

Université Joseph Fourier, Grenoble – 2012/2013
L2 SI PHY236 et GEL23b – option Énergétique

Johann Collot – collot@in2p3.fr

Monique Giroud – monique.giroud@ujf-grenoble.fr

Stéphane Grenier – stephane.grenier@grenoble.cnrs.fr

5. Énergie : Environnement et Économie

2. Effet de serre : historique

Évoqué pour la première fois en 1824 par Joseph Fourier dans : Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires.

« La température du sol est augmentée par l'interposition de l'atmosphère parce que la chaleur solaire trouve moins d'obstacles pour pénétrer dans l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure »

Sans cet effet, la température moyenne terrestre serait de $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En supposant un albédo (fraction du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace par l'atmosphère) de 31%, l'irradiance moyenne solaire de la terre est de :

$$1368/4 \times (1-0,31) = 236 \text{ W/m}^{-2}.$$

À l'équilibre thermodynamique, cela conduit à une émission radiative terrestre de la même quantité qui est dissipée, sans encombre à travers l'atmosphère, dans l'espace.

$$T = \left(\frac{236}{5,6710^{-8}} \right)^{1/4} = -19,1^{\circ}\text{C}$$

3. Effet de serre : historique

Mais on sait que la température moyenne de surface de la terre est plutôt de 15 °C, son émission radiative est alors en moyenne :

$$E_T = (288,15)^4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 391 \text{ W/m}^{-2} .$$

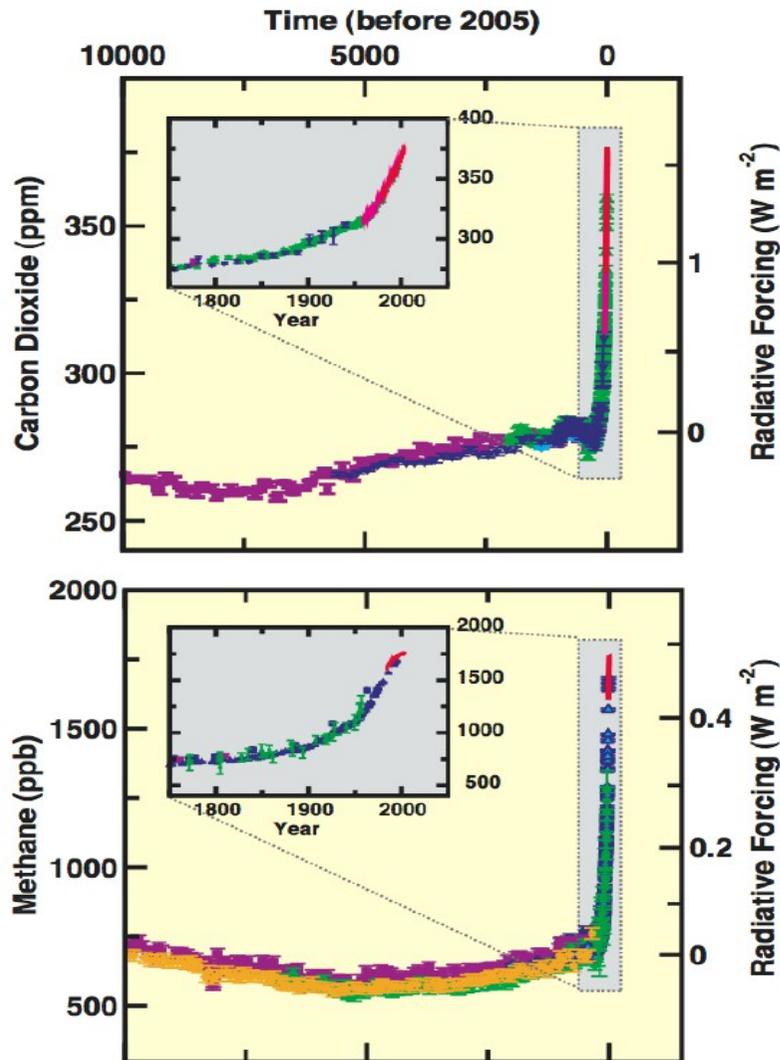
Comme 236 W/m⁻² uniquement sont dissipés dans l'espace, cela conduit à l'absorption d'au moins 155 W/m⁻² par l'atmosphère à l'équilibre.

En 1861, John Tyndall suggère que cet effet est dû principalement à la présence de vapeur d'eau et de CO₂ dans l'atmosphère.

En 1896, Svante Arrhenius estime qu'un doublement de la quantité de CO₂ devrait augmenter de 5-6 °C la température moyenne du globe ! C'est assez proche des conclusions actuelles du GIEC (Groupement International sur l'Évolution du Climat) ! 3 °C pour un doublement de la concentration de CO₂. Arrhenius proposa de repousser la prochaine ère glaciaire en promouvant l'exploitation du charbon. D'une certaine manière, il avait vu juste . On ne pourra pas dire qu'on ne savait pas !

4. Effet de serre : historique

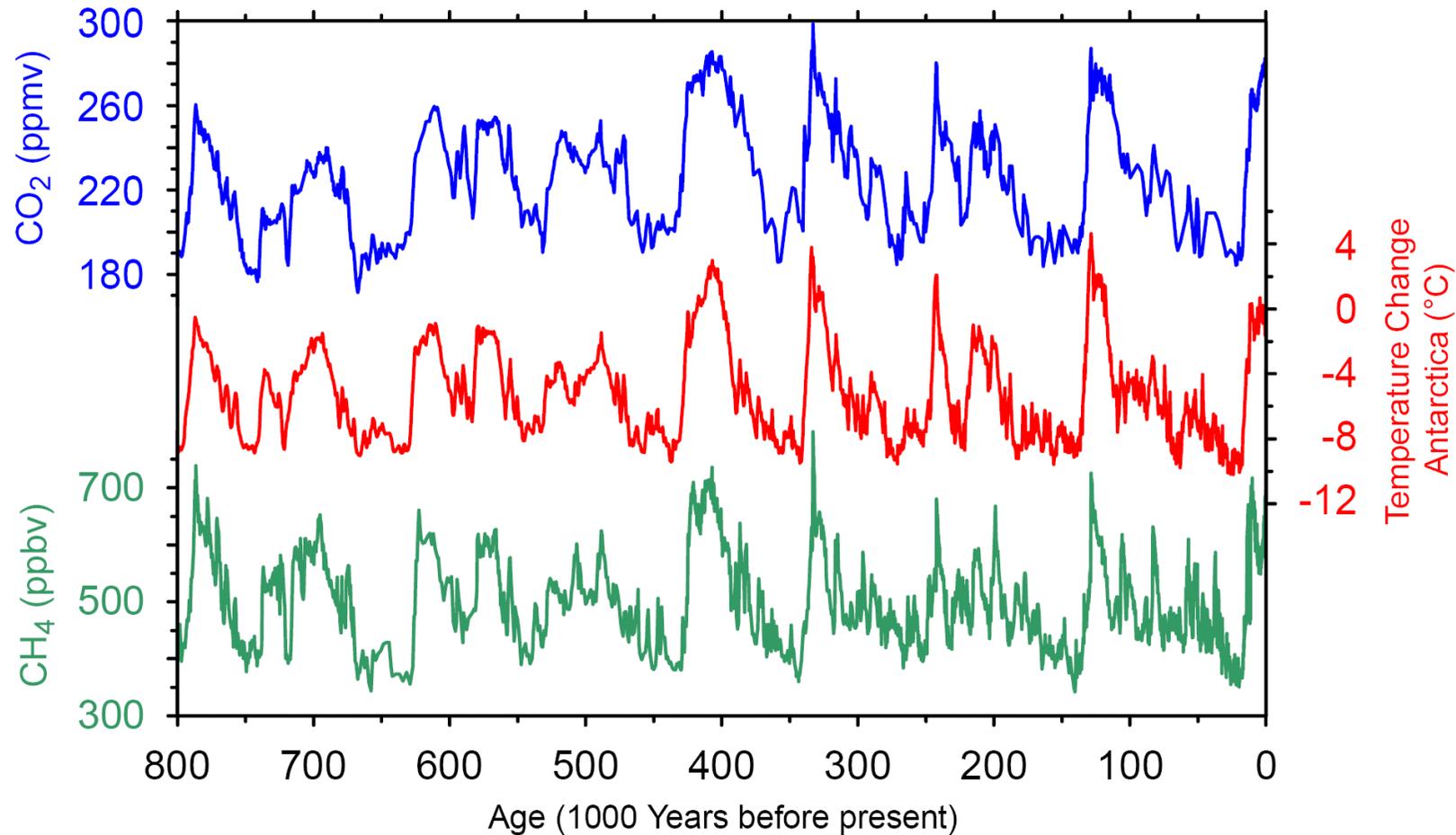
Les premiers messages de vigilance ont été lancés par la communauté scientifique dans les années 70.



Aujourd'hui la concentration de CO_2 dans l'atmosphère s'est accrue d'environ 40% par rapport à sa valeur pré-industrielle.

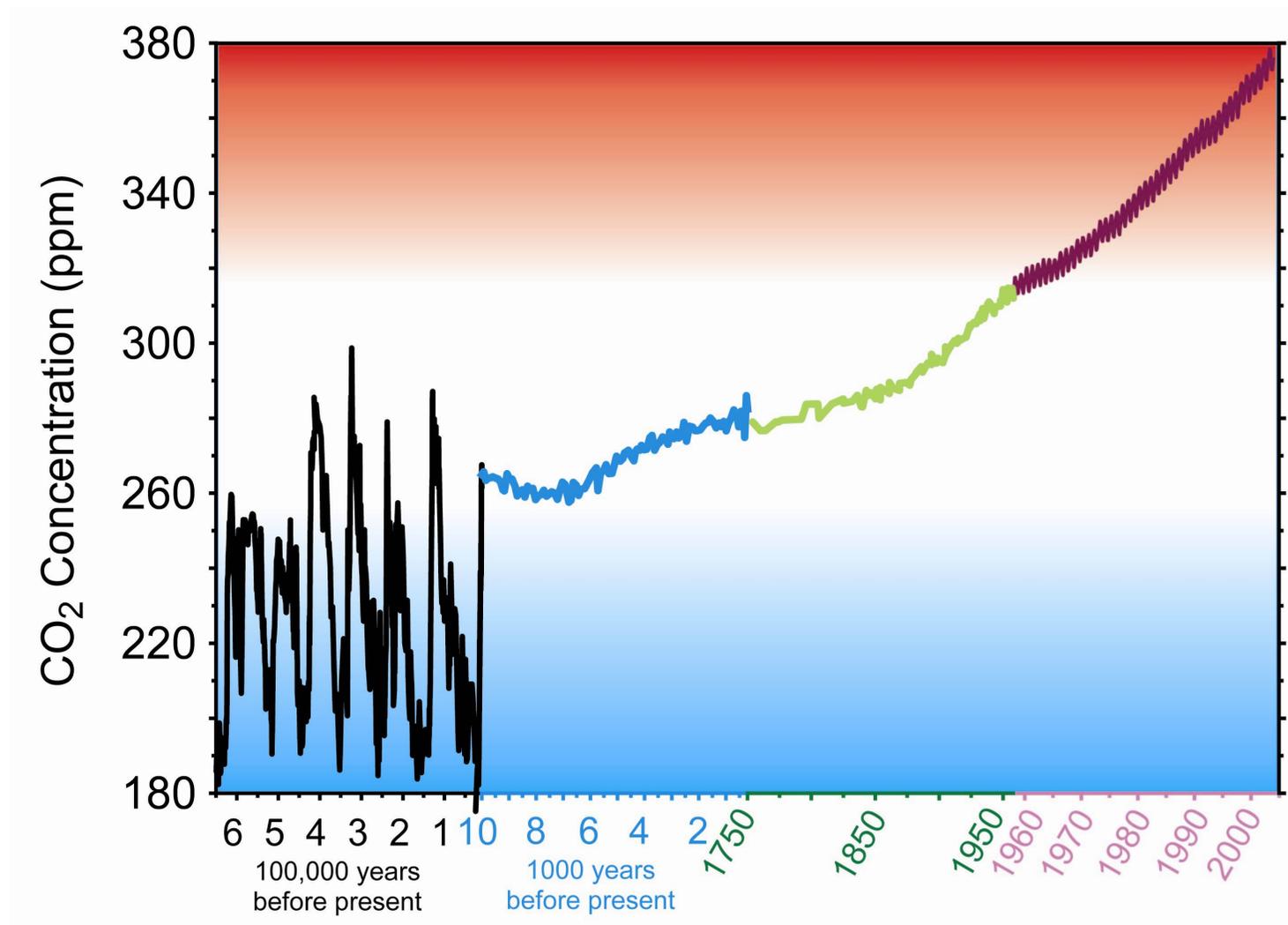
Fin 2009, elle était de 390 ppm et elle s'élève de 1,7 ppm/an (partie par million). La Terre n'a jamais connu une telle concentration de CO_2 au cours des 800 000 dernières années. Il n'y a donc pas d'expérience directe de l'évolution du climat terrestre dans de telles conditions.

5. Effet de serre : concentration de CO_2 dans le passé



Concentration de CO_2 mesurée dans les bulles d'air contenues dans les carottes de glace de l'Antarctique. Mais ici, c'est en général l'élévation de température qui précède l'accroissement de la concentration de CO_2 .

6. Effet de serre : concentration de CO_2 dans le passé et aujourd'hui



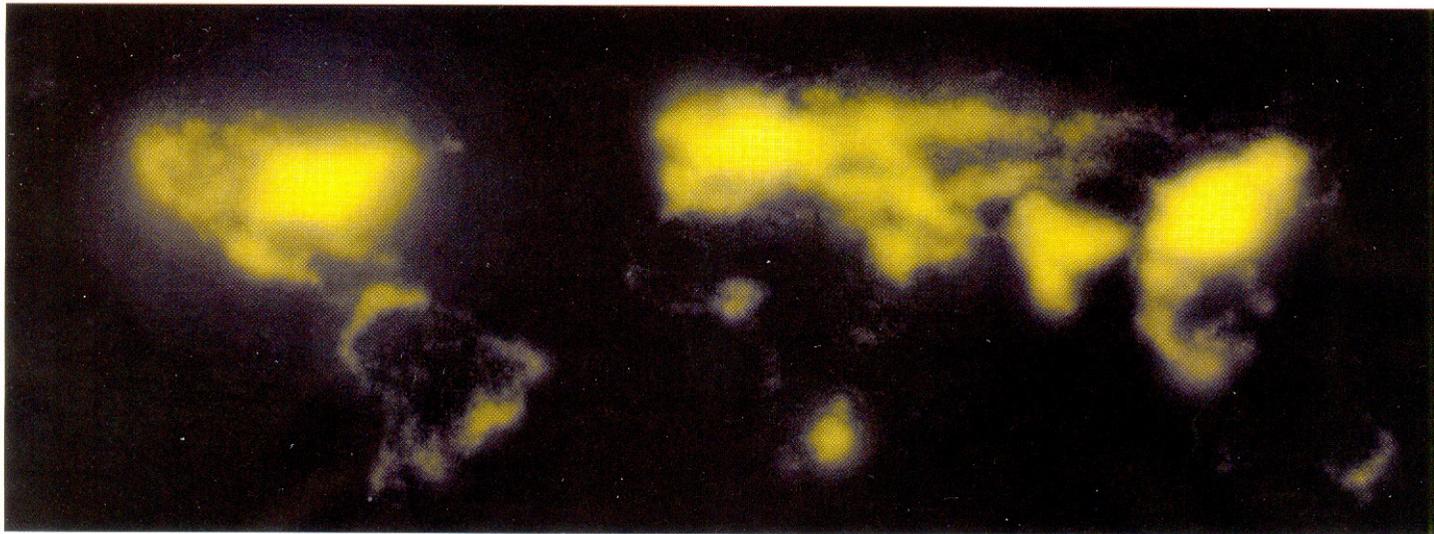
7. Effet de serre : émission de CO_2 aujourd'hui d'origine anthropique

Taux annuel d'émission en 2011 : 34,7 Gt de CO_2 .

Taux de croissance annuelle d'émission de CO_2 entre 2000 et 2009 : 2.5% / an
contre 1% / an dans la décennie précédente.

37% de plus qu'en 1990 année de référence du protocole de Kyoto

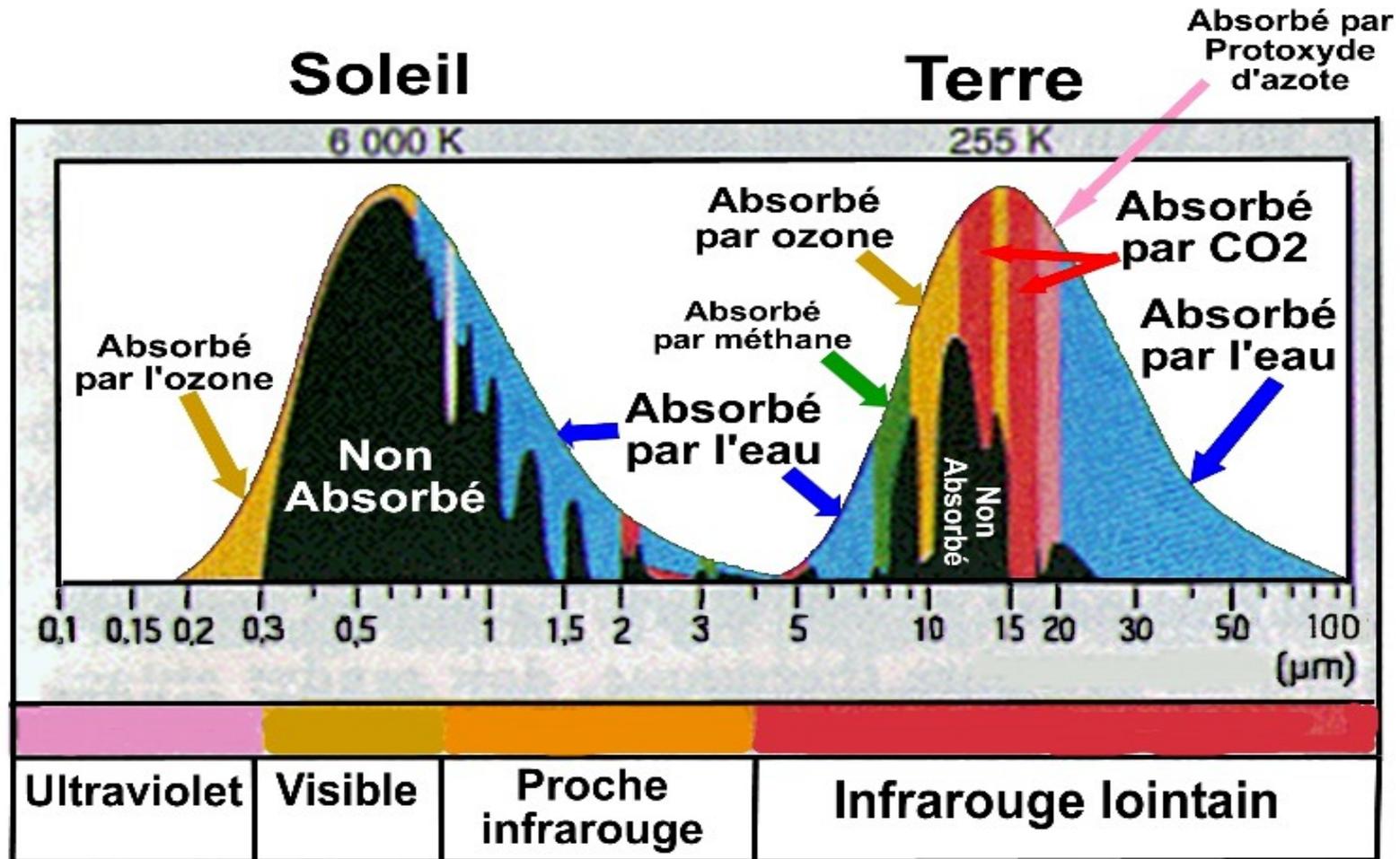
Taux annuel d'émission par habitant : 5,5 t en Chine, 10 t en Europe, 17 t aux USA
5,5 t en France et 4,6 t en moyenne dans le monde



Planisphère de l'intensité des émissions de CO_2 .

8. Effet de serre

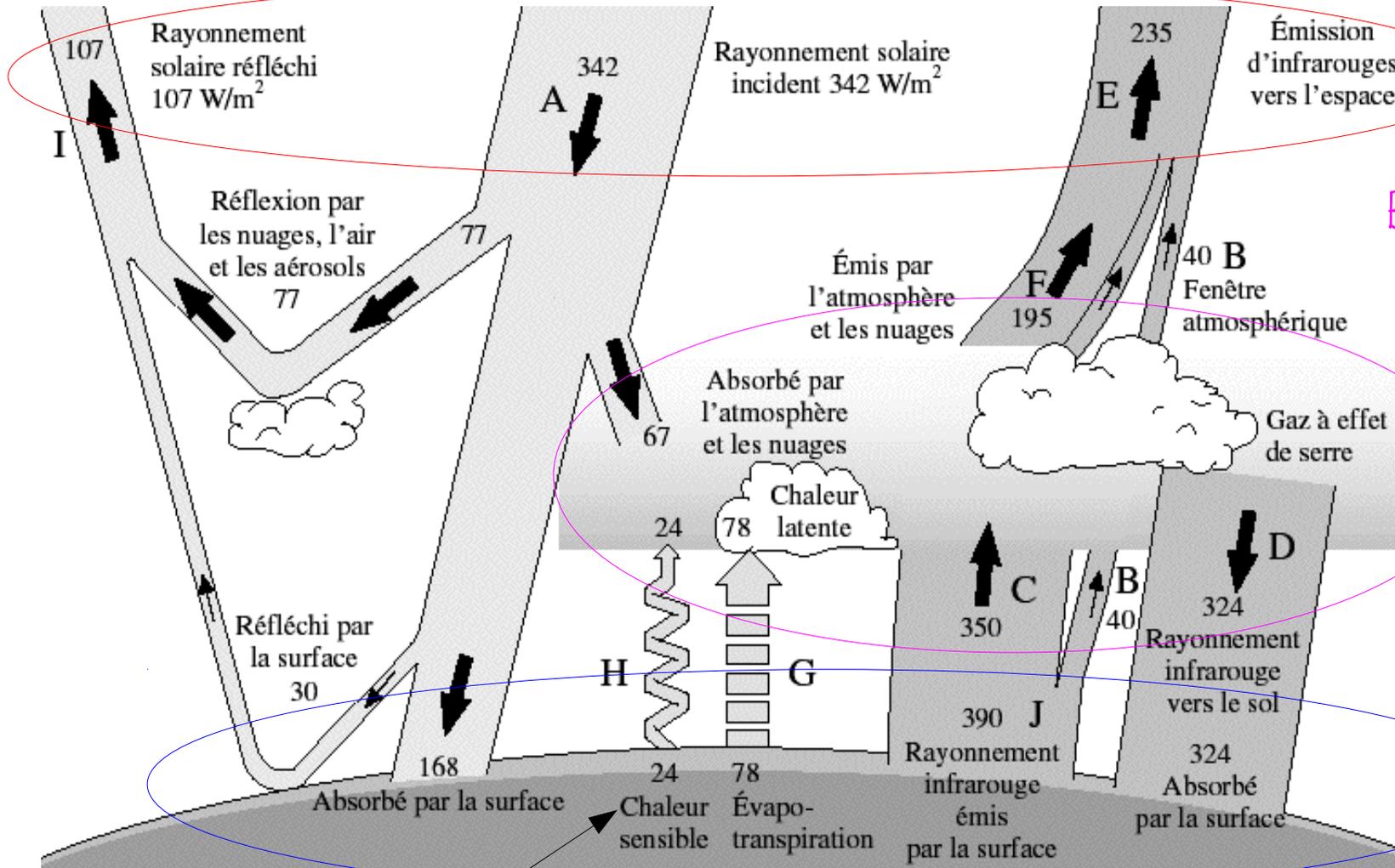
Spectre d'absorption du rayonnement thermique



Sources : Sadourny, Jancovici

9. Effet de serre : flux énergétiques à l'équilibre aujourd'hui

Bilan global:
 $342 - 107 - 235 = 0$

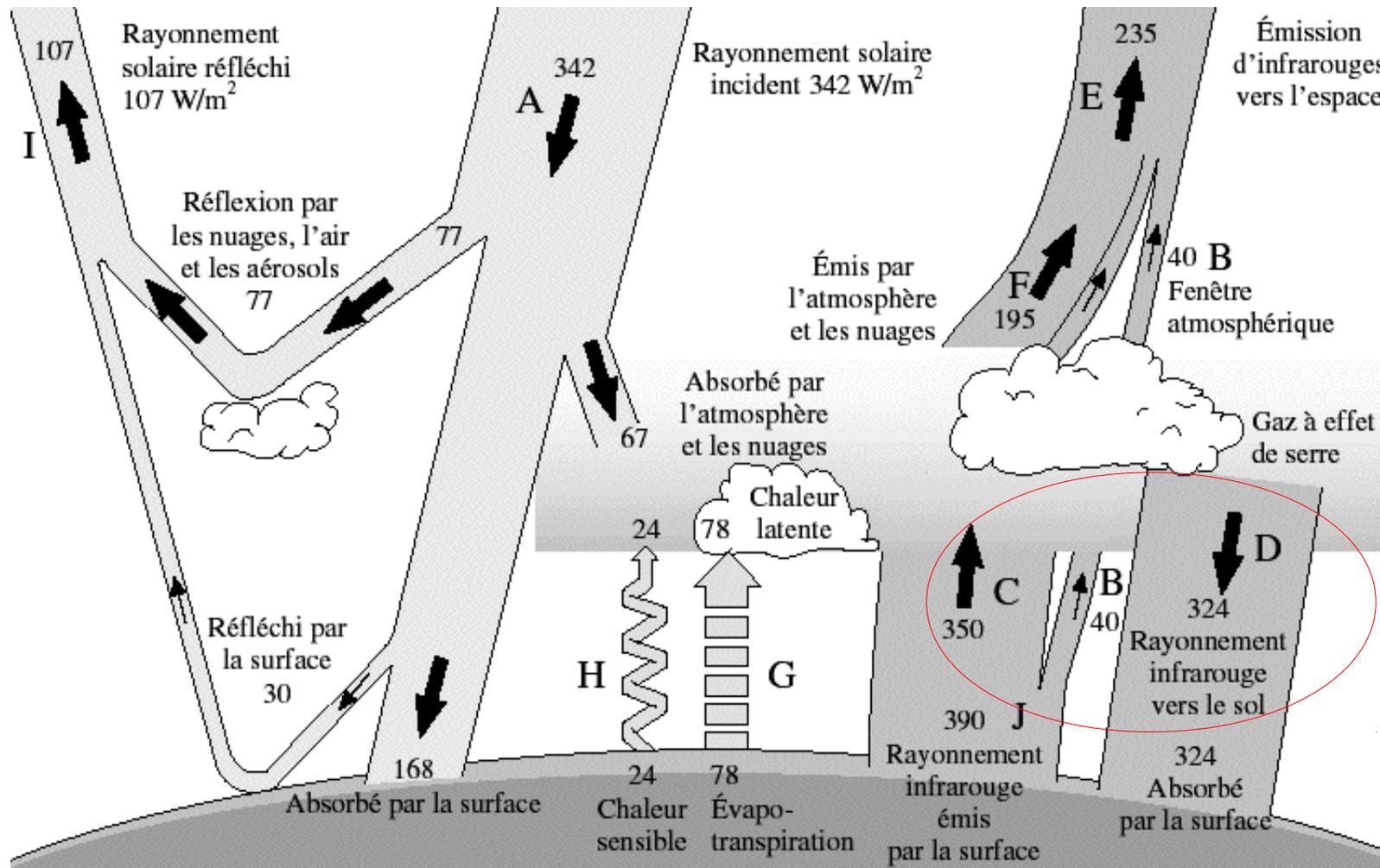


Bilan atmosphérique :
 $67 + 24 + 78 + 350 - 195 - 324 = 0$

convection et conduction

Bilan terrestre : $168 + 324 - 24 - 78 - 390 = 0$

10. Effet de serre : forçage radiatif

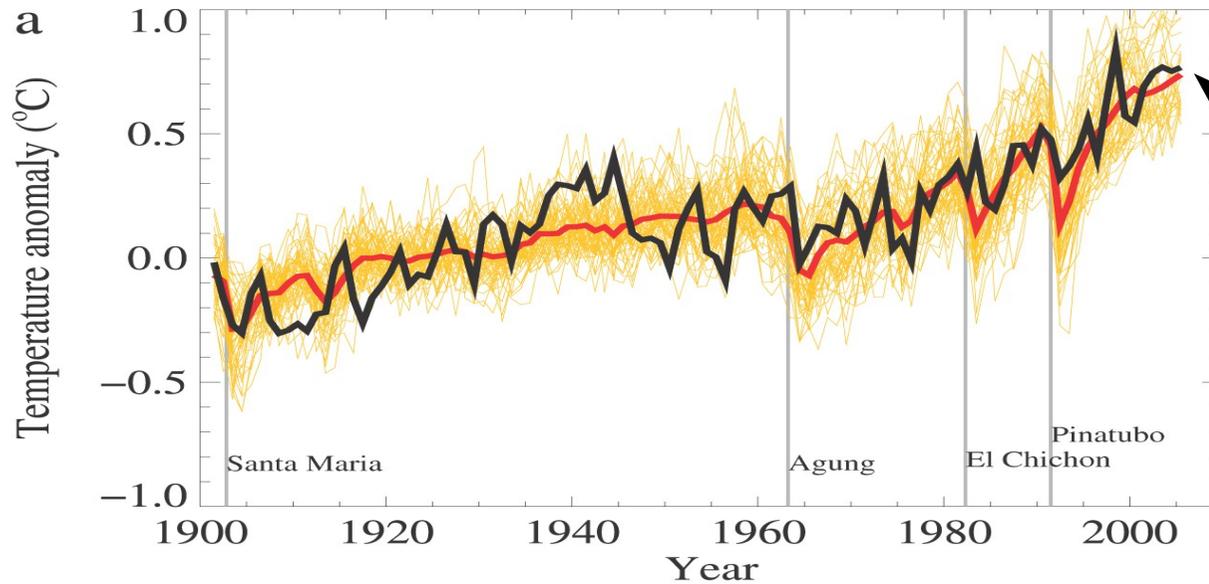


Mécanismes radiatifs de l'effet de serre

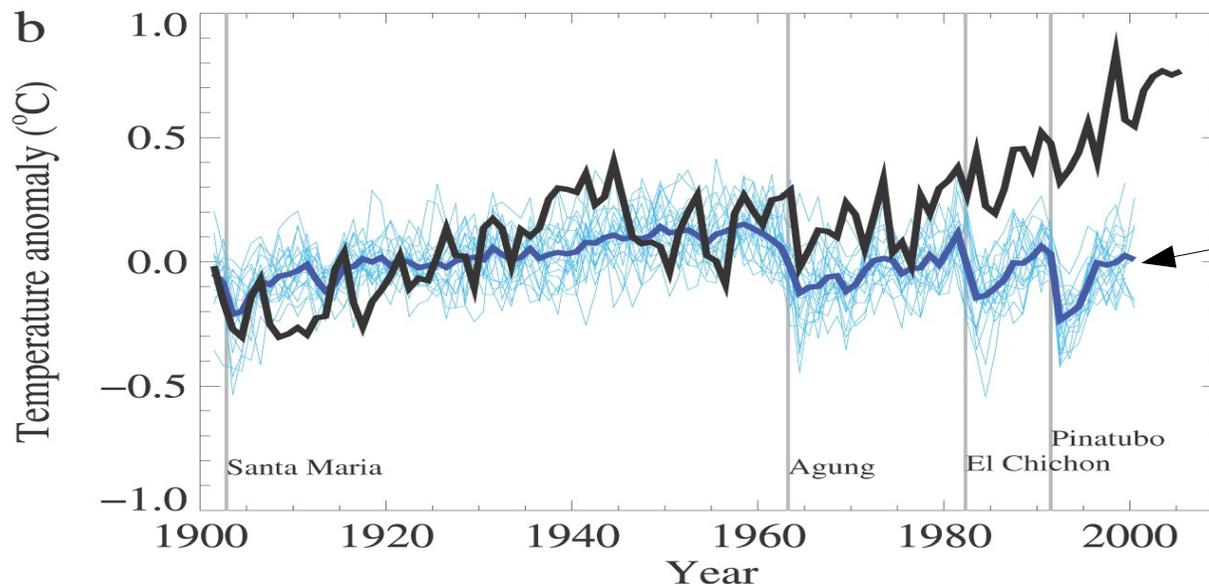
Lorsque la température de la terre augmente de 0,5 °C, l'émission radiative terrestre s'accroît de : $\Delta E = \sigma 4T^3 \Delta T \times 90\% = 2,4 \text{ W/m}^{-2}$

Car 10% sont transmis à travers l'atmosphère (B).

II. Effet de serre : Modélisation de l'anomalie de température de la surface de la terre .



En tenant compte
des forçages naturels
et d'origine anthropique.



En ne tenant compte que
des forçages naturels .

12. Effet de serre : forçage radiatif

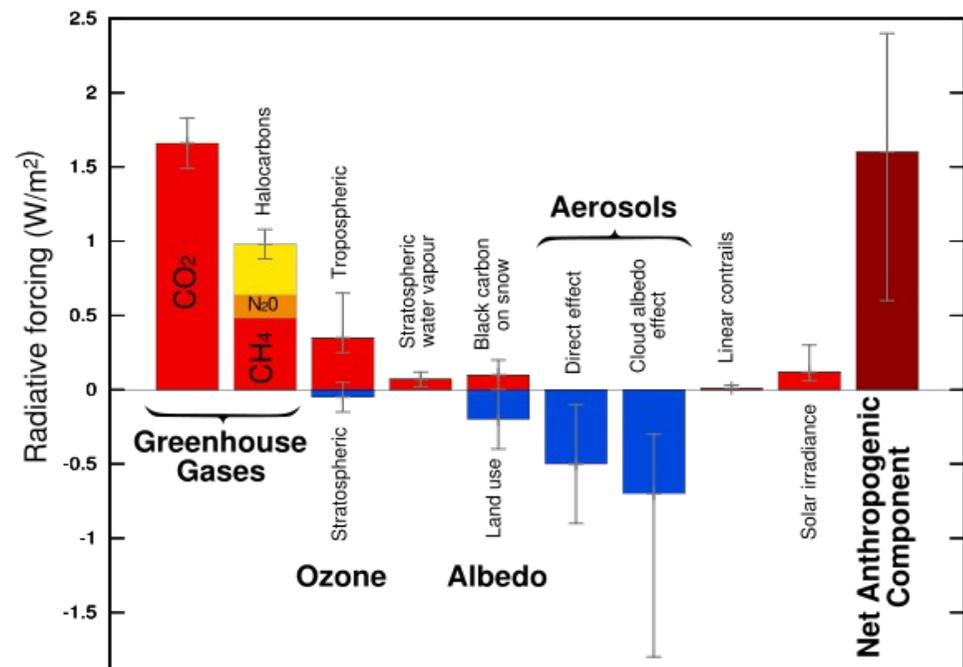
Avant 1750, pour un million de molécules d'air, l'atmosphère contenait 3900 molécules d'eau, 280 de gaz carbonique et moins d'une molécule de méthane.

Aujourd'hui, l'atmosphère contient 195 molécules d'eau de plus (+5% car l'atmosphère est presque saturée), 105 molécules de CO_2 de plus (+37%) et 1 molécule de CH_4 de plus (+160%).

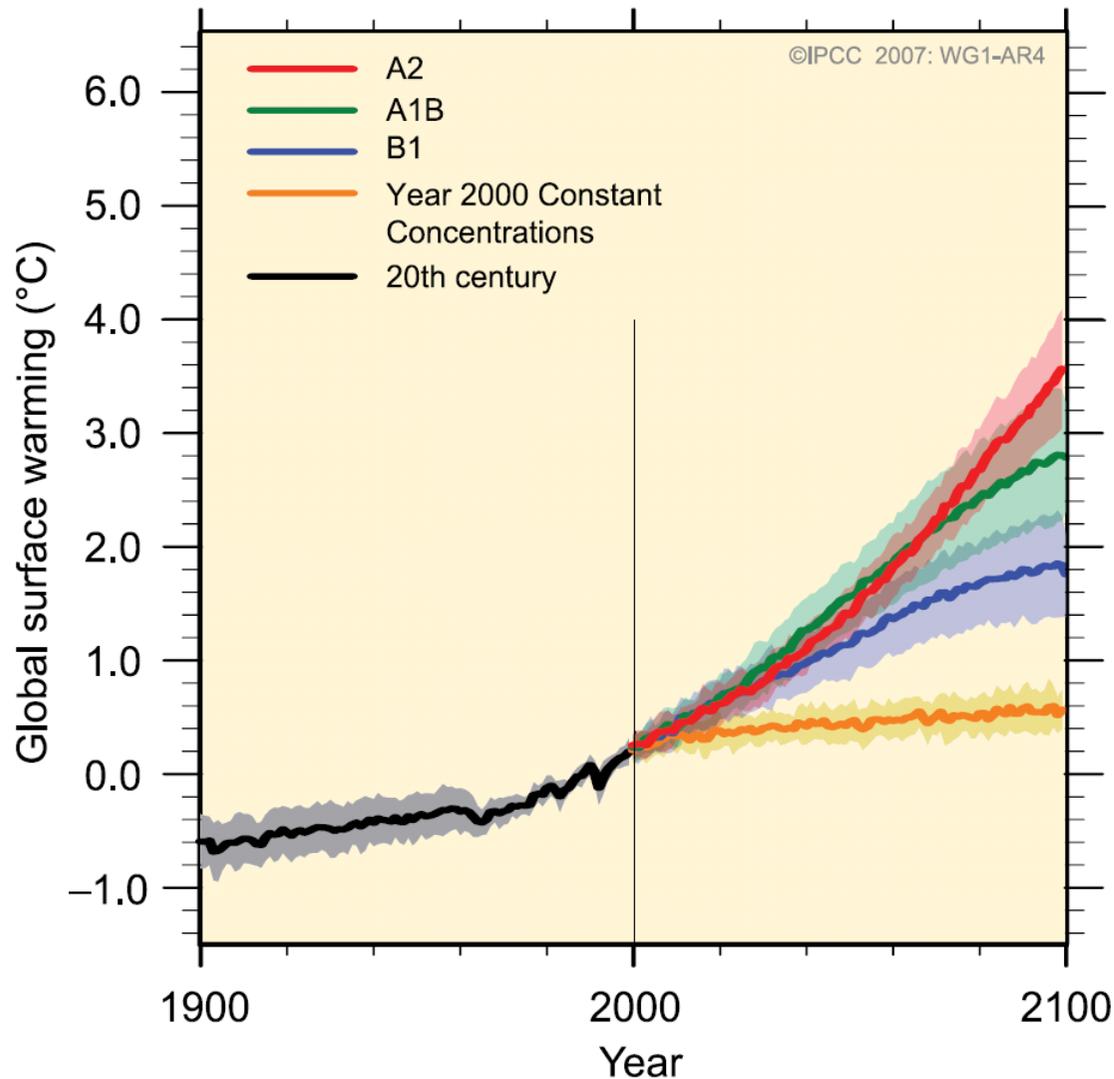
Le forçage radiatif dû à ces surplus de concentration sont : $1,6 \text{ W/m}^{-2}$ pour le CO_2 , $0,4 \text{ W/m}^{-2}$ pour le CH_4 et $0,4 \text{ W/m}^{-2}$ pour les autres gaz à effet de serre (N_2O et CFC). Il est réduit globalement par d'autres phénomènes à forçages négatifs à environ $1,6 \text{ W/m}^{-2}$.

Si le forçage radiatif est positif, la terre se réchauffe.

Radiative Forcing Components



13. Effet de serre : évolution du climat



Emissions „high”

Emissions „low”

Atteint dans 70 ans au rythme actuel.

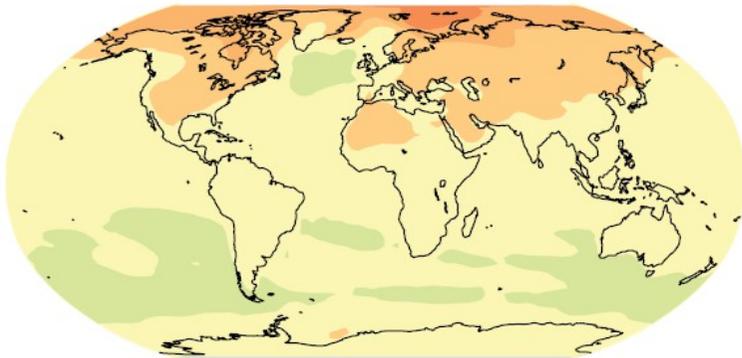
> 1000 ppm de CO₂

< 450 ppm de CO₂

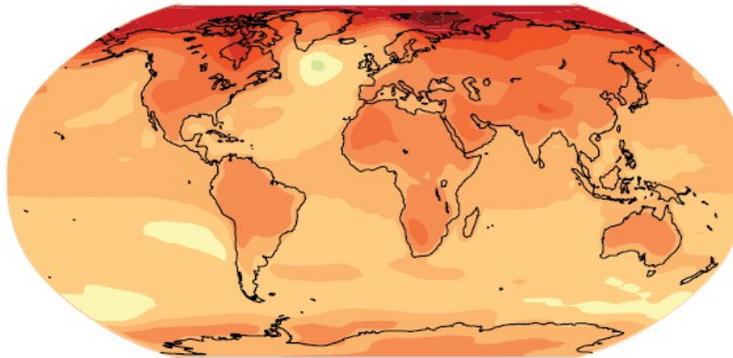
Atteint dans 20 ans au rythme actuel (2,2 ppm/an + 3,6% de plus par an).

14. Effet de serre : évolution du climat

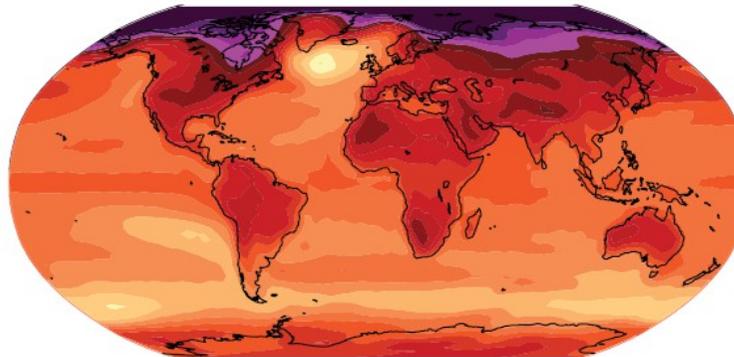
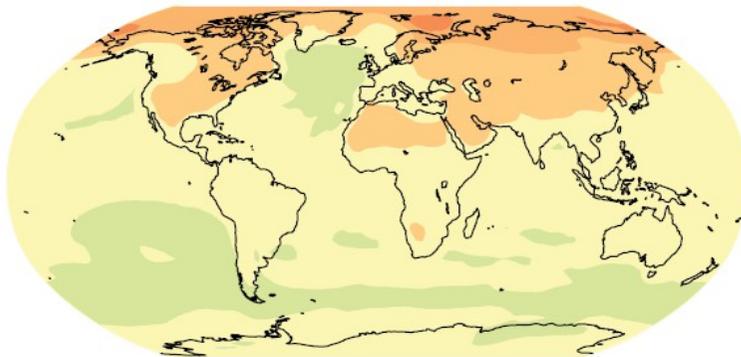
2020 - 2029



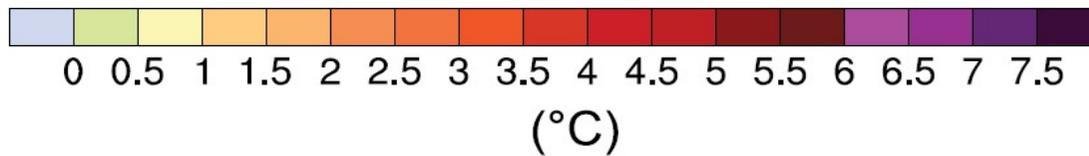
2090 - 2099



émissions basses
< 450 ppm
de CO₂



émissions hautes
> 1000 ppm
de CO₂



15. Économie (non spéculative) de l'énergie

Il faut relâcher 15 Gt de CO_2 pour produire 1 ppm de plus dans l'atmosphère (la moitié étant absorbée par la biosphère et les océans).

1 Tep de charbon (brûlé) produit 5,87 t de CO_2

1 Tep de pétrole produit 3,14 t de CO_2

1 Tep de gaz produit 1,96 t de CO_2

Par ailleurs (si l'on tient compte du cycle de vie complet des moyens de production) :

1 Tep nucléaire primaire produit 0,02-0,07 t de CO_2

1 Tep éolien produit 0,1 - 0,9 t de CO_2

1 Tep solaire photovoltaïque produit 0,4 - 3 t de CO_2

1 Tep de biomasse produit de 0 - 1,4 t de CO_2

1 Tep hydroélectrique produit ~ 0,02 t de CO_2

Quand on tient compte de leur cycle de vie complet, les énergies renouvelables ne sont jamais totalement décarbonées (dans une économie alimentée principalement par les énergies fossiles).

16. Économie (non spéculative) de l'énergie

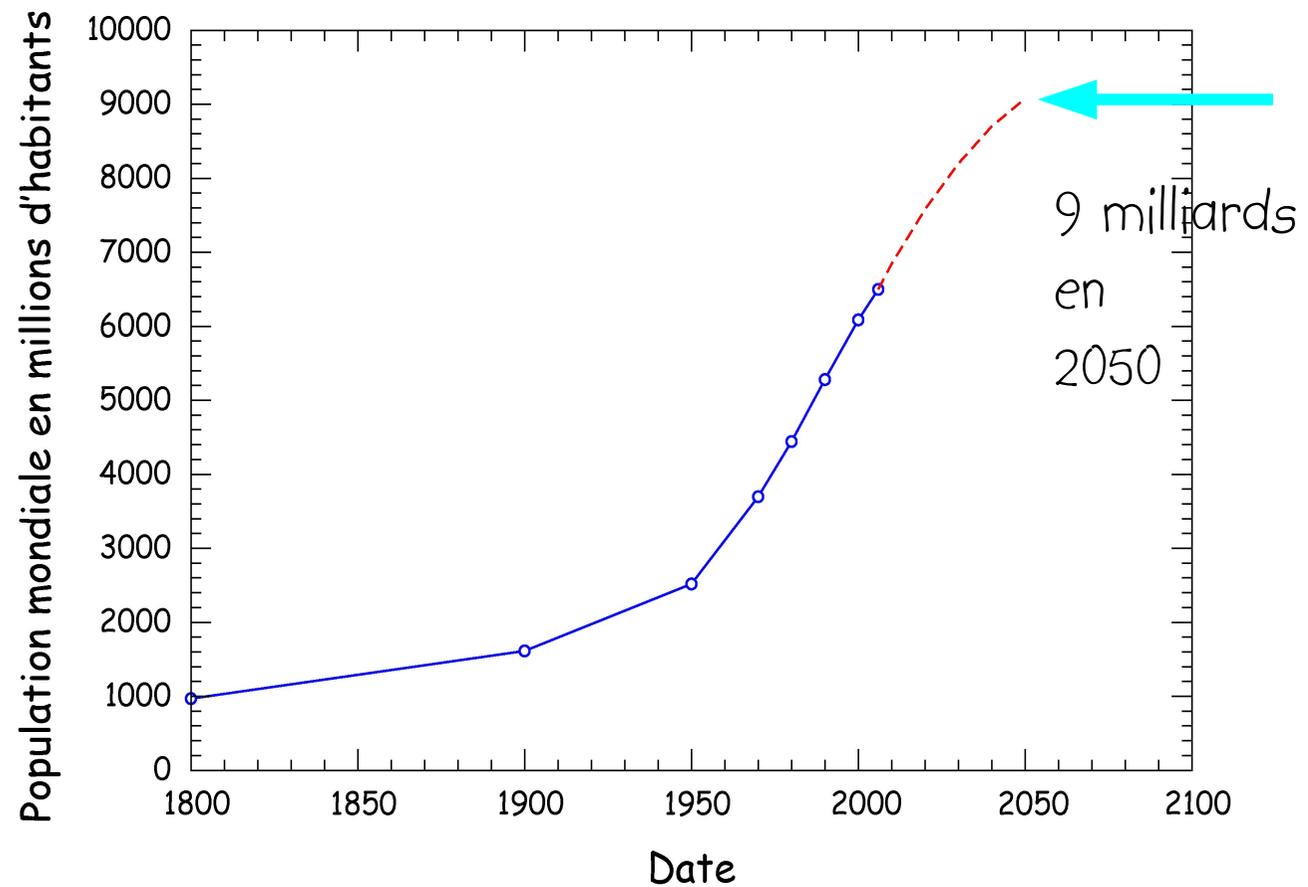
La consommation énergétique mondiale annuelle peut s'écrire sous la forme de fractions ayant un sens démographique et économique :

$$\text{Energie} = \frac{\text{Energie}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \text{Population}$$

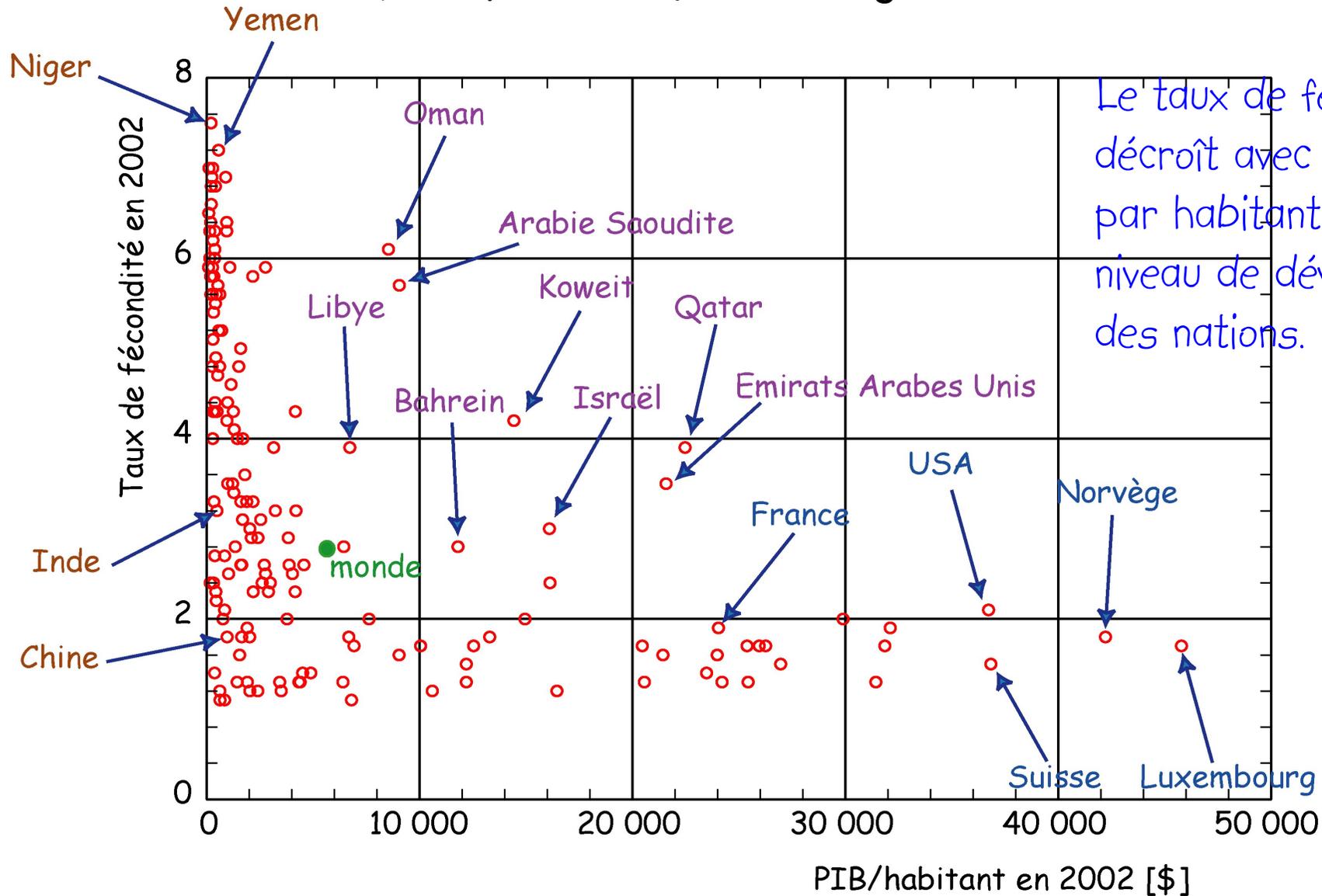
PIB/habitant moyen mondial

efficacité énergétique mondiale

Population X 1,4 en 2050



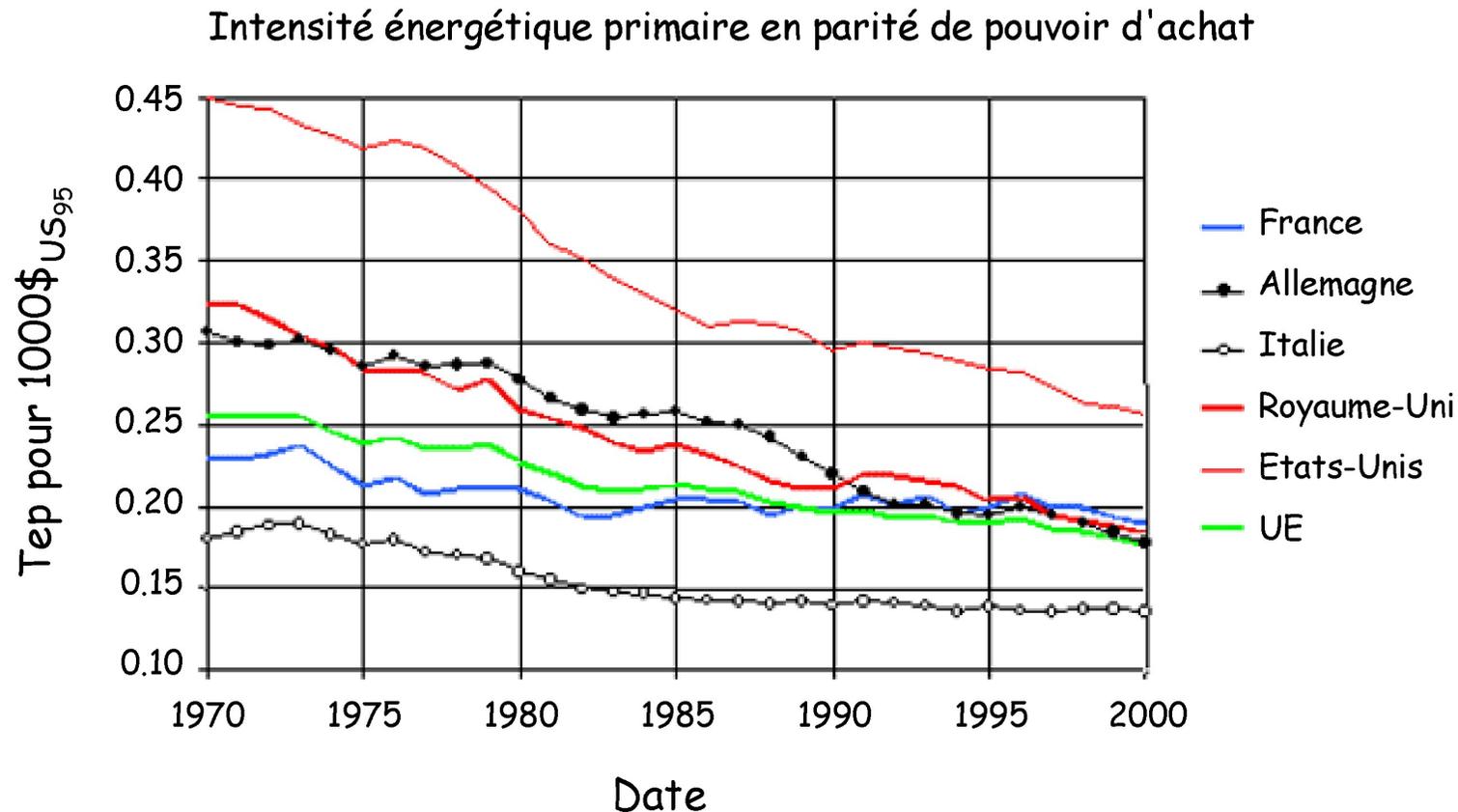
17. Économie (non spéculative) de l'énergie



Difficile d'évaluer l'accroissement du PIB/habitant sur 50 ans !

Accroissement d'un facteur 3 : 2,22 %/an

18. Économie (non spéculative) de l'énergie



L'intensité (l'efficacité) énergétique s'améliore au cours du temps.
On admettra que globalement celle-ci pourrait être divisée par deux
dans le monde dans les 50 prochaines années.

19. Économie de l'énergie

$$\text{Energie} = \frac{\text{Energie}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \text{Population}$$

0,5 3 X 1,4 = 2,1

(amélioration de l'efficacité énergétique mondiale)

Ce petit calcul montre qu'un doublement de la consommation énergétique annuelle mondiale d'ici à 2050 est tout à fait plausible.

Si on maintenait les mêmes sources d'énergie primaire qu'aujourd'hui, cela nous conduirait à accroître de plus de 4 ppm /an la concentration de CO₂ dans l'atmosphère avec un passage au-dessus de 700 ppm au cours du siècle.

Est-on prêt à prendre ce risque ?

20. Conclusion

Il a fallu un siècle pour que le charbon l'emporte sur le bois vers 1870. Le charbon a sauvé la forêt menacée d'extinction car première source d'énergie primaire.

Le pétrole a pris le pas sur le charbon vers 1970. Le pétrole a sauvé les baleines chassées pour leur huile...

Dans les prochaines décennies, le gaz pourrait prendre le dessus sur le pétrole.

Mais nul ne connaît aujourd'hui l'énergie décarbonée qui prendra le relais sur les énergies fossiles ! Au mieux, les experts parlent d'un panachage...un aveu probable d'ignorance.

Pour être utile vis à vis de la limitation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère cette source d'énergie décarbonée devra devenir prédominante vers 2050.

21. Pour en savoir plus :

- L'Énergie – Ressources, Technologies et environnement,
C. Ngô – UniverSciences Dunod
- L'Énergie de demain – Techniques, Environnement, Économie –
J.L. Bobin, E. Huffer, H. Nifenecker – EDP Sciences
- Energy ... beyond oil , Fraser Armstrong & Katherine Blundell, Oxford
- IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change), <http://www.ipcc.ch>
- GPC (Global Carbon Project), <http://www.globalcarbonproject.org>