TSE101 - Partie 1 / Chapitre 2

Climat

Philippe Ciblat

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris

Plan

1. Energies du système-Terre
   - Rayonnement électro-magnétique (loi de Planck)
   - Bilan du système céleste (cycles de Milankovitch)
2. Analyse de l'effet de serre atmosphérique
   - Notion de forçage et bilan radiatif
   - Relation entre température et GES
3. Paléoclimatologie
   - Techniques de mesure du climat passé
   - Analyse de quelques périodes passées
4. Climat futur
   - Sources de GES (par origine, par pays, par revenu)
   - Scénarios du GIEC

- *2 TPs : Mécanisme de l'effet de serre, Paléoclimatologie*

Objectifs de ce chapitre

- Caractérisation des processus en jeu dans le réchauffement
- Quelques chiffres sur le réchauffement

Section 1 : Energies du système-Terre

Source 1 : Chaleur solaire

Tout corps (dont le soleil) émet un rayonnement électromagnétique

Loi de Planck

Spectre du rayonnement dépend de la température du corps:

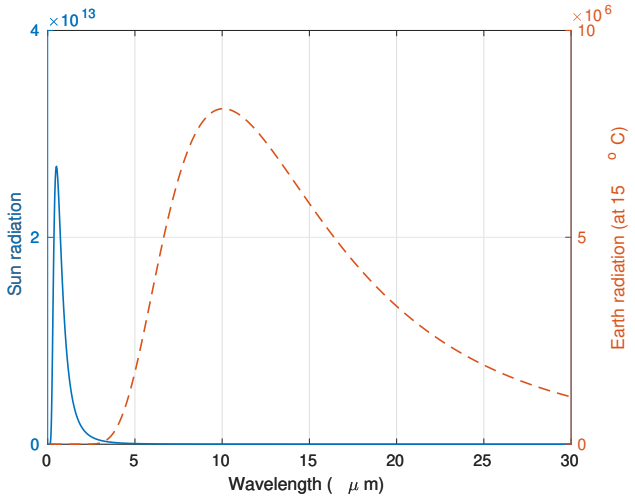
$$L(\lambda, T) = \frac{2h\pi c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}$$

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

- $F_{5800^\circ \mathrm{K}} = 64{,}2 \mathrm{MW/m^2}$
- $F_{288^\circ \mathrm{K}} = 390 \mathrm{W/m^2}$



Source 1 : Chaleur solaire sur Terre

- Rayonnement F_S du Soleil (de surface $4\pi R_S^2$)
- A une distance R du soleil, le rayonnement F reçu conduit à

$$4\pi R^2 F = 4\pi R_S^2 F_S$$

  Donc, à la distance Soleil-Terre : $F = 1362\mathrm{W/m}^2$
- la Terre de section πR_T^2 <u>mais</u> de surface $4\pi R_T^2$ éclairée la moitié du temps :

$$\text{Energie} = \pi R_T^2 F \frac{\mathcal{T}}{2} = 2\pi R_T^2 F_T \mathcal{T} \;\Rightarrow\; F_T = 340\mathrm{W/m}^2$$

- Effet Albedo de 30% environ

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

Hypothèse: Terre <u>sans</u> effet de serre mais <u>inertie</u> calorifique

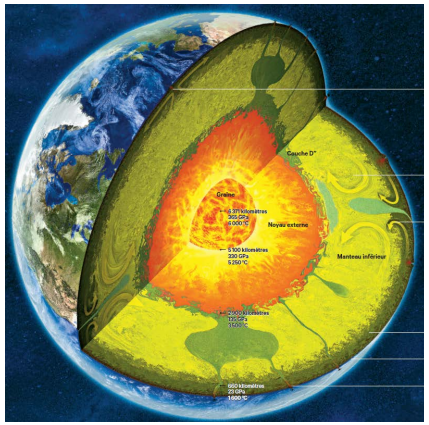
- Terre admet un équilibre radiatif au sol (entrée = sortie)

$$\sigma T_{T,sol}^4 = 240 \;\Leftrightarrow\; T_{T,sol} \approx -18^\circ\mathrm{C}$$

Source 2 : Chaleur primitive

Chaleur interne à la Terre

- Magma et donc volcanisme
- Equivalent à environ $0,1$ W/m^2



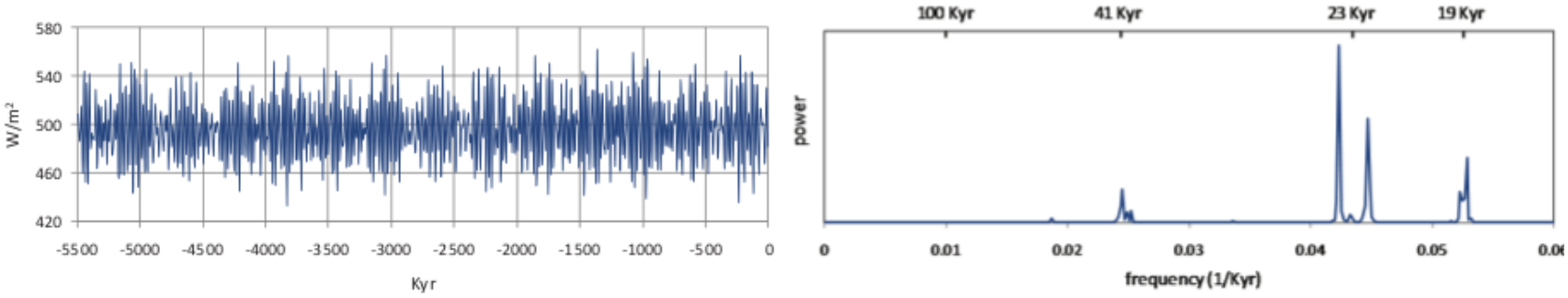
- conduction de chaleur du sous-sol vers la surface
  - ↪ Buffon fait l'hypothèse de refroidissement (mort lente)
  - ↪ Fourier invalide l'hypothèse de Buffon (effet de serre)
- marginal en forçage radiatif
- sauf effet secondaire
  - ↪ poussière et SO_2 (refroidissement par albédo) à durée faible
  - ↪ rejet de CO_2 faible (250Mt par an) à durée longue
  - ↪ Exemples : Tambora (Indonésie) en 1815, îles Kouriles en 1831

source : G. Buffon, "Des époques de la nature", 1778 ; J. Fourier, "Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", 1824

Modification du bilan radiatif : cycles de Milankovitch

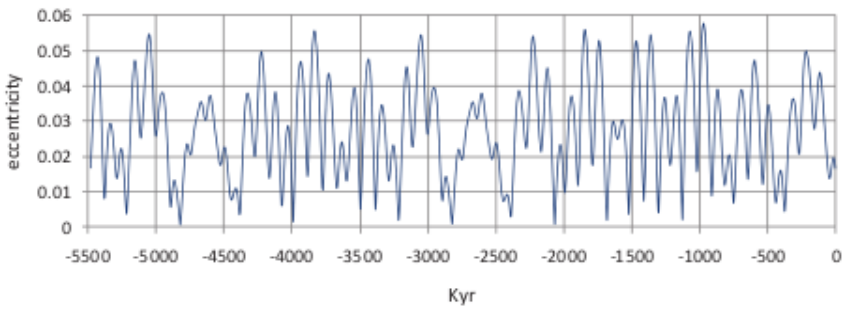
Variations des positions de la Terre par rapport au Soleil [1941]

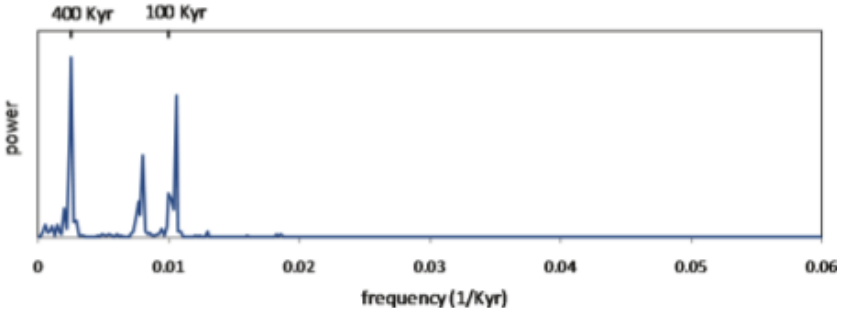
- Distance :
  - ↪ **Excentricité** dans le plan elliptique ..... 400.000 ans
- Surfaces exposées :
  - ↪ **Obliquité** de l'axe terrestre/au plan elliptique .... 40.000 ans
  - ↪ **Précession** de l'axe terrestre/à l'axe d'obliquité .. 20.000 ans



source : M. Milankovitch, "Kanon der Erbbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem", Königlische Serbische Akademie, 1941 ; R. McGehee, "A paleoclimate model of ice-albedo feedback forced by variations in Earth's orbit", SIAM, 2012

Excentricité

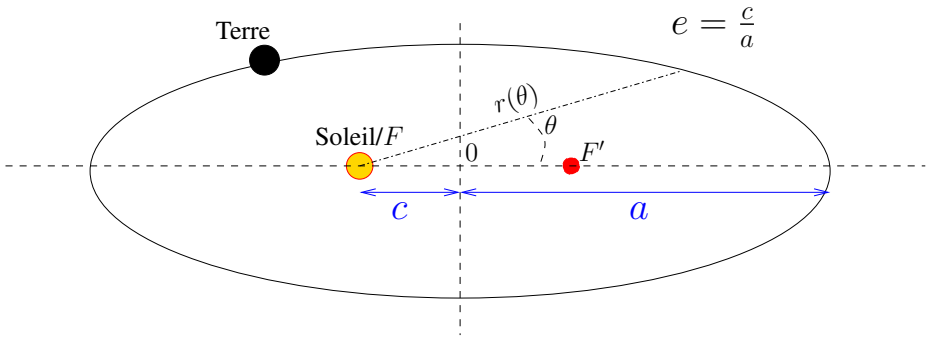




$$r(\theta) = \frac{r_0}{1 - e\cos(\theta)}$$

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

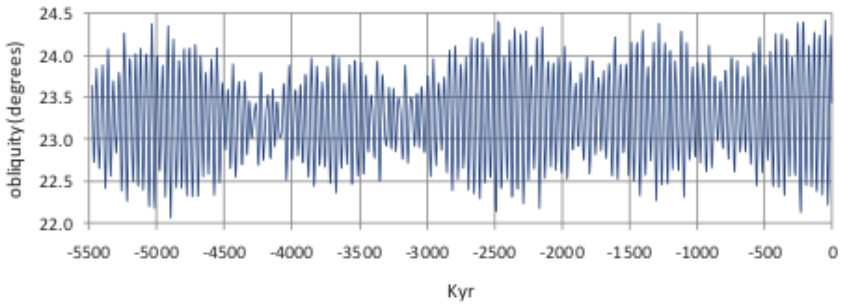
$$F_0 = \frac{R_s^2 F_S}{r_0^2}$$

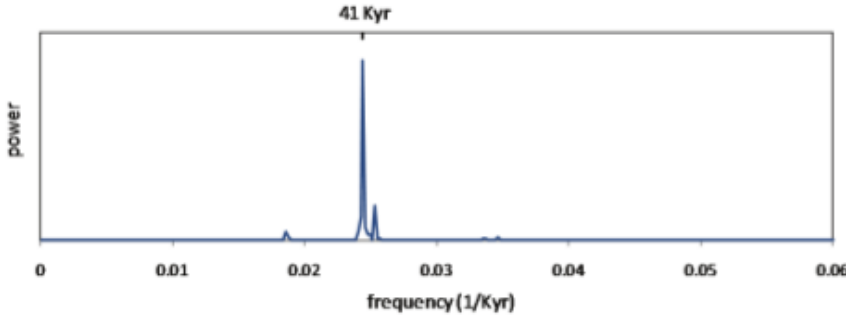


$$F = \int_0^{2\pi} (1 - e\cos(\theta))^2 d\theta . F_0 = (1 + 0,5e^2) F_0 \text{ où } e \ : 0 \to 0,05$$

faible modification de l'énergie reçue ($\pm 0,6$ W/m^2)

Obliquité

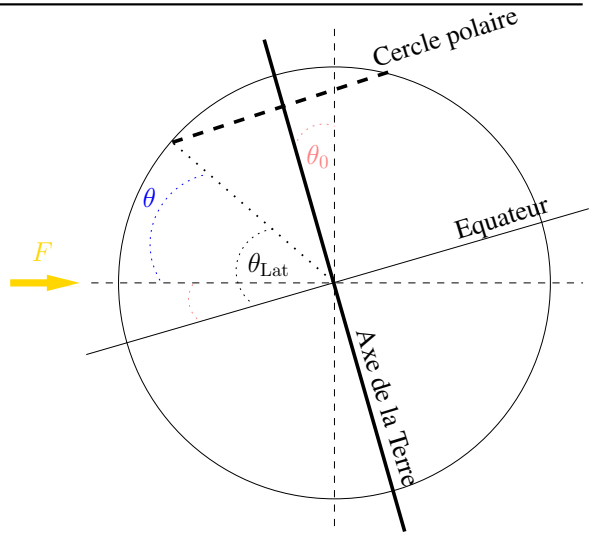




A $\theta_{\mathrm{Lat}} = 66°$ et $\theta_0 : 22 \to 24,5°$,

$$F_{\mathrm{min}} = F\cos(66-22) = 0.719F$$
$$F_{\mathrm{max}} = F\cos(66-24,5) = 0,749F$$

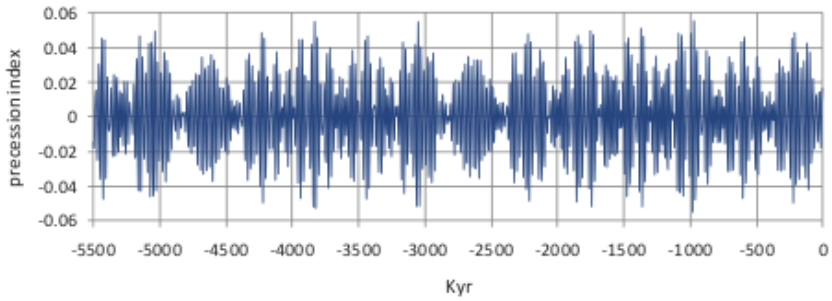
Ecart maximal: 4%

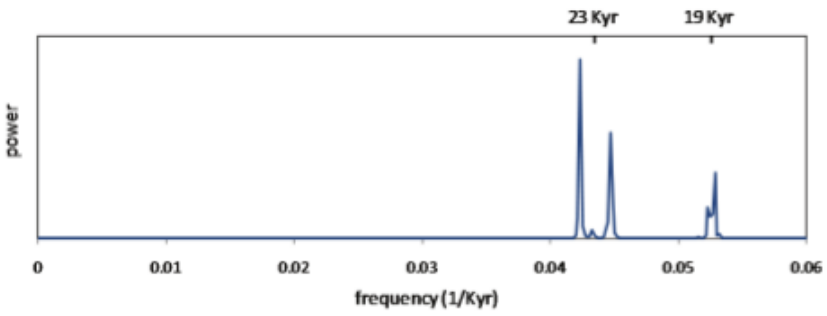


Si plus oblique (θ_0 grand)

- saisons plus intenses : été plus chaud et hiver plus froid
- circulation de la chaleur modifiée

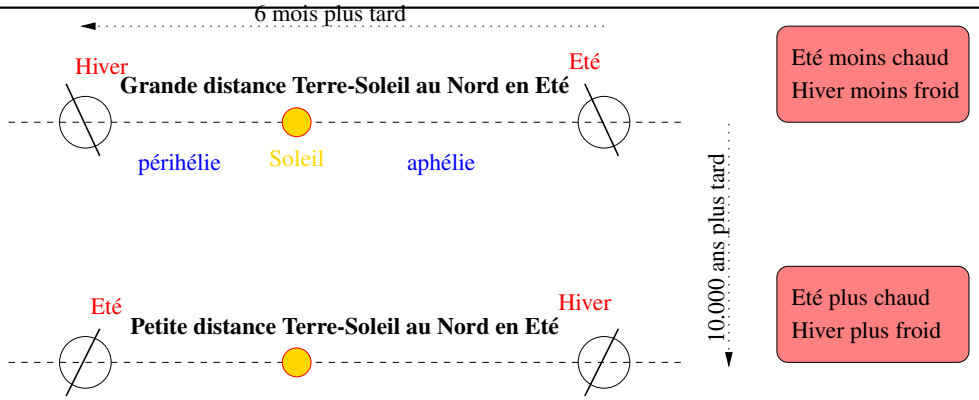
Précession





Indice de précession :

- Si positif, cas «grande distance»
- Si négatif, cas «petite distance»



Actuellement, période interglaciaire

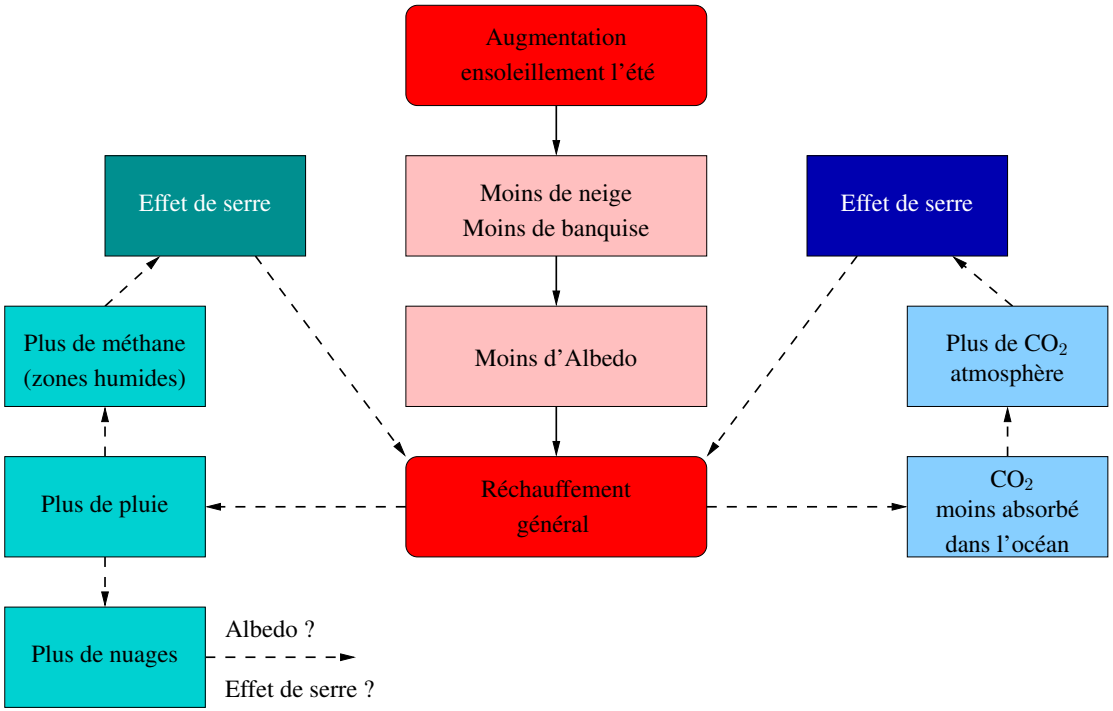
- Excentricité moyenne $(0,017)$
- Obliquité moyenne $(23°)$
- Précession légèrement positive

Périodes glaciaire et interglaciaire

Glaciaire = été peu chaud

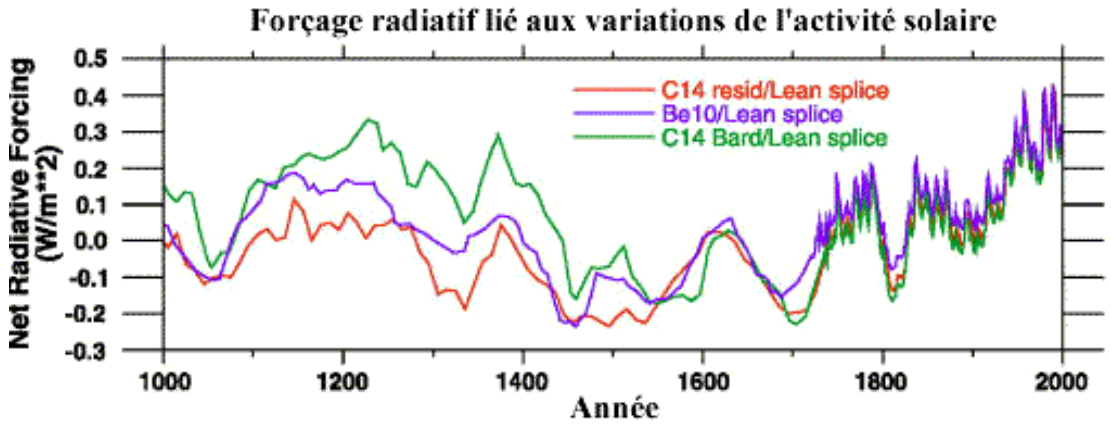
- Excentricité grande
- Obliquité assez faible
- Précession positive

Cycle actuel (via précession) de 10 ka de glaciaire et d'interglaciaire



Bilan radiatif sur le dernier millénaire

Insolation: quantité d'énergie reçue au sommet de l'atmosphère (taches solaires rajoutent un cycle de 11 ans)



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

la Terre avec effet de serre

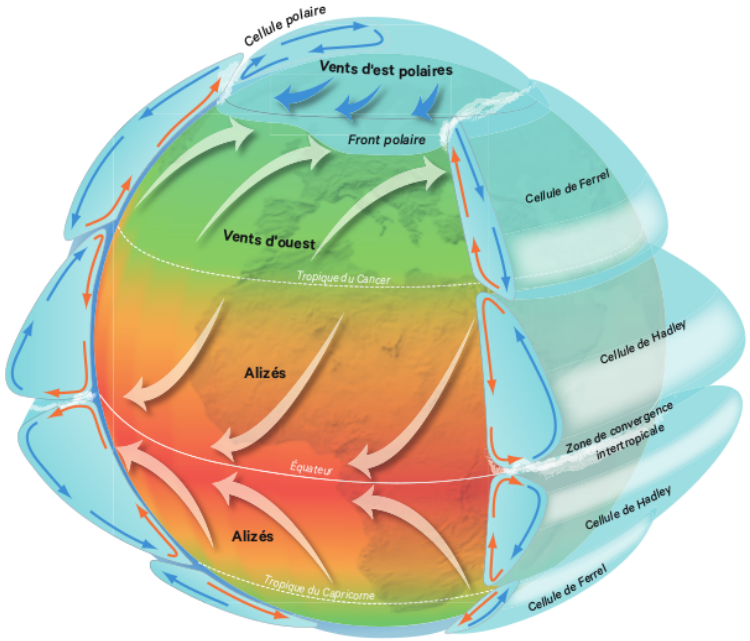
- Modification de l'équilibre radiatif (cf. Section 2): apport de chaleur changé
- Mais aussi transfert temporel de chaleur possible via sol
- Mais aussi transfert géographique de chaleur possible via atmosphère et océan
  - Conduction (contact): théorie de Fourier
  - Convection (mouvement): théorie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

Gradient de températures 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

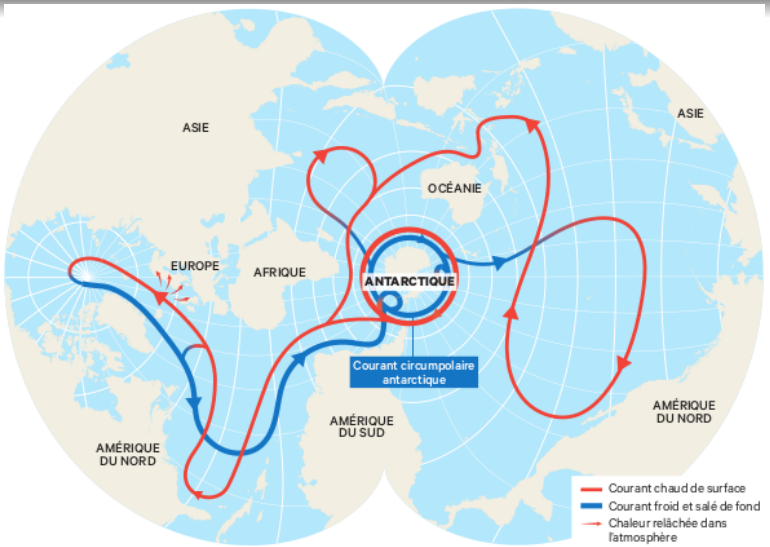


Si vent de surface va vers le Sud (en hémisphère Nord), alors Coriolis implique un déplacement vers la droite dans le sens du déplacement et donc vers l'Ouest

- 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

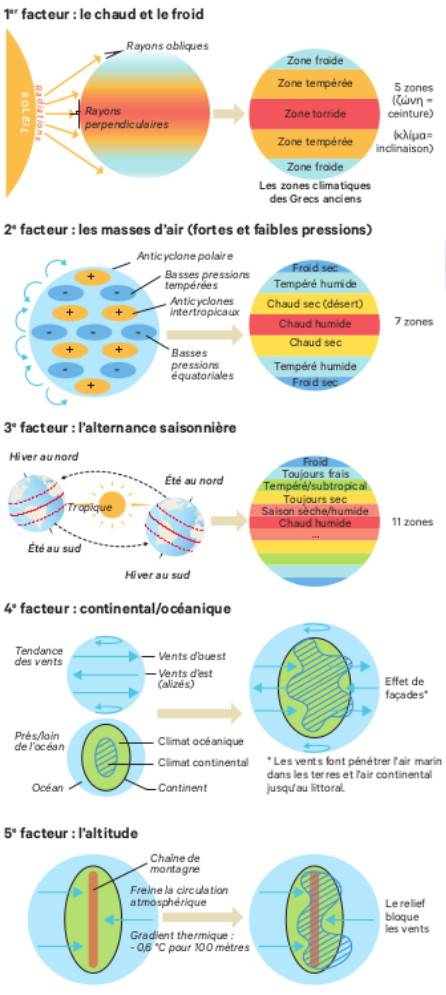


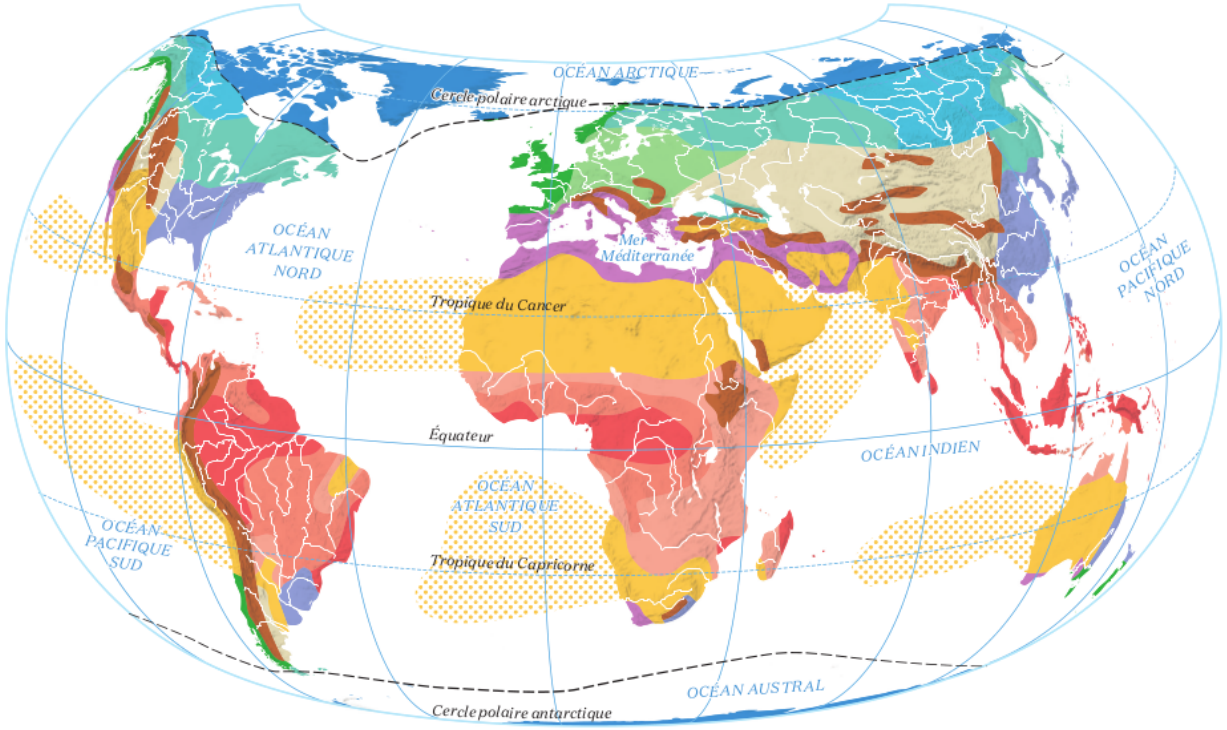
Actions combinées :

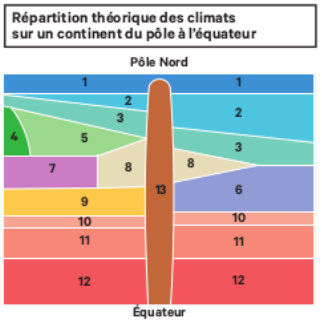
- *vents*
- *rotation de la Terre*
- *température et salinité*
- *marées et fonds marins*

- Courant de surface (géré par vent et Coriolis) : eau chaude
- Courant de profondeur (géré par 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 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 montagnard
--- Limite des températures moyennes inférieures à 10 °C pour le mois le plus chaud
Zone maritime à faibles précipitations (< 500 mm/an)

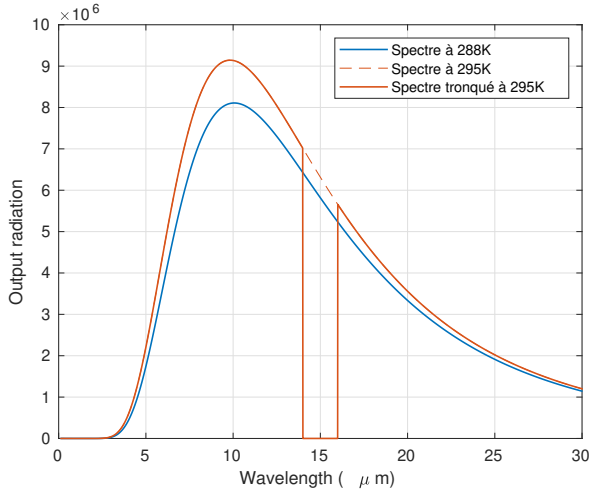
source : C. Grateloup, "Atlas historique de la Terre", 2022

Section 2 : Effet de serre (atmosphérique)

Principe

- la Terre reçoit du rayonnement (solaire) autour de f_{RX}
- la Terre envoie du rayonnement (tellurique) autour de f_{TX}
- L'atmosphère laisse passer à f_{RX} mais pas à f_{TX}
  - en raison de certaines molécules (H_2O, CO_2, CH_4, etc)
  - bilan énergétique modifié et ré-équilibrage via modification du spectre de Planck par hausse de la température

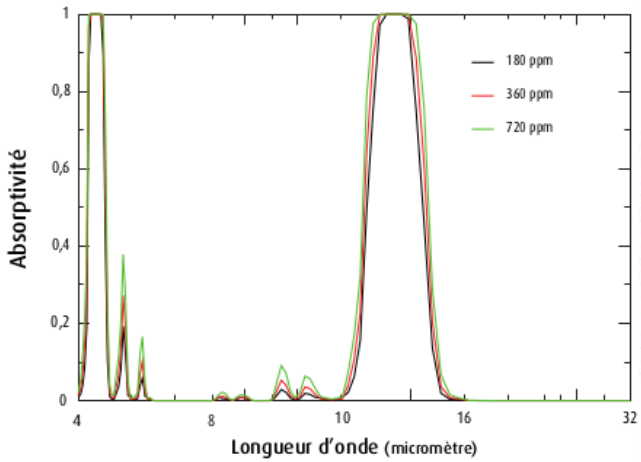
l'atmosphère agit comme un filtre passe-bande d'un certain gabarit <u>mais</u> la fabrication de la réponse fréquentielle du filtre non triviale

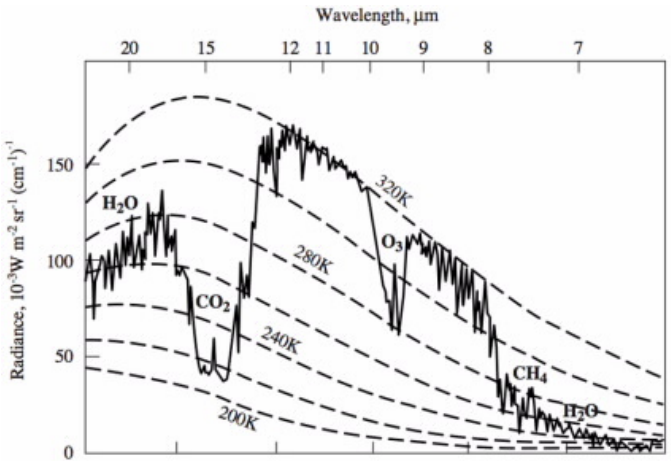


- la Terre (vue du ciel) admet un équilibre radiatif : énergie entrante = énergie sortante
- Absorption totale de 14 à 16μm: température passe de 288 à 295°K (+7°)

Mesure de l'effet de serre

- Gauche : Absorptivité du CO_2 avec concentrations récentes
- Droite : Spectre visible en haut de l'atmosphère (Nimbus4)





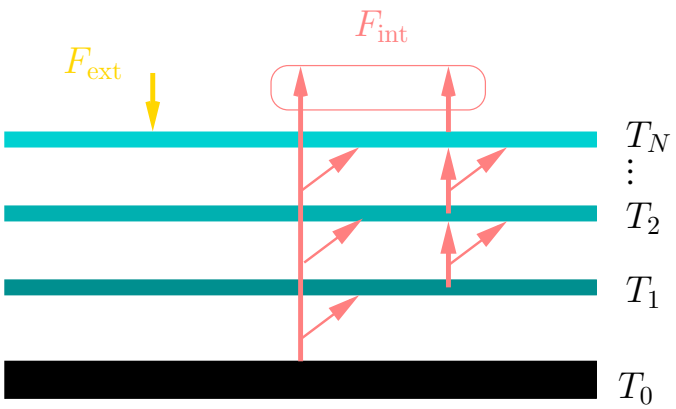
- Absorptivité par CO_2 de 100% à certaines fréquences
- Rayonnement passe partiellement néanmoins !!!
- Effet de serre augmente bien avec concentration en CO_2

source : J.-L. Dufresne, "Effet de serre: plus subtil qu'on ne le croit", 2011 ; R. Dickinson, "Modeling climate changes due to CO_2", 1982 ; B. Legras, "Radiative transfert and greenhouse effect", 2023

Modélisation de l'effet de serre atmosphérique

- Molécule absorbante ré-émet au même taux (**loi de Kirchhoff**)
- Gradient de température (en raison de la densité de l'air) induit un spectre de ré-émission différent

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



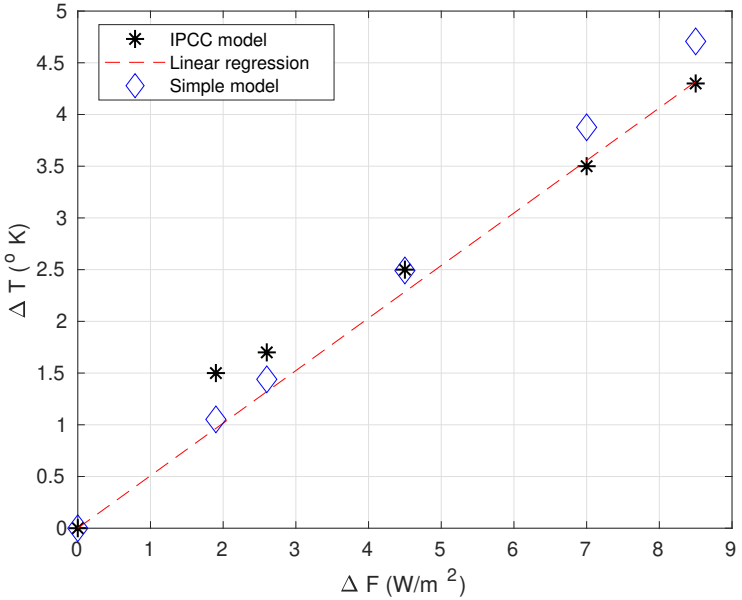
- Couche initiale : $F_0(\lambda) = L(\lambda, T_0)$
- Couche n : $F_n(\lambda) = (1-\alpha_n)F_{n-1}(\lambda) + \alpha_n L(\lambda, T_n)$
- Couche finale : $F_{\text{ext}} = F_{\text{int}} = (1-\alpha_N)F_{N-1}(\lambda) + \alpha_N L(\lambda, T_N)$

$$T_0 = \text{fct}(F_{\text{ext}}, \{\alpha_n\}_n, \{T_n\}_n)$$

avec absorptions α_n données par la densité des gaz à effet de serre

Remarques sur l'effet de serre atmosphérique

- z_e l'altitude d'émission équivalente
  - $z_e \approx$ 10km (troposphère) $\rightarrow$ spectre de 217°K (car -56°C)
- Pas gradient de température ($F_n = F_0, \forall n$), pas d'effet de serre
- Déficit en $F_{\text{int}} \rightarrow$ ré-équilibre avec $F_0 \nearrow \rightarrow T_0 \nearrow$
  - $\Delta T \approx 3.\frac{|\Delta F|}{4\sigma T_{\text{ref}}^3}$



- En fait, doublement du CO_2 implique un réchauffement de 3°

source : Modèle MODTRAN, https://climatemodels.uchicago.edu/modtran, Université de Chicago

Composition (naturelle) de l'atmosphère

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

Gaz	Molécule	%
Diazote	N_2	78
Dioxygène	O_2	21
Vapeur d'eau	H_2O	0 à 4
Dioxyde de carbone	CO_2	0,0420000
Méthane	CH_4	0,0001745
Protoxyde d'azote	N_2O	0,0000300
Ozone	O_3	0,0000040

Ces gaz ont des impacts différents

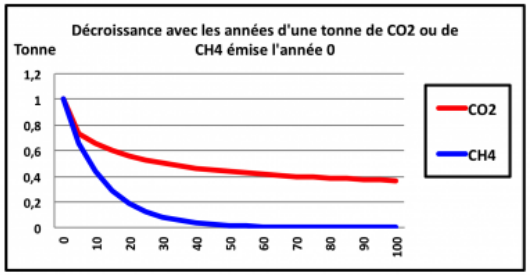
- en raison de leur chimie
- en raison de leur durée de vie

Calcul du CO_2 équivalent

- Potentiel de Réchauffement Global (PRG) :

$$\mathrm{PRG}_g = \frac{a_g}{a_{CO_2}} \cdot \frac{\int_0^{T_i} x_g(t)dt}{\int_0^{T_i} x_{CO_2}(t)dt}$$

  - a_g: efficacité radiative du gaz g (en W/(m^2.kg))
  - $x_g(t)$: taux de décomposition du gaz g à l'instant t
- Durée de vie (CO_2 : 50 ans ; CH_4 : 12 ans ; N_2O : 120 ans)

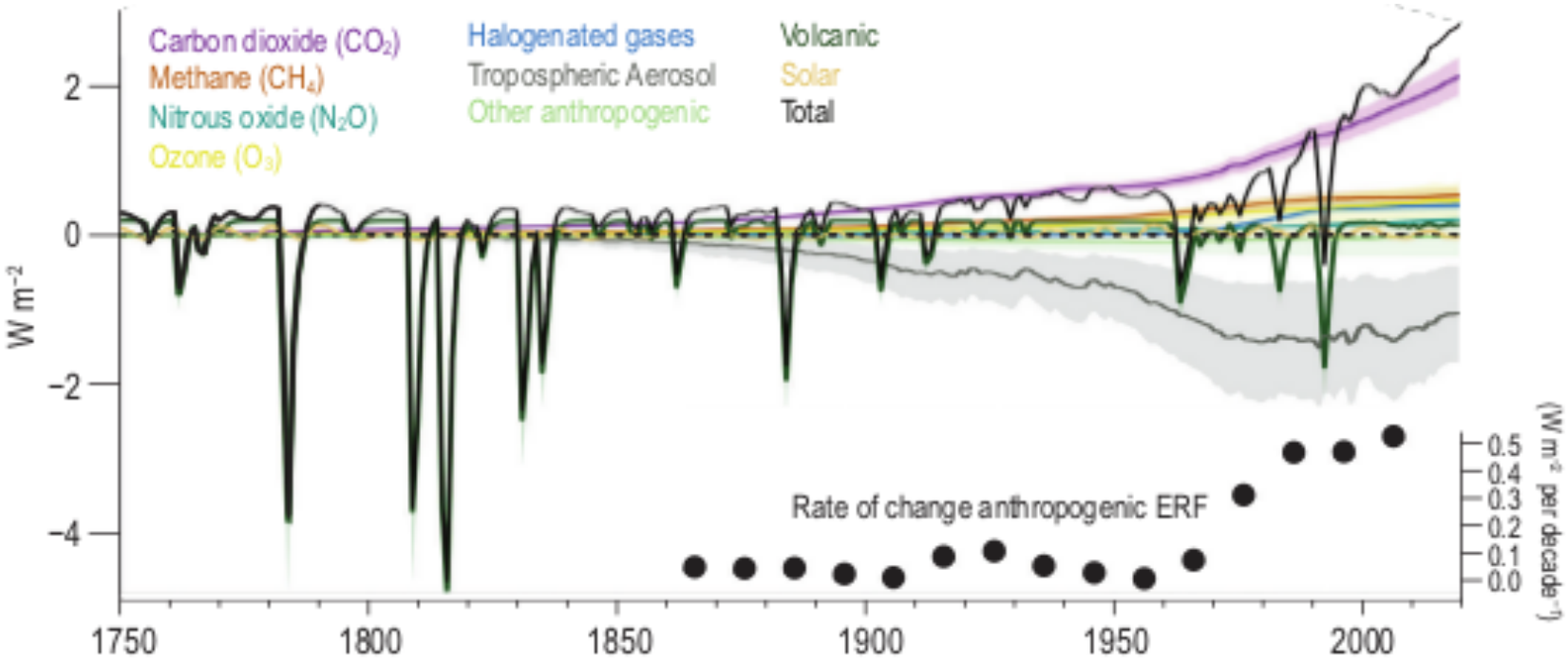


	CO_2	CH_4	N_2O
T_i =20 ans	1	84	264
T_i =**100 ans**	**1**	**28**	**273**

Bilan radiatif final

++ CO_2 pas le seul problème car progression des deux autres aussi

−− Volcanisme par à-coups, aérosols troposphériques



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

Un modèle (très simple) de climat : rapport 5 du GIEC

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{c}} & = & \mathbf{A}_1.\mathbf{c} + \mathbf{b}_1.u \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} & = & \mathbf{A}_2.\boldsymbol{\theta} + \mathbf{b}_2.\left(\log_{10}\left(\mathbf{d}.\mathbf{c}/\mathbf{c}_{\mathrm{ref}}\right) + \mathbf{f}_{\mathrm{nonCO_2}}\right) \\ \Delta T & = & \mathbf{g}.\boldsymbol{\theta} \end{cases}$$

avec

- $\mathbf{c}$ concentration de CO_2 dans plusieurs milieux
- u injection de CO_2 (naturel ou anthropique)
- $\boldsymbol{\theta}$ écart de température par rapport à une référence
- ΔT écart de température globale
- $\mathbf{A}_1$ et $\mathbf{A}_2$ matrices

source : R. Millar et al., "A modified impulse response representation of the global near surface air temperature and atmospheric concentration response to CO_2 emissions", 2017 ; N. Leach et al., "FAIRv2.0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration", 2021

Historique

- Rayonnement infrarouge (chaleur obscure) . . . . Herschel [1799]
- Notion d'effet de serre terrestre (filtrage) . . . . . Fourier [1824]
- Valeur du flux solaire . . . . . Pouillet [1838]
- CO_2 retient de la chaleur du Soleil . . . . . Foote [1856]
- Composition de l'atmosphère et effet de serre . . Tyndall [1864]
- Mesure du spectre solaire infrarouge . . . . . Langley [1887]
- Calcul de ΔT en fonction du CO_2 . . . . . Arrhenius [1896]
  - loi logarithmique entre concentration en CO_2 et ΔT
  - doublement d'une concentration en CO_2 conduit à $+5°C$
  - <u>mais</u> i) principale bande d'absorption du CO_2 non considérée, ii) absorption du CO_2 surestimée, iii) modèle à une couche
- Bilan radiatif en haut de l'atmosphère et modèle de circulation générale . . . . . Manabe [1967]

source : S. Arrhenius, "Influence of CO_2 in the air on the temperature of the ground", 1896 ; S. Manabe et al., "Effect of doubling of CO_2 concentration in the atmosphere", 1975

Section 3 : Paléoclimatologie

Variables climatiques

- Rayonnement du soleil
  - Puissance solaire (1 Ga): +9% dans un milliard d'années
  - Cycles de Milankovitch (10 ka)
  - Taches solaires (10 a)
- Composition de l'atmosphère
  - Volcanisme : apport de GES
  - Erosion (roches silicatées) : retrait de GES
  - Végétation et activités humaines (donc le vivant)
- Albédo
  - Glaces de surface
  - Végétation (donc le vivant)
- Tectonique des plaques (1 Ma)
  - Modification des dynamiques océaniques et atmosphériques
  - Exemple: continents aux pôles $\rightarrow$ moins de pluie, moins d'érosion

Histoire de la paléoclimatologie

- Notion de variabilité du climat vers le début XIXe siècle

  - Analyse des blocs erratiques
  - Analyse des moraines
  - Conservation des grands fauves
  - Cuvier [1812], Esmark [1824]
- Analyse d'impact sur les sociétés humaines depuis ∼1970
- On remonte à des milliers d'années avec des archives humaines
  - Occupation des glaciers
  - Dates des vendanges/moissons/floraisons/Mousson
  - Hauteur des cours d'eau et quantité de précipitations
- On remonte à des centaines de millions d'années avec de la paléomesure biogéochimique depuis ∼ 1960

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

Quelques techniques de mesure

Recherche de ...

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

↪ Glace (carotage) : composition

↪ Sédiments : composition et fossiles (coquillages)

↪ Dendrochronologie : taille et composition des cernes des arbres

↪ Palynologie : composition du végétal ou du pollen

↪ Phénologie : dates d'apparition du végétal

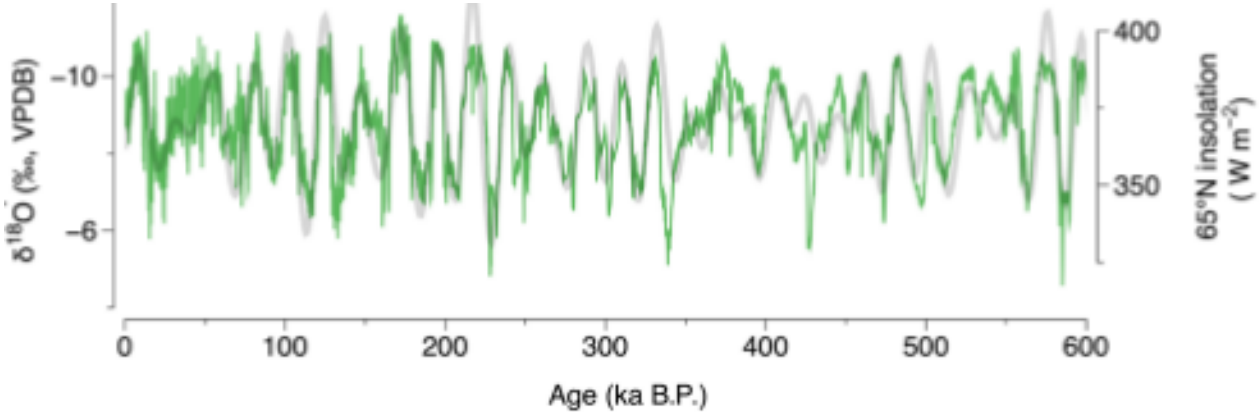
Fiabilisation de la mesure par croisement d'archives

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 1 : un marqueur (*proxy*) isotopique

Marqueur (δ^{18}O) = proportion ^{18}O sur ^{16}O dans glaces/sédiments

- si froid, faible δ^{18}O dans les concrétions/glaces:
- si froid, fort δ^{18}O dans les sédiments équatoriaux



Paléothermomètre !

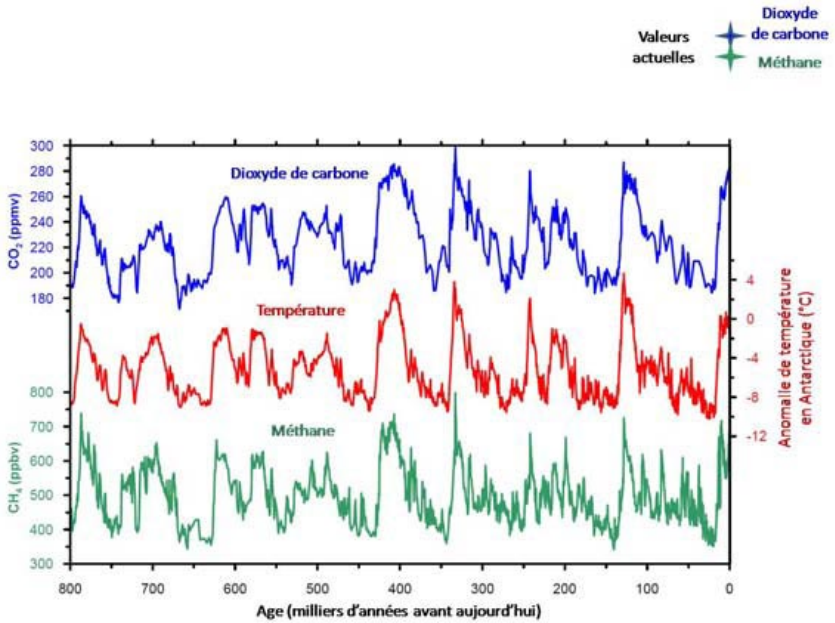
source : G. Liu et al., "On the glacial-interglacial variability in δ^{18}O records", Science Advances, 2020 ;

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

Exemple 2 : un marqueur atmosphérique

Marqueur = bulles d'air dans la glace

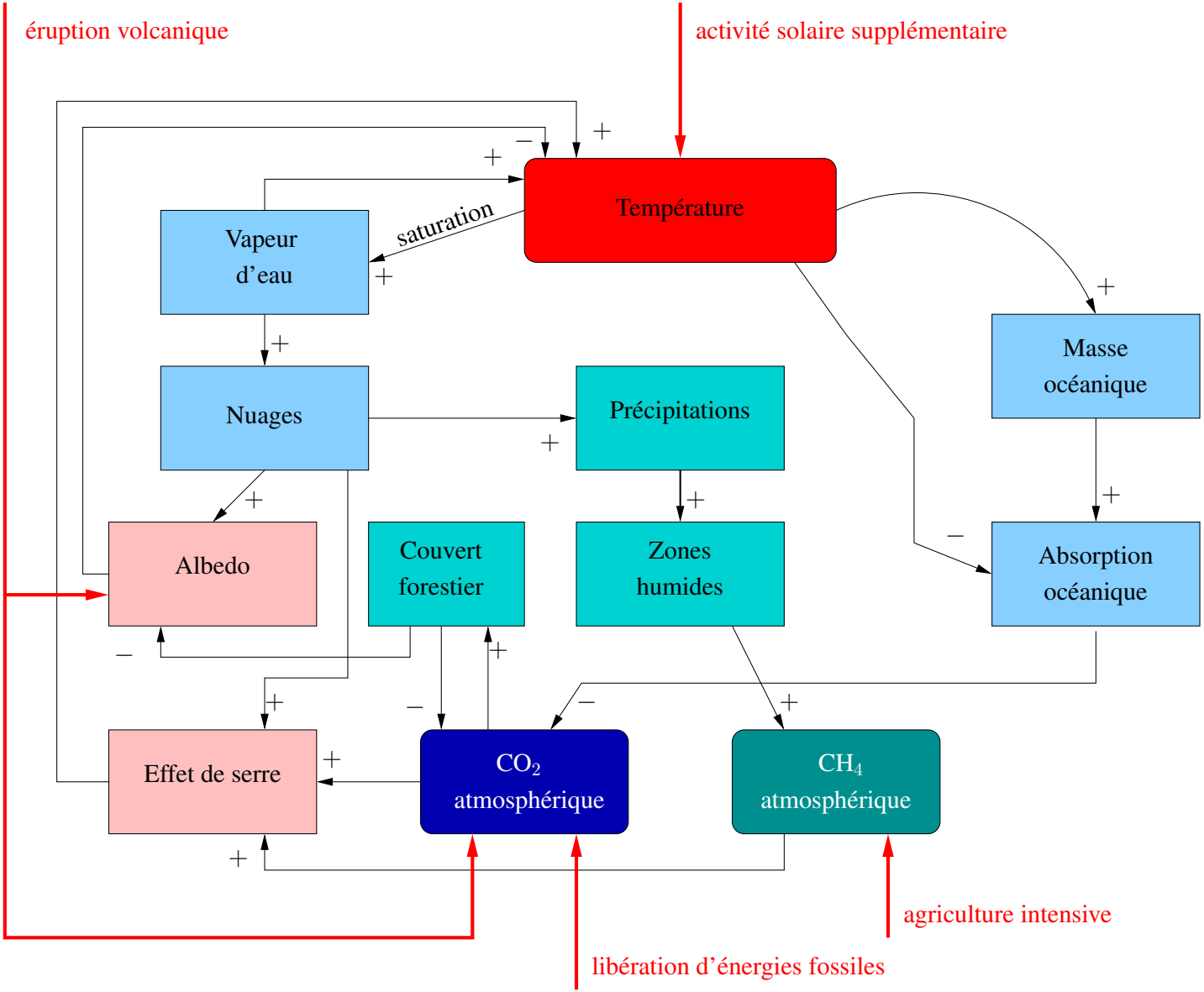
- EPICA : *Euro. Proj. for Ice Coring in Antarctica* ($\leq$ 0,8 Ma)
- Beyond EPICA ($\leq$ 1,5 Ma)
- Datations par les strates ou des isotopes



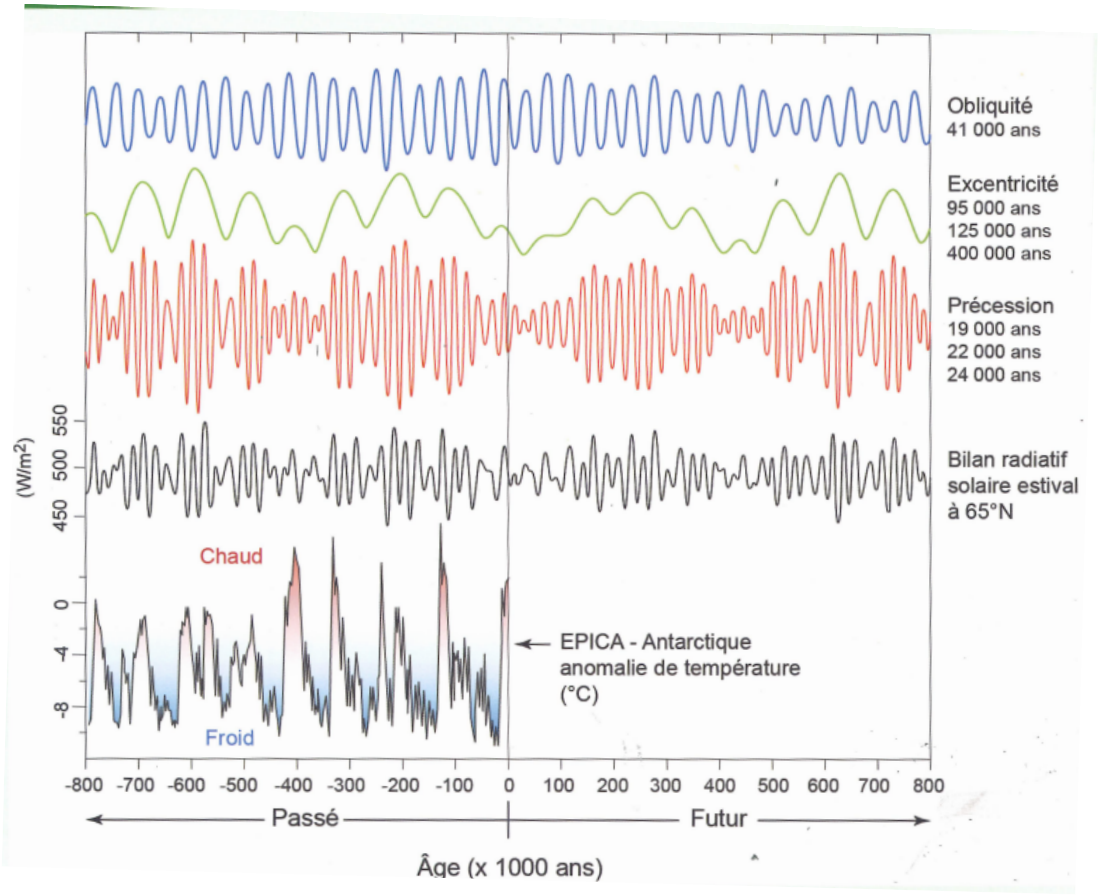
Paléogazomètre !

source : Universités de Grenoble-Alpes et de Berne ; C. Genthon et al., "Vostok ice core : climatic response to CO_2 and orbital forcing changes over the last climatic cycle", Nature, 1987

Comment lire la courbe de Vostok ?



Résultat 1 : le $\delta^{18}O$ dans les glaces (jusqu'à 0,8 Ma)

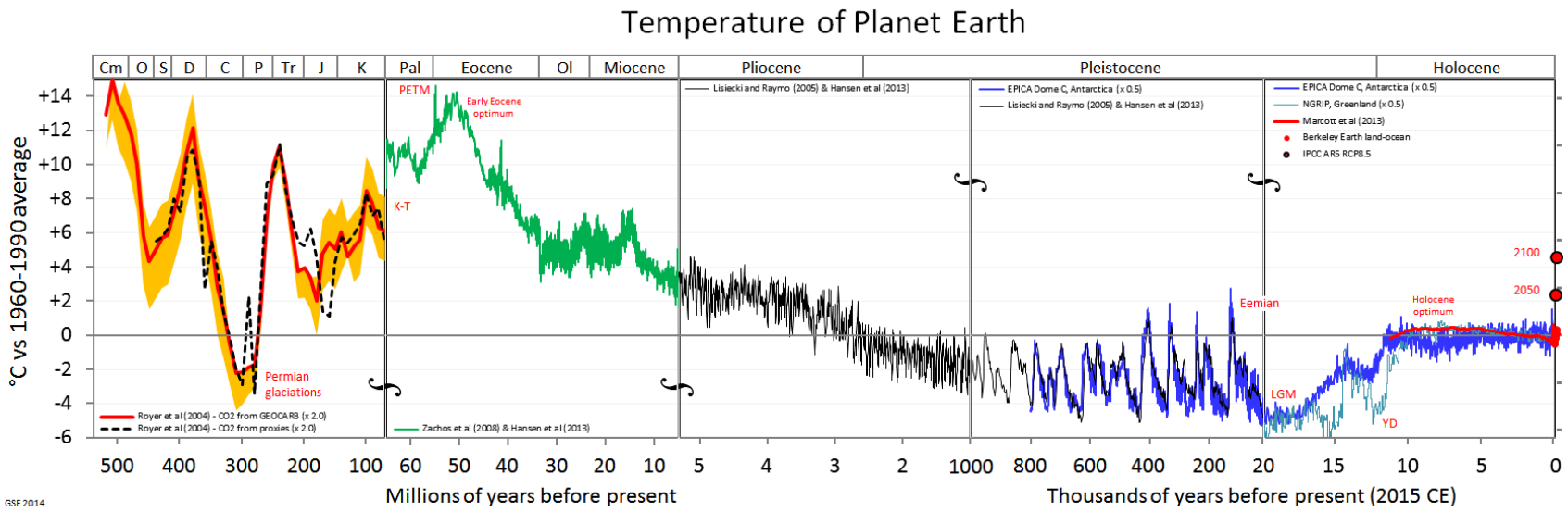


- Un lien existant entre température et cycles de Milankovitch

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

Résultat 2 : le $\delta^{18}O$ dans les sédiments (jusqu'à 540 Ma)

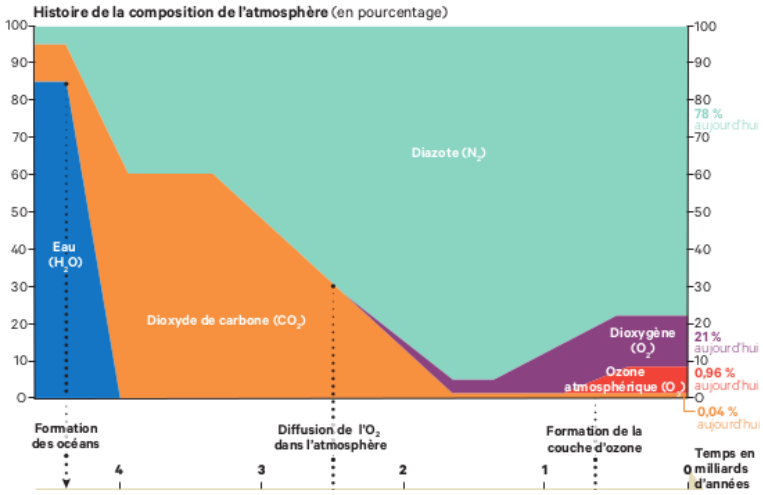


- Période glaciaire :
  - pré-holocène $\rightarrow$ 15-20 ka
  - fin carbonifère/début permien $\rightarrow$ 300 Ma
- Période très chaude :
  - paléocène éocène température maximum $\rightarrow$ 55 Ma ($CO_2 \nearrow$)
- Si $+4°C$, alors jamais vu depuis quelques Ma

source : G. Fergus, 2007

Composition de l'atmosphère

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

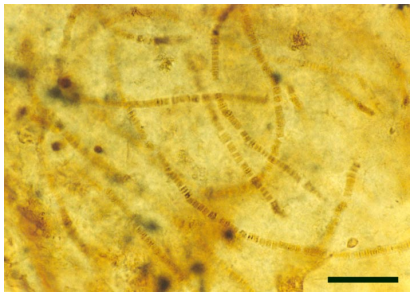


- Refroidissement terrestre (4,3 Ga) : formation de l'océan
- Apparition de la vie dans l'océan (3,5 Ga) :
  - fixation du CO_2 : photosynthèse et érosion rocheuse
  - libération de O_2 dans l'océan puis dans l'atmosphère
  - transformation du O_2 en O_3 (ozone) par rayonnement solaire

source : D. Lowe et al., "Tectonic controls on atmospheric, climatic, and biological evolution 3.5-2.4 Ga", Precambrian Research, 2007

Grandes apparitions

- 3,5 Ga : stromatolithes avec cyanobactéries $\leftrightarrow$ **anaérobie**



- 2,5 Ga : eukaryotes et organismes multicellulaires $\leftrightarrow$ **aérobie**

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

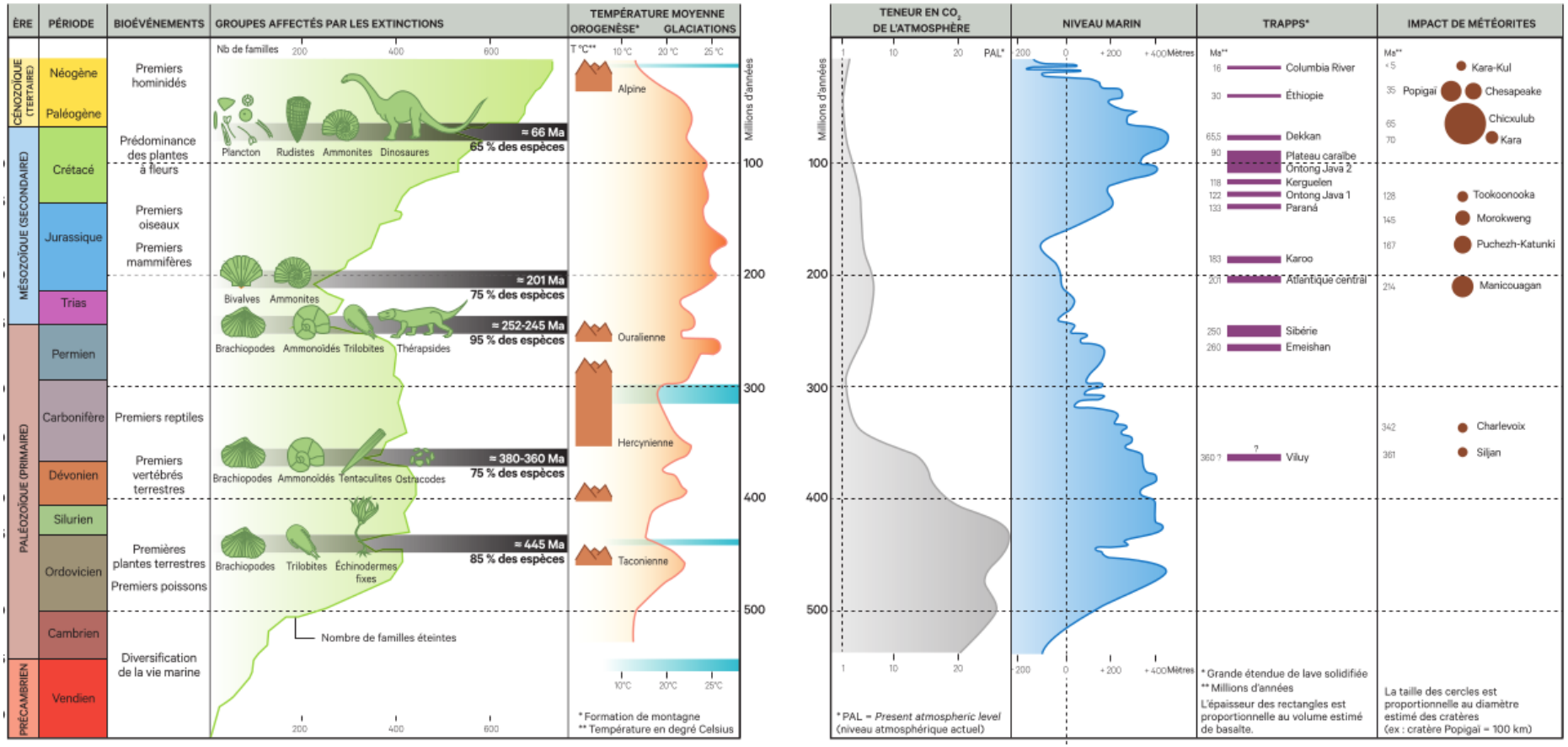
Dans la suite, apparitions souvent liées à des grandes extinctions

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

Grandes extinctions

- 450 Ma : **Ordovicien**
  - en amont, diversification/explosion végétale (CO_2 à 4000 ppm)
  - 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)
- 250 Ma : **Permien**
  - en amont, grandes forêts (Carbonifère à 300 Ma)
  - Pangée à l'équateur d'où altération du CO_2 par érosion
  - baisse de CO_2 (de 1500 à 300 ppm !)
  - éruption volcanique avec grand effet Albédo (trapps de Sibérie)
- 200 Ma : **Trias**
  - ouverture de la Pangée, donc activité volcanique intense
  - météorites moyennes mais nombreuses
- 70 Ma : **Crétacé**
  - météorite gigantesque du Chicxulub au Yucatan
  - activité volcanique intense au Deccan

Résumé



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

Section 4 : Climat futur

Histoire du GIEC

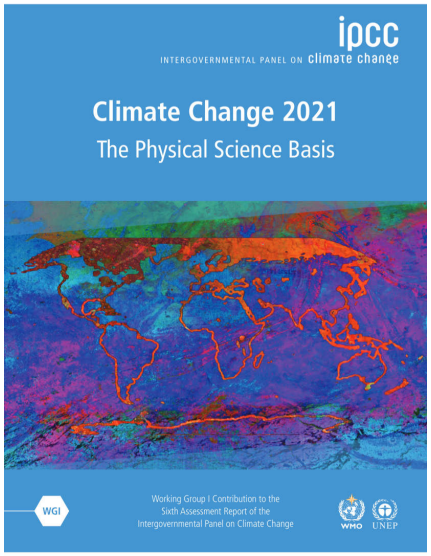
Groupe d'experts **I**ntergouvernemental sur l'**E**volution du **C**limat (*IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change*)

- Mesure de GES à Hawaï depuis 1958 : courbe de Keeling
- Sciences du climat stabilisées $\sim$ 1970
- Alertes scientifiques
  - 1979 : rapport de J. Charney (commandité par J. Carter)
  - 1988 :
    - ↪ article de C. Genthon (avec C. Lorius et J. Jouzel) confirmant lien CO_2 et température
    - ↪ audition de J. Hansen au Congrès états-unien
    - ↪ création du GIEC par l'OMM et le PNUE sur demande du G7
- 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

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



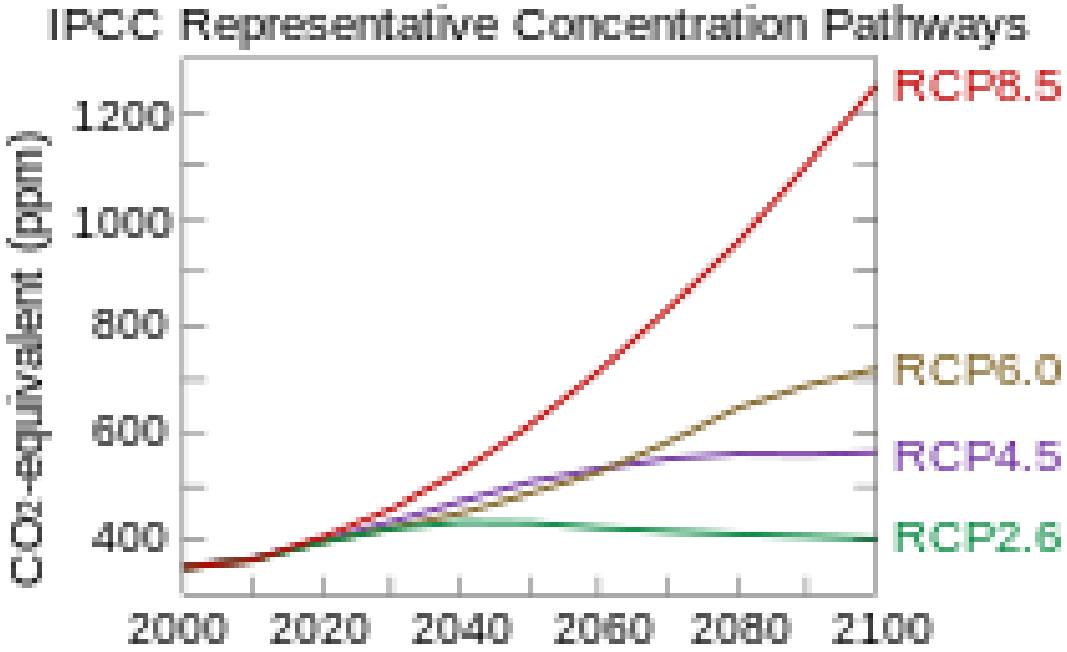
- 1990 (FAR) : variations naturelles mais influence humaine possible et lente
- 1995 (SAR) : influence humaine détectable
- 2001 (TAR) : réchauffement probablement d'influence humaine
- 2007 (AR4) : réchauffement effectif et très vraisemblablement d'influence humaine
- 2014 (AR5) : réchauffement sans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

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

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

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

- RCPn: *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)

Scénarios du GIEC : AR6 (1/2)

SSPm-n = Shared Socio-economic Pathway

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

Un narratif

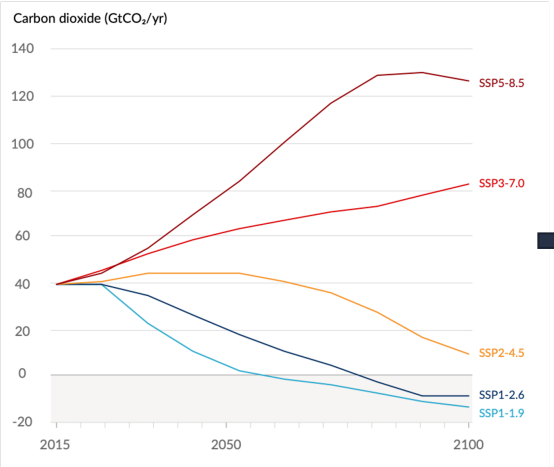
- Trajectoires socio-économiques / choix de société
  - ↪ population, éducation, PIB, énergies fossiles, sols, $\cdots$
- Conséquences sur le climat mais aussi d'autres métriques
  - ↪ biodiversité, inégalités sociales, migrations, $\cdots$

- SSP5-8.5 : forte croissance, utilisation intense des fossiles
  - ↪ étude de la sensibilité aux aléas climatiques
  - ↪ étude des systèmes très critiques pour les activités humaines
  - ↪ 1100 ppm en 2100
- SSP1-1.9 : CO_2 net zéro en 2050
  - ↪ objectifs de l'Accord de Paris
  - ↪ 400 ppm en 2100

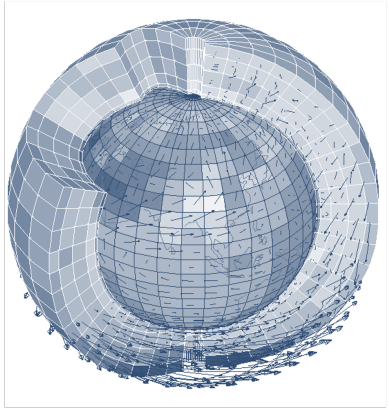
Scénarios du GIEC : AR6 (2/2)

- SSP1-2.6 : CO_2 net zéro en 2070
  - ↪ 450 ppm en 2100
- SSP2-4.5 : *Nation. Determined Contrib.* de l'Accord de Paris
  - ↪ 600 ppm en 2100
- SSP3-7.0 : tendance linéaire de croissance de rejet
  - ↪ l'Etat travaille à l'adaptation de ce SSP (+4°C)
  - ↪ 850 ppm en 2100

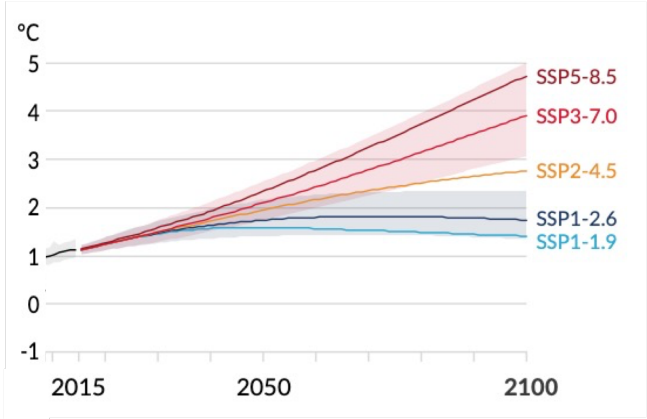
Émissions de GES



Modèles climatiques

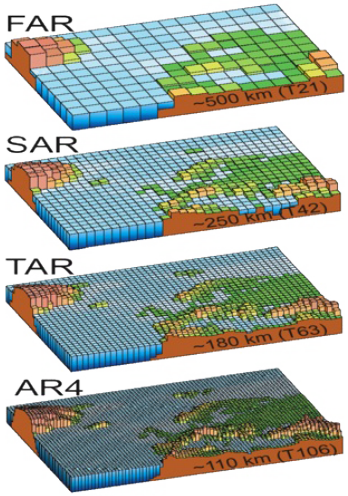


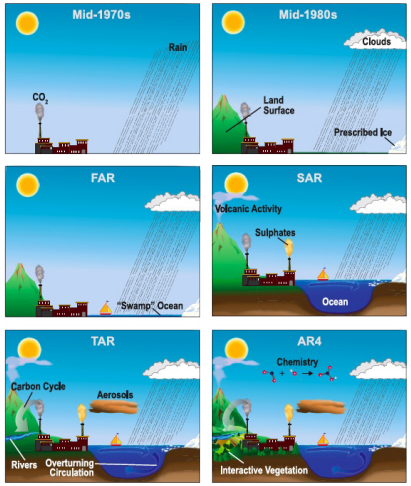
Projections climatiques



source : http://www.carbone4.com/ ; https://www.mcc-berlin.net/

Modèles du climat (1/2)





- CIMP*n*: *Coupled Model Intercomparison Project* pour l'AR-*n*
  - une soixantaine de modèles internationaux (IPSL en France)
  - comment jouer avec un modèle ?
    - ↪ modèle *stricto sensu* ↔ équations f
    - ↪ configuration du modèle ↔ paramètres $\boldsymbol{\theta}$
    - ↪ simulation du modèle ↔ conditions aux limites $\mathbf{x}(0)$
  - Modèles primitifs prennent bien les éléments prépondérants en compte !

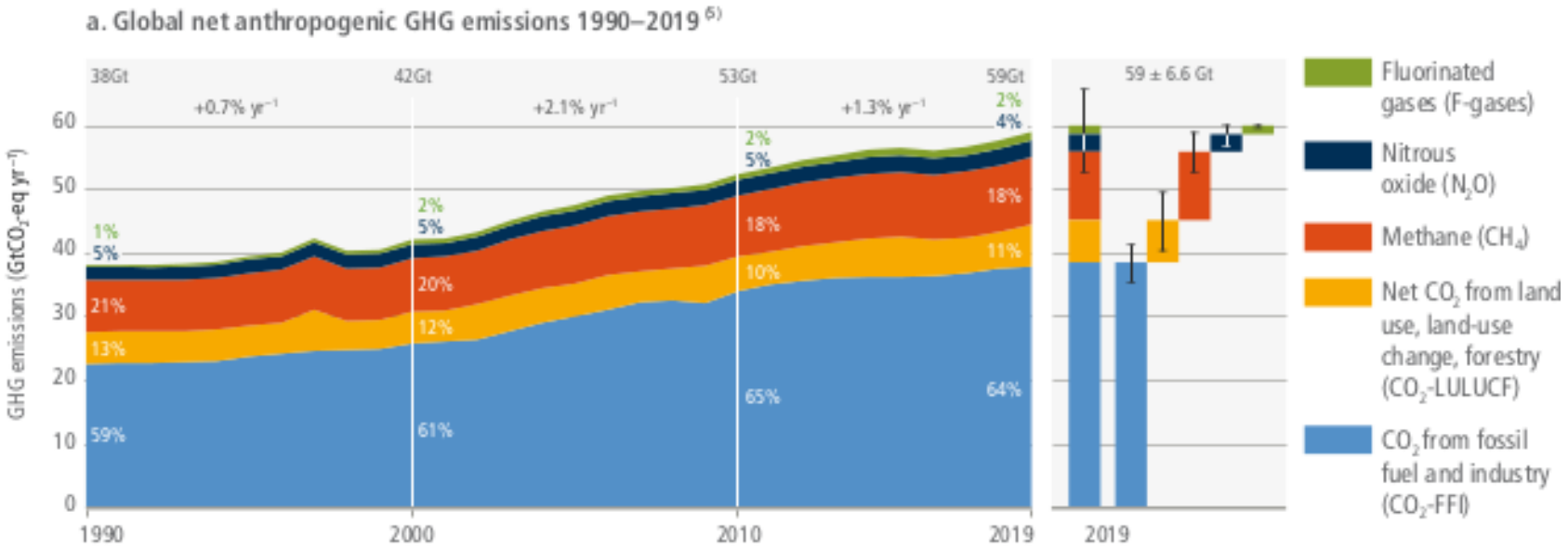
source : J.-M. Jancovici, "Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?", 2007 ; A. Ribes et al., "Making climate projections conditional on historical observations", Science Advances, 2021

Modèles du climat (2/2)

- 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

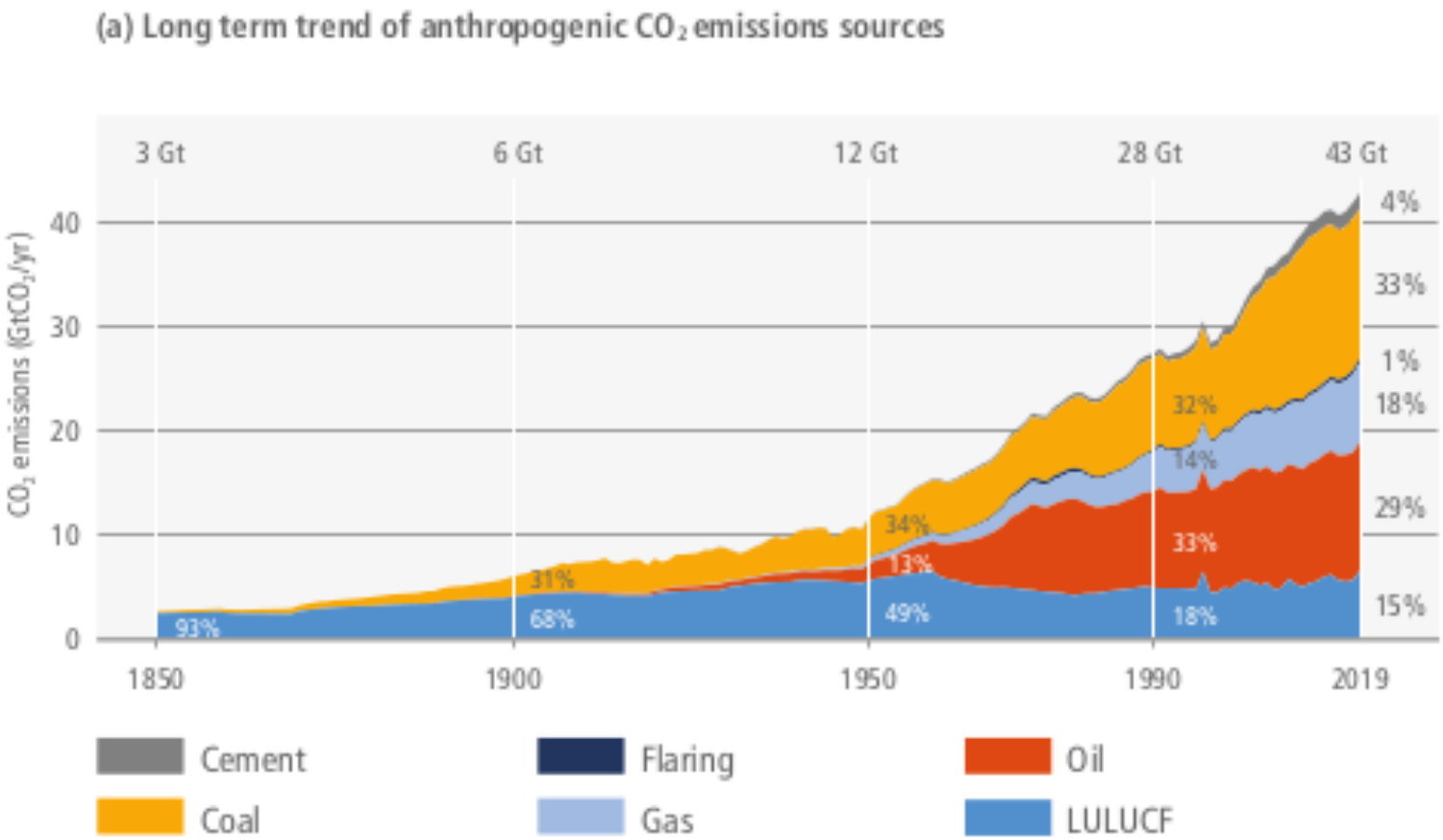
En amélioration continuelle
(prise en compte de phénomènes et de leurs interactions)

Evolution des GES par gaz



- 60Gt CO_2e par an dont 40Gt de CO_2
- Hausse de 50% en 30 ans
- Points singuliers : 1997 (feux en Asie), 2008 (récession)

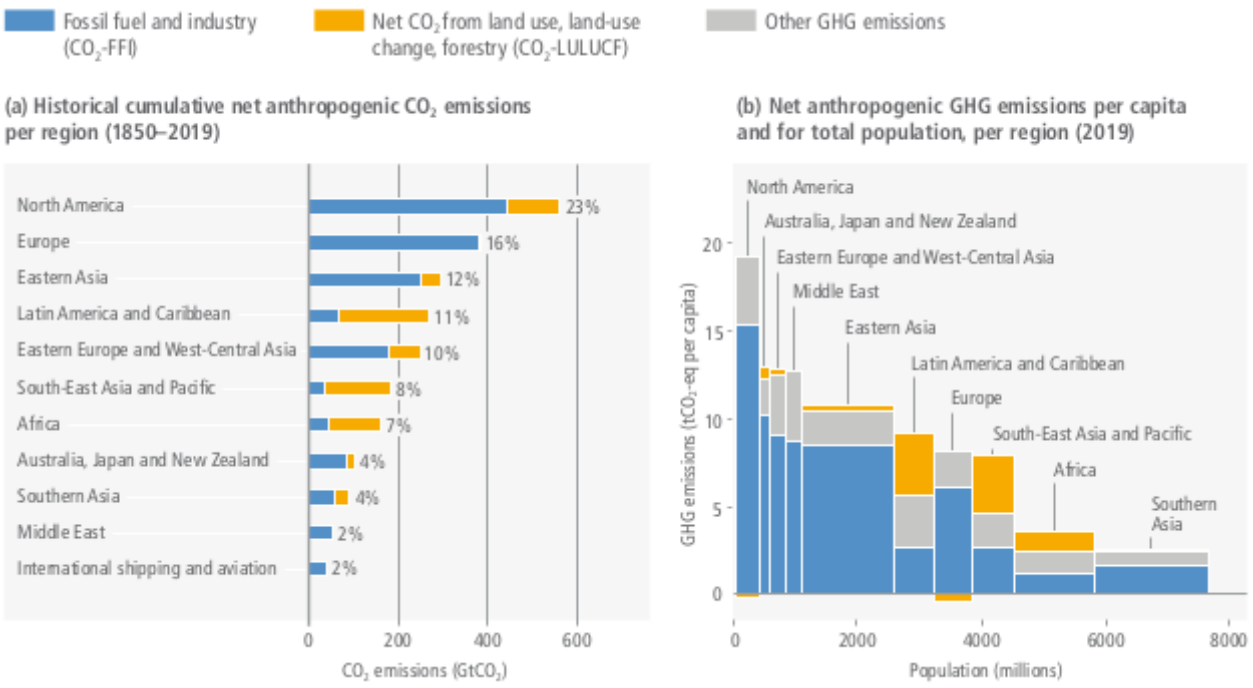
Evolution du CO_2 par ressources naturelles



- 33% pour le charbon !
- Accumulation des ressources

source : J.-B. Fressoz, "Sans transition", 2024

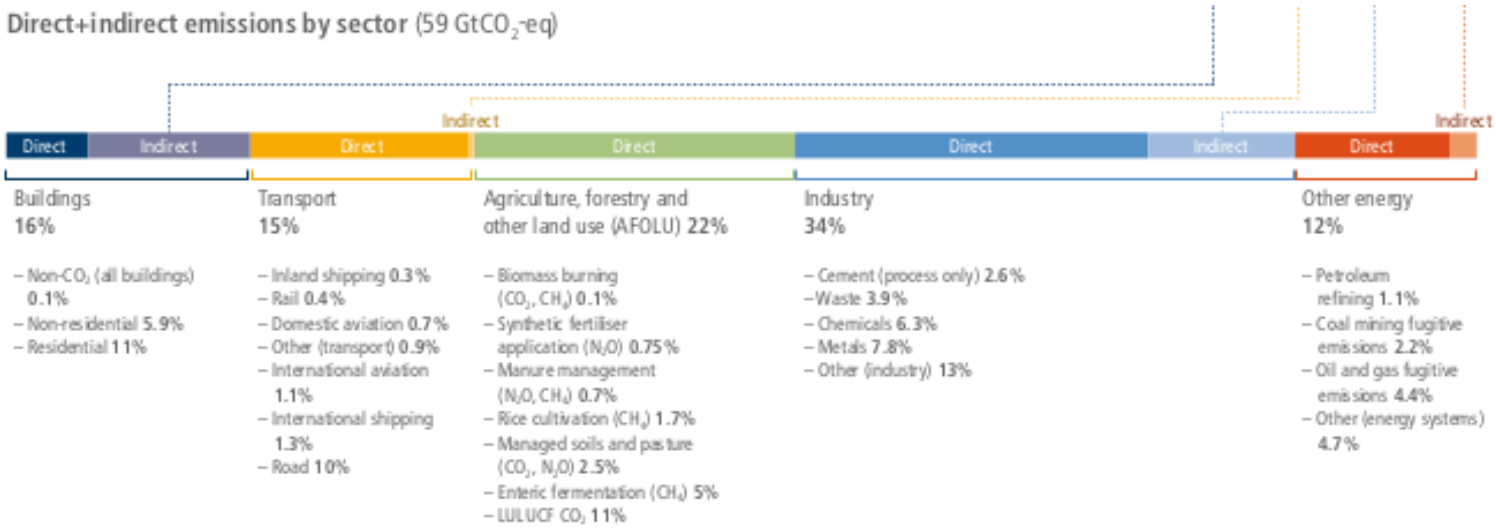
Répartition des GES par pays



- Pays occidentaux : 40% du stock
- En flux individuel : pays anglo-saxons, Moyen-Orient, $\cdots$
- En flux total : Asie de l'Est, Amérique du Nord, $\cdots$
- Attention: ce n'est pas l'empreinte carbone d'un individu !

Ces inégalités compliquent les négociations internationales

Répartition des GES par activités



Problème: bilan très équilibré

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

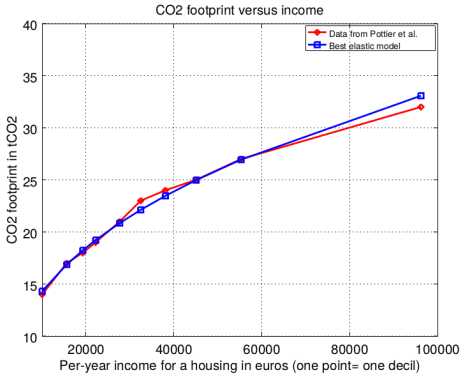
source : http://climatetrace.org

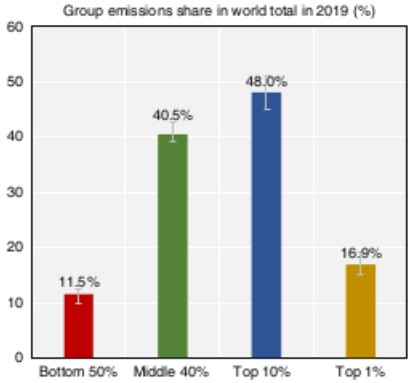
Répartition des GES par revenu

- *Proxy* : émission $= f(\text{revenu})$ où $f(x) \propto x^{\beta}$ et $\beta \in [0,3; 1,2]$
- Base de données directement (cf. INSEE)

- **National :** 9,6tCO_2/a.p
- $\beta = 0,37$

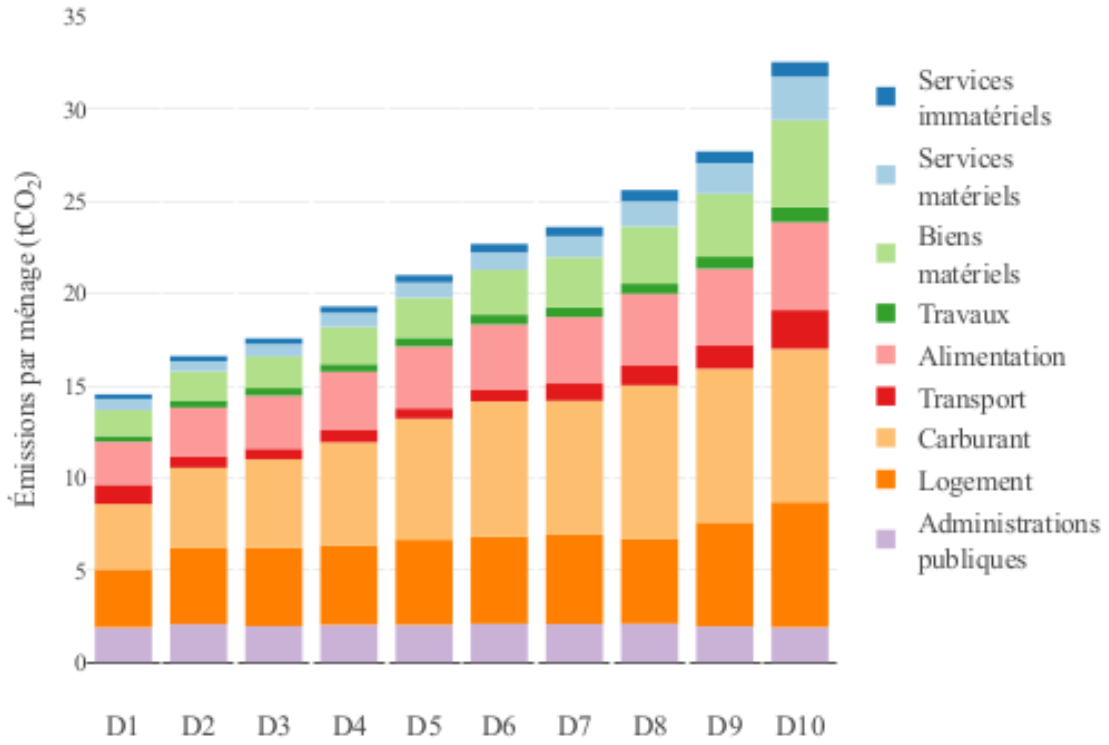
- **Mondial :** 6,6tCO_2/a.p
- $\beta \in [0,4; 0,8]$





- Effet contributif très inégalitaire
- Capital et épargne non pris en compte
- Variation forte à l'intérieur d'un décile

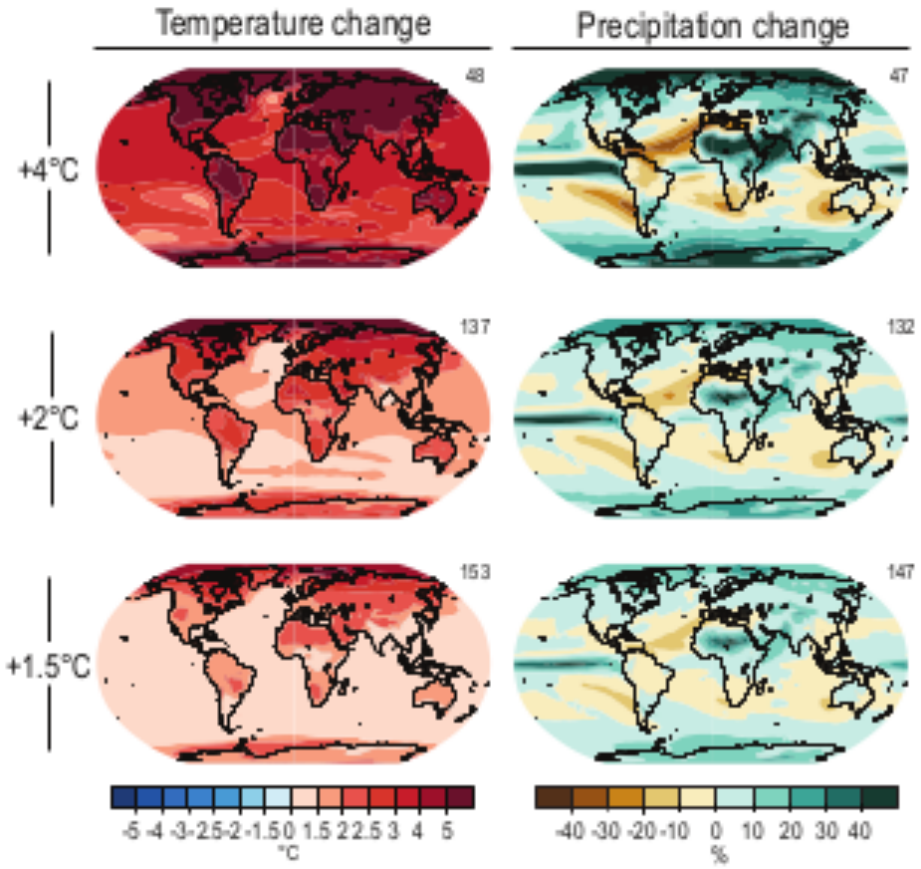
Répartition nationale des GES par activités et revenu



- Selon les déciles, services matériels et immatériels diffèrent
- Dépenses contraintes ou pas : difficile à examiner ici

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 CO_2 ? Panorama critique des inégalités écologiques en France", 2020

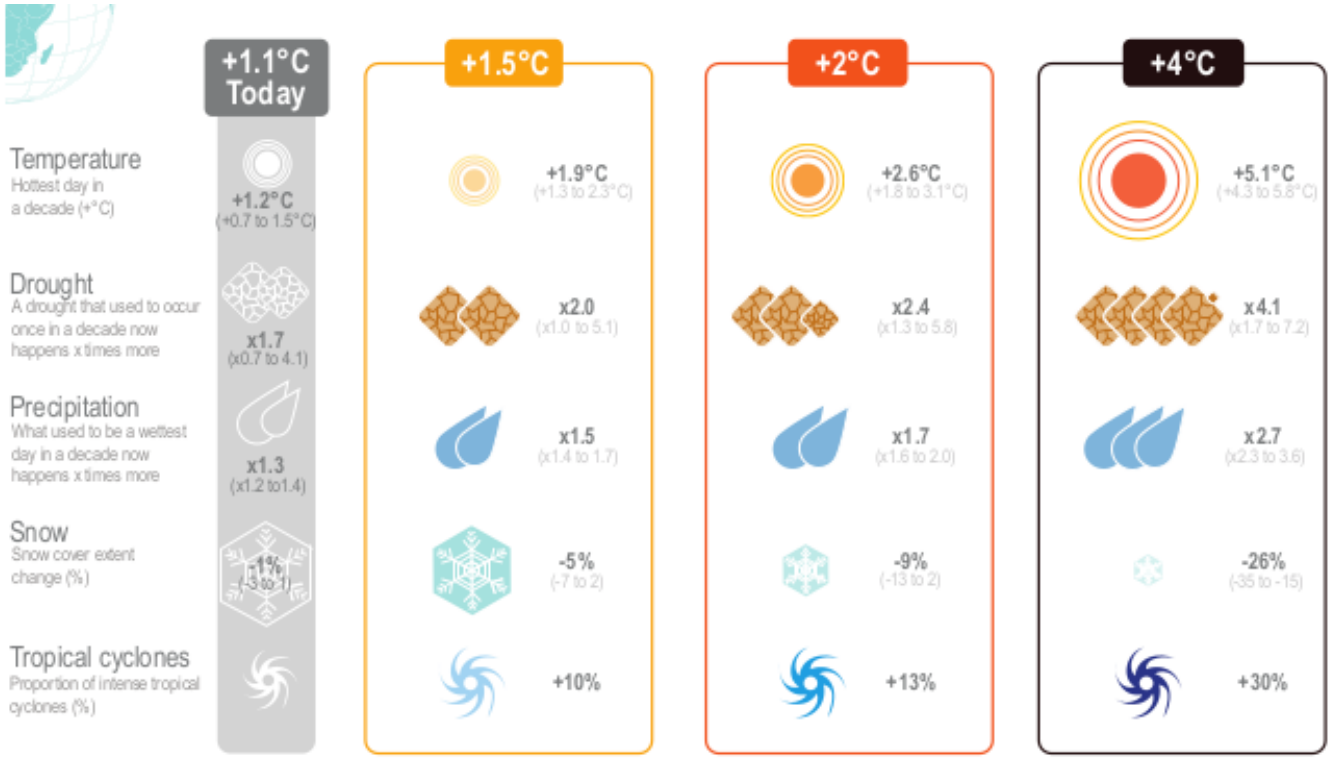
Climat futur : température et précipitations moyennes



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

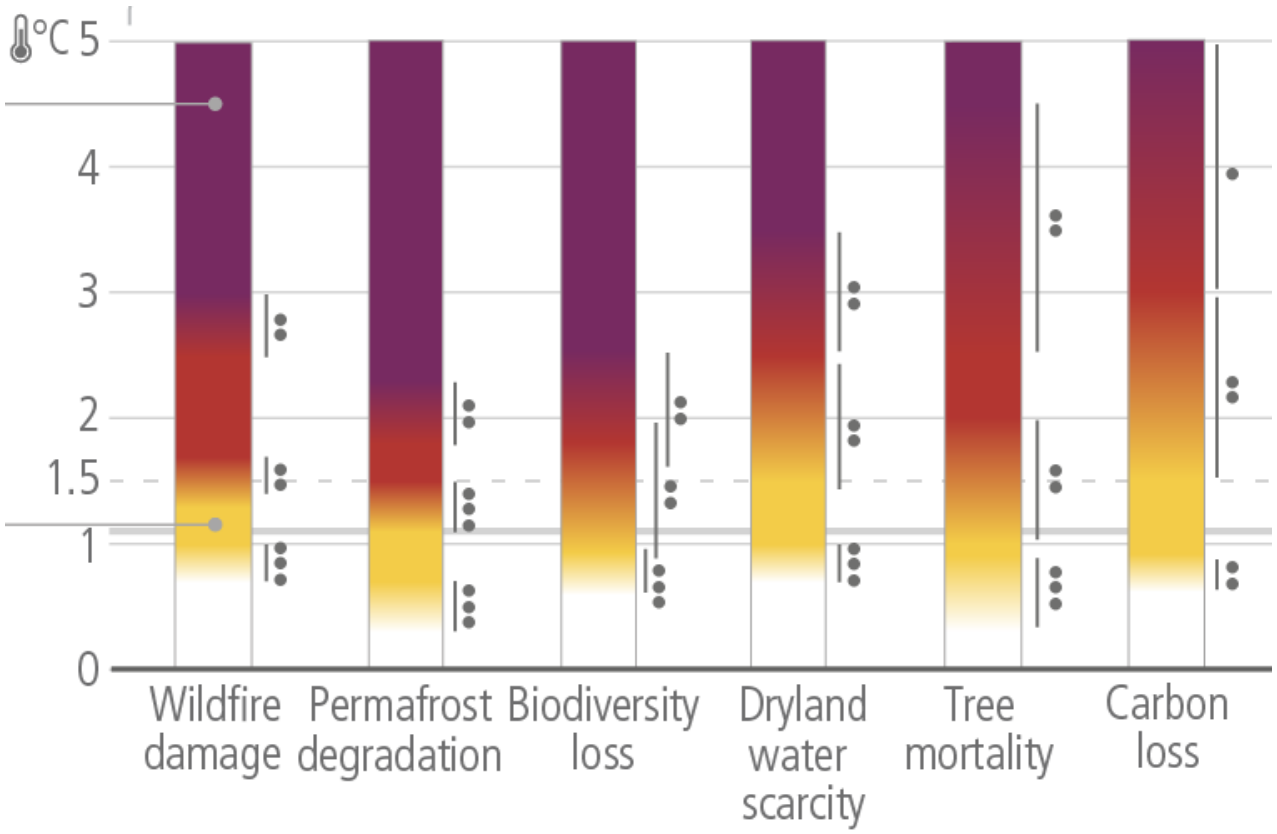
source : https://impactlab.org/ (Berkeley, Rutgers, Université de Chicago)

Climat futur : probabilités des évènements extrêmes



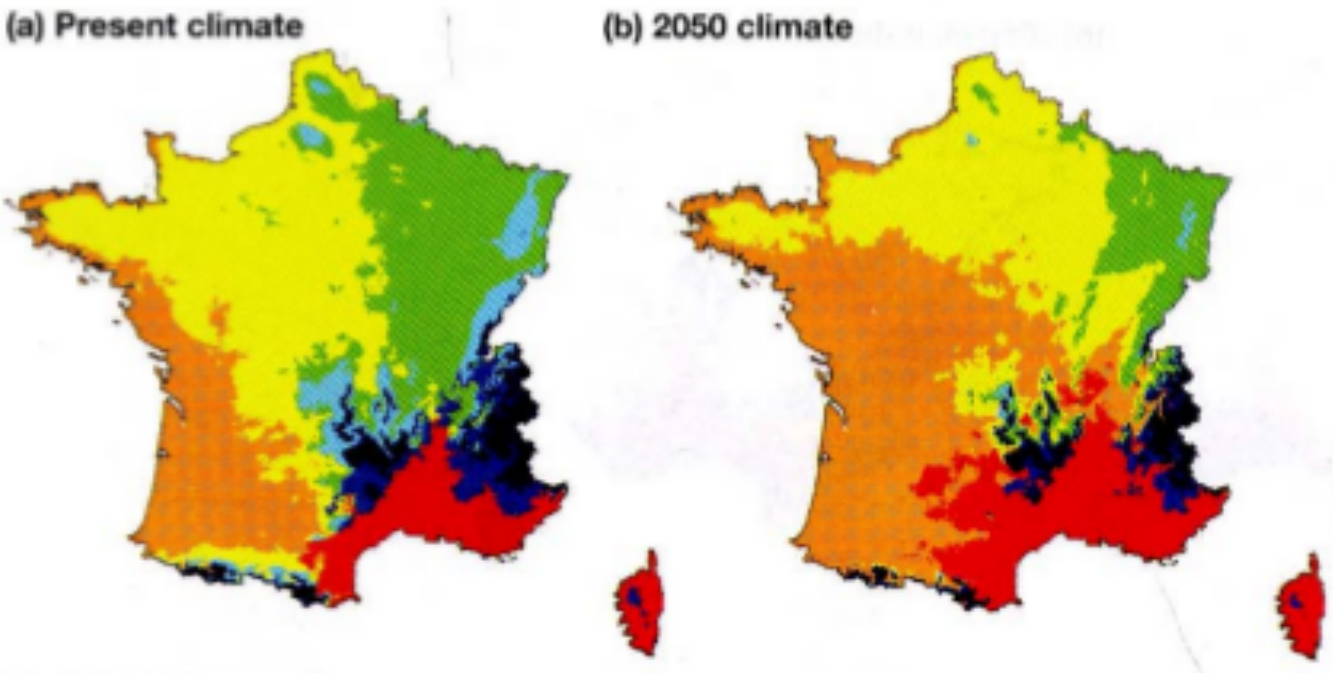
- Fréquence plus élevée de sécheresse, de canicule
- Plus de cyclones
- Moins de neige : problème de stockage de l'eau

Climat futur : impact sur le monde naturel



- +2°C : gérable
- +4°C : dégâts très importants et des rétroactions non maîtrisées

Climat futur : zones climatiques nationales



Scénario 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

Conclusion

Savoir :

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

Savoir-faire :

- Analyser un article de vulgarisation sur les sujets abordés