



Climat et changement climatique : le point de vue d'une enseignante-chercheuse en physique



Catherine Even

Université Paris Saclay

Ecoclim 2023, 12/06/2023

Plan du cours du M1 énergie-matériaux : « le climat, un défi sociétal »

Chapitre I : le climat, comment ça marche?

Chapitre II : le réchauffement climatique actuel

Chapitre III : comment résoudre la crise climatique?

Plan de ce cours (Ecoclim 2023)

1. Le climat global à un moment donné
2. Les climats du passé
3. Le changement climatique

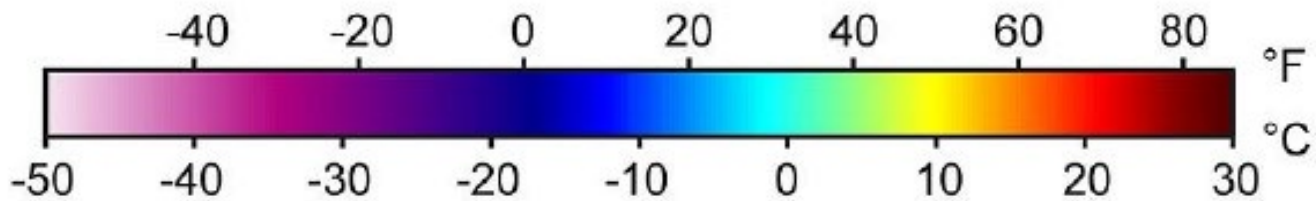
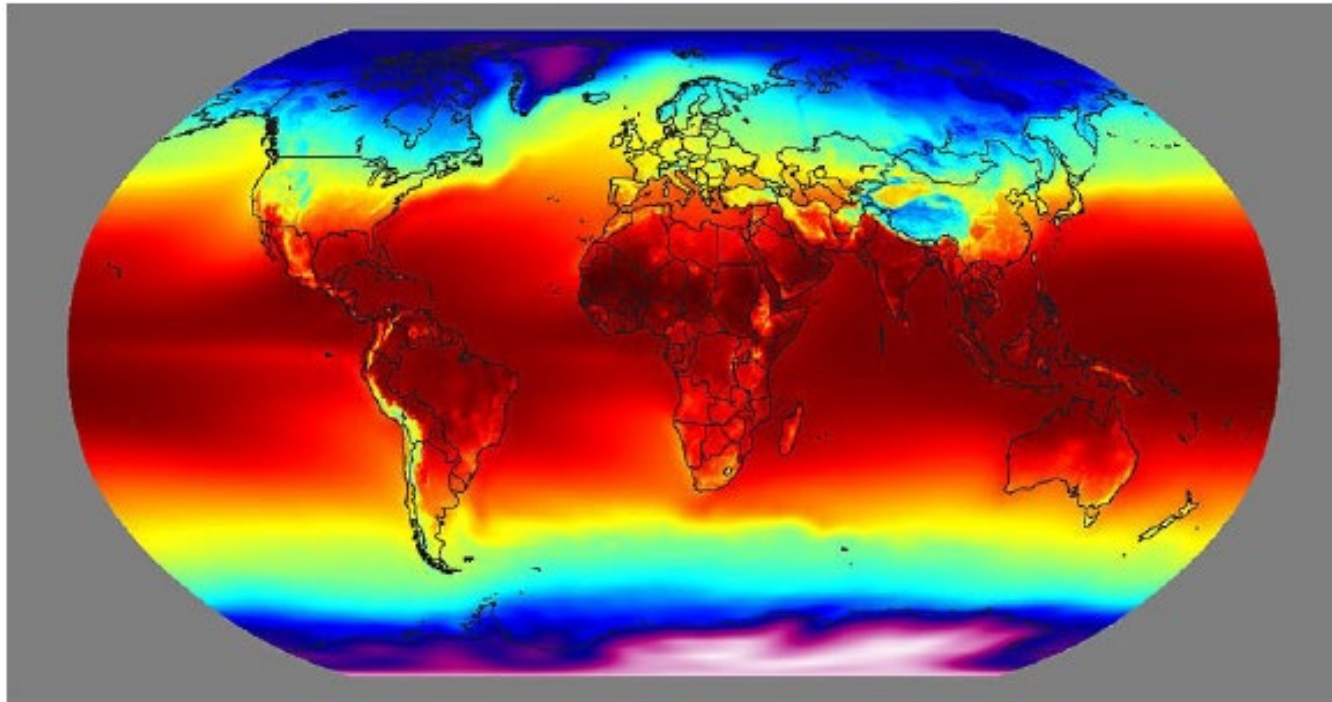
Plan de ce cours (Ecoclim 2023)

1. Le climat global à un moment donné
2. Les climats du passé
3. Le changement climatique observé

Bibliographie de la partie 1

- F.W. Taylor, *Elementary climate physics*
- M-A Mélières et C. Maréchal, *Climats*
- R. Delmas, G. Mégie et V-H Peuch, *Physique et chimie de l'atmosphère*
- Cours de G. Roux, Magistère de Physique d'Orsay
- Cours de G. Blanc, *Physique et société*, Université Paris-Cité
- Peixoto et Oort, Rev Mod Phys. 56, p. 365 (1984)
- J-L Dufresne et J. Treiner, La Météorologie n°72 (2011)
- <http://planet-terre.ens-lyon.fr>

Température moyenne et latitude



Annual Mean Temperature

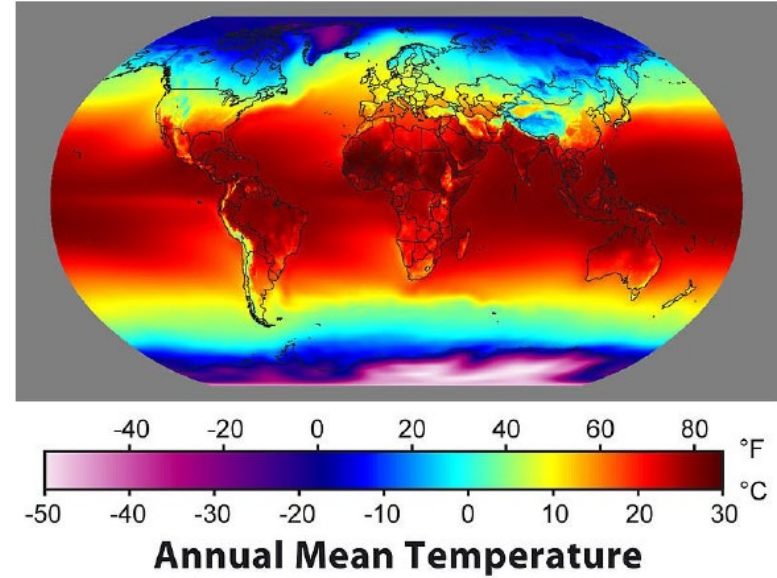
Des différents climats vers le « climat global »

Température moyenne annuelle

→ moyennée sur le globe

→ « température globale »

Elle vaut aujourd'hui $+15^{\circ}\text{C}$.



Le Soleil : source d'énergie de la Terre

Rayonnement électromagnétique reçu du Soleil (principalement visible et IR)	$1,7 \cdot 10^{17} \text{ W}$
Géothermie (radioactivités à période longue : ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K)	$\sim 4,4 \cdot 10^{13} \text{ W}$
Civilisation en 2010 ($\sim 10^9$ humains consommant 10 t de pétrole/an)	$1,6 \cdot 10^{13} \text{ W}$
Énergie rotative dissipée par les marées	$2,8 \cdot 10^{12} \text{ W}$
Vent solaire (pour « cible magnétosphérique » de $25 R_{\text{Terre}} \sim 10^{14} \text{ W}$)	$\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ W}$
Rayonnement du fond cosmologique (corps noir* à 2,7 K)	$1,6 \cdot 10^9 \text{ W}$
Rayonnement électromagnétique reçu des étoiles (visible, IR)	$\sim 1,3 \cdot 10^9 \text{ W}$
Rayonnement cosmique (protons, alphas...)	$9 \cdot 10^8 \text{ W}$
Météorites ($\sim 30\,000$ tonnes par an, supposant $v_{\text{impact}} \simeq 20 \text{ km/s}$)	$\sim 2 \cdot 10^8 \text{ W}$

Energie solaire : plus de 1000 fois les autres sources d'énergie

Le rayonnement du corps noir

- Rayonnement : un des modes de transfert de la chaleur
- Tout corps à une certaine température émet un rayonnement électromagnétique → modèle du corps noir
- Corps noir à l'équilibre (température constante): absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, et la réémet

Les lois du corps noir

- Loi de Planck :

$$\frac{d^2P}{dSd\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}$$

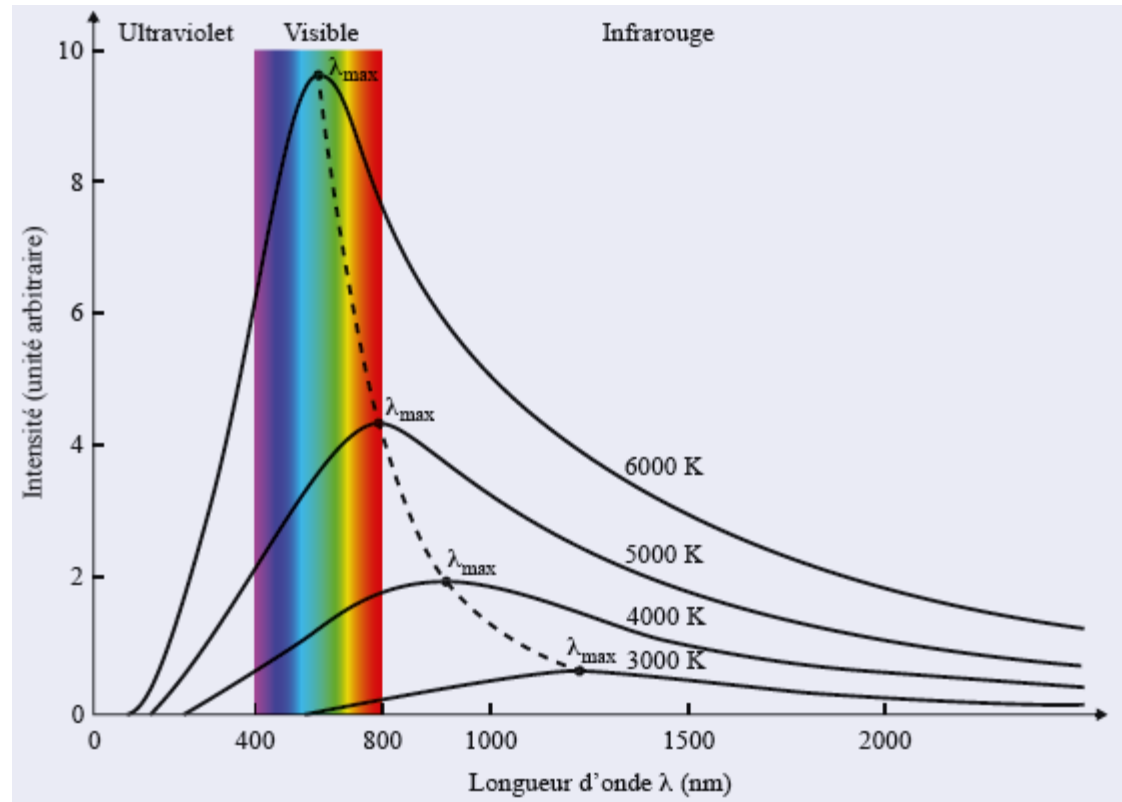
- Loi de Stefan-Boltzmann :

$$\frac{dP}{dS} = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

- Loi de Wien :

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



Les corps réels

On corrige la loi de Stefan-Boltzmann par l'émissivité $\varepsilon(\lambda, T)$

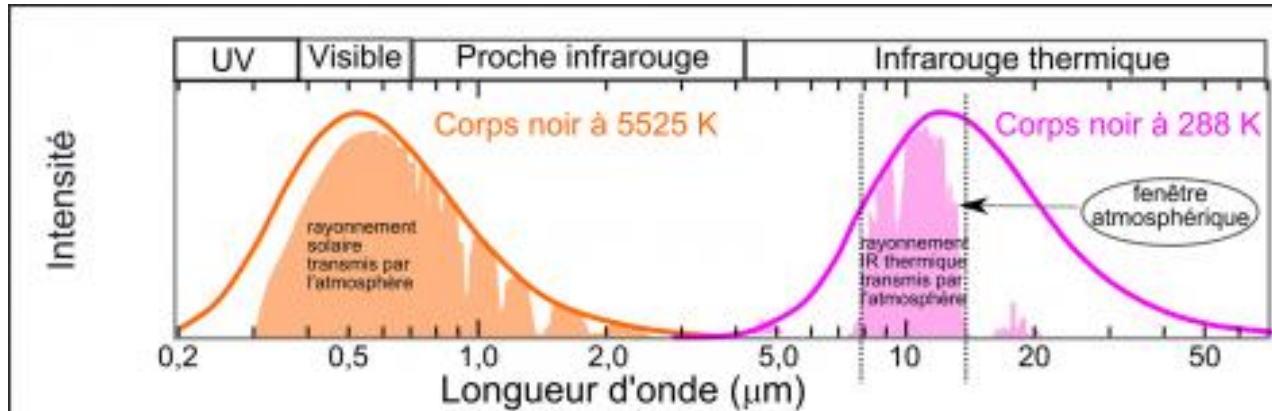
Corps gris : $\varepsilon = \text{constante}$

On a alors :
$$\frac{dP}{dS} = \varepsilon \sigma T^4$$

Pour un corps à l'équilibre thermique, émissivité = coefficient d'absorption

Matériau	Emissivité ε
Aluminium	0.02
Cuivre poli	0.03
Nuages type cirrus	0.10 à 0.90
Nuages type cumulus	0.25 à 0.99
Cuivre oxydé	0.5
Béton	0.7 à 0.9
Carbone	0.8
Lave (volcan actif)	0.8
Neige âgée	0.8
Ville	0.85
Désert	0.85 à 0.9
Peinture blanche	0.87
Brique rouge	0.9
Herbe	0.9 à 0.95
Eau	0.92 à 0.97
Peinture noire	0.94
Forêt	0.95
Suie	0.95
Neige fraîche	0.99

Le Soleil et la Terre



Soleil : émet essentiellement dans le visible

Terre : émet essentiellement dans l'infra-rouge

La constante solaire

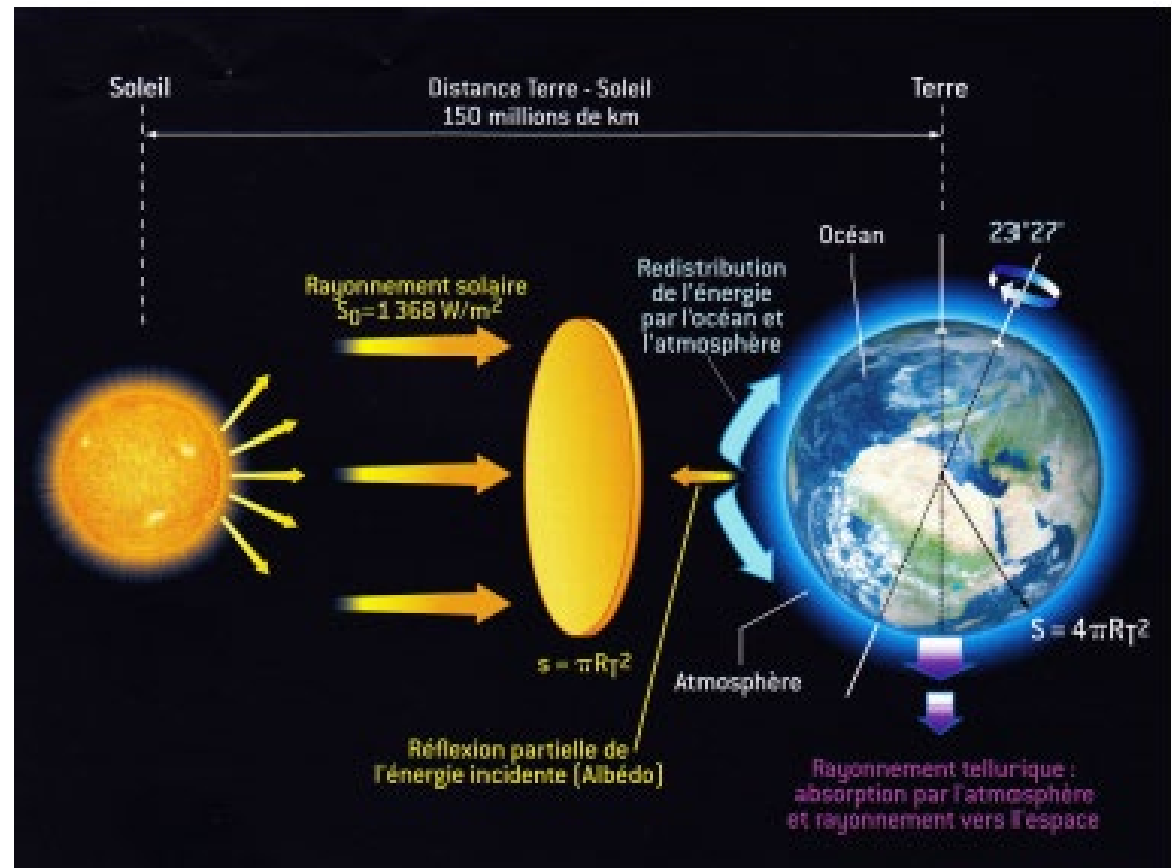
Constante solaire : puissance par unité de surface reçue de la part du Soleil, à la distance Terre-Soleil, perpendiculaire à la ligne Soleil-Terre

$$I_0 = 1368 \text{ W.m}^{-2}$$

Puissance reçue :

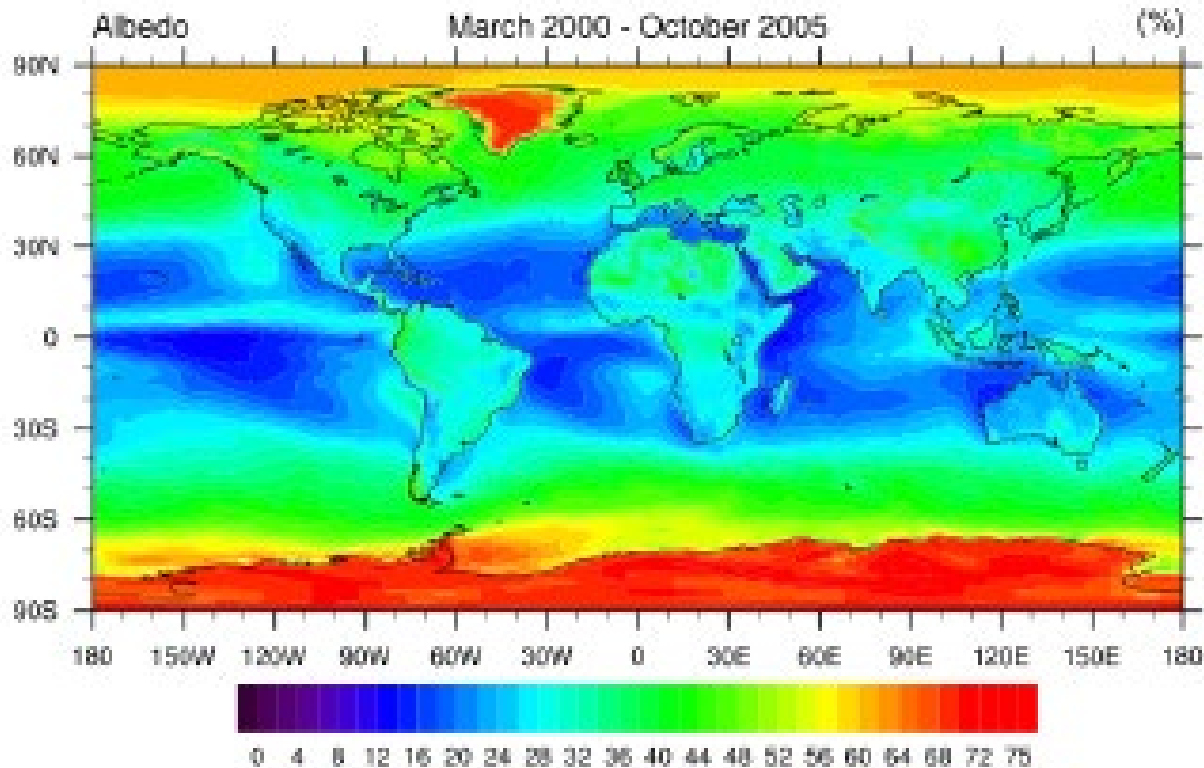
$$\pi R_T^2 I_0$$

calcul : **exercice**



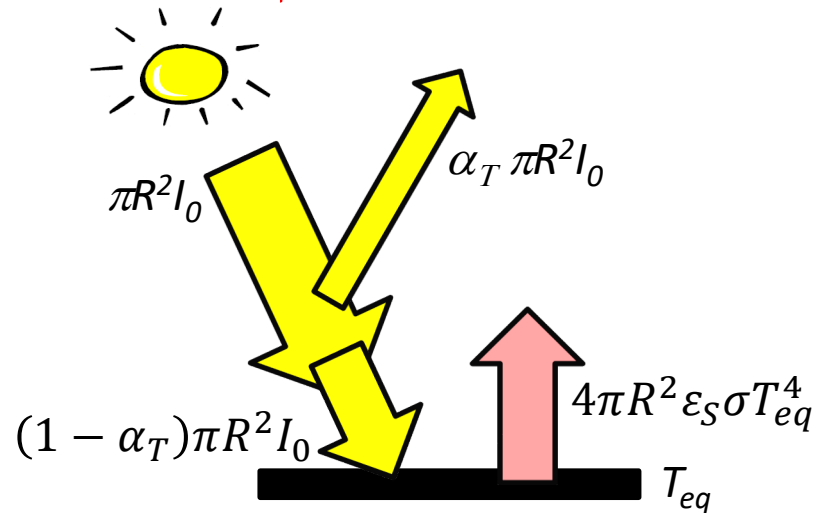
La notion d'albédo

- Albédo : fraction de puissance réfléchiée par la planète
- Albédo de la Terre : $\alpha_T = 0.3$ en moyenne



Type	albédo A
Surface de lac	0.02 à 0.04
Surface de la mer	0.05 à 0.15
Asphalte	0.07
Mer calme (soleil au zénith)	0.10
Forêt équatoriale	0.10
Roches sombres, humus	0.10 à 0.15
Ville	0.10 à 0.30
Forêt de conifères	0.12
Cultures	0.15 à 0.25
Végétation basse, verte	0.17
Béton	0.20
Sable mouillé	0.25
Végétation sèche	0.25
Sable léger et sec	0.25 à 0.45
Forêt avec neige au sol	0.25
Glace	0.30 à 0.40
Neige tassée	0.40 à 0.70
Sommet de certains nuages	0.70
Neige fraîche	0.75 à 0.95

Equilibre radiatif de la Terre sans atmosphère et avec albédo **(peut être fait en exercice)**



A la surface à l'équilibre thermique : Puissance reçue = puissance émise

$$(1 - \alpha_T)\pi R^2 I_0 = 4\pi R^2 \epsilon_S \sigma T_{eq}^4$$

$$T_{eq} = \left[\frac{(1 - \alpha_T) I_0}{4\epsilon_S \sigma} \right]^{\frac{1}{4}}$$

A.N. avec $\epsilon_S = 0.95$ (émissivité de la surface terrestre) et $\alpha_T = 0.3$,

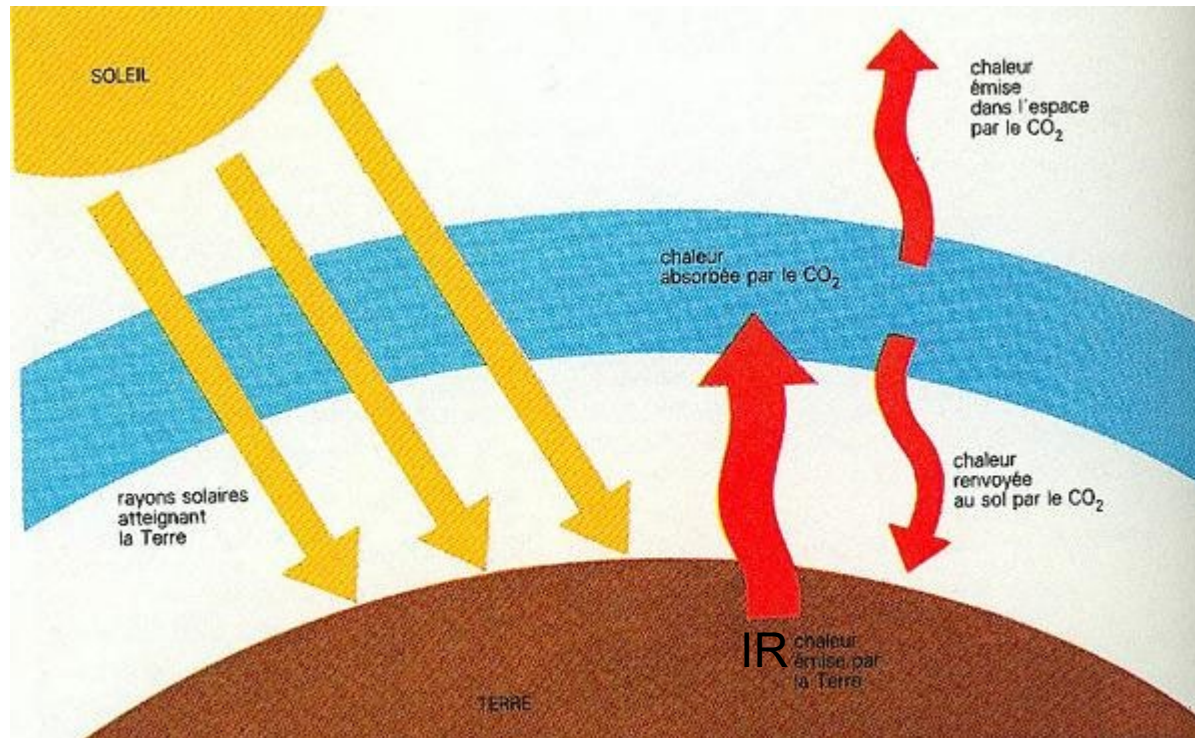
$$T_{eq} = 258K = \mathbf{-15^\circ C} !!$$

à comparer à $T_{réelle} = \mathbf{+15^\circ C} = 288K$ (30K de plus!)

Qu'est-ce que l'effet de serre?

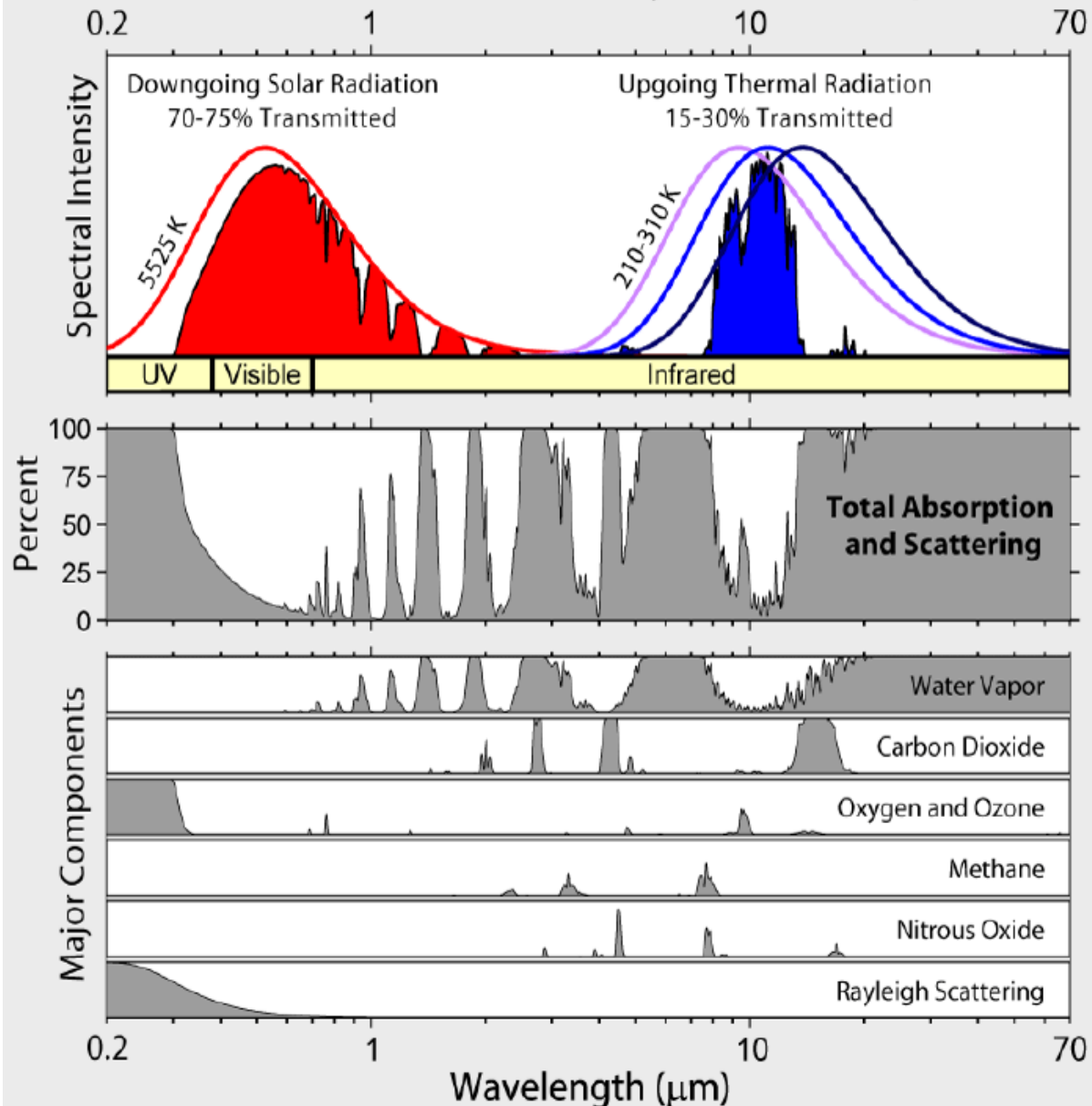
L'effet de serre est un phénomène... naturel!

Gaz à effet de serre : piègent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre



Sans effet de serre: T serait de -15°C ; avec effet de serre : $T = 15^{\circ} \text{C}$
→ l'effet de serre est **bénéfique** (rend la planète habitable)!

Radiation Transmitted by the Atmosphere



Quels sont les gaz à effet de serre?

Des gaz à l'état de **traces**, mais qui ont un effet important!

Gaz à effet de serre	Concentration préindustrielle	Concentration actuelle	PRG à 100 ans	Durée de séjour (ans)
H ₂ O	_____	0.8%	Non def.	1-2 sem.
CO ₂	280 ppm	410 ppm	1	100
CH ₄	0.7 ppm	1.8 ppm	25	12
O ₃	0.24 ppm	0.33 ppm		
N ₂ O	0.27 ppm	0.33 ppm	298	114
CCl ₂ F ₂	0	0.52 ppb	10900	100
CHClF ₂	0	0.105 ppb	1810	12
CF ₄	0	0.07 ppb	7390	50000
SF ₆	0	0.008 ppb	22800	3200

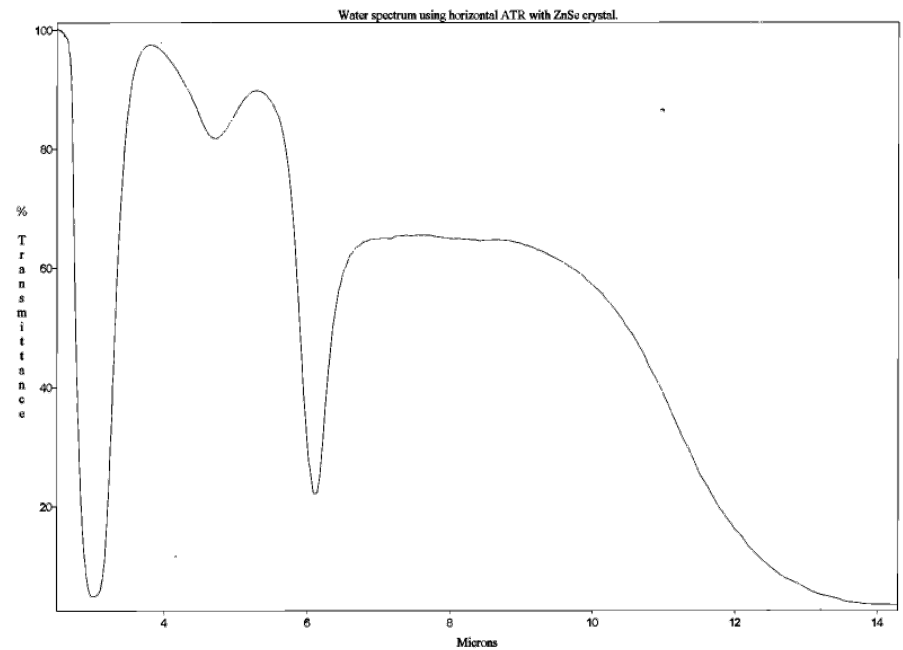
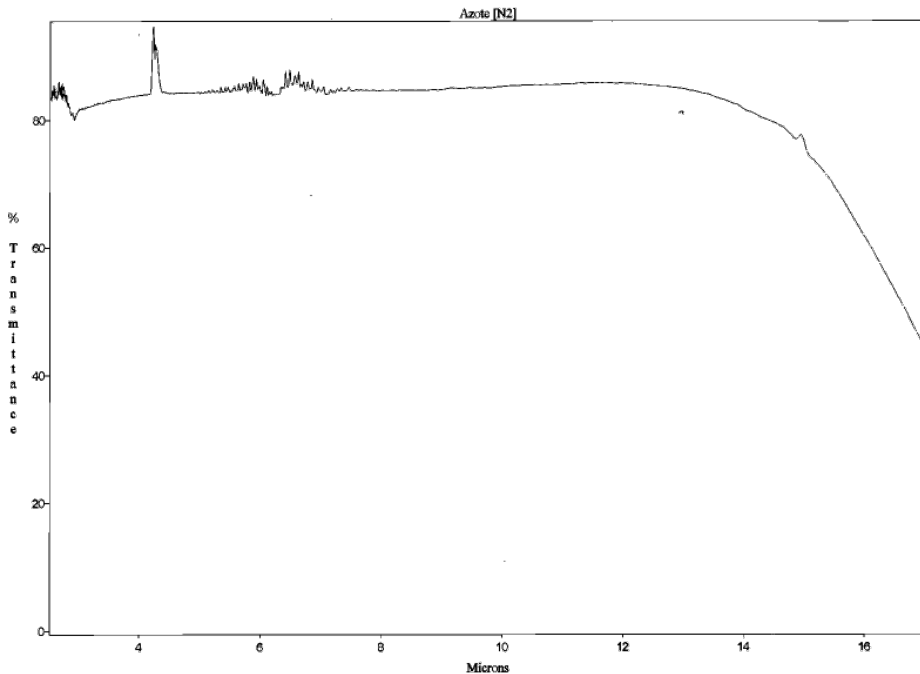
PRG : Pouvoir de réchauffement global, comparé à celui du CO₂

$$\text{PRG} = \frac{\int_0^{100 \text{ ans}} A_{\text{gaz}} C_{\text{gaz}}(t) dt}{\int_0^{100 \text{ ans}} A_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2}(t) dt}$$

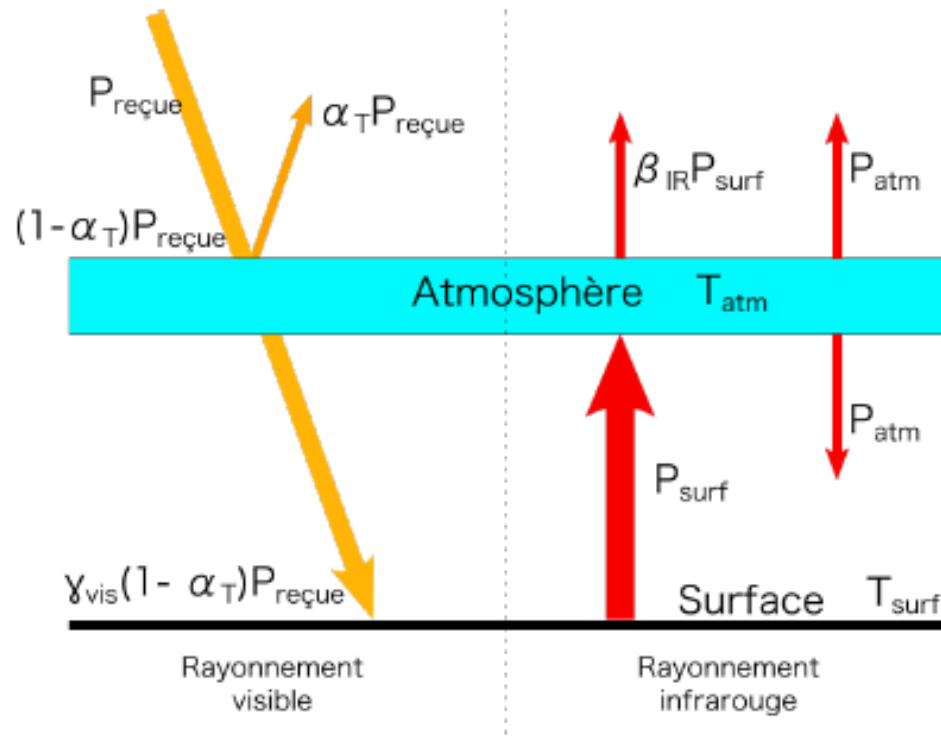
Chimie de l'effet de serre

- Photons UV : cassent les liaisons covalentes (couche d'ozone)
- Photons visibles : sont diffusés par les molécules de l'atmosphère (ciel bleu)
- Photons IR : excitent les modes de vibration ou de rotation de certaines molécules comme H₂O, CO₂, CH₄ etc mais pas N₂ et O₂

Spectres d'absorption du diazote (gauche) et de l'eau (droite) :



Modèle simplifié d'effet de serre : atmosphère isotherme à une couche (exercice)

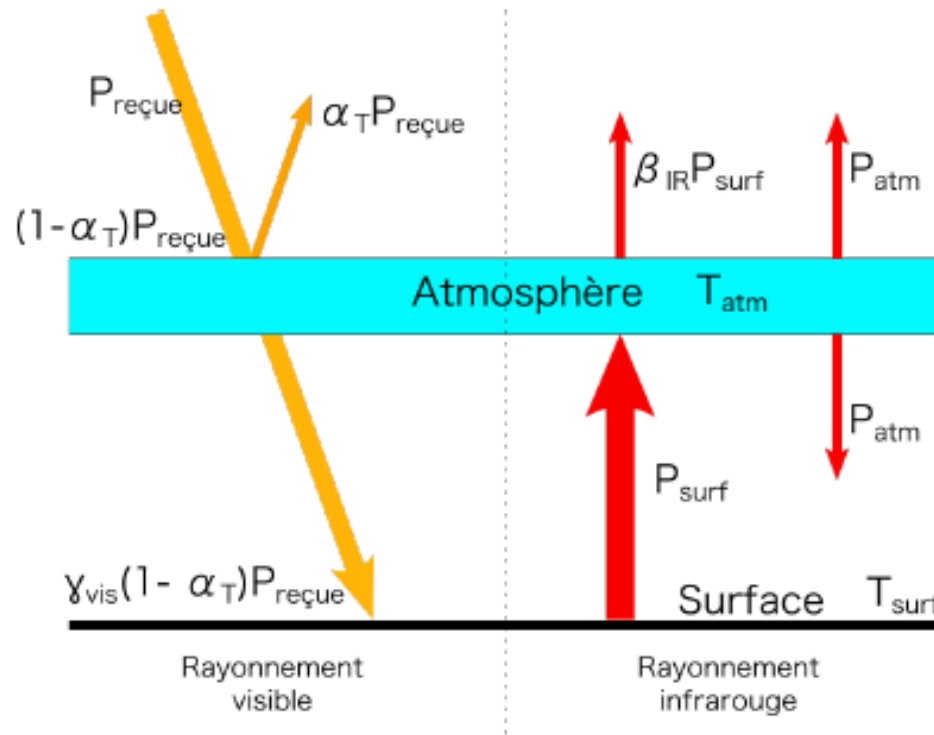


$$P_{\text{reçue}} = \pi R^2 I_0, P_{\text{atm}} = 4\pi R^2 \epsilon_{\text{IR}} \sigma T_{\text{atm}}^4 \text{ et } P_{\text{surf}} = 4\pi R^2 \epsilon_{\text{surf}} \sigma T_{\text{surf}}^4$$

$$\epsilon_{\text{IR}} = 1 - \beta_{\text{IR}}$$

β_{IR} : coeff de transmission de l'atmosphère dans l'IR
 ϵ_{IR} : émissivité = coefficient d'absorption de l'atmosphère

Bilans thermiques pour 3 sous- systèmes



- {Terre + atmosphère}: $(1 - \alpha_T)P_{reçue} = \beta_{IR}P_{surf} + P_{atm}$
- {atmosphère}: $(1 - \alpha_T)P_{reçue} + P_{surf} = \gamma_{vis}(1 - \alpha_T)P_{reçue} + \beta_{IR}P_{surf} + 2P_{atm}$
- {surface terrestre}: $\gamma_{vis}(1 - \alpha_T)P_{reçue} + P_{atm} = P_{surf}$

γ_{vis} : Coeff de transmission de l'atmosphère dans le visible

Résultat après calcul

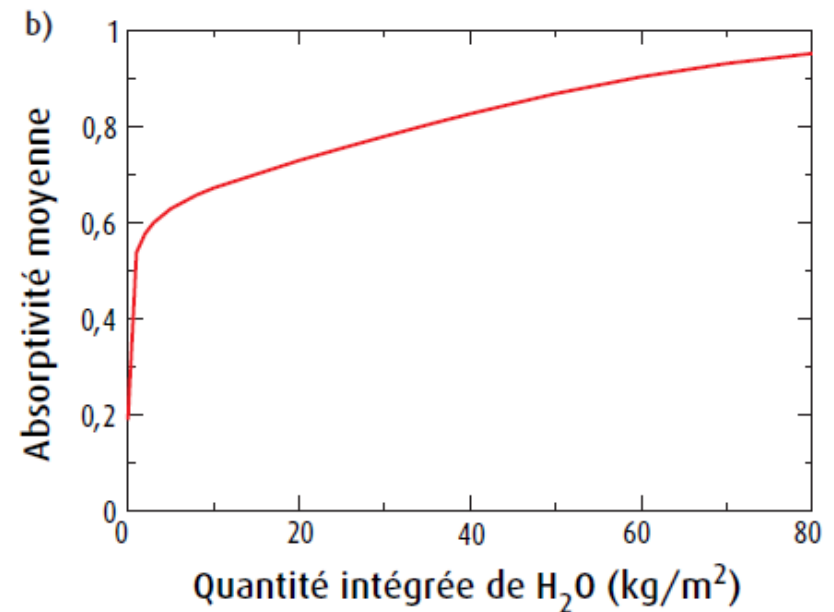
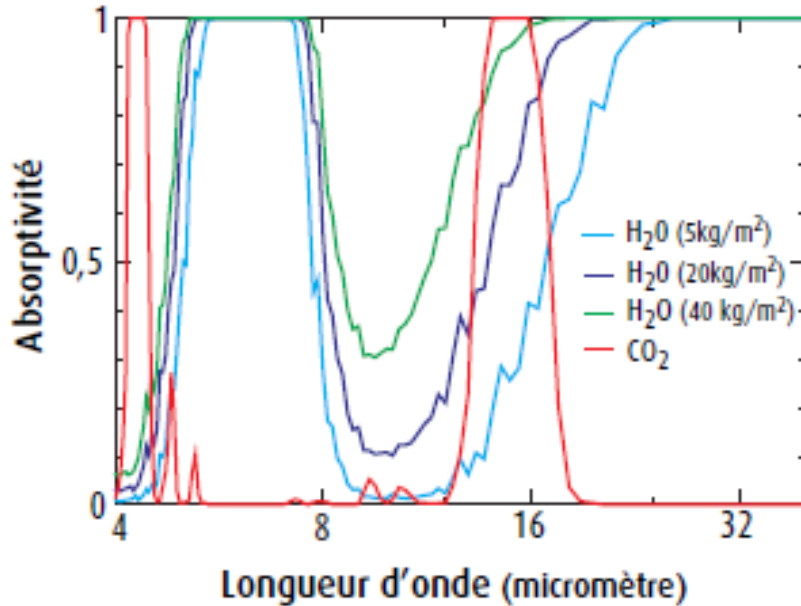
$$T_{\text{atm}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)(1 - \beta_{\text{IR}}\gamma_{\text{vis}})}{(1 - \beta_{\text{IR}}^2)} \cdot \frac{I_0}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad T_{\text{atm}} = 250 \text{ K} = -23 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{surf}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)(1 + \gamma_{\text{vis}})}{(1 + \beta_{\text{IR}})} \cdot \frac{I_0}{4\epsilon_{\text{surf}}\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad T_{\text{surf}} = 284 \text{ K} = 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{surf}} = \left(\frac{1 + \gamma_{\text{vis}}}{1 + \beta_{\text{IR}}} \right)^{1/4} T_{\text{eq}} \quad T_{\text{eq}} = \left[\frac{(1 - \alpha_T)I_0}{4\epsilon_S\sigma} \right]^{\frac{1}{4}}$$

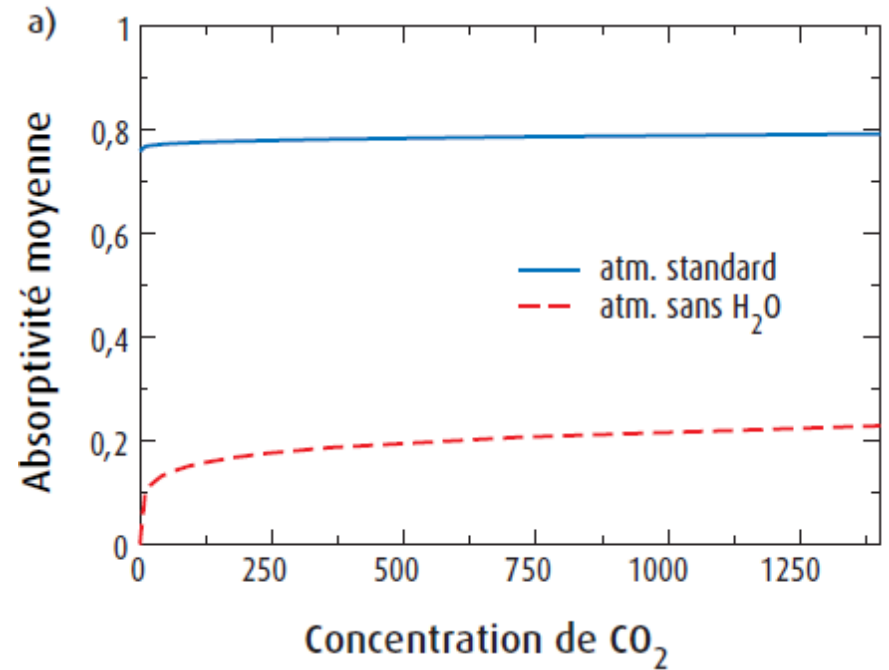
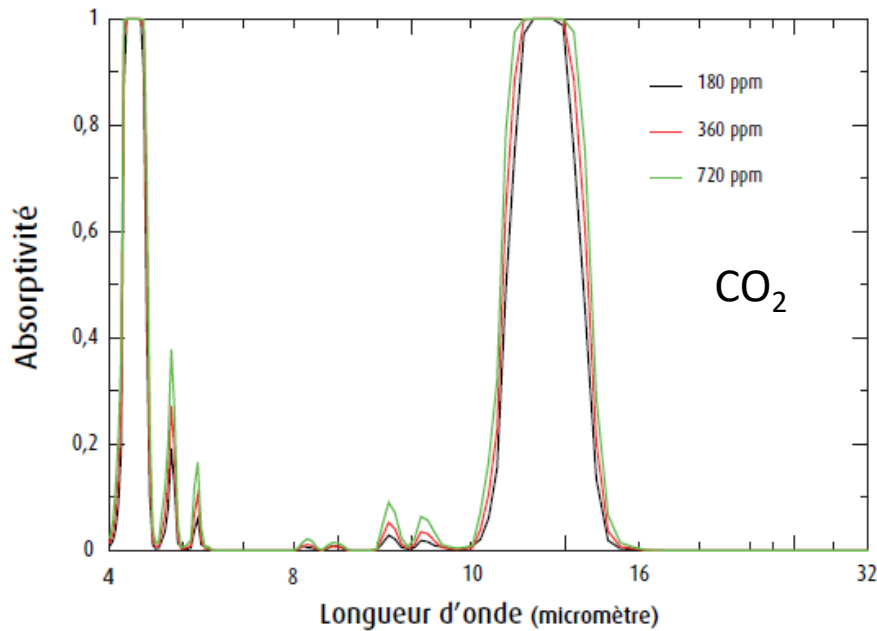
- $T_{\text{surf}} > T_{\text{eq}}$ car $\gamma_{\text{vis}} > \beta_{\text{IR}}$
- Si la concentration des gaz à effet de serre augmente, l'absorption augmente (β_{IR} diminue), et T_{surf} augmente (réchauffement climatique? Pas si simple...)
- Si α_T diminue, T_{surf} augmente
- Modèle très simplifié : il manque les pertes par conduction thermique et évapotranspiration

Cas de l'eau



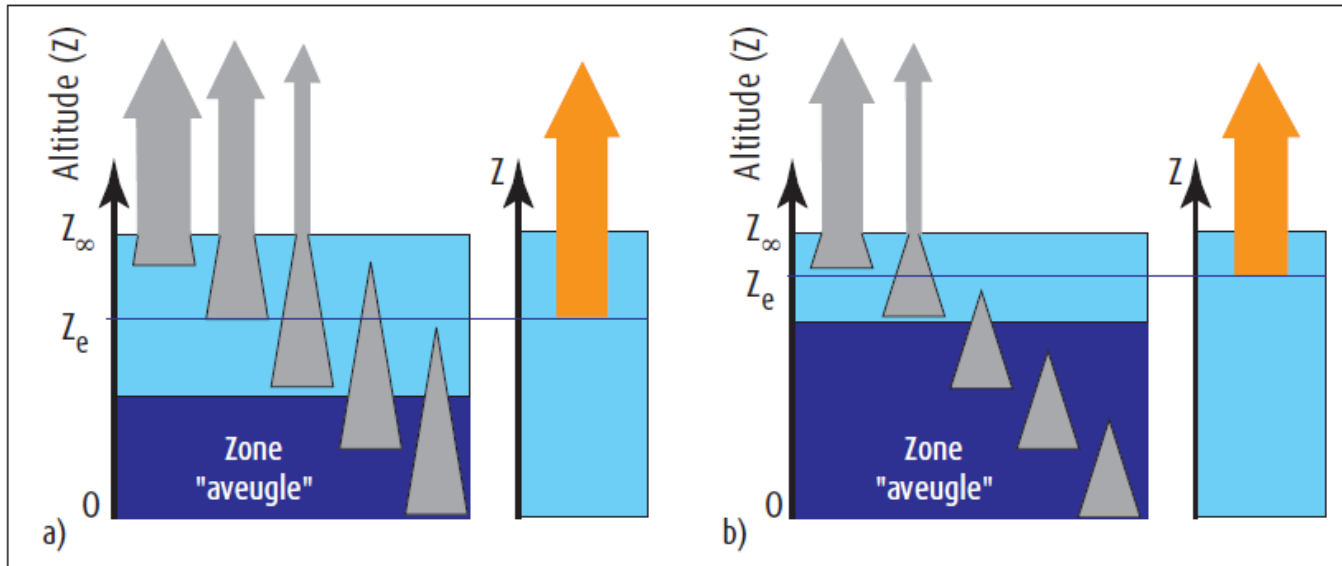
- Absorptivité : absorption du rayonnement sur toute la hauteur de l'atmosphère
- Bandes d'absorption de l'eau : essentiellement non saturées
- Modèle à une couche marche bien

Cas du CO₂ : effet de saturation



CO₂ : bandes essentiellement saturées → modèle à une couche ne marche plus

Cas du CO₂ : notion d'altitude d'émission



Si le CO₂ ↗ l'altitude moyenne d'émission Z_e ↗

CO₂ et augmentation de l'effet de serre

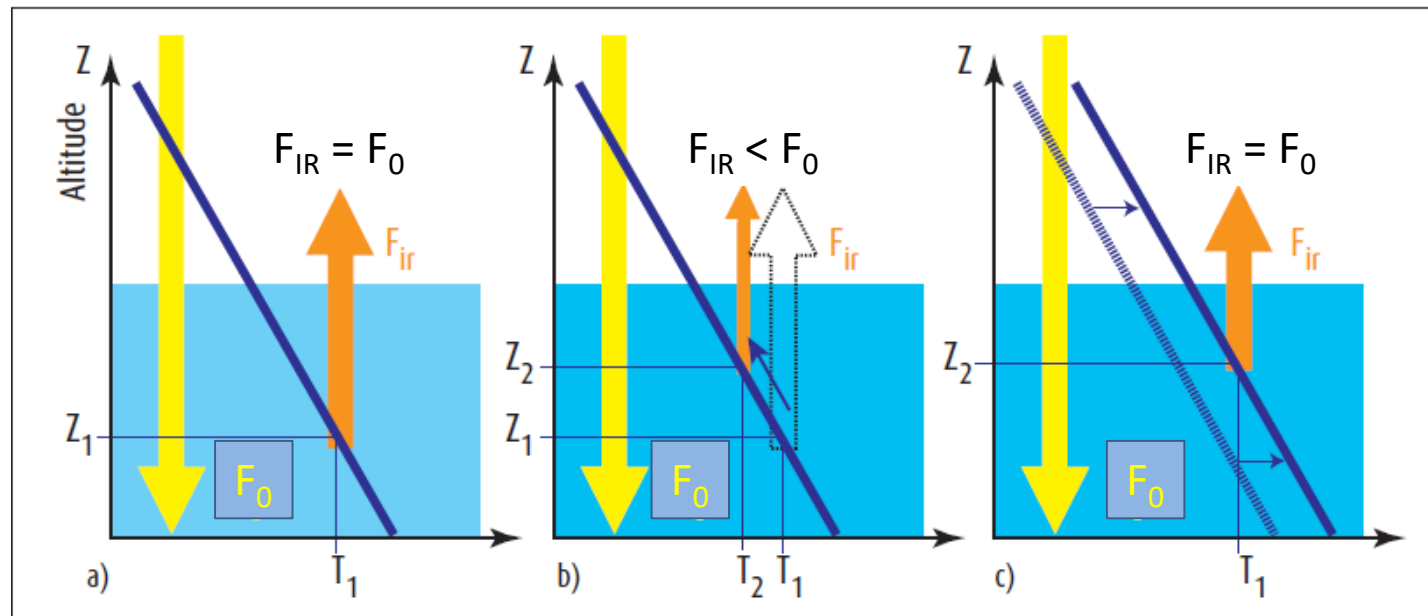
Figure 10 - Schémas illustrant la variation de l'effet de serre et de la température consécutifs à une augmentation de la concentration en gaz à effet de serre pour lequel l'absorptivité est déjà saturée :

a) atmosphère de référence, à l'équilibre ;

b) l'altitude d'émission augmente, le rayonnement infrarouge émis vers l'espace diminue, il y a déséquilibre ;

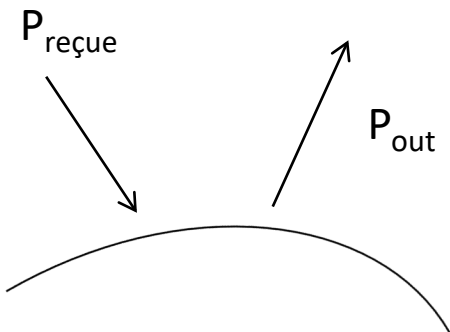
c) un nouvel équilibre est atteint avec une température plus élevée de l'atmosphère et de la surface.

Ce schéma contient la clef de la compréhension de l'effet de serre pour une atmosphère dont l'absorptivité est saturée.



Même si l'absorption moyenne de l'atmosphère n'augmente pas lorsque le CO₂ augmente, l'effet de serre augmente car l'atmosphère est stratifiée en température

Perturbations de l'effet de serre et forçages radiatifs



Bilan au sommet de l'atmosphère

Forçage radiatif : $F = P_{\text{reçue}} - P_{\text{out}}$; unité : W.m^{-2}

$F = 0$: équilibre $\rightarrow T = \text{cste}$

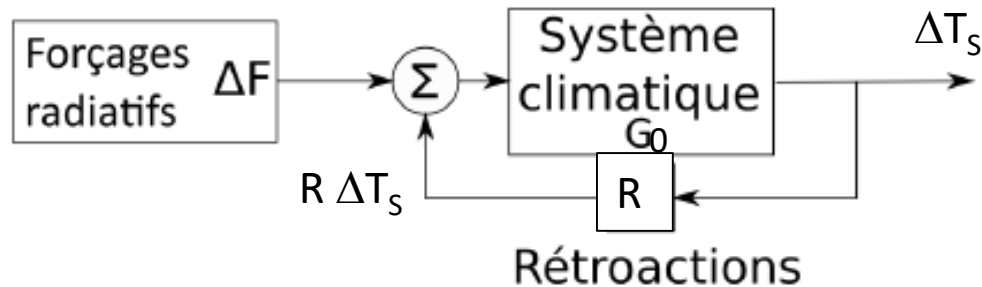
$F > 0$ \rightarrow réchauffement de la planète

$F < 0$ \rightarrow refroidissement de la planète

Aujourd'hui (2019): $F = 2.7 \text{ W.m}^{-2}$ par rapport à 1750*

* IPCC, AR6 (août 2021)

Rétroactions du système climatique



- Rétroaction positive ; ex :

T_S augmente \rightarrow fonte des glaces \rightarrow albédo diminue $\rightarrow T_S$ augmente

T_S augmente \rightarrow vapeur d'eau augmente \rightarrow effet de serre augmente $\rightarrow T_S$ augmente

T_S augmente \rightarrow permafrost fond \rightarrow dégagement de méthane $\rightarrow T_S$ augmente

- Rétroaction négative ; ex :

T_S augmente \rightarrow pertes par rayonnement augmentent $\rightarrow T_S$ diminue

La machine climatique terrestre

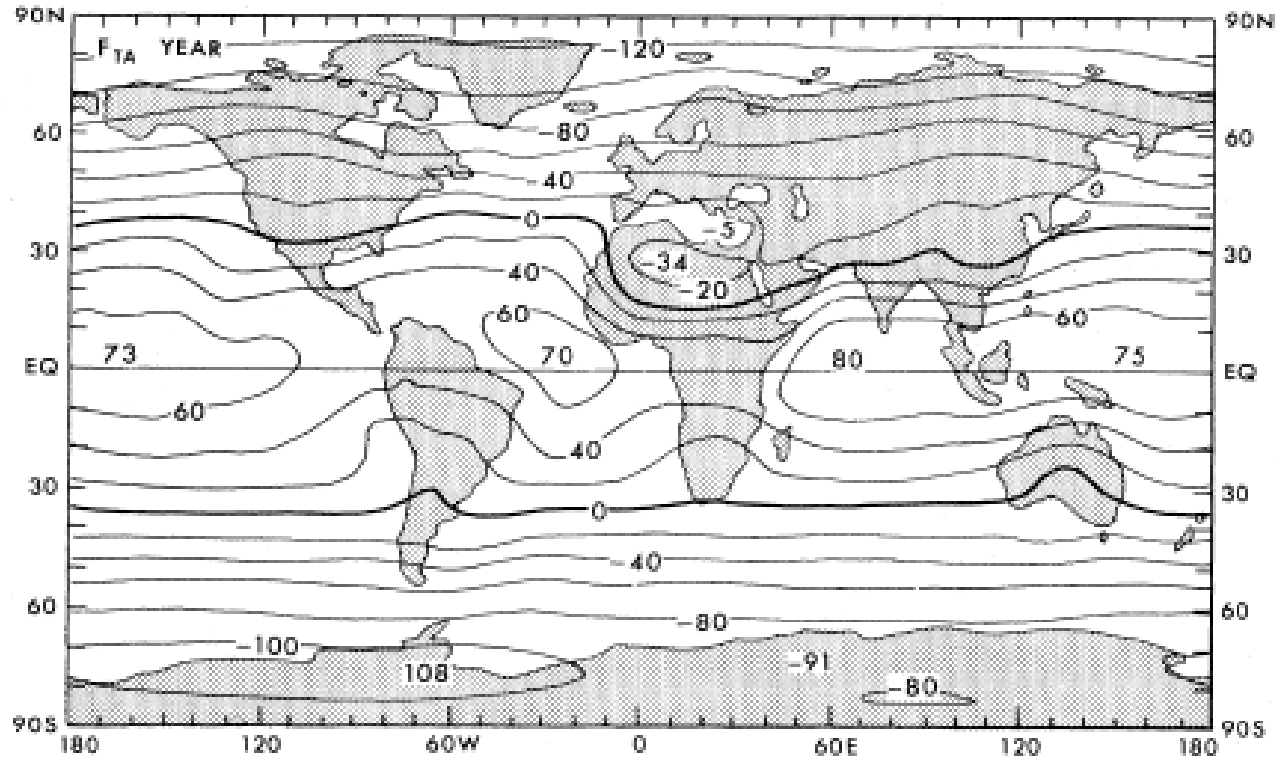


FIG. 10. Global distribution of the net incoming radiation at the top of the atmosphere (F_{TA}), after Campbell and Vonder Haar (1980) for annual mean conditions. Units are $W m^{-2}$.

L'Equateur reçoit plus d'énergie que les pôles

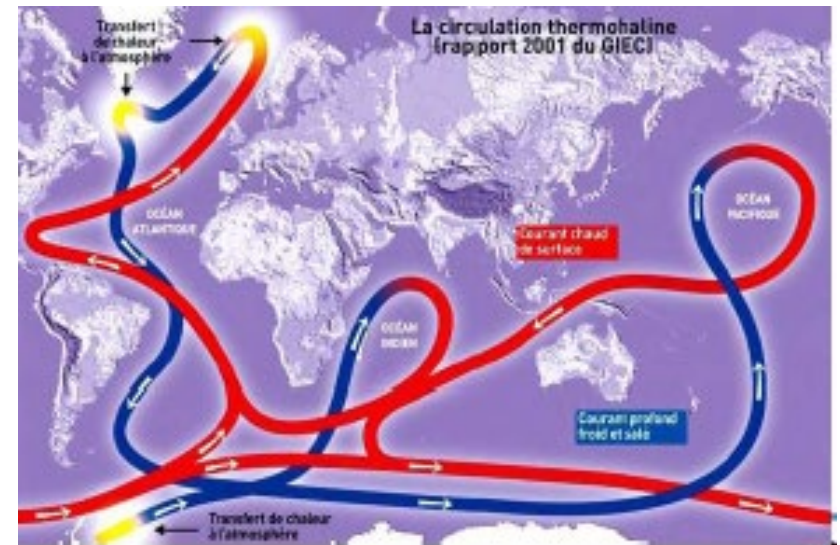
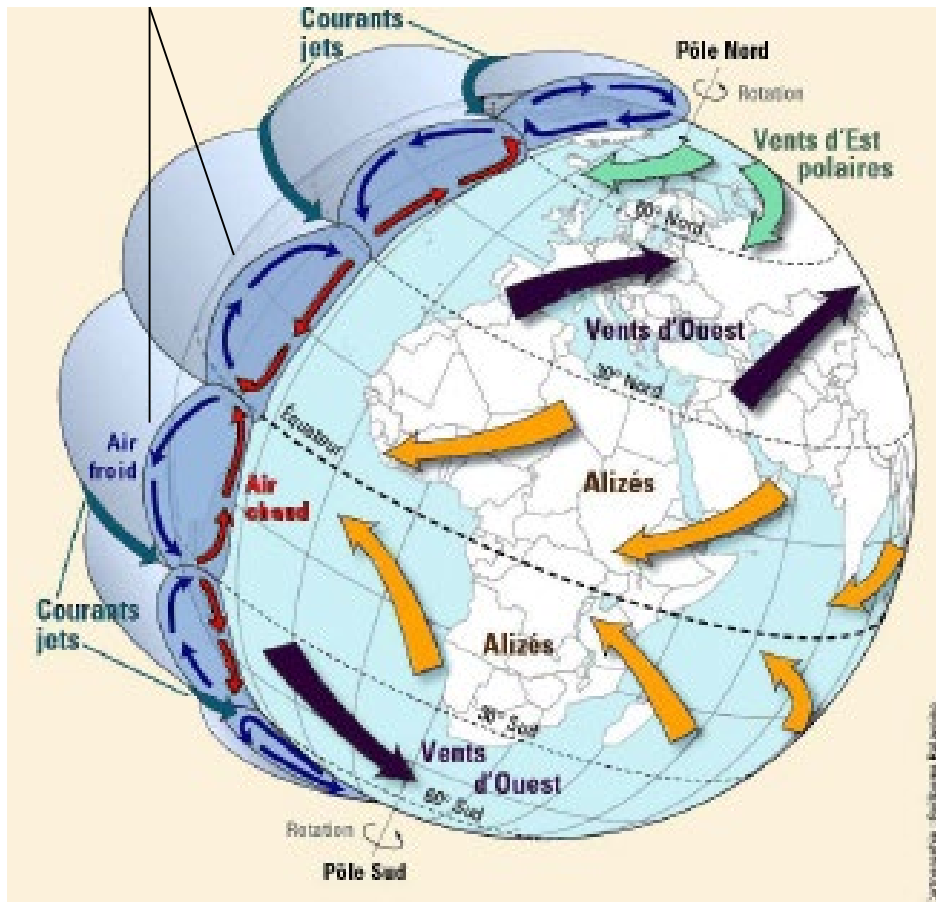
→ L'océan et l'atmosphère sont mis en mouvement pour transporter de la chaleur de l'Equateur vers les pôles (moteur thermique)

→ la différence de température entre Equateur et pôles est ainsi amoindrie

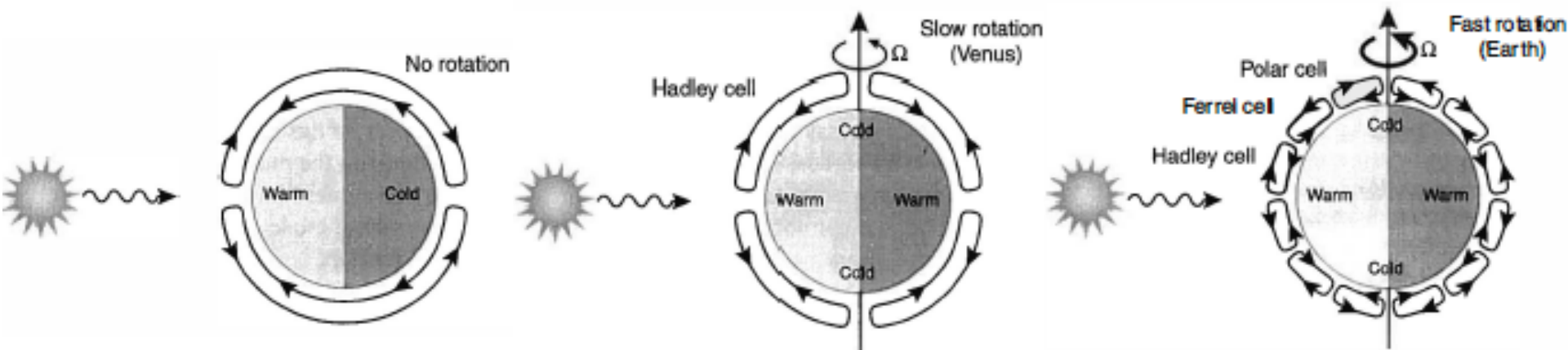
La machine climatique terrestre

Transport de chaleur par l'océan (50%) et par l'atmosphère (50%)

Cellules de Hadley



Convection horizontale dans l'atmosphère : cellules de Hadley



Rappel sur la force d'inertie de Coriolis

Rappel de mécanique du point

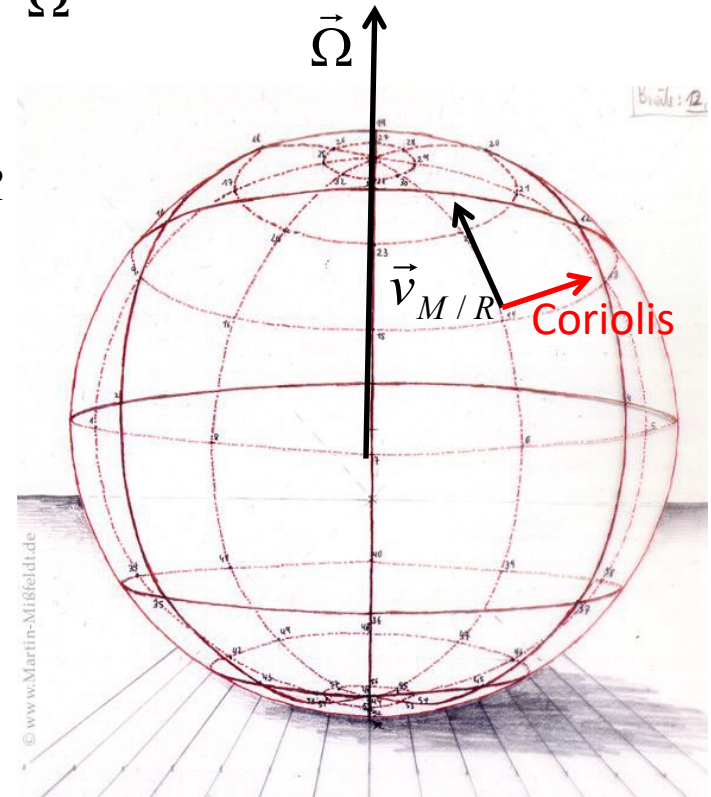
Système : point matériel de masse m

PFD dans un référentiel R non galiléen tournant par rapport à un référentiel galiléen avec la vitesse angulaire de rotation $\vec{\Omega}$

$$m\vec{a}_{M/R} = \Sigma\vec{F} - m\vec{a}_e - 2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{M/R}$$

↑
Force d'inertie
de Coriolis

Si vitesse horizontale vers le Nord,
→ force de Coriolis vers l'Est



Hydrodynamique de l'atmosphère

Navier-Stokes appliquée à une particule fluide de l'atmosphère, dans le référentiel terrestre

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \Delta \vec{v} - 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

Après projection sur un plan horizontal :

$$\frac{D\vec{v}_H}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}_H P + \nu \Delta \vec{v}_H - f \vec{k} \wedge \vec{v}_H$$

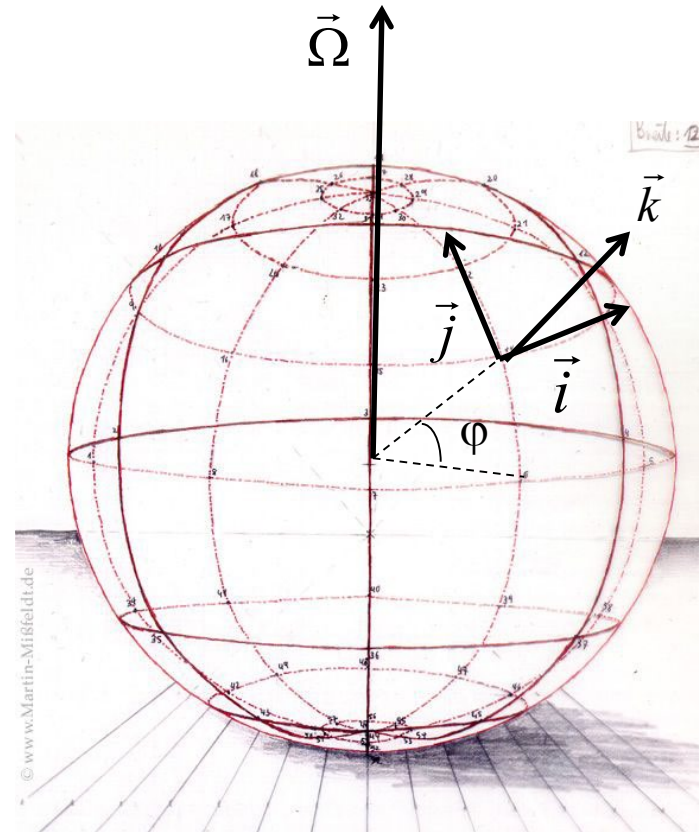
avec : $f = 2 \Omega \sin \varphi$; $\varphi = \text{latitude}$

$$\frac{\text{convection}}{\text{Coriolis}} = \frac{\|(\vec{v}_H \cdot \nabla) \vec{v}_H\|}{\|f \vec{k} \wedge \vec{v}_H\|} = \frac{U^2 / L}{f U} = \frac{U}{f L}$$

$$U = 10 \text{ m.s}^{-1} ; L = 1000 \text{ km} = 10^6 \text{ m}$$

$$f = 2 \Omega \sin \varphi ; \Omega = 7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

→ $\frac{\text{convection}}{\text{Coriolis}} \approx 0.1$ → **la force de Coriolis domine à grande échelle**



Exercices possibles (entre autres) : récapitulation

- Profil de pression dans la troposphère (modèle d'atmosphère isotherme)
- Profil de température dans la troposphère (modèle d'atmosphère adiabatique)
- Calcul de la constante solaire
- Equilibre radiatif de la Terre sans atmosphère
- Modèle d'effet de serre à une couche

Plan de ce cours (Ecoclim 2023)

1. Le climat global à un moment donné
2. Les climats du passé
3. Le changement climatique observé

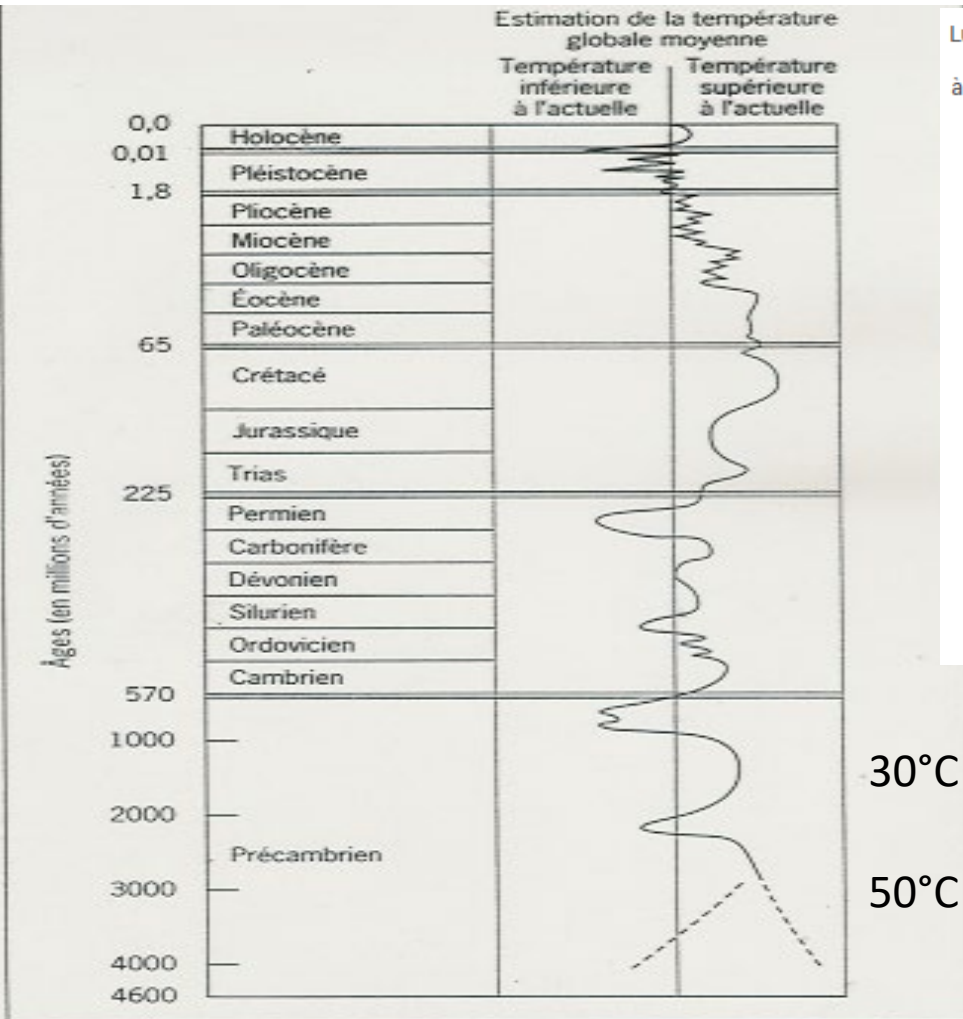
Bibliographie de la partie 2

- G. Ramstein, *Voyage à travers les climats de la Terre*
- G. Ramstein, Reflets de la physique n°55 (2017)

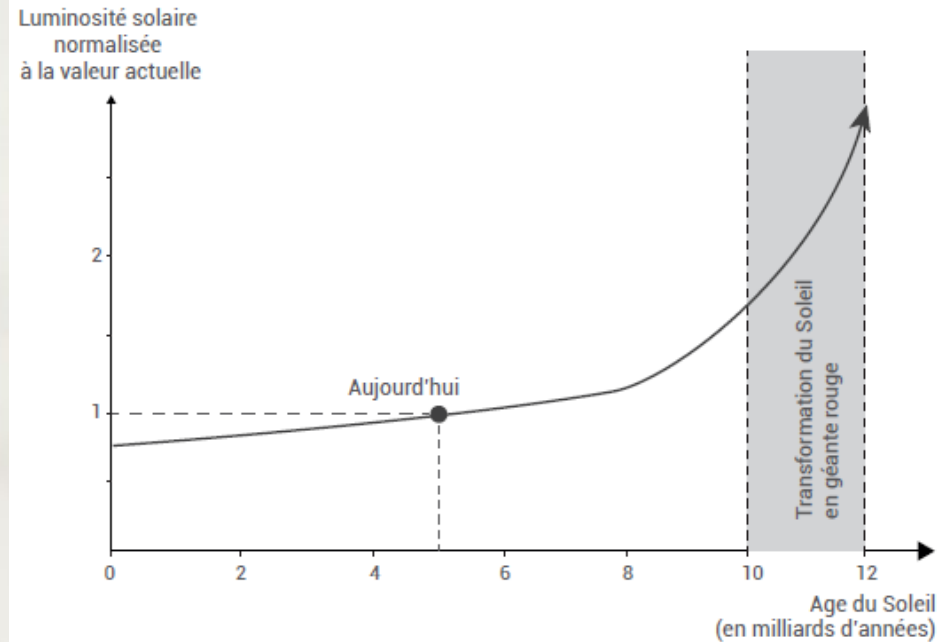
Echelles de temps du système climatique : une valse à quatre temps (G. Ramstein)

- Milliards d'années : Soleil
- Dizaines de millions d'années : tectonique des plaques
- Dizaines à centaines de milliers d'années : paramètres orbitaux de la Terre
- Centaine d'années : être humain!!

Paléoclimat



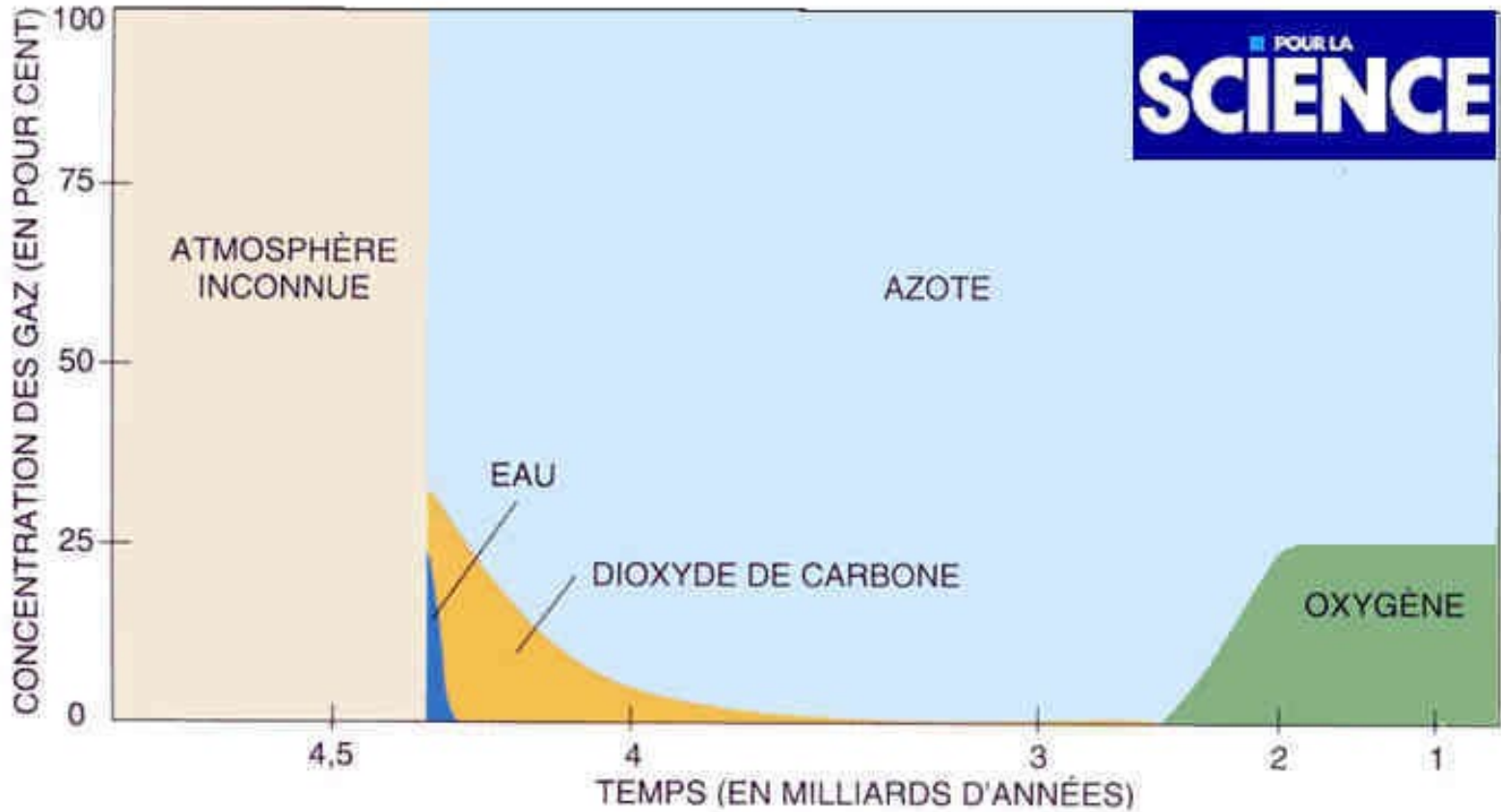
Différents indicateurs géologiques permettent de retracer l'allure générale de la courbe des changements de température de la Terre depuis son origine, il y a 4,6 milliards d'années. Ils mettent en évidence un climat généralement plus chaud que celui des deux derniers millions d'années.



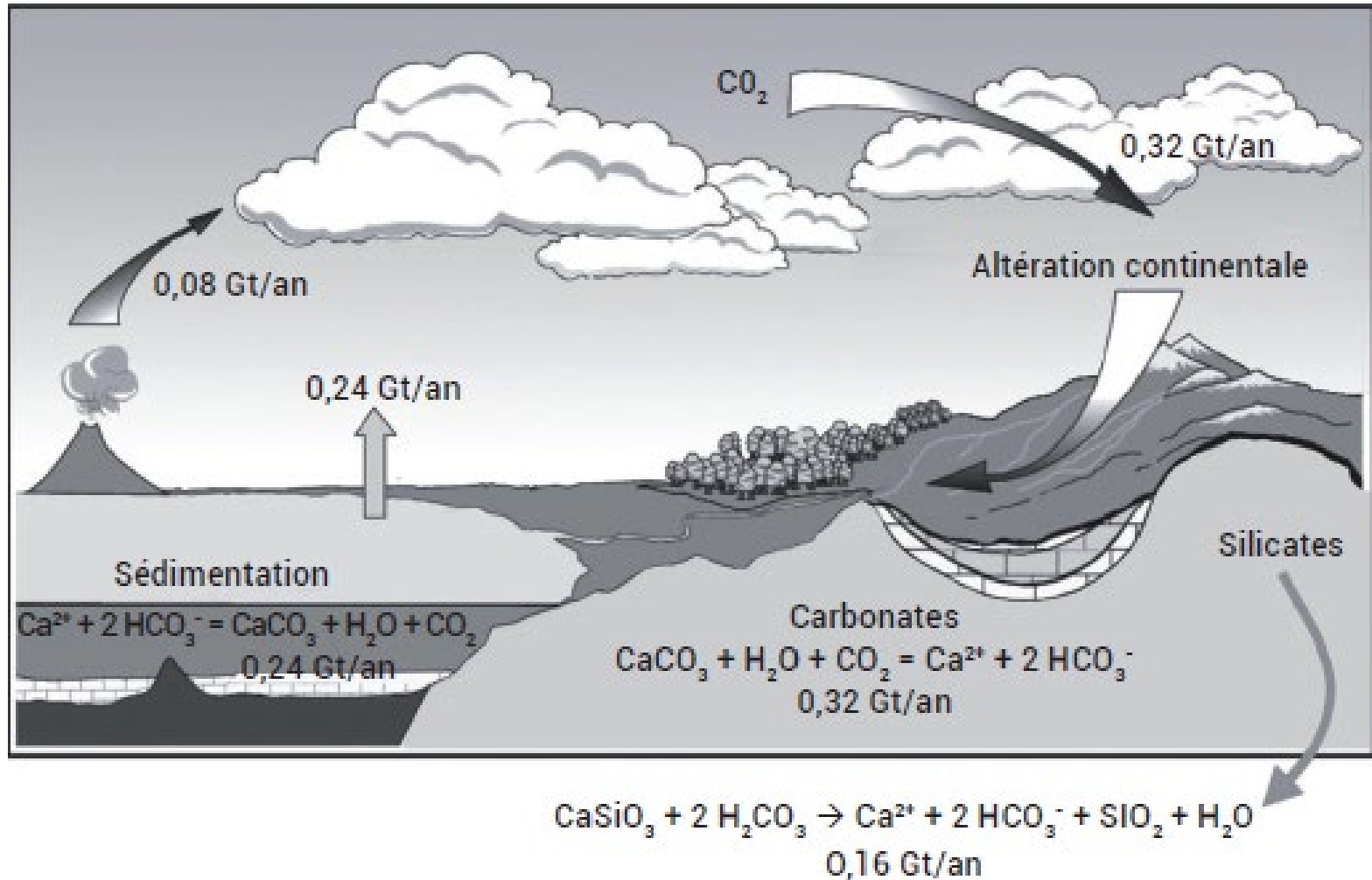
H. Le Treut, Ecoclim, juin 2018

G. Ramstein, Reflets de la physique n°55

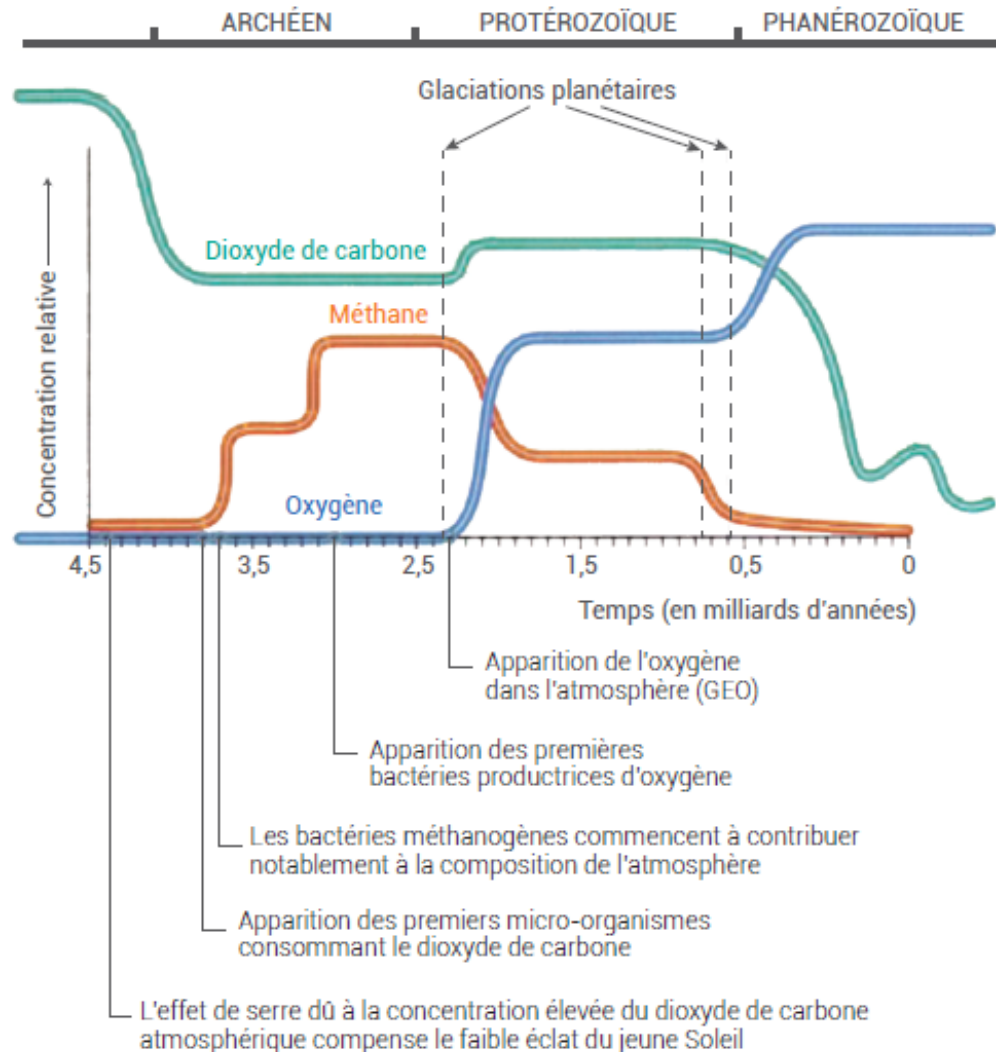
Composition de l'atmosphère terrestre depuis le début de la Terre



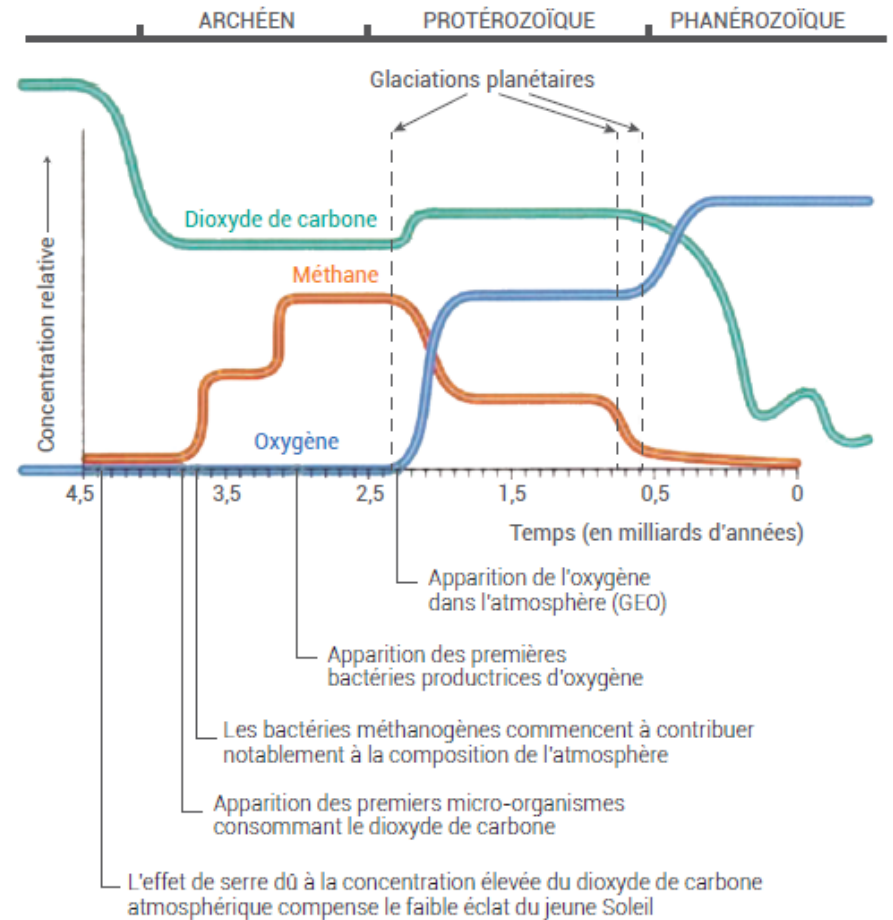
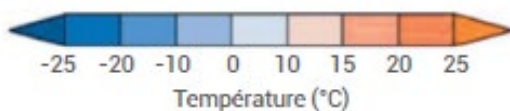
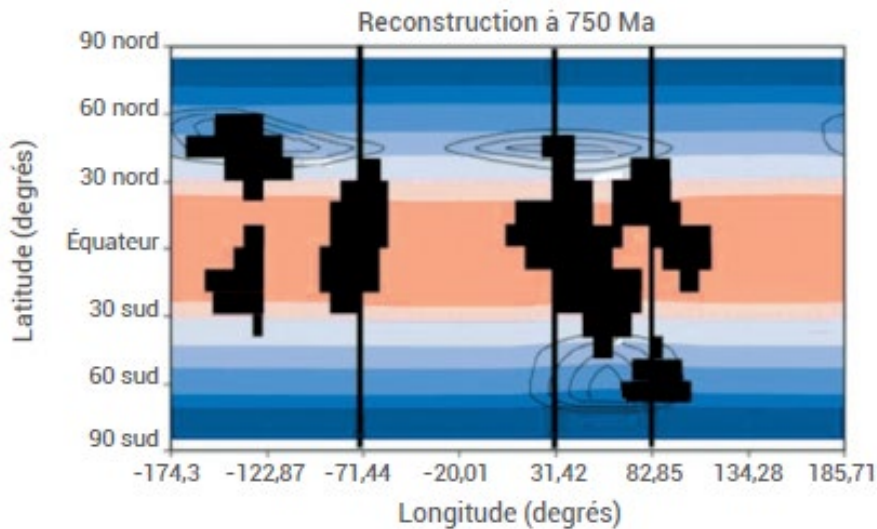
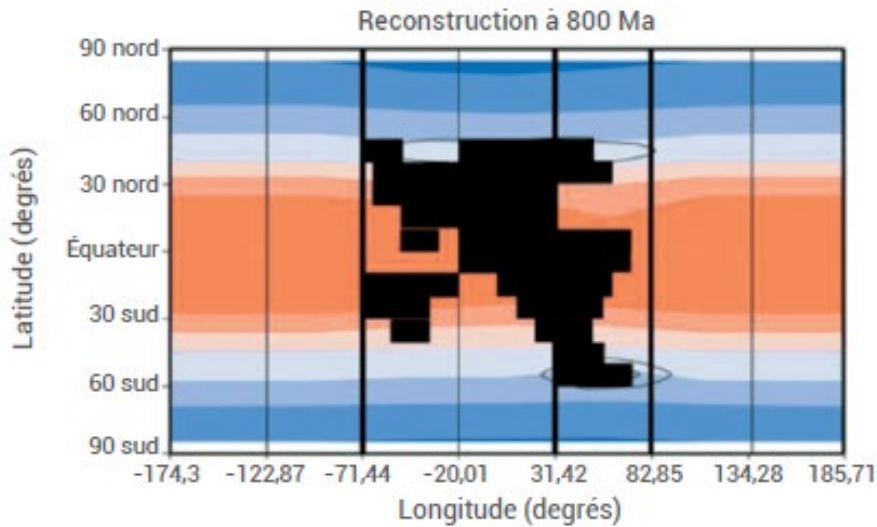
Le cycle du carbone aux échelles géologiques



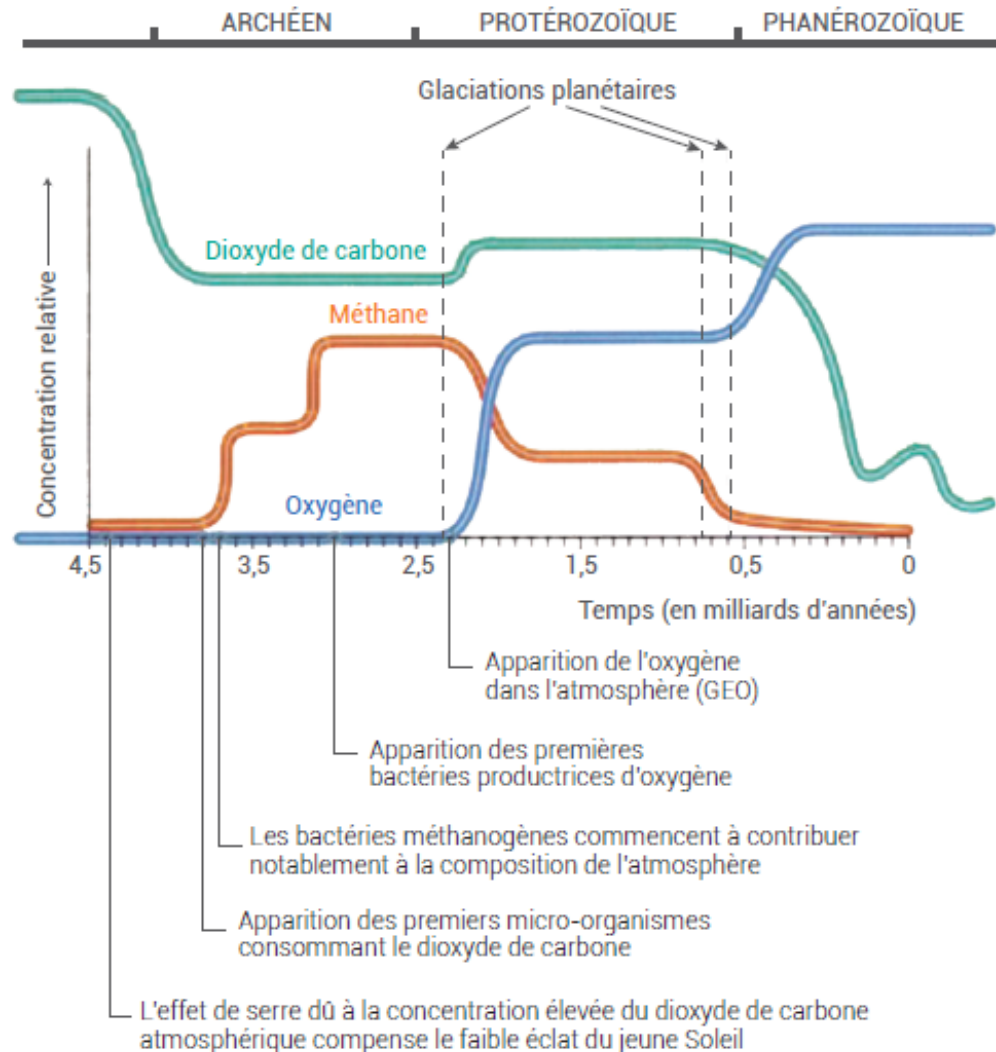
CO₂, méthane et oxygène au fil du temps



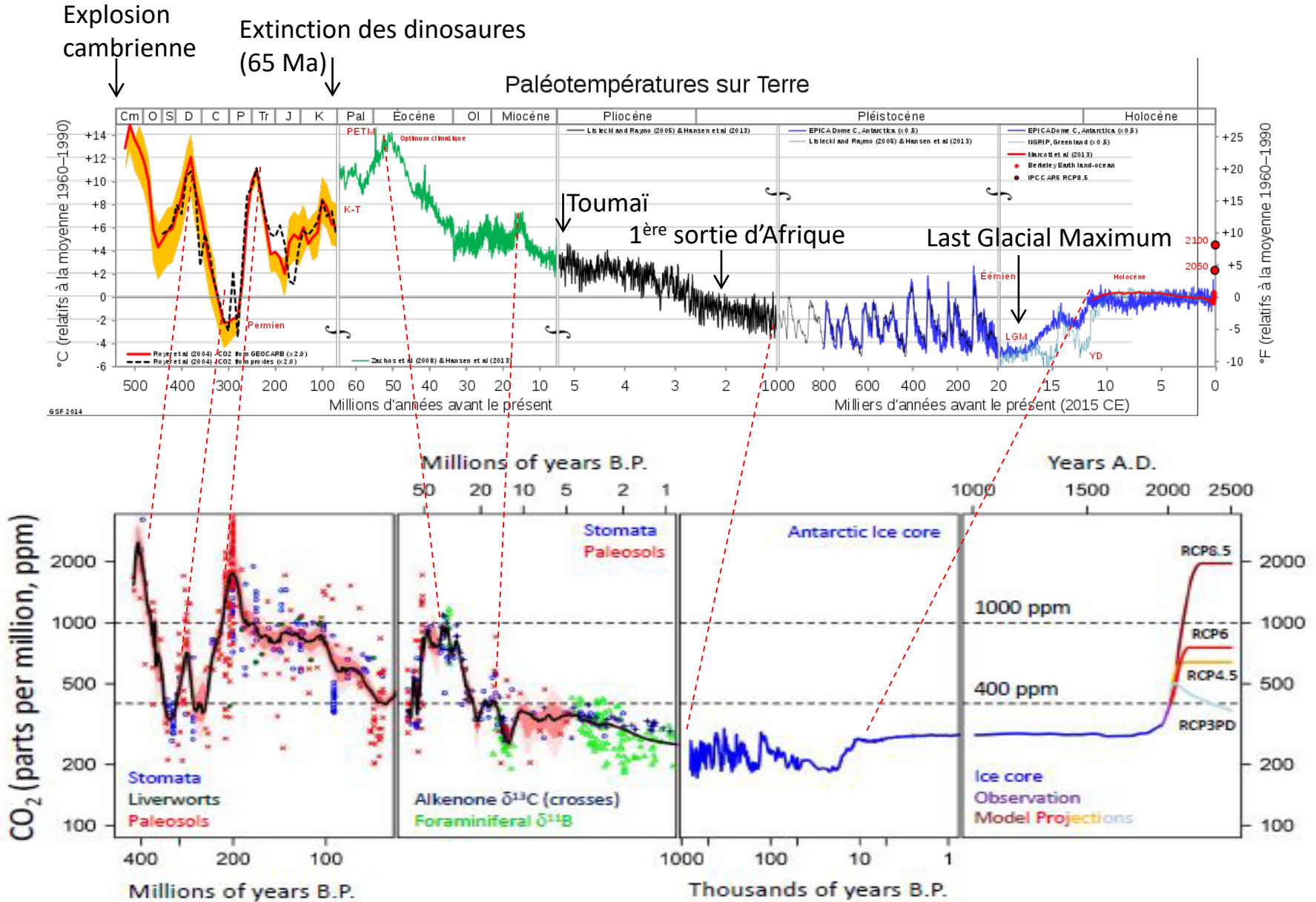
Eclatement du supercontinent Rodinia



CO₂, méthane et oxygène au fil du temps



Température et CO₂ sur les derniers 500 Ma



Plan de ce cours (Ecoclim 2023)

1. Le climat global à un moment donné
2. Les climats du passé
3. Le changement climatique observé

Bibliographie de la partie 3

- N. de Noblet, exposé à Ecoclim2018
- Global Carbon Project
- <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/CCCIC>
- IPCC, « Climate change 2013 : the physical science basis », Summary for policymakers (2013)
- IPCC « Climate change 2014, Impacts, Adaptation and Vulnerability », Summary for policymakers (2014)
- IPCC « special report : global warming of 1.5°C » (2018)
- IPCC, « Climate change and land », summary for policymakers (2019)
- IPCC, « Climate change 2021 : the physical science basis », Summary for policymakers (2021)
- *Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises*, CEA, CNRS, Météo-France, 17/09/2019

Plan de ce cours (Ecoclim 2023)

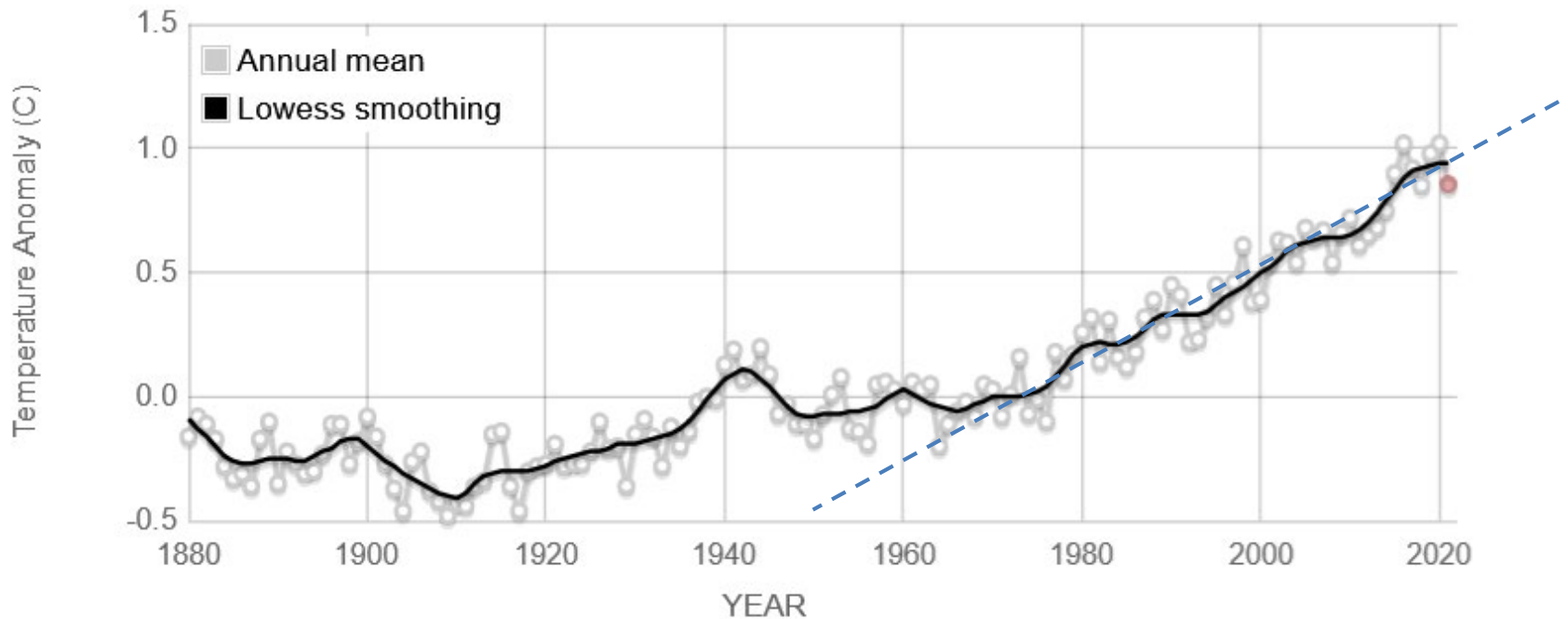
1. Le climat global à un moment donné
2. Les climats du passé
3. Le changement climatique observé
 - 3.a observations
 - 3.b cause

Température globale 1884-2021

GLOBAL LAND-OCEAN TEMPERATURE INDEX

Data source: NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS).

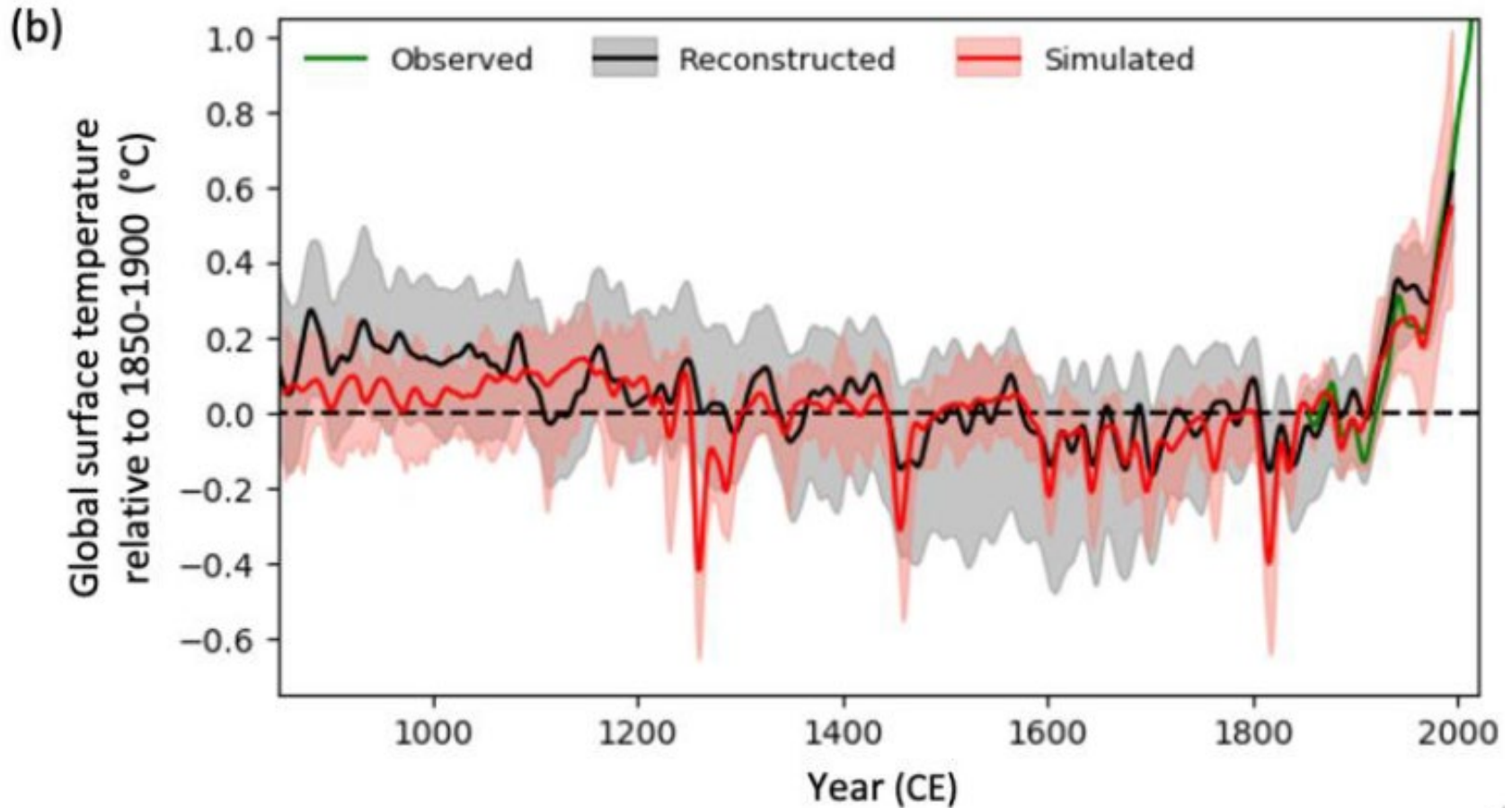
Credit: NASA/GISS



+1°C environ depuis 1880

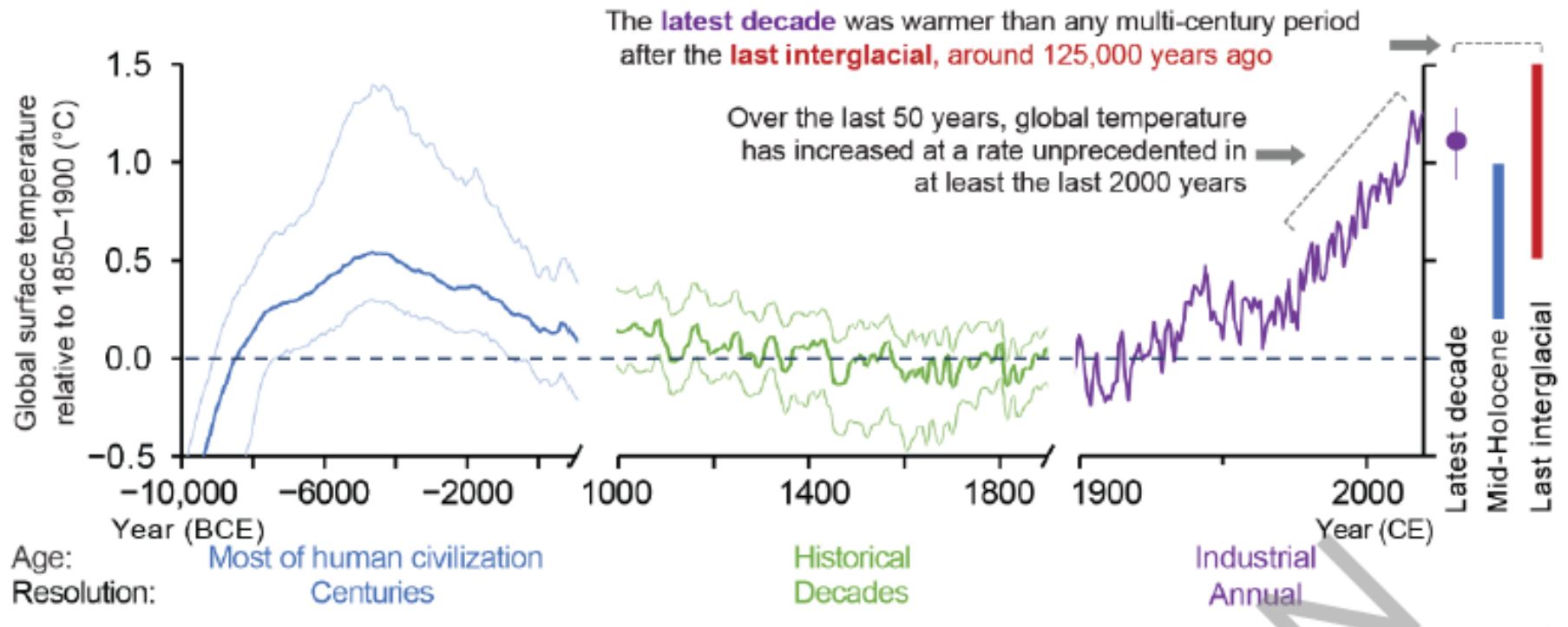
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

Température globale depuis 1200 ans



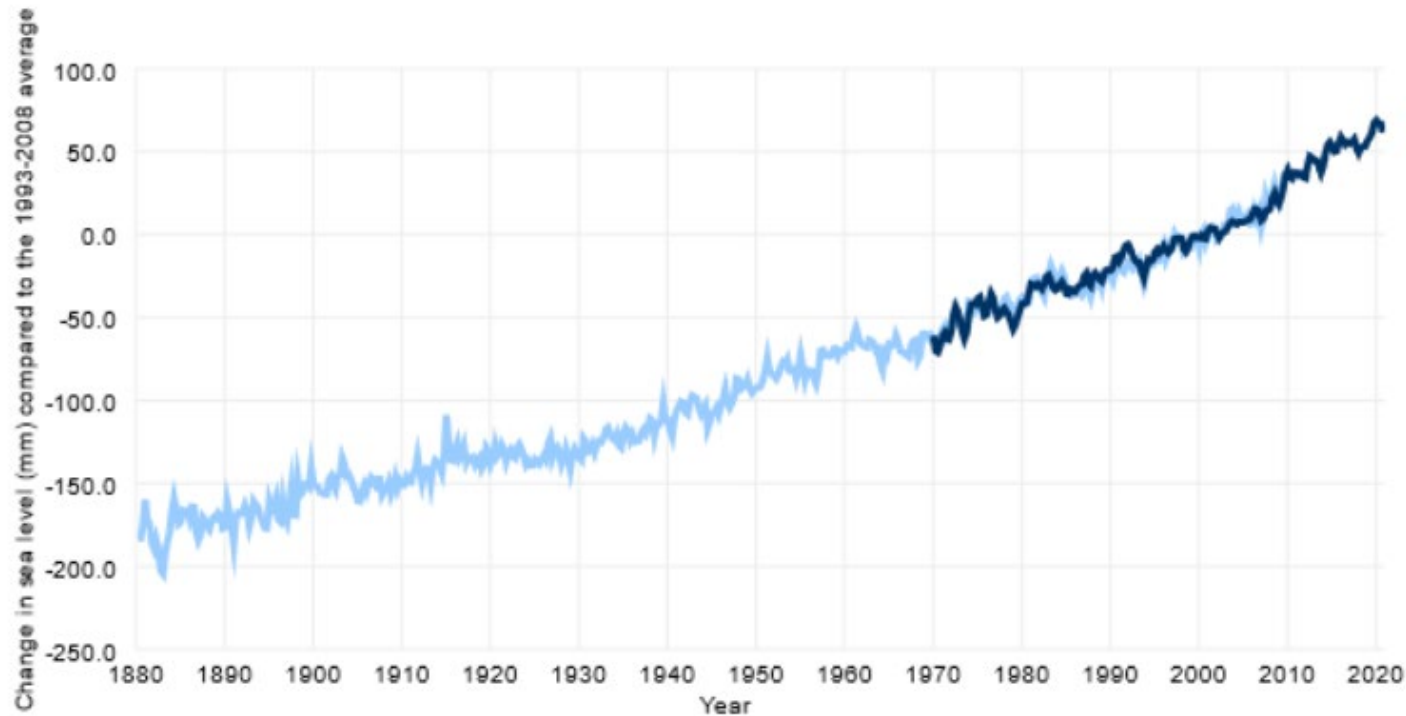
Température globale depuis 10000 ans

(a) Recent global temperatures are unprecedented in the era of human civilization



Elévation du niveau des mers

Sea level since 1880

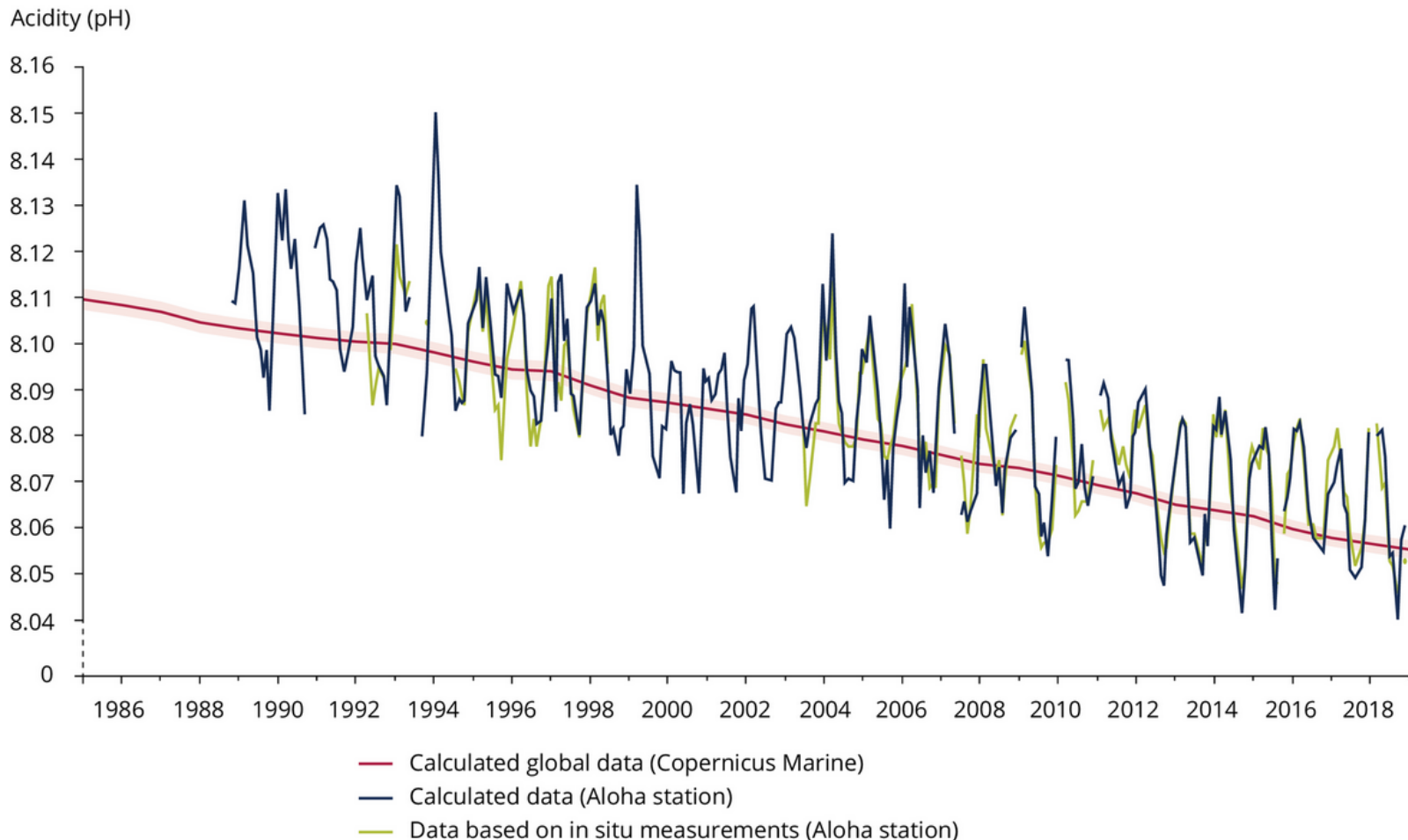


+ de 20 cm depuis 1880

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

Acidification de l'océan

Fig. 1: Decline in ocean pH measured at the Aloha station and yearly mean surface seawater pH reported on a global scale (Copernicus Marine)



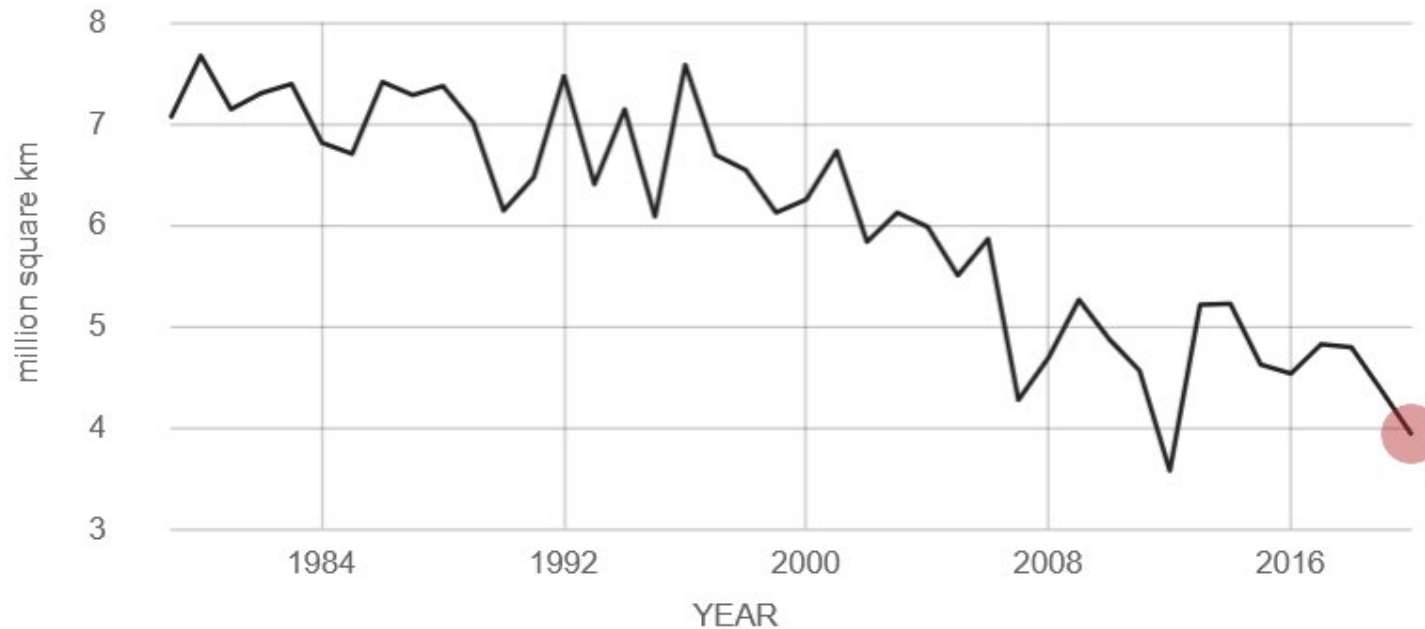
Fonte de la banquise arctique

AVERAGE SEPTEMBER MINIMUM EXTENT

RATE OF CHANGE

Data source: Satellite observations. Credit: [NSIDC/NASA](#)

↓ **13.1**
percent per decade



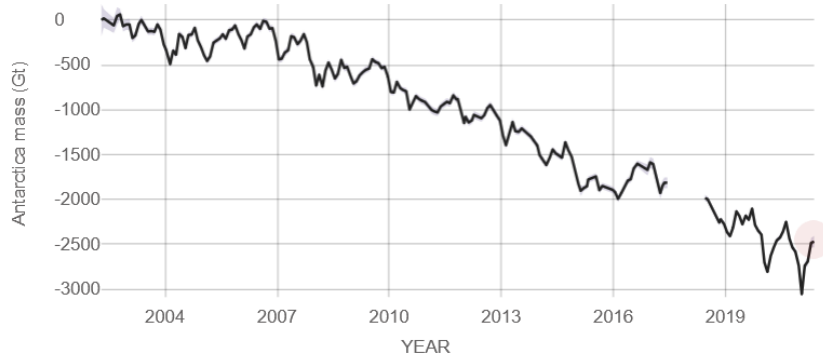
Fonte de moitié depuis 1979

Fonte des glaciers continentaux

ANTARCTICA MASS VARIATION SINCE 2002

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

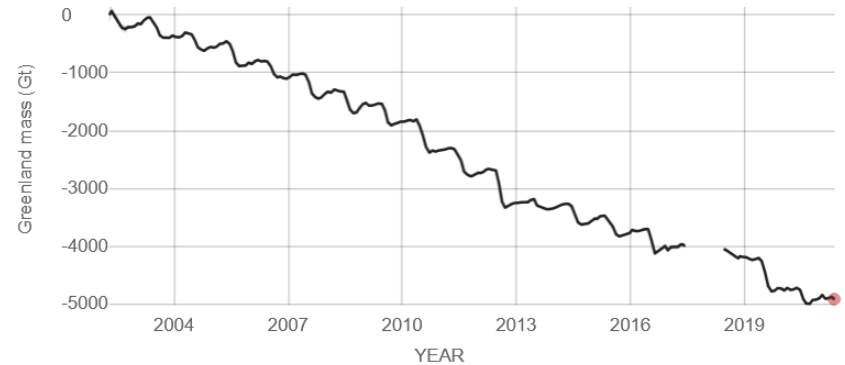
RATE OF CHANGE
↓ 151.0
billion metric tons per
year



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
↓ 277.0
billion metric tons per
year



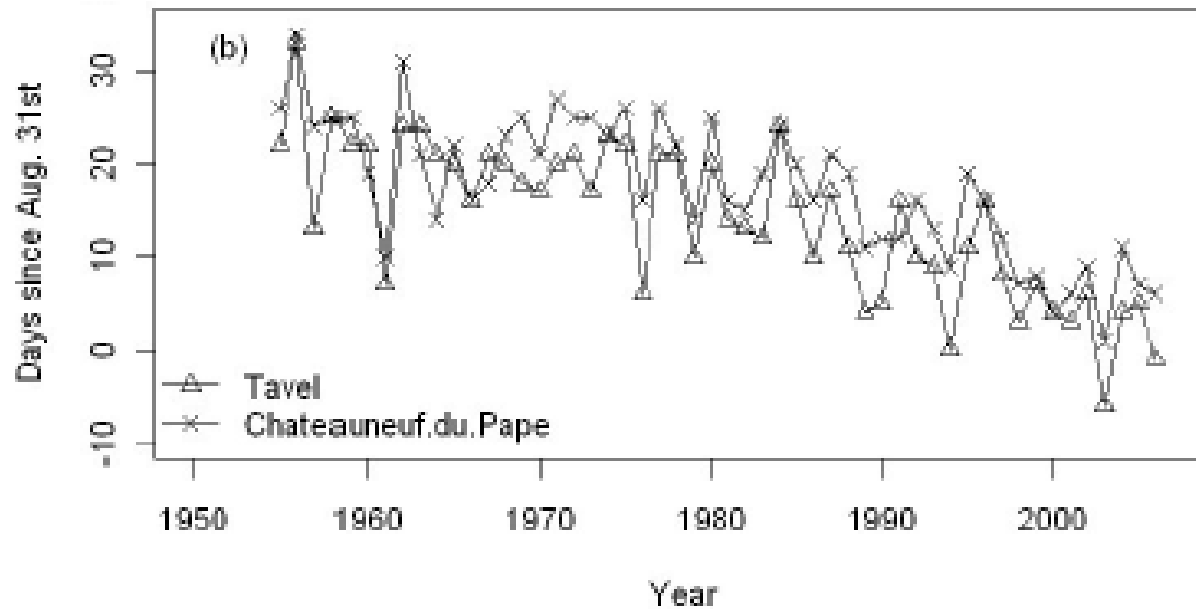
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/>



Fonte du « glacier blanc » dans les Hautes-Alpes : un recul de 137 m en 23 ans

Exemple en agriculture : avancée de la date des vendanges

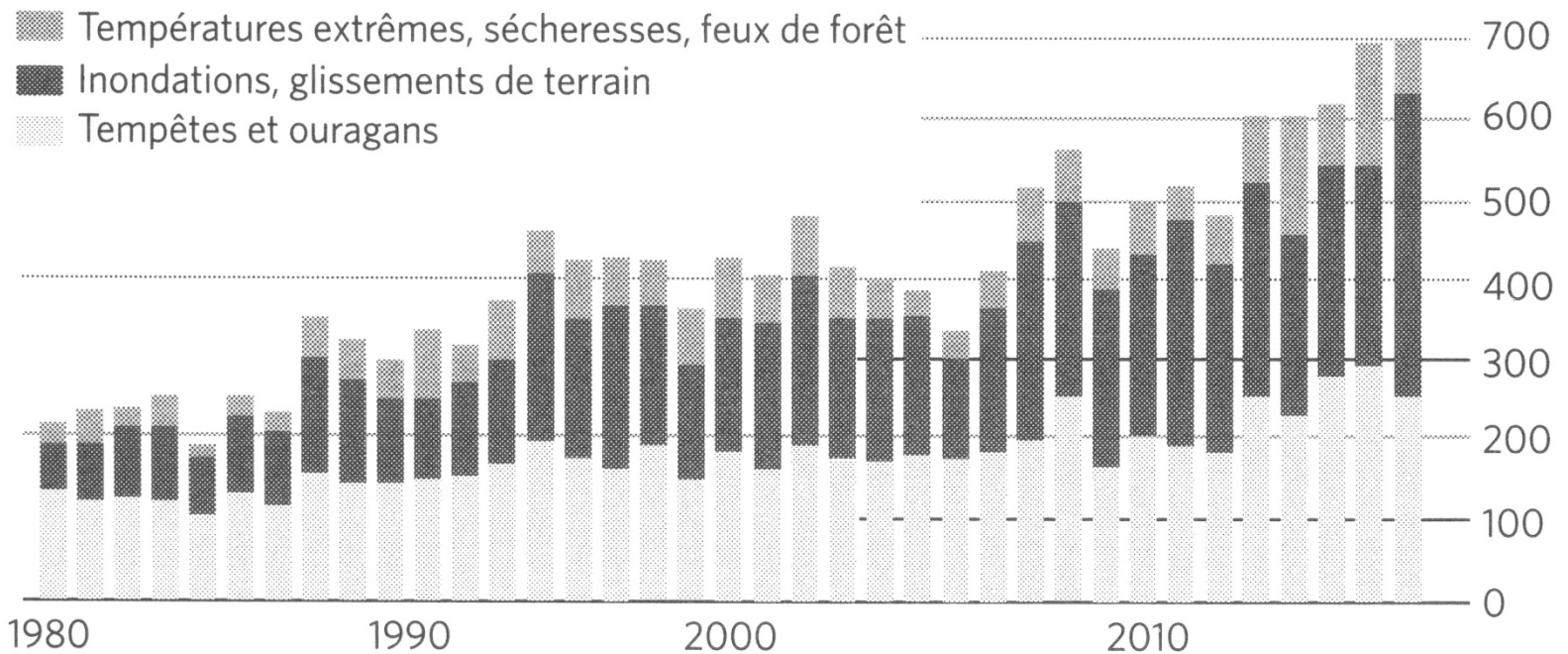
Château neuf du Pape & Tavel



-30 jours en 50 ans

Evénements extrêmes

Figure 1.3. Le nombre d'événements extrêmes a triplé en 30 ans.



Source : Munich Re
Economist.com

Plan de ce cours (Ecoclim 2023)

1. Le climat global à un moment donné
2. Les climats du passé
3. Le changement climatique observé
 - 3.a observations
 - 3.b cause

Température et principaux gaz à effet de serre sur 400.000 ans

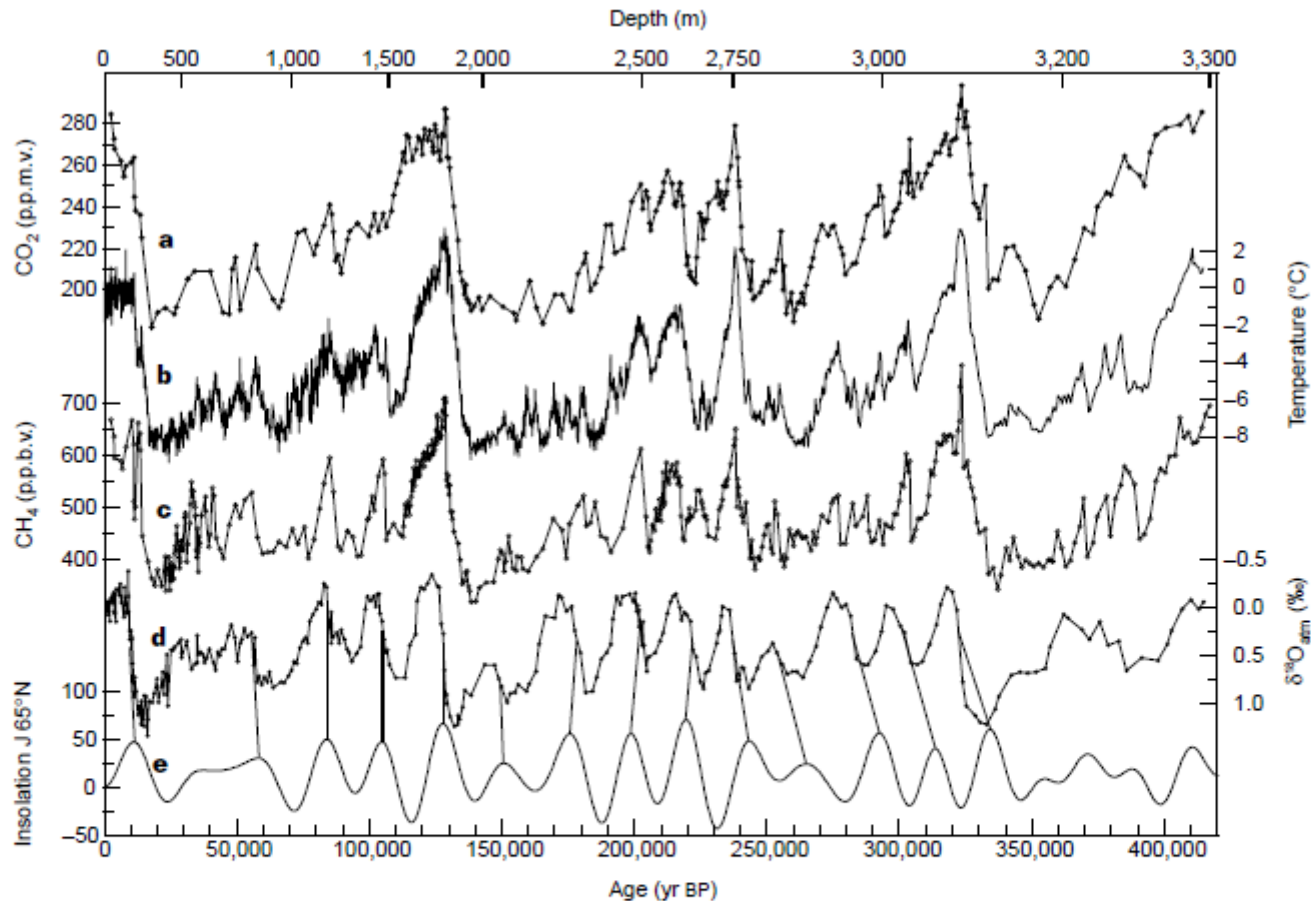
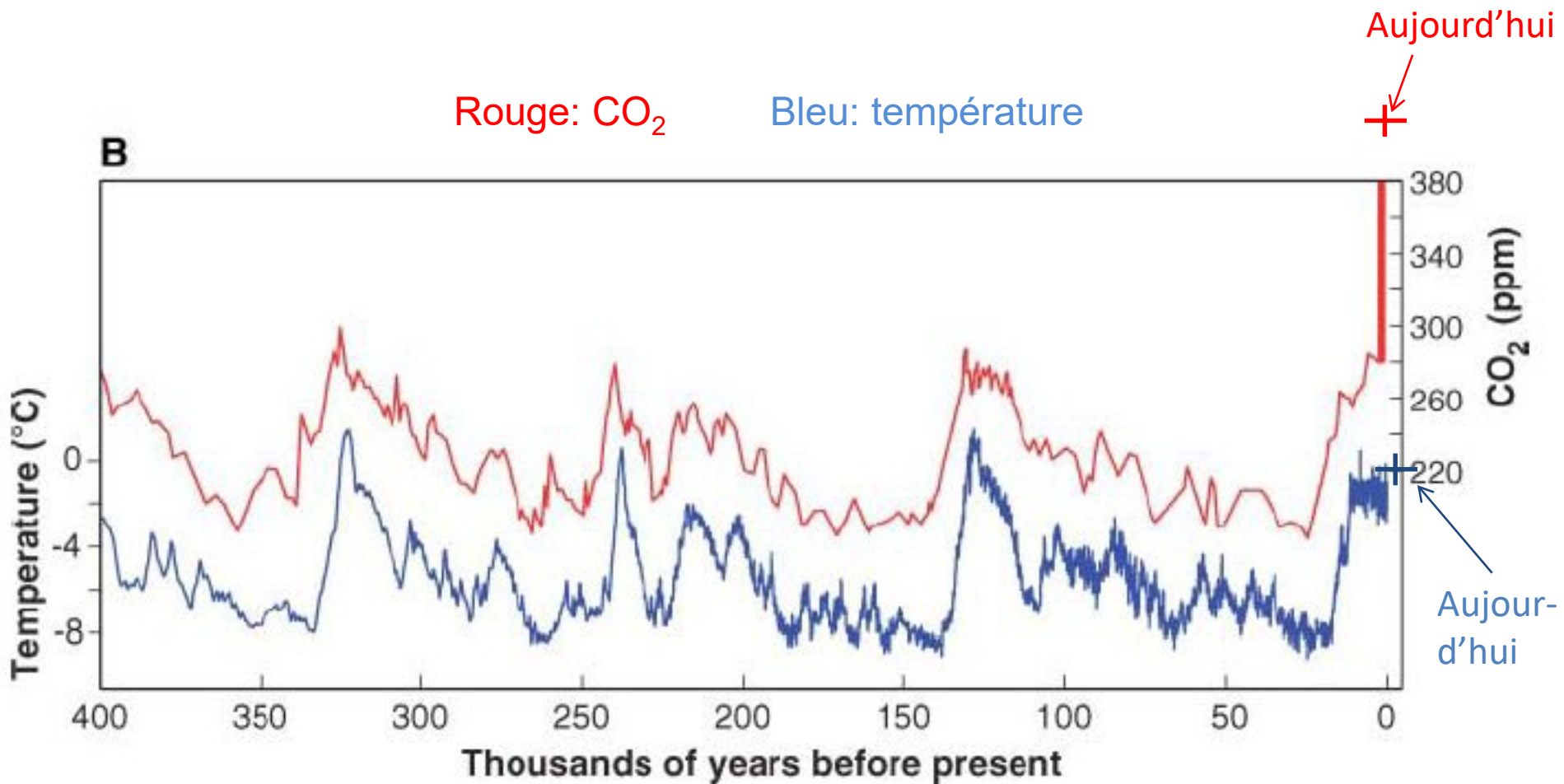


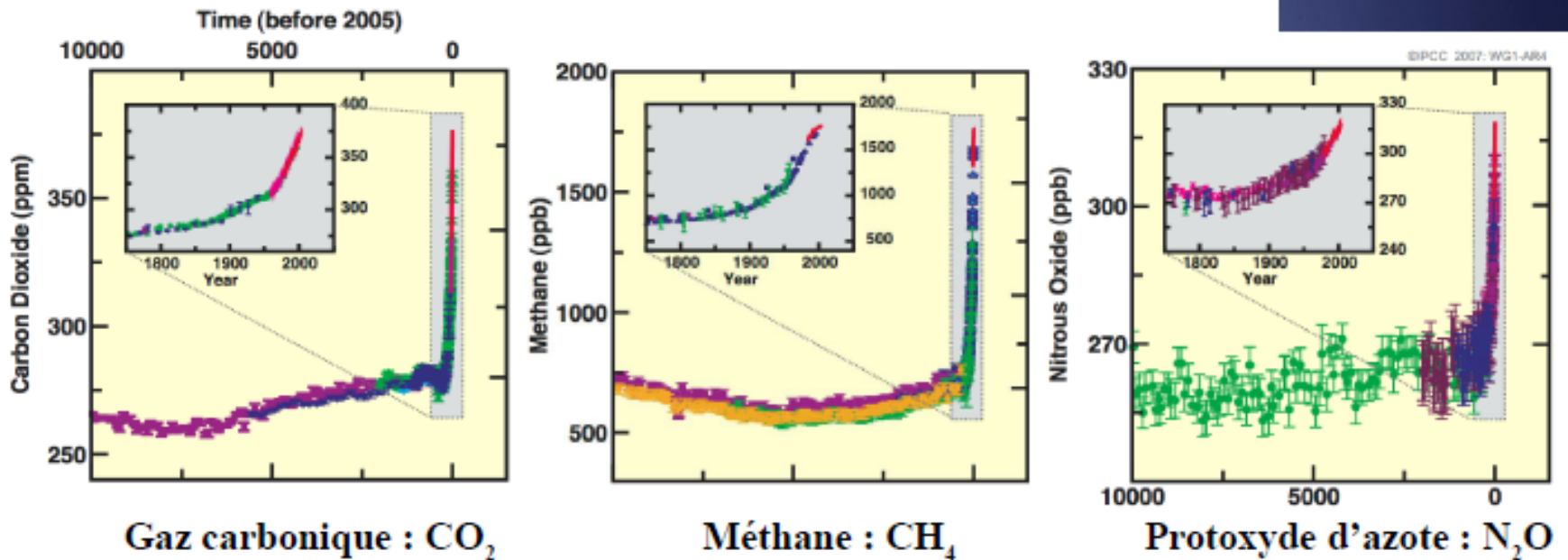
Figure 3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (GT4 timescale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the top axis) of: **a**, CO₂; **b**, isotopic temperature of the atmosphere (see text); **c**, CH₄; **d**, $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$; and **e**, mid-June insolation at 65°N (in Wm^{-2}) (ref. 3). CO₂ and CH₄ measurements have been performed using the methods and analytical procedures previously described^{8,9}. However, the CO₂ measuring system has been slightly modified in order to increase the sensitivity of the CO₂ detection. The

thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO₂ after its transformation into CH₄. The mean resolution of the CO₂ (CH₄) profile is about 1,500 (950) years. It goes up to about 6,000 years for CO₂ in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH₄ time resolution ranges between a few tens of years to 4,500 years. The overall accuracy for CH₄ and CO₂ measurements are ± 20 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

Température et CO₂ sur 400.000 ans :



Augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère



Augmentation forte des principaux gaz à effet de serre depuis la révolution industrielle...

- * CH₄ anthropique : ruminants et rizières
- * N₂O anthropique : agriculture industrielle
- * CO₂ anthropique : surtout dû aux énergies fossiles

Emissions humaines de CO₂ et évolution du taux de CO₂ dans l'atmosphère

Question : est-ce que la quantité de CO₂ émise par les activités humaines depuis la révolution industrielle correspond à la variation de la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère pendant la même période?

Réponse : **voir exercice**

→ **bon ordre de grandeur** ; on a émis à peu près deux fois trop de CO₂ par rapport à la variation du taux de CO₂ observée. En fait **l'océan et les continents ont absorbé la moitié de nos émissions**

CO₂ supplémentaire dans l'atmosphère : argument isotopique

Etude de la composition isotopique du C dans le CO₂ de l'atmosphère:
On mesure la proportion de ¹³C et de ¹⁴C dans le C de l'atmosphère

Rappel :

le C majoritaire est du ¹²C : noyau à 6 protons et 6 neutrons (stable)

¹³C : 6 protons et 7 neutrons (stable)

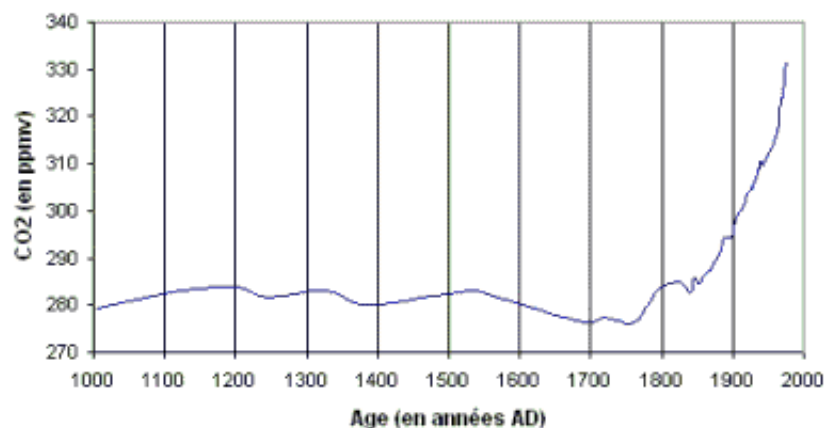
¹⁴C : 6 protons et 8 neutrons (radioactif)

Observations:

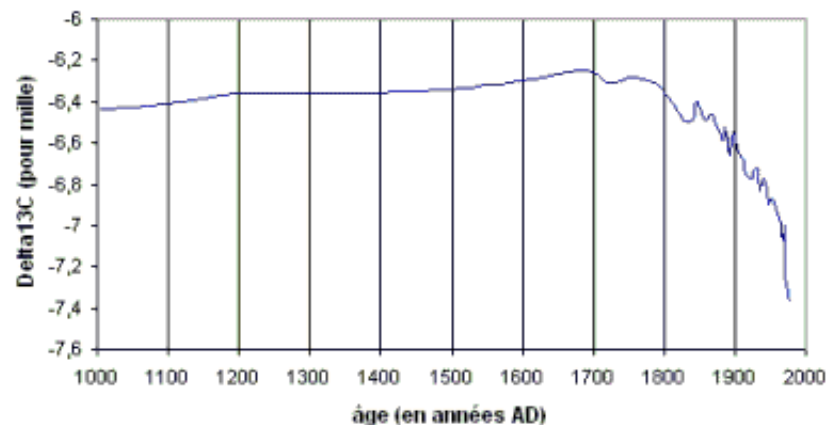
La quantité de CO₂ dans l'atmosphère augmente depuis 1850

La part de ¹³C diminue, celle du ¹⁴C également, également depuis 1850

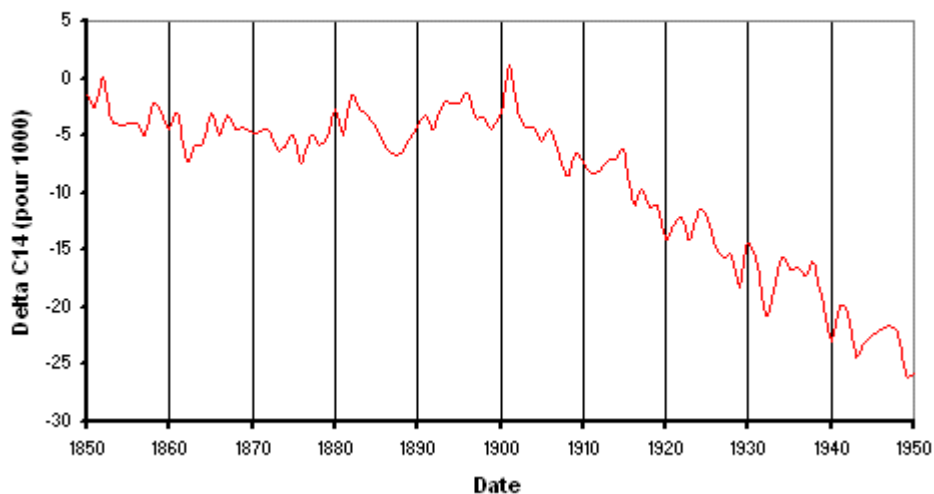
CO2 en fn de l'âge - Law Dome



Delta13C02 en fn de l'âge - Law Dome



DeltaC14 en fonction du temps



Argument isotopique : part du ^{13}C

Le delta ^{13}C est défini par la proportion de ^{13}C par rapport au ^{12}C relative à un échantillon de référence, exprimée en pour mille. Ainsi, lorsqu'un échantillon est enrichi en ^{13}C par rapport au standard, son $\delta^{13}\text{C}$ sera positif. Lorsque l'échantillon est appauvri en ^{13}C par rapport au standard, le $\delta^{13}\text{C}$ est négatif.

Les combustibles fossiles utilisés par l'homme en énorme quantité depuis la révolution industrielle sont des produits dérivés de la photosynthèse. Ils sont appauvris en ^{13}C . Le $\delta^{13}\text{C}$ moyen des combustibles fossiles est de -26, alors que le $\delta^{13}\text{C}$ moyen de l'atmosphère est de -8.

L'apport massif de CO_2 lié à la combustion des carburants fossiles devrait donc diminuer le $\delta^{13}\text{C}$ atmosphérique. La diminution observée du $\delta^{13}\text{C}$ atmosphérique est un argument montrant que l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 n'est pas liée à un dégazage océanique ($\delta^{13}\text{C}$ de l'océan superficiel = + 4).

Argument isotopique : part du ^{14}C

L'isotope 14 du Carbone est constamment produit dans la haute atmosphère sous l'effet des rayonnements solaires à haute énergie à partir de l'azote. Les végétaux incorporent par photosynthèse ce ^{14}C dans la matière organique mais celui-ci sera restitué à l'atmosphère par les mécanismes respiratoires.

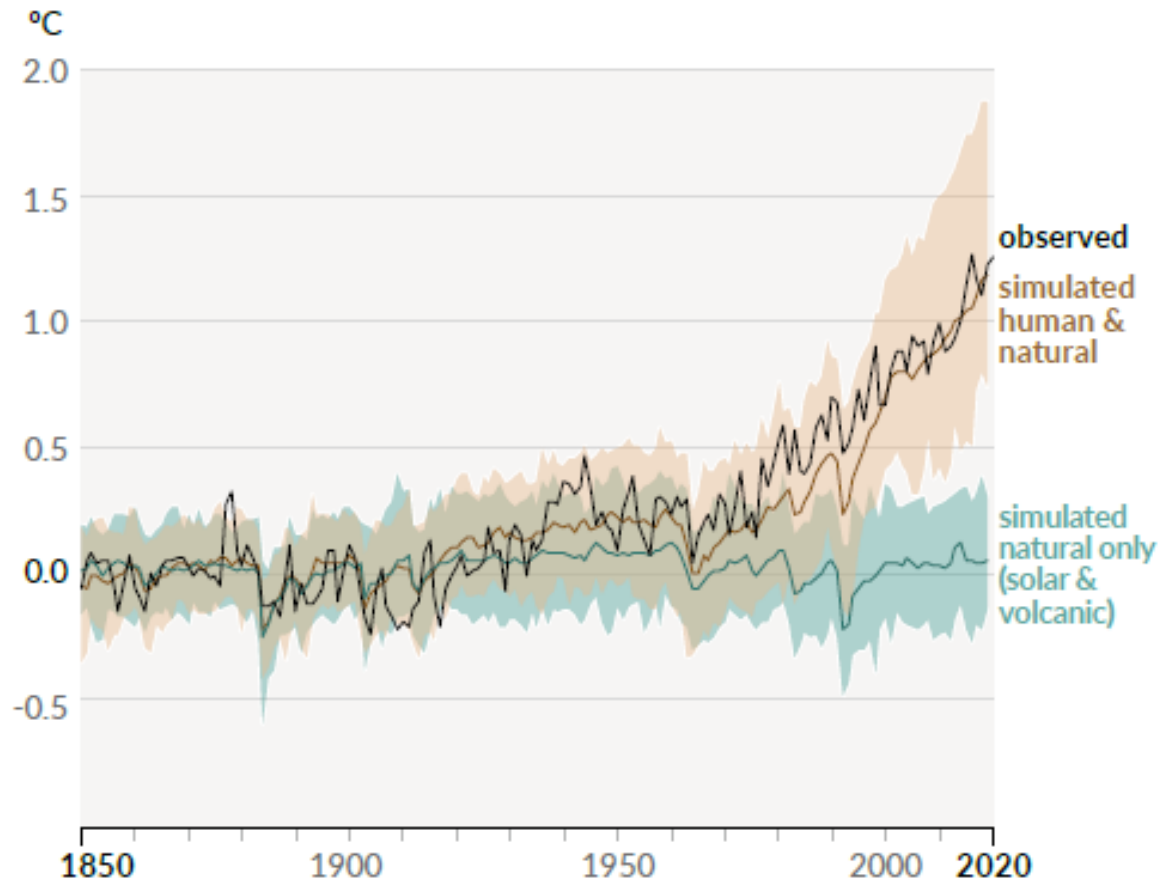
Or, l'isotope ^{14}C est radioactif avec une demi-vie de 5730 ± 40 ans. On admet qu'au bout de 10 demi-vies (56 000 ans) la quantité d'isotope est négligeable. Cela explique pourquoi les combustibles fossiles que nous utilisons, qui ont un âge de 50 à 100 MA, ne contiennent plus de ^{14}C . La combustion massive des carburants fossiles doit donc faire diminuer la concentration atmosphérique en ^{14}C .

En résumé :

- Les combustibles fossiles sont appauvris à la fois en ^{13}C et en ^{14}C .
- Seule interprétation possible : le carbone supplémentaire de l'atmosphère provient de la combustion des énergies fossiles.

Réchauffement climatique observé : l'effet de l'être humain

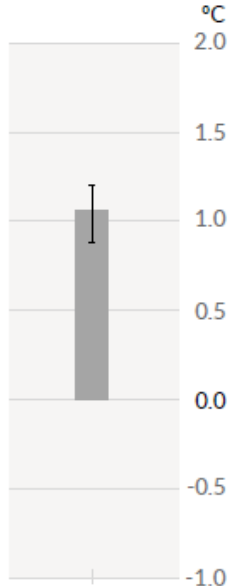
b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)



Origine précise du réchauffement observé : GES versus aérosols

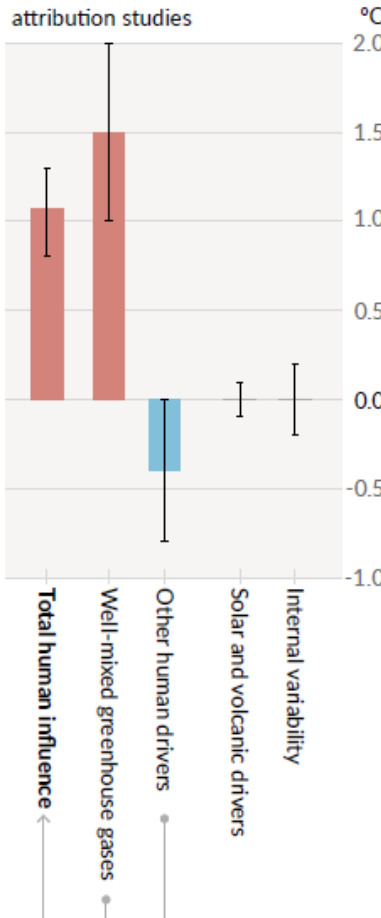
Observed warming

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

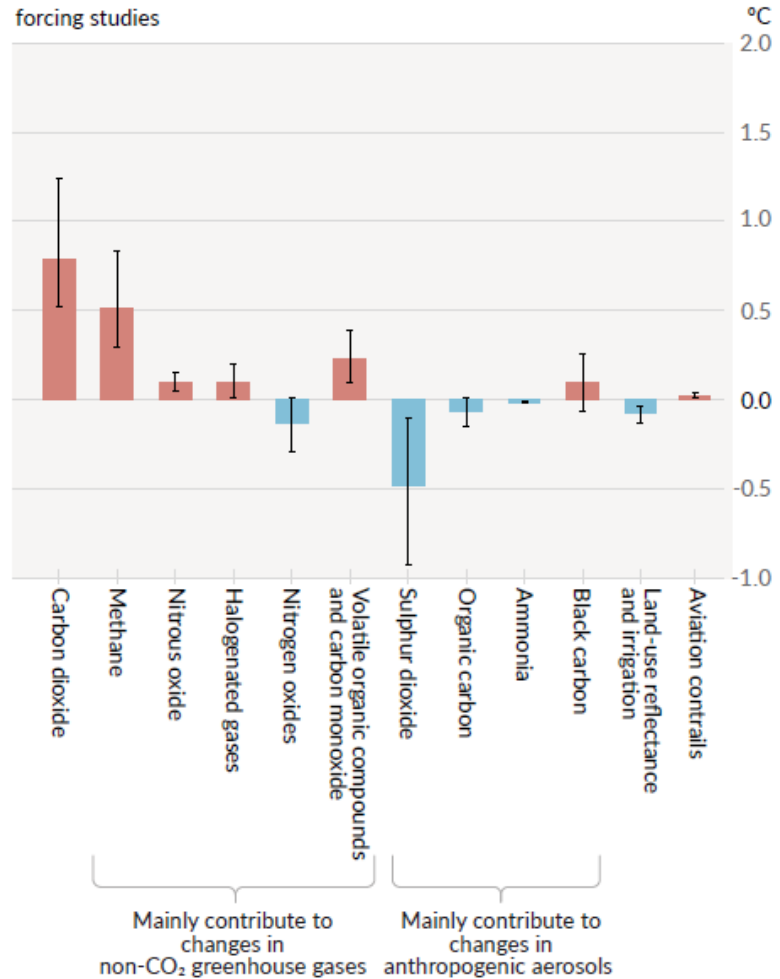


Contributions to warming based on two complementary approaches

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



c) Contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from radiative forcing studies



Merci de votre attention!



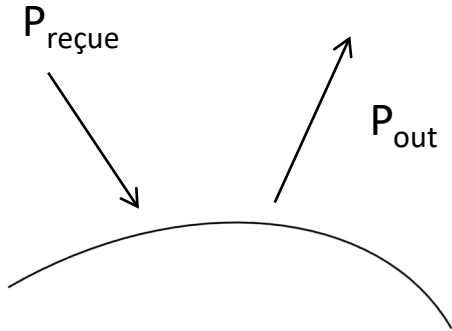
PAS DE CADEAUX
CETTE ANNÉE...



FAUT-IL CRÉER UNE BANQUE
POUR LE CLIMAT ?



Perturbations de l'effet de serre et forçages radiatifs



Flux radiatif net au sommet de l'atmosphère :

$$N = P_{reçue} - P_{out}$$

à l'équilibre $N = 0$

$N(\vec{E}, \vec{I}, T_S)$; E_i : variables externes ; I_j : variables internes ; $T_S = T_{surf}$

$$\Delta N = \sum_i \frac{\partial N}{\partial E_i} \Delta E_i + \left(\frac{\partial N}{\partial T_S} + \sum_j \frac{\partial N}{\partial I_j} \frac{\partial I_j}{\partial T_S} \right) \Delta T_S$$

$\underbrace{\Delta F_i}_{\text{Forçage radiatif}}$

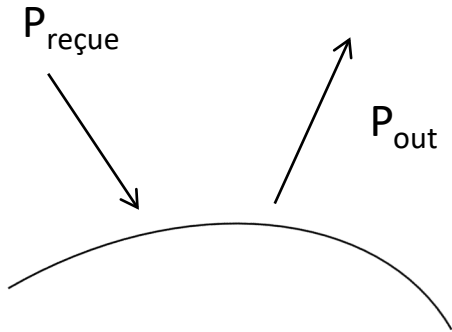
$\underbrace{\left(\frac{\partial N}{\partial T_S} + \sum_j \frac{\partial N}{\partial I_j} \frac{\partial I_j}{\partial T_S} \right)}_{\text{Réponse du système climatique}} \Delta T_S$

$\Delta N = 0$ à l'équilibre, soit $\Delta T_S = G \Delta F$ avec $\Delta F = \sum_i \Delta F_i$

Avec $G^{-1} = -\frac{\partial N}{\partial T_S} - \sum_j \frac{\partial N}{\partial I_j} \frac{\partial I_j}{\partial T_S}$; G gain du système

$$G^{-1} = G_0^{-1} - R$$

Perturbations de l'effet de serre et forçages radiatifs



Flux radiatif net au sommet de l'atmosphère :

$$N = (P_{reçue} - P_{out}) / 4\pi R^2$$

à l'équilibre $N = 0$

$N(\vec{E}, \vec{I}, T_S)$; E_i : variables externes ; I_j : variables internes ; $T_S = T_{surf}$

$$\Delta N = \sum_i \frac{\partial N}{\partial E_i} \Delta E_i + \left(\frac{\partial N}{\partial T_S} + \sum_j \frac{\partial N}{\partial I_j} \frac{\partial I_j}{\partial T_S} \right) \Delta T_S$$

$$\underbrace{\Delta F_i}_{\text{Forçage radiatif}}$$

Forçage radiatif

(W.m⁻²)

Réponse du système climatique

$\Delta N = 0$ à l'équilibre, soit $\Delta T_S = G \Delta F$ avec $\Delta F = \sum_i \Delta F_i$

Avec $G^{-1} = -\frac{\partial N}{\partial T_S} - \sum_j \frac{\partial N}{\partial I_j} \frac{\partial I_j}{\partial T_S}$; G gain du système

$$G^{-1} = G_0^{-1} - R$$

Gain du système climatique

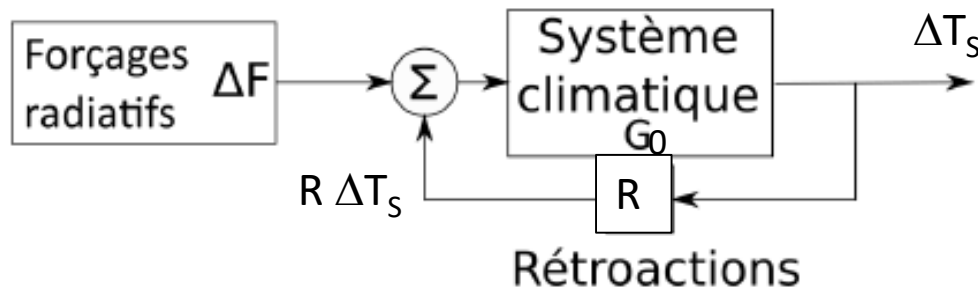
$$G_0^{-1} = -\frac{\partial N}{\partial T_S} \text{ et } R = \sum_j \frac{\partial N}{\partial I_j} \frac{\partial I_j}{\partial T_S}$$

G_0 : gain du système en l'absence de rétroactions

R : rétroactions du système climatique

$$G = \frac{G_0}{1 - G_0 R}$$

Analogie avec un circuit électrique bouclé :



$$\Delta T_S = G_0 (\Delta F + R \Delta T_S)$$

Rétroactions du système climatique

$$G = \frac{G_0}{1 - G_0 R}$$

- $R = 0$

$$G = G_0$$

- $R > 0$

$G > G_0$: rétroaction positive ; ex :

T_S augmente \rightarrow fonte des glaces \rightarrow albédo diminue $\rightarrow T_S$ augmente

T_S augmente \rightarrow vapeur d'eau augmente \rightarrow effet de serre augmente $\rightarrow T_S$ augmente

- $R < 0$

$G < G_0$: rétroaction négative ; ex :

T_S augmente \rightarrow pertes par rayonnement augmentent $\rightarrow T_S$ diminue

Modélisation des changements climatiques

Réponse du système climatique à une perturbation:

$$C \frac{d\Delta T_S}{dt} = \Delta F - G^{-1} \Delta T_S$$

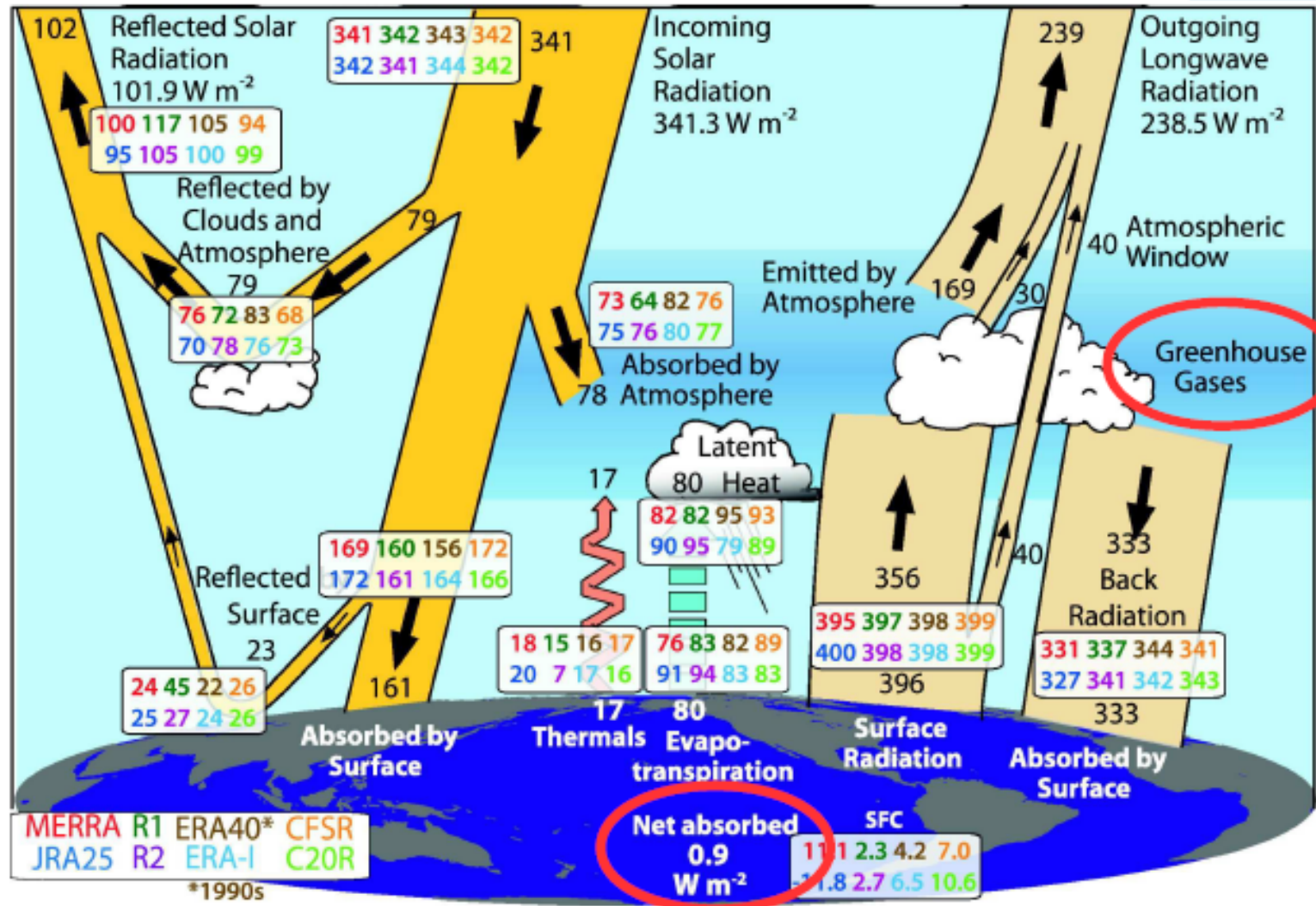
C : capacité thermique du système en $\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$

On obtient $\Delta T_S = (\Delta T_S)_0 (1 - e^{-t/\tau})$

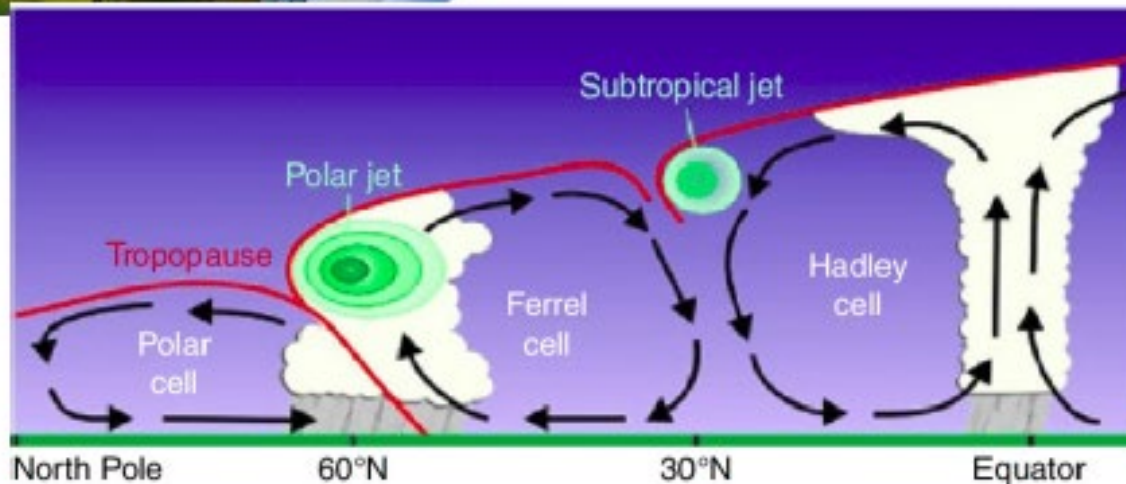
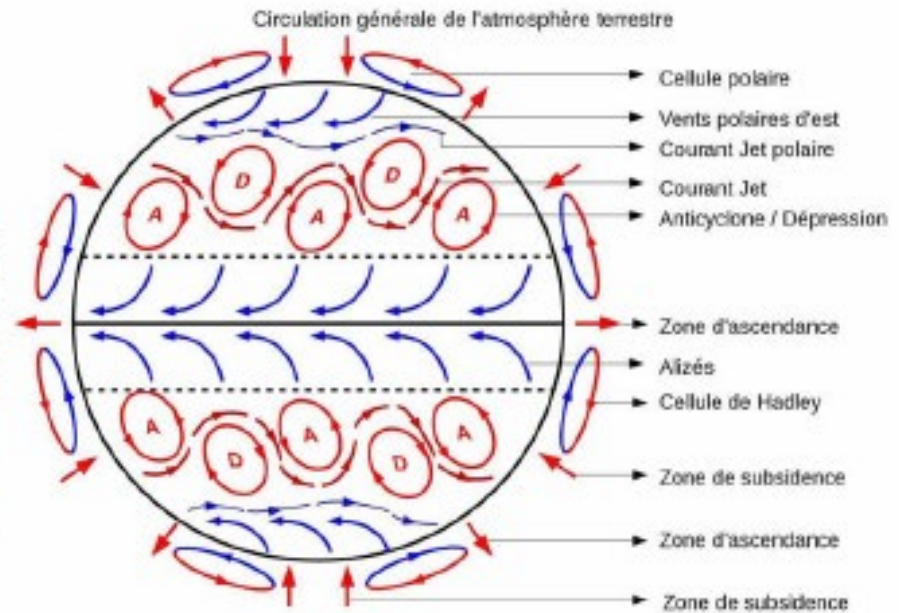
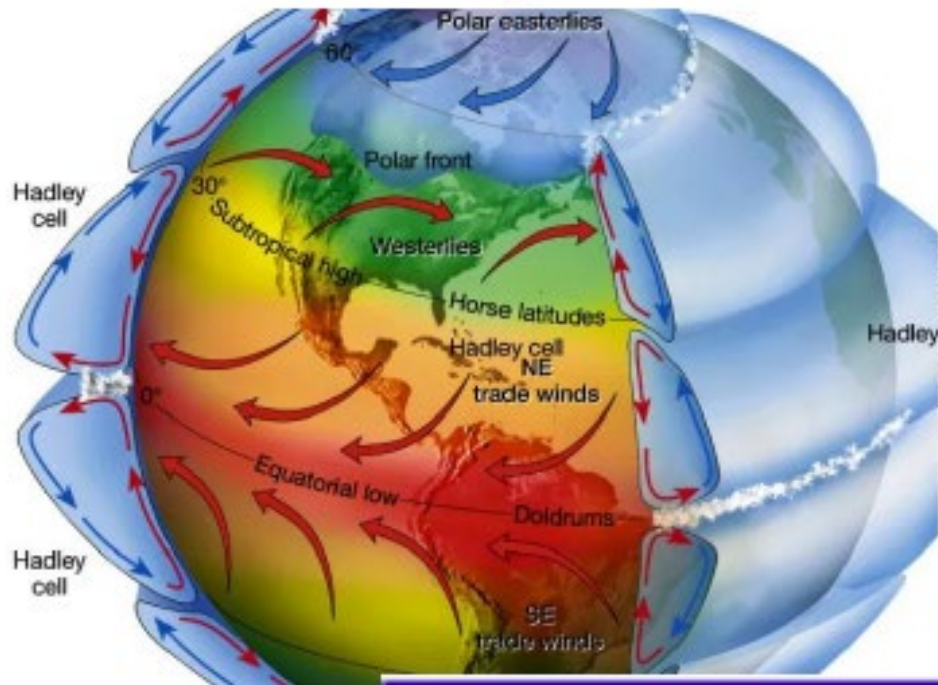
$(\Delta T_S)_0 = G \Delta F$; $\tau = C G$

A.N : voir TD

Bilan radiatif terrestre global

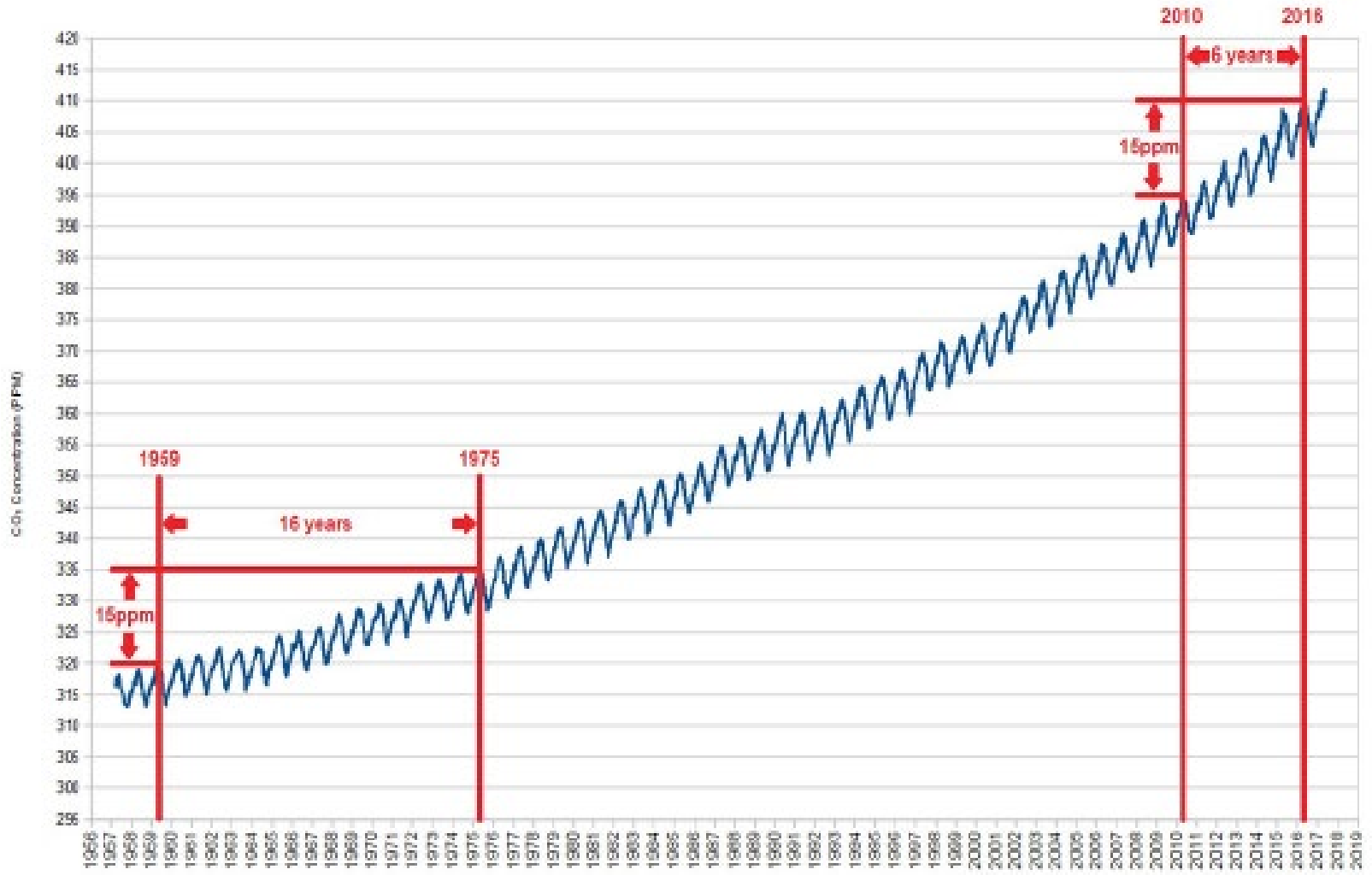


Circulation générale dans l'atmosphère

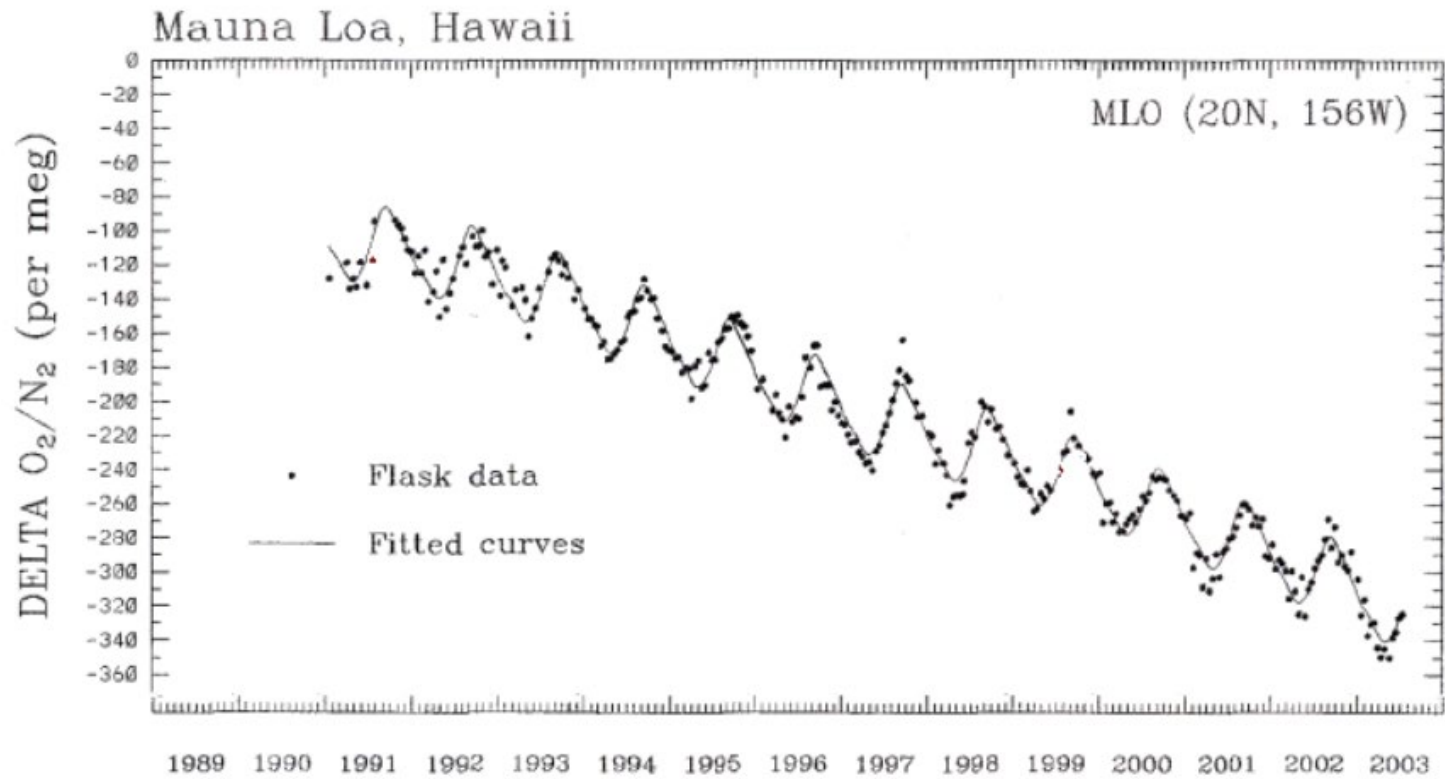


Atmospheric CO₂ concentration

Data: Scripps Institution of Oceanography



@KevPluck



-04 12 19 34

<http://bluemoon.ucsd.edu/plotfiles/mlfig.pdf>

http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/CCCIC/ressources/atm_synth1

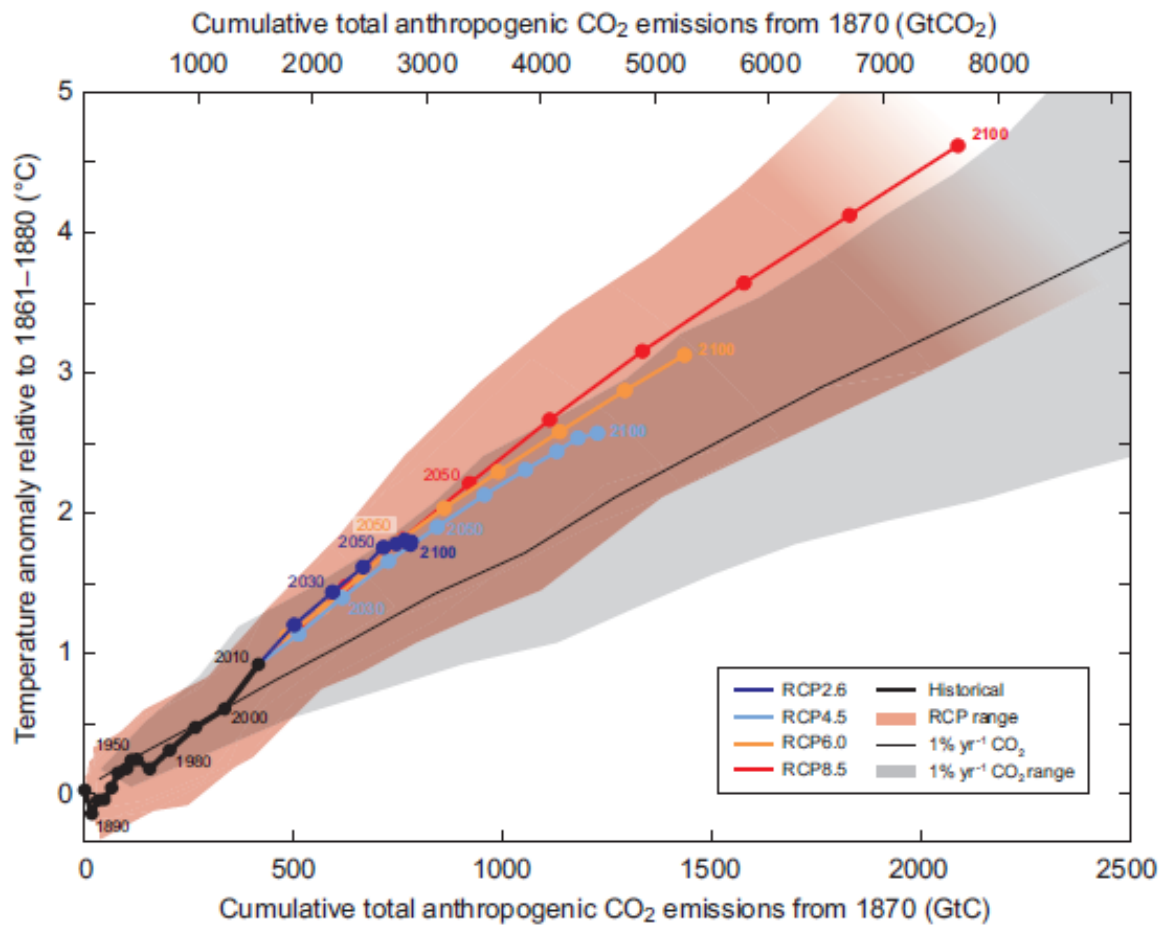


Figure SPM.10 | Global mean surface temperature increase as a function of cumulative total global CO₂ emissions from various lines of evidence. Multi-model results from a hierarchy of climate-carbon cycle models for each RCP until 2100 are shown with coloured lines and decadal means (dots). Some decadal results are labeled for clarity (e.g., 2050 indicating the decade 2040–2049). Model results over the historical period (1860 to 2010) are indicated in black. The coloured plume illustrates the multi-model spread over the four RCP scenarios and fades with the decreasing number of available models in RCP8.5. The multi-model mean and range simulated by CMIP5 models, forced by a CO₂ increase of 1% per year (1% yr⁻¹ CO₂ simulations), is given by the thin black line and grey area. For a specific amount of cumulative CO₂ emissions, the 1% per year CO₂ simulations exhibit lower warming than those driven by RCPs, which include additional non-CO₂ forcings. Temperature values are given relative to the 1861–1880 base period, emissions relative to 1870. Decadal averages are connected by straight lines. For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material. (Figure 12.45; TSTFE.8, Figure 1)