

TSE101 - Partie 1 / Chapitre 2

Climat : physique, passé et futur

Philippe Ciblat

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris



- Energies du système-Terre
 - Chaleur solaire (loi de Planck, cycles de Milankovitch)
 - Chaleur primitive
- Effet de serre
 - Forçage et Bilan radiatif (rayonnement électro-magnétique)
 - Modèles atmosphériques multi-couches thermiques
 - Lien Température/GES
- Paléoclimat
 - Techniques de mesure du climat passé
 - Analyse de quelques périodes passées
 - ↪ Origine et impact sur l'atmosphère et les températures
 - ↪ Impact sur la biodiversité de l'époque
- Climat futur (via rapports du GIEC)
 - Histoire du GIEC
 - Sources de GES (par origine, par pays, par revenu)
 - Scénarios du GIEC

Section 1 : Energies du système-Terre

Source 1: Chaleur solaire [1824]

Tout corps (dont le soleil) émet un rayonnement électromagnétique

Loi de Planck

Spectre du rayonnement dépend de la température du corps:

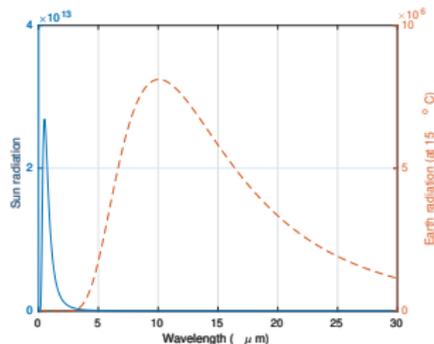
$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

avec λ longueur d'onde (en m), T température en Kelvin, c célérité de l'onde, k cste de Boltzmann, h cste de Planck

$$F = \int_{\lambda} L(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

avec σ cste de Stefan-Boltzmann

- $F_{S, TX, 5800K} = 64,2 \text{ MW/m}^2$
- $F_{T, TX, 288K} = 390 \text{ W/m}^2$



Source 1: Chaleur solaire sur Terre

- Rayonnement à distance R du soleil (de surface $4\pi R_{\odot}^2$)

$$4\pi R^2 F = 4\pi R_{\odot}^2 F_{S, TX}$$

Donc, à la distance de la Terre;

$$F = (700000/152000000)^2 \cdot 64 \cdot 2.10^6 = 1362 \text{W/m}^2$$

- Mais la Terre (de section πR^2) est elle-même une sphère.
Donc

$$\pi R^2 F = 4\pi R^2 F_{T, RX} \Rightarrow F_{T, RX, air} = 340 \text{W/m}^2$$

- Effet Albedo de 30% environ

$$F_{T, RX, sol} = 240 \text{W/m}^2$$

Cycles de Milankovitch [1941]: excentricité

Variation des positions de la Terre par rapport au Soleil

- distance
- surfaces exposées
- Plan elliptique variant → variation 400.000 ans

$$d(\theta) = \frac{d_c}{1 - e \cos(\theta)}$$

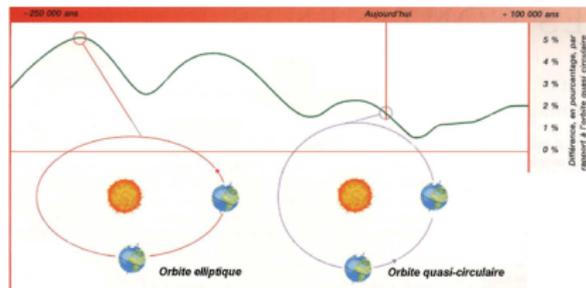
$$d_{\max} \approx (1 + 2e)d_{\min}$$

$$F_e = (1 + 0,5e^2)F_c$$

avec

$$e : 0 \rightarrow 0,05$$

↪ modifie l'énergie reçue et la répartition dans l'année



source: M. Milankovitch, "Kanon der Erbbestahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem",
Königliche Serbische Akademie, 1941

Cycles de Milankovitch [1941]: obliquité

- Axe de la Terre non perpendiculaire au plan elliptique → variation 40.000 ans
Au cercle polaire, forçage

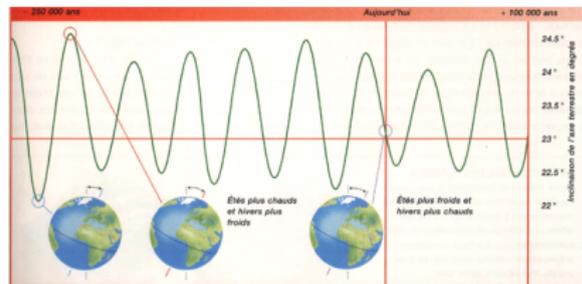
$$\text{min} : F \underbrace{\cos(66 - 21)}_{0,66}$$

$$\text{max} : F \underbrace{\cos(66 - 24,5)}_{0,70}$$

Ecart maximal: 6%

↪ Si plus oblique,

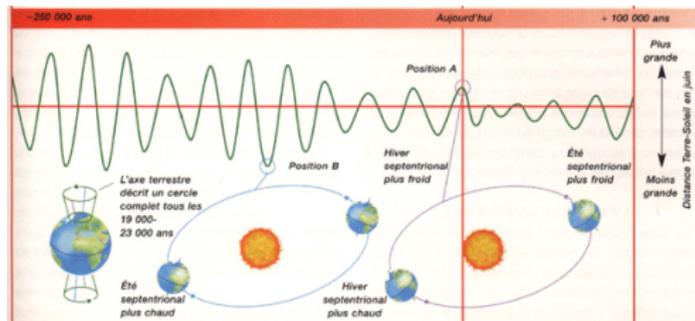
- intensité plus forte des saisons en hémisphère Nord
- été plus chaud et fonte des glaces aux pôles
- circulation de la chaleur modifiée
- tendance à l'âge interglaciaire



source: M.A. Mélières, "La théorie astronomique du climat", site internet CNRS

Cycles de Milankovitch [1941]: précession

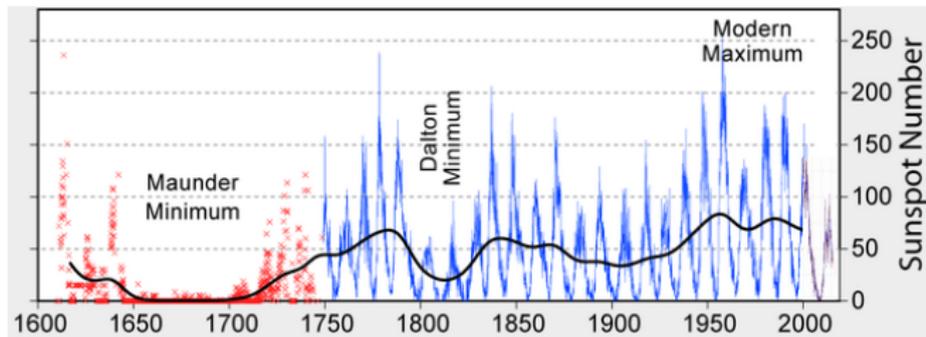
- Oscillation de l'axe de la Terre autour de celui de l'obliquité → variation 20.000 ans



↳ impact sur les saisons proche de l'obliquité

- Combinaison avec périhélie (proche) et aphélie (lointain)
- Chaque 20kan, conjonction angle maximal à la périhélie et donc été chaud
- Période glaciaire de 10kan et interglaciaire de 10kan possible

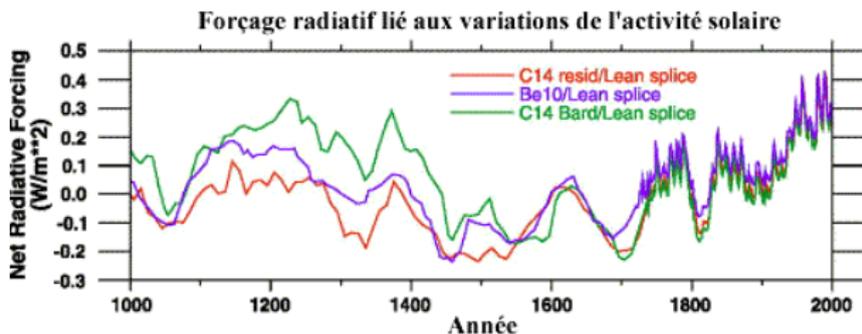
Taches solaires



↪ couramment, cycle de 11 ans (avec $\pm 0,5 \text{ W/m}^2$)

source: R.A. Rohde, "Global Warming Art project"

Insolation: quantité d'énergie reçue au sommet de l'atmosphère



environ $\pm 0,3 W/m^2$

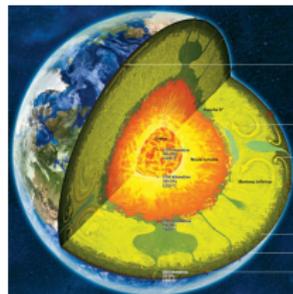
- Petit âge glaciaire (1350-1850)
- Minimum de Maunder (1645-1715)
- Optimum médiéval (800-1300)

source: E. Le Roy Ladurie, "Histoire du climat depuis l'an mil", 1967 ; T. Crowley et al., "The Earth Climate: Paleoclimatology", Oxford University Press, 1991

Source 2: Chaleur primitive

Chaleur interne à la Terre

- Magma et donc volcanisme
- Environ $0,1 \text{ W/m}^2$



- marginal en forçage radiatif
- sauf effet secondaire
 - i) poussière (refroidissement par albedo),
 - ii) rejet de SO_2 (refroidissement par albedo) à durée de vie faible mais
 - iii) rejet de CO_2 faible (250Mt par an) à durée de vie longue
- Ex.: Tambora (Indonésie) en 1815 (année sans été en 1816)

Hypothèse: la Terre sans atmosphère

- Seul transfert de chaleur via rayonnement (sous vide)
- Terre est un corps inerte, donc entrée = sortie
- Sans effet de serre, équilibre radiatif au sol

$$\sigma T_{T,RX,sol}^4 = 240 \Leftrightarrow T_{T,RX,sol} = \sqrt[4]{240/5,67 \cdot 10^{-8}}$$

$$T_{T,RX,sol} \approx -18^\circ\text{C}$$

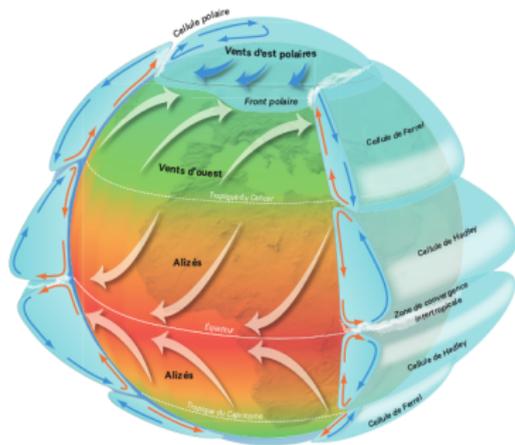
- Modification de l'équilibre radiatif (cf. Section 2): apport de chaleur changé
- Mais aussi transfert temporel de chaleur possible via sol
- Mais aussi transfert géographique de chaleur possible via atmosphère et océan
 - Conduction (contact): théorie de Fourier
 - Convection (mouvement): théorie de mécanique des fluides

Configuration des températures différentes à cause de l'atmosphère.
Cela induit

- des climats différents
- de nouvelles forces (vent, courant marin) exploitables en plus du solaire (source 1) et de la géothermie (source 2)

source: J.L. Dufresne, "Effet de serre: découverte et analyse", HDR, 2009

Circulation atmosphérique



Si vent de surface va vers le Sud (en hémisphère Nord), alors Coriolis implique un déplacement vers la droite dans le sens du déplacement et donc vers l'Ouest

- Cellule de Hadley: air chaud de l'équateur monte et remplacé par l'air des tropiques (où il redescend par refroidissement)
- Cellule polaire: air froid descend et va vers les basses latitudes
- Cellule de Ferrel: redistribution de la chaleur entre équateur et pôles. Vent de surface poussé vers les hautes latitudes

source: C. Grateloup, "Atlas historique de la Terre", 2022

Circulation océanique



Actions combinées:

- vents
- rotation de la Terre
- température et salinité
- marées et fonds marins

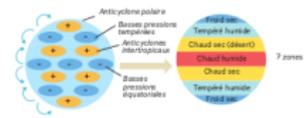
- Courant de surface (vent et Coriolis): eau chaude
- Courant de profondeur (densité de l'eau): eau froide
- Exemples:
 - Circulation thermohaline: au Nord, plus froide et salée (par évaporation antérieure) et donc s'enfonce
 - Remontées d'eaux froides (*upwelling*): vent pousse les eaux de surface et donc remontée des eaux de profondeur (riche en nutriments par décomposition). Courant des Canaries (eau froide et poissonneuse au large du Maroc/Sénégal car les Alizées poussent l'eau de surface loin des côtes)

Zones climatiques

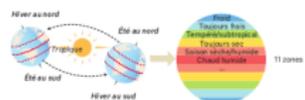
1^{er} facteur : le chaud et le froid



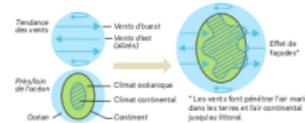
2^e facteur : les masses d'air (fortes et faibles pressions)



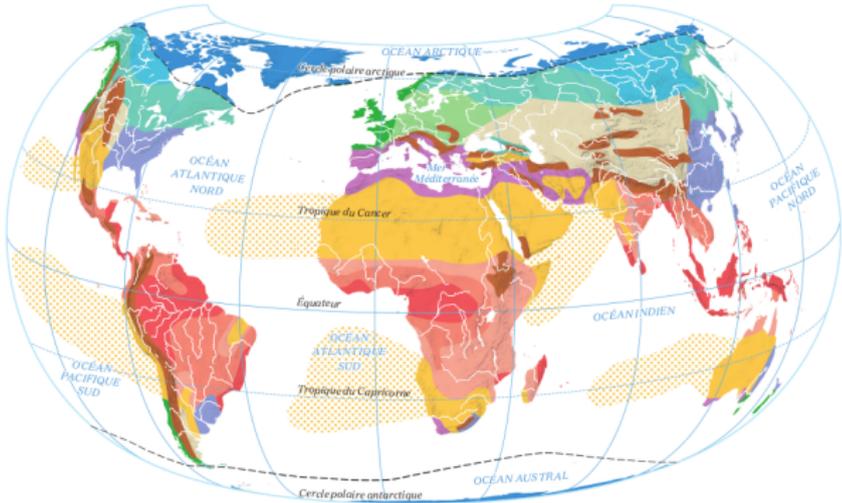
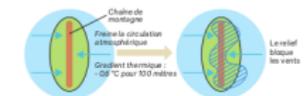
3^e facteur : l'alternance saisonnière



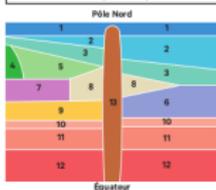
4^e facteur : continental/océanique



5^e facteur : l'altitude



Répartition théorique des climats sur un continent du pôle à l'équateur



- 1 Climat polaire
 - 2 Climat continental froid à grande amplitude thermique
 - 3 Climat tempéré froid
 - 4 Climat hyperocéanique (frais à faible amplitude thermique)
 - 5 Climat océanique (frais à amplitude thermique modérée)
 - 6 Climat tempéré humide à amplitude thermique très marquée
 - 7 Climat à saisonnalité forte (hiver tempéré doux, été subtropical sec), souvent appelé « méditerranéen »
 - 8 Climat aride à été chaud et hiver froid
 - 9 Climat aride à été torride et hiver chaud
 - 10 Climat chaud à saison humide courte (Climat tropical sec ou sahélien)
 - 11 Climat chaud avec une saison humide marquée (Climat tropical humide)
 - 12 Climat constamment chaud et humide (équatorial)
 - 13 Climat montagneux
- Limite des températures moyennes inférieures à 10°C pour le mois le plus chaud
□ Zone maritime à faibles précipitations (< 500 mm/an)

source: C. Grateloup, "Atlas historique de la Terre", 2022

Section 2 : Effet de serre (atmosphérique)

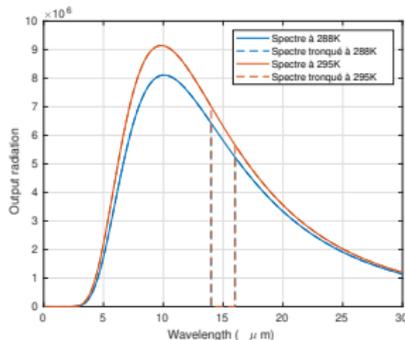
Principe 1

- la Terre reçoit du rayonnement (solaire) autour d'une fréquence f_{RX}
- la Terre envoie du rayonnement (tellurique) autour d'une fréquence f_{TX} différente (car engendrée par des températures différentes)
- L'atmosphère
 - laisse passer à f_{RX}
 - ne laisse pas passer à f_{TX}

l'atmosphère agit comme un filtre passe-bande d'un certain gabarit mais
la fabrication de la réponse fréquentielle du filtre non triviale

Principe 2

- la Terre (vue du ciel/satellite) admet un équilibre radiatif (système fermé)
 - énergie entrante = énergie sortante
- mais l'atmosphère absorbe une partie de l'énergie rayonnée par le sol (principe 1)
 - certaines molécules (H_2O , CO_2 , CH_4 , etc) sont excitées par ce rayonnement et « pompent » l'énergie
 - bilan énergétique modifié et ré-équilibrage via modification du spectre de Planck par hausse de la température



Absorption totale de 14 à 16 μm

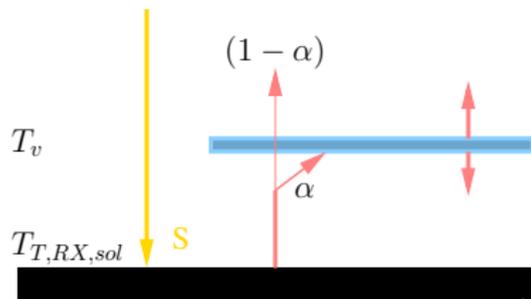
↪ température de 288 à 295°K
(+7°)

↪ forçage de 390 à 429W/m²
(+39)

- Rayonnement infrarouge (chaleur obscure) Herschel [1799]
- Notion d'effet de serre terrestre (filtrage) Fourier [1824]
- Valeur du flux solaire Pouillet [1838]
- Composition de l'atmosphère et effet de serre .. Tyndall [1864]
- Mesure du spectre solaire infrarouge Langley [1887]
- Calcul de la température en fct du CO₂ Arrhenius [1896]
 - Doublement d'une concentration en CO₂ conduit à +5°C
 - Loi logarithmique entre concentration en CO₂ et température
 - mais i) principale bande d'absorption du CO₂ non considérée, ii) absorption du CO₂ surestimée par rapport à H₂O, iii) modèle à une couche (de température atmosphérique) erroné
- Atmosphère, eau et climat avec CO₂ variant .. Manabe [1967]

*source: S. Manabe et R. Wetherald, "The effect of doubling of CO2 concentration in the atmosphere",
Journal of the Atmospheric Sciences, 1975*

Exemple-jouet



Loi de Kirchhoff: taux d'absorption = taux d'émission
Budget surface et espace:

$$\begin{cases} S &= \sigma T_{T,RX,sol}^4 - \alpha \sigma T_v^4 \\ S &= (1 - \alpha) \sigma T_{T,RX,sol}^4 + \alpha \sigma T_v^4 \end{cases}$$

$$T_{T,RX,sol} = \sqrt[4]{\frac{2S}{(2-\alpha)\sigma}}$$

Deux cas extrêmes:

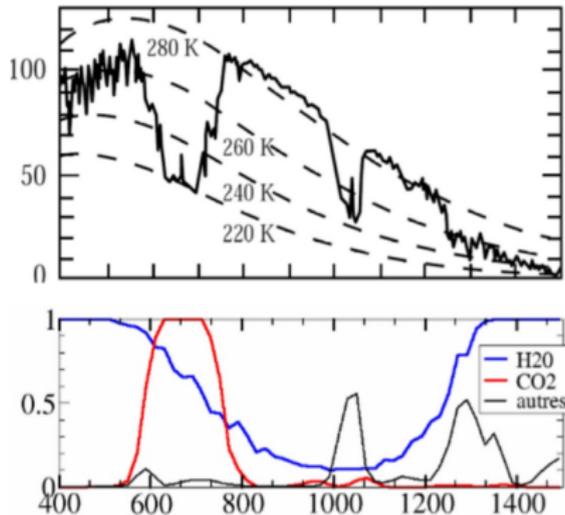
- $\alpha = 0$: pas d'effet de serre
- $\alpha = 1$: hausse de la température au sol de $\sqrt[4]{2} \approx 18\%$

Défauts du modèle:

- Gradient d'absorption
- Gradient de température (guidée par la densité de l'air)

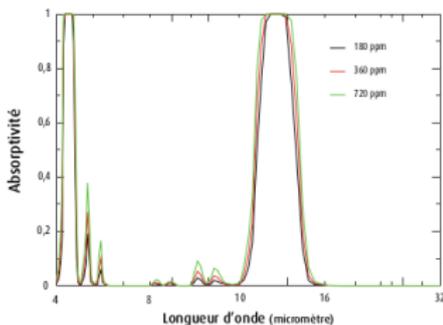
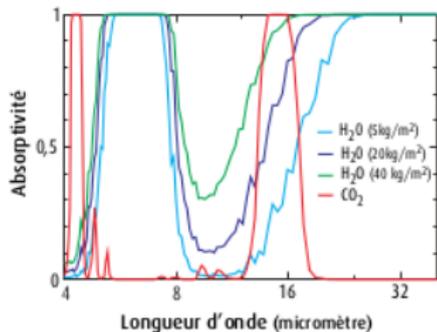
Taux d'absorption par des gaz à effet de serre

- Spectre visible du haut de l'atmosphère (satellite Nimbus4)
- Absorption des molécules avec des concentrations récentes



source: R. Dickinson, "Modeling climate changes due to carbon dioxide increase", *Carbon Dioxide Review*, 1982 ; B. Legras, "Radiative transfert and greenhouse effect", ENS Ulm, 2023

Evolution du taux d'absorption



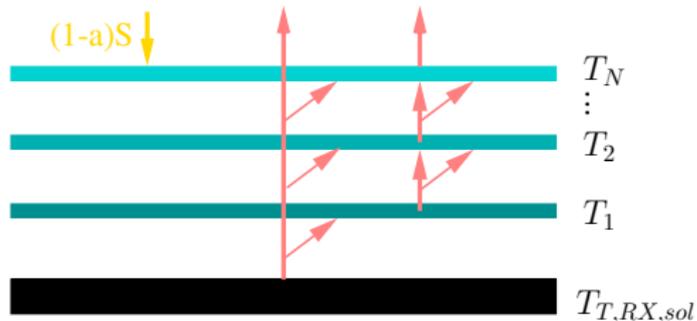
- Absorption via H_2O varie fortement avec humidité (valeur moy. de $20\text{kg}/\text{m}^2$)
- Absorption via CO_2 en régime saturé (pré ère industrielle)

Néanmoins effet de serre augmente bien avec concentration en CO_2

source: J.L. Dufresne, "l'effet de serre atmosphérique: plus subtil qu'on ne le croit!", Météorologie, 2011

Modèle plus réaliste (1/3)

Système à N couches avec température T_n à $n^{\text{ème}}$ couche



A la longueur d'onde λ ,

- Couche initiale: $F_0(\lambda) = L(\lambda, T_{T,RX,Sol})$
- Couche n : $F_n(\lambda) = (1 - \alpha_n)F_{n-1}(\lambda) + \alpha_n L(\lambda, T_n)$
- Couche finale: $(1 - a)S = (1 - \alpha_N)F_{N-1}(\lambda) + \alpha_N L(\lambda, T_N)$

avec l'effet Albedo a

Modèle plus réaliste (2/3)

En posant

- $u_n = F_n(\lambda)$
- $\beta_n = L(\lambda, T_n)$

on a

$$u_n = (1 - \alpha_n)u_{n-1} + \alpha_n\beta_n$$

avec $u_0 = L(\lambda, T_{T,RX,sol})$ et $u_N = (1 - a)S$

Suite arithmético-géométrique à raisons variables

$$T_{T,RX,sol} = \text{fct}(a, S, \{\alpha_n\}_n, \{T_n\}_n)$$

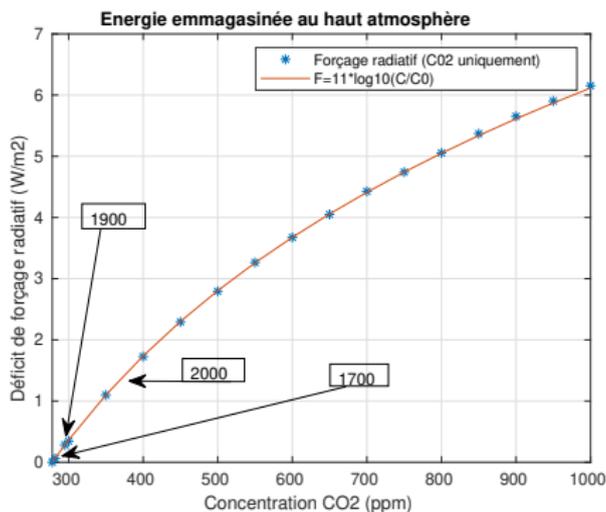
- Pas gradient de température, pas d'effet de serre ($F_n = F_0, \forall n$)
- Températures données par la convection atmosphérique
- Absorptions données par la densité des gaz à effet de serre

- A altitude $z < z_e$, flux non vu par l'extérieur
- A altitude $z > z_e$, flux non modifié
- A altitude $z = z_e$, flux vu par l'extérieur identique à $(1 - a)S$

$z_e =$ altitude d'émission équivalente (dépend de λ via $\alpha_n(\lambda)$)

- $z_e \approx 10\text{km}$ (troposphère) \rightarrow spectre de 217°K (car -56°C)
- Point singulier à $15\mu\text{m}$: $z_e \approx 32\text{km}$ (stratosphère) \rightarrow spectre de 238°K (car -35°C)

Lien entre forçage (F_N) et concentration



- Déficit en $F_N \rightarrow$ rééquilibre avec $F_0 \nearrow \rightarrow T_{T,RX,sol} \nearrow$
- Nombreux modèles: $\Delta T_{T,RX,sol} \approx \Delta F_N$
- Doublement du CO_2 implique un réchauffement de 3°C
- GIEC ($F_0 \text{ W/m}^2$): $\Delta F_0 = 1.9 \rightarrow 1.5^\circ$, $\Delta F_0 = 2.6 \rightarrow 1.7^\circ$,
 $\Delta F_0 = 4.5 \rightarrow 2.5^\circ$, $\Delta F_0 = 7 \rightarrow 3.5^\circ$, $\Delta F_0 = 8.5 \rightarrow 4.3^\circ$

Composition (naturelle) de l'atmosphère

En italique, les gaz à effet de serre (GES)/*GreenHouse Gas (GHG)*

Gaz	Molécule	%
Diazote	N ₂	78
Dioxygène	O ₂	21
<i>Vapeur d'eau</i>	H ₂ O	0 à 4
<i>Dioxyde de carbone</i>	CO ₂	0,0420000
<i>Méthane</i>	CH ₄	0,0001745
<i>Protoxyde d'azote</i>	N ₂ O	0,0000300
<i>Ozone</i>	O ₃	0,0000040

Ces gaz ont des impacts différents

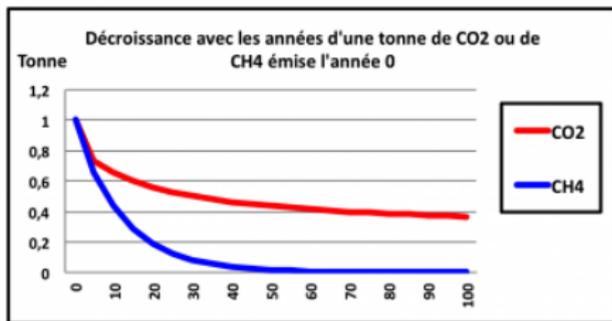
- en raison de la Chimie
- en raison de leur durée de vie

Calcul du CO₂ équivalent (1/2)

- Potentiel de Réchauffement Global (PRG)/ *Global Warming Potential (GWP)*

$$\text{PRG}_g = \frac{a_g}{a_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{\int_0^{T_i} x_g(t) dt}{\int_0^{T_i} x_{\text{CO}_2}(t) dt}$$

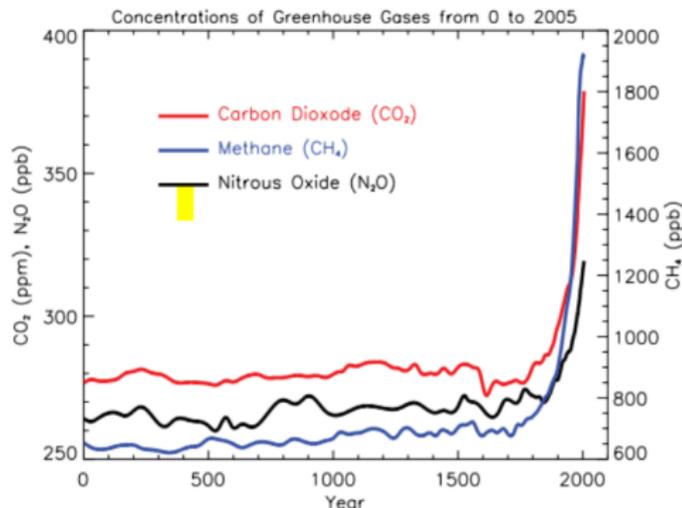
- a_g : efficacité radiative du gaz g (en W/(m².kg))
 - $x_g(t)$: taux de décomposition du gaz g à l'instant t
- Durée de vie (CO₂: 50 ~ 200 ans; CH₄: 12 ans; N₂O: 120 ans)



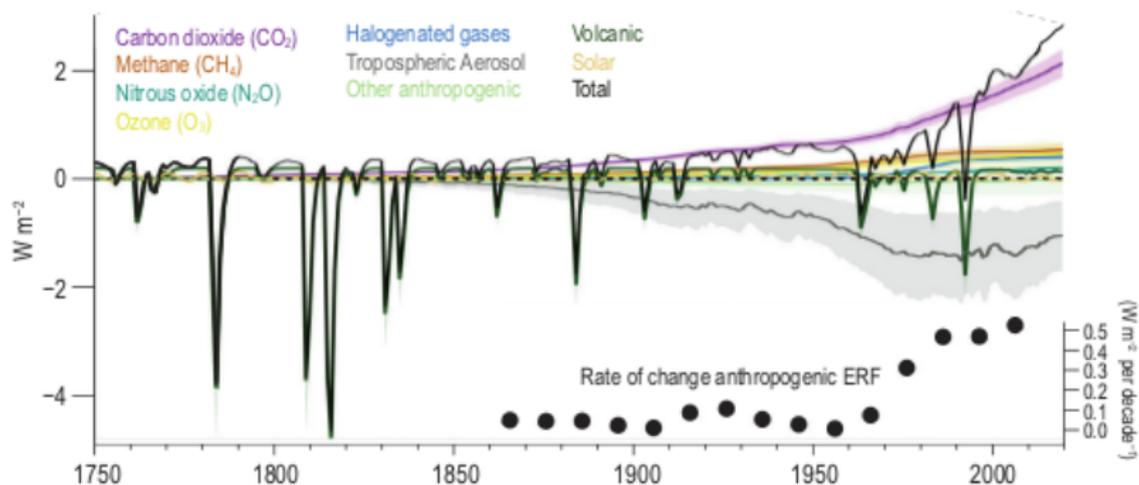
Calcul du CO₂ équivalent (2/2)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
$T_i = 20$ ans	1	84	264
$T_i = 100$ ans	1	28	273

- CO₂ n'est pas l'unique problème
- car progression des deux autres aussi



Bilan radiatif final



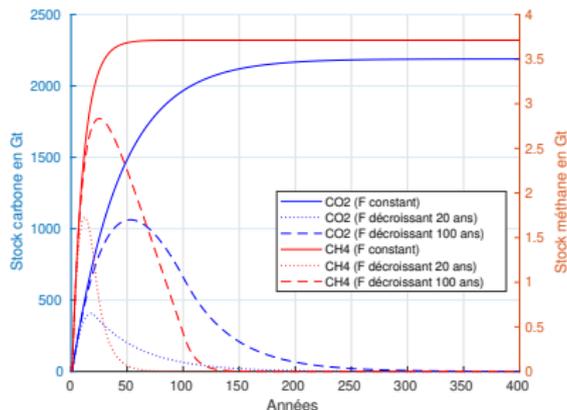
source: Rapport 6 du groupe de travail 1 du GIEC, 2022

Flux et stock

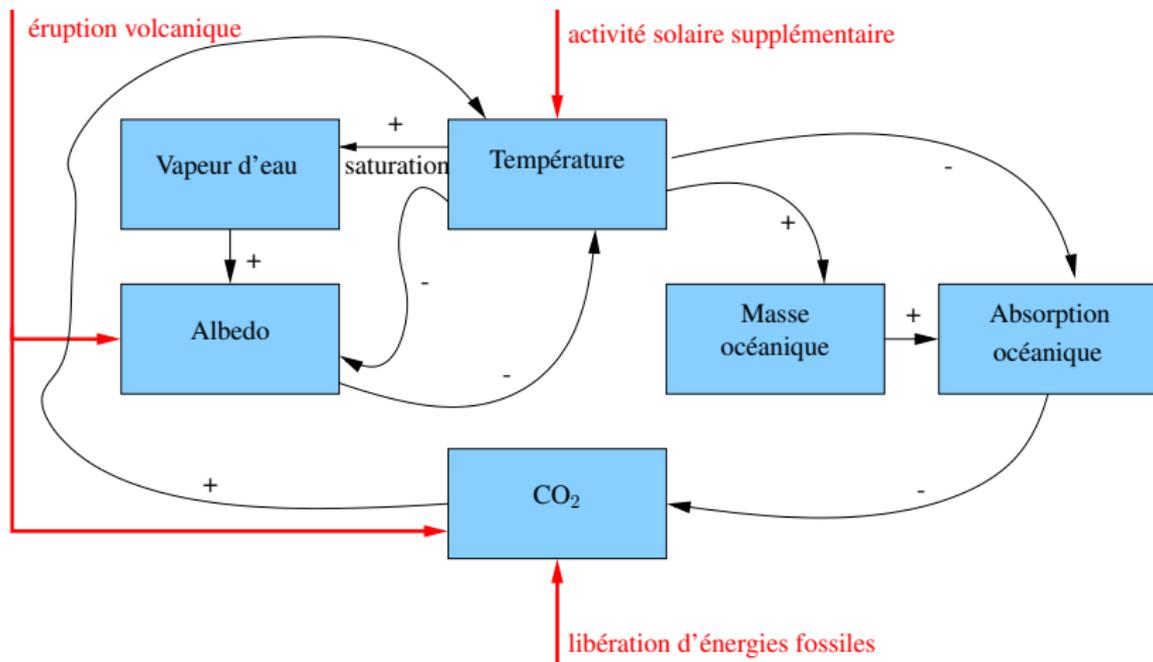
- S_n^g : stock du gaz g à l'année n
- F_n^g : flux du gaz g à l'année n

$$S_{n+1} = e^{-\tau_g} S_n^g + F_n^g = \sum_{k=0}^n e^{-\tau(n-k)} F_k^g + e^{-\tau_g(n+1)} S_0$$

avec $\tau_{\text{CO}_2} = \frac{\ln(2)}{30}$, $\tau_{\text{CH}_4} = \frac{\ln(2)}{7}$, $F_0^{\text{CO}_2} = 50\text{Gt}$, $F_0^{\text{CH}_4} = 350\text{Mt}$



Quelques boucles de rétroaction



Section 3 : Paléoclimat

- Rayonnement du soleil
 - Puissance solaire (10^9 ans): +9% dans un milliard d'années
 - Cycles de Milankovitch (10^4 ans)
 - Taches solaires (10 ans)
- Composition de l'atmosphère
 - Volcanisme: apport de GES
 - Erosion (des roches silicatées): retrait de GES
 - Végétation et les activités humaines (dont le vivant)
- Albedo
 - Glaces de surface
 - Végétation (donc le vivant)
- Tectonique des plaques (10^6 ans)
 - Modification des dynamiques océaniques et atmosphériques
 - Exemple: continents aux pôles → moins de pluie, moins d'érosion

Techniques de mesure (1/3)

- Notion de variabilité du climat vers le début XIX^e siècle



- Analyse des blocs erratiques
 - Analyse des moraines
 - Conservation des grands fauves
 - Anciens glaciers d'où climat variable
 - Cuvier [1812], Esmark [1824]
- Analyse d'impact sur les sociétés humaines depuis ~1970
 - Archives humainesmilliers d'années
 - Occupation des glaciers, quantité du couvert neigeux
 - Dates de vendange, dates des moissons
 - Hauteur/étiage des cours d'eau (par ex.: le Nil)
 - Précipitations (quantité d'eau, dates de la Mousson)

source: G. Cuvier, "Discours sur les révolutions de la surface du Globe", 1812 ; E. Le Roy Ladurie,

"Histoire du climat depuis l'an mil", 1967

Deux problèmes

- Paléomesure: à une date donnée, retrouver des informations de climat depuis ~ 1960
- Mesure de datations: absolue ou relative

Exemple étonnant: isotope carbone 14 (^{14}C)

- Quantité originelle de carbone 14
 - Rayons cosmiques
 - Activité solaire
- Quantité restante de carbone 14
 - Demi-vie de 5770 ans après mort de l'objet vivant étudié

Problème: même outil pour dater et analyser le climat

source: W. Libby et al., "Age determination by radiocarbon content : world-wide assay of natural radiocarbon", Science, 1949 ; E. Bard et al., "Radiocarbon spike at 14000 year BP in subfossil trees", Phil. Trans. of Royal Society, 2023

On cherche

- Température
- Précipitations, qualité de l'eau (salinité, acidité)
- Composition de l'atmosphère

On mesure via des archives centaines de millions d'années

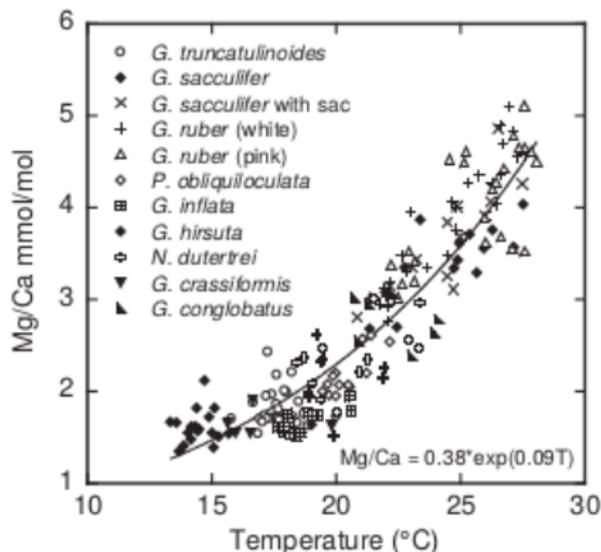
- Glace (carottage): composition
- Sédiments: composition et fossiles (coquillages)
- Dendrochronologie: taille et composition des cernes des arbres
- Palynologie: composition du végétal
- Paléo-écologie: composition des espèces ou pollen

Fiabilisation de la mesure par croisement d'archives

source: L. Mächler et al., "Laser-induced sublimation extraction for centimeter-resolution multi-species GHG analysis on ice cores", Atmospheric Measurement Techniques, 2023 ; C. Lafrance, "Histoire des climats dans la Terre d'Oman", Le Monde, 2023

Exemple: un marqueur (*proxy*) moléculaire

Marqueur = proportion Magnésium dans Calcium des foraminifères



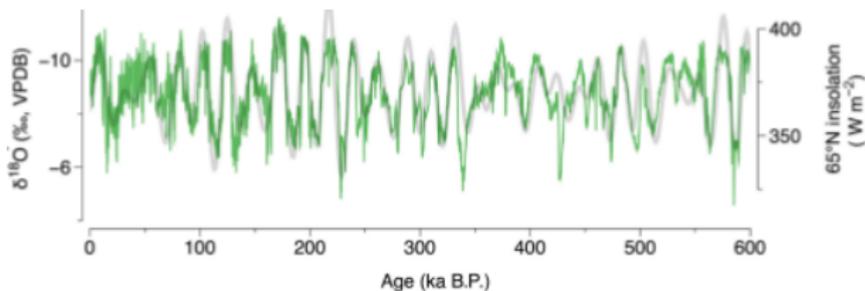
Paléo-thermomètre

source: S. Barker et al., "Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy", *Quaternary Science Review*, 2005

Exemple: un marqueur isotopique

Marqueur ($\delta^{18}\text{O}$) = proportion ^{18}O sur ^{16}O dans glaces/sédiments

- si froid, essentiellement évaporation de ^{16}O (car possible à température plus faible)
 - dans les concrétions/glaces: faible $\delta^{18}\text{O}$
 - dans les sédiments équatoriaux: fort $\delta^{18}\text{O}$



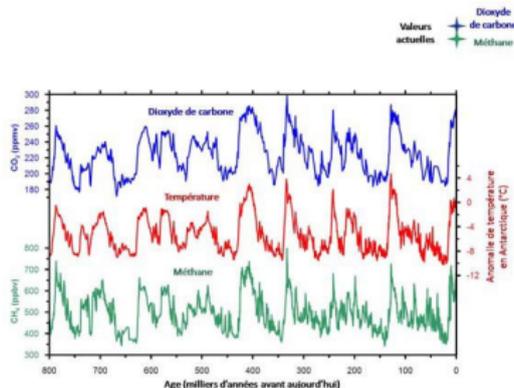
Paléo-thermomètre

source: G. Liu et al., "On the glacial-interglacial variability in $\delta^{18}\text{O}$ records", *Science Advances*, 2020 ;

J. Jouzel et a., "Climate instabilities: Greenland and Antarctic records", *CRAS*, 1994

Exemple: un marqueur atmosphérique

- Bulles d'air dans la glace
 - EPICA: *European Project for Ice Coring in Antarctica* (jusqu'à 800.000 ans)
 - Nouveau projet: beyond EPICA (jusqu'à 1,5 millions d'années)
 - Datations par les strates ou des isotopes

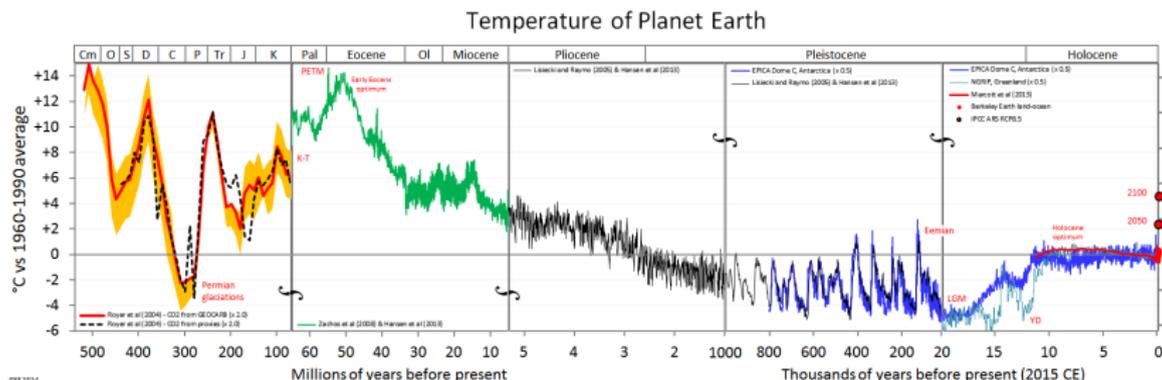


Paléo-gazomètre!

source: Universités de Grenoble-Alpes et de Berne ; C. Genthon et al., "Vostok ice core : climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle", *Nature*, 1987

Résultat 1: le $\delta^{18}\text{O}$ dans les sédiments

Retour à 540 millions d'années en arrière (via sédiments)



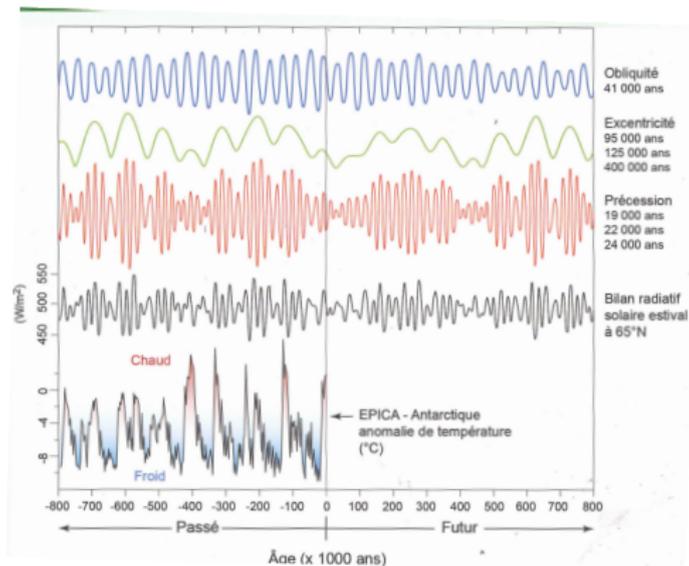
09P 2014

- Période glaciaire: 15-20.000 ans (avant holocène)
- Période très chaude: 50 millions d'années (éocène)
- $+4^{\circ}\text{C}$ jamais vu depuis quelques millions d'années

source: G. Fergus, 2007

Résultat 2: le $\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces

Retour à 800.000 ans en arrière



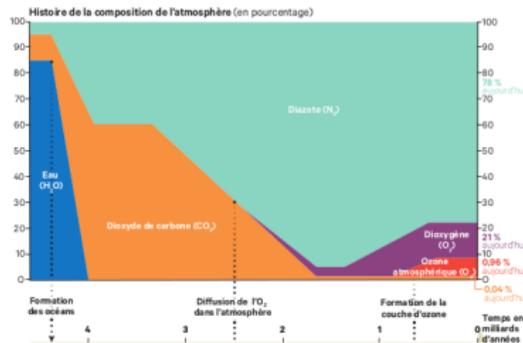
- Un lien entre température et cycles de Milankovitch

source: J. Hays et al., "Variations on the Earth's Orbit: pace maker of the ice ages", Science, 1976 ;

M. Magny et al., "Histoire du climat dans les montagnes du Jura", 2023

Composition de l'atmosphère

- Activité du soleil n'est pas l'unique explication
- Composition de l'atmosphère joue un rôle

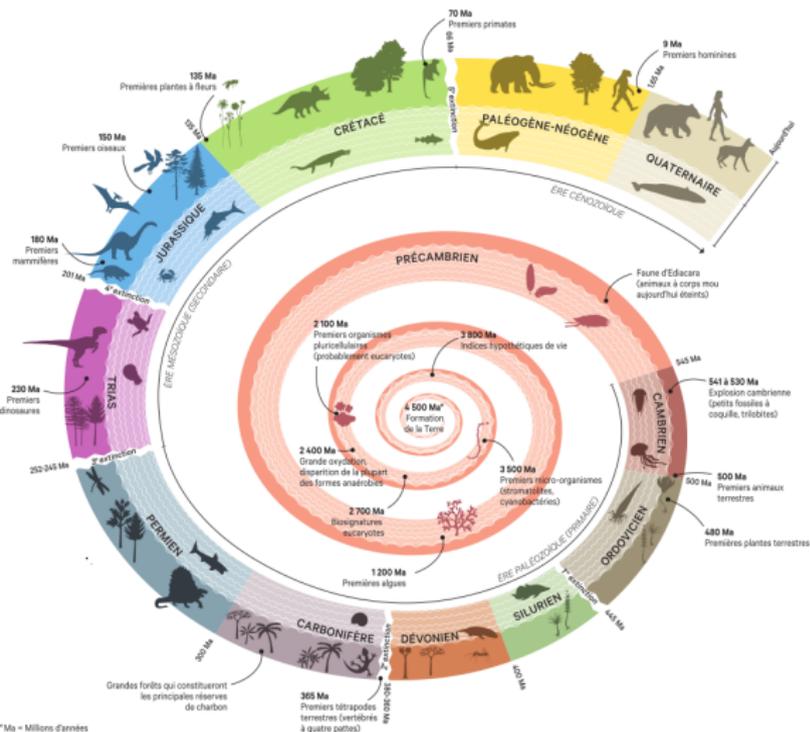


- Refroidissement terrestre (4,3 Ga): formation de l'océan
- Apparition de la vie dans l'océan (3,5 Ga):
 - fixation du CO₂: photosynthèse et érosion rocheuse
 - libération de O₂ dans l'océan puis dans l'atmosphère
 - transformation du O₂ en O₃ (ozone) par rayonnement solaire

source: D. Lowe et al., "Tectonic controls on atmospheric, climatic, and biological evolution 3.5-2.4 Ga",

Precambrian Research, 2007

Grandes périodes géologiques

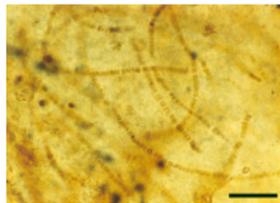


- **Précambrien (≤ 540 Ma):** rares données
- **Etapes du vivant:**
 - 2,5 Ga: aérobie
 - 540 Ma: ozone
- **Extinctions**
 - 450 Ma: Ordovicien
 - 365 Ma: Dévonien
 - 250 Ma: Permien
 - 200 Ma: Trias
 - 70 Ma: Crétacé

* Ma = Millions d'années

Grandes apparitions

- 3,5 Ga: stromatolithes avec cyanobactéries (anaérobiques)



Activité de photosynthèse via le taux décroissant de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

- 2,5 Ga: eukaryotes et organismes multicellulaires



Grande oxydation

- 700 Ma: fossiles à coque dure (la calcite)
- 540 Ma: explosion du vivant (poissons, terrestrialisation)

Dans la suite, apparitions souvent liées à des grandes extinctions

source: J.F. Moyen, "L'histoire de l'atmosphère", 2007

Grandes extinctions (1/3)

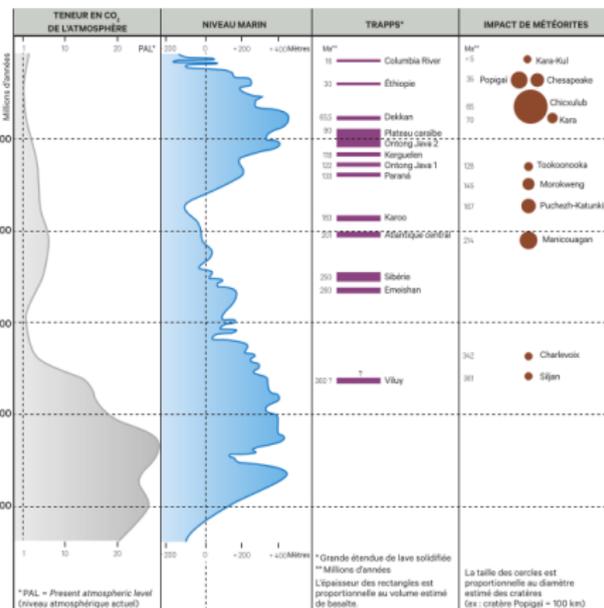
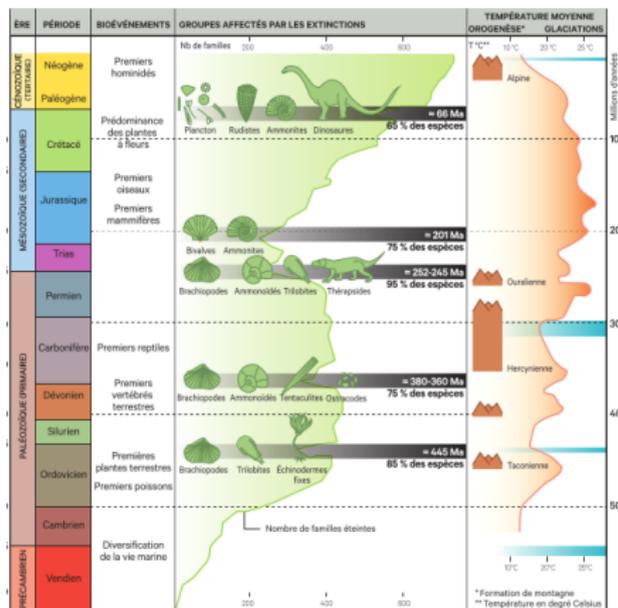
- 450 Ma: Ordovicien
 - diversification et explosion végétale (CO_2 à 4000 ppm)
 - ensuite baisse du CO_2 , baisse de 5°C , glaciation
- 365 Ma: Dévonien
 - poissons nombreux, premiers vertébrés terrestres
 - période chaude et humide et donc invasion de végétaux
 - baisse substantielle du CO_2 (mais encore 2000 ppm)
 - Hypothèses:
 - ↪ baisse température
 - ↪ altération couche ozone

source: J. Marshall et al., "UV-B radiation was the Devonian-Carboniferous boundary terrestrial extinction kill mechanism", Science Advances, 2020

Grandes extinctions (2/3)

- 250 Ma: Permien
 - Carbonifère (300 Ma):
 - ↳ grandes forêts et développement futur du charbon
 - ↳ Pangée à l'équateur: altération du CO₂ par érosion
 - ↳ baisse de CO₂ (de 1500 à 300 ppm)
 - Eutrophisation probable et anoxie
 - Eruption volcanique gigantesque (trapps de Sibérie)
 - ↳ refroidissement temporaire par effet Albedo
 - ↳ hausse de CO₂
- 200 Ma: Trias
 - Hypothèses
 - ↳ Ouverture de la Pangée, donc activité volcanique intense
 - ↳ Météorites moyennes mais nombreuses
 - Période suivante: développement des dinosaures et mammifères
- 70 Ma: Crétacé
 - Météorite gigantesque du Chicxulub au Yucatan
 - Activité volcanique intense au Deccan

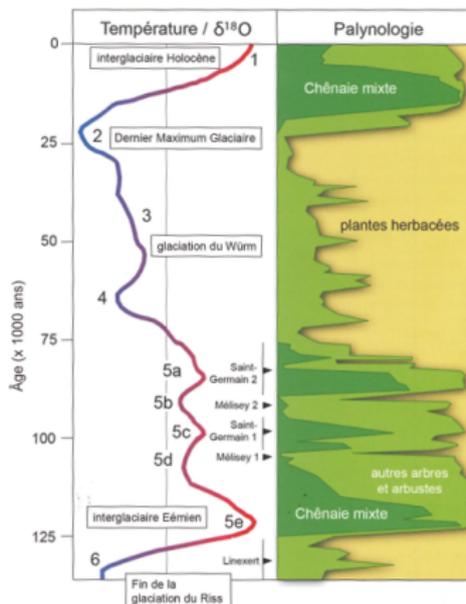
Grandes extinctions (3/3)



source: C. Grateloup, "Atlas historique de la Terre", 2022

Quelques effets récents sur la biodiversité

Analyse de la Tourbière de Grande-Pile (Haute-Saône)



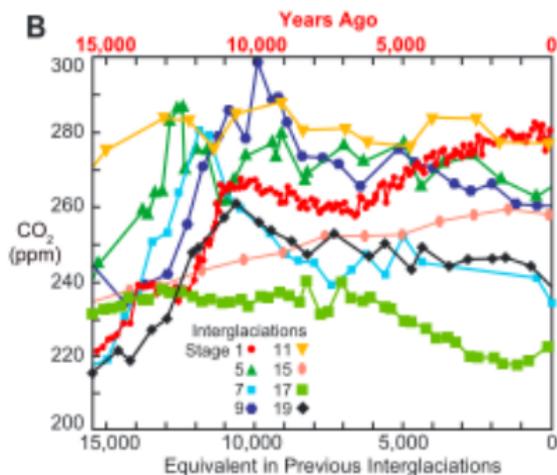
source: C. Woillard, "Grande Pile peat bog: a continuous pollen record for the last 140,000 years",

Quaternary Research, 1978

Quelques effets très récents sur la biodiversité (1/2)

Fin Néolithique:

- hausse du CO₂ (déforestation)
- hausse du CH₄ (riziculture)



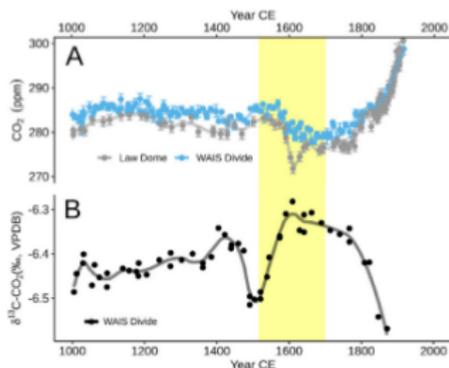
Ceci n'explique pas l'optimum de l'Holocène (9.000 → 5.000)

source: W. Ruddiman et al., "Late Holocene climate: natural or anthropogenic", *Reviews of Geophysics*,

2015

Quelques effets très récents sur la biodiversité (2/2)

- Dépeuplement de l'Amérique: petit âge glaciaire ?
 - arrivée de Cortés (1519) à Mexico
 - reforestation par dépeuplement: hausse du taux $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$



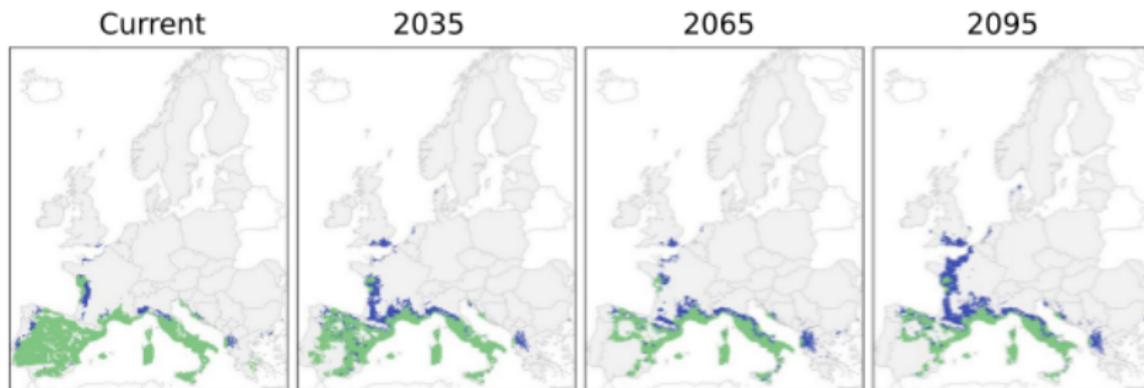
- Déforestation et pluviométrie (du Moyen-Age à la Révolution)
- Tambora (Indonésie) en 1815 (année sans été en 1816)

source: W. Ruddiman et al., "Late Holocene climate: natural or anthropogenic", *Reviews of Geophysics*, 2015 ; A. Koch et al., "Earth system impacts of the European arrival and Great dying on the Americas after 1492", *Quaternary Science Reviews*, 2019 ; J.B. Fressoz et al., "Les révoltes du ciel", 2020

Un effet futur sur la biodiversité

Aire du Chêne vert/*Quercus Ilex* pour RCP4.5

- vert: zone de présence
- bleu: zone possible mais non atteignable



source: A. Mauri et al., "EU-Trees4F, a dataset on the future distribution of the European tree species",
Nature, 2022

Section 4 : Climat futur

Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (*IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change*)

- Mesure de GES à Hawaï depuis 1958: courbe de Keeling
- Sciences du climat stabilisées ~ 1970
- Alertes scientifiques
 - 1979: Rapport de J. Charney (commandité par le gvt Carter)
 - 1988: Article de C. Genthon (avec C. Lorius et J. Jouzel) confirmant lien CO₂ et température
 - 1988: Audition de J. Hansen au Congrès étasunien
- Quelques remarques grand-public dès 1959

Les politiques commencent à examiner le problème

source: J. Charney, "Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment", 1979 ; A. Michel, "Le charbon que nous brûlons réchauffe la Terre", Sciences et Vie, 1959

Histoire du GIEC: contexte politique (1/3)

1972

- Conférence à Stockholm de l'ONU. Déclaration établissant un programme de mesures via l'Organisation Mondiale Météorologie (OMM) et demandant d'être attentif aux activités impliquant un changement climatique

1979



- Conférence à Genève de l'OMM et du Programme Nations Unies Environnement
- Premiers échanges au G7 à Tokyo en juin: « *augmenter le charbon en préservant l'environnement, substituer le charbon au pétrole, développer d'autres énergies notamment limitant la teneur de CO₂* »

source: V. Giscard d'Estaing, "Déclaration à la suite du sommet de Tokyo", juin 1979 ; J. Zillman,

"Historique des activités climatologiques", Bulletin de l'OMM, 2009

Histoire du GIEC: contexte politique (1/3)

1972

- Conférence à Stockholm de l'ONU. Déclaration établissant un programme de mesures via l'Organisation Mondiale Météorologie (OMM) et demandant d'être attentif aux activités impliquant un changement climatique

1979



- Conférence à Genève de l'OMM et du Programme Nations Unies Environnement
- Premiers échanges au G7 à Tokyo en juin: « *augmenter le charbon en préservant l'environnement, substituer le charbon au pétrole, développer d'autres énergies notamment limitant la teneur de CO₂* »

source: V. Giscard d'Estaing, "Déclaration à la suite du sommet de Tokyo", juin 1979 ; J. Zillman,

"Historique des activités climatologiques", Bulletin de l'OMM, 2009

1988

- Congrès à Toronto (*World Conference on the changing atmosphere: implications for global security*) avec conférence sur le rapport Bruntland à propos du DD. Préconisation d'une baisse d'émissions de 20% d'ici 2005
- Création du GIEC par l'OMM et le PNUE à la demande du G7
 - ↳ état de l'art sur le système climatique, les conséquences des changements climatiques, et les stratégies possibles pour y faire face
 - ↳ validation par tous les Etats de i) rapports courts finaux, ii) thèmes des rapports spéciaux, iii) constitution du bureau nommant les experts

source: F. Gemenne et al., "Atlas de l'anthropocène", 2021

Histoire du GIEC: contexte politique (3/3)



1990

- Conférence à Genève de l'ONU et l'OMM. Appel pour un traité relatif aux changements climatiques
- AG de l'ONU décide d'entamer des négociations pour une convention-cadre

1992

- Sommet de Rio: adoption de la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC)

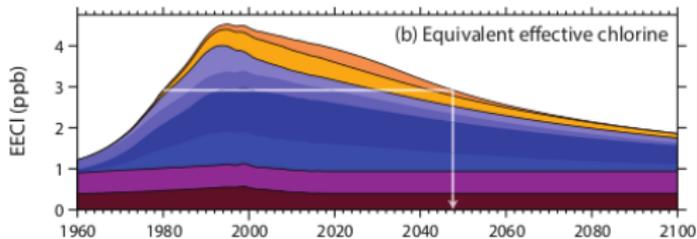
1997: Protocole de Kyoto

- Objectif contraignant (via des quotas d'émissions) de baisse de 5% d'ici 2012 pour les pays industrialisés
- Mise en place d'un marché d'échanges/achats de quotas

Un parallèle? la couche d'ozone

Alertes scientifiques

- 1974: Premier article scientifique
- 1979: Première mesure de confirmation d'un trou
- 1985: Article clôturant le débat



- 1985: convention de Vienne (non-contraignant)
- 1987: protocole de Montréal (contraignant)

- Couche d'ozone arrête de s'agrandir (car CFC diminue)
- Mais le parallèle s'arrête là: problème non systémique

source: M. Molina et al., "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone", *Nature*, 1974 ; J. Farman, "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction", *Nature*, 1985 ; *Scientific Assessment of Ozone Depletion*, WMO, 2018

Histoire de la Conférence of Parties (COP)

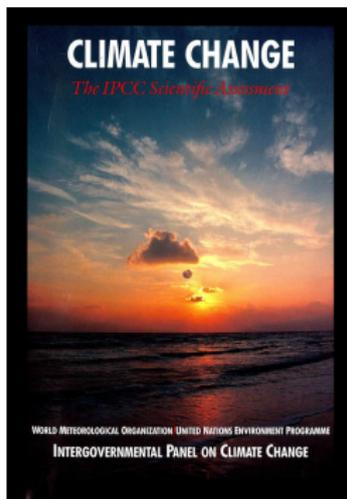
Réunions annuelles de négociations sur le climat liées à la CCNUCC

- 1995 (Berlin): COP1
- 1997 (Kyoto): COP3 - Protocole de Kyoto
- 2009 (Copenhague): COP15 - fin du Protocole de Kyoto
 - ↳ Pays récalcitrants: Canada, Etats-Unis, Japon, Russie, ...
 - ↳ Finalement, marchés de quotas locaux pour des sites industriels
- 2012 (Doha): COP18 - **Meeting of the Parties (CMP)**
 - ↳ Engagement de baisse de 18% d'ici 2020 pour certains pays
- 2015 (Paris): COP21 - Accord de Paris
 - ↳ Objectifs pour ne pas dépasser une augmentation de 2°C
- 2023 (Dubai): COP28
 - ↳ Premier bilan sur les émissions depuis l'Accord de Paris
 - ↳ Financement des préjudices
 - ↳ Transition énergétique

source: A. Dahan et al., "Gouverner le climat? 20 ans de négociations climatiques", 2015

Rapports du GIEC (AR: **A**ssessment **R**eport)

- WG1: *Physical Science Basis*
- WG2: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*
- WG3: *Mitigation of Climate Change*

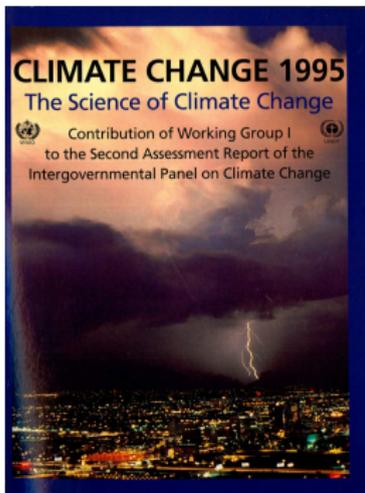


- 1990: FAR - variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995: SAR - influence humaine détectable
- 2001: TAR - réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007: AR4 - réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014: AR5 - réchauffement sans précédent et sûrement d'influence humaine
- 2022: AR6 - fait établi

source: <http://www.ipcc.ch/reports/> ; J. Jouzel et al., "Trente ans d'histoire du GIEC", 2018

Rapports du GIEC (AR: **A**ssessment **R**eport)

- WG1: *Physical Science Basis*
- WG2: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*
- WG3: *Mitigation of Climate Change*

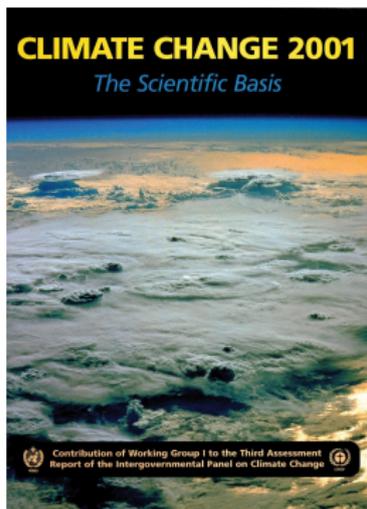


- 1990: FAR - variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995: SAR - influence humaine détectable
- 2001: TAR - réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007: AR4 - réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014: AR5 - réchauffement sans précédent et sûrement d'influence humaine
- 2022: AR6 - fait établi

source: <http://www.ipcc.ch/reports/> ; J. Jouzel et al., "Trente ans d'histoire du GIEC", 2018

Rapports du GIEC (AR: **A**ssessment **R**eport)

- WG1: *Physical Science Basis*
- WG2: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*
- WG3: *Mitigation of Climate Change*

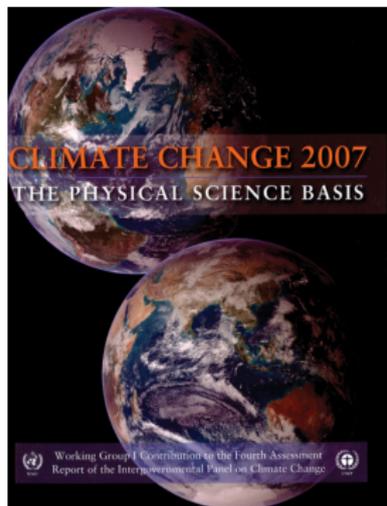


- 1990: FAR - variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995: SAR - influence humaine détectable
- 2001: TAR - réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007: AR4 - réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014: AR5 - réchauffement sans précédent et sûrement d'influence humaine
- 2022: AR6 - fait établi

source: <http://www.ipcc.ch/reports/> ; J. Jouzel et al., "Trente ans d'histoire du GIEC", 2018

Rapports du GIEC (AR: **A**ssessment **R**eport)

- WG1: *Physical Science Basis*
- WG2: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*
- WG3: *Mitigation of Climate Change*

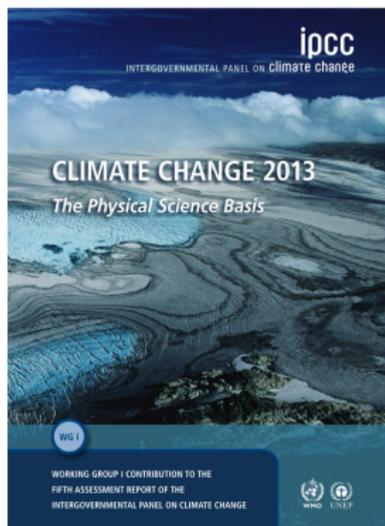


- 1990: FAR - variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995: SAR - influence humaine détectable
- 2001: TAR - réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007: AR4 - réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014: AR5 - réchauffement sans précédent et sûrement d'influence humaine
- 2022: AR6 - fait établi

source: <http://www.ipcc.ch/reports/> ; J. Jouzel et al., "Trente ans d'histoire du GIEC", 2018

Rapports du GIEC (AR: **A**ssessment **R**eport)

- WG1: *Physical Science Basis*
- WG2: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*
- WG3: *Mitigation of Climate Change*

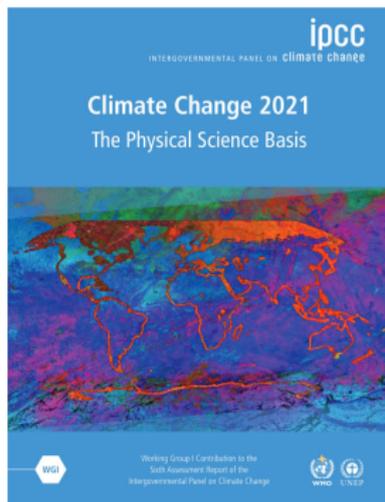


- 1990: FAR - variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995: SAR - influence humaine détectable
- 2001: TAR - réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007: AR4 - réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014: AR5 - réchauffement sans précédent et sûrement d'influence humaine
- 2022: AR6 - fait établi

source: <http://www.ipcc.ch/reports/> ; J. Jouzel et al., "Trente ans d'histoire du GIEC", 2018

Rapports du GIEC (AR: **A**ssessment **R**eport)

- WG1: *Physical Science Basis*
- WG2: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability*
- WG3: *Mitigation of Climate Change*

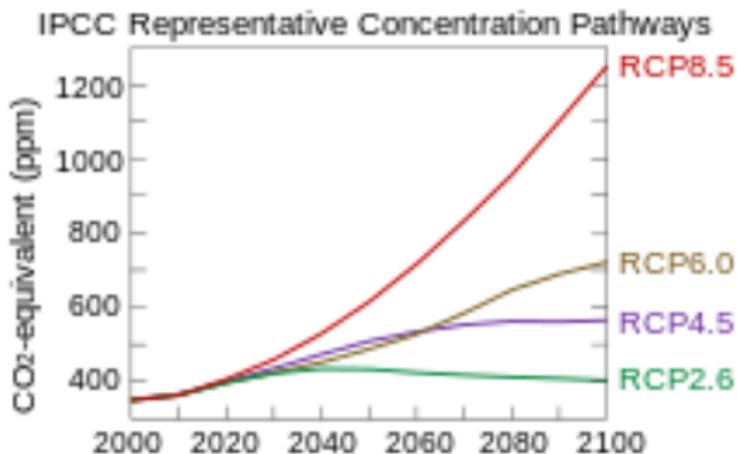


- 1990: FAR - variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995: SAR - influence humaine détectable
- 2001: TAR - réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007: AR4 - réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014: AR5 - réchauffement sans précédent et sûrement d'influence humaine
- 2022: AR6 - fait établi

source: <http://www.ipcc.ch/reports/> ; J. Jouzel et al., "Trente ans d'histoire du GIEC", 2018

Scénarios du GIEC: AR n avec $n \leq 5$

- RCP n : *Representative Concentration Pathway* avec n la valeur du forçage radiatif en W/m^2 en 2100



- Approche retenue jusqu'au AR5
- Analyse du stock (flux supposé dans la dérivée de la courbe)

Modèles du climat (1/2)

Courbes précédentes sont des moyennes sur des modèles de climat



- CIMP n : *Coupled Model Intercomparison Project*
 - avec n le numéro du AR correspondant
 - une soixantaine de modèles
 - en France, Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) comprenant le Laboratoire de Météorologie Dynamique (X, Ulm, Sorbonne)

source: J.M. Jancovici, "Qu'est-ce qu'un modèle climatique?", 2007 ; A. Ribes et al., "Making climate projections conditional on historical observations", *Science Advances*, 2021

- Echanges énergétiques entre sol, océan, atmosphère et espace
- Transferts radiatifs dans l'atmosphère
- Circulation de l'air dans l'atmosphère
- Circulation océanique ainsi que l'interaction avec l'atmosphère
- Formation et fonte de la glace
- Nuages
 - ↳ marge de progression importante
- Echanges de carbone entre atmosphère et sol
 - ↳ comportement de la végétation difficile car local et dépend de l'état de la biodiversité

En amélioration continue
(prise en compte de phénomènes et de leurs interactions)

SSP $m-n$ = Shared Socio-economic Pathway

- avec m le narratif
- avec n le forçage en W/m^2 en 2100

Un narratif

- Trajectoires socio-économiques / choix de société
 - ↳ Population, Education, PIB, ...
 - ↳ Utilisation des énergies fossiles, des sols
- Conséquences sur le climat mais aussi d'autres métriques
 - ↳ biodiversité, inégalités sociales, migrations, ...

Exemples:

- Scénario *business as usual*: SSP2-4.5
- Scénario très pessimiste: SSP5-8.5

Scénarios du GIEC: AR6 (2/2)

- investissements importants dans l'éducation et la santé, croissance économique rapide, institutions stables
 - évolution croissante vers des pratiques durables SSP1
 - intensité énergétique forte basée sur les fossiles SSP5
- investissements faibles dans l'éducation ou la santé, croissance économique atone, croissance démographique rapide
 - priorité à la sécurité et souveraineté régionale SSP3
 - grandes inégalités au sein des pays et entre pays SSP4
- Trajectoire actuelle sans déviations substantielles SSP2

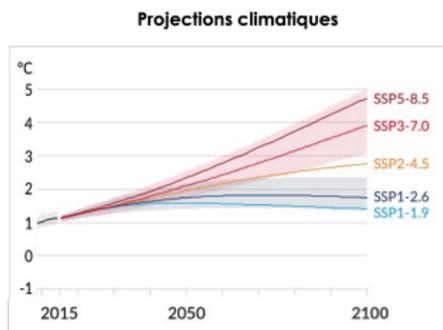
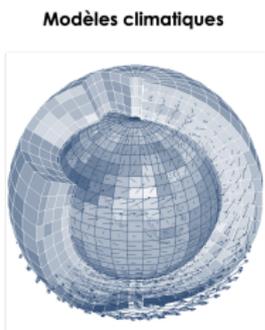
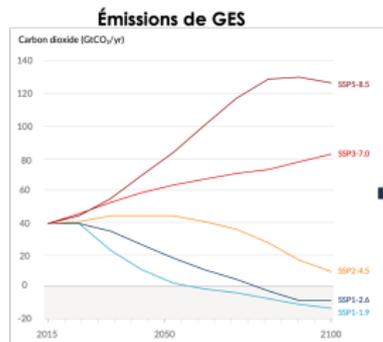
Exemples:

- Objectifs de l'Accord de Paris: SSP1-1.9
- Pas de politique climatique supplémentaire: SSP3-7.0

source: <http://www.carbone4.com/>

Pour la température, 5 SSP sont considérés (proche des RCP)

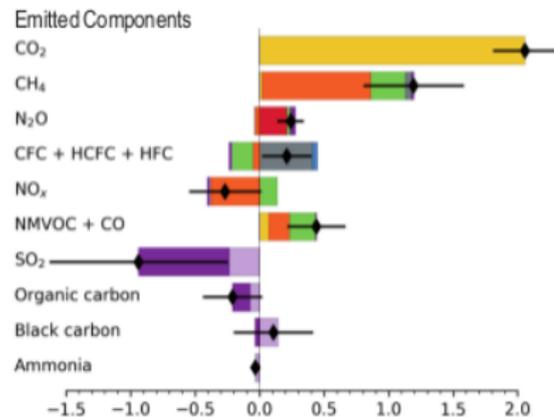
SSP	réchauffement-limite d'ici 2100	RCP
1-1.9	1,5°C (proba > 50%)	
1-2.6	2°C (proba > 67%)	2.6
2-4.5	3°C (proba > 50%)	4.5
3-7.0	4°C (proba > 50%)	
5-8.5	> 4°C (proba > 50%)	8.5



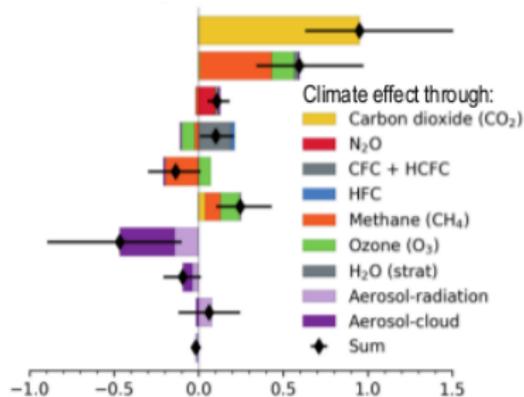
- SSP5-8.5: probable à horizon 2050 et peu probable au-delà
 - Disponibilité des énergies fossiles et ressources minérales
 - Pas de boucle de rétroaction entre changement climatique et activités humaines
 - Utile néanmoins de l'étudier pour les systèmes
 - ↳ très sensibles aux aléas climatiques (ex: littoral)
 - ↳ très critiques pour les activités humaines (ex.: nucléaire)
- SSP3-7.0: probable à horizon 2050 et peu probable au-delà
 - l'Etat travaille à l'adaptation au +4°C
- SSP2-4.5: le plus probable
 - calculé avec les Contributions Déterminées d'émissions au niveau National (NDC) de l'Accord de Paris

Contributions des différents gaz

(a) Effective radiative forcing
1750 to 2019

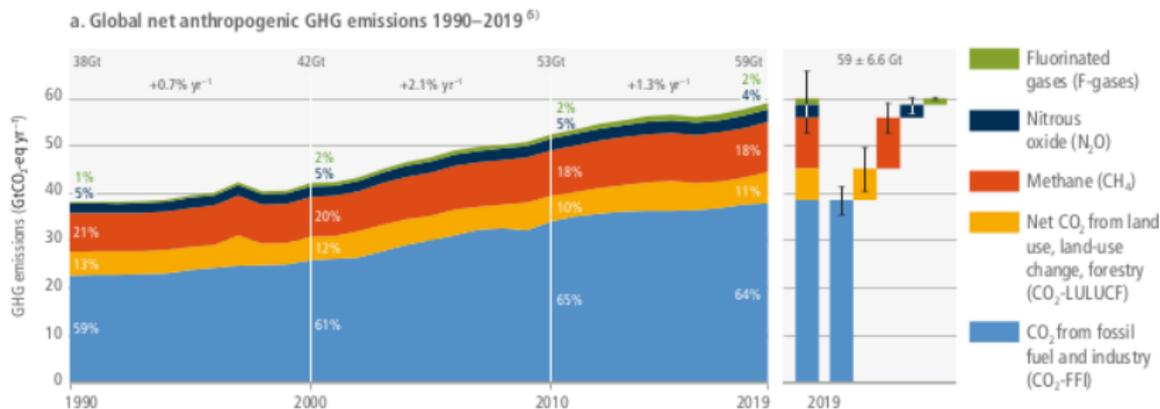


(b) Change in global surface temperature
1750 to 2019



- Agir prioritairement sur la diminution du CO₂
- Agir prioritairement sur la diminution du CH₄

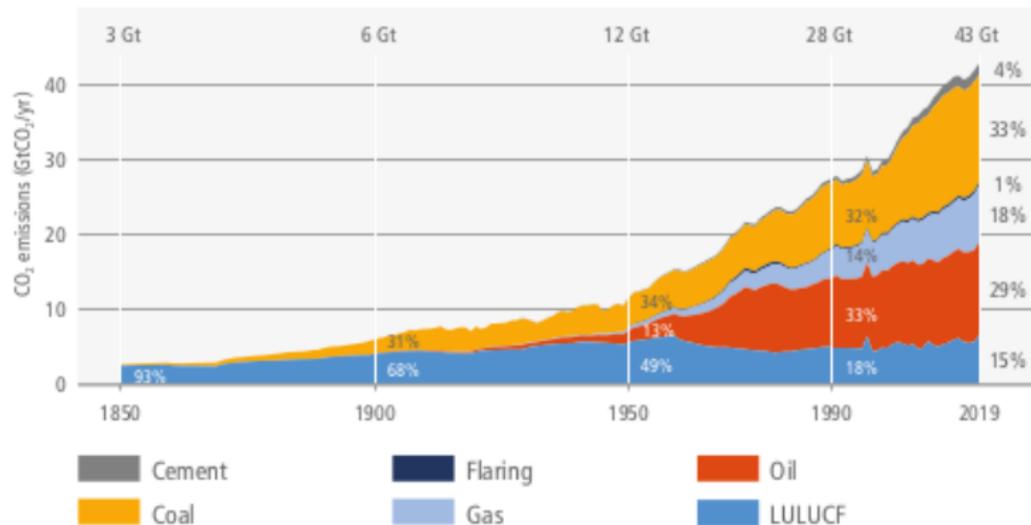
Evolution des différents gaz



- 60Gt par an dont 40Gt de CO₂ direct
- Hausse de 50% en 30 ans
- Légère inflexion de la courbe
- Points singuliers: 1997 (feux géants en Asie du Sud-Est), 2008 (récession mondiale)

Répartition par ressources (CO₂ direct)

(a) Long term trend of anthropogenic CO₂ emissions sources

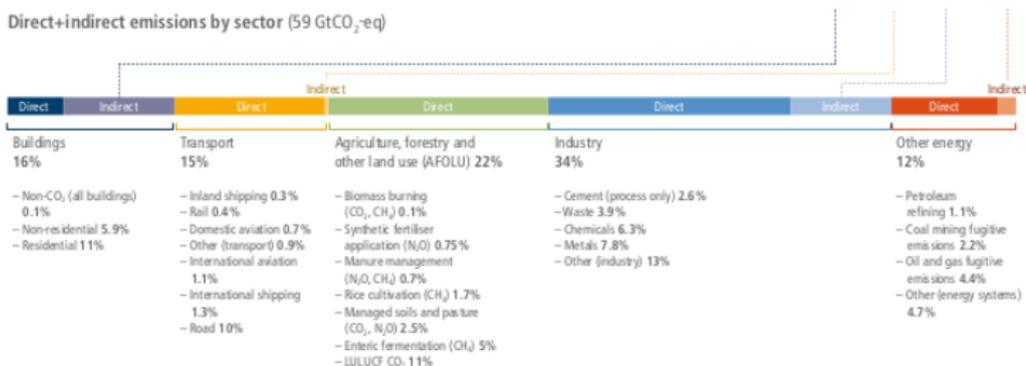


- 33% pour le charbon !
- Accumulation des ressources

source: J.B. Fressoz, 'Sans transition', 2024

Répartition par activités

Direct+indirect emissions by sector (59 GtCO₂-eq)



Problème: bilan très équilibré

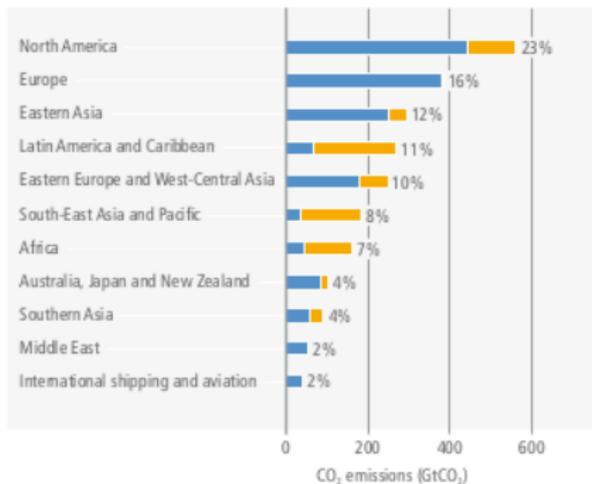
- Transports (trafic routier)
- Batiments
- Agriculture, utilisation des sols (déforestation, élevage)
- Industrie

source: <http://climatetrace.org>

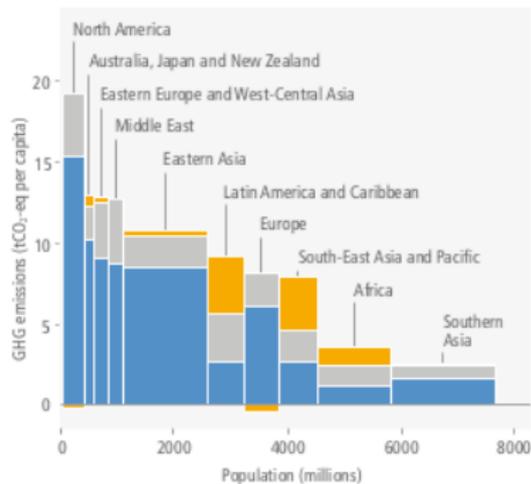
Répartition par pays (1/2)



(a) Historical cumulative net anthropogenic CO₂ emissions per region (1850–2019)



(b) Net anthropogenic GHG emissions per capita and for total population, per region (2019)

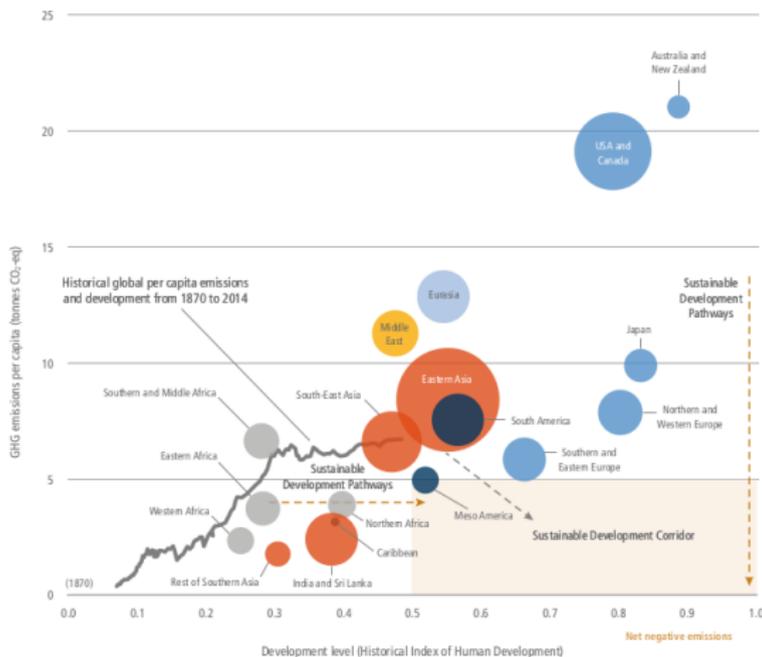


Répartition par pays (2/2)

- Pays occidentaux: 40% en stock
- En flux individuel: pays anglo-saxons et Moyen-Orient
- En flux total: Asie de l'Est, Amérique du Nord, Asie du Sud-Est, Europe et Amérique latine (par déforestation)
- Attention: ce n'est pas l'empreinte carbone d'un individu !

Ces inégalités de stock/flux (par individu ou pas) compliquent les négociations internationales

Flux GES et indice de développement humain (IDH)



- Corrélation GES et IDH (cf. T11 du Chapitre 1 de la Partie 1)
- Objectif: 2Gt par individu

- Par *proxy*: émission = $f(\text{revenu})$ avec

$$f(x) = \alpha x^\beta$$

dit modèle élastique avec $\beta \in [0, 3, 1, 2]$

- Par base de données directement (INSEE: Budget des familles)

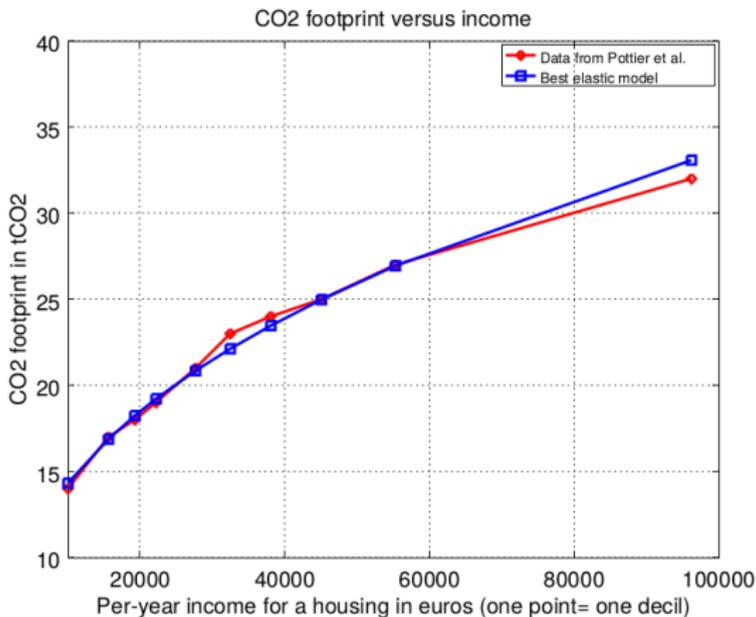
Quelques problèmes:

- Catégorisation des dépenses (prise en compte du travail?)
- Epargne non prise en compte (impact pour fort revenu)
- Capital non pris en compte
- Variation forte à l'intérieur d'un décile
- Dernier centile à faible population

source: T. Piketty et al. , "Carbon and inequality: from Kyoto to Paris", 2015 ; L. Chancel, "Climate change and the global inequality of carbon emissions", 2021 ; A. Pottier et al., "Qui émet du CO₂? Panorama critique des inégalités écologiques en France", 2020

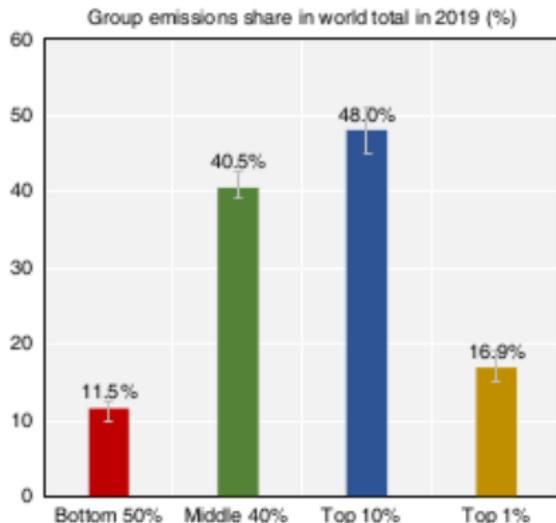
Répartition par revenu en France

- Empreinte carbone par ménage (2,17 individus)
- Moyenne: 9,6tCO₂ par an et par individu (en France)
- $\beta = 0,37$ assez faible

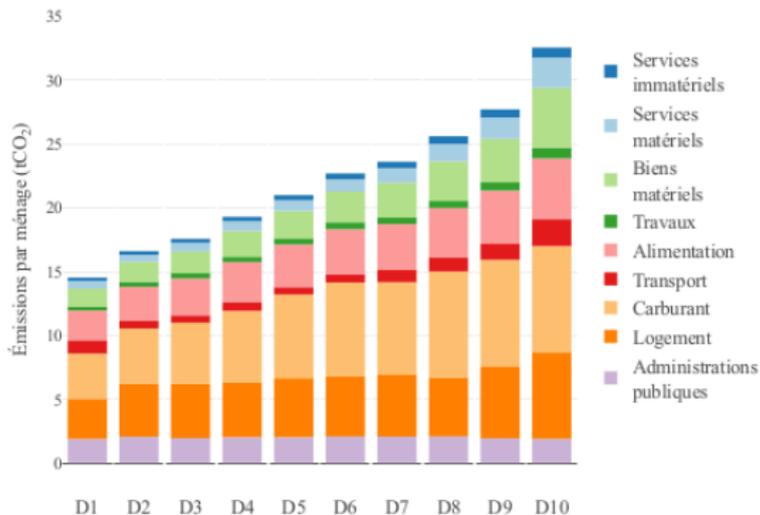


Répartition par revenu dans le Monde

- Moyenne: 6,6tCO₂ par an et par individu (dans le Monde)
- Proxy avec $\beta = 0,4$ et $\beta = 0,8$
- Effet contributif très inégalitaire

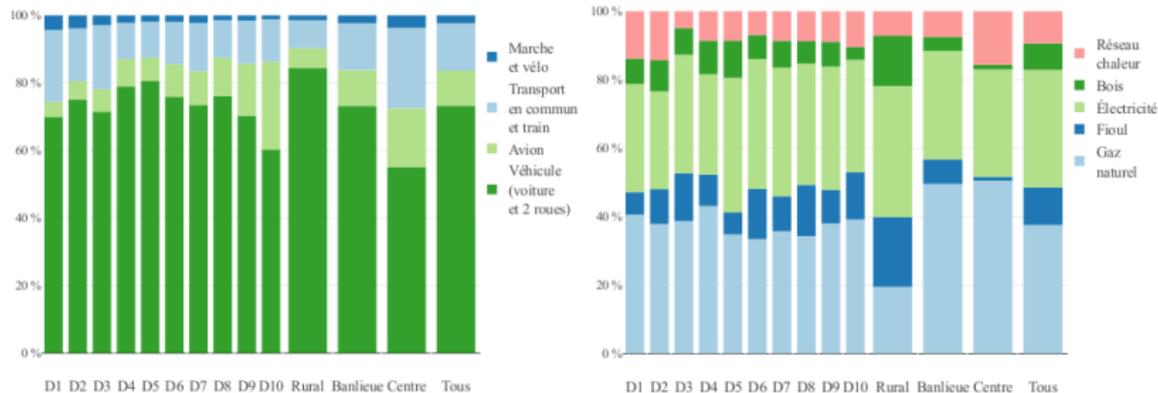


Répartition par revenu et activités (en France)



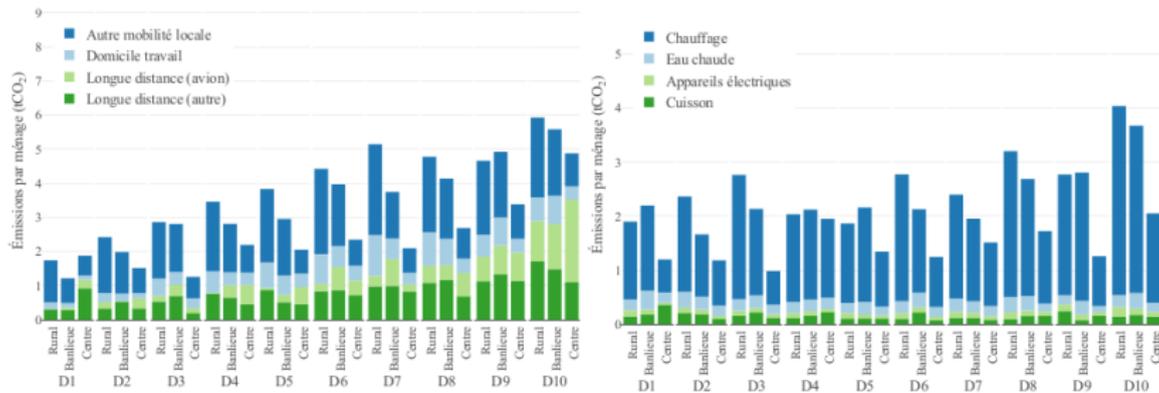
- Services matériels (soins) et immatériels (enseignement, assurances) assez différent
- Dépenses contraintes ou pas: difficile à examiner ici

Répartition par revenu: transport et chauffage (en France)



- Localisation joue un rôle crucial
- En transports: singularité du D10
- En chauffage: singularité des D1 et D2 (réseau de chaleur)

Quantité par revenu: transport et chauffage (en France)



- Montants très différents par décile
- En transports: avion pour D10
- En chauffage: singularité du D10

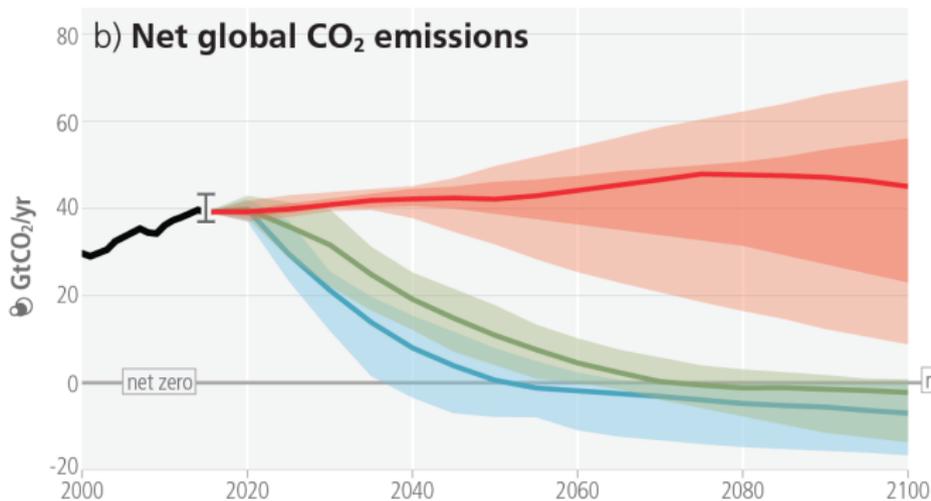
Stock CO₂ restant

- CO₂ injecté depuis 1850: 2550Gt
- Depuis le FAR (1990): 1000Gt donc 40%
- Rythme annuel actuel: 42Gt
- Concentration annuelle: 420ppm

SSP	T en 2100	Total restant	Zero émission	Total en 2040	Concentration en 2100
1-1.9	1,5°C	233Gt	5 ans	2800Gt	400ppm
1-2.6	2°C	980Gt	23 ans	3100Gt	450ppm
2-4.5	3°C	x	x	3300Gt	600ppm
3-7.0	4°C	x	x	3500Gt	850ppm
5-8.5	> 4°C	x	x	3600Gt	1100ppm

source: <https://www.mcc-berlin.net/>

Trajectoire du flux CO₂

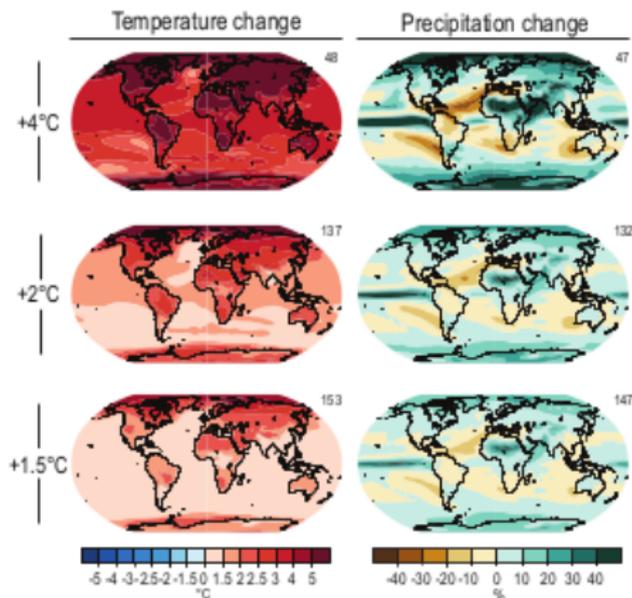


- SSP1-1.9 (Paris): CO₂ net zéro en 2050
- SSP1-2.6: CO₂ net zéro en 2070
- SSP3-7.0 (Adaptation):
 - même pente de croissance
 - +50% par an en 2100

- Puits de carbone naturels
 - Océans: moins efficace si réchauffement car moins de courants
 - Forêts, Tourbières, prairies
- Puits de carbone artificiels: capture et stockage
 - Objectif SSP1-2.6: 100Gt d'ici 2055 et 8Gt par an à terme
 - Capture actuelle: 40Mt par an
 - Surplus non gérable par d'autres procédés pour net zéro
 - Techniques
 - ↳ Energie par biomasse avec captage du carbone (1,5Mt par an)
 - ↳ Captage des fumées d'usine (démonstrateurs)
 - ↳ Captage directement dans l'air (9kt par an)
 - Zone de stockage: aquifères salins profonds (400 à 10.000Gt) et anciens gisements d'hydrocarbures (6.000 à 42.000Gt)
- Rejet limité de CO₂ (cf. T68)

source: Centre Hadley ; IFPEN ; CITEPA ; Energy Transitions Commission, "CCUS in the energy transition: vital but limited", 2022

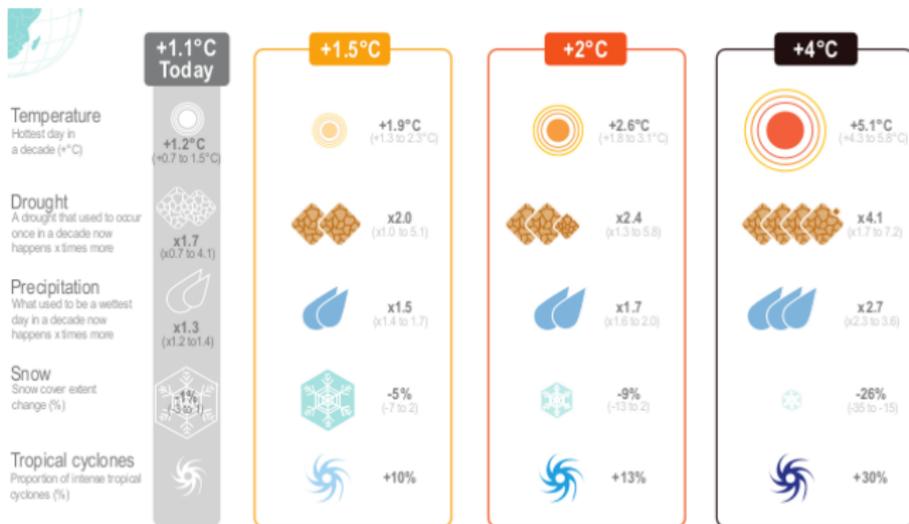
Climat futur: température et précipitations



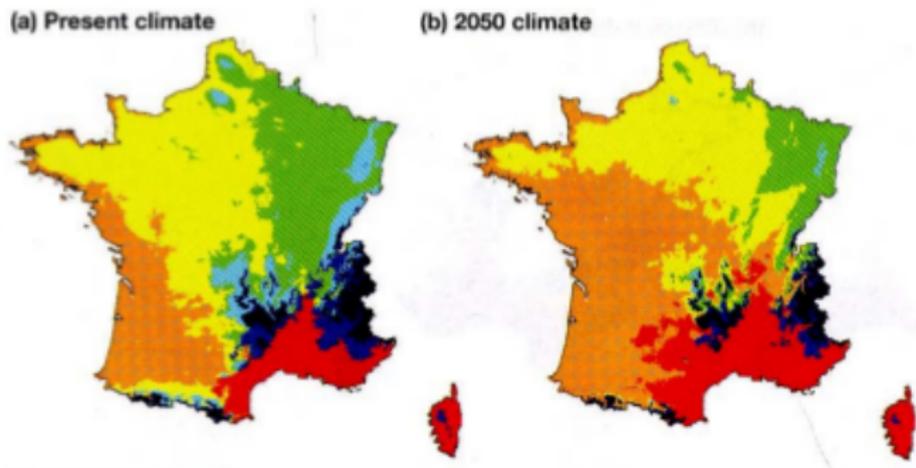
- Hausse des températures plus aiguës au Nord
- Plus de pluie sauf zones méditerranéennes

source: <https://impactlab.org/> (Berkeley, Rutgers, UChicago)

Climat futur: les extrêmes



- Fréquence plus élevée de sécheresse, de canicule
- Plus de cyclones
- Moins de neige: problème de stockage de l'eau

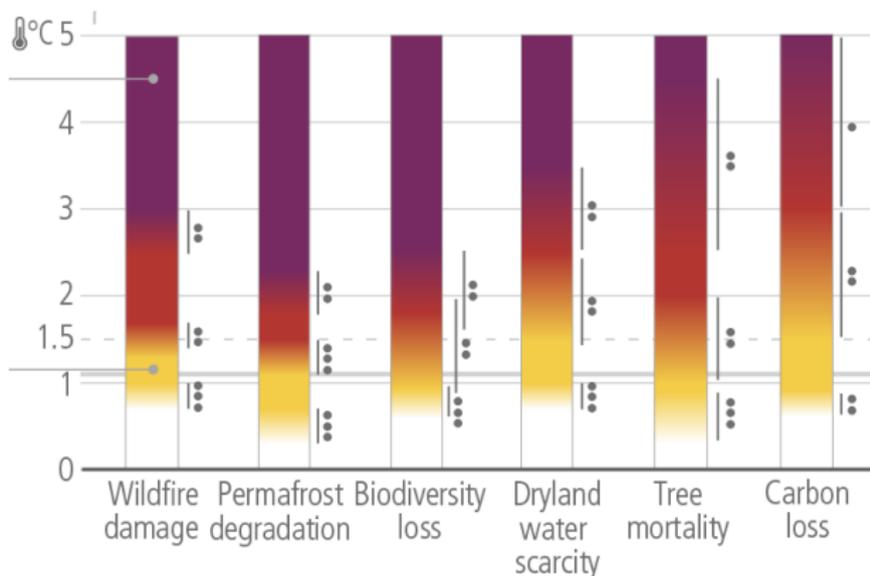


Scénario B2 (équivalent SSP3-7.0)

- Remontée du climat méditerranéen
- Diminution du climat continental et montagnard

source: V. Badeau et al., "Climate change and the biogeography of the French trees species: first result and perspectives", 2010 ; IPCC Special report on emissions scenarios, 2000

Climat futur: impact sur la biodiversité



- +2°C: gérable
- +4°C: dégâts très importants et boucle de rétroaction non maîtrisée

Savoir:

- Différents forçages du climat
- Quelques ordres de grandeur
 - forçage radiatif, concentration CO_2 , ...
- Différents scénarios du GIEC
- Impacts du changement climatique

Savoir-faire:

- Analyser un article scientifique sur les sujets abordés
- Construire une réflexion sur les priorités d'action