

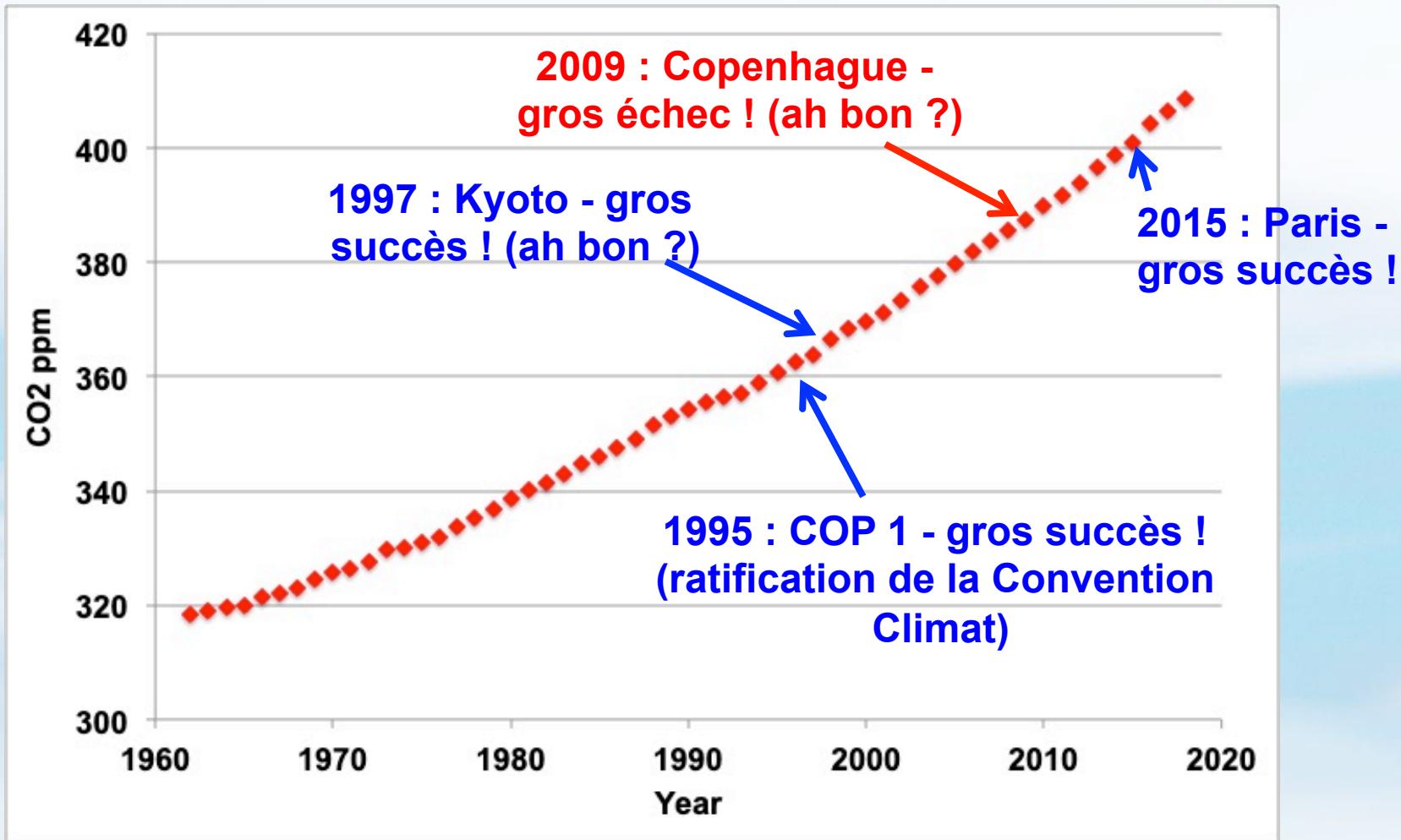
Eléments de base sur l'énergie au 21^e siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech 2020
Partie 3 - Quel climat pour (après)demain ?**

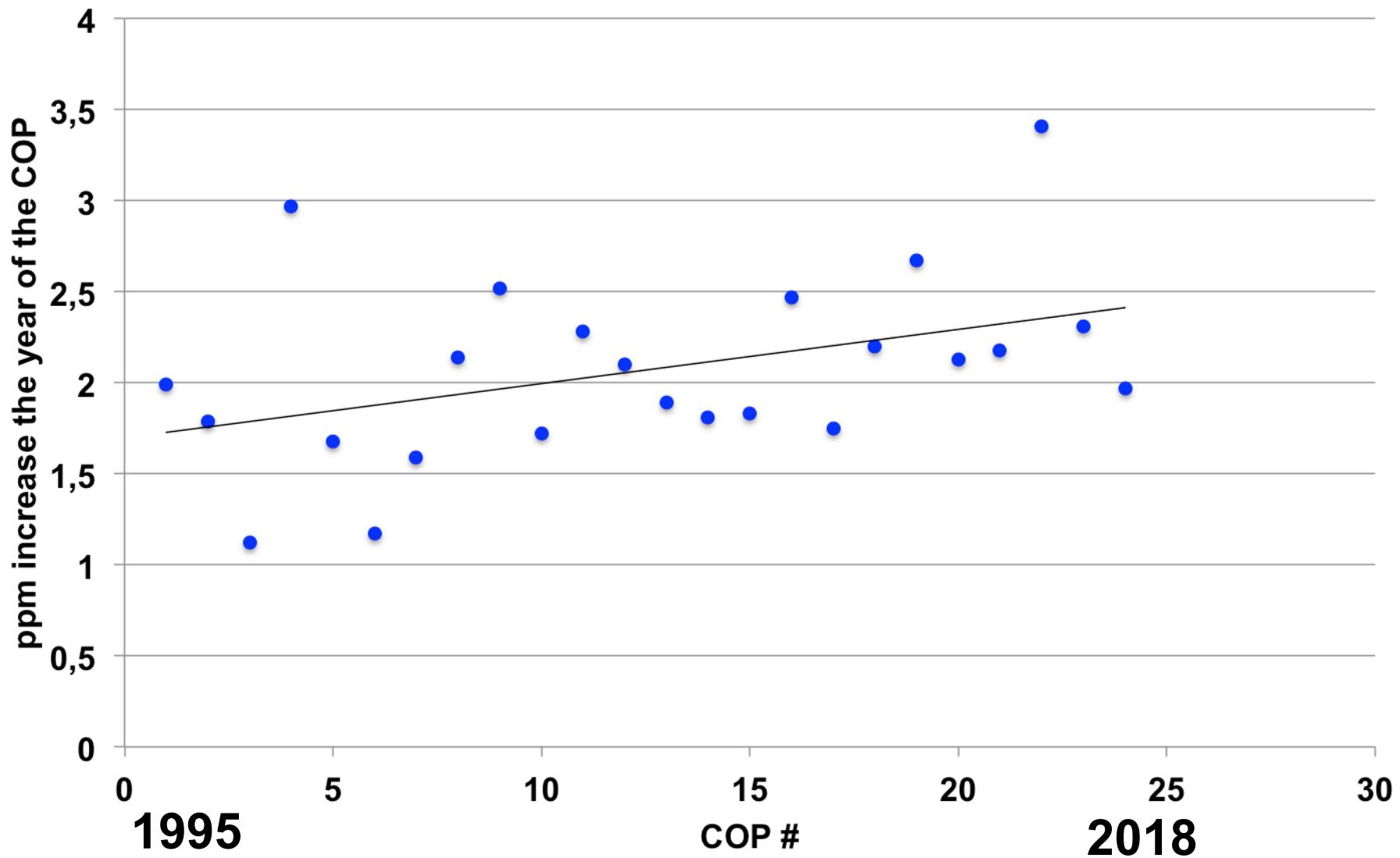
Nous avons un problème de climat ? Meuh non, c'est réglé !





Concentration atmosphérique en CO₂ depuis 1962. Données NOAA ESRL.

Tu causes, tu causes... (bis)



Augmentation duCO₂ atmosphérique à Mauna Loa l'année de chaque Conférence des Parties. Jancovici, d'après données NOAA ESRL.

Attention : le climat, ce n'est pas la météo !

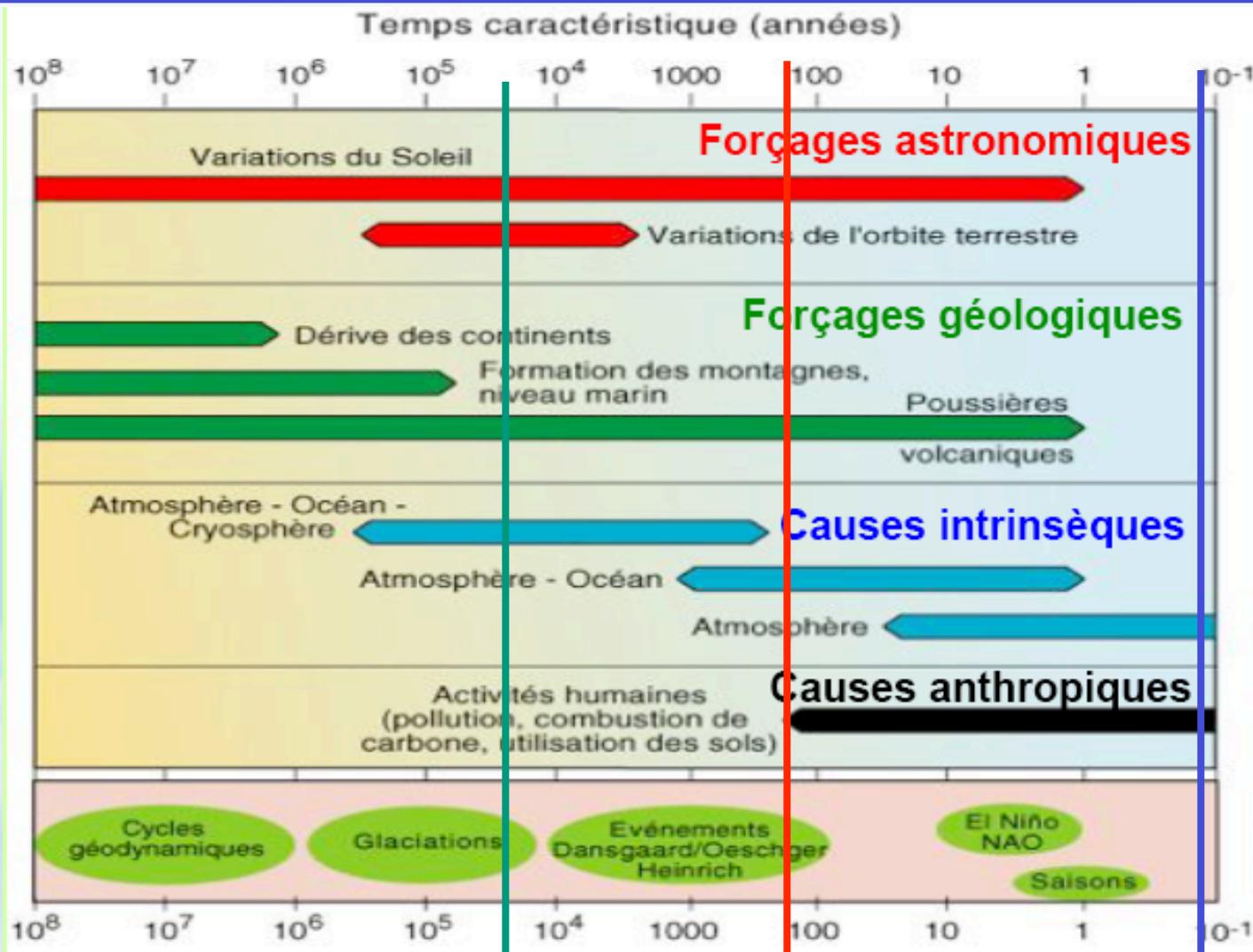
Avec nos sens, nous ne percevons que **la météo**. La météo, c'est le temps qu'il fait « tout de suite et devant ma porte ». Elle concerne des valeurs **instantanées** et **locales** de la température, des précipitations, de la pression, de la nébulosité, etc.

Par contre, le climat désigne des conditions **moyennes** de température ou de précipitations, et leurs variations les plus régulières (saisons par ex.), sur une zone plus ou moins vaste.

La confusion est possible parce que le **climat** utilise les **mêmes grandeurs** que la météo : température, précipitations, vent, nébulosité, etc.

Le climat change (et a toujours changé), mais pas aussi vite que la météo !

Que des hommes pour tripoter le climat ? Allons donc...



A l'échelle de 10.000 à 100.000 ans : l'astronomie domine

A l'échelle du siècle au millénaire : l'océan domine

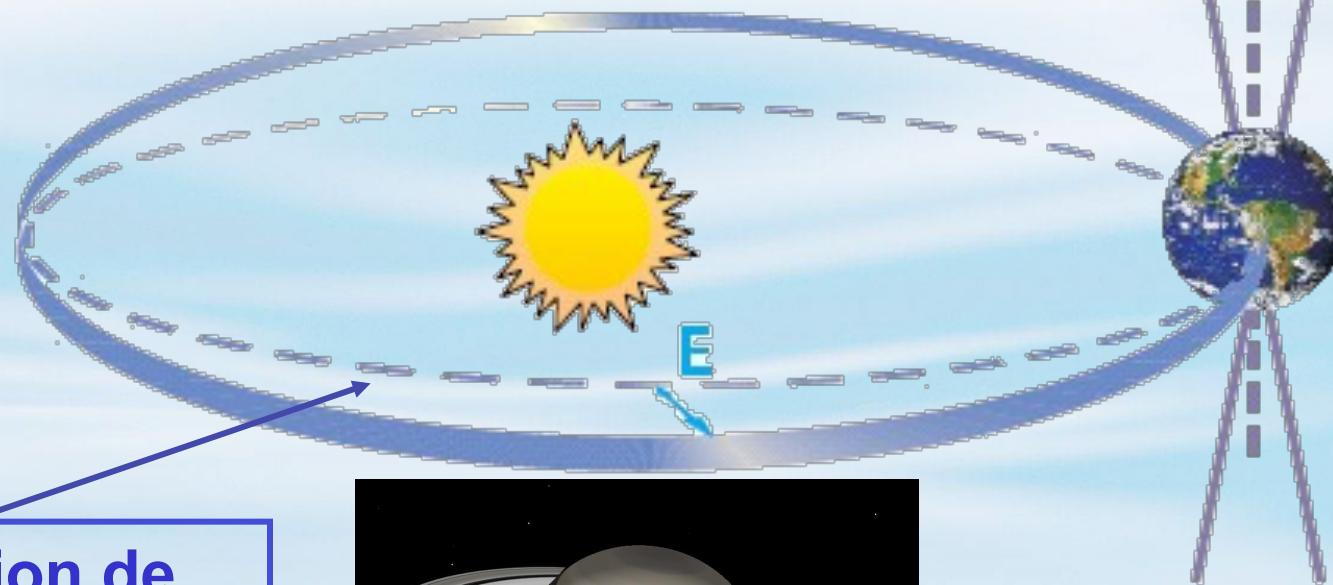
Causes diverses d'influence sur le climat et échelles de temps caractéristiques. Edouard Bard, exposé au Collège de France.

A l'échelle de la semaine : l'atmosphère domine

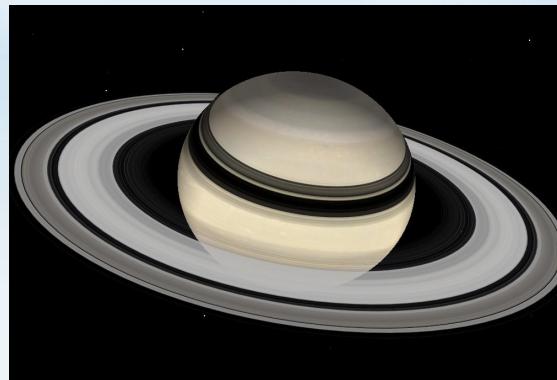
Être perturbé concerne aussi les planètes



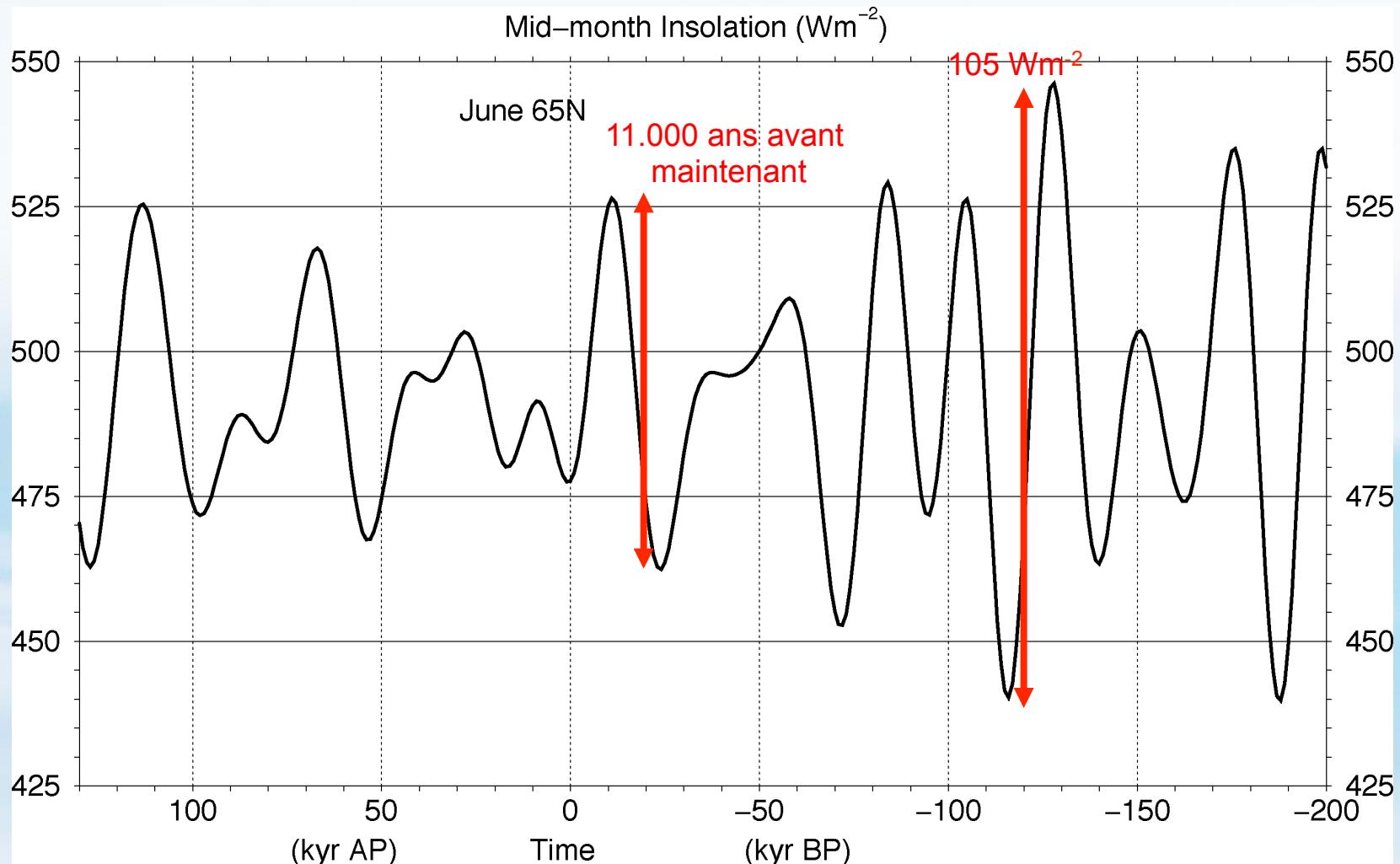
Obliquité:
~ 40 000 ans



Variation de
l'excentricité :
~ 100 000 ans



Précession des
équinoxes:
~ 21 000 ans



Variation de l'insolation en juin à 65°N. Source André Berger, exposé au Collège de France, 2004



Climatologue, cela n'existe (presque) pas !

Pour cerner le comportement du climat, il faut une multitude de disciplines scientifiques, **dont aucune ne s'appelle « climatologie » :**

Astrophysiciens -> énergie solaire reçue par la Terre

Dynamiciens de l'atmosphère -> échanges surface-espace

Chimistes de l'atmosphère (aérologues) -> composition de l'air

Océanographes -> océan,

Glaciologues -> calottes polaires, paléoclimats,

Vulcanologues -> volcans,

Géophysiciens -> dérive des continents,

Biogéochimistes -> cycle des éléments (N, C, P, O...), paléoclimats

Biologistes -> végétation,

Sans parler de toutes les sciences humaines, puisque l'homme est devenu un agent climatique....

L'effet de serre est de l'histoire (scientifique) très ancienne

1824 : Joseph Fourier, physicien français, publie "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", où il expose que la température du sol est augmentée par le rôle de l'atmosphère

1838 : Claude Pouillet, physicien français, puis Joseph Tyndall, un irlandais, attribuent l'effet de serre naturel à la vapeur d'eau et au gaz carbonique. Pouillet affirme que toute variation de la quantité de vapeur d'eau, comme de CO₂, doit se traduire par un changement climatique

1896 : Svante Arrhenius, chimiste Suédois (Prix Nobel 1903) prédit que l'utilisation intensive des combustibles fossiles engendrera un réchauffement climatique. Il donne un ordre de grandeur : 4°C en plus pour un doublement du CO₂ dans l'air.

1922 : Lewis Fry Richardson, un physicien anglais, tente une première expérience de modélisation du climat à partir des seules équations de la physique (sans ordinateur !).

1950 : Le premier ordinateur (l'ENIAC) est utilisé pour expérimenter le premier modèle numérique de prédition météorologique

Un gaz est dit « à effet de serre » si il est capable d'absorber du rayonnement infrarouge émis par la Terre

Cela concerne essentiellement :

La vapeur d'eau H₂O

Le dioxyde de carbone ou « gaz carbonique » ; CO₂

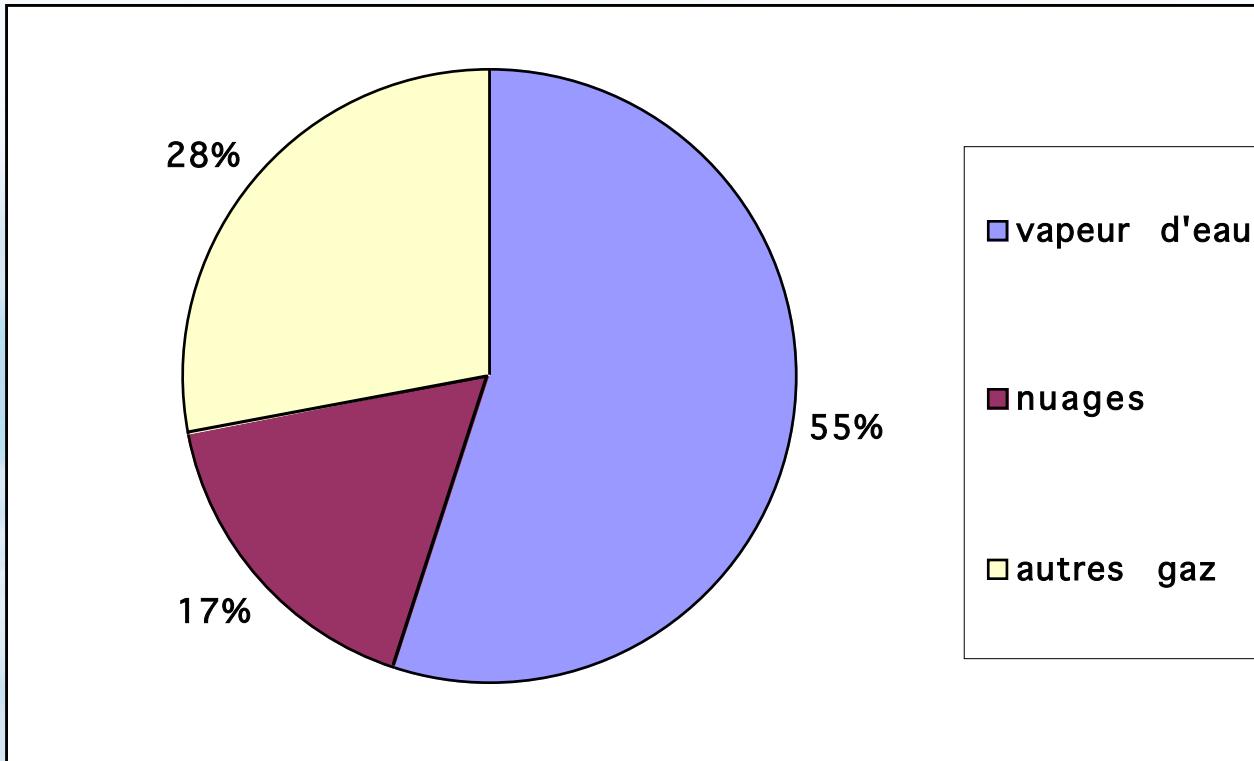
Le méthane, ou gaz naturel ; CH₄

Le protoxyde d'azote, ou gaz hilarant ; N₂O

Des molécules plus complexes telles les halocarbures ; C_xH_yF_zCl_t

Un gaz sans émissions directes : l'ozone

Origine de l'effet de serre « naturel » : que d'eau !



La Terre n'a pas le monopole de l'effet de serre

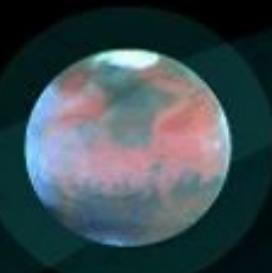
Mars

Thin atmosphere

(Almost all CO₂ in ground)

Average temperature : - 50°C

Planets and atmospheres



Earth

0,03% of CO₂ in the atmosphere

Average temperature : + 15°C



Venus

Thick atmosphere

containing 96% of CO₂

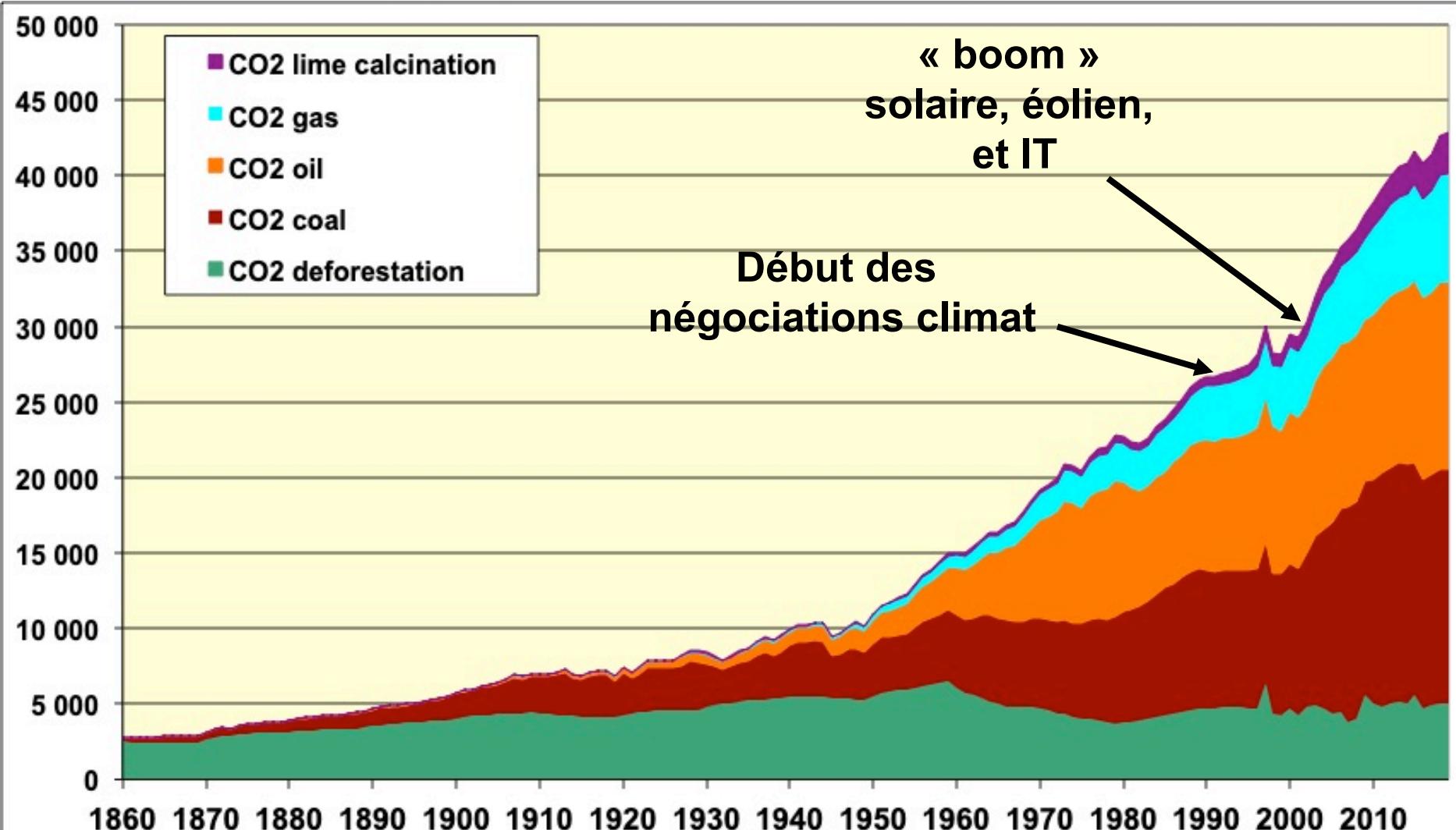
Average temperature : + 420°C



GRAPHIC DESIGN : PHILIPPE REKACEWICZ

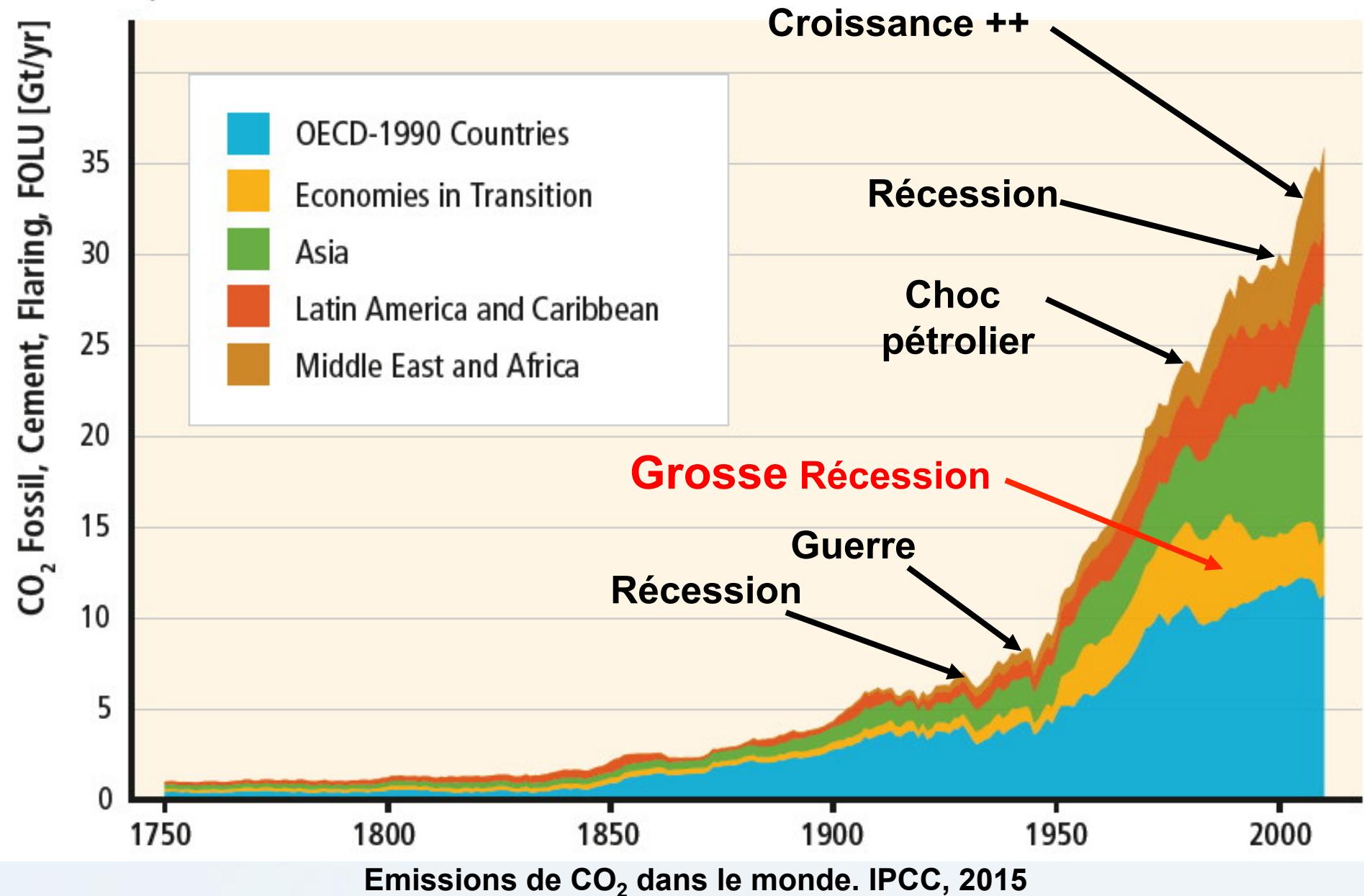
Sources: Calvin J. Hamilton, Views of the solar system, www.planetaryimages.com; Bill Arnett, The nine planets, a multimedia tour of the solar system, www.seds.org/billa/ttnp/nineplanets.html

L'homme, agent climatique

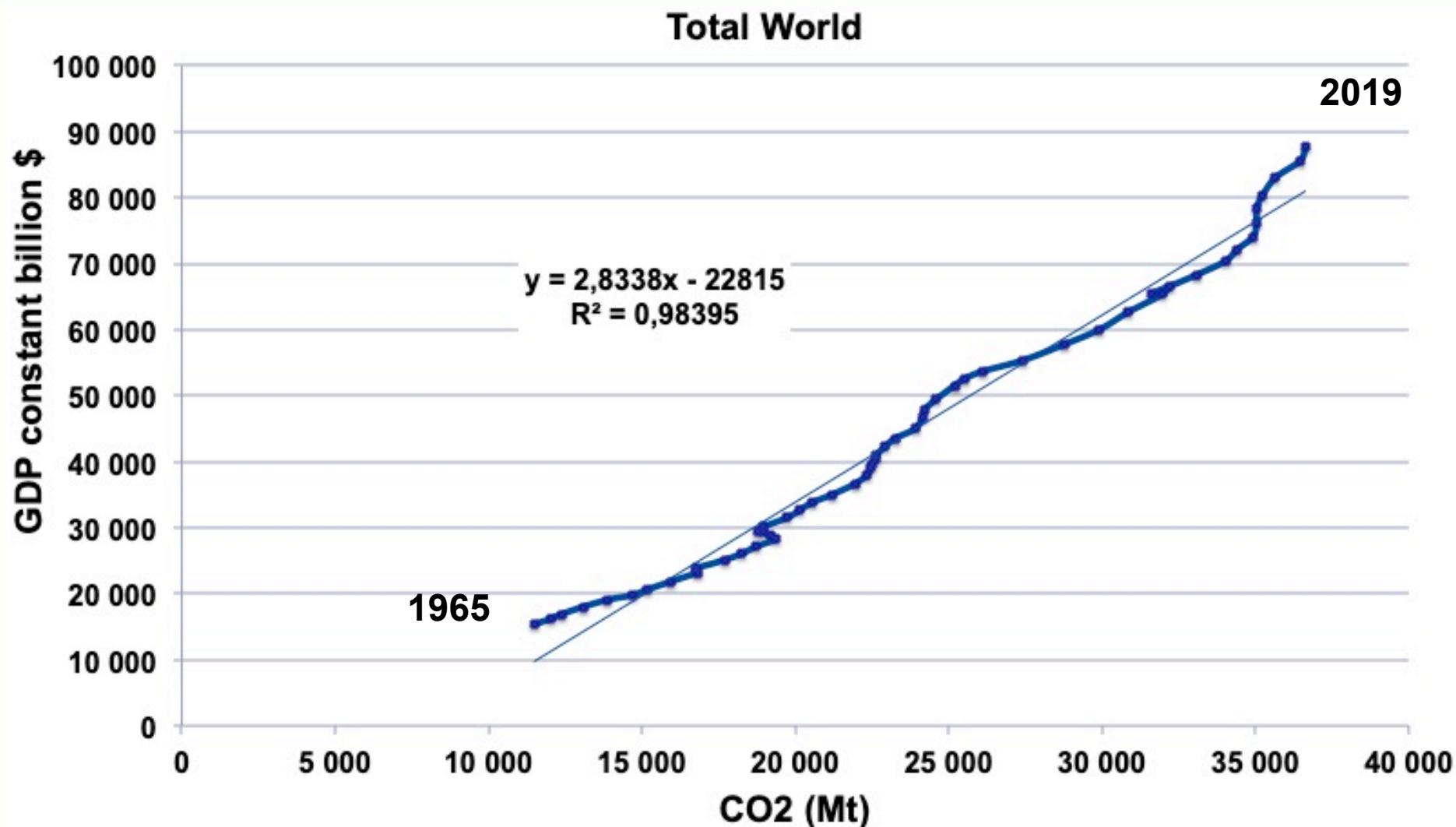


Emissions de CO₂ toutes sources depuis 1860. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review pour les combustibles ; source CDIAC pour la déforestation et le ciment

Plus ça va (le PIB) et moins ça va (le CO₂)...



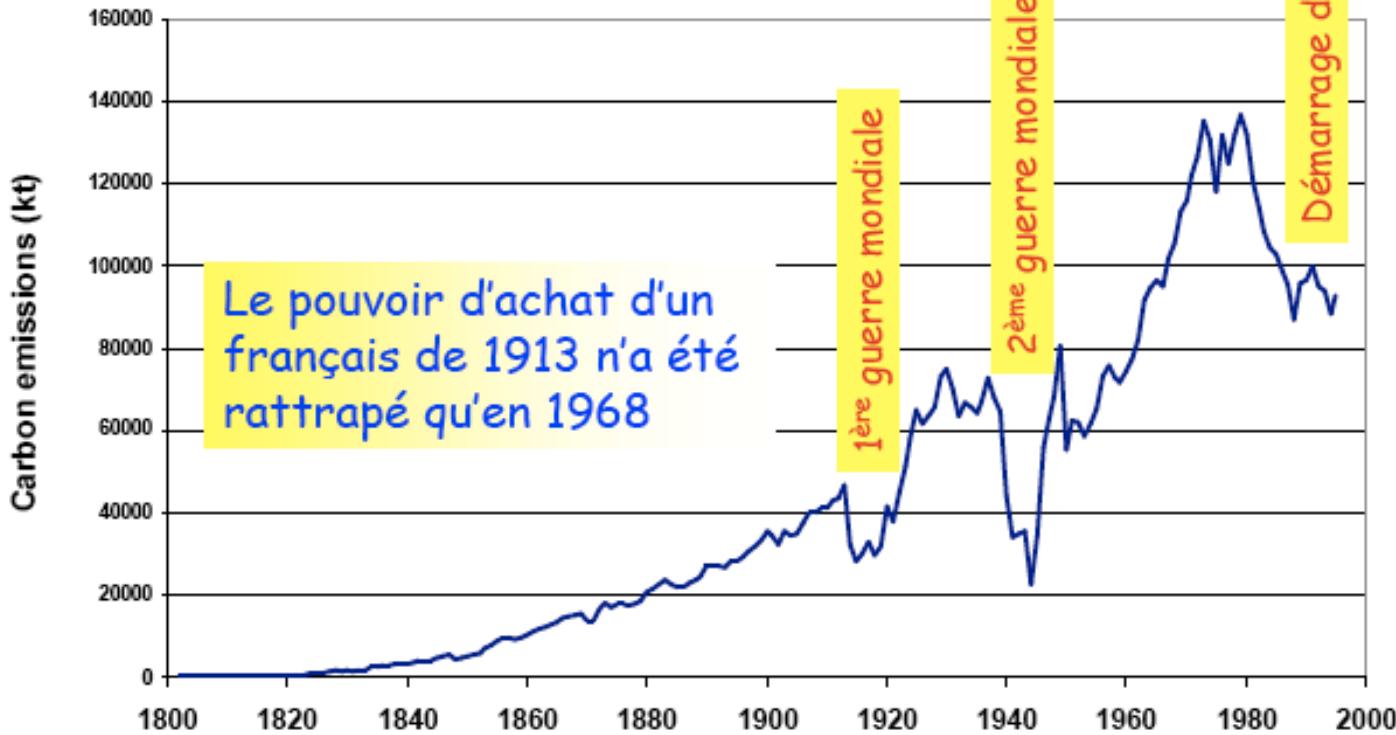
Plus de PIB avec moins de CO₂ ?



Emissions de CO₂ (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde. Données primaires World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

Évolution des émissions de CO₂ au cours du temps

FRANCE - CO₂ EMISSIONS



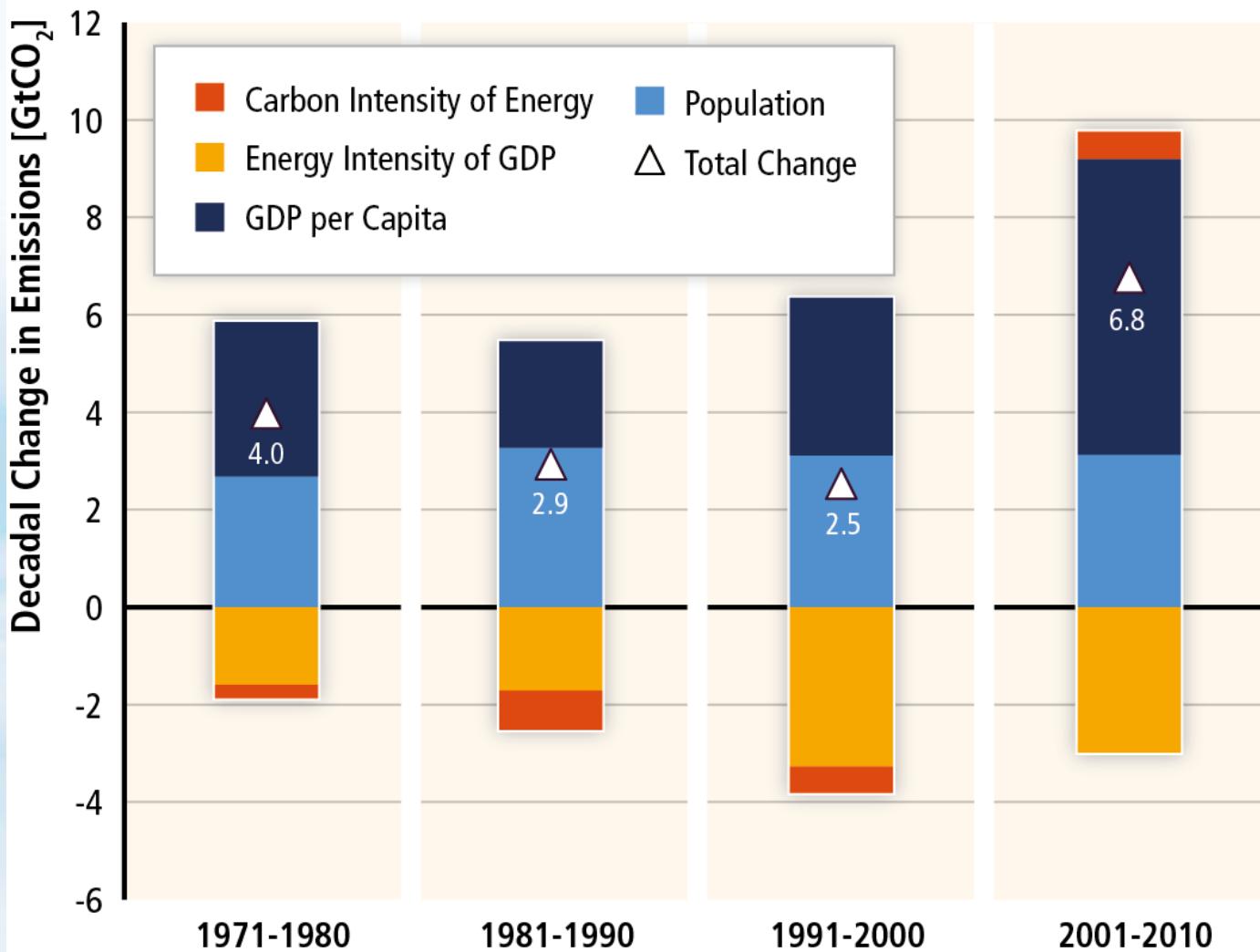
Source service d'études économiques du CEA

Emissions de CO₂ provenant de combustibles fossiles en France depuis 200 ans

Source CEA.

Vivent le charbon, le PIB et les enfants !

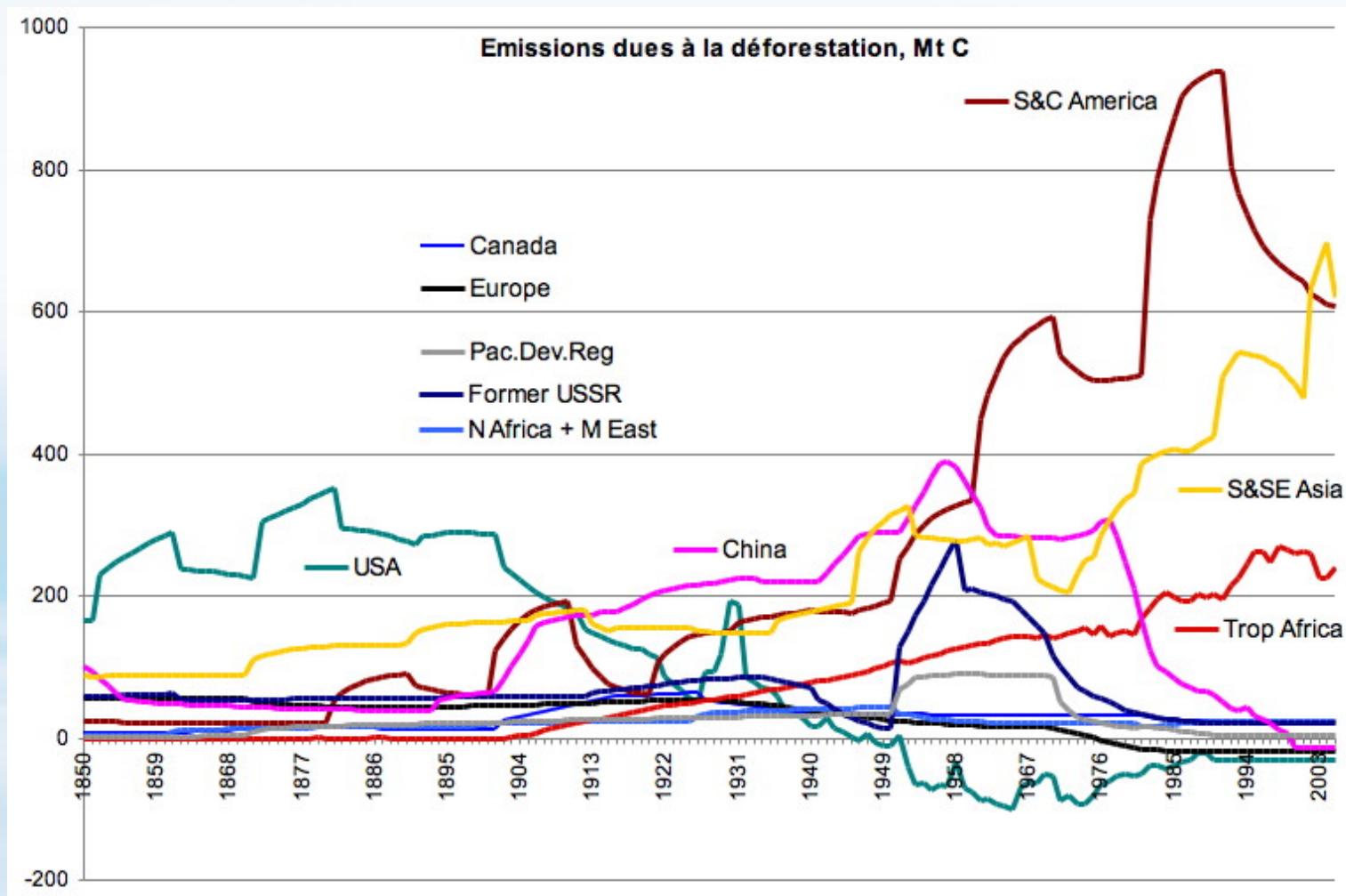
Decomposition of the Change in Total Global CO₂ Emissions from Fossil Fuel Combustion



Contribution de divers facteurs à la variation des émissions de CO₂ fossile par période

Source IPCC, AR5, 2014.

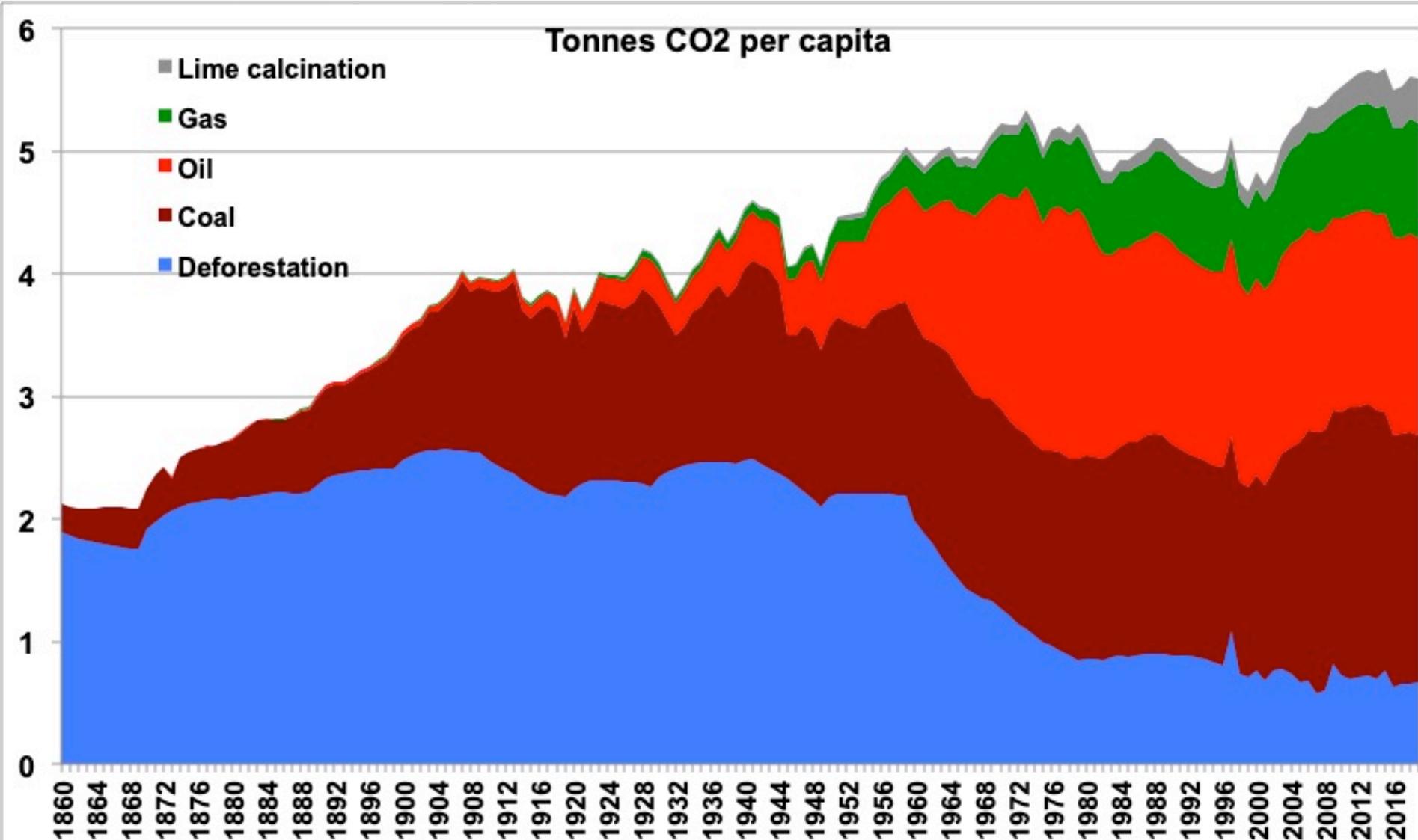
La déforestation, historiquement la première source



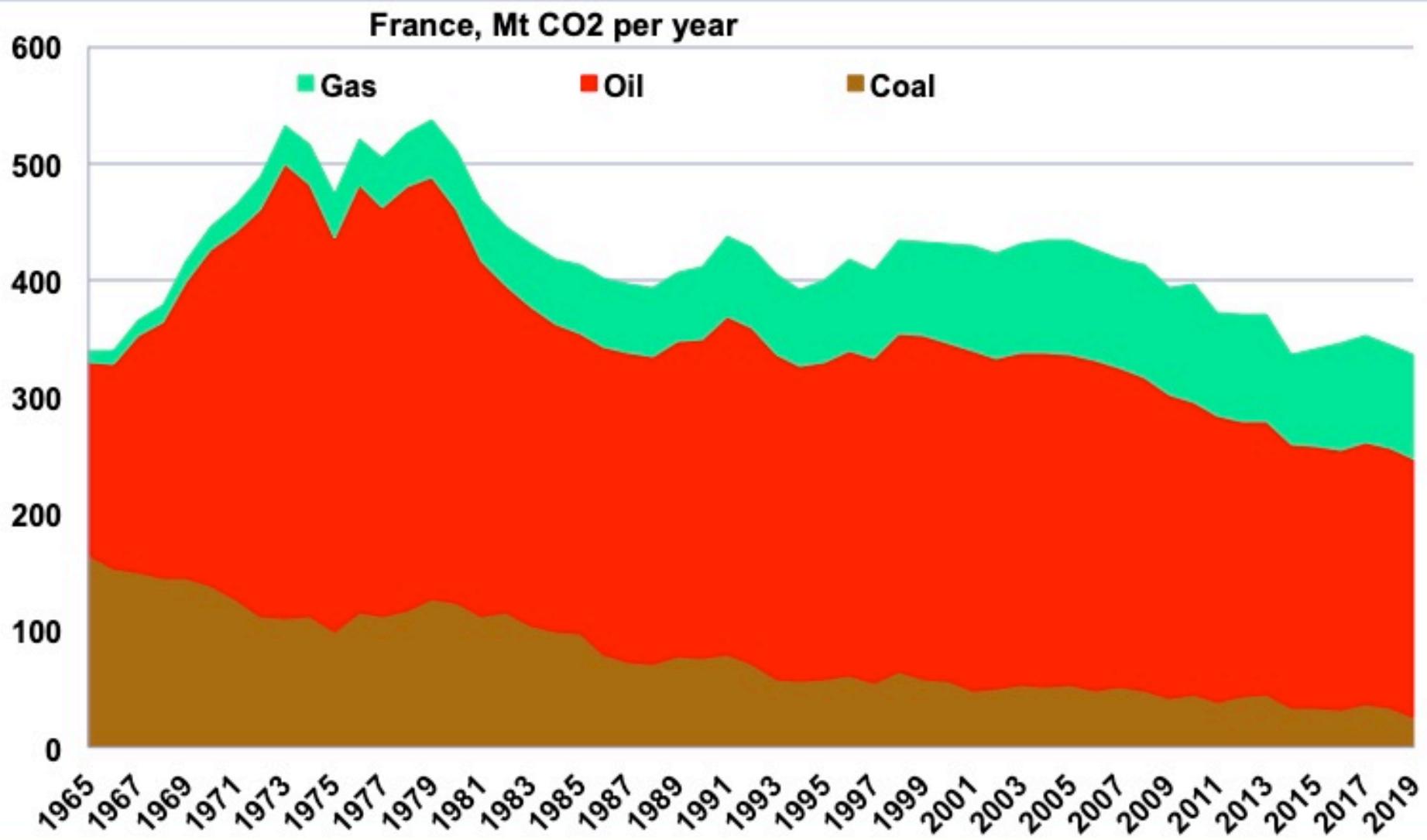
Emissions dues à la déforestation, par grande zone, de 1850 à 2005.

Source : Houghton, The Woods Hole Research Center sur <http://cdiac.ornl.gov/trends>

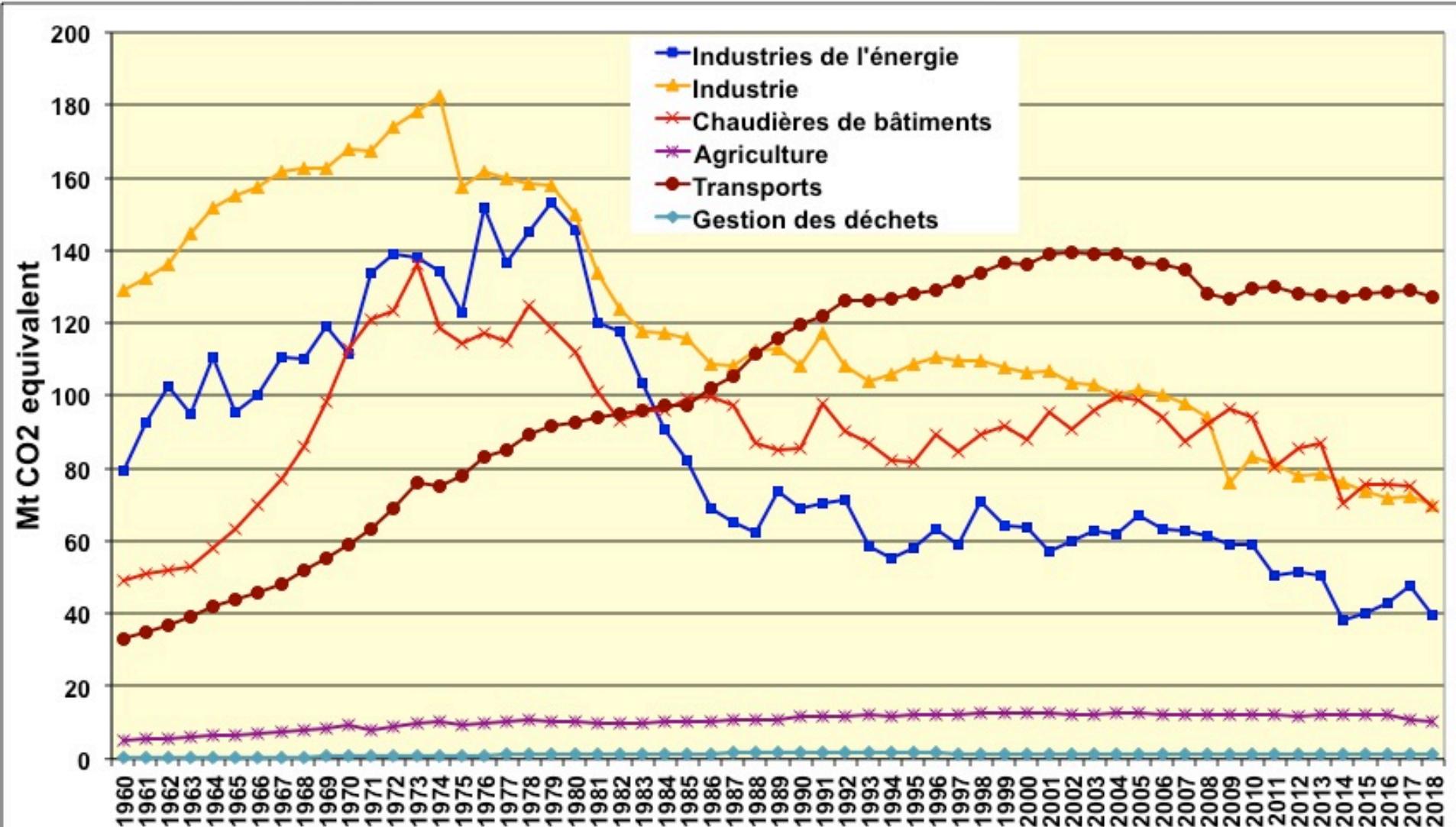
Et par personne ?



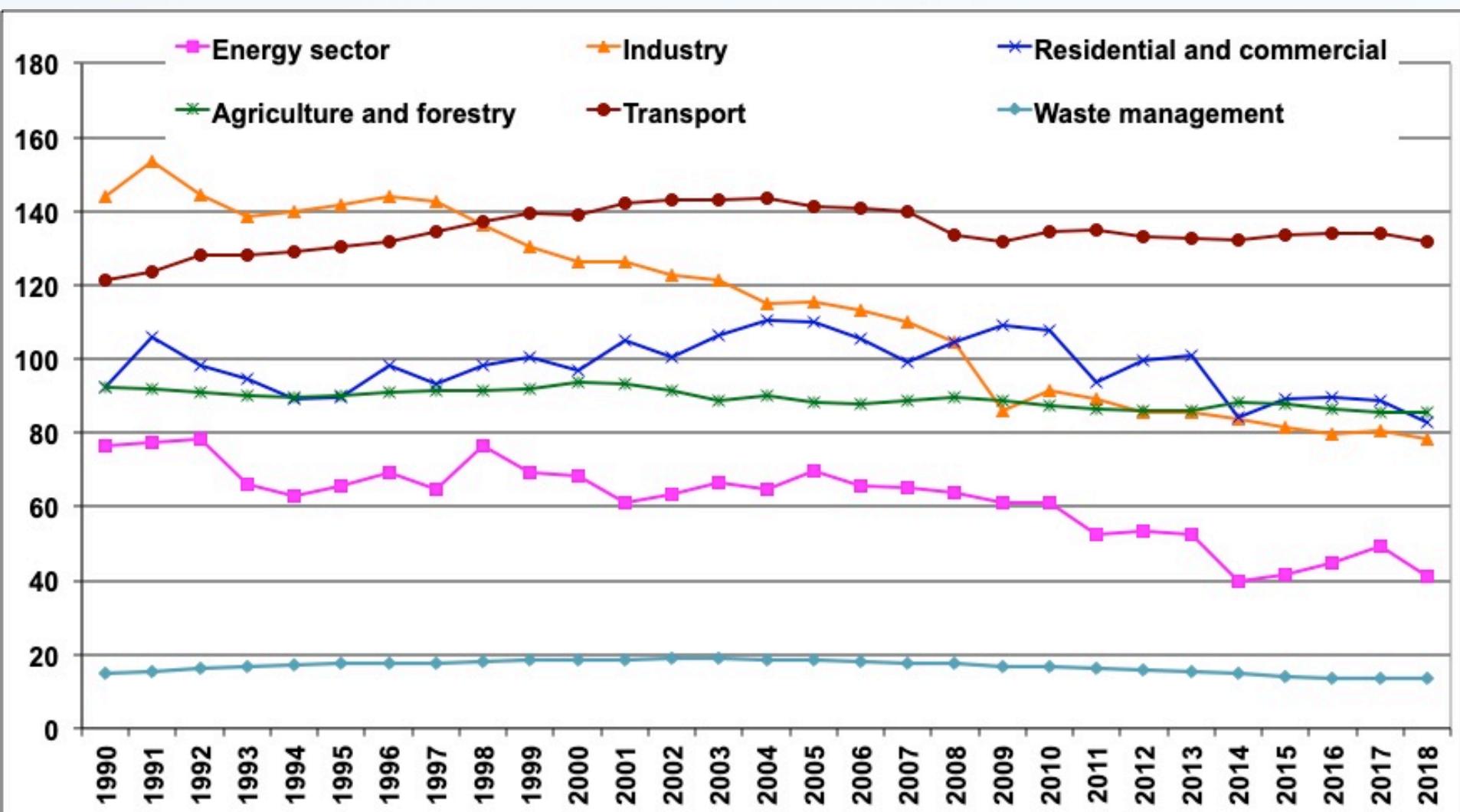
Emissions de CO₂ par personne depuis 1880. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review pour les combustibles ; données The Carbon Budget pour la déforestation et le ciment ; UN pour la population.



Emissions de CO₂ en France depuis 1965, en millions de tonnes. Calculs de l'auteur sur données BP Statistical Review 2018

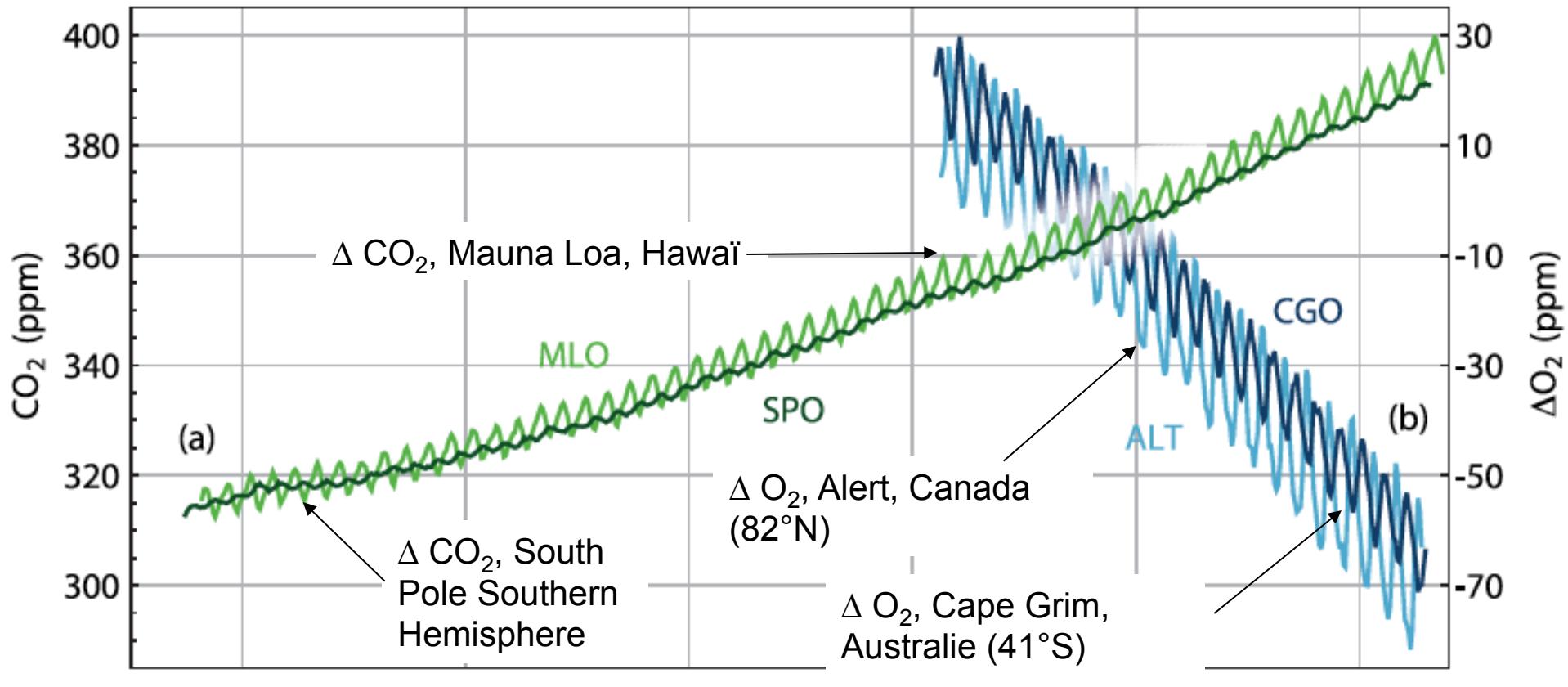


Emissions de CO₂ en France depuis 1960, en millions de tonnes. Source CITEPA 2019



Emissions de gaz à effet de serre en France depuis 1990, en millions de tonnes équivalent CO₂, Source CITEPA 2018

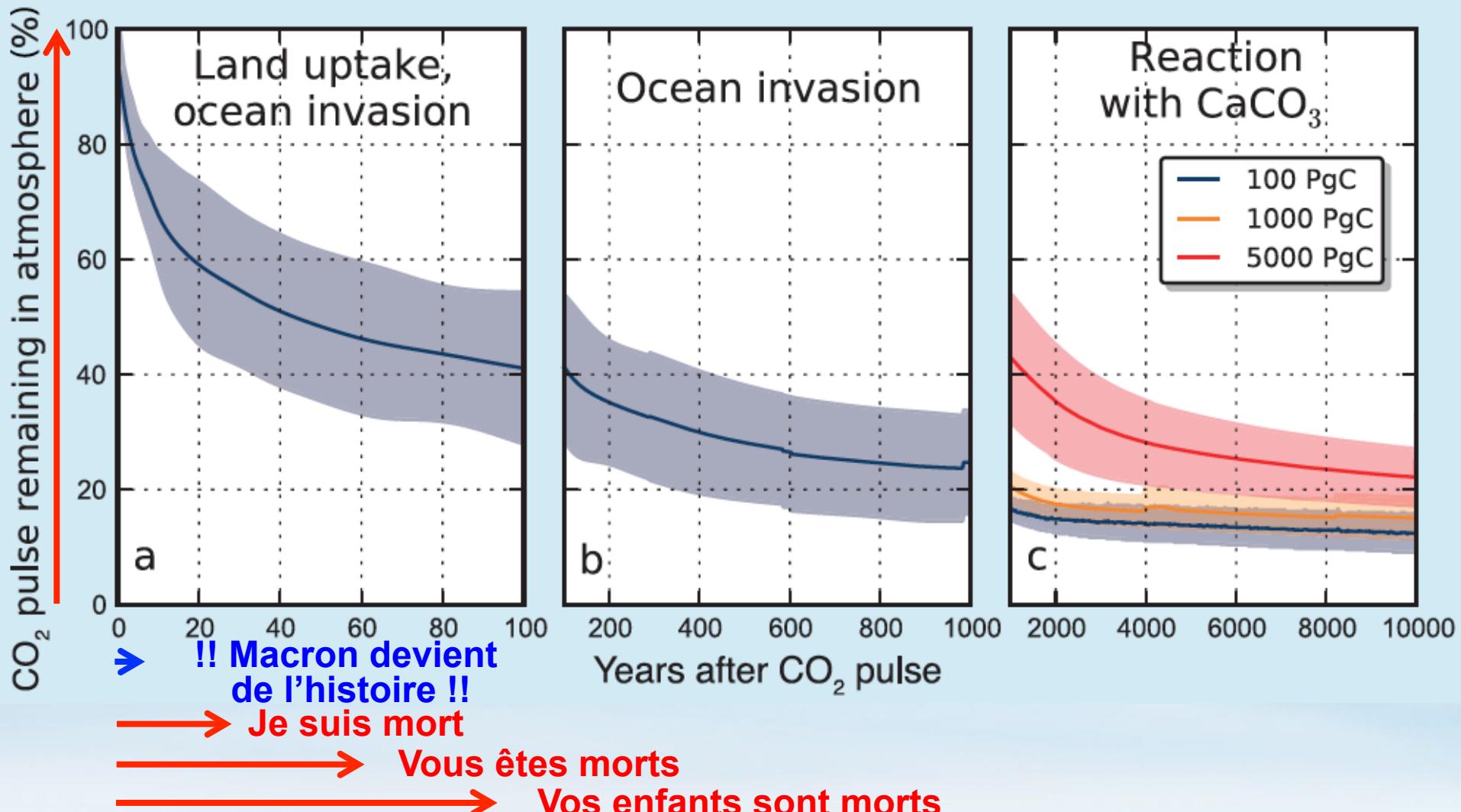
Une partie de ce CO₂ se trouve très bien dans l'air



Source : IPPP, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air... et y rester

A t_0 , j'émets du CO₂

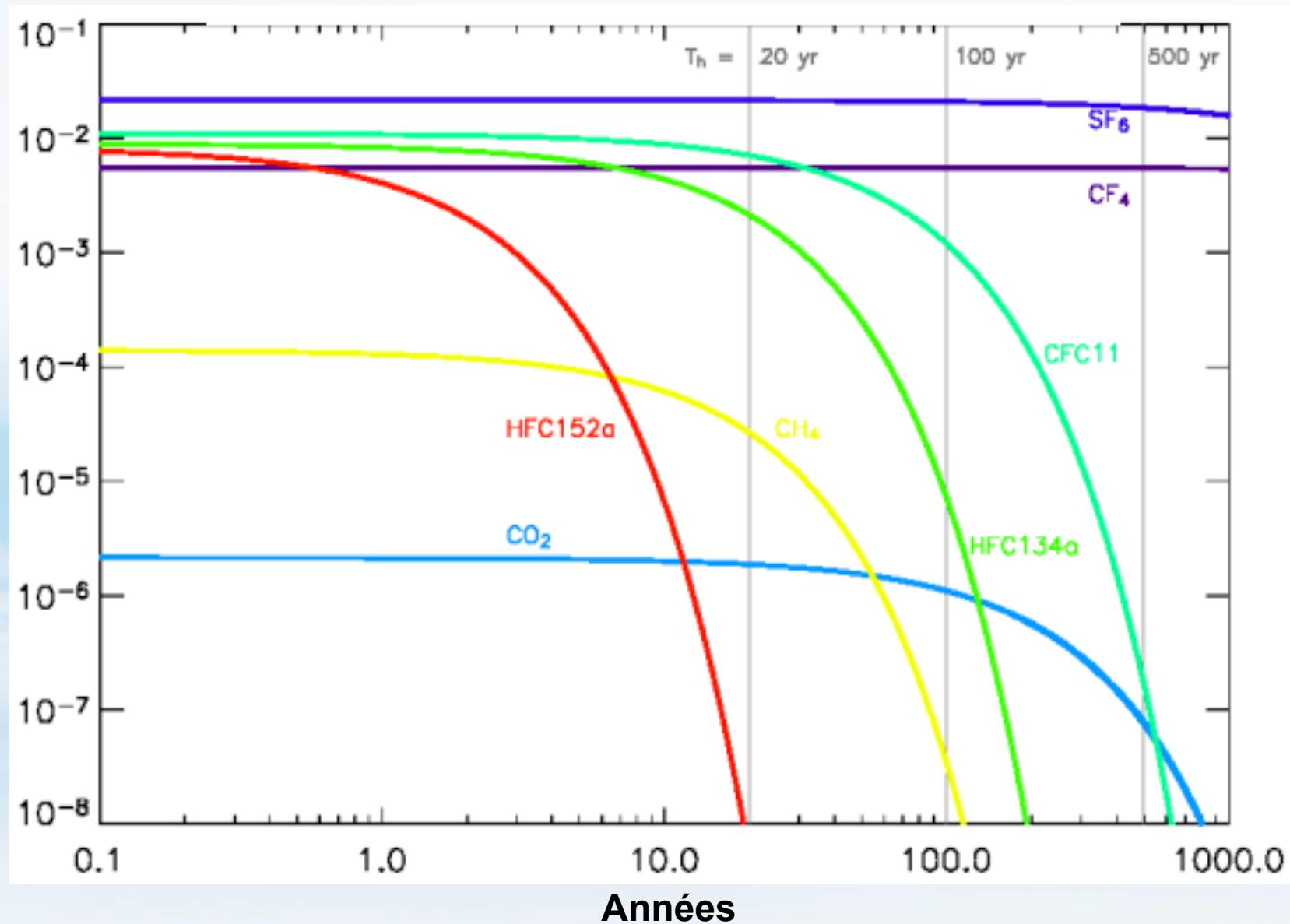


Fraction d'un « pulse » de CO₂ émis à l'instant 0 qui reste dans l'atmosphère au cours du temps, et processus dominant d'épuration selon la période concernée.

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

Le gaz à effet de serre aime s'envoyer en l'air... et y rester

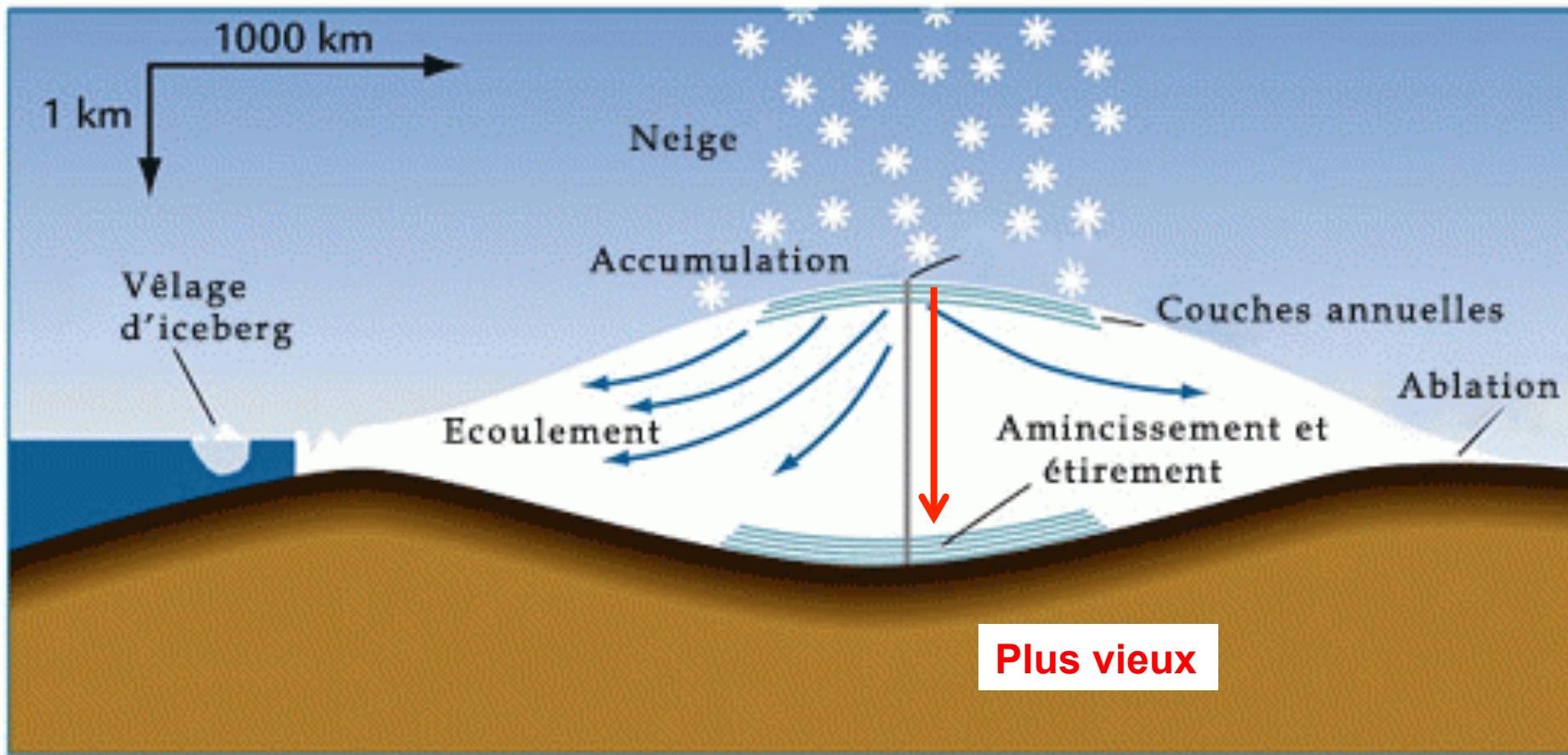
Watts par m², échelle logarithmique



Forçage radiatif en fonction du temps d'un million de tonnes de gaz émise à l'instant 0.
D. Hauglustaine, LSCE.

Pour savoir ce qui s'est passé, il faut fouiller les archives

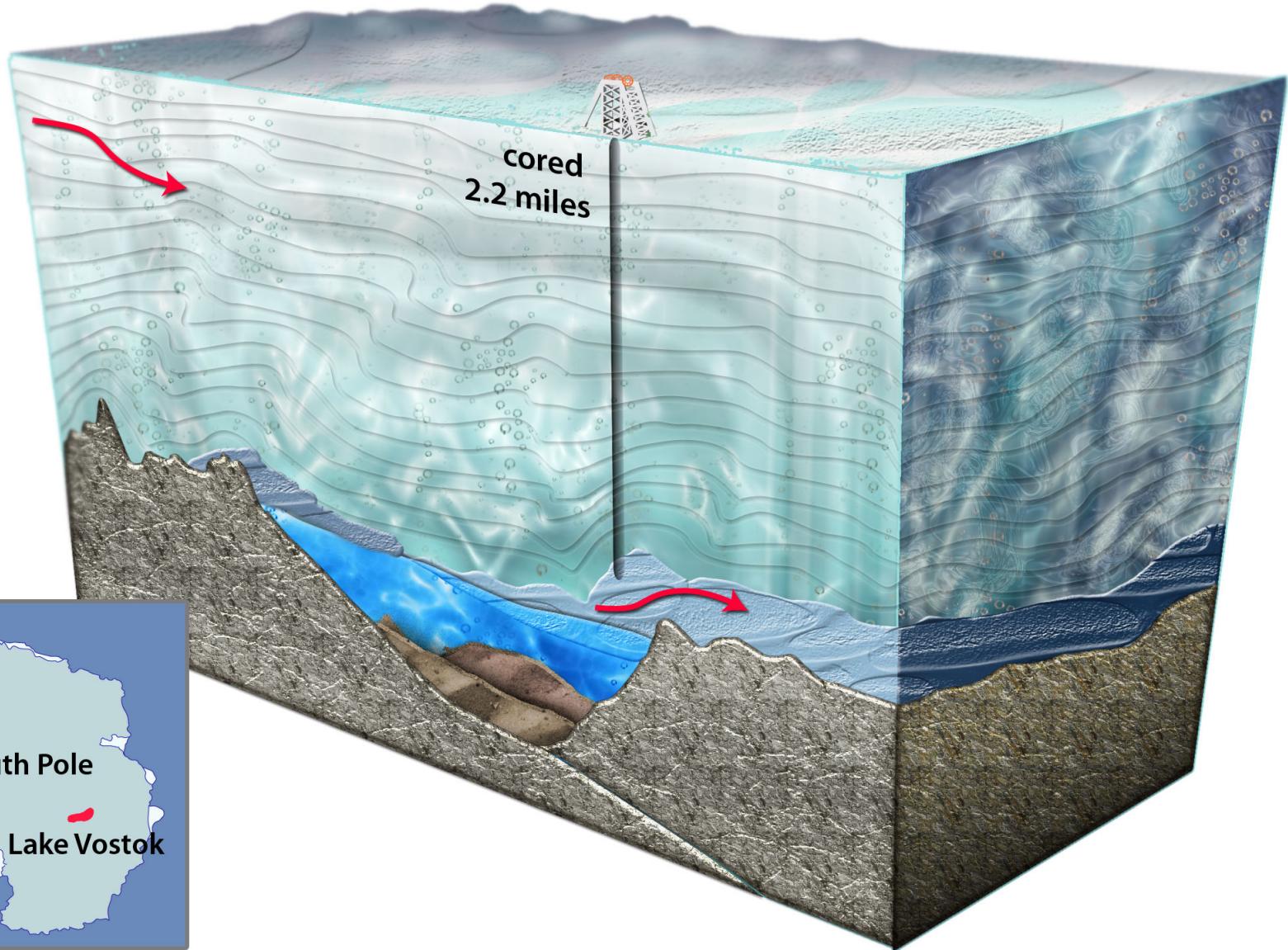
$T_f < 0$ toute l'année
 $T_a < 0$ toute l'année



Allons à la neige (ou plutôt à la glace)



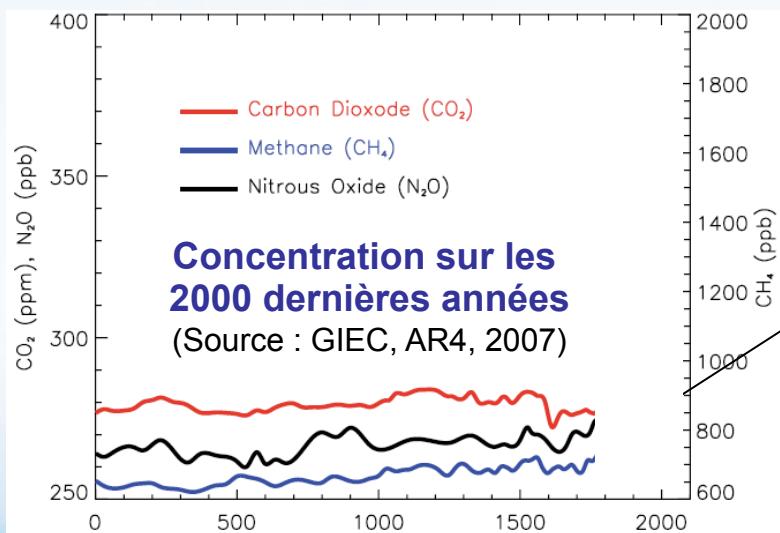
J'fais des trous, des p'tits trous...



Le glaçon peut couter fort cher... mais rapporter gros

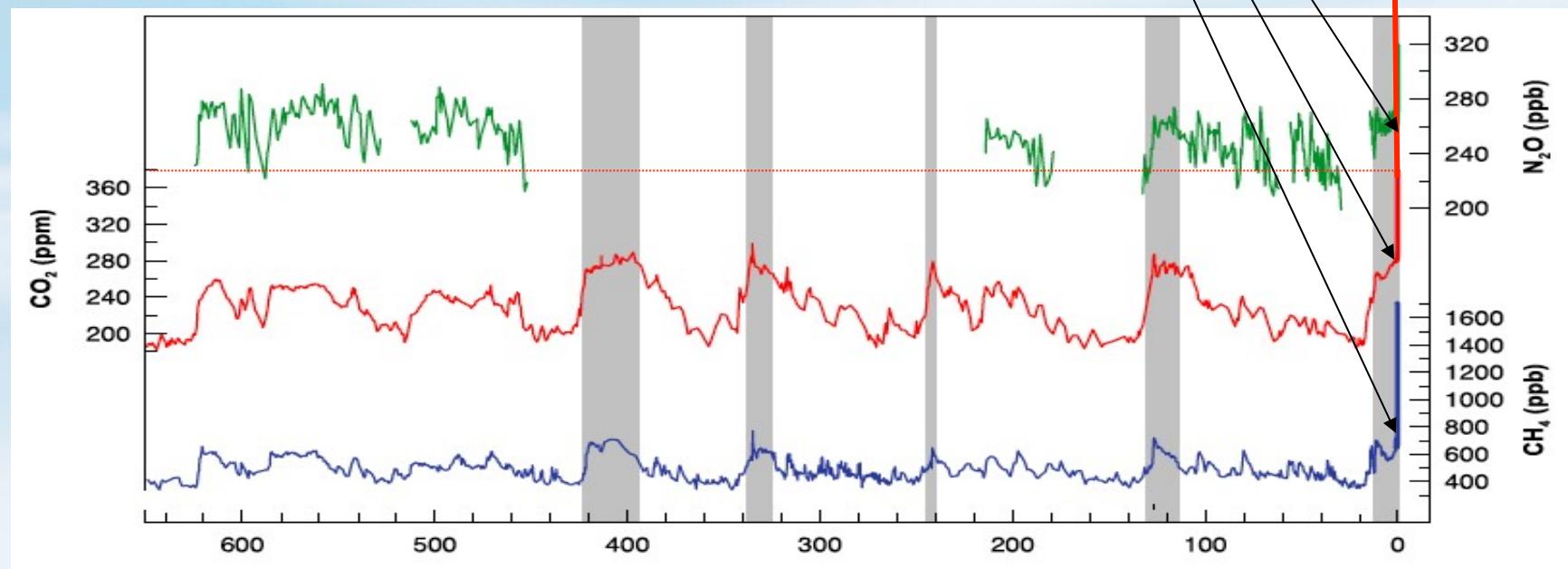


Emettons, émettons, il en restera toujours quelque chose



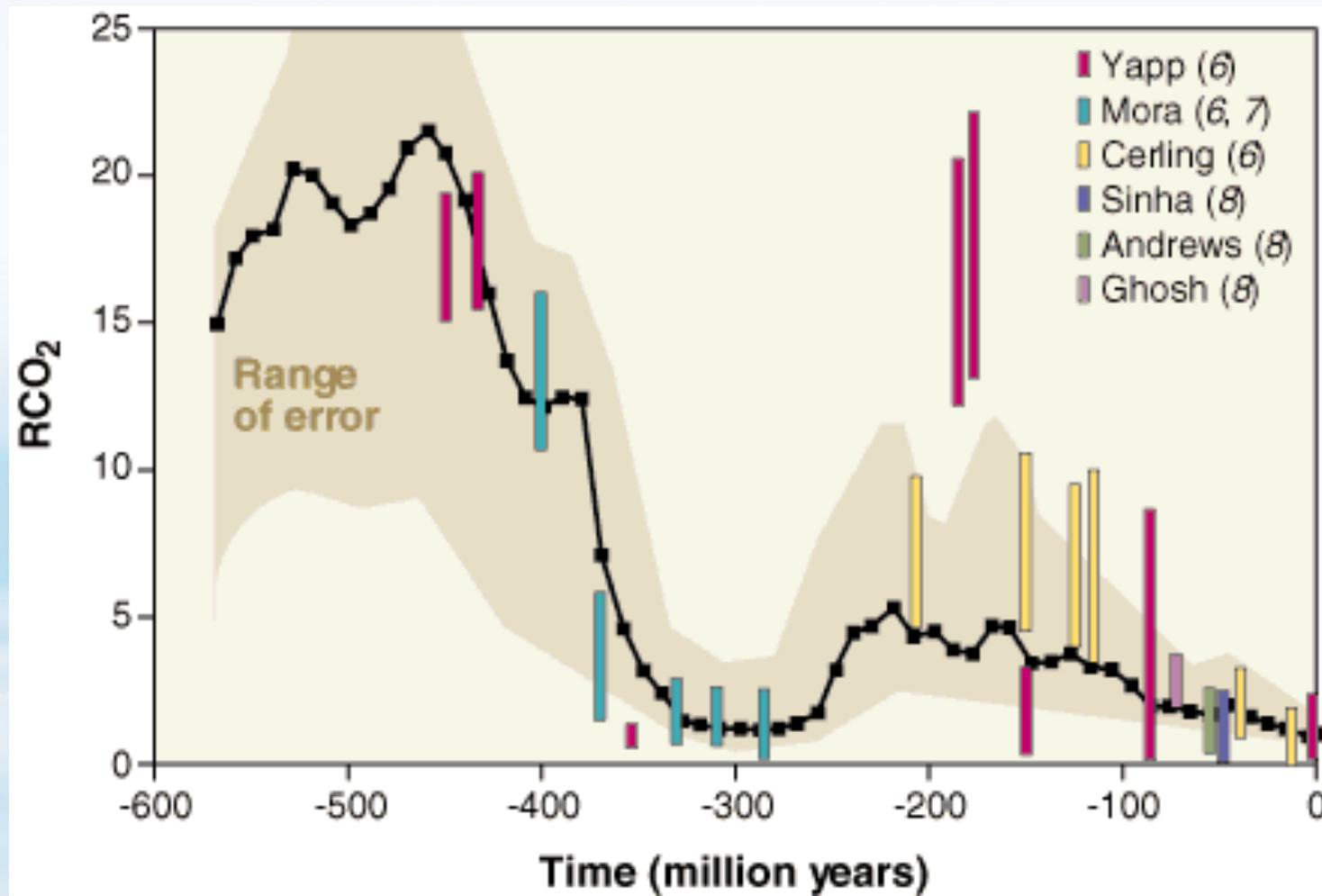
Début de la révolution industrielle

2100 ?



Concentrations atmosphériques du CO_2 , CH_4 , N_2O sur les 650.000 dernières années (GIEC, AR4, 2007)

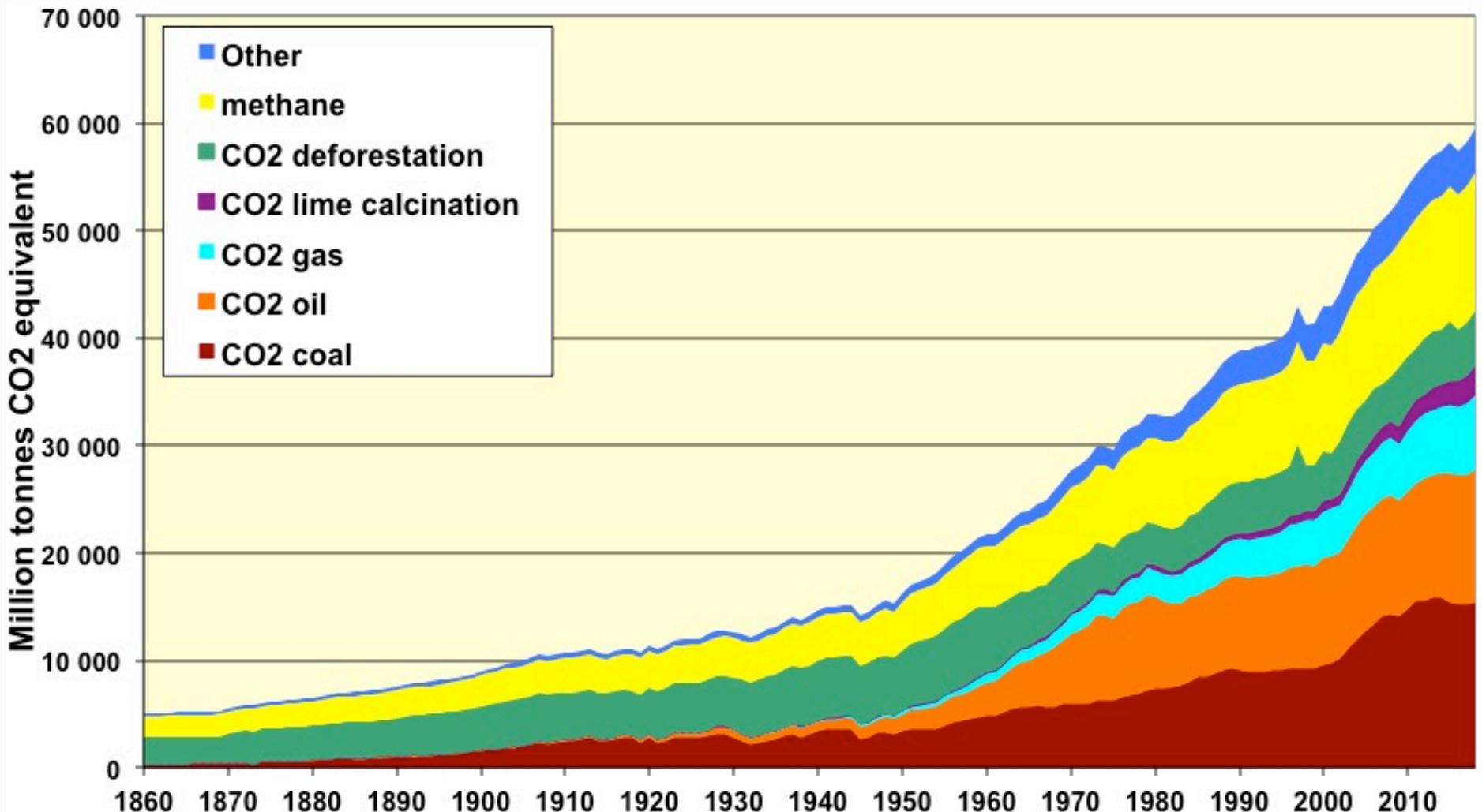
Plus ou moins de CO₂, c'est naturel aussi...



Variation de la concentration atmosphérique en CO₂, au cours des 600 millions d'années qui nous ont précédé. Source : Berner, Science, 1997

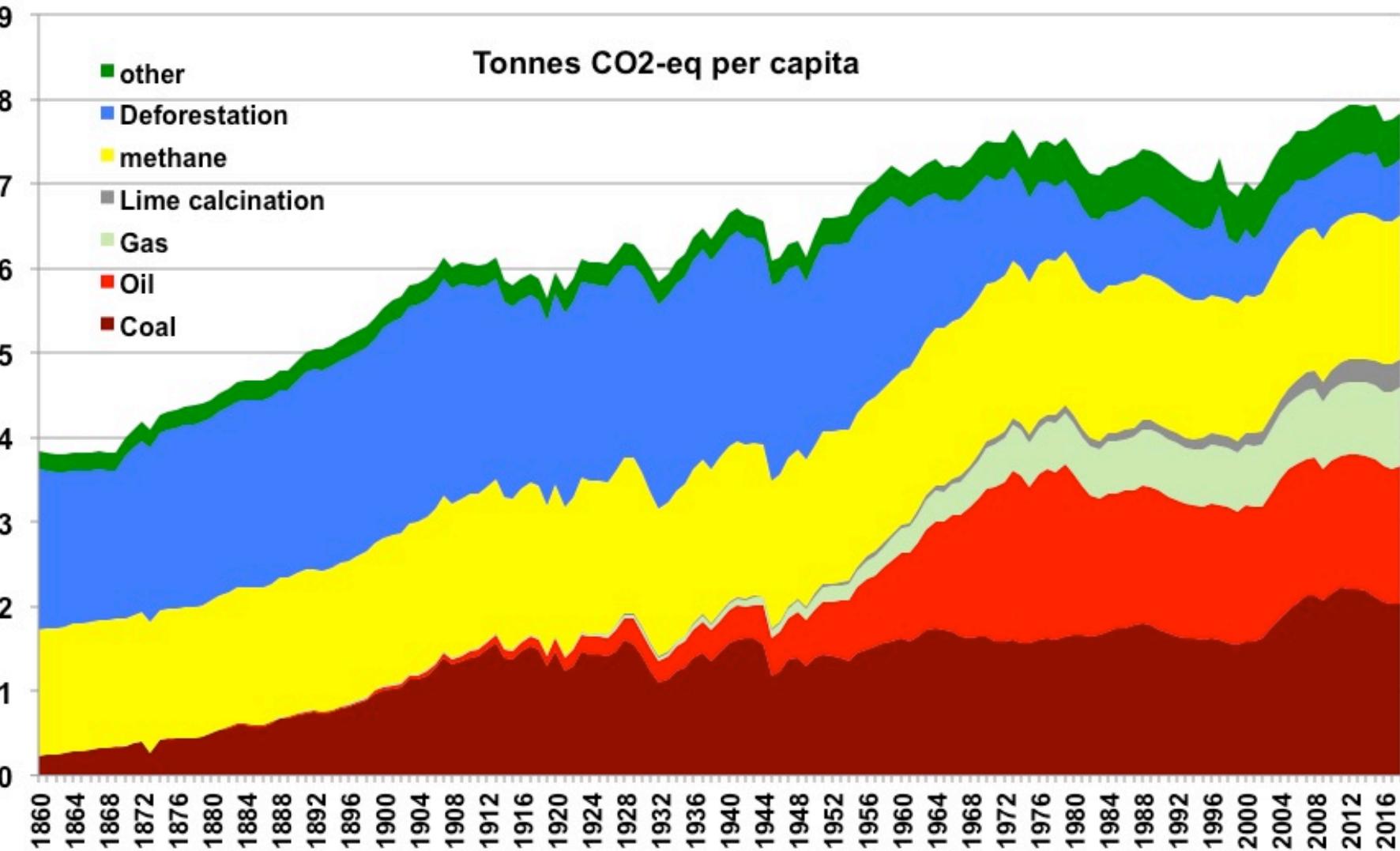
$$PRG = \frac{\int_0^N F_{gaz}(t)dt}{\int_0^N F_{CO_2}(t)dt}$$

Le Pouvoir de Réchauffement Global, ou PRG (en anglais Global Warming Potential, ou GWP) : une équation compliquée pour une notion simple : combien de fois le CO₂ ?



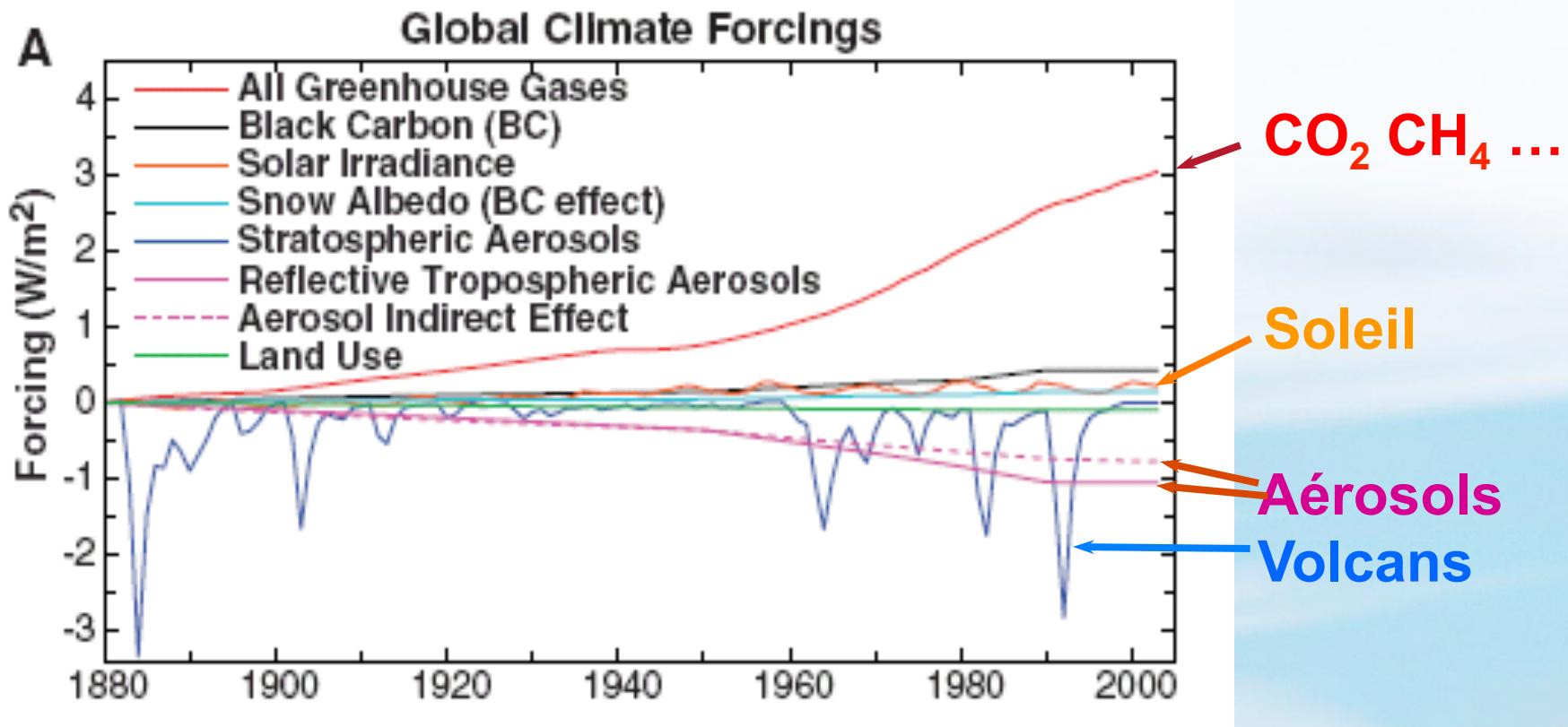
Emissions de gaz à effet de serre par personne toutes sources depuis 1860. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review (combustibles) ; the global carbon budget (autres émissions)

Devenir neutres en 50 ans ?



Emissions de gaz à effet de serre par personne toutes sources depuis 1860. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review (combustibles) ; the global carbon budget (autres émissions)

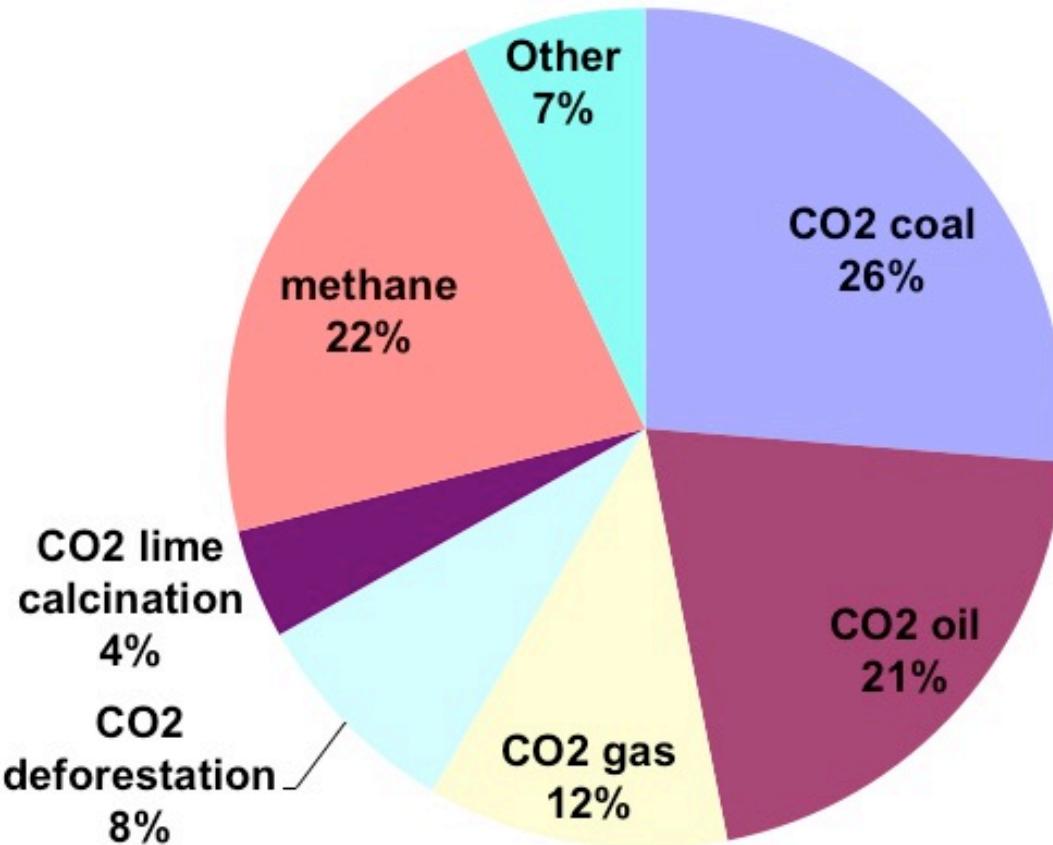
On sort la calculette : qui influe le plus ?



Comparaison des diverses influences (naturelles et humaines) sur un climat stable à l'échelle du siècle. Source Hansen et al., Science, 2005

Contribution de chaque gaz aux émissions

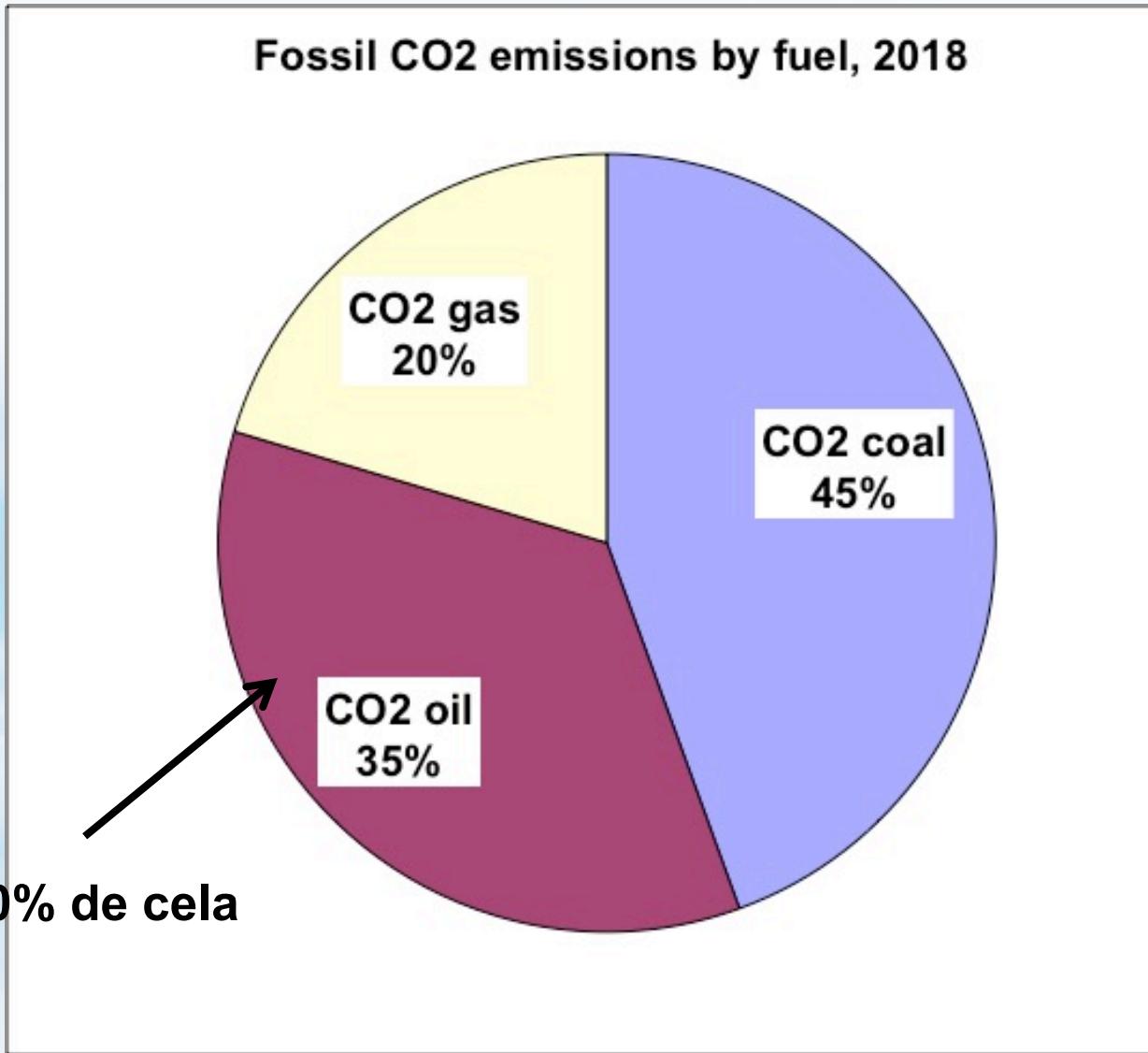
Greenhouse gases emissions, all sources, 2017



Part de chaque gaz dans les émissions de 2017, hors ozone. Pour le ciment il s'agit uniquement des conséquences de CaCO₃ → CaO + CO₂

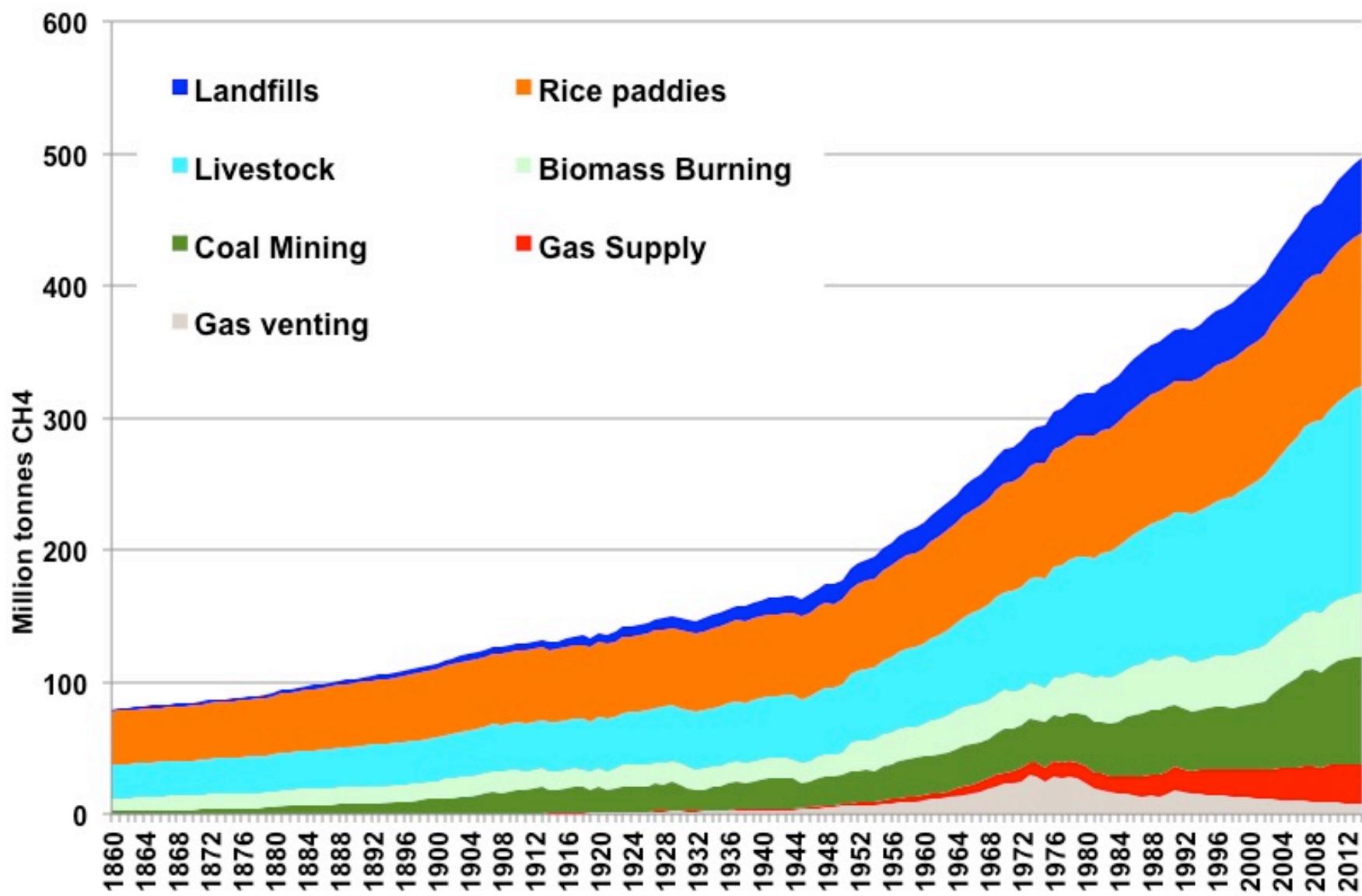
Sources diverses, compilation de l'auteur

CO₂ = pétrole = voitures ? Pas si simple...



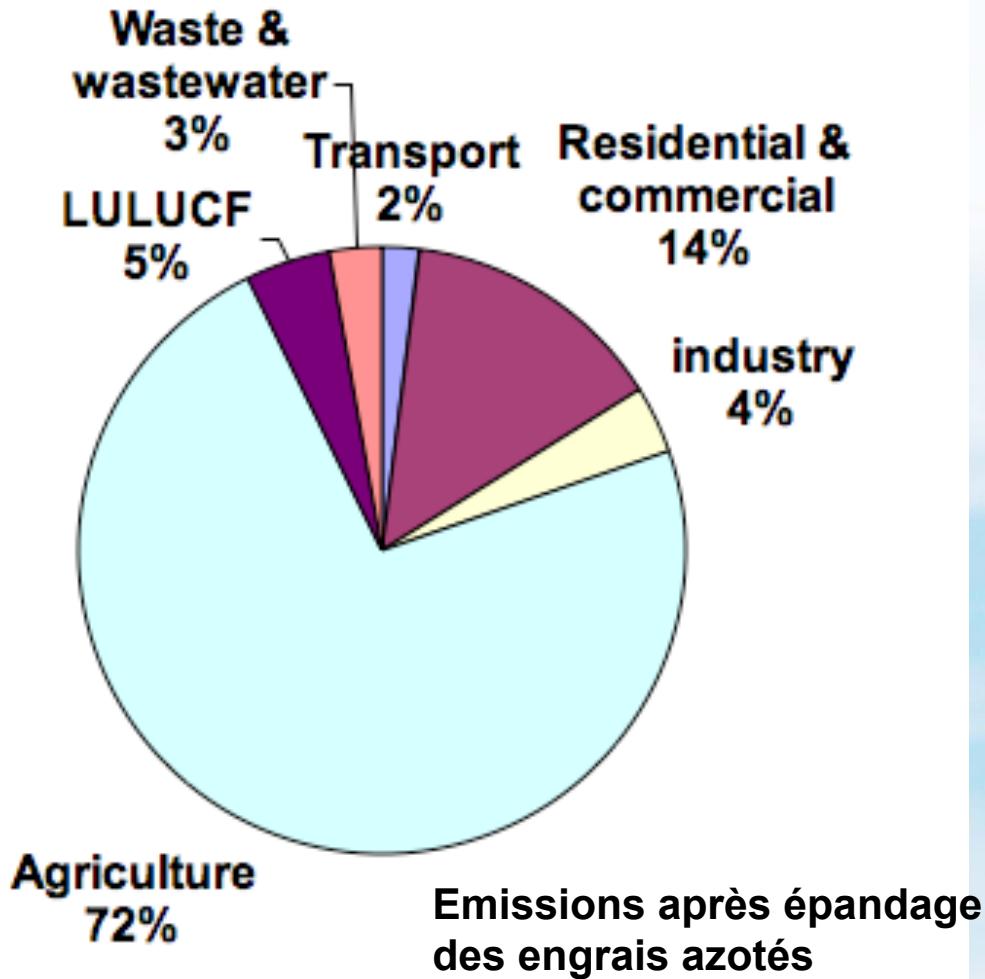
Jancovici, 2018, d'après BP statistical Review, 2018

Vaches qui rotent et pètent émettent tripette



Emissions de méthane dans le monde par secteur (source The Carbon Budget)

Un gaz hilarant qui ne l'est plus tellement



Répartition des émissions de N₂O dans le monde par secteur, 2004 (source IPCC)

Les halocarbures

La première famille - désormais interdite de production - est mondialement connue : les CFC. Leur premier usage a été le remplacement de l'ammoniac dans les circuits réfrigérants, puis ils ont servi comme gaz propulseurs, solvants, expulseurs de mousses plastiques...

Désormais interdits de production, les CFC ont été remplacés par des substituts aux doux noms de HFC, HCFC, PFC...

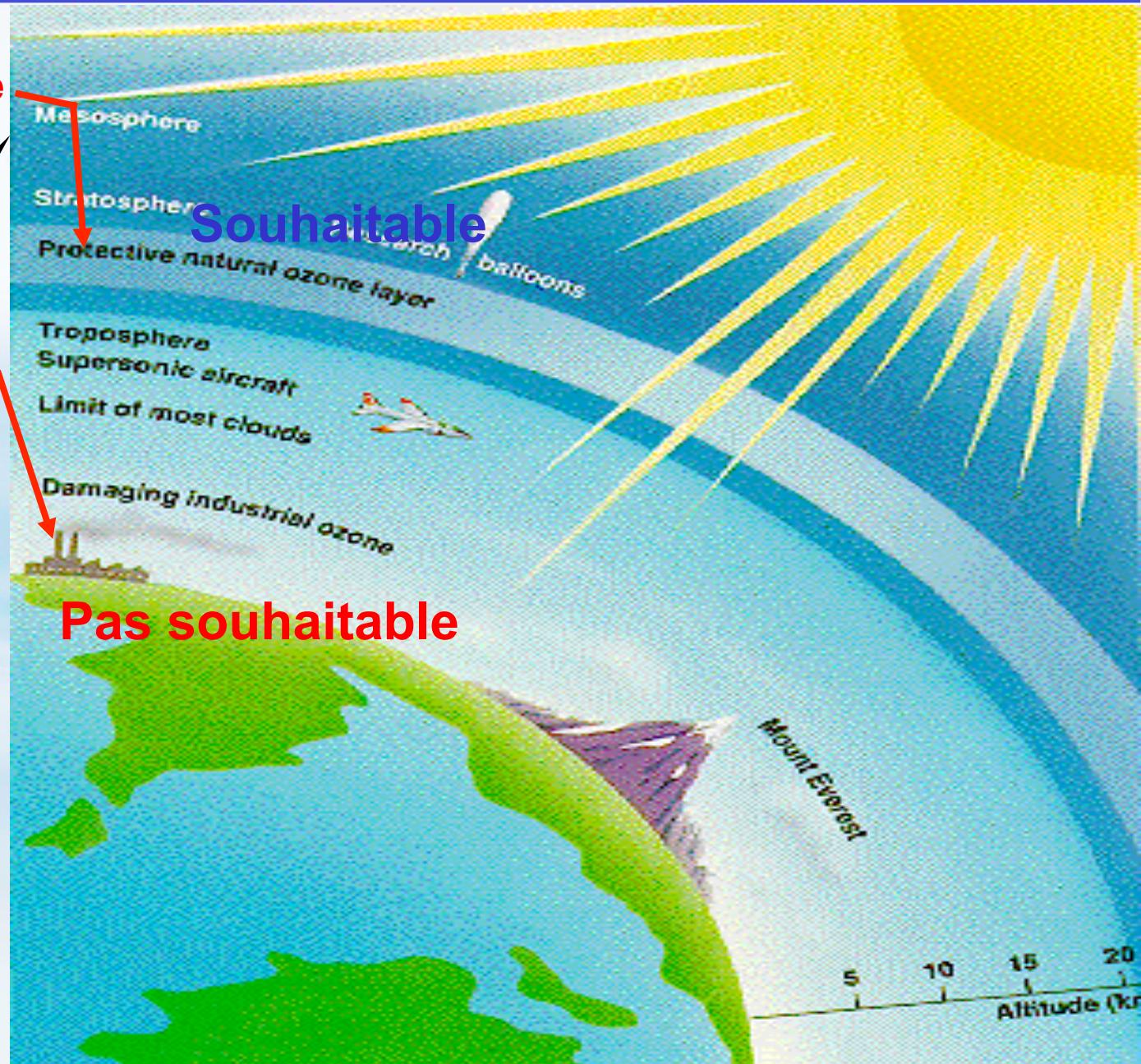
Ces gaz servent - toujours - dans les circuits de fluide réfrigérants, mais aussi comme gaz propulseurs, de gaz expulseurs (industries des mousses plastiques), de solvants (semi-conducteurs), et viennent parfois de manière « indésirables » de certains procédés industriels (par exemple électrolyse de l'alumine)

Ozone des villes et ozone d'en haut

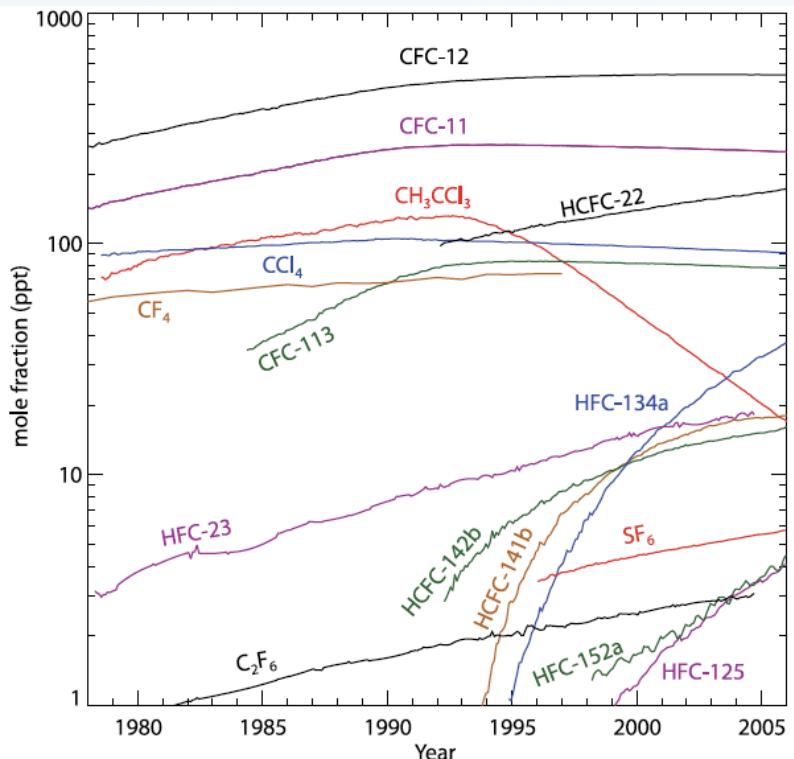
Ozone stratosphérique



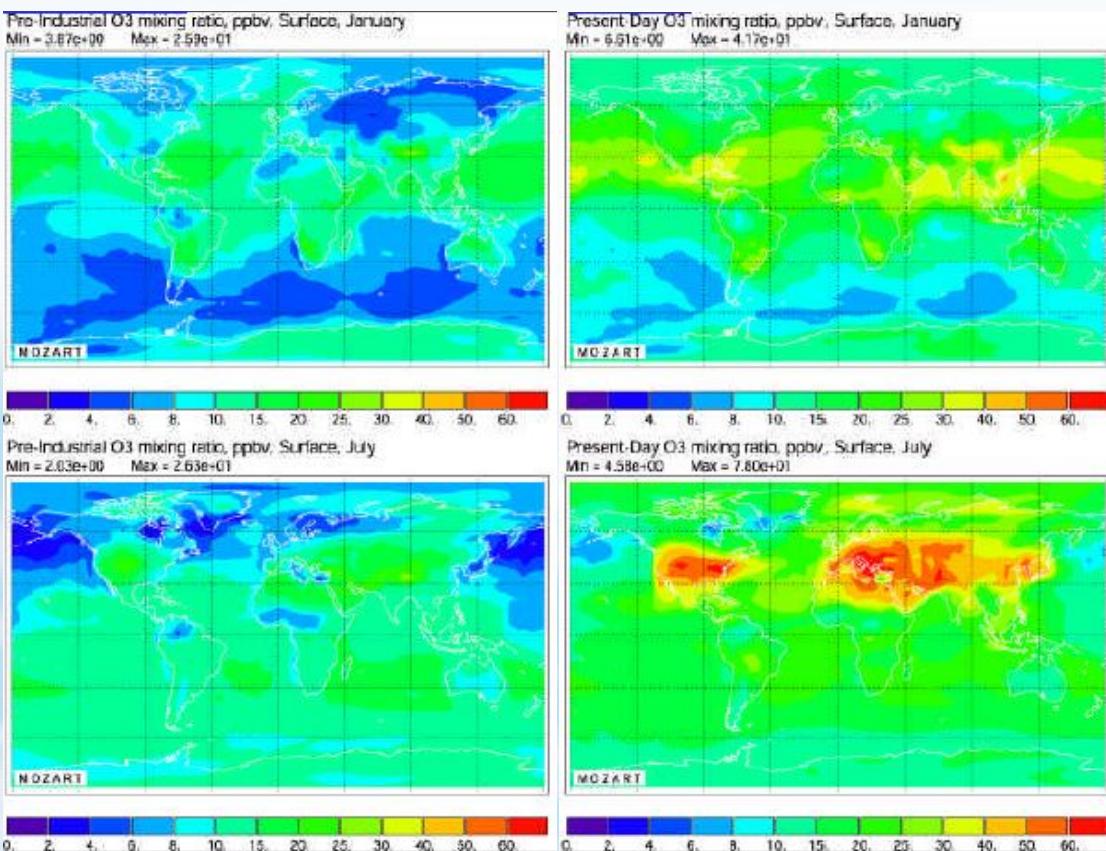
Ozone troposphérique



Et tout cela s'accumule aussi dans l'atmosphère



Concentration atmosphérique de divers gaz halogénés (attention ! Échelle logarithmique : une droite ici = une exponentielle « en vérité »). GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007



Concentration moyenne d'ozone près du sol à l'époque pré)industrielle (à gauche) et actuellement (à droite), en janvier (en haut) et en juillet (en bas).

Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Bref, l'ensemble donne quoi ?



Déforestation



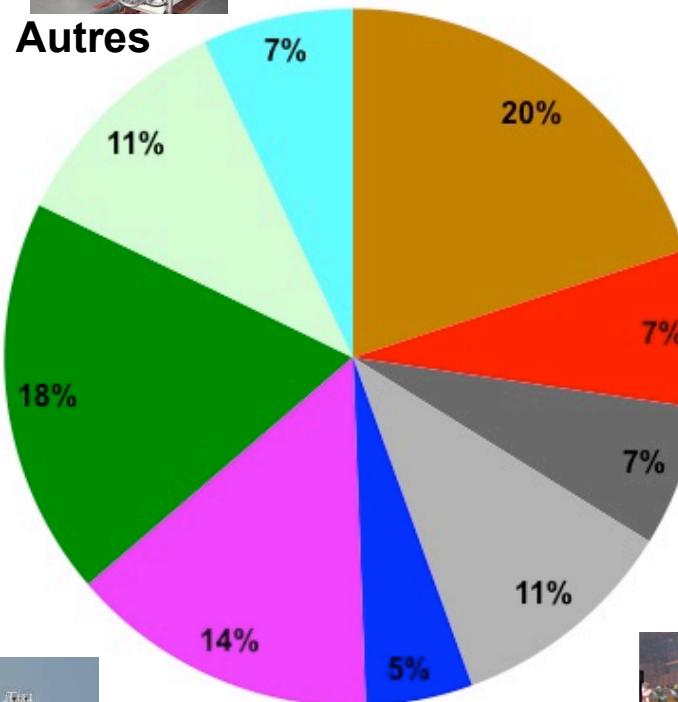
Autres



Centrales à charbon



Agriculture



≈ 6%



≈ 4%
Transports



≈ 2%



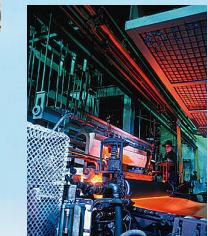
≈ 2%



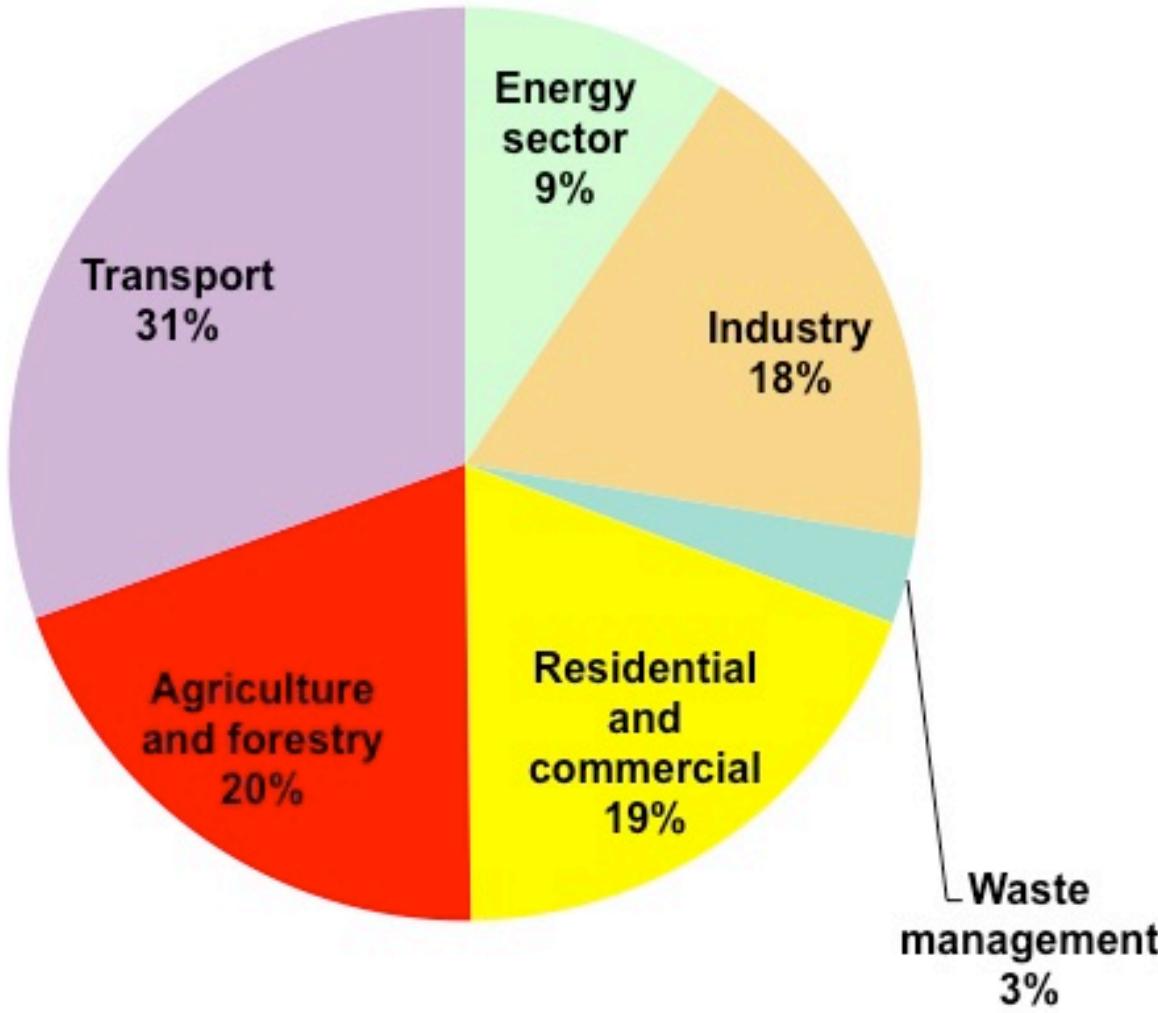
Bâtiments



Reste de l'industrie

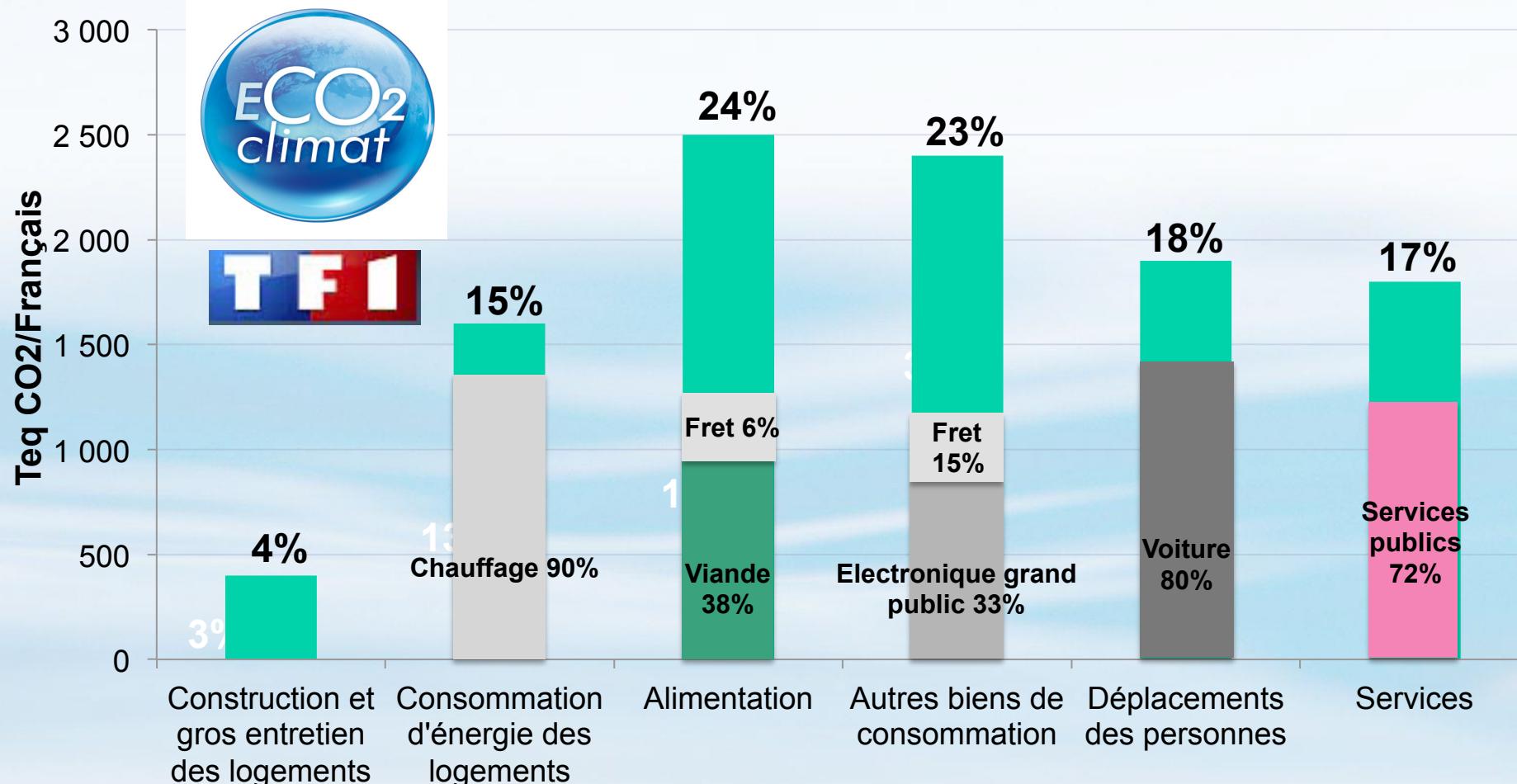


Décomposition des émissions mondiales en 2018. Jancovici, données diverses.



Répartition des émissions **brutes** françaises 2018 (tous gaz à effet de serre pris en compte) par secteur (source CITEPA)

Dis moi ce que tu émets, je te dirai si tu consommes



Kg équivalent CO₂ par Français et par poste en 2009 pour sa consommation finale. Calculs Carbone 4.