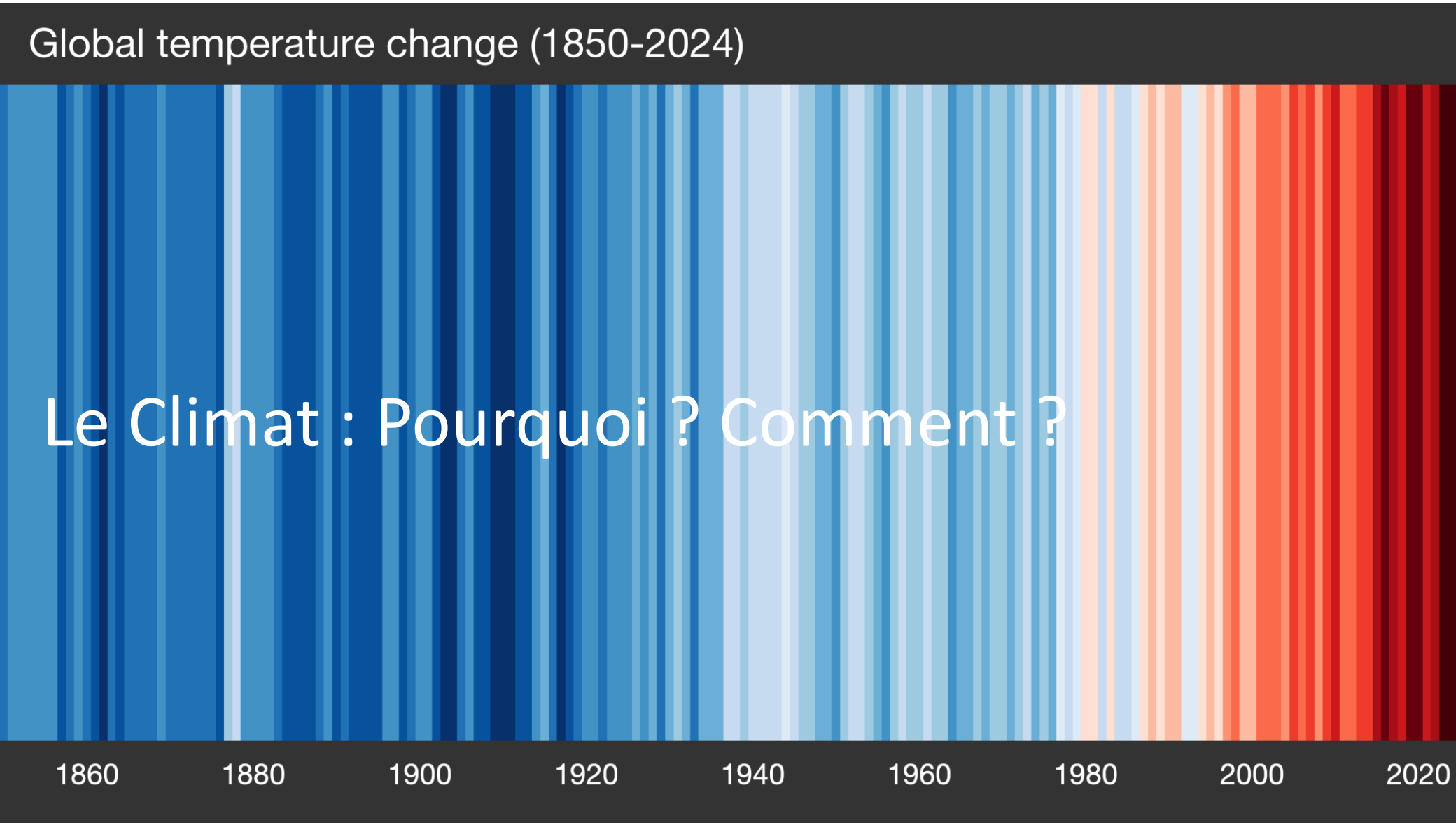
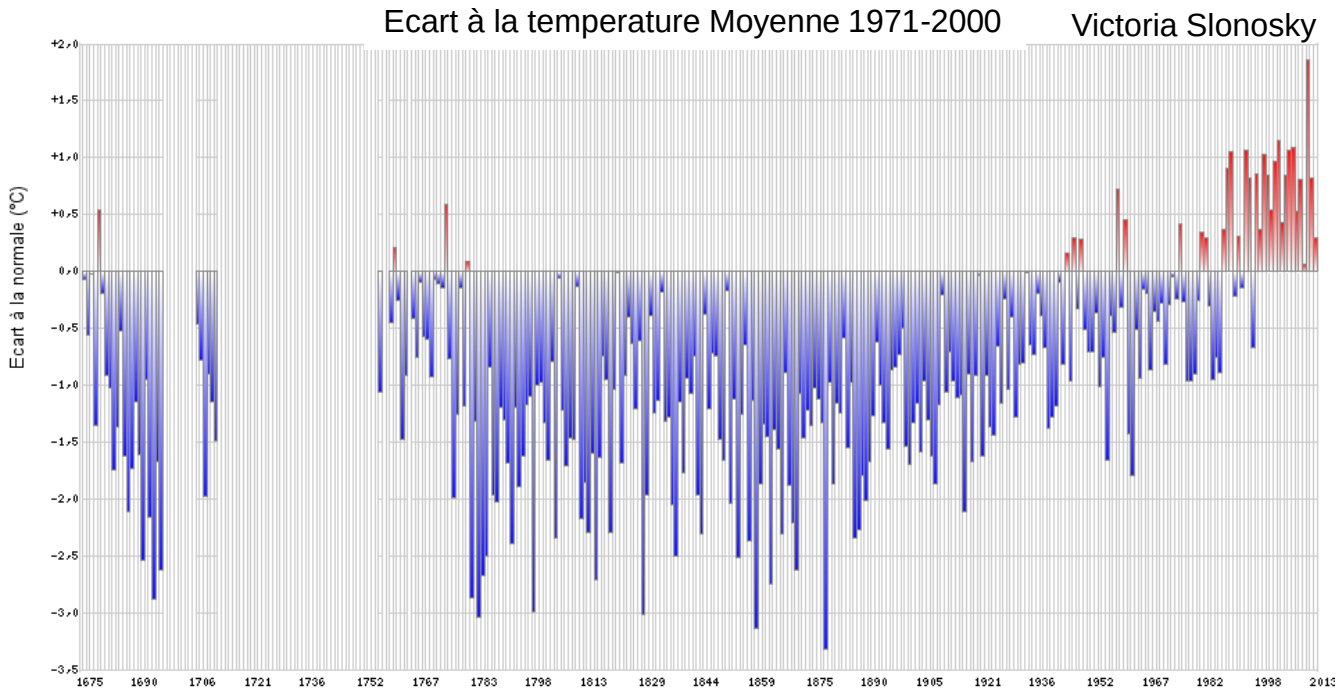
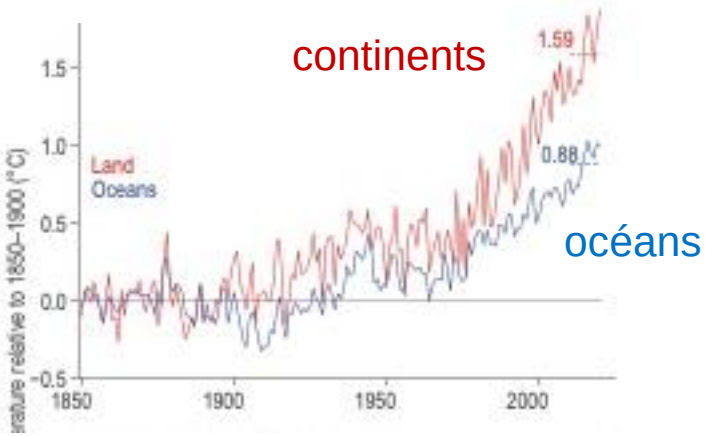
Le Climat : Pourquoi ? Comment ?



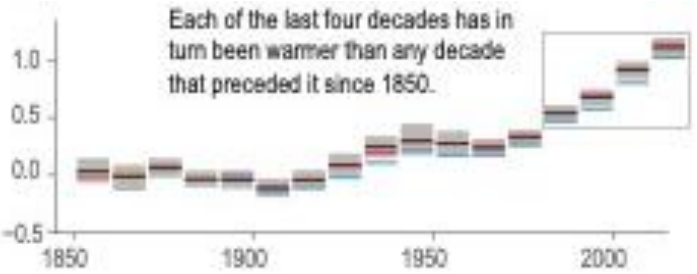
Elisabeth Michel, Marc Delmotte, LSCE
Journée sensibilisation IRFU,

Température annuelle à Paris –Montsouris 1675-2013

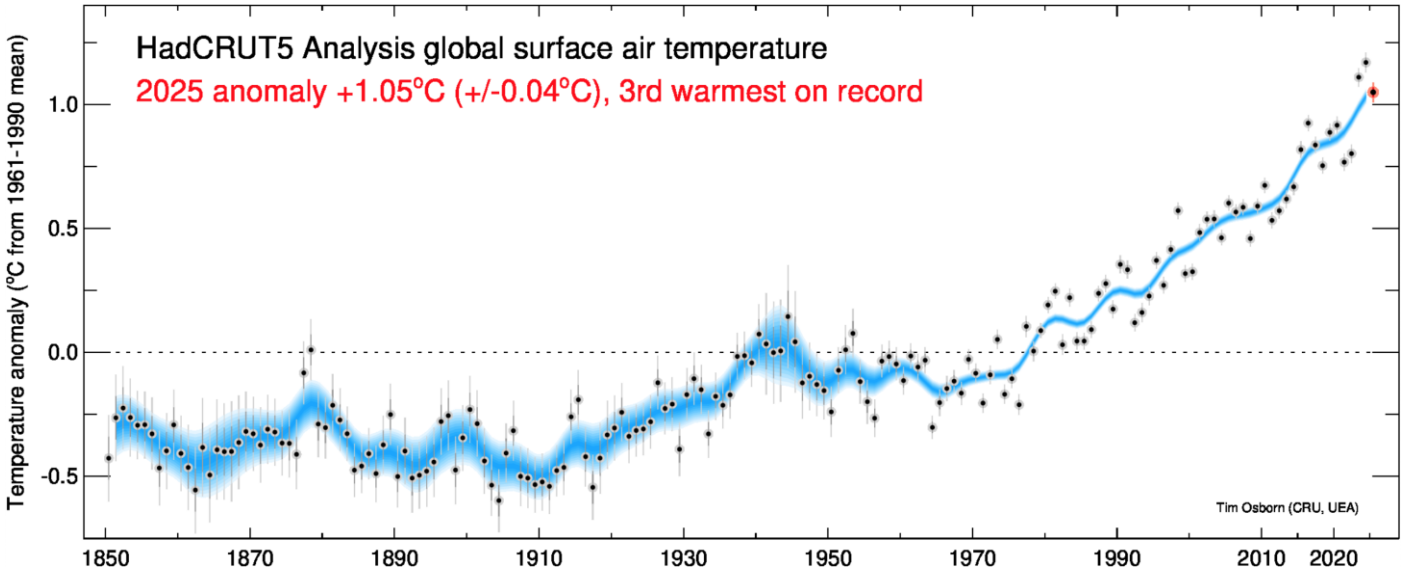




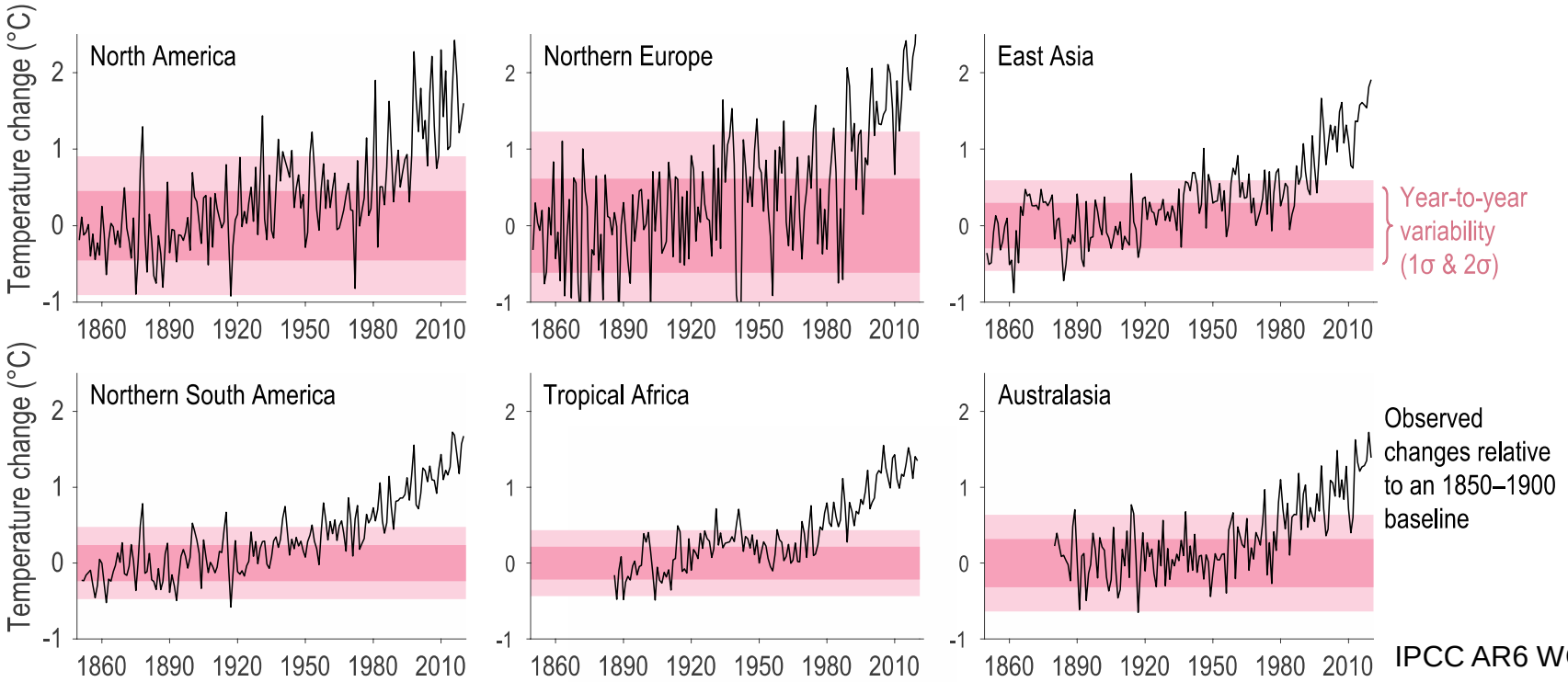
IPCC AR6 WG1 Full report (fig. 2.11)



Chacune des 4 dernières decennies a été à son tour plus chaude que toutes les décennies qui l'ont précédée depuis 1850



Température moyenne annuelle régionale



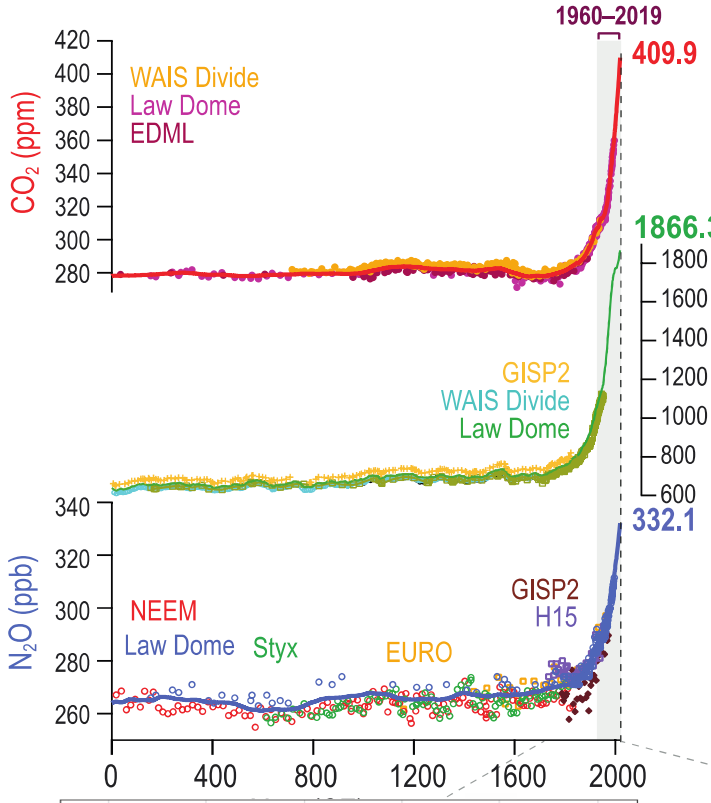
IPCC AR6 WG1 Full report (fig. 1.14)

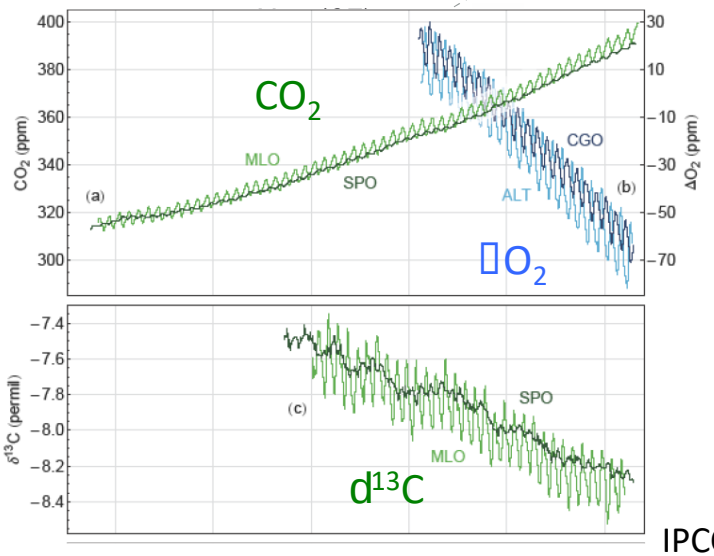
1000 dernières années

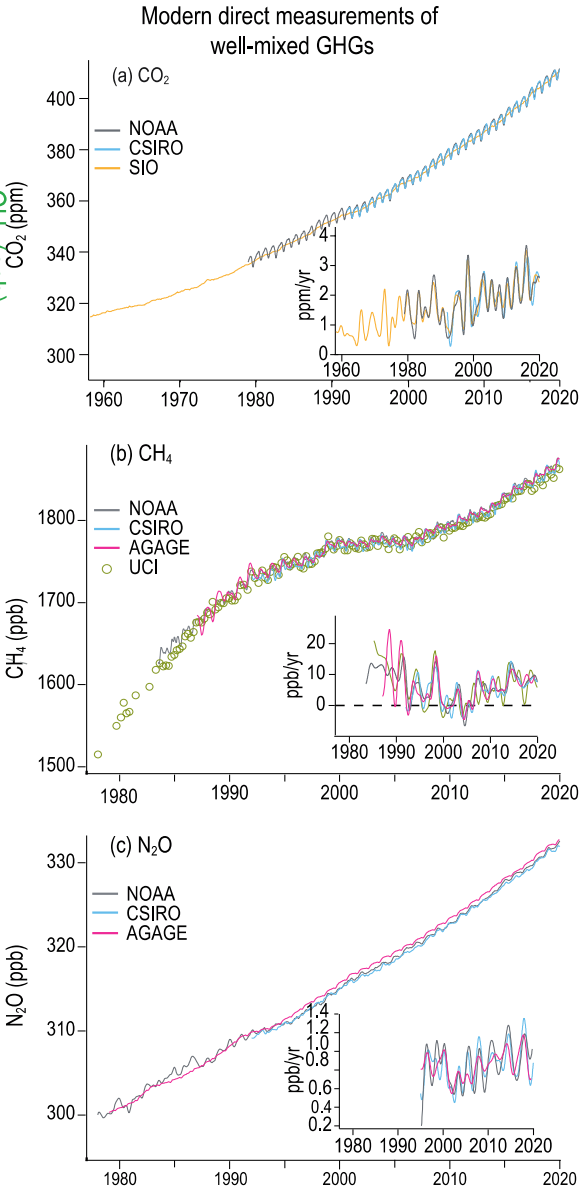
Données historiques

Les concentrations en GES (CO_2, CH_4, N_2O) ont augmenté de manière continue depuis le début de la période préindustrielle.
L'augmentation du CO_2 s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles comme le montre les mesures isotopiques du CO_2 et celle de la concentration en oxygène.
Les variations des autres GHG s'explique par les activités humaines (agriculture)

CO_2 à 420 ppm en 2024
Il faut remonter au Pliocène (avant 3Ma) pour retrouver des concentrations équivalentes







IPCC AR6 WG1 Full report (fig. 2.5)

La fonte des glaciers

- Partout, on constate le recul des glaciers.
  Ici des photos illustratives.

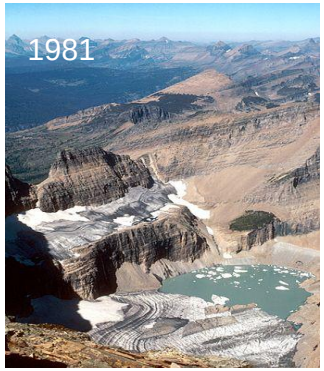
La mer de glace (massif du Mont-Blanc)

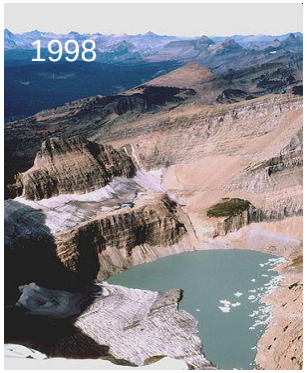


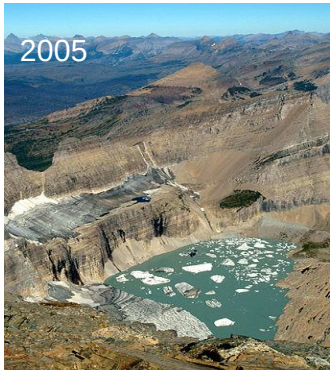


Le glacier de Grinnell (Montana)



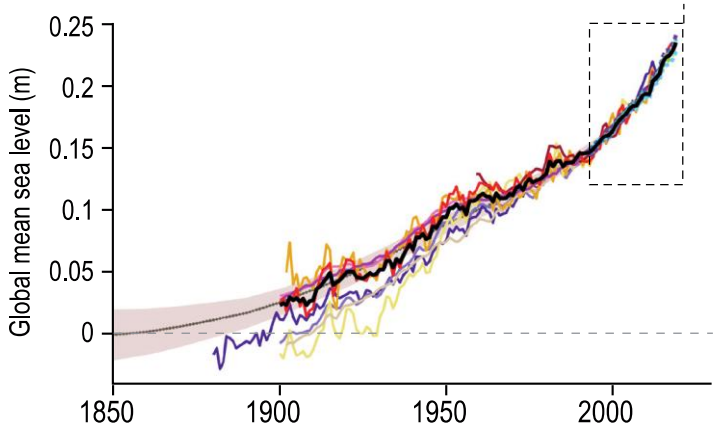






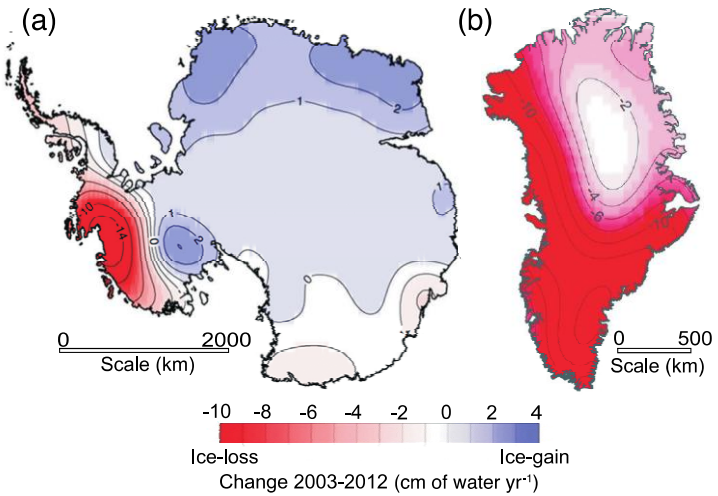
https://fr.wikipedia.org/wiki/Recul_des_glaciers_depuis_1850

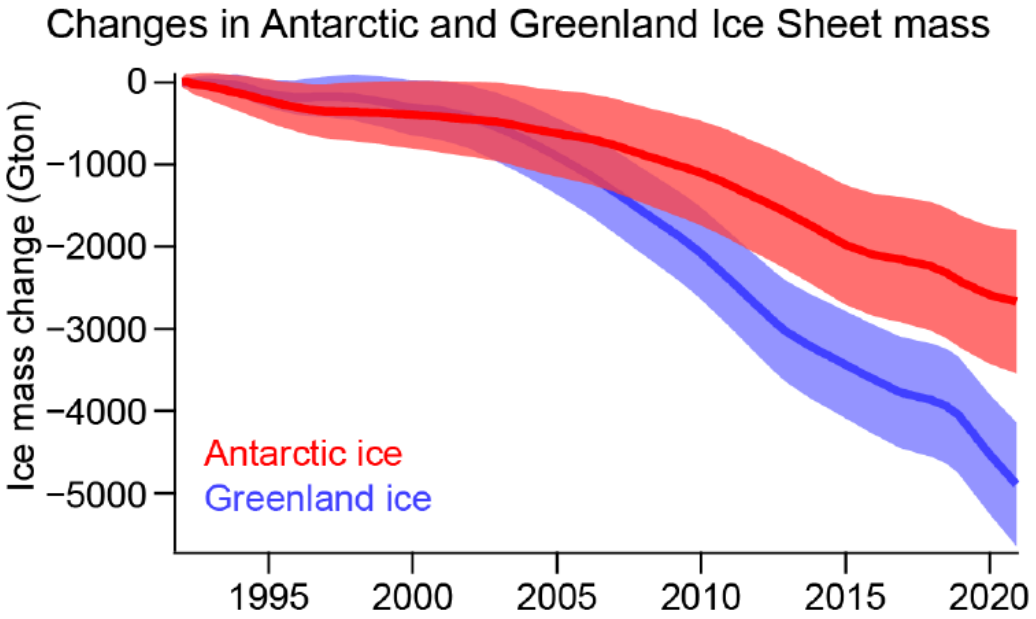
Niveau marin





taille des glaciers

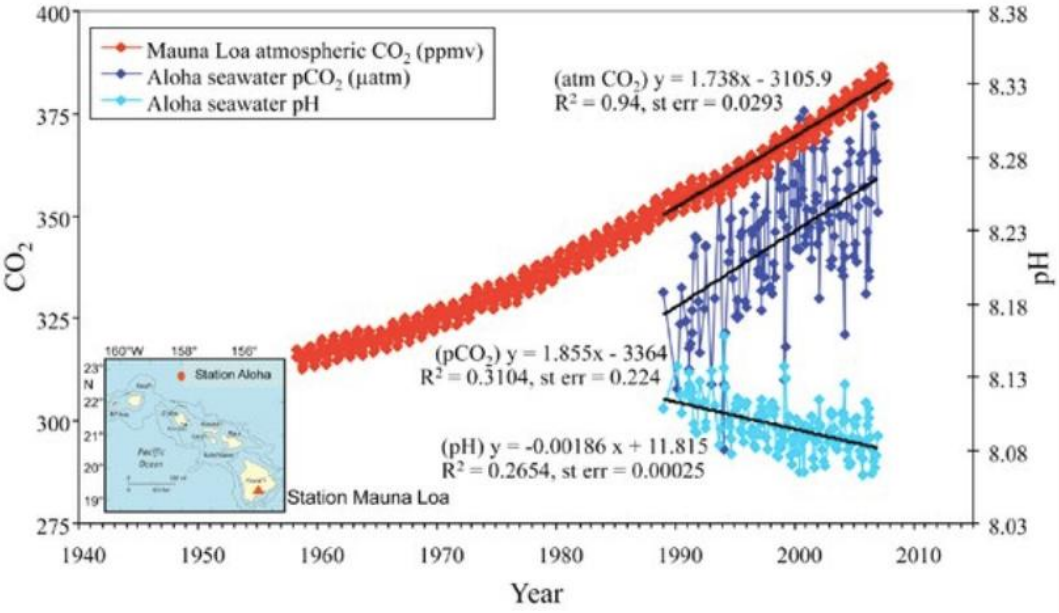


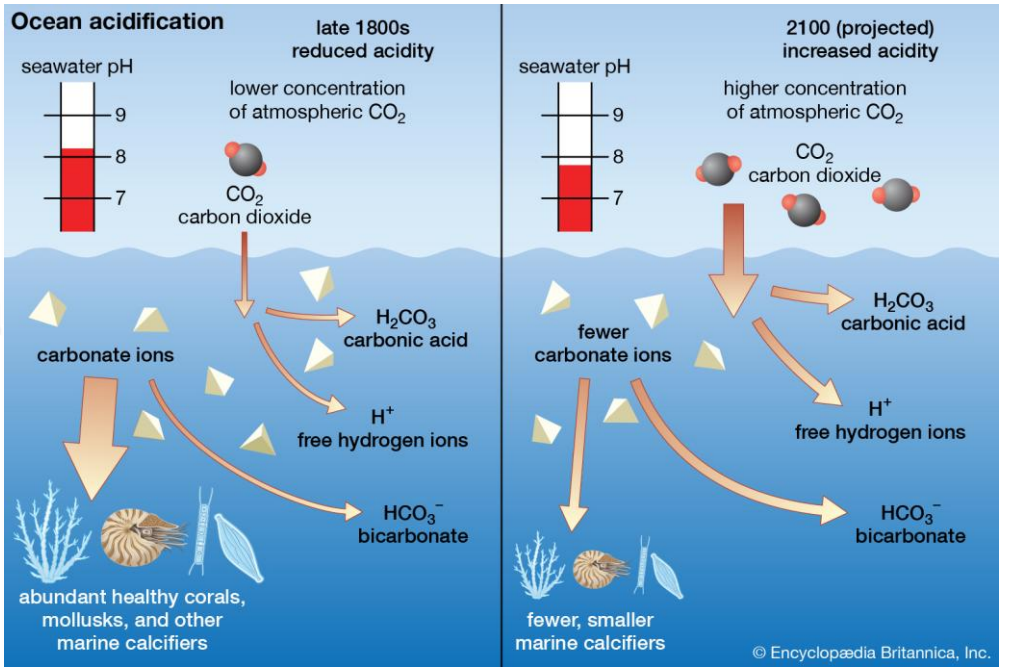


IPCC AR5 WG1 fig. TS.3

IPCC AR6 WG1 Full report (fig. 2.24)

L'acidification des océans





- Variation du pH à la surface des océans (bleu clair) et du CO_2 (bleu foncé) entre 1990 et 2005 (station Aloha).

- Depuis l'ère industrielle, le pH des océans a diminué de 8.19 à 8.05 (→ augmentation de l'acidité de 30%).

Fabry et al., 2010; Encyclopedia Britannica, Inc.

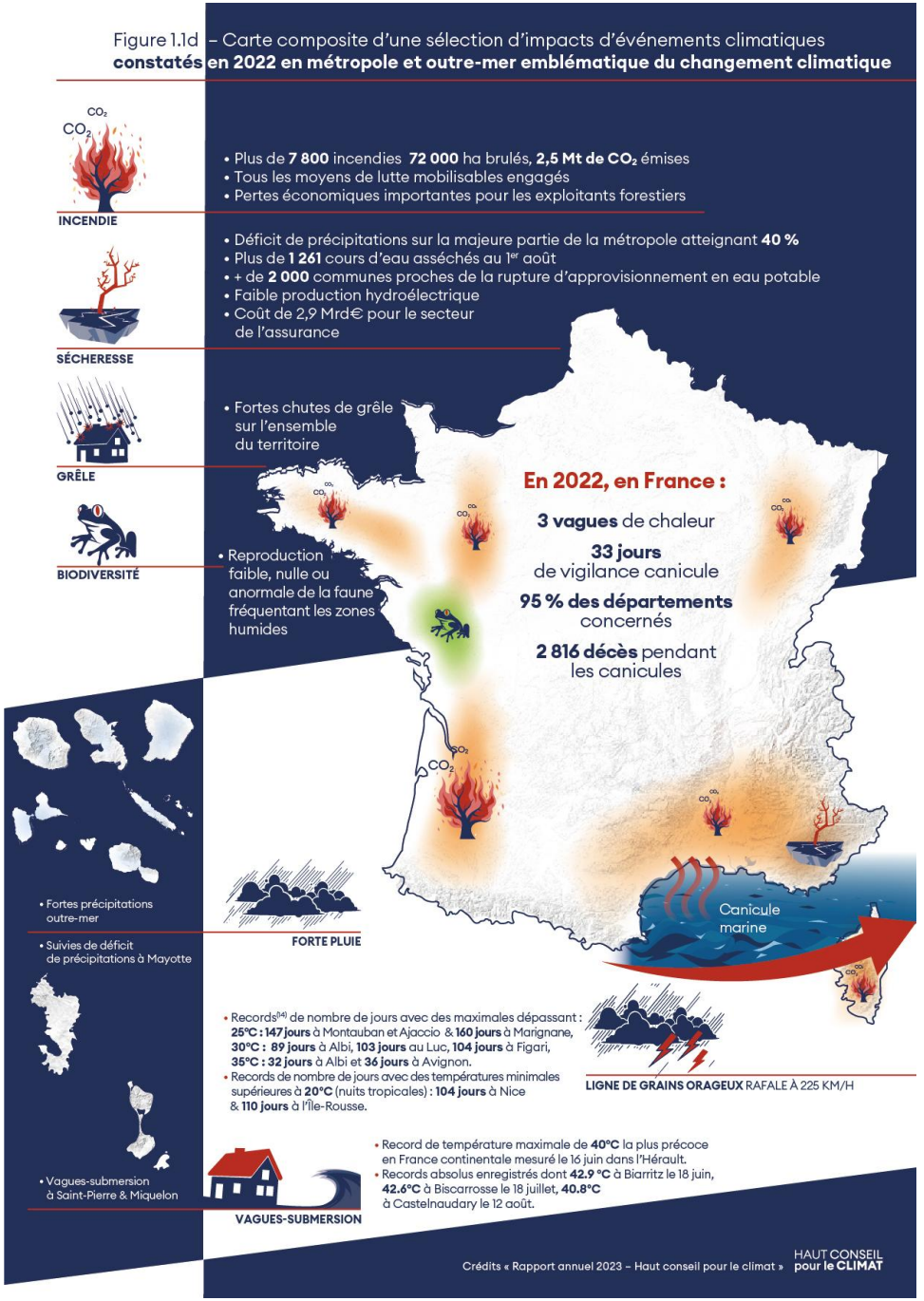


Figure 1.1d – Carte composite d'une sélection d'impacts d'événements climatiques constatés en 2022 en métropole et outre-mer emblématique du changement climatique
INCENDIE
• Plus de 7 800 incendies 72 000 ha brulés, 2,5 Mt de CO_2 émises
• Tous les moyens de lutte mobilisables engagés
• Pertes économiques importantes pour les exploitants forestiers
SÉCHERESSE
• Déficit de précipitations sur la majeure partie de la métropole atteignant 40 %
• Plus de 1 261 cours d'eau asséchés au 1er août
• + de 2 000 communes proches de la rupture d'approvisionnement en eau potable
• Faible production hydroélectrique
• Coût de 2,9 Mrd€ pour le secteur de l'assurance
GRÊLE
• Fortes chutes de grêle sur l'ensemble du territoire
BIODIVERSITÉ
• Reproduction faible, nulle ou anormale de la faune fréquentant les zones humides
En 2022, en France :
3 vagues de chaleur
33 jours de vigilance canicule
95 % des départements concernés
2 816 décès pendant les canicules
Canicule marine
• Fortes précipitations outre-mer
• Suivies de déficit de précipitations à Mayotte
FORTE PLUIE
• Records[14] de nombre de jours avec des maximales dépassant : 25°C : 147 jours à Montauban et Ajaccio & 160 jours à Marignane, 30°C : 89 jours à Albi, 103 jours au Luc, 104 jours à Figari, 35°C : 32 jours à Albi et 36 jours à Avignon.
• Records de nombre de jours avec des températures minimales supérieures à 20°C (nuits tropicales) : 104 jours à Nice & 110 jours à l'Île-Rousse.
LIGNE DE GRAINS ORAGEUX RAFALE À 225 KM/H
• Vagues-submersion à Saint-Pierre & Miquelon
VAGUES-SUBMERSION
• Record de température maximale de 40°C la plus précoce en France continentale mesuré le 16 juin dans l'Hérault.
• Records absolus enregistrés dont 42.9 °C à Biarritz le 18 juin, 42.6°C à Biscarrosse le 18 juillet, 40.8°C à Castelnaudary le 12 août.
Crédits « Rapport annuel 2023 – Haut conseil pour le climat »
HAUT CONSEIL pour le CLIMAT

Et en 2026 …..

En résumé

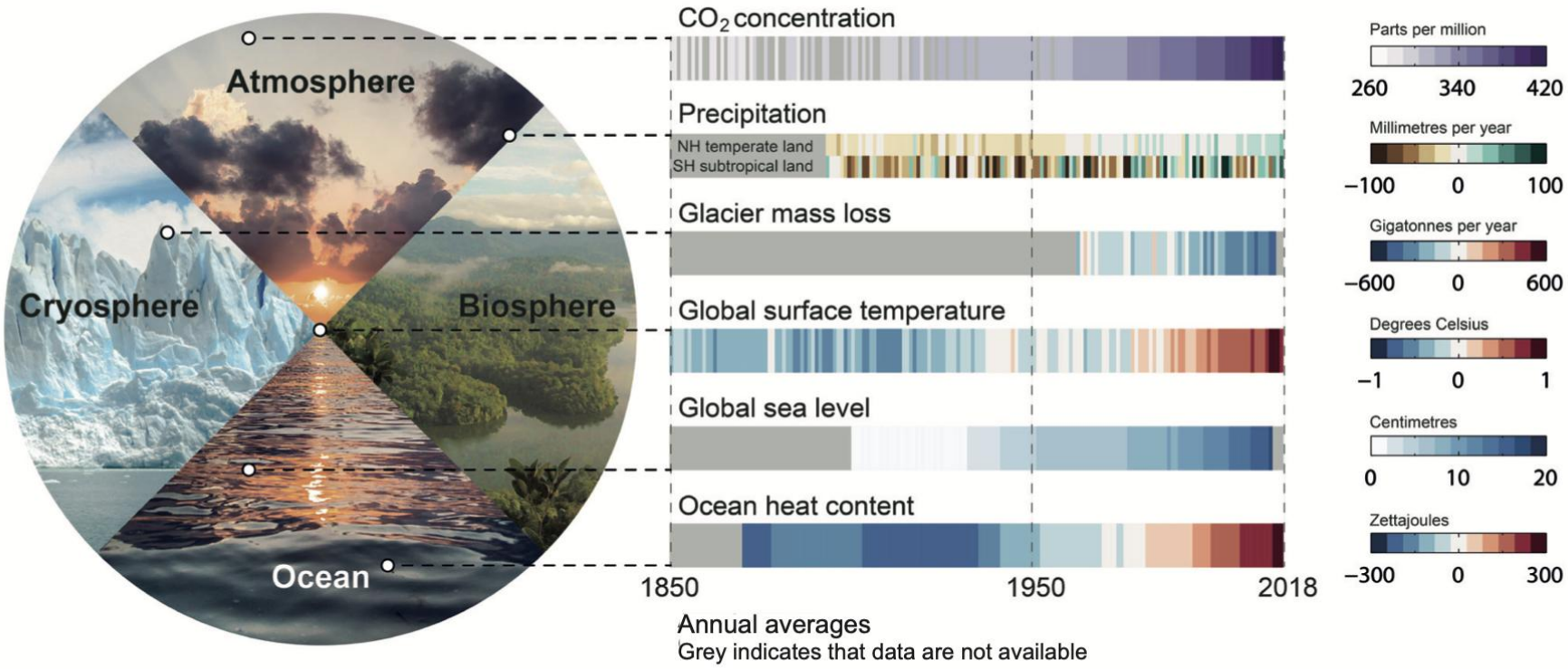
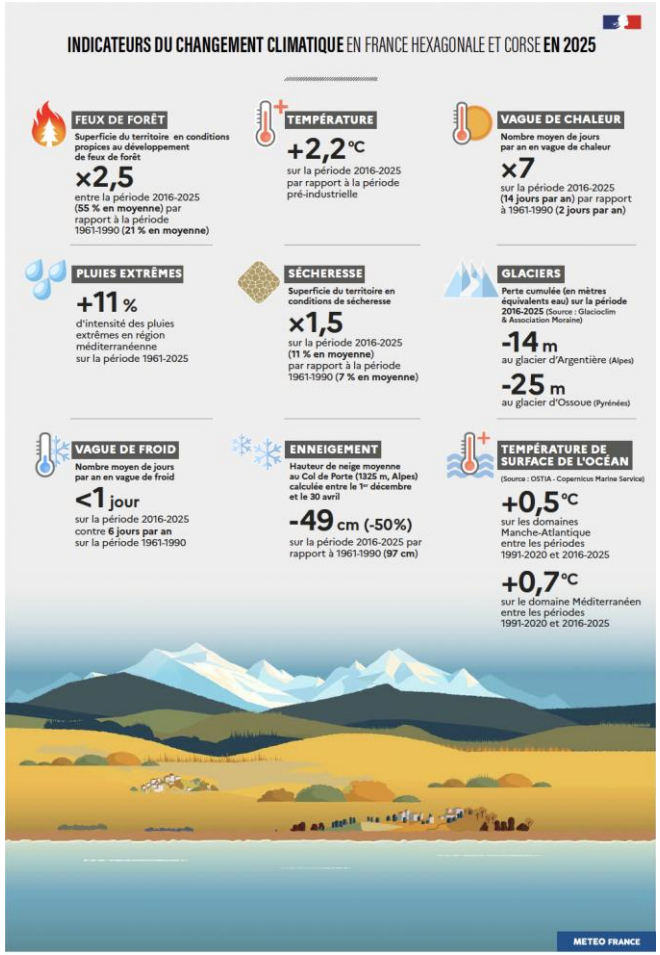
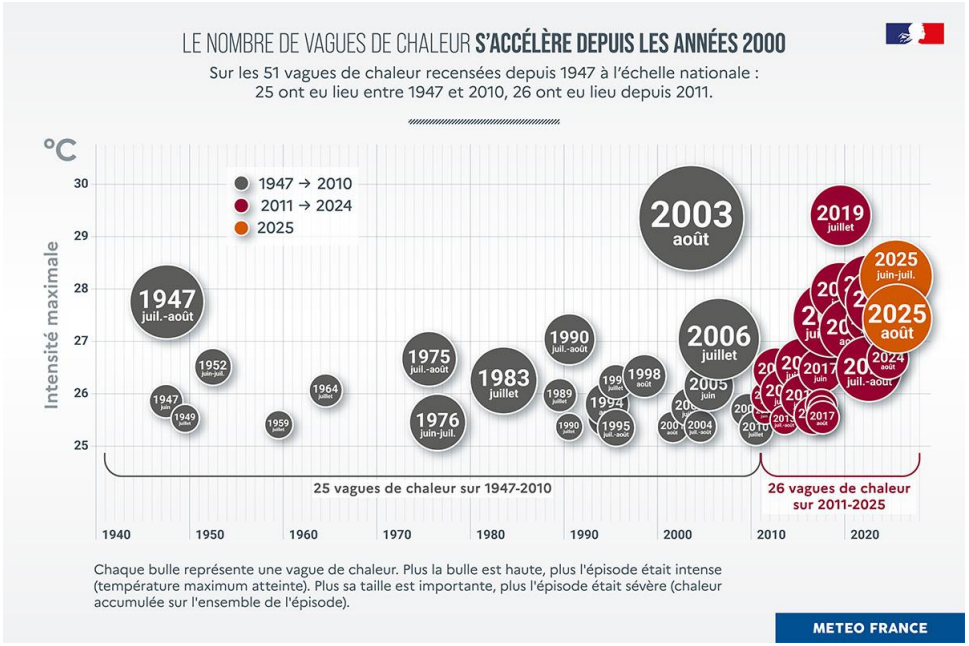


Figure 1.4 | Changes are occurring throughout the climate system. Left: Main realms of the climate system: atmosphere, biosphere, cryosphere and ocean.

IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf – P.158

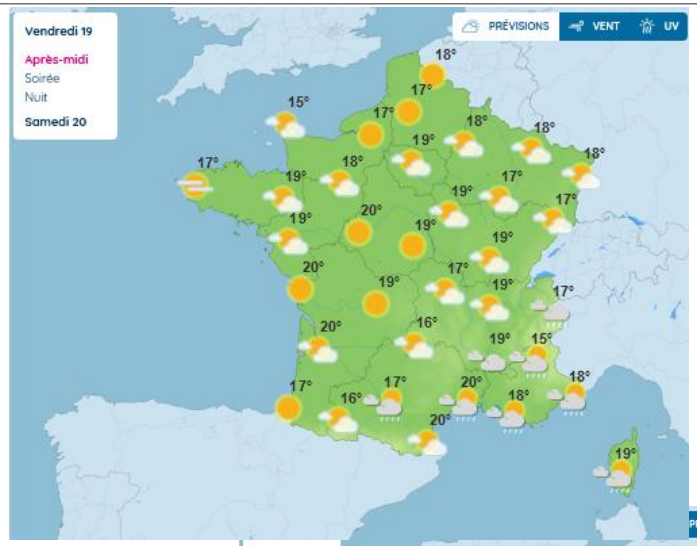
Chaque incrément de réchauffement planétaire renforce la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, des sécheresses des sols, des conditions propices aux incendies et des pluies extrêmes



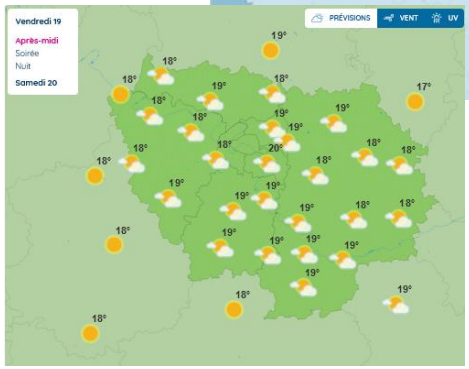


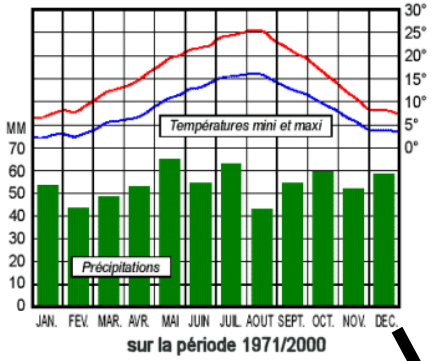
Cycle de l'eau plus intense, plus variable
Tensions croissantes sur la ressource en eau

Partie I : Météorologie et Climat

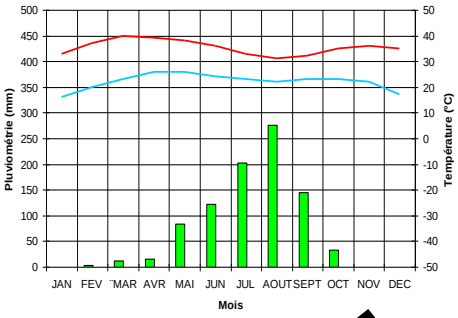


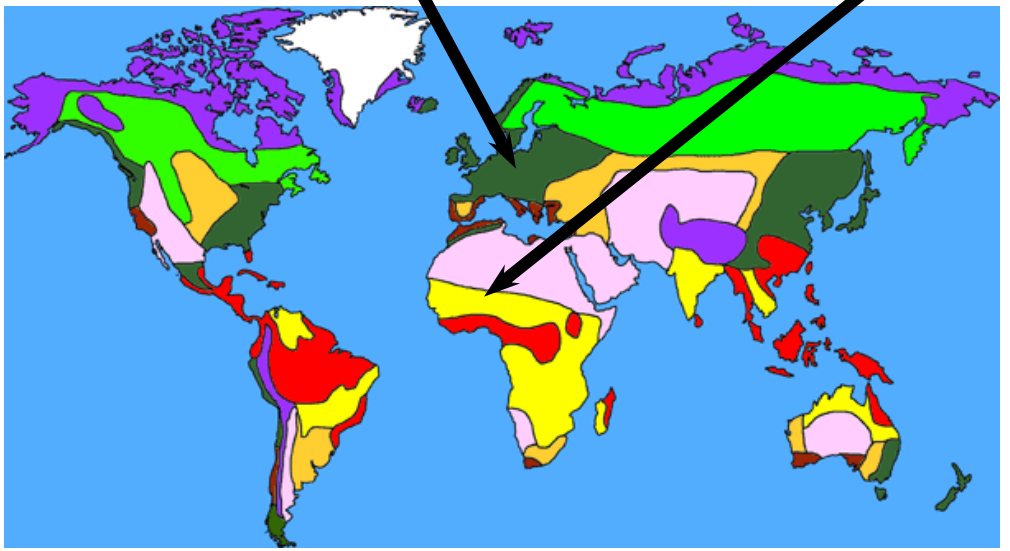






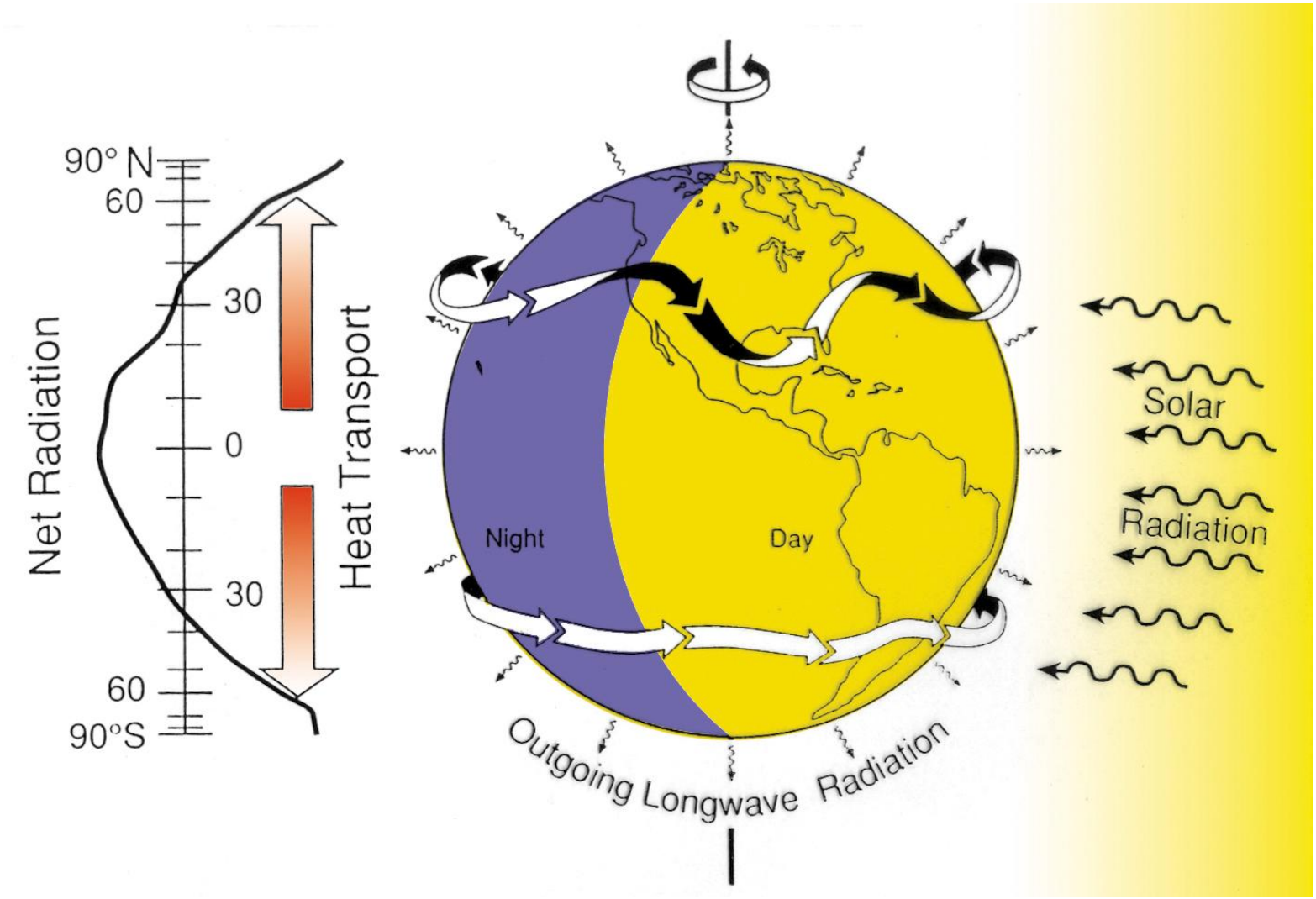
sur la période 1971/2000

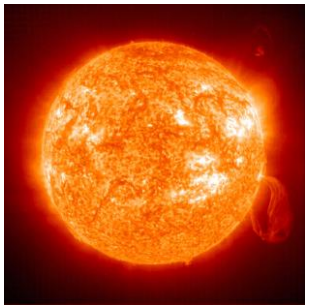




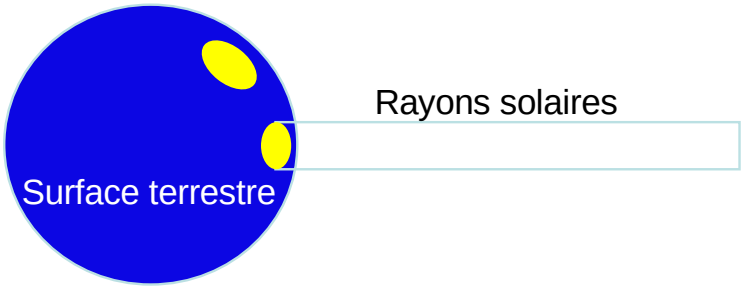
- Forêt tropicale
- Savane tropicale
- Desert
- Méditerranéen
- Prairie
- Forêt tempérée décidue
- Forêt boréale
- Toundra polaire et alpine

Le climat : une machine thermique





Climat et rayonnement solaire

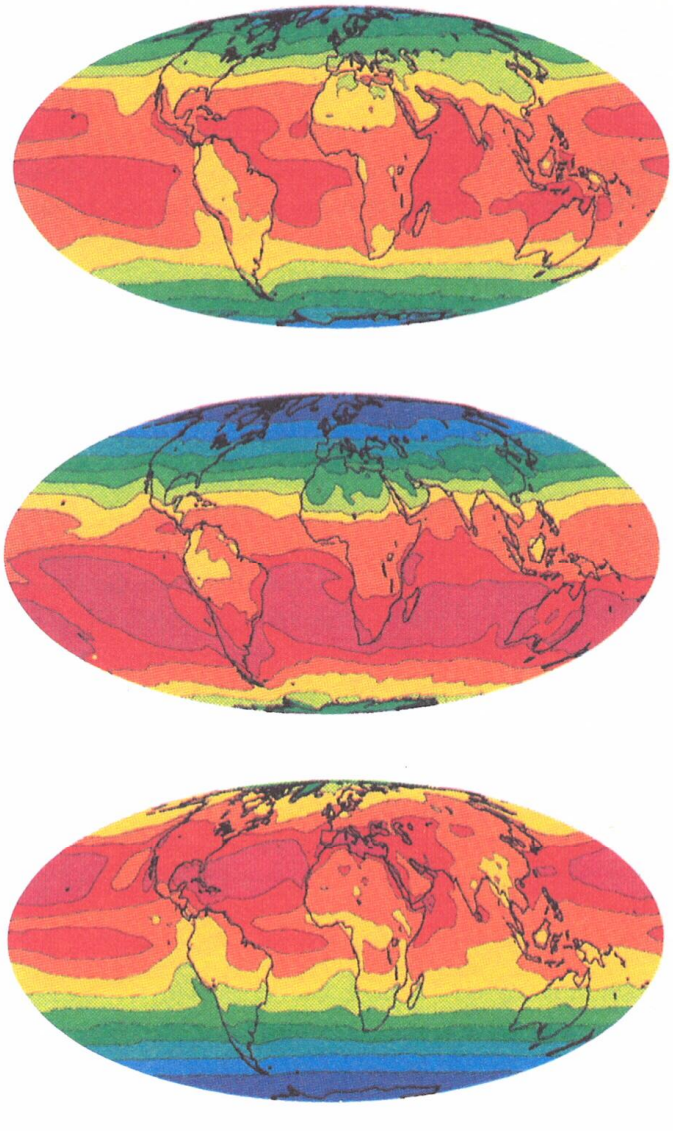


« Clima »: signifie Inclinaison en grec

Puissance absorbée par le système terre

< 40W/m^2

>360W/m^2



Moyenne annuelle

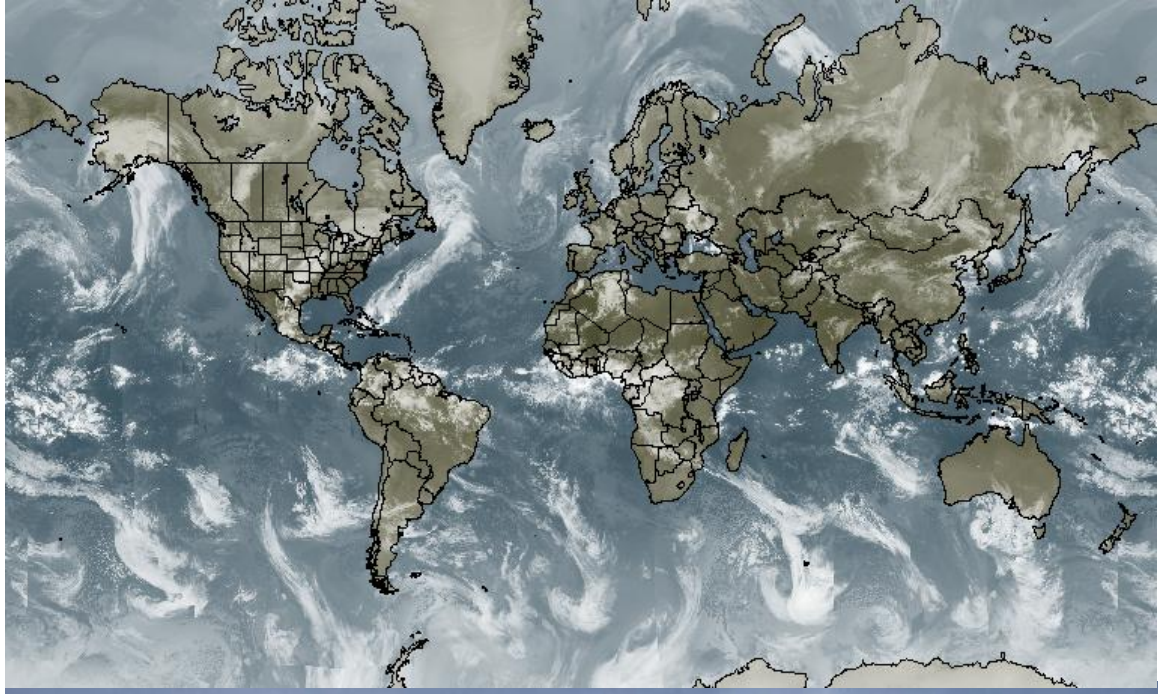
Hiver boréal

Eté boréal

Le climat de la terre, Sadourny, collection dominos, 1994

Transport de Chaleur:

Atmosphère

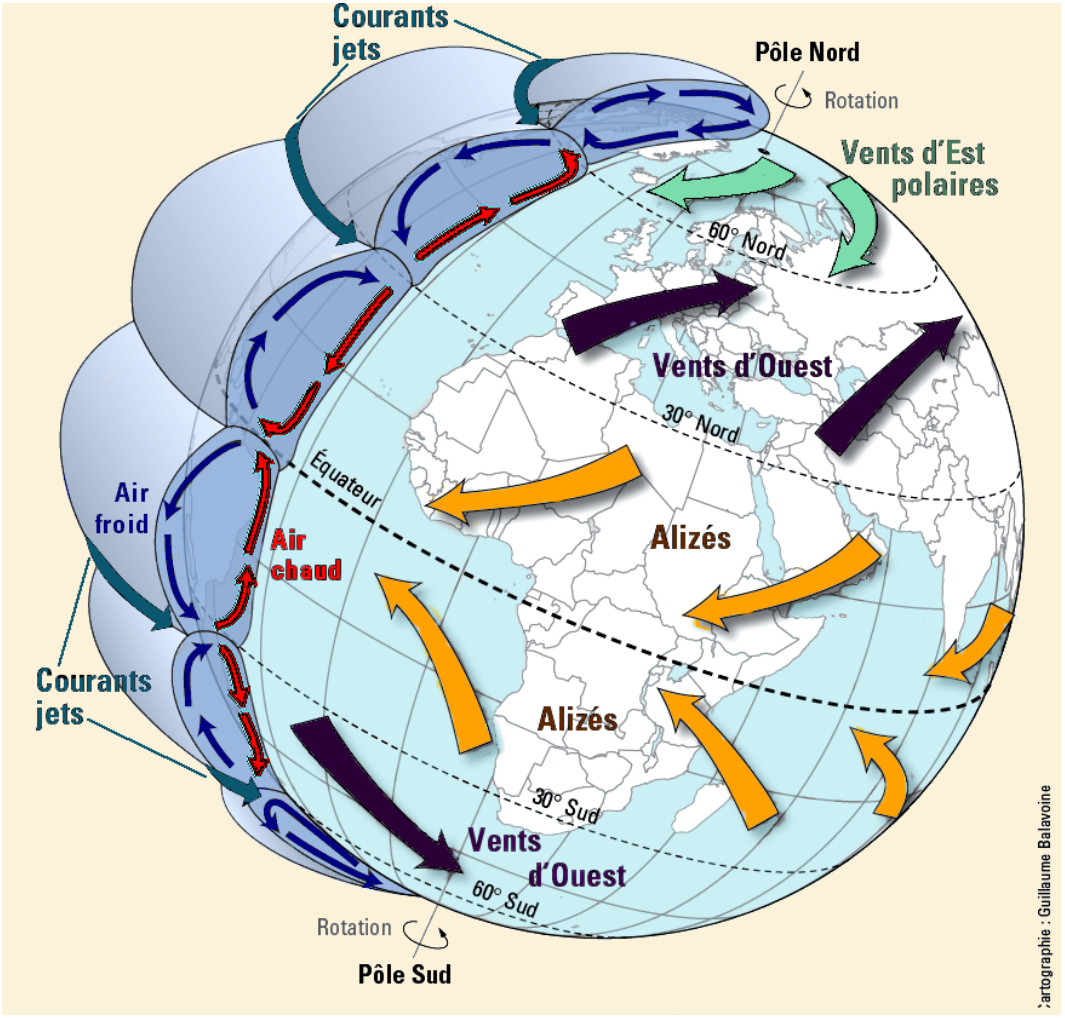


Océan



Partie III : Dynamique de l'atmosphère

L'atmosphère se met en mouvement pour redistribuer l'énergie



$\Rightarrow$ joue un rôle considérable dans le cycle de l'eau: transporte d'énormes quantités de vapeur d'eau.

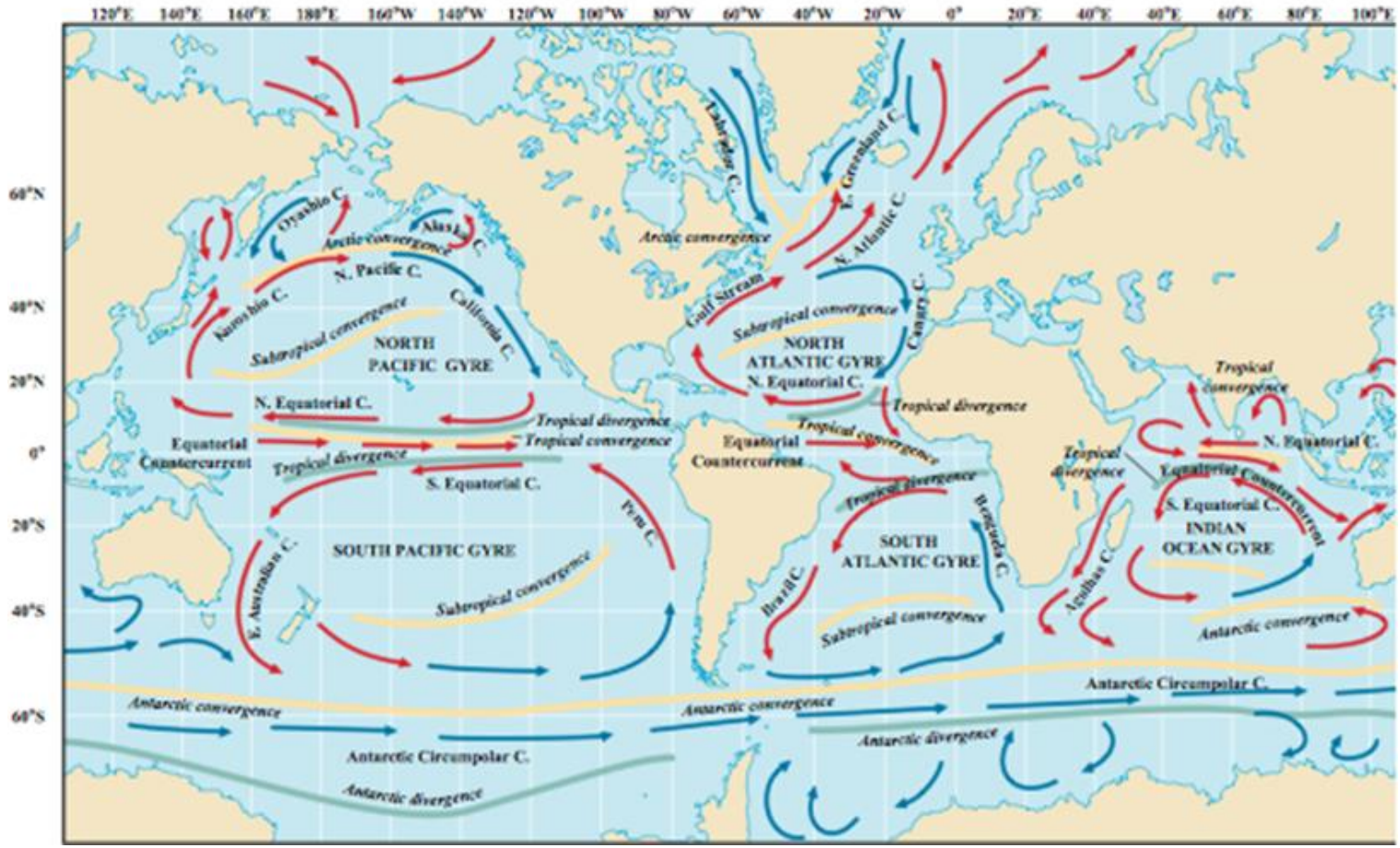
Cellule des régions polaires

Cellule de Ferrel

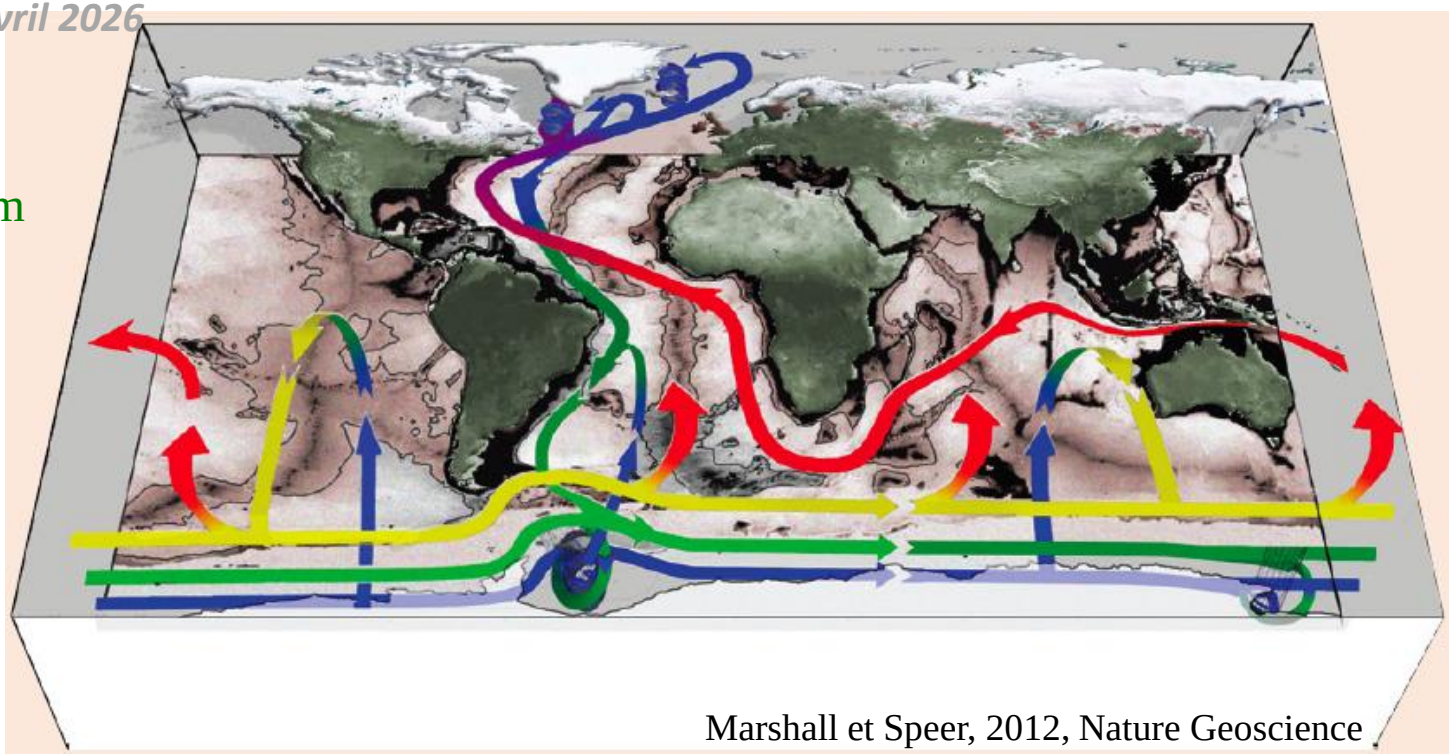
Cellule de Hadley

Le déplacement des masses d'air conditionne le climat des diverses régions de la planète

Circulation océanique de surface

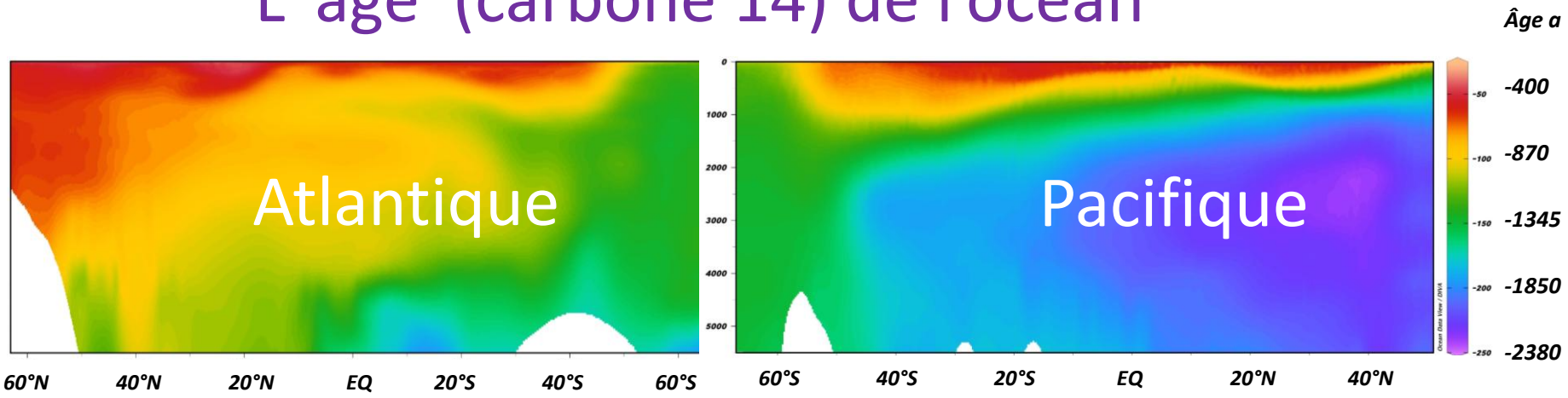


Courants de surface
Eaux profondes 2000 - 4000 m
Eaux de fond > 4000 m



Marshall et Speer, 2012, Nature Geoscience

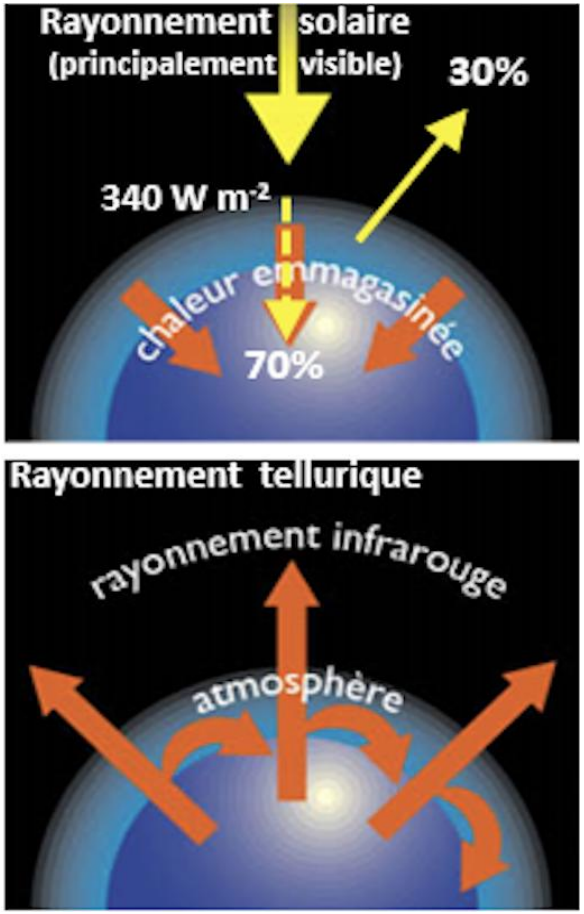
L' âge (carbone 14) de l'océan



Une planète échange du rayonnement lumineux avec l'extérieur

- rayonnement entrant : de son étoile principalement et sous forme de lumière visible

- rayonnement sortant : ce qu'elle réfléchit et émet vers l'espace, essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge



Rappel: Les gaz à effet de serre

0.04 %

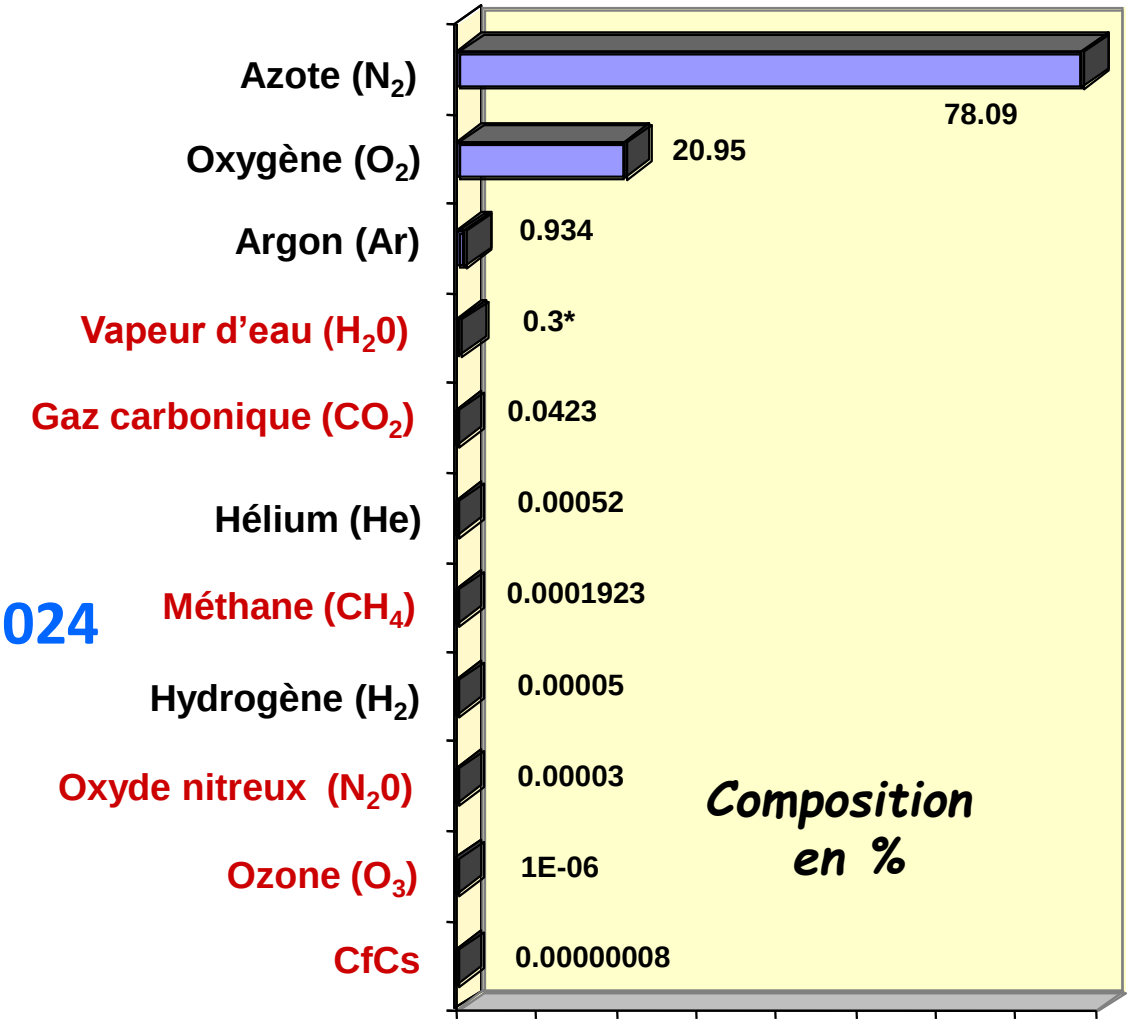
=

423.9 ppm

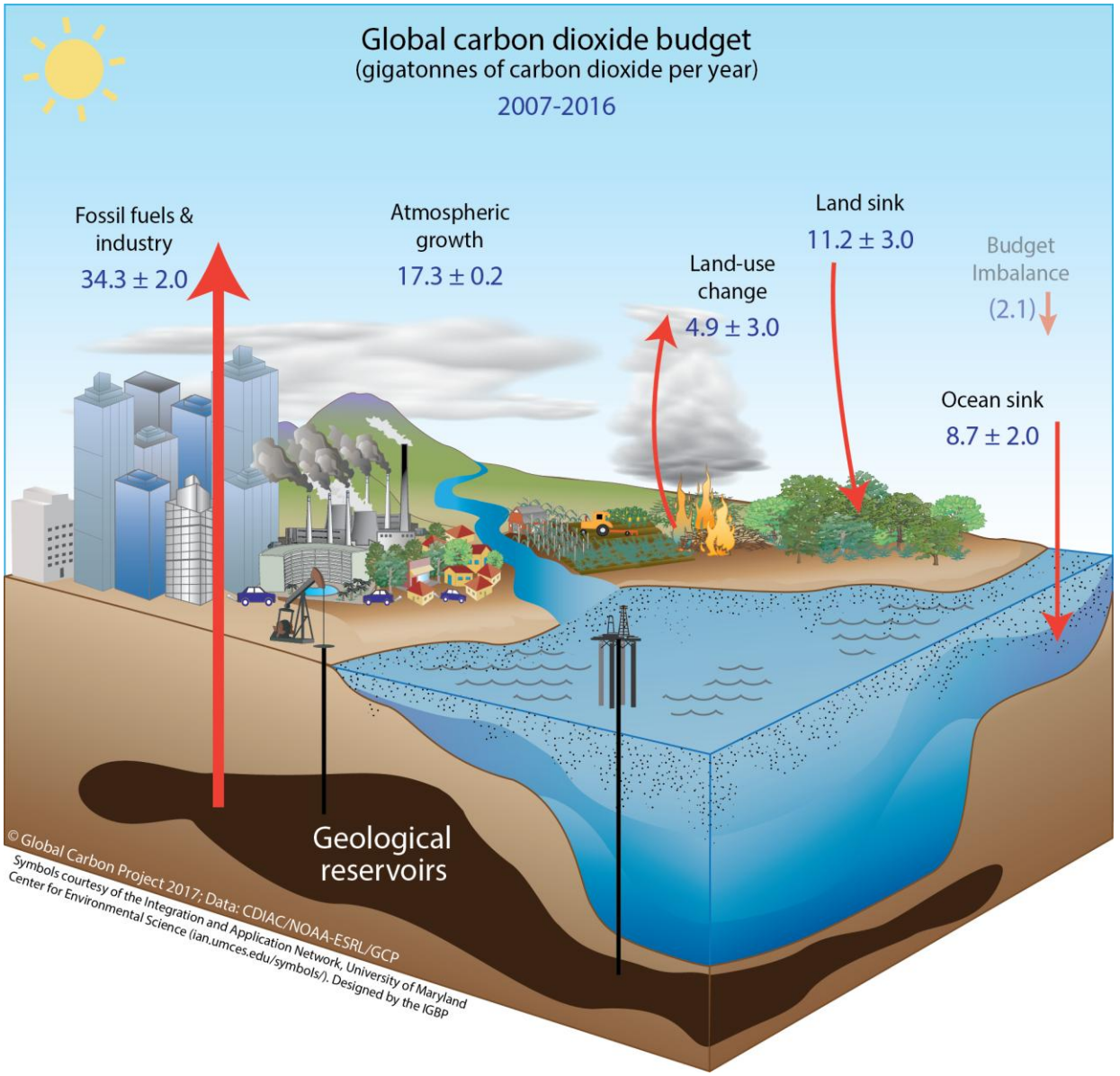
Valeur moyenne globale du CO_2 atmosphérique en 2024

Gaz à effet de serre

** : la vapeur d 'eau varie entre 0 et 7%*



Cycle du carbone

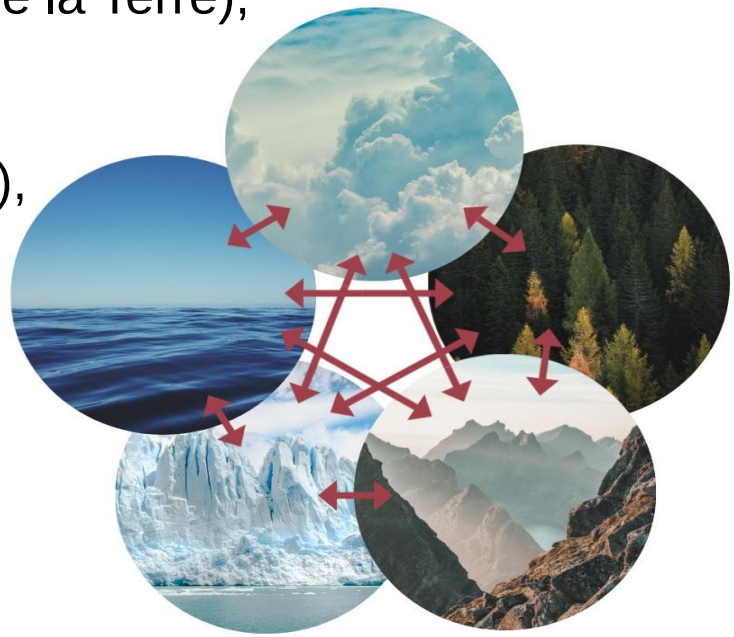


Perturbation of the global carbon cycle caused by anthropogenic activities,
averaged globally for the decade 2007–2016 ($GtCO_2$/yr) Source: CDIAC; NOAA-ESRL; Le Quéré et al 2017; Global Carbon Budget 2017

Le système Terre

- Le système climatique définit un ensemble d'interactions entre les 5 grands sous-ensembles terrestres :

- la lithosphère(couche supérieure de la partie solide de la Terre),
- l'hydrosphère (tout ce qui concerne l'eau liquide),
- la cryosphère (tout ce qui concerne la glace),
- l'atmosphère (l'enveloppe gazeuse de la Terre solide),
- la biosphère (tout ce qui concerne la vie).



Wikipedia

- Son fonctionnement présente une certaine variabilité "interne" et est soumis à des "forçages externes".

Les facteurs de forçages externes

Le forçage radiatif correspond à la **variation du bilan entre l'énergie reçue par la Terre (rayonnement solaire) et l'énergie qu'elle renvoie vers l'espace**, due à une perturbation du système climatique (par exemple les gaz à effet de serre, les aérosols ou les changements de l'activité solaire).

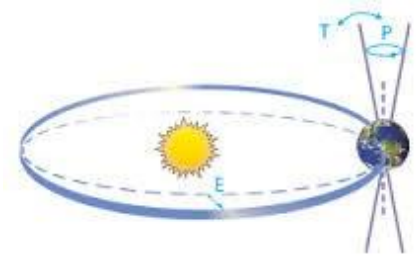
- Il s'exprime en **watts par mètre carré (W/m^2)**.
- Un **forçage radiatif positif** entraîne un **réchauffement** (ex. augmentation du CO_2).
- Un **forçage radiatif négatif** entraîne un **refroidissement** (ex. certaines particules aérosols ou augmentation de l'albédo).

Les facteurs de forçage naturel externes sont :

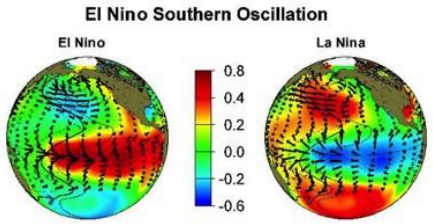
- les variations des cycles orbitaux : induisent des variations importantes et à très long terme,
- l'évolution de luminosité de l'étoile Soleil : son influence est faible,
- la tectonique / le volcanisme : influence hautement variable et potentiellement importante

Changements climatiques au Quaternaire

Orbite de la Terre



Variabilité interne



Activité volcanique

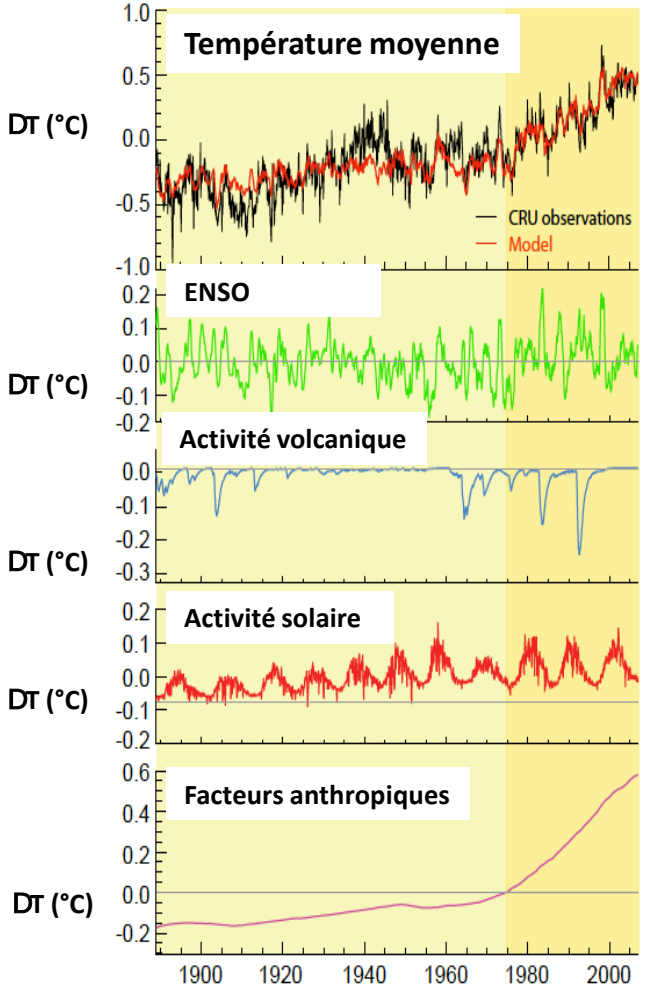


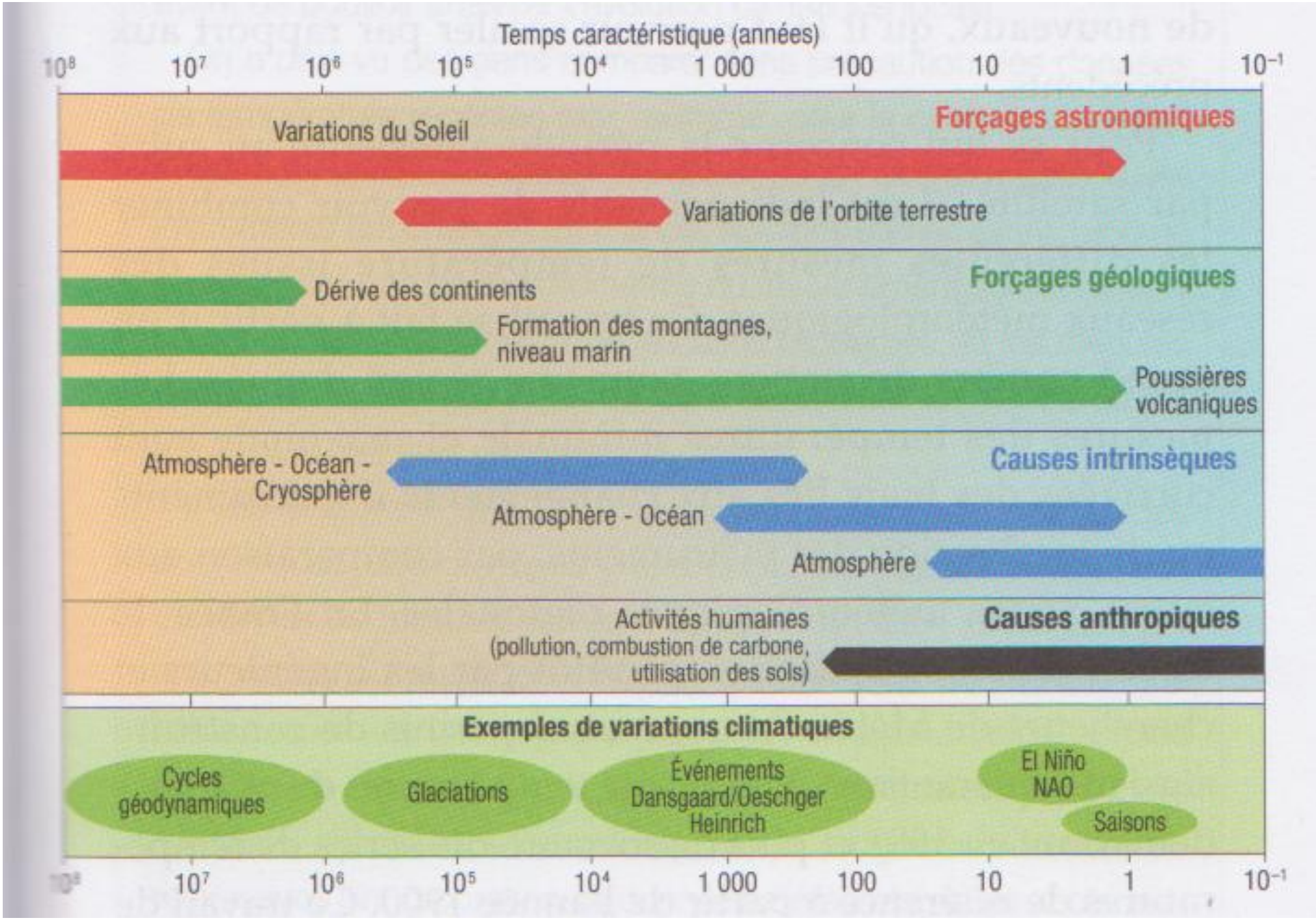
Activité solaire



Facteurs anthropiques



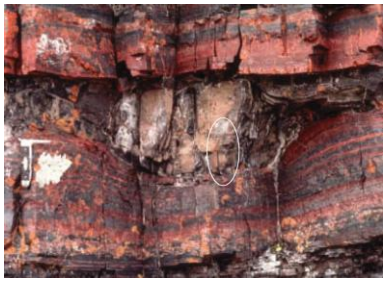


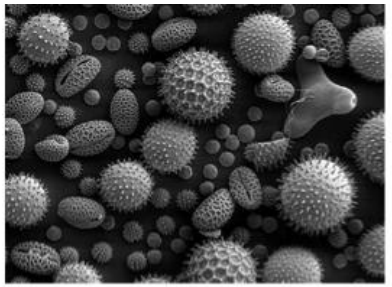

Temps caractéristique (années)
10⁸
10⁷
10⁶
10⁵
10⁴
1 000
100
10
1
10⁻¹
Forçages astronomiques
Variations du Soleil
Variations de l'orbite terrestre
Forçages géologiques
Dérive des continents
Formation des montagnes, niveau marin
Poussières volcaniques
Causes intrinsèques
Atmosphère - Océan - Cryosphère
Atmosphère - Océan
Atmosphère
Causes anthropiques
Activités humaines (pollution, combustion de carbone, utilisation des sols)
Exemples de variations climatiques
Cycles géodynamiques
Glaciations
Événements Dansgaard/Oeschger Heinrich
El Niño NAO
Saisons

Les archives du climat: Préhistoriques, Biologiques et géologiques

Continents:

âges des plus vieilles roches
Traceurs d'origine biologique,
Traceurs inorganiques, …..

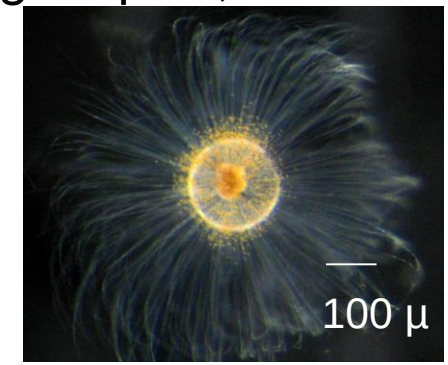





Océans:

150-200Ma
Traceurs d'origine biologique,
Traceurs inorganiques, …..

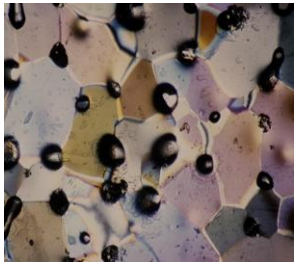
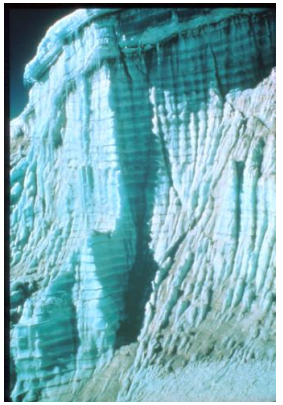




Glaciers:

1Ma (Antarctique)
Chimie de la glace, poussières
Bulles d'air, …..

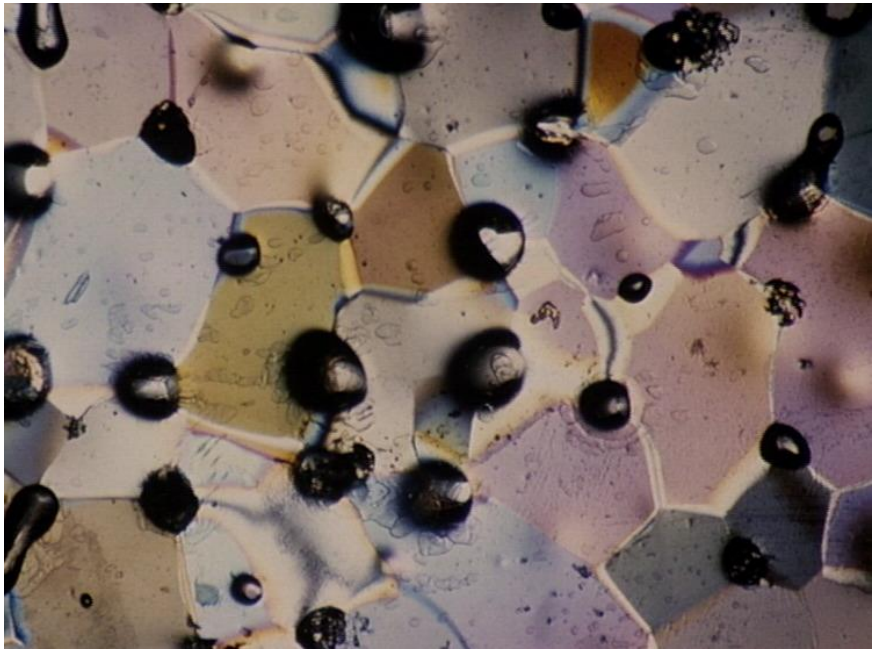
Datations….

Les archives marines et glaciaires, enregistrements quasi continus

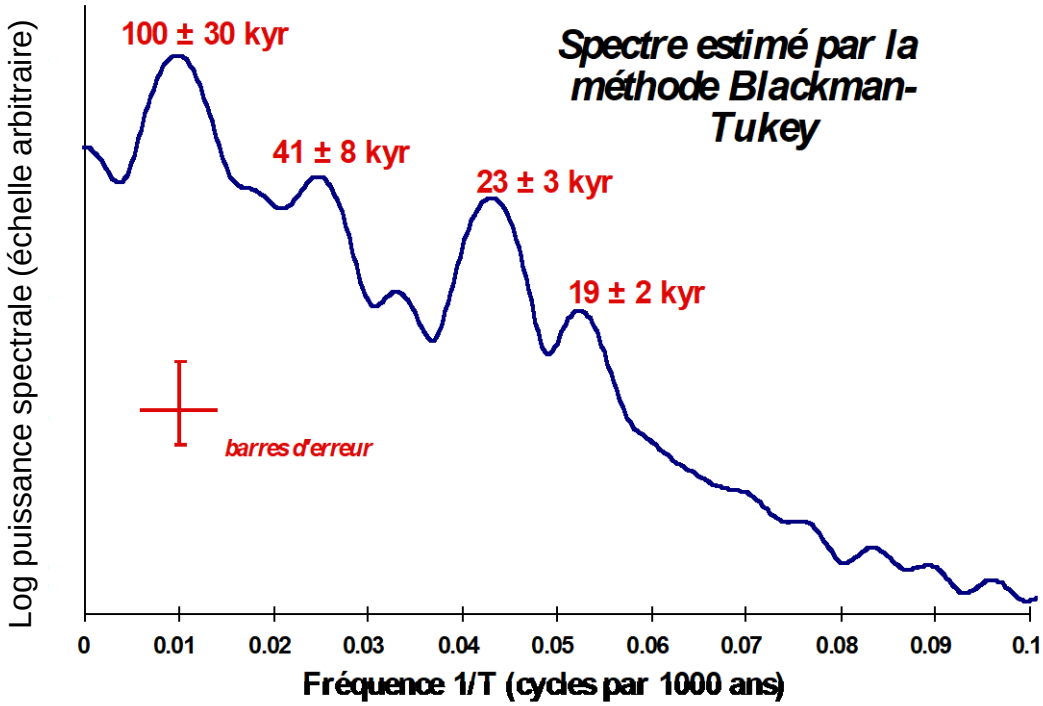


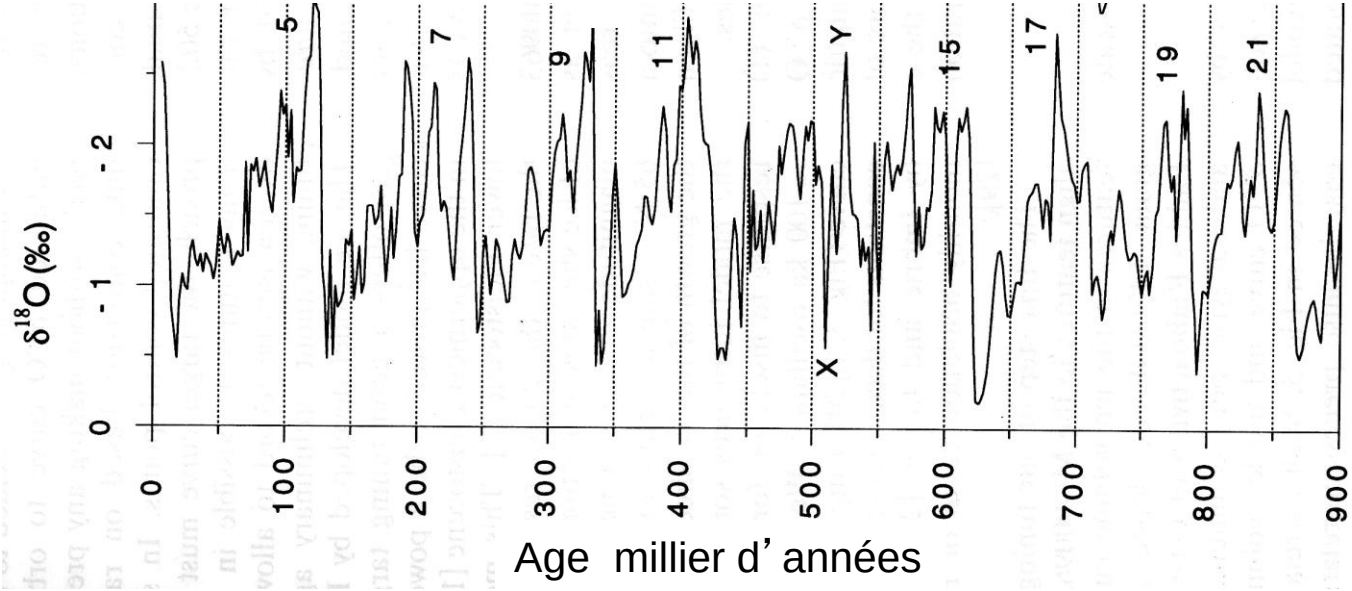






La théorie astronomique des paléoclimats

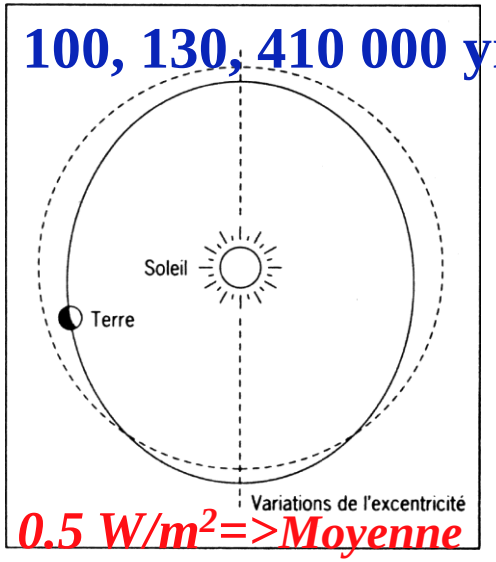




La théorie astronomique des paléoclimats

Excentricité

100, 130, 410 000 yrs

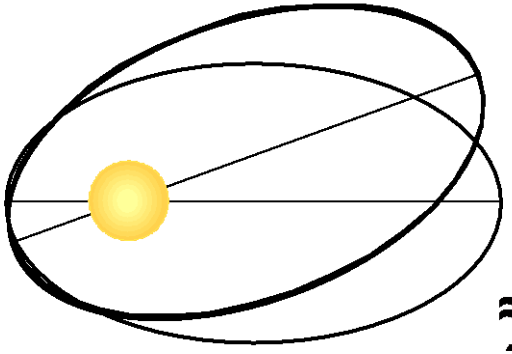


0.5 W/m²=>Moyenne annuelle globale

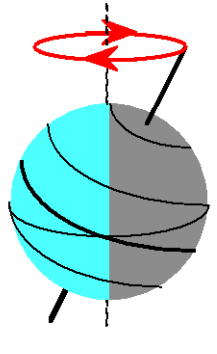


Milutin Milankovitch
1924

Précession de l'élipse



≈ 135 000

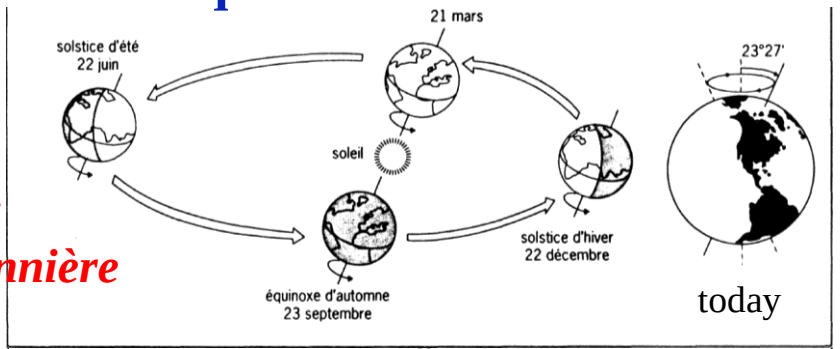


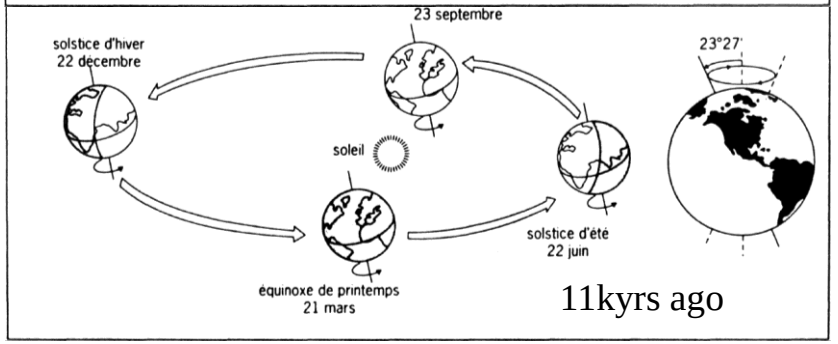
≈ 25 700

de l'axe

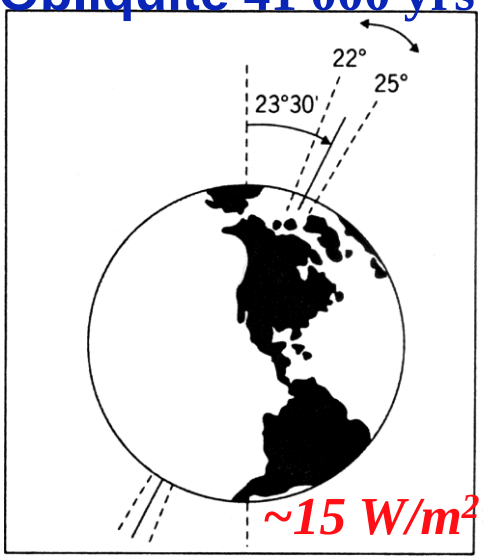
Précession climatique: ~19 et 23 000 ans

~100 W/m²=> Moyenne saisonnière locale

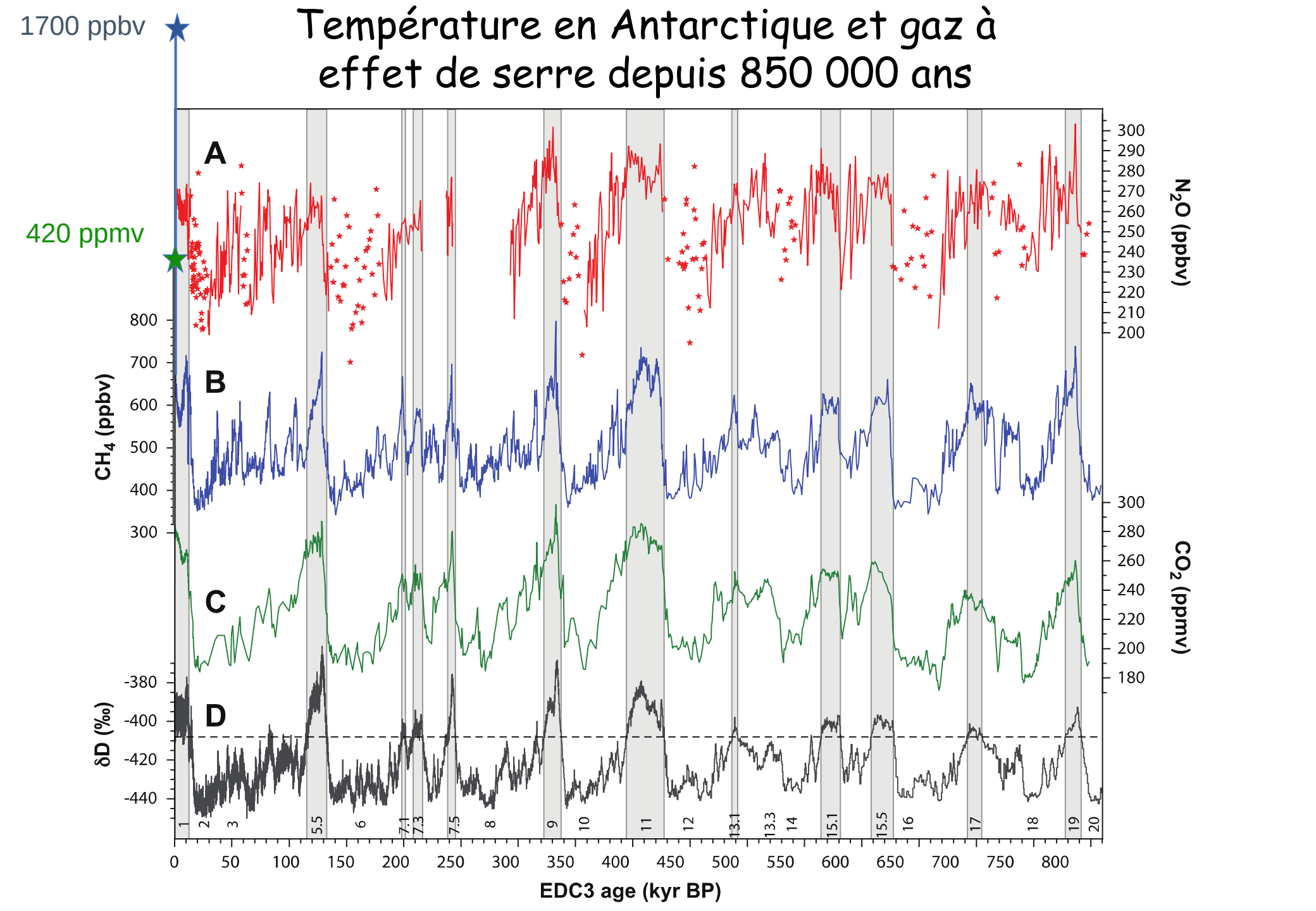




Obliquité 41 000 yrs

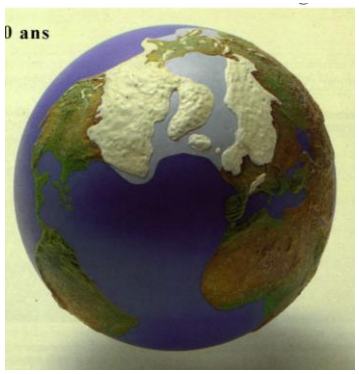


~15 W/m²=> Moyenne annuelle locale


Température en Antarctique et gaz à effet de serre depuis 850 000 ans
1700 ppbv
420 ppmv
A
B
C
D
N_2O (ppbv)
CH_4 (ppbv)
CO_2 (ppmv)
δD (‰)
EDC3 age (kyr BP)
0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800
300 290 280 270 260 250 240 230 220 210 200
800 700 600 500 400 300
300 280 260 240 220 200 180
-380 -400 -420 -440
1 2 3 5.5 6 7.1 7.3 7.5 8 9 10 11 12 13.1 13.3 14 15.1 15.5 16 17 18 19 20

Evènements abrupts (10 -1000 ans)





Insolation Juin, 65° N

W/m2

580
540
500
460

MD 95-2042 *G. bulloides* $\delta^{18}O$ N. Atl. (37° 48' N, 10° 10' W, 3146 m)

G. bulloides δ18, ‰ PDB

0.5
1.5
2.5
3.5
4.5
5.5

GRIP ice $\delta^{18}O$

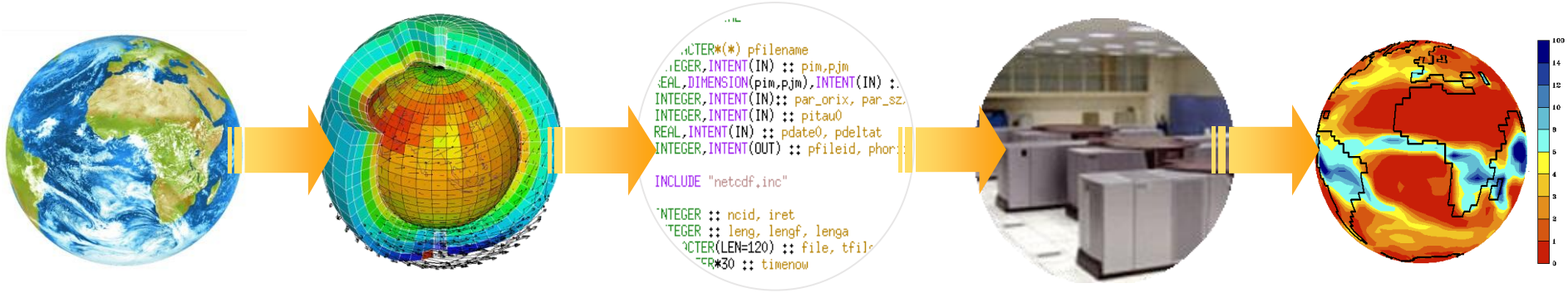
GRIP ice δ18, ‰ SMOW

-25
-30
-35
-40
-45

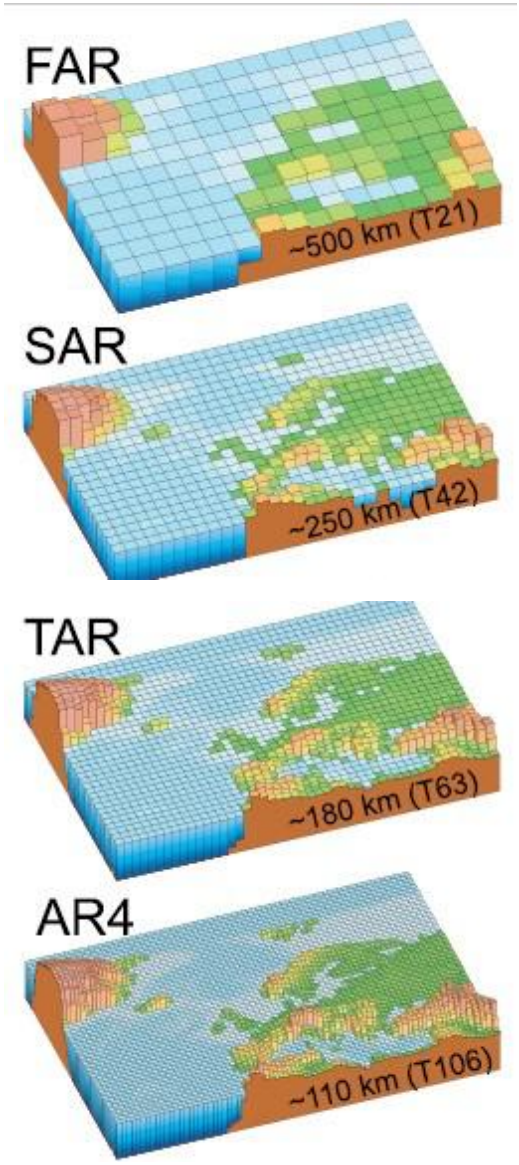
5 15 25 35 45 55 65 75 85 95

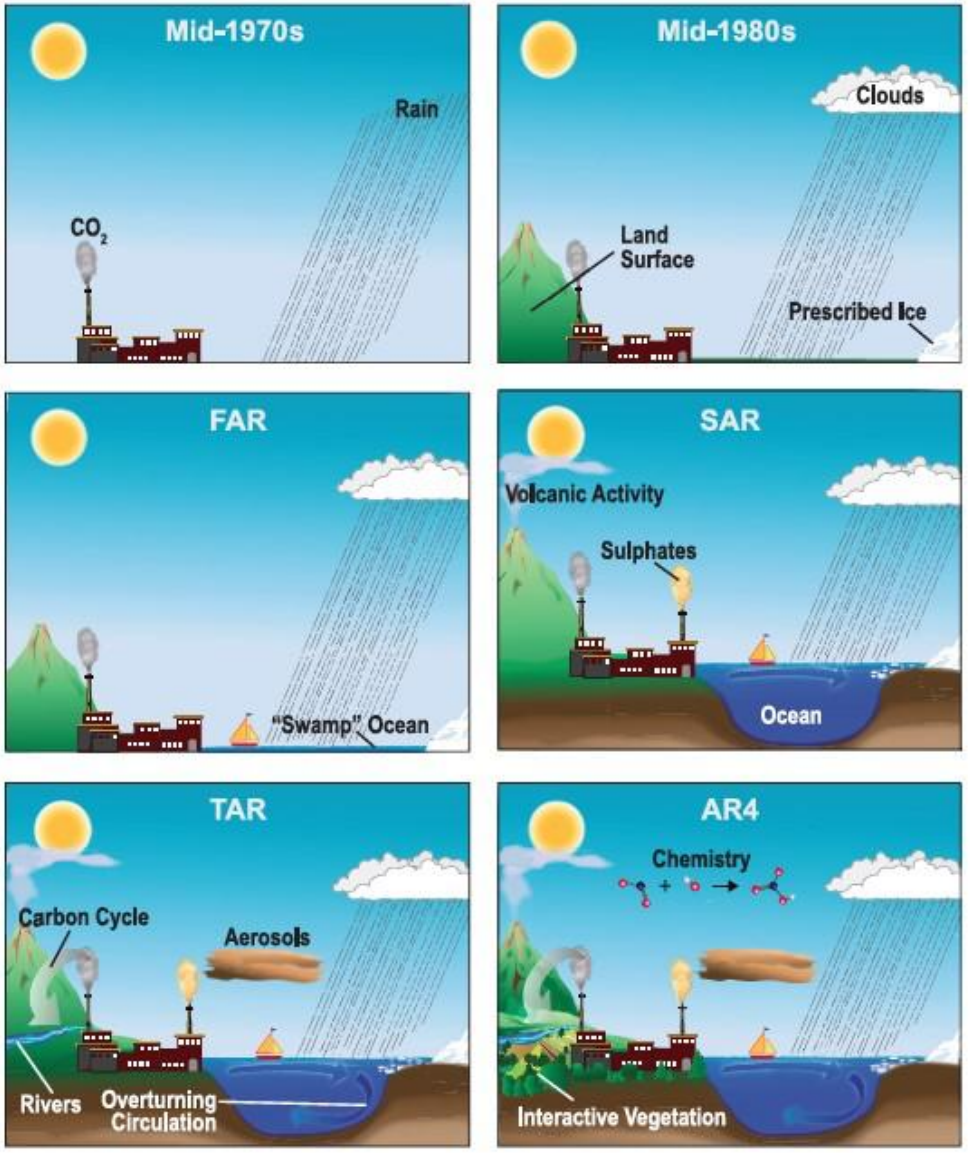
GRIP age, ka

Qu'est ce qu'un modèle climatique?



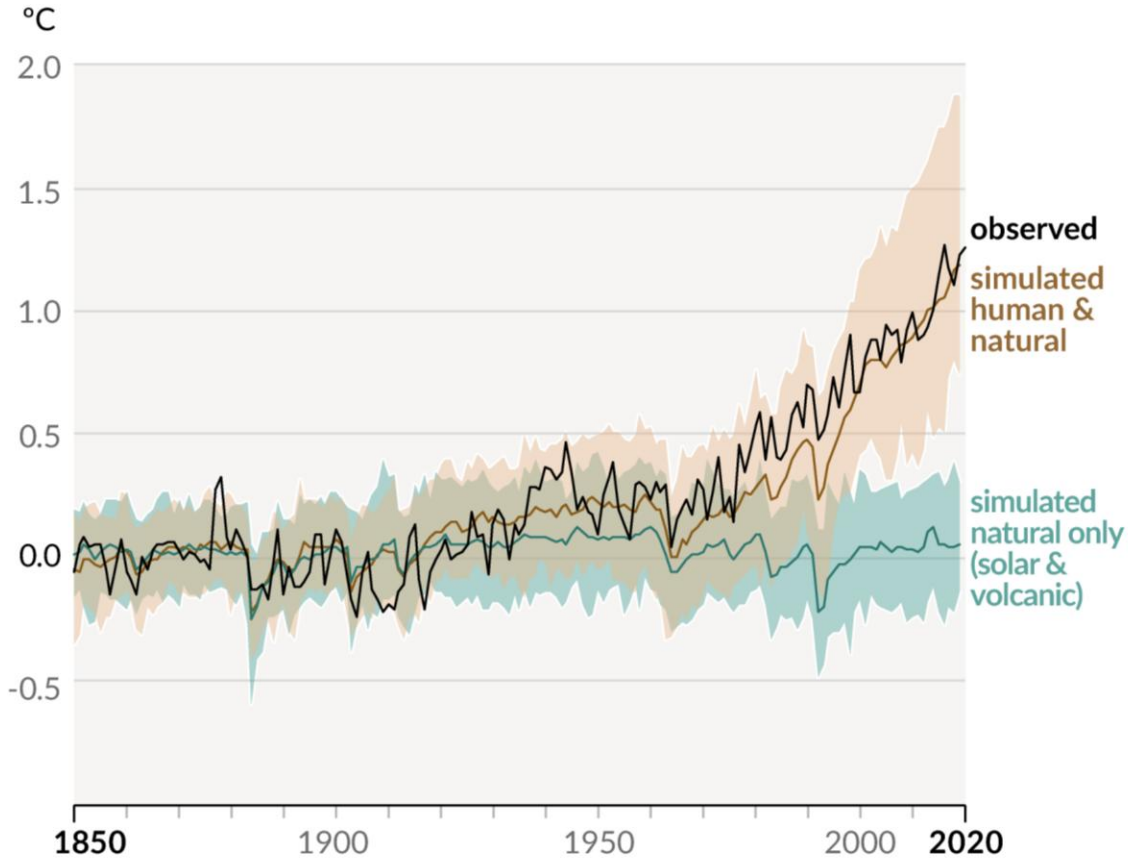
Des modèles de plus en plus précis et complexes





IPCC AR4 WG1

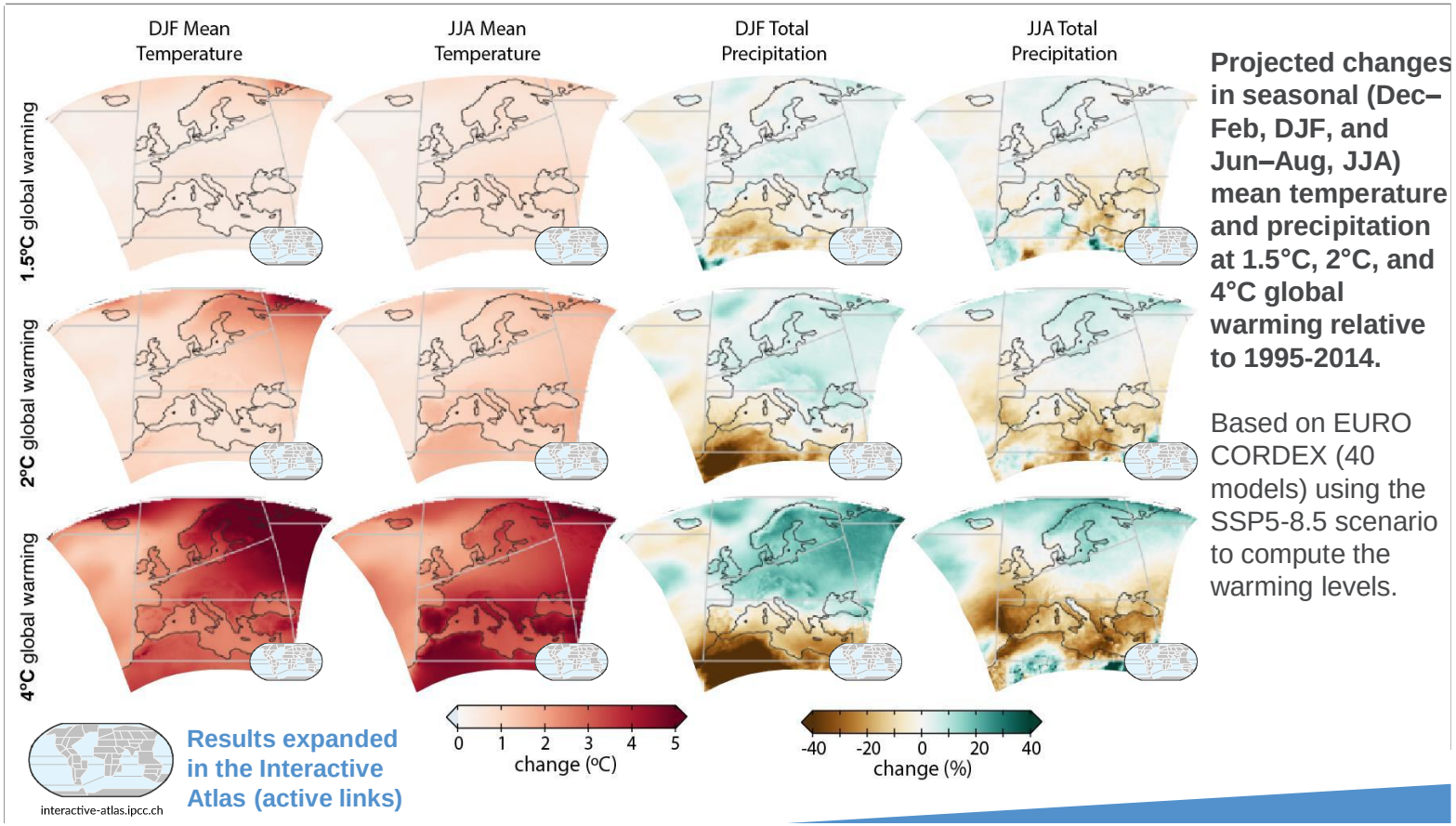
qui reproduisent correctement le changement observé à l'échelle globale



IPCC AR6 WG1

Quel futur ? Scénarios du GIEC

AR6: Des cartes régionales avec des atlas interactifs

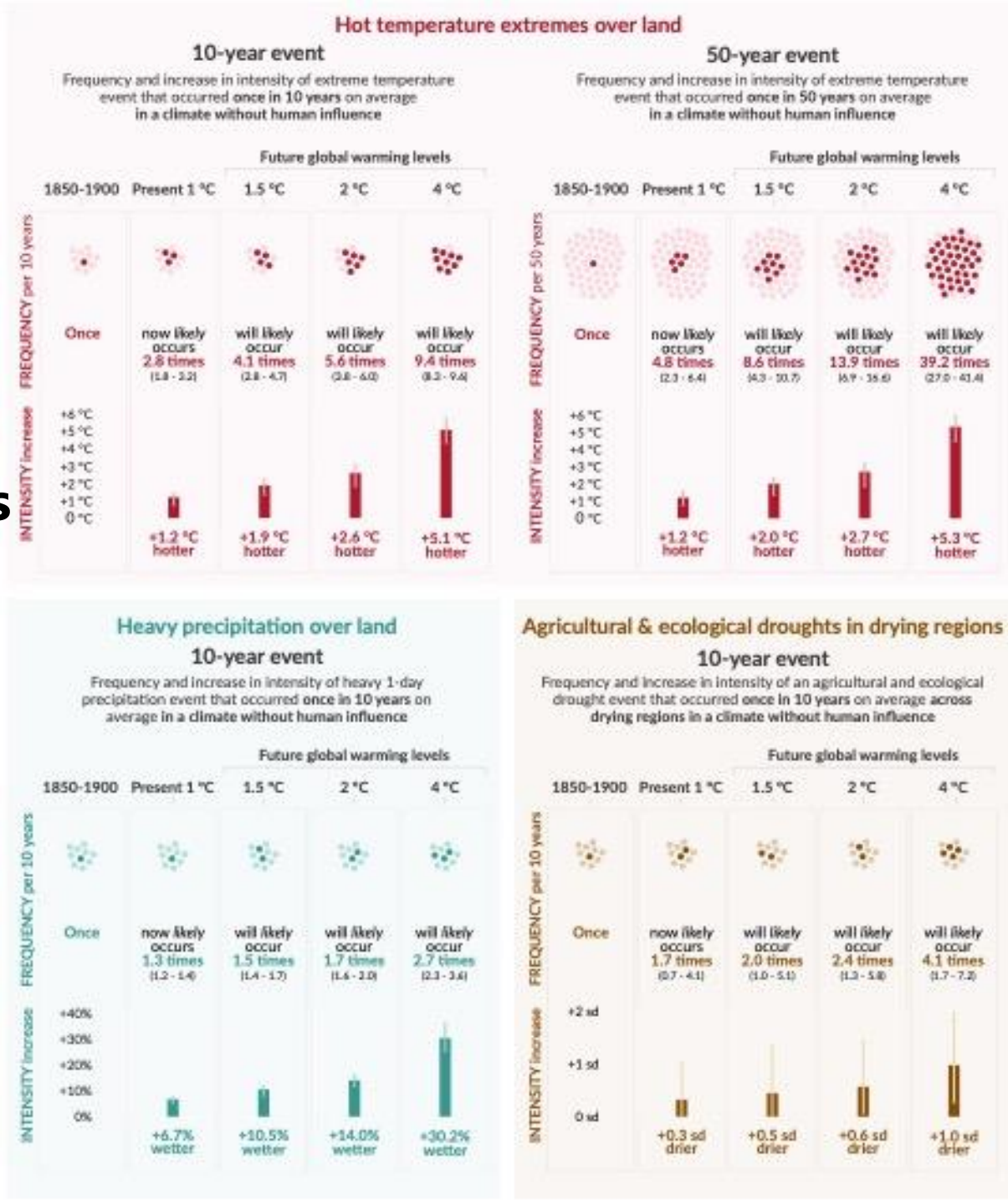


Projected changes in seasonal (Dec–Feb, DJF, and Jun–Aug, JJA) mean temperature and precipitation at 1.5°C, 2°C, and 4°C global warming relative to 1995-2014.

Based on EURO CORDEX (40 models) using the SSP5-8.5 scenario to compute the warming levels.

IPCC AR6 WG1

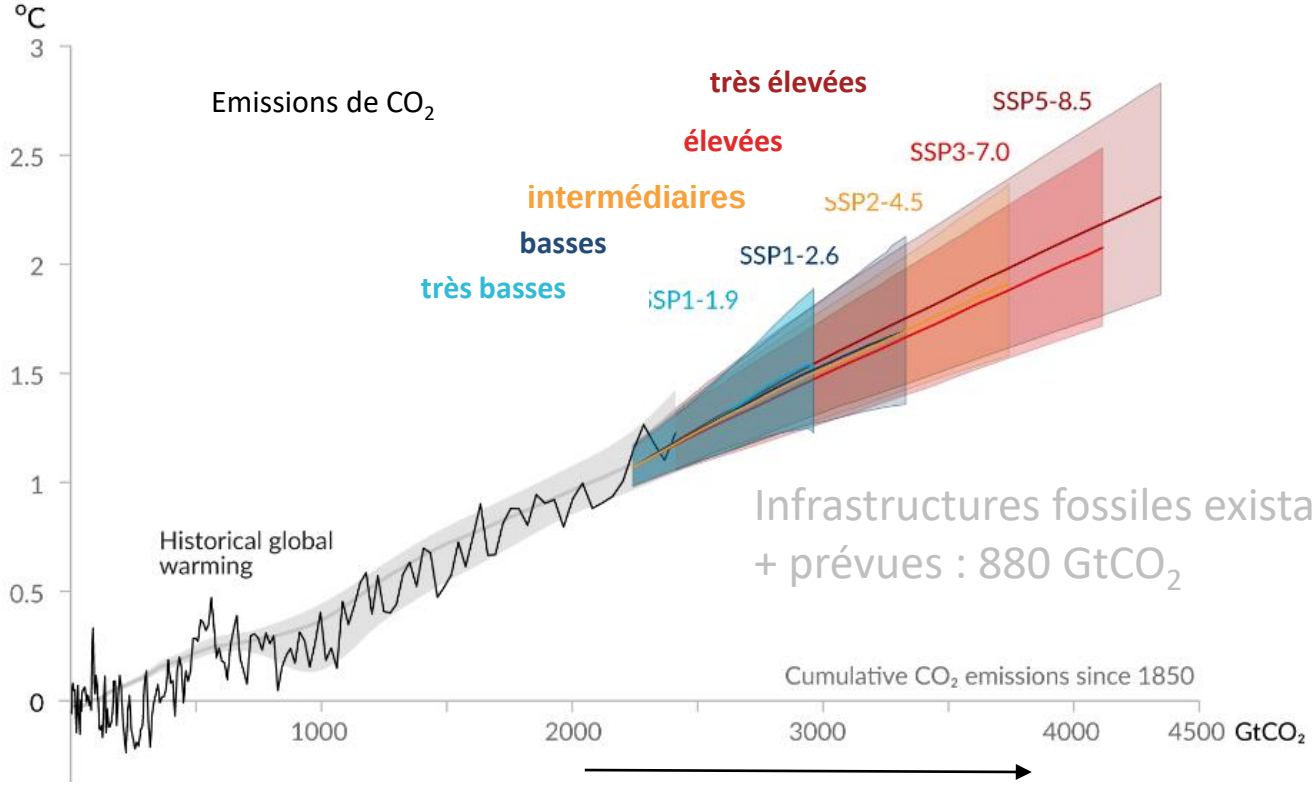
La fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes augmentent avec chaque augmentation supplémentaire du réchauffement climatique.



IPCC AR6 WG1

Chaque tonne d'émissions de CO_2 contribue au réchauffement planétaire

Hausse de la température



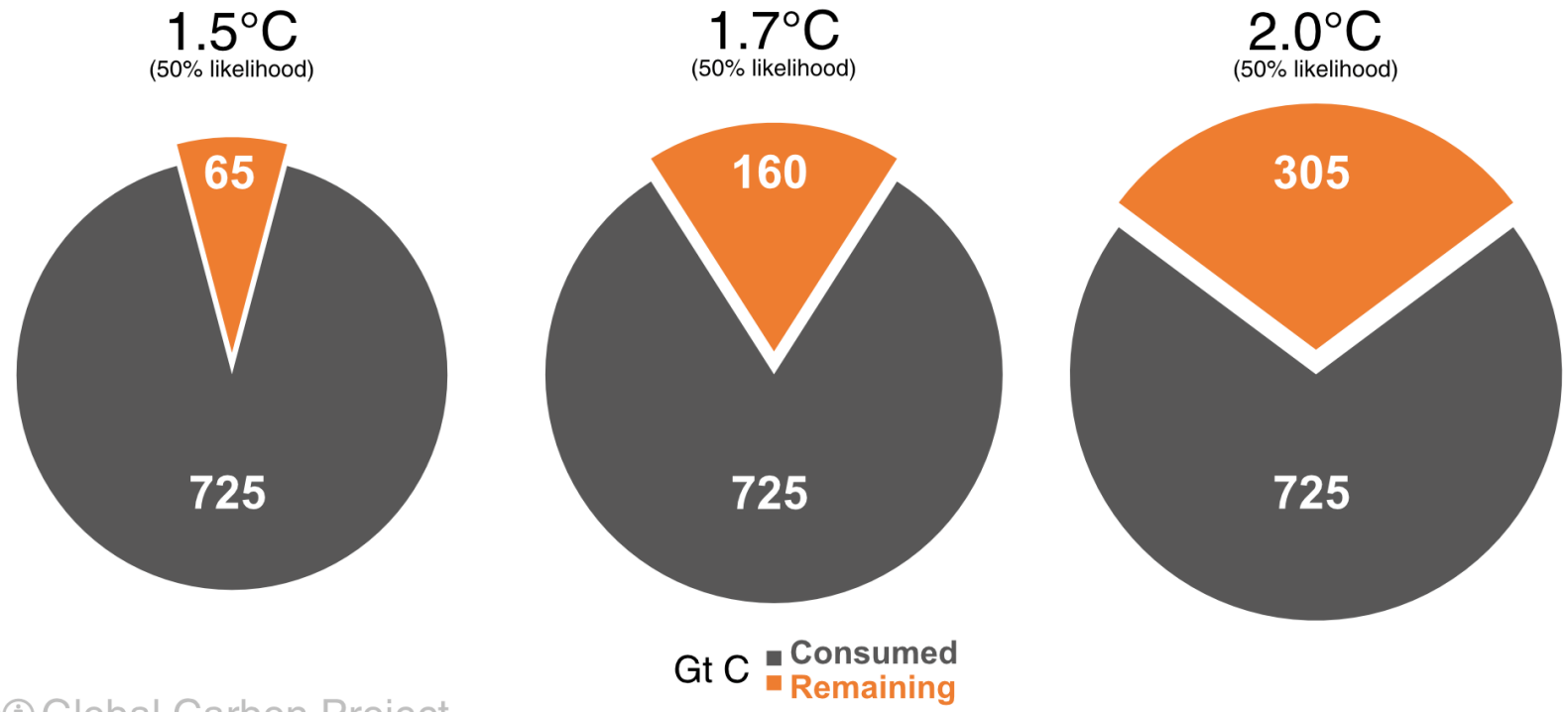
Infrastructures fossiles existantes : 660 $GtCO_2$
+ prévues : 880 $GtCO_2$

Emissions cumulées de CO_2 depuis 1850

IPCC AR6 WG1

Remaining carbon budget

The remaining carbon budgets to limit global warming to 1.5°C , 1.7°C and 2°C are 65 GtC (*238 $GtCO_2$*), 160 GtC (*586 $GtCO_2$*), and 305 GtC (*1118 $GtCO_2$*) respectively, equivalent to 6, 14 and 27 years from 2025.
725 (*2656 $GtCO_2$*) have been emitted since 1850



The remaining carbon budgets are the average of two estimates (IPCC AR6 and Forster et al., 2023), both updated by removing the most recent emissions.
Quantities are subject to additional uncertainties e.g., future mitigation choices of non-CO_2 emissions
Source: IPCC AR6 WG1; Forster et al., 2023; Friedlingstein et al 2024; Global Carbon Project 2024