

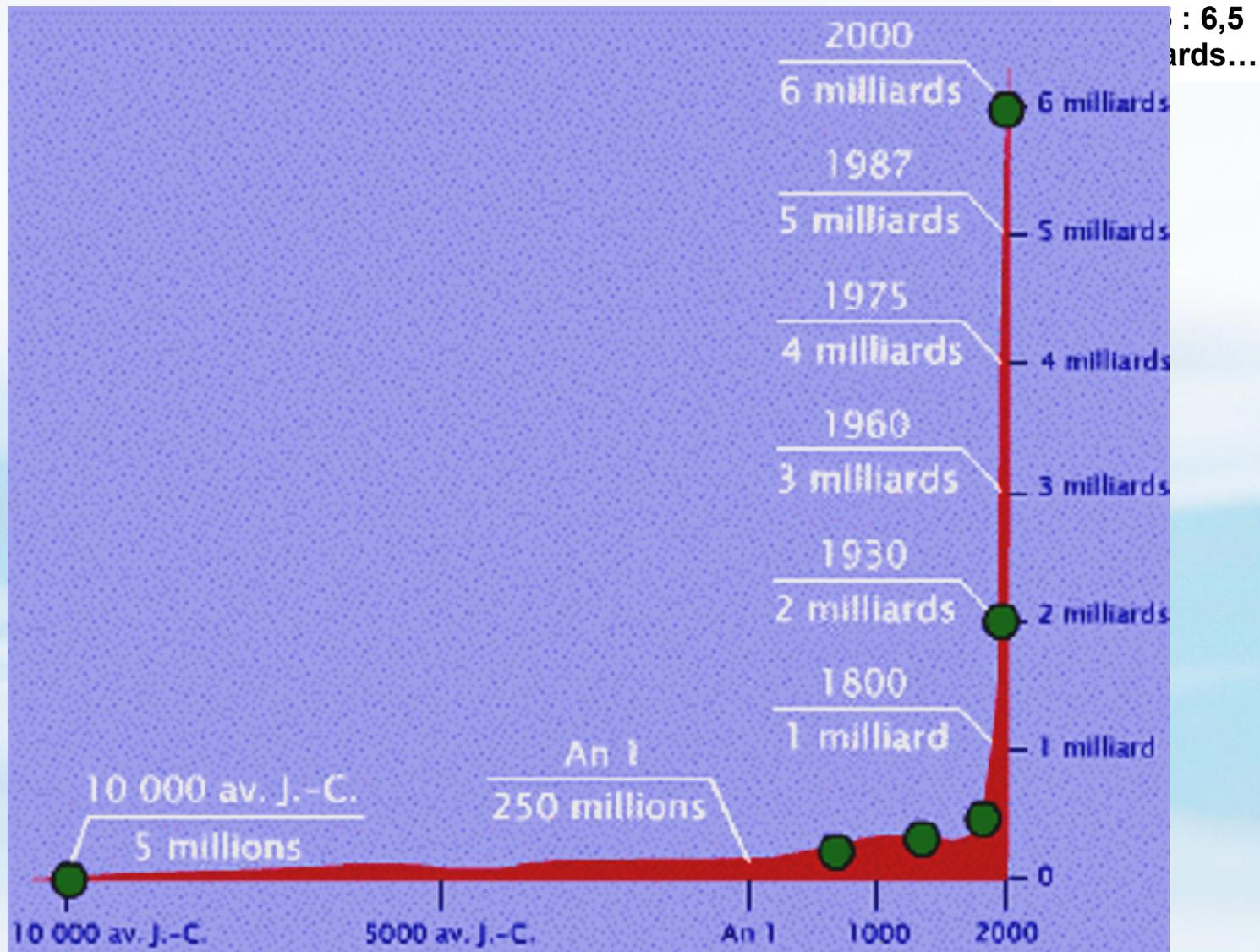
Energie et climat : la fin de l'âge d'or ?



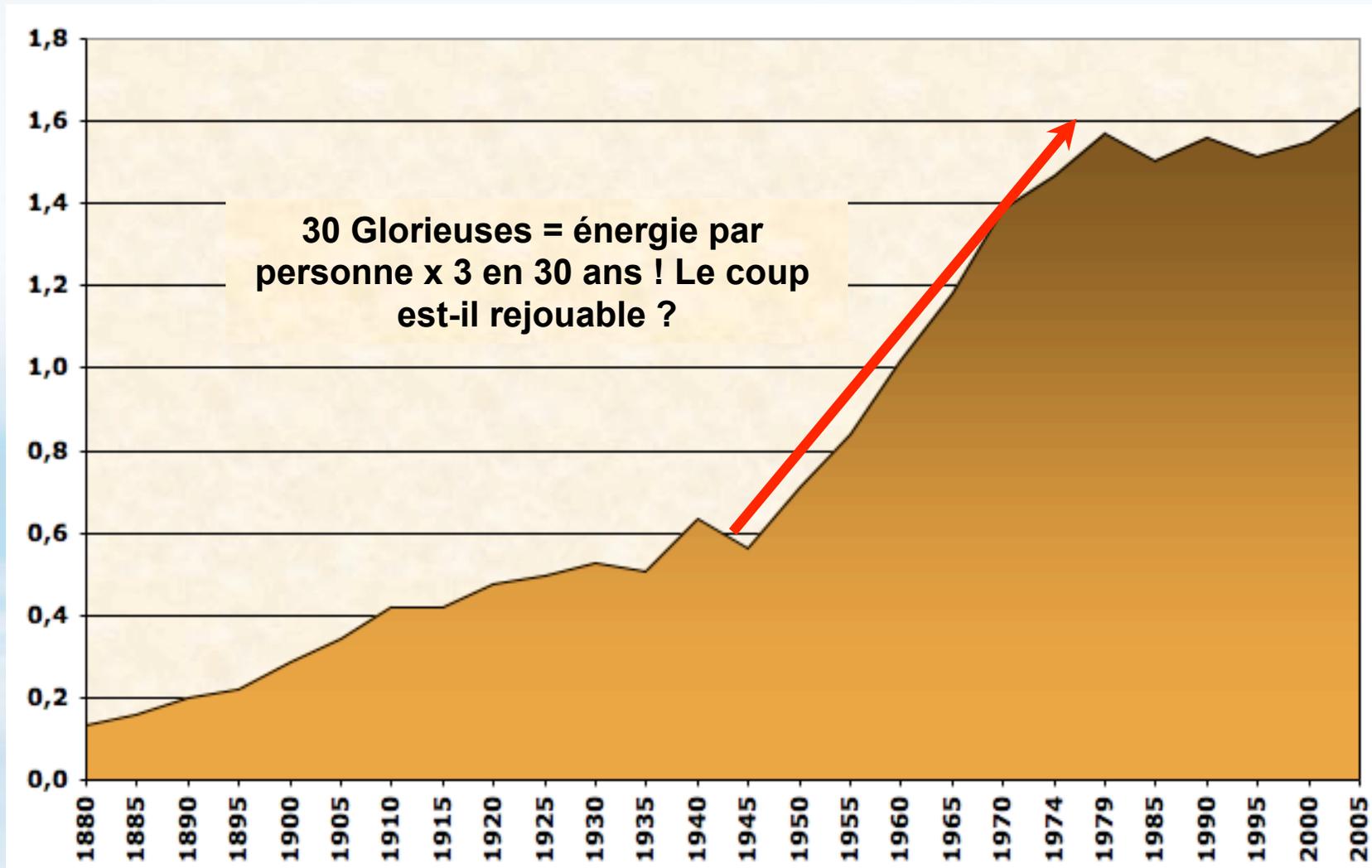
Jean-Marc Jancovici - SPIE - 27 mars 2008

- l' énergie est utilisée depuis 500.000 ans : la domestication du feu ; vent, traction animale et force de l' eau il y a des milliers d' années...
- le climat a toujours varié, et variera toujours
- Ce qui a changé entre le passé et aujourd' hui en matière d' énergie (et donc des conséquences de son usage) : les **ordres de grandeur**. Les ordres de grandeur, c' est une affaire de chiffres, pas de slogans.
- La crainte de l' avenir est multimillénaire (Apocalypse, Malthus, Club de Rome...).
- ... mais « il est arrivé que l' on se trompe » n' est pas équivalent à « dès qu' il est question d' avenir on se fait peur pour rien ». « Il est arrivé que l' on se trompe » permet parfaitement d' avoir aussi « il est arrivé que l' on ait raison » !

Au commencement étaient les hommes....



Évolution démographique depuis le néolithique (découverte de l'agriculture). Source : Musée de l'Homme

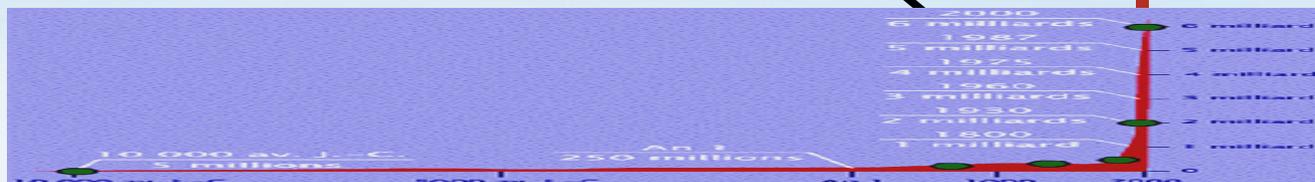


Conso. d'énergie primaire hors biomasse en tep par habitant. Une tep \approx 42 GJ \approx 11.600 kWh

Compilation de l'auteur (Sources diverses)

La « taille de la boîte » (l'environnement) est en train de devenir un problème majeur

La « taille de la boîte » (l'environnement) n'est pas vraiment un problème



Pression de l'homme sur son environnement depuis le néolithique, figurée avec des surfaces

Energie fournie par un organisme humain :

Métabolisme de base d' un individu au repos : 2,5 kWh par jour (correspond à 2000 Calories d' alimentation)

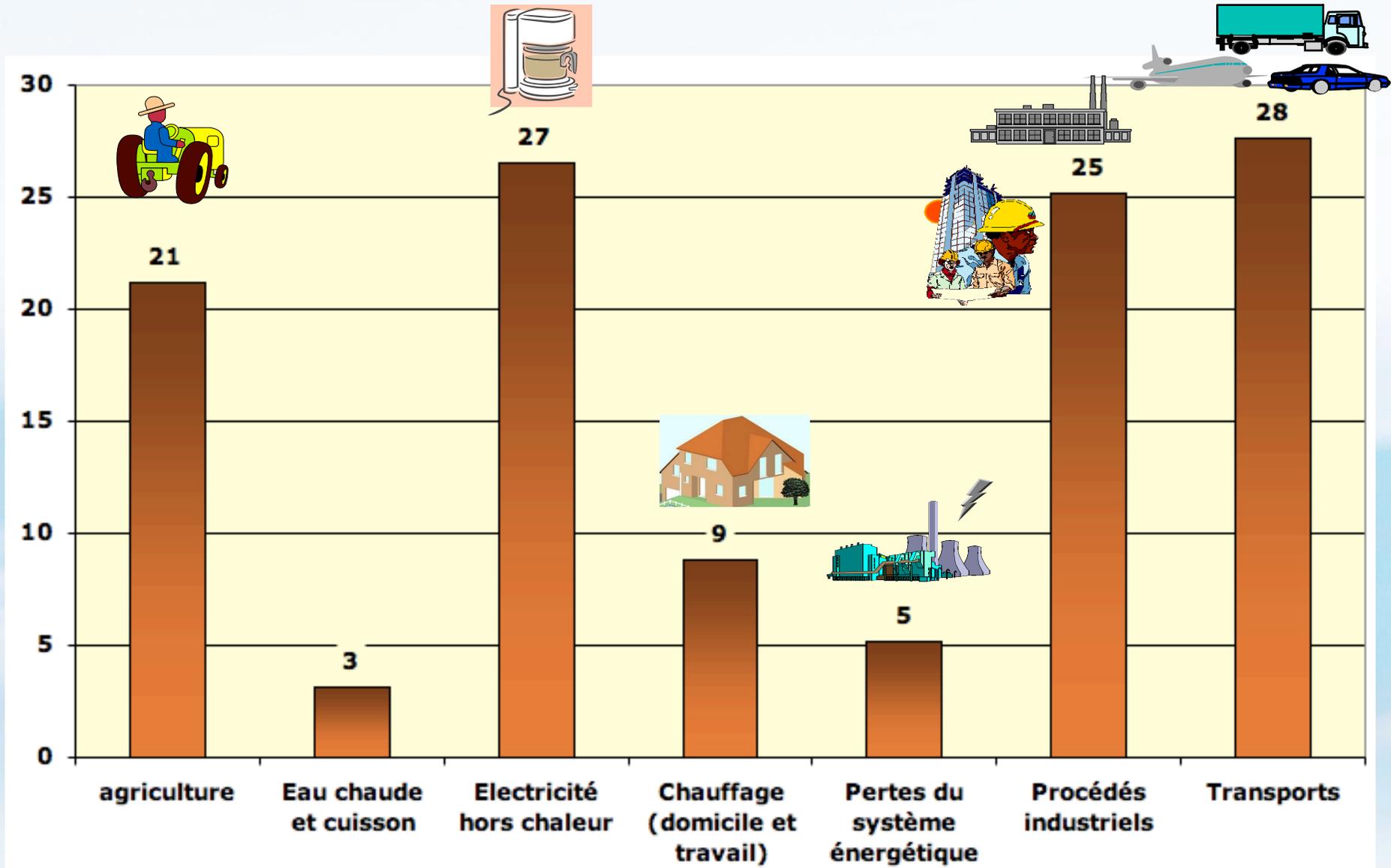
3.000 mètres de dénivelée pour une personne de 65 kg (facile !) : 0,5 kWh d' énergie mécanique (rappel pour les sceptiques : $E = mgh$; ici $E = 50 \times 9,81 \times 3500 \approx 1,9 \text{ MJ} \approx 0,5 \text{ kWh}$)

1 grand trou pour les géraniums, soit 18 tonnes de terre remontée de 1 mètre : 0,05 kWh d' énergie mécanique (pour les même sceptiques : E vaut toujours mgh ; ici $E = 18000 \times 9,81 \times 1 \approx 0,18 \text{ MJ} = 0,05 \text{ kWh}$)

1 litre d' essence, c' est (roulement de tambour)... 10 kWh

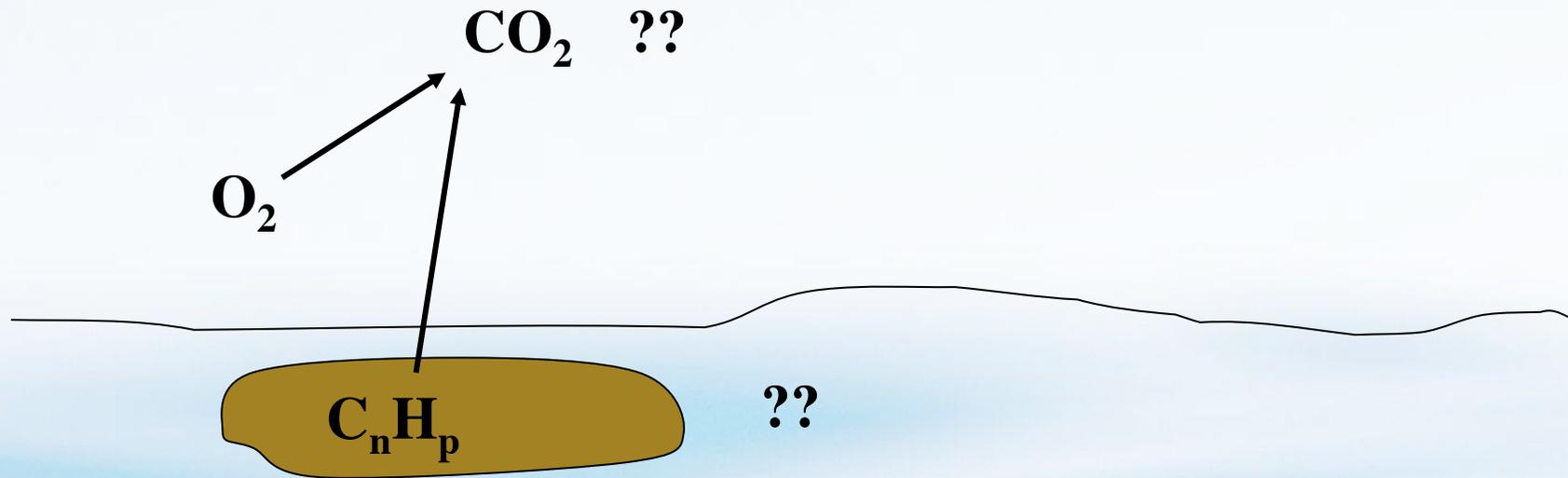
Il y a autant d' énergie mécanique dans un 1 litre d' essence que dans 10 paires de jambes ou 100 paires de bras sur une journée !

Nietzsche voulait des surhommes : nous voici



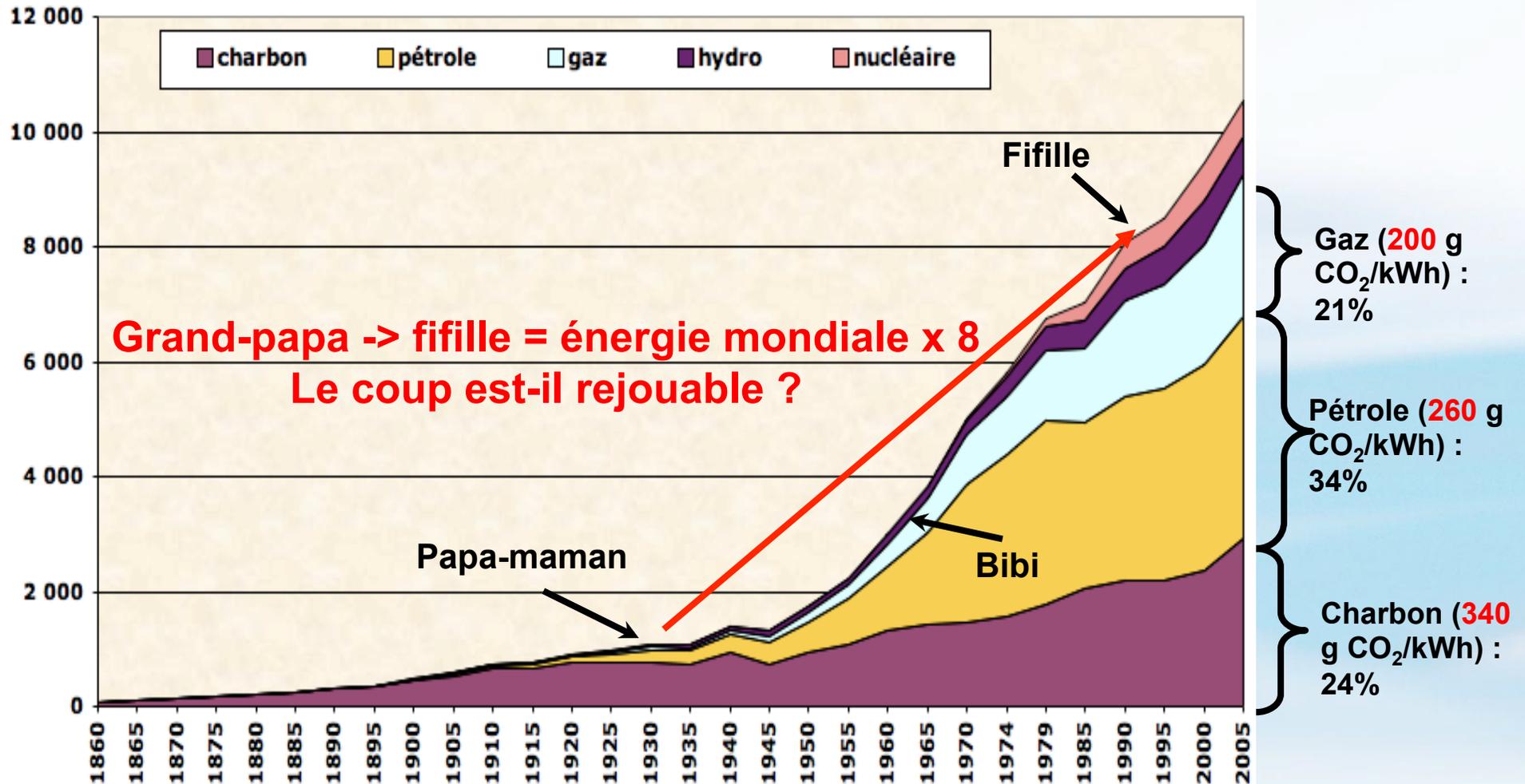
« Equivalent esclave » à la disposition de chaque Français de l' an 2000. Qui est modeste ?!?

Calcul de l' auteur, 2008

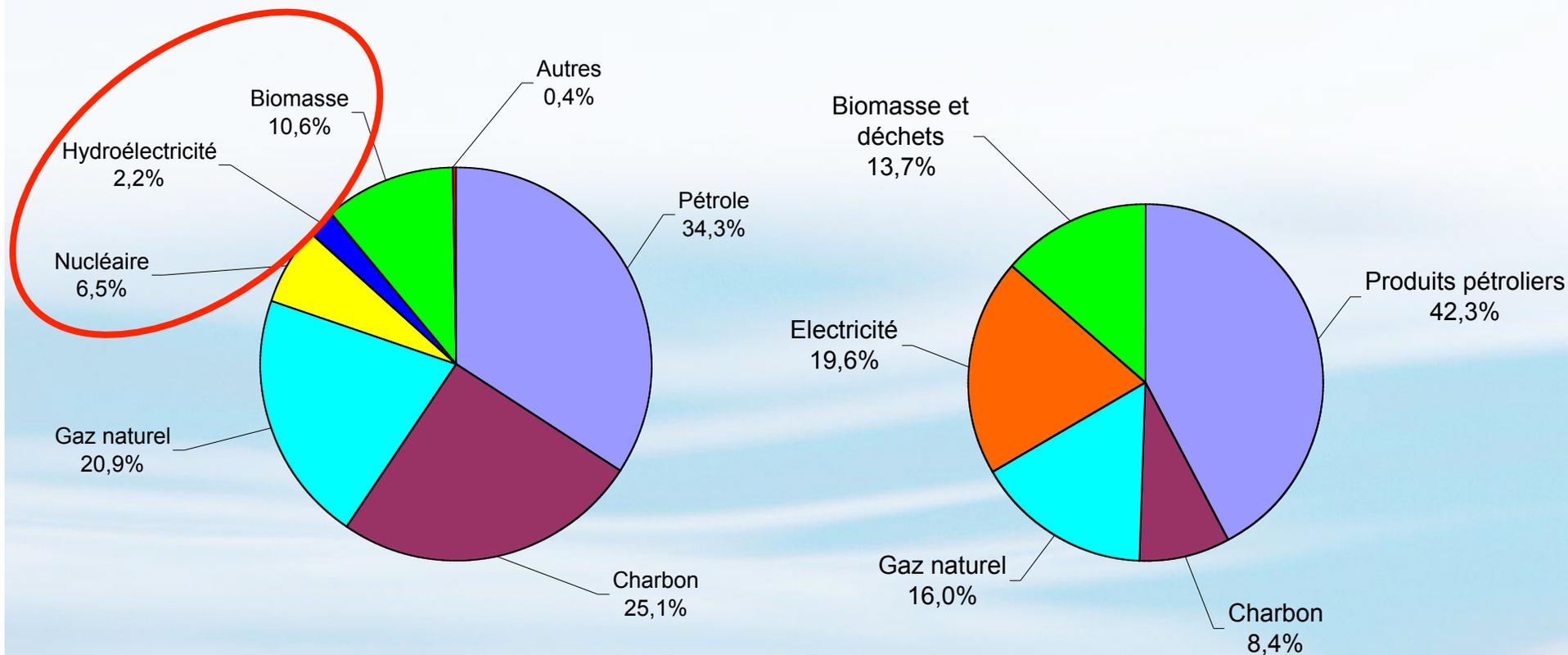


Combien de temps pouvons jouer à « j'extrais de plus en plus de carbone du sous-sol ? » -> débat sur les **ressources**

Combien de temps pouvons nous jouer à « je mets de plus en plus de carbone dans l'atmosphère ? » -> débat sur le **changement climatique**

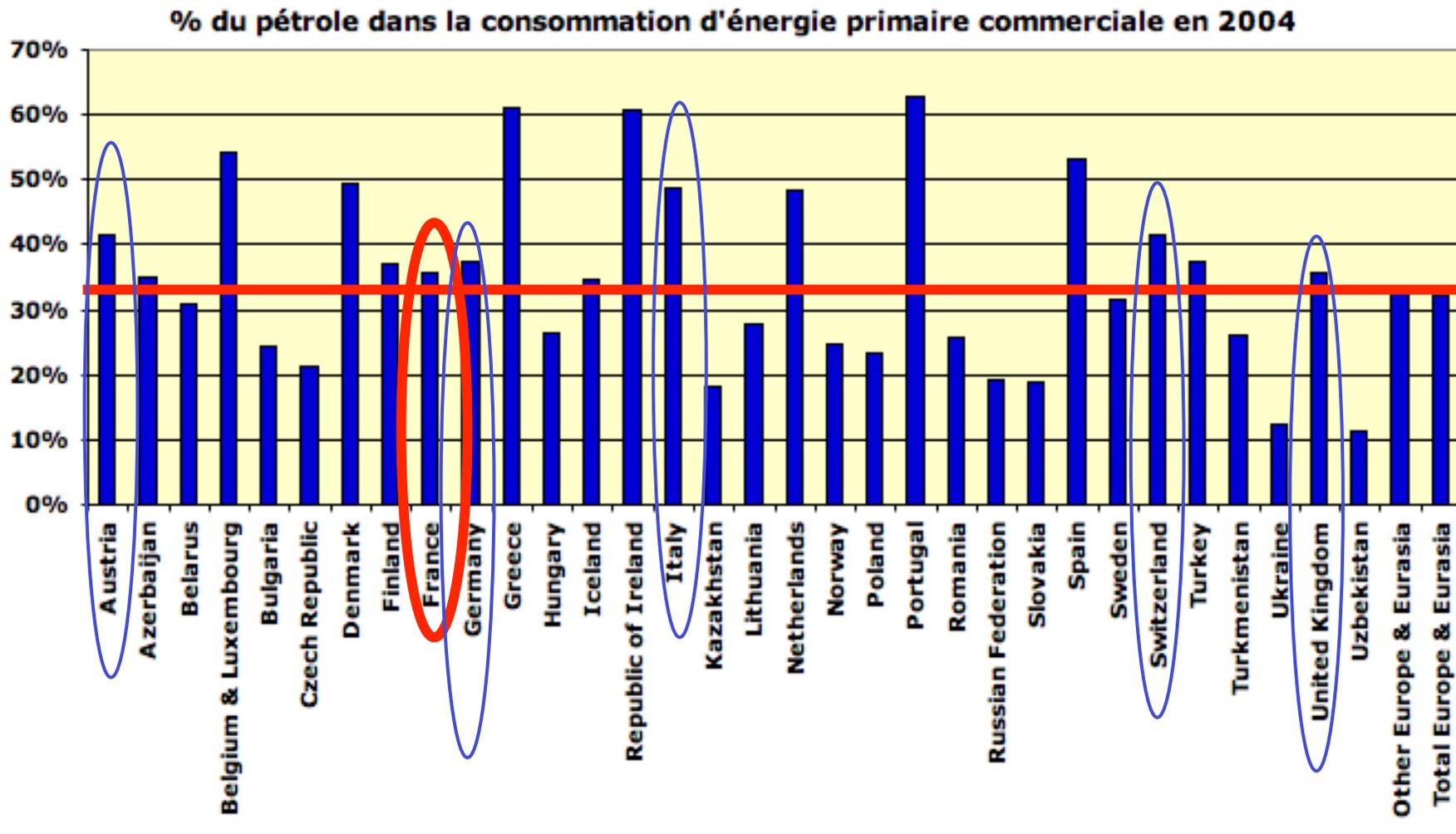


Consommation mondiale en Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) depuis 1860.
Sources Schilling & al + AIE + BP statistical review, compilation de l'auteur



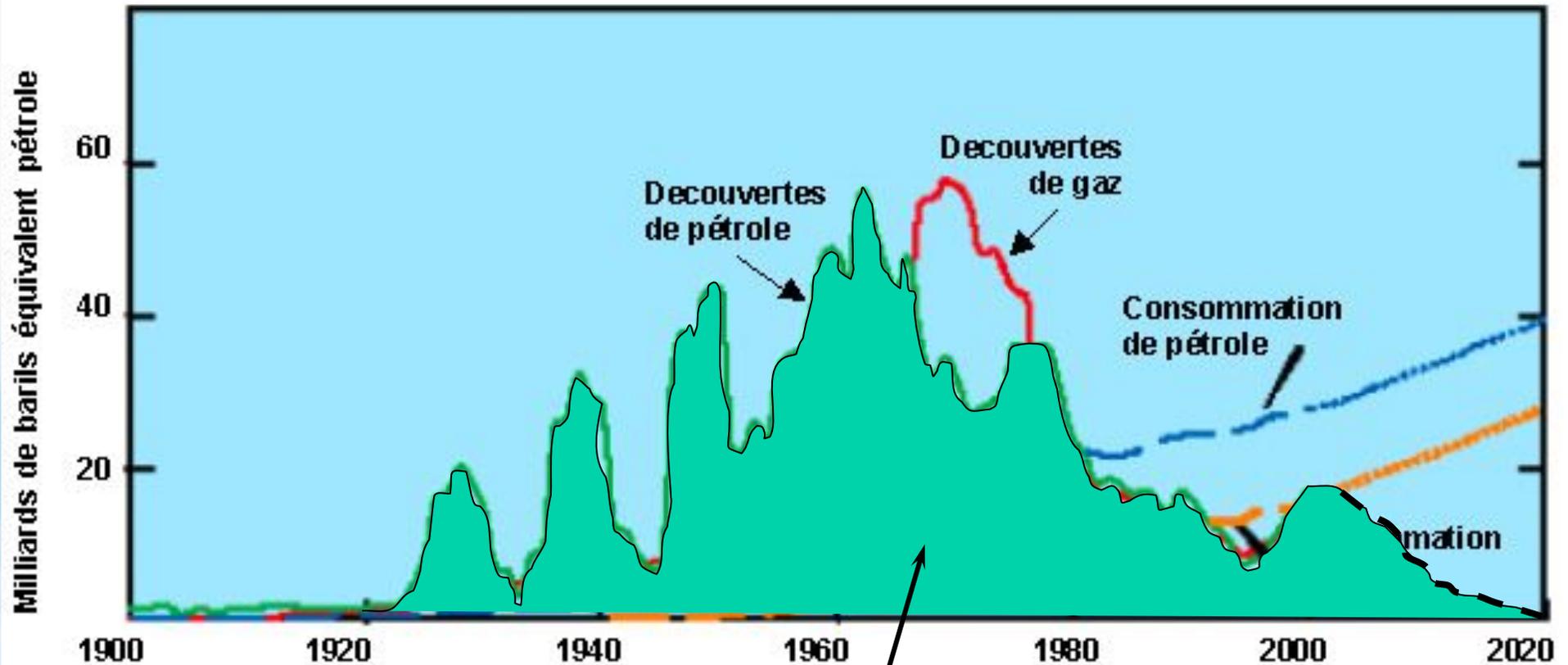
11,1 Gtep_{primaire} → 7,6 Gtep_{final}

Bilan énergétique mondial en 2004 - Source : AIE 2006



Part du pétrole dans la consommation d'énergie primaire hors bois en Europe en 2004. La France est très exactement dans une honnête moyenne...

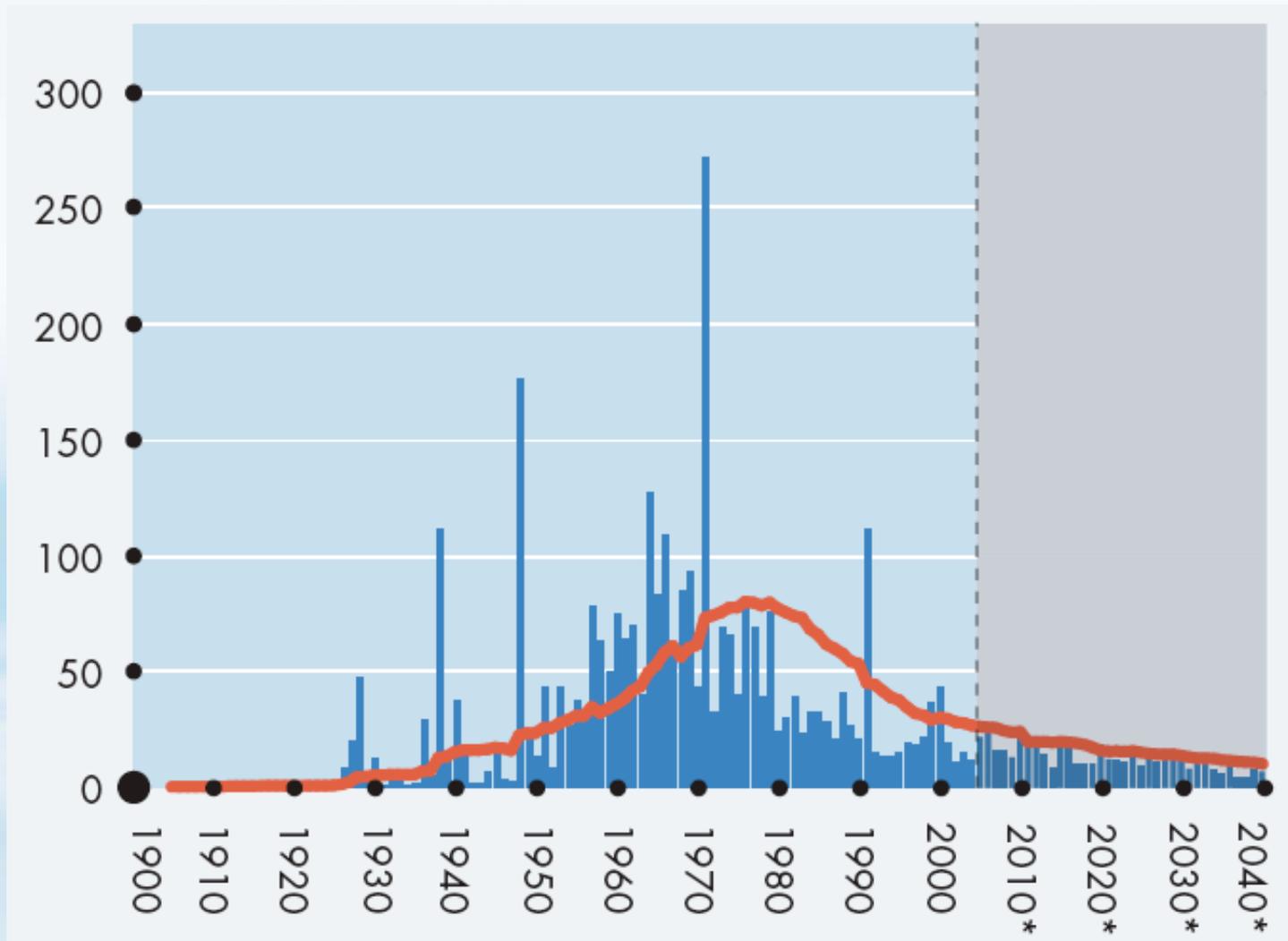
Source BP Stat review



Découvertes cumulées de pétrole récupérable = réserves **ultimes** = max de la production cumulée possible de $-\infty$ à $+\infty$!

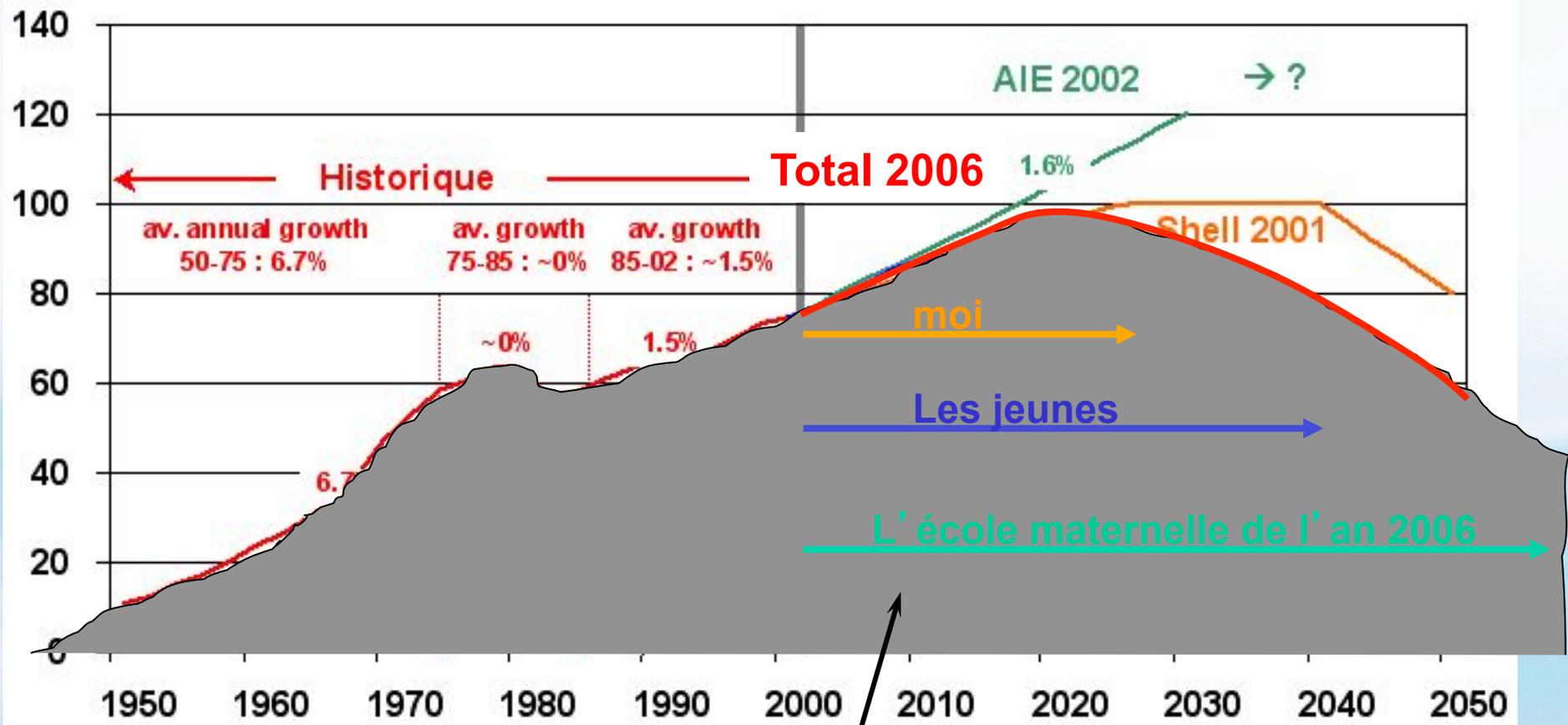
Découvertes mondiales de pétrole récupérable depuis 1900, en moyenne mobile sur 5 ans, en milliards de tonnes équivalent pétrole (1 tonne = 7,3 barils).

Source : Exxon Mobil, 2002



Découvertes mondiales de pétrole récupérable depuis 1900 (valeurs annuelles et moyenne mobile sur 20 ans), en milliards de barils, et **extrapolation pour le futur** (y compris offshore profond, polaire, condensats, etc).

Source : Shell/IHS Energy, 2005



Production cumulée < découvertes cumulées de pétrole récupérable = réserves ultimes

Prédiction du maximum de la production pétrolière mondiale selon les sources. La prolongation tendancielle de la croissance finira par s'arrêter : c'est une simple question de mathématiques !

Source : Total, 2004 et 2006

A quand le début de moins de pétrole ?

IFP, Yves Mathieu, Division Géologie-Géochimie-Géophysique, Colorado Springs, AAPG Hedberg conference November 2006

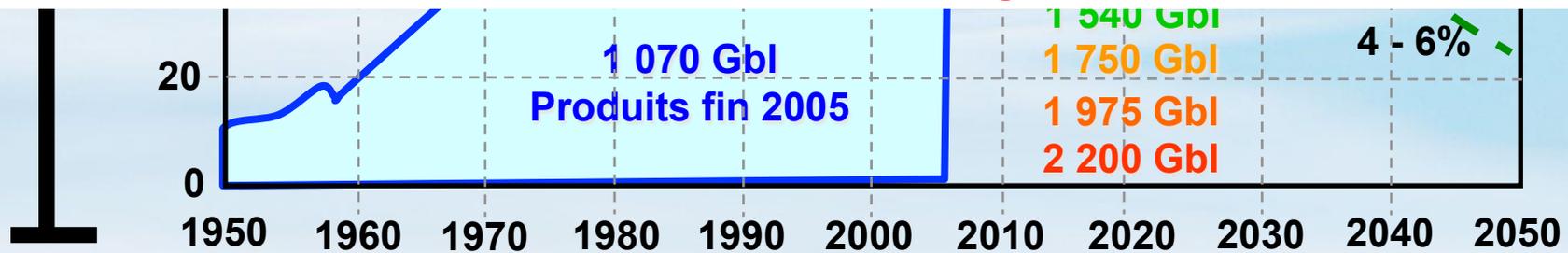
Probable: stabilisation de la production autour de 90 millions barils jours de 2010 à 2028

Possible: stabilisation de la production autour de 100 millions de barils de 2020 à 2030

Éventuel: pic de production autour de 105 millions barils jour en 2030 environ

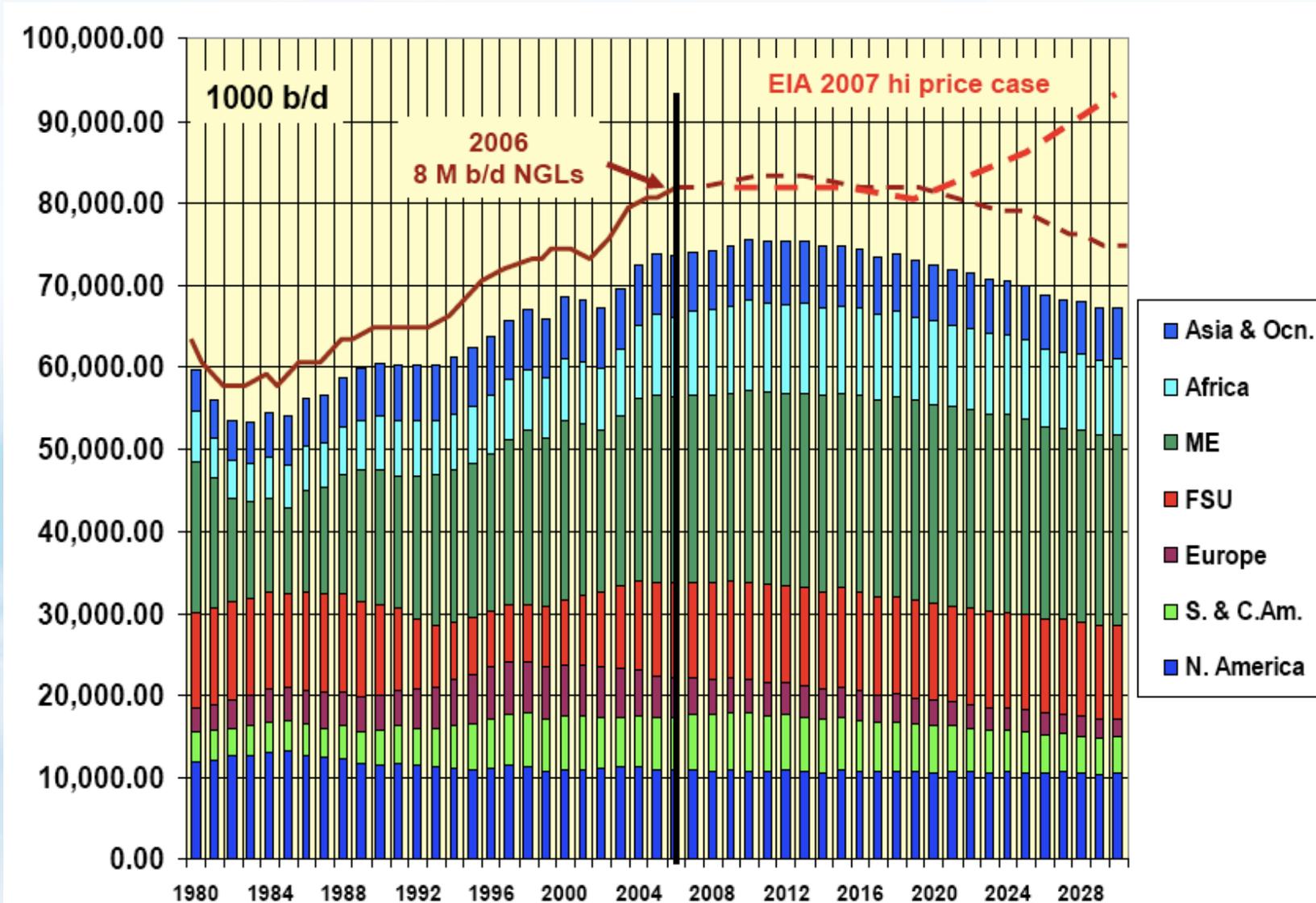


AIE : 120 millions de barils/jour en 2030 ????

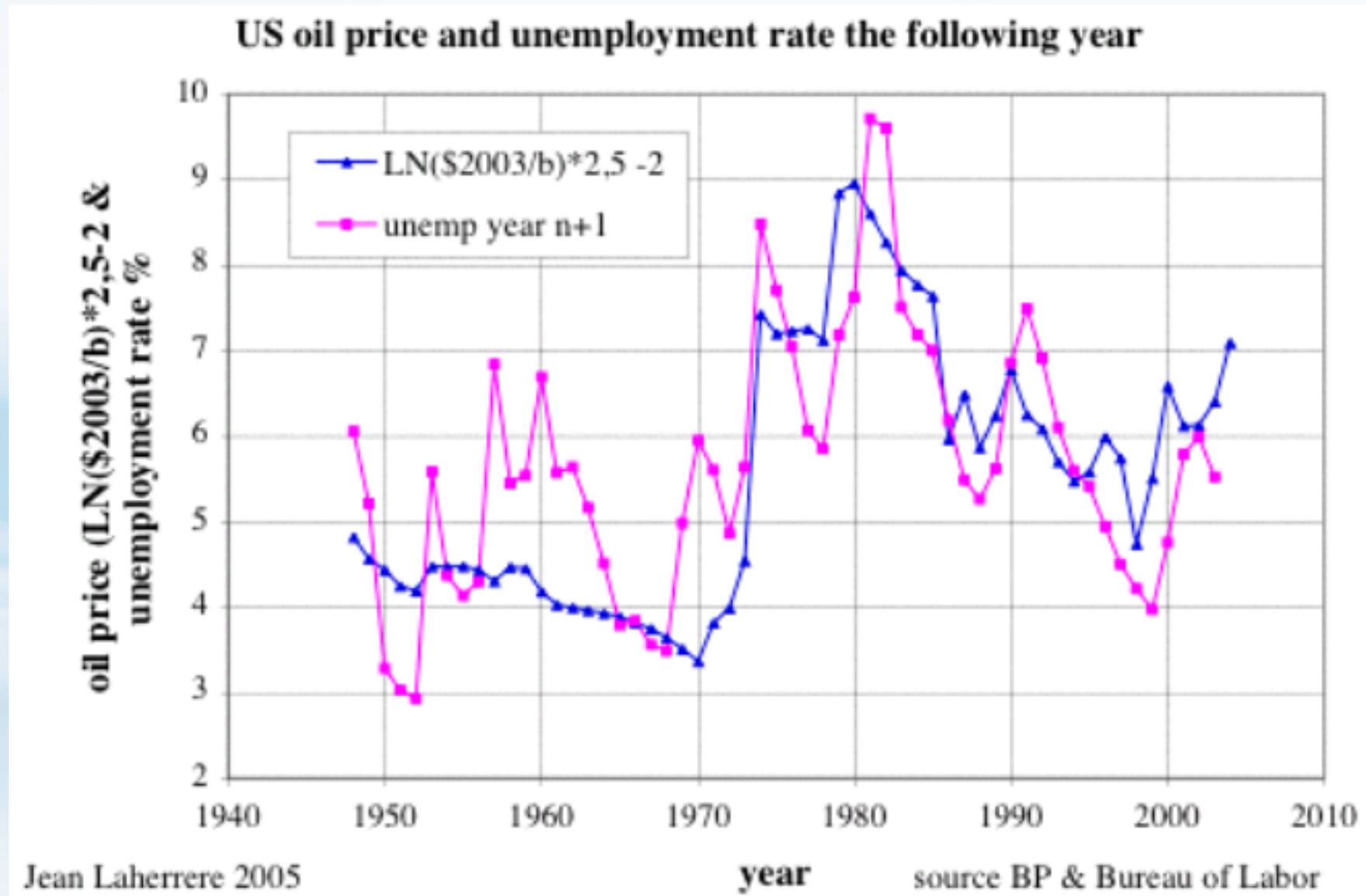


NB : 1070 Gbarils ≈ 140 Gt

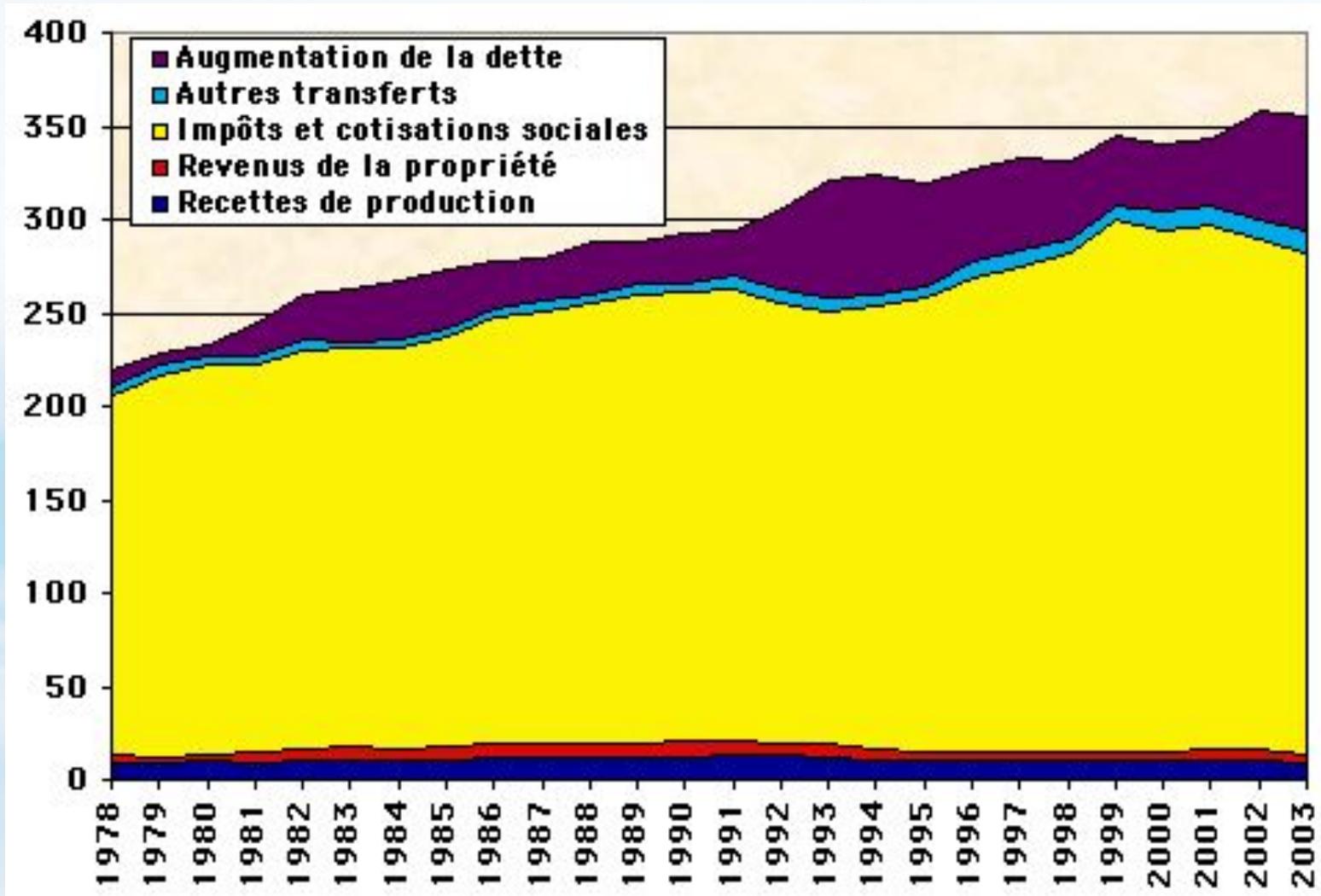
Le monde va passer son maximum, mais quand ?



Projection de la production pétrolière mondiale, discriminée par zone de production.
 Source : Dr. Sadad I. Al Hussein, Oil and Money Conference, October 30, 2007



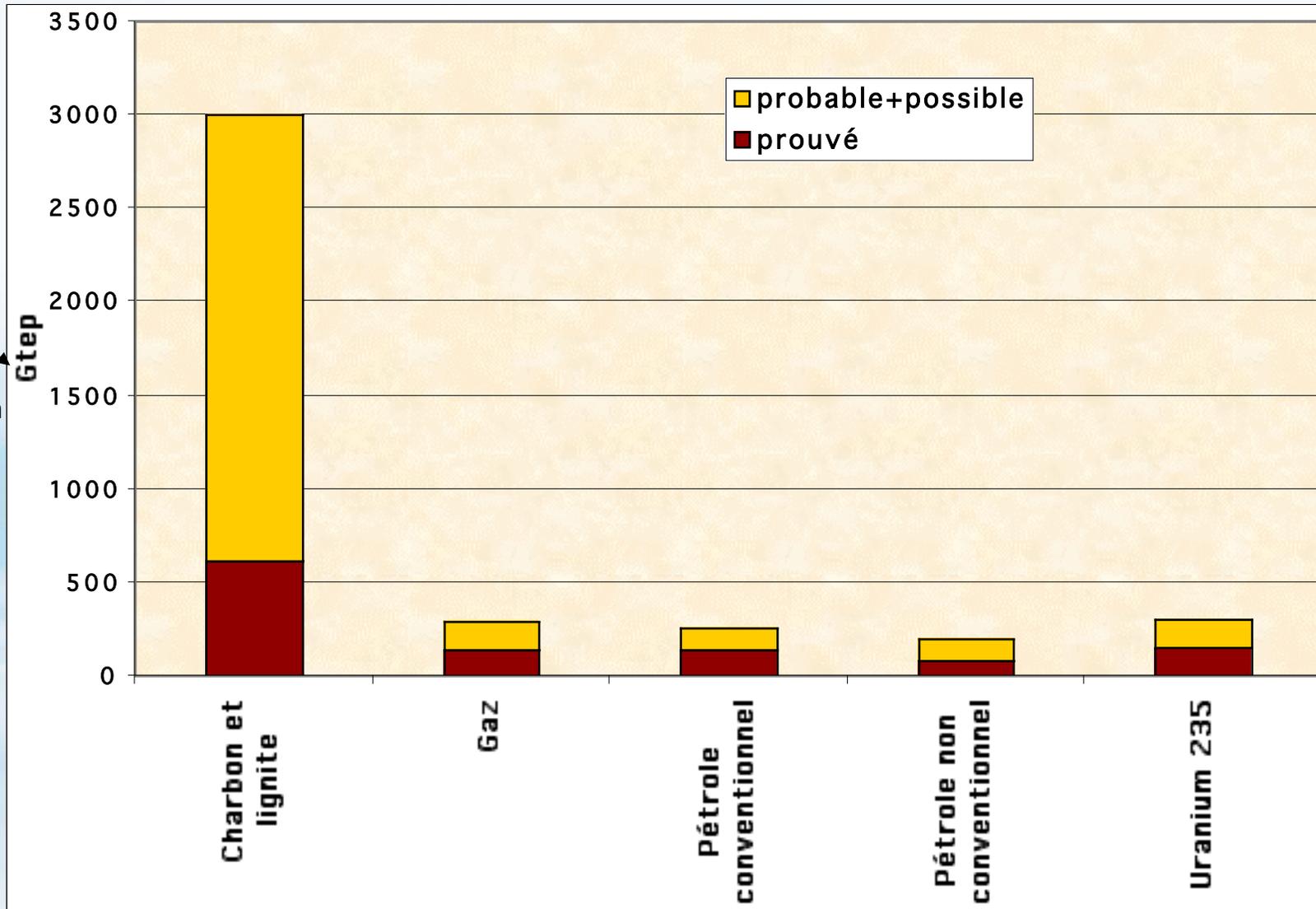
Corrélation aux US entre prix du pétrole année N, et chômage année N+1. Source Laherrere, 2005



Revenus de l'Etat depuis 1978 par nature de contribution : le recours à l'endettement date... du premier choc pétrolier, et augmente à chaque récession. Source INSEE/comptes de la Nation, 2004.

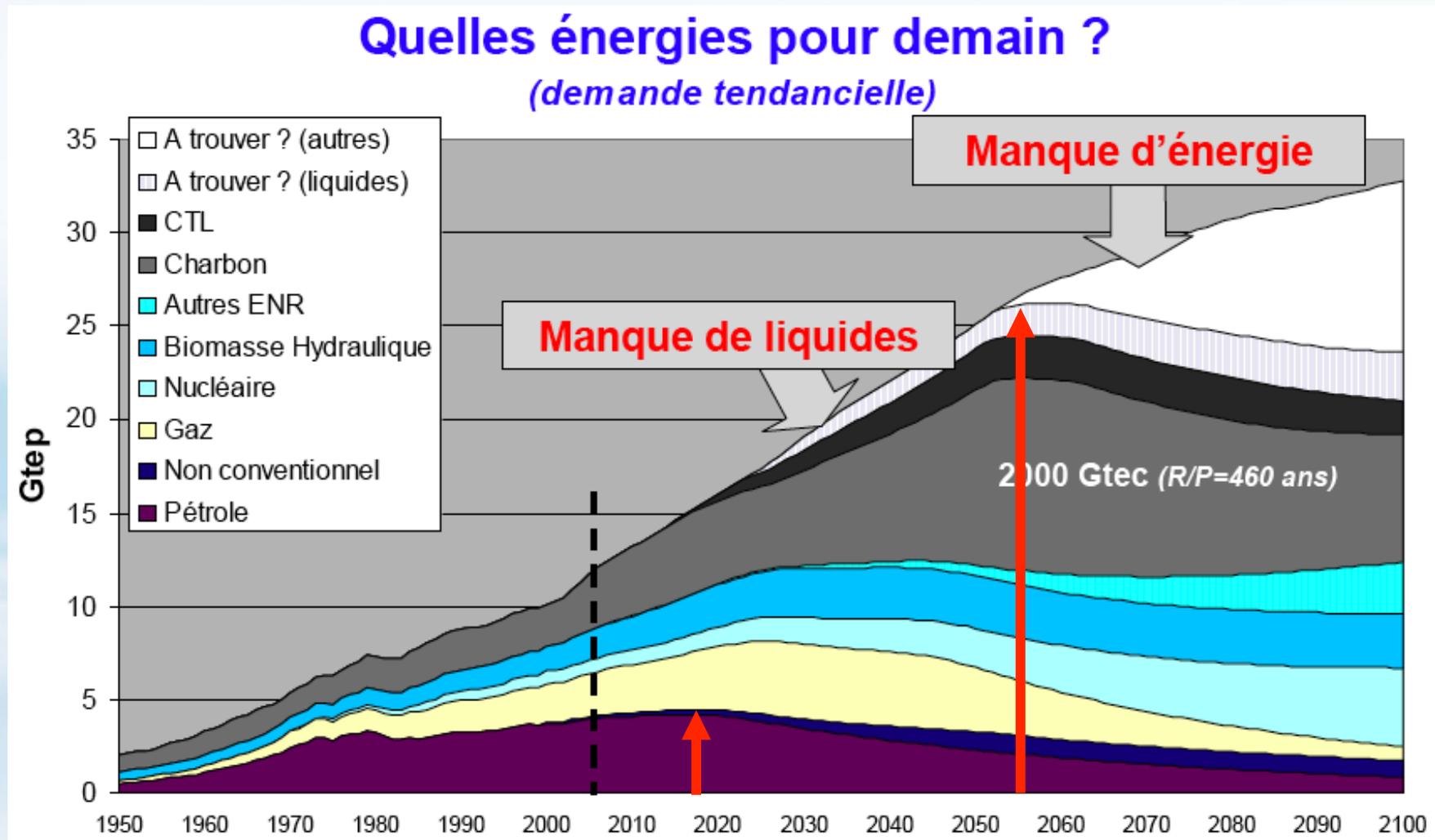
Le problème se complique un peu : il n'y a pas que le pétrole

1 Gtep = 1 milliard de tonnes équivalent pétrole. La consommation d'énergie annuelle de l'humanité en 2005 est d'environ 10 Gtep



Total des réserves prouvées : 800 Gtep, avec les supposées 4000 Gtep maximum.

Source IFP



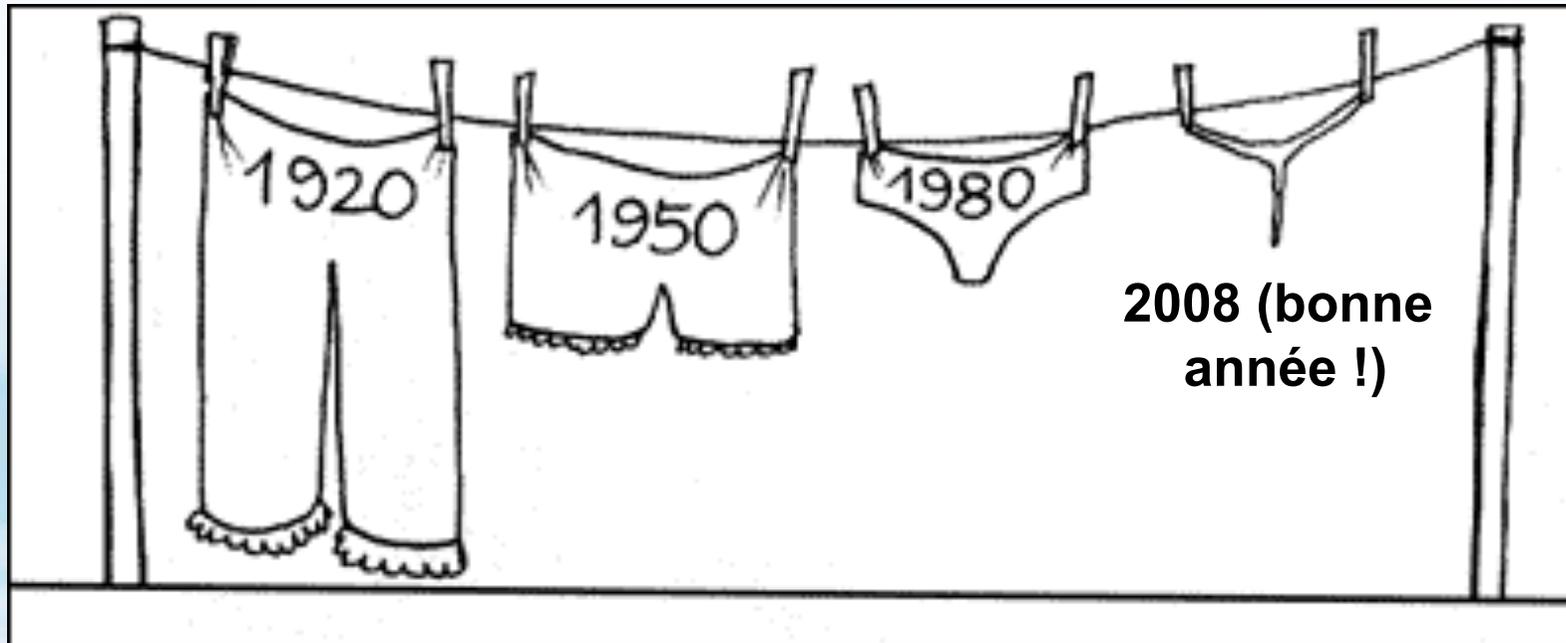
Source du graphique : Bernard Rogeaux, EDF, décembre 2007

Concentration atmosphérique en CO ₂ au moment de la stabilisation	Concentration atmosphérique tous gaz à effet de serre au moment de la stabilisation en CO ₂ -équivalent	Période de survenance du maximum des émissions de CO ₂	Augmentation de température globale à l'équilibre, par rapport à la température de 1850
350 à 400 ppm	445 à 490 ppm	2000 à 2015	2,0 à 2,4 °C
400 à 440 ppm	490 à 535 ppm	2000 à 2020	2,4 à 2,8 °C
440 à 485 ppm	535 à 590 ppm	2010 à 2030	2,8 à 3,2 °C
485 à 570 ppm	590 à 710 ppm	2020 à 2060	3,2 à 4,0 °C
570 à 660 ppm	710 à 855 ppm	2050 à 2080	4,0 à 4,9 °C
660 à 790 ppm	855 à 1130 ppm	2060 à 2090	4,9 à 6,1 °C

450 ppm de CO₂ à stabilisation : nous avons « encore droit » à 250 Gt de carbone, soit les réserves pétrolières et gazières et RIEN DE PLUS

Source IPCC, novembre 2007

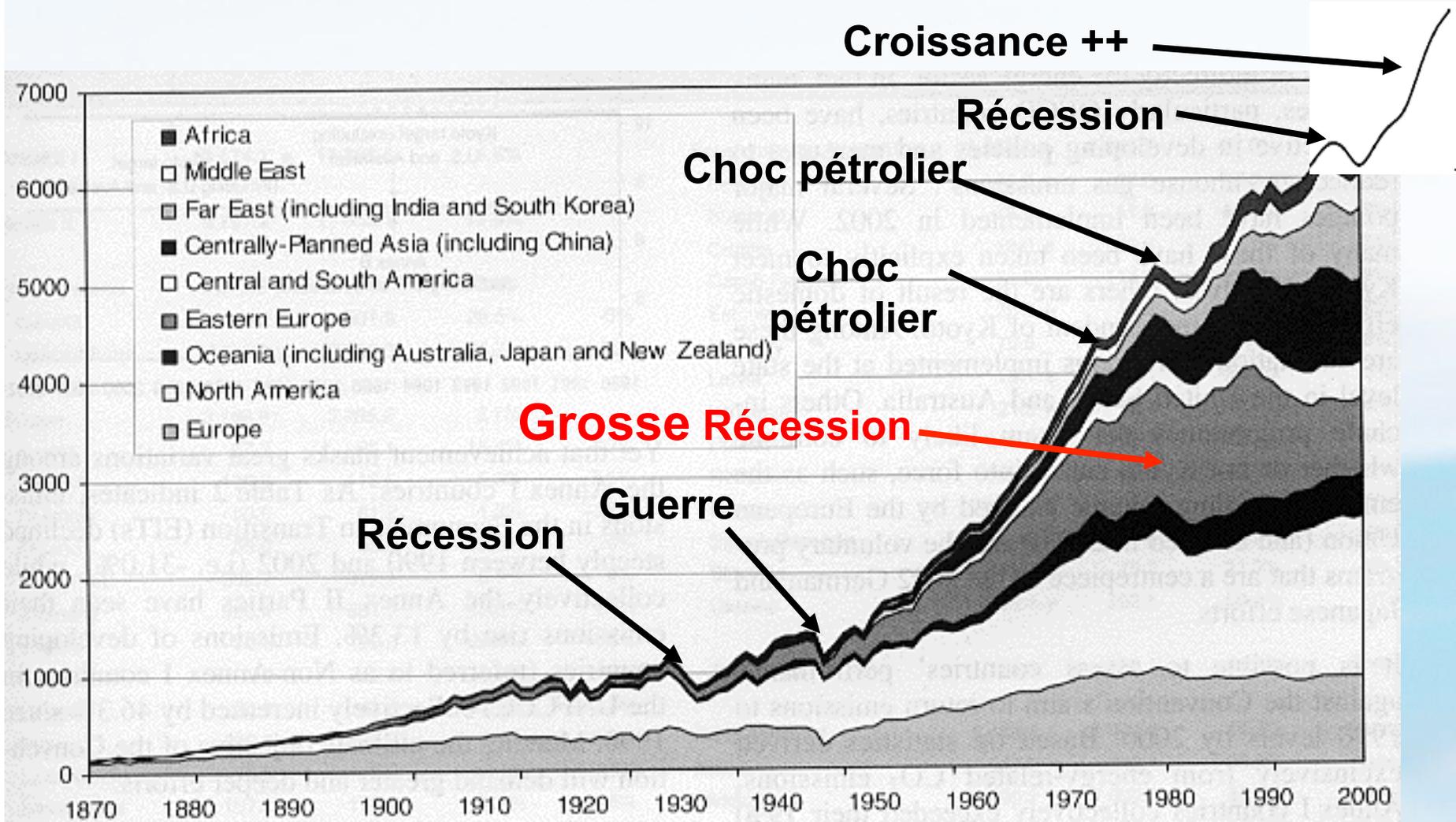
Il est évident qu' Allègre néglige des données d' observation irréfutables



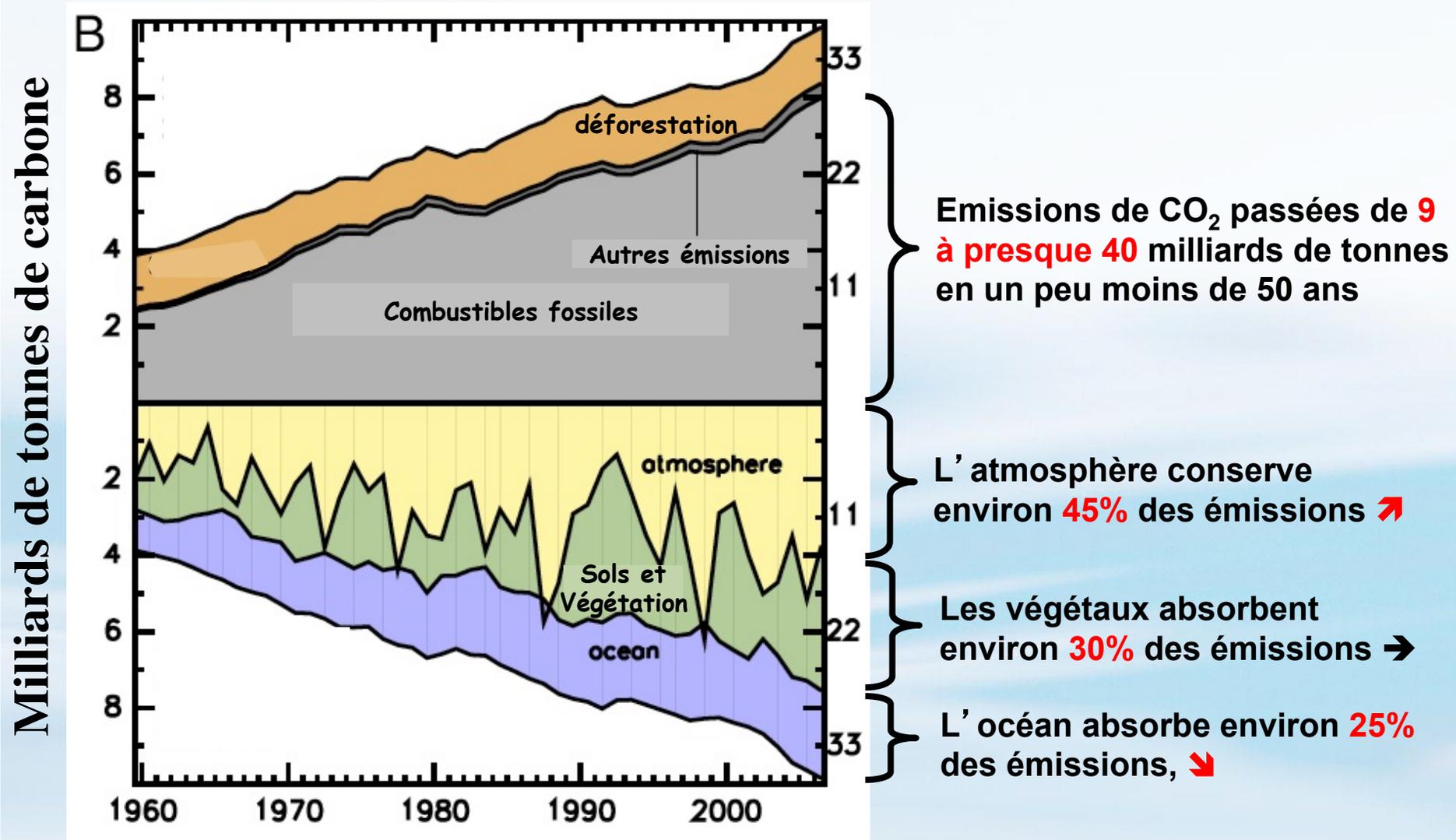
Effet du changement climatique sur les tenues vestimentaires depuis le début du 20^e siècle.

Source : Petit Bateau, Playtex, Aubade, Princesse Tam Tam

Les hommes : plus ça va (le PIB) et moins ça va (le CO₂)



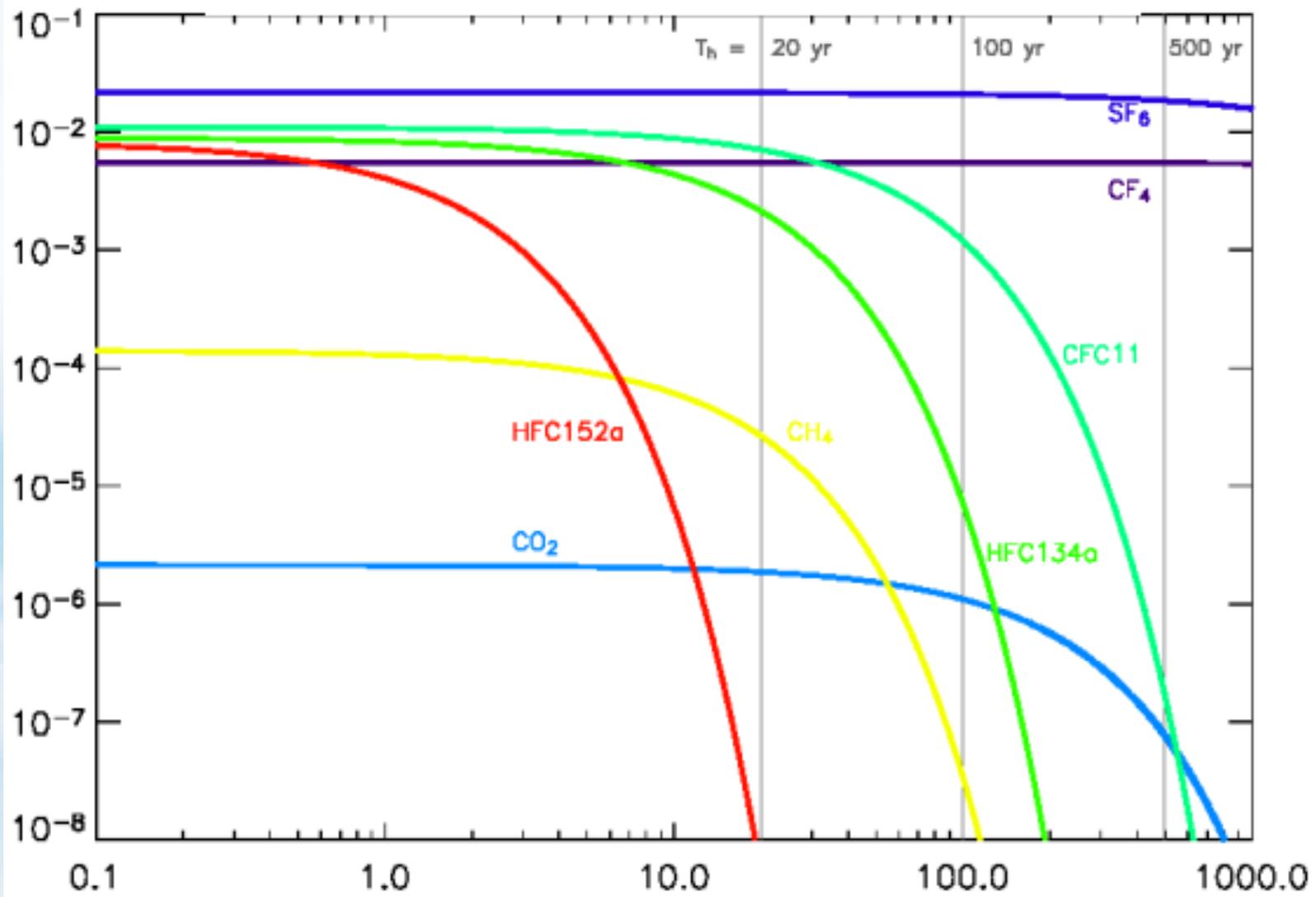
Les émissions de CO₂ provenant de combustibles fossiles ont été multipliées par plus de 4 depuis 1950, et surtout **il est impossible de « faire » de la croissance économique sans augmenter ces émissions**. AIE, 2004 + IPCC, 2007



Evolution des émissions de CO₂ depuis 1960 (en haut), et accroissement du stock de carbone de chaque compartiment de la planète sur la même période (en bas).

Source : Canadell et al, Proceedings of the National Academy Of Science (US), 2007.

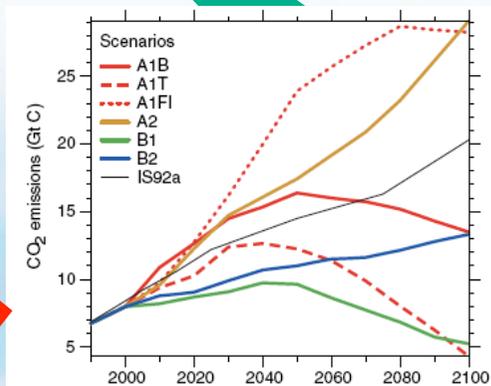
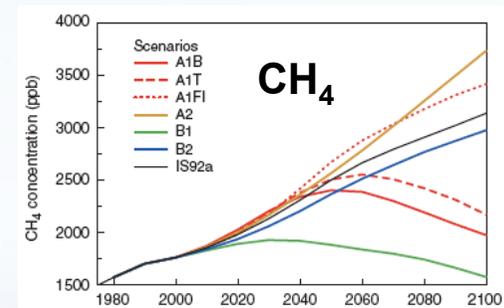
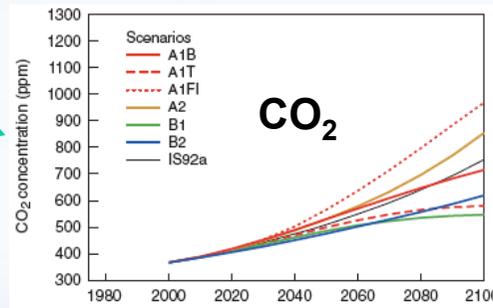
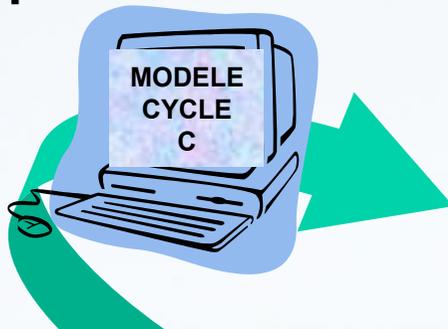
Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air... et y rester



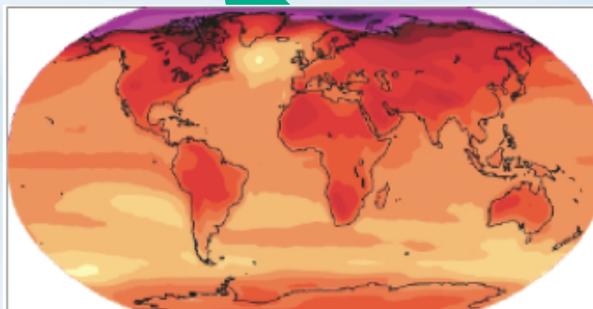
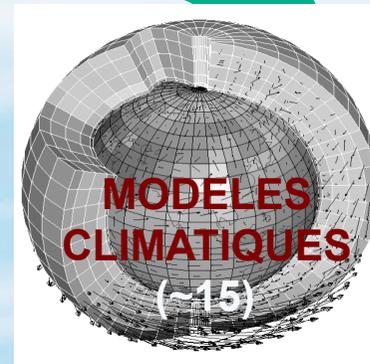
Effet résiduel (axe vertical, en watts/m^2) au cours du temps (axe horizontal, en années) d'une tonne de gaz émise à l'instant 0 (attention ! échelles logarithmiques). D. Hauglustaine, LSCE.

La simulation climatique, aussi fiable qu'un pronostic boursier ?

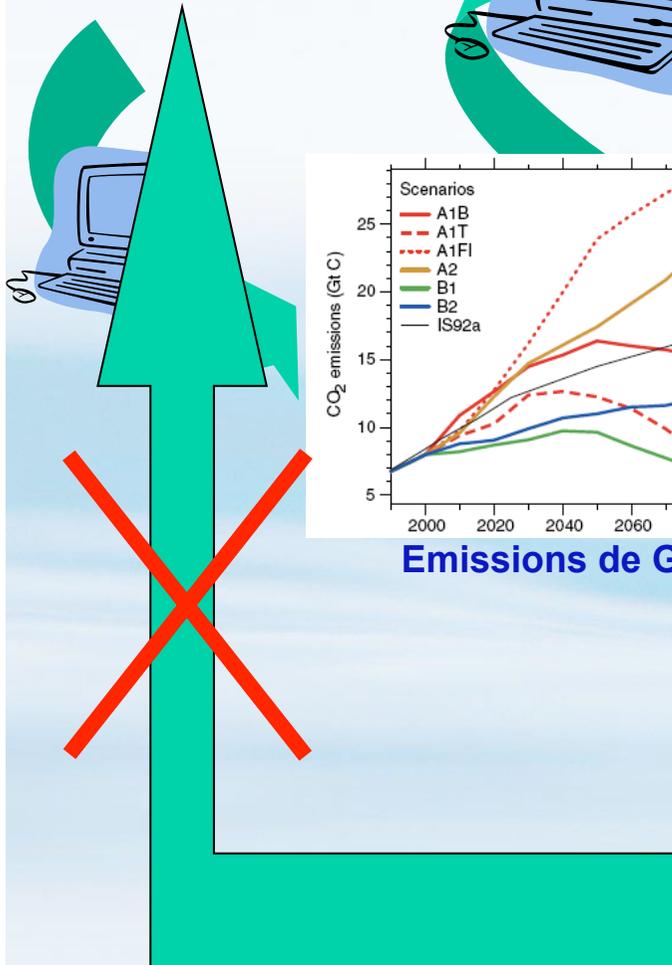
**HYPOTHESES
ECONOMIQUES ET
DEMOGRAPHIQUES**

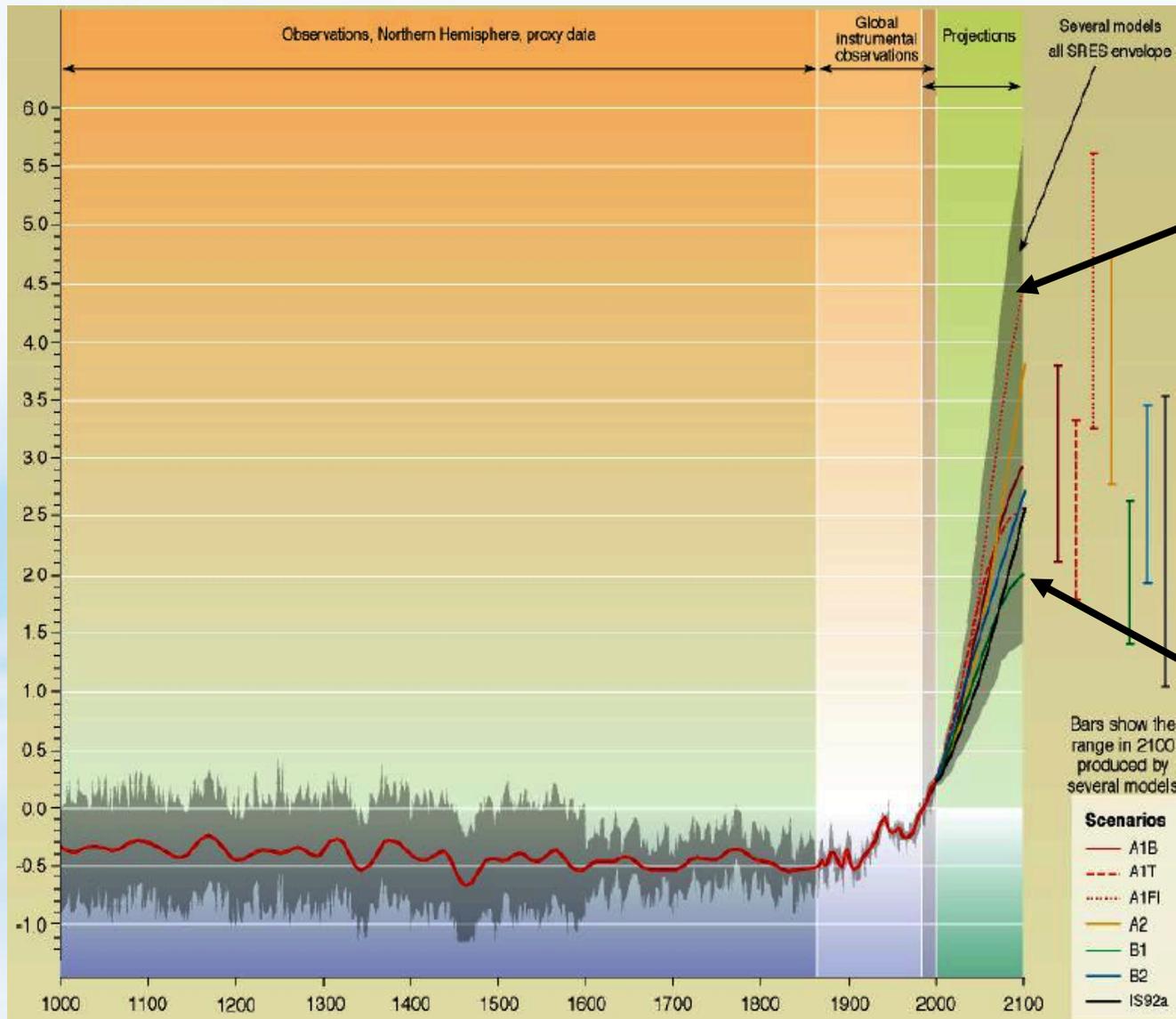


Concentration en GES



Climat Futur





10 milliards de terriens évoluent vers les émissions d'un Polonais de l'an 2000

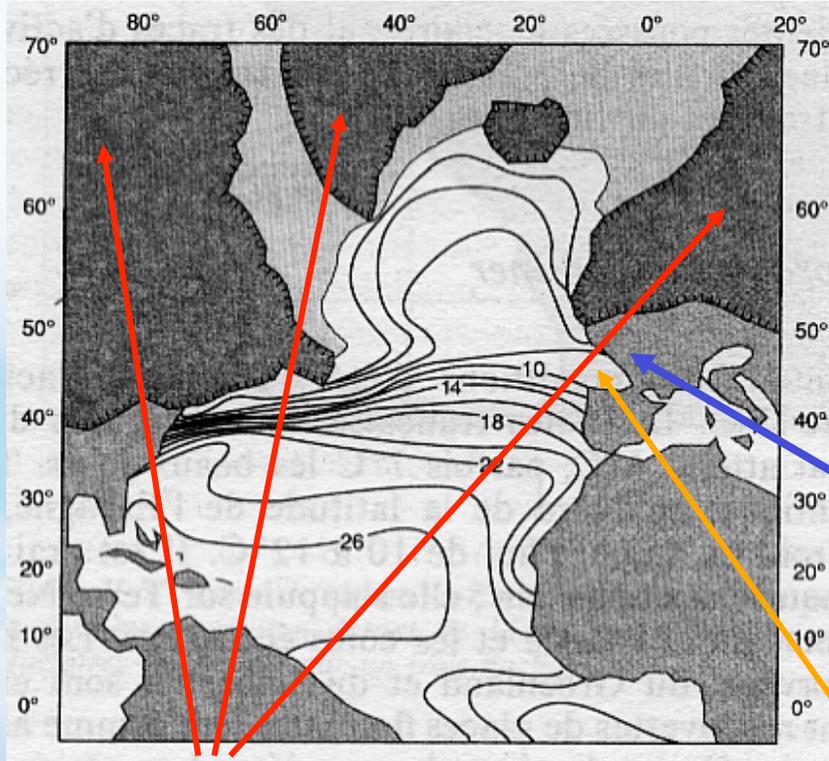
Les émissions mondiales restent constantes

Évolution de la température moyenne de l'air au niveau du sol, selon les scénarii, et mise en perspective avec le passé. Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

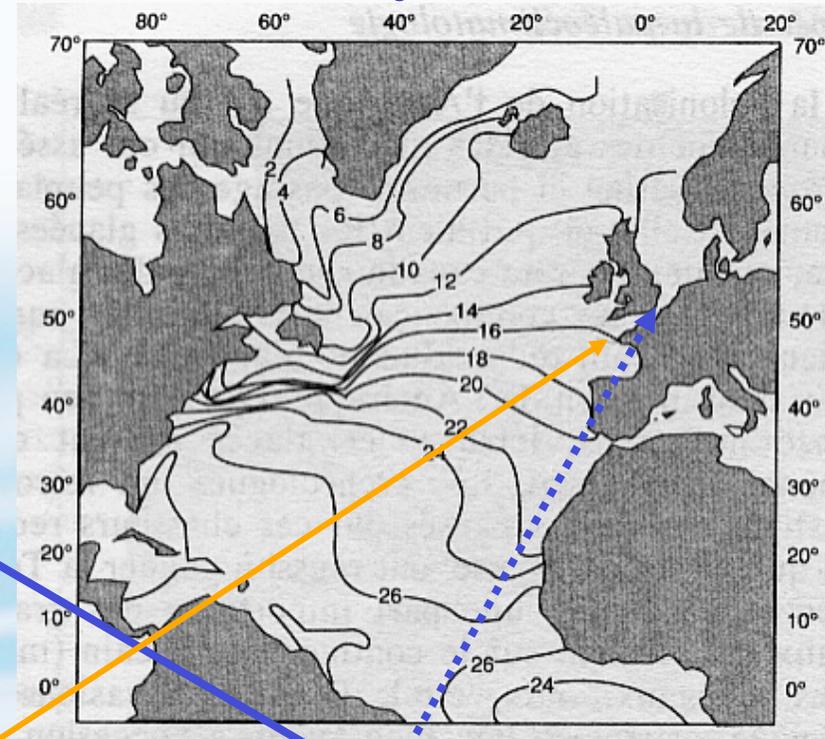
Quelques degrés en plus, c' est un **changement d' ère climatique**

Depuis le dernier maximum glaciaire, **la moyenne planétaire n' a augmenté «que» de 5°C**, mais notre planète a considérablement changé.

Il y a 20.000 ans



Aujourd' hui



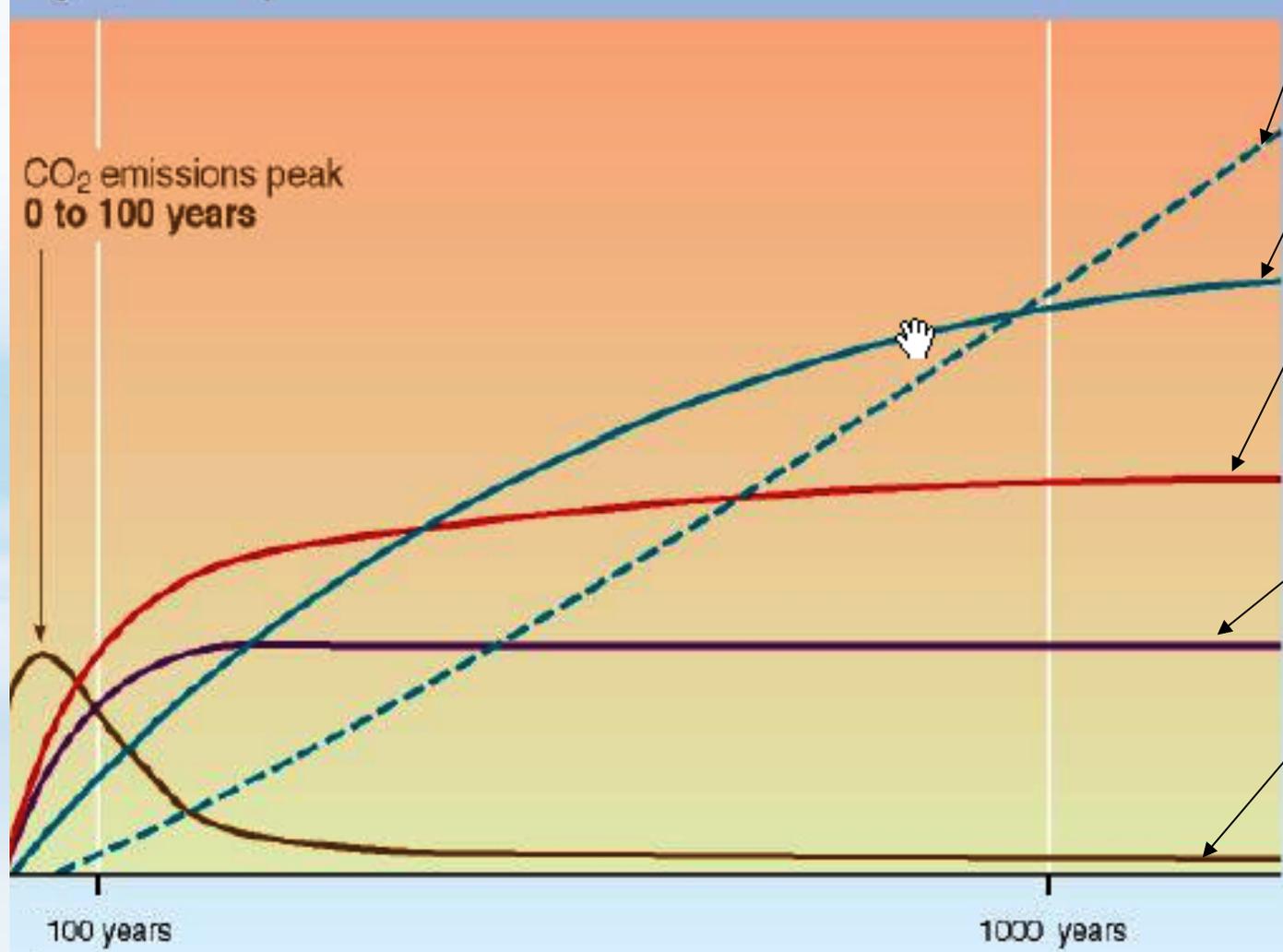
Période glaciaire : d' immenses glaciers, épais de plusieurs km, recouvrent l' Amérique et l' Europe du nord. Le sol de la France est gelé en permanence, et inapte aux cultures

Période glaciaire : la température de l' Europe est plus basse de 8 à 10 °C mais celle des tropiques a peu varié

Période glaciaire : on passe à pied sec de France en Angleterre : la mer est plus basse de 120 mètres !

-> Quelques degrés de plus en 100 ans, ce sera(it) un choc massif et ingérable

Magnitude of response



Fonte des glaces
(y compris
calottes)

Dilatation de
l'eau de
surface des
océans

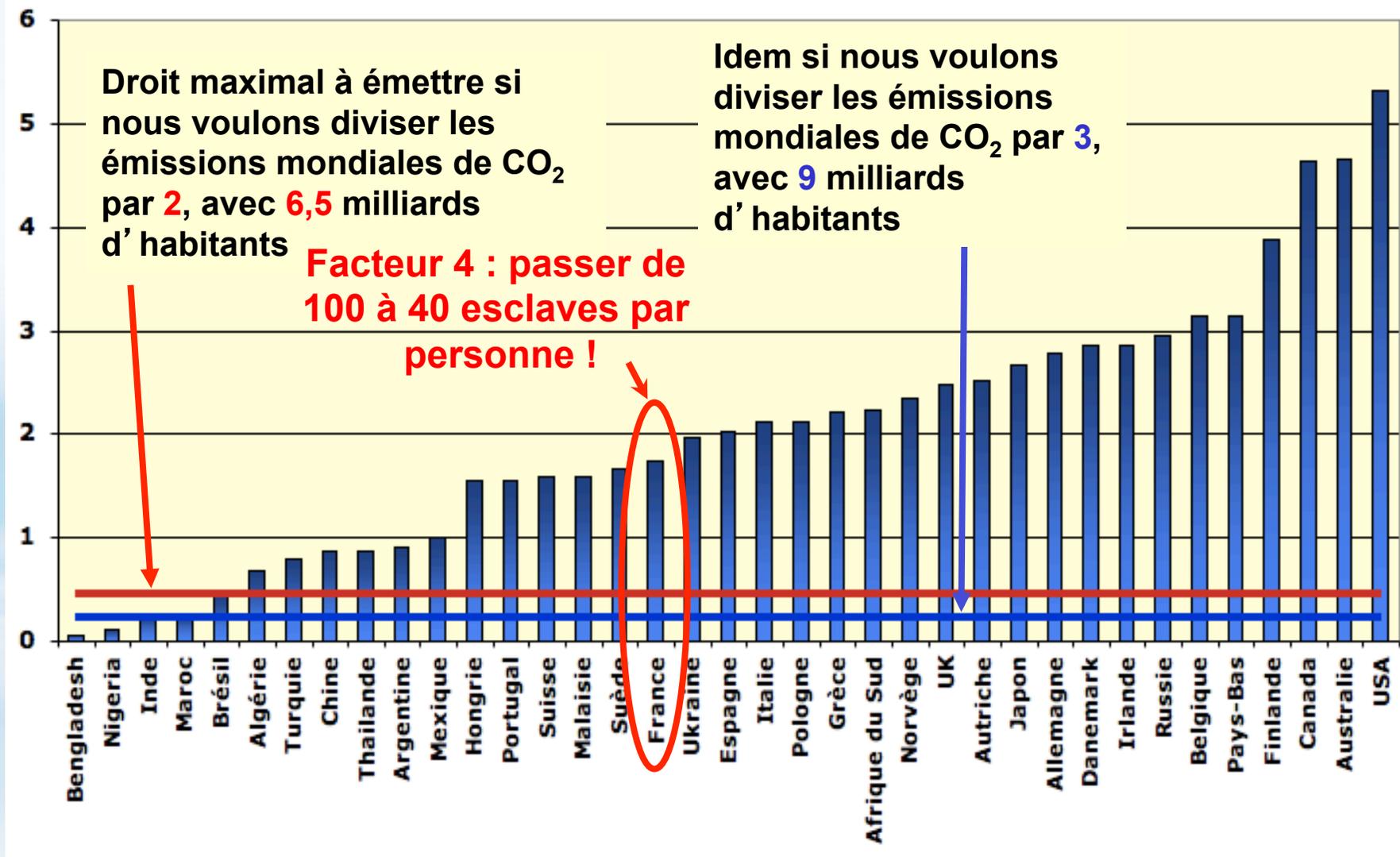
Évolution de la
température
moyenne

Évolution de la
concentration en
CO₂

Hypothèse :
évolution des
émissions de
CO₂

Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Où est le développement durable ?



Émissions de CO₂ par habitant en 2003 et « droits maximaux à émettre sans perturber le climat ». Source UNFCCC pour les émissions par habitant.

En l'état actuel des technologies, **l'une des choses suivantes** suffit à atteindre le « droit maximal à émettre sur une année » :

faire un AR Paris-NY en avion,

ou consommer 3.700 kWh d'électricité en Grande Bretagne ou 3.200 kWh en Allemagne, mais 24.000 kWh en France (consommation annuelle moyenne par Français : environ 8000 kWh),

ou acheter 50 à 500 kg de produits manufacturés,

ou produire 2 tonnes de ciment (une maison moderne de 100 m² en nécessite environ 10),

ou brûler 7.200 kWh de gaz naturel, en tenant compte des émissions amont (quelques mois de chauffage d'un logement).

ou parcourir 5.000 à 6.000 km en 6CV en zone urbaine (2 fois moins en 4x4)

Source : Jancovici, 2007

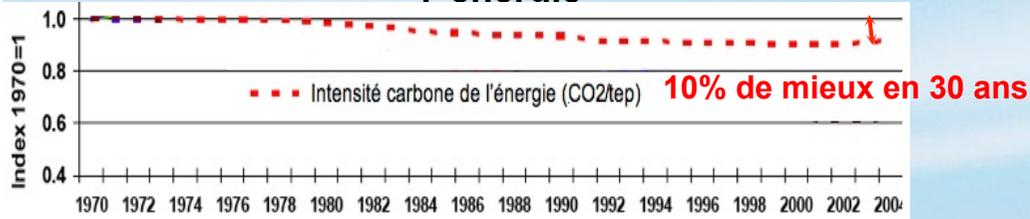
L' équation de Kaya :

$$GES = \frac{GES}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

A diviser par 2... et le sera !

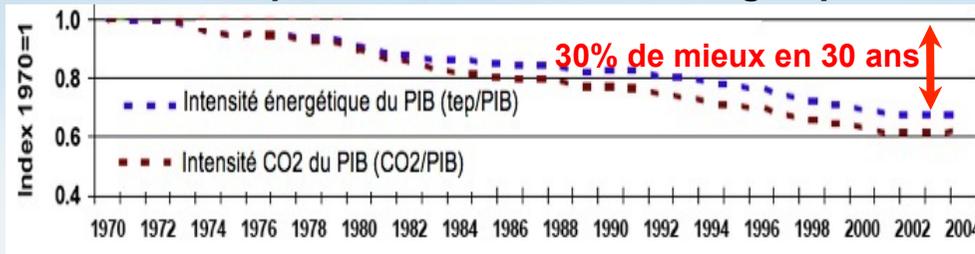
Emissions de gaz carbonique = Contenu en gaz carbonique de l'énergie * Intensité énergétique de l'économie * Production par personne * Population

« La technique » N°2 : l'efficacité carbone de l'énergie

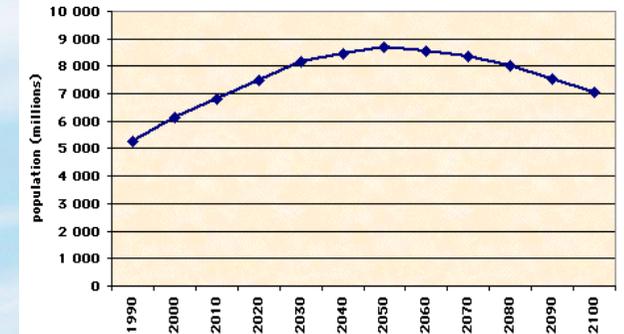


Il faut gagner 75% en 45 ans, en doublant l'approvisionnement énergétique !

« La technique » N°1 : l'efficacité énergétique

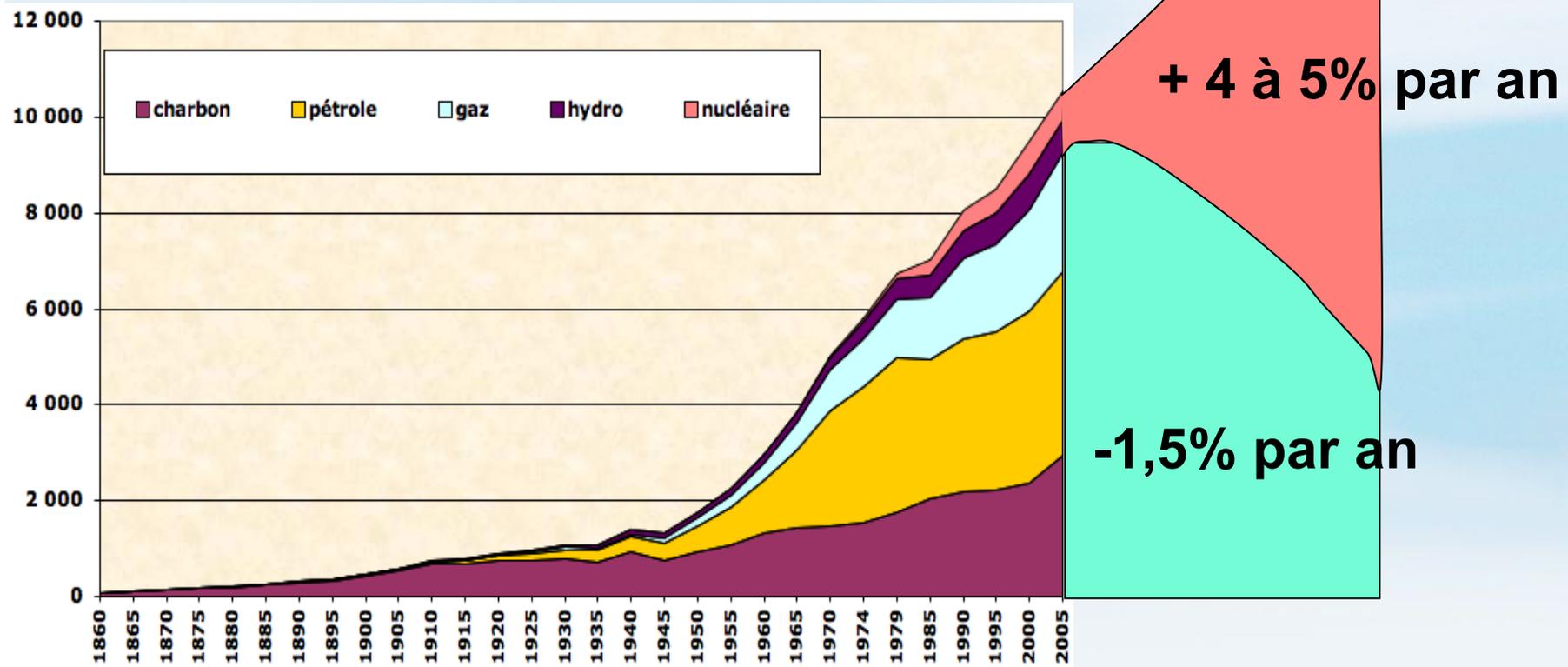


Gain de 50% en 50 ans ?

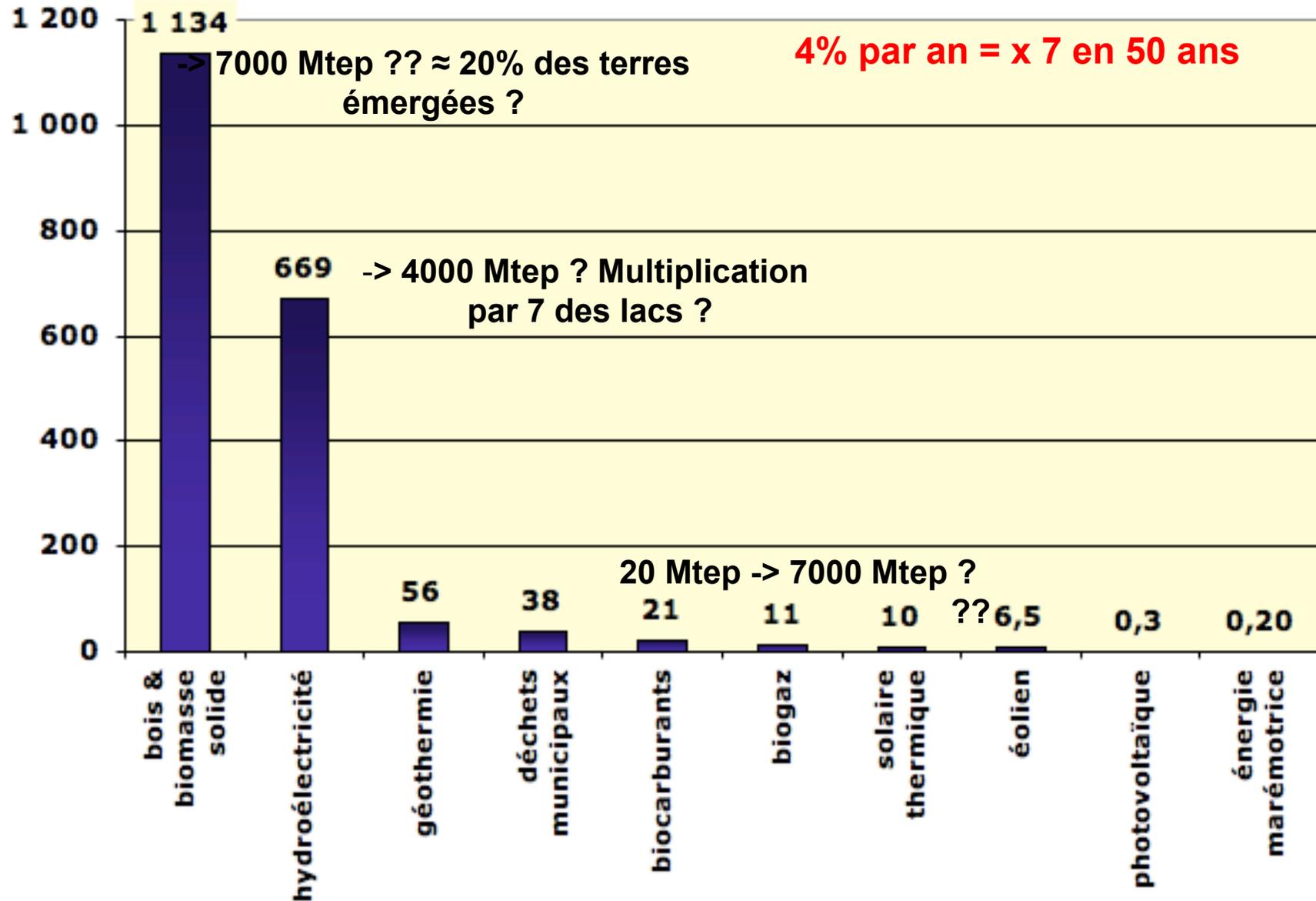


+ 50% d'ici 2050 ?

2% de croissance par an = x 2,7 en 50 ans ; 4% par an c'est x 7 en 50 ans !!!



Peut-on utiliser des énergies renouvelables ?



Contribution des énergies renouvelables au bilan énergétique mondial en 2005

Quelques éléments de réflexion :

L'accident de Tchernobyl, selon l'OMS, fera de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de décès prématurés **en 40 ans** (le tabac, l'alcool, la voiture ou la « malbouffe » : environ un million chacun par an),

Les déchets nucléaires, en France, c'est 200 tonnes de matières par an qui sont à peu près aussi dangereuses que des phytosanitaires très agressifs

Les réserves d'uranium accessibles si on y met le prix sont importantes (et en U238 ne constituent plus une limite)

Mais... 4% de croissance sur 45 ans, c'est **2.500 réacteurs nucléaires en 2050** (400 aujourd'hui), 5.000 si 50% de pertes après production de l'électricité (stockage, conversion en H₂, etc), **10.000** si peu de contribution des renouvelables.

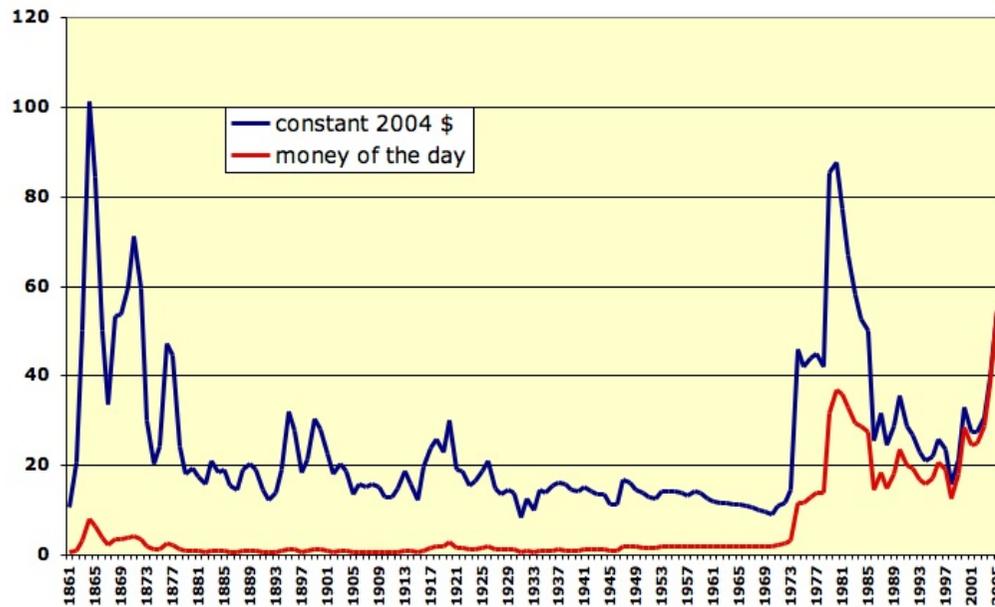
Y aura-t-il les capitaux ? (2.500 réacteurs ≈ 5.000 G\$, ≈ 15% du PIB mondial 2000)

Y aura-t-il les compétences ?

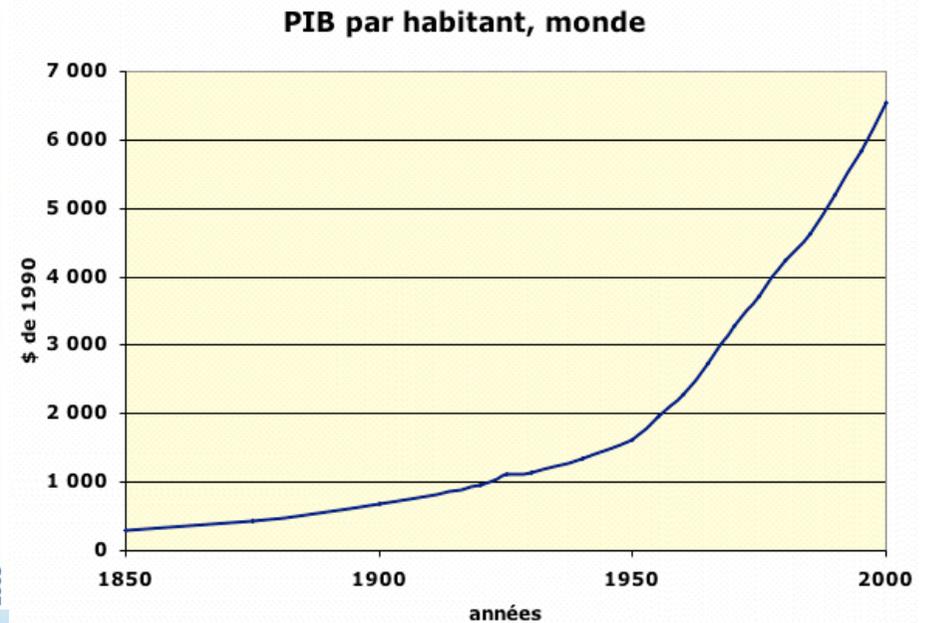
Y aura-t-il la volonté en démocratie, avec 20 ans de préavis ?

Y aura-t-il les emplacements ? Etc etc

La contribution du nucléaire à « la » solution : encore et toujours une question d'ordre de grandeur... et une évolution qui n'arrivera pas « toute seule »



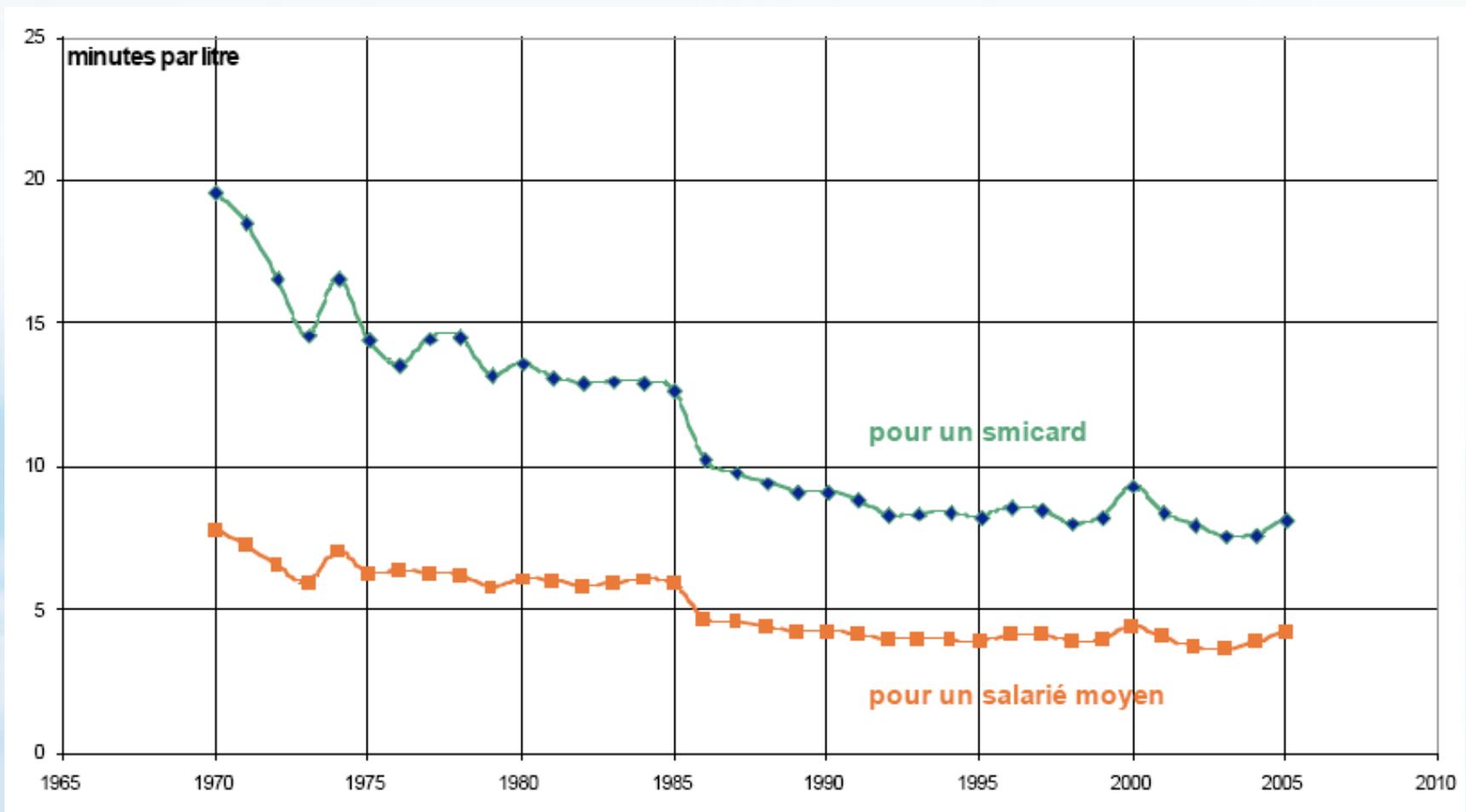
Prix du baril depuis 1861 en \$ courants et en \$ de 2004. Source BP Statistical Review, 2007



Reconstruction du PIB par habitant depuis 1850 (le PIB est une notion qui date de la fin de la Seconde Guerre Mondiale)

Source : J. Bradford DeLong, 2005

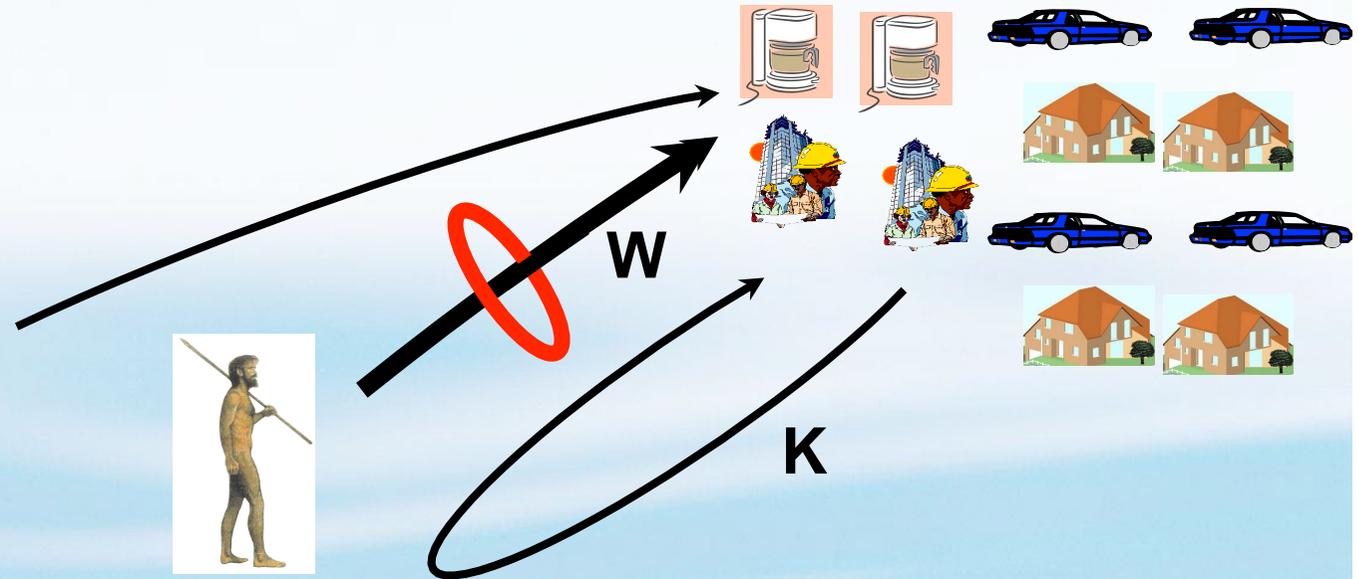
En 100 ans, le prix relatif de l'énergie - donc du carbone - a été divisé par 10 environ en Occident, et le prix d'un service énergétique par 20 à 30 -> l'énergie est devenu quasi-invisible dans la formation des prix



**Prix du carburant exprimé en minutes de temps de travail par litre (prix rapporté au pouvoir d'achat) : rouler coûte 2 à 3 fois moins cher aujourd'hui qu'en 1970.
Source FNAUT, 2007**

Le PIB, pas mieux qu'une masse salariale

Stocks naturels
non
renouvelables



~~Nous avons tous appris $P = F(K, W)$. Les ressources naturelles ne sont pas dans la formation des prix : seuls y figurent le coût du travail humain, et le consentement - humain - à se défaire de sa propriété~~

En fait $P = F(K, W, R)$. Il faut « corriger » les prix de :

- la « dotation aux amortissements » pour diminution des stocks de toute sorte, et notamment d'hydrocarbures
- la « provision pour risques » pour changement climatique futur (**Rapport Stern**)

Tant que le carbone ne sera pas dans la formation des prix, l'économie ne permettra pas de voir venir « toute seule » les risques présentés plus haut... et la solution arrivera quand même, mais subie et non choisie

**Consommation
en énergies
fossiles**

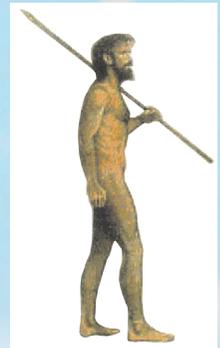


**Période
sans énergies fossiles**

**100 esclaves / habitant
(J.M Jancovici 2005)**



Merci à Yves Mathieu ! (IFP)



**Période
sans énergies fossiles**