

Grenelle de l'Environnement

Groupes de suivi du parlement



QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (LZW)
sont requis pour visionner cette image.

Une trop brève introduction à la question climat-énergie
Jean-Marc Jancovici - 9 octobre 2007

Un peu de littérature pour commencer...

« Vous aviez le choix entre le déshonneur et la guerre ; vous avez choisi le déshonneur, et vous aurez la guerre. »

Winston Churchill à Chamberlain en 1938, à propos des Accords de Munich.

« Le déshonneur » (la facilité) :

Nier le problème (de préférence en faisant crédit à des personnes sans compétences sur le sujet)

Penser que le journal offre une base d'informations suffisantes pour l'arbitrer

Le sous-traiter à des Verts quelconques en considérant qu'il est détachable du reste

Refuser les bons signaux économiques au nom de la défense d'un pouvoir d'achat matériel déjà considérable

« La guerre » (l'effort) : payer l'énergie de plus en plus cher

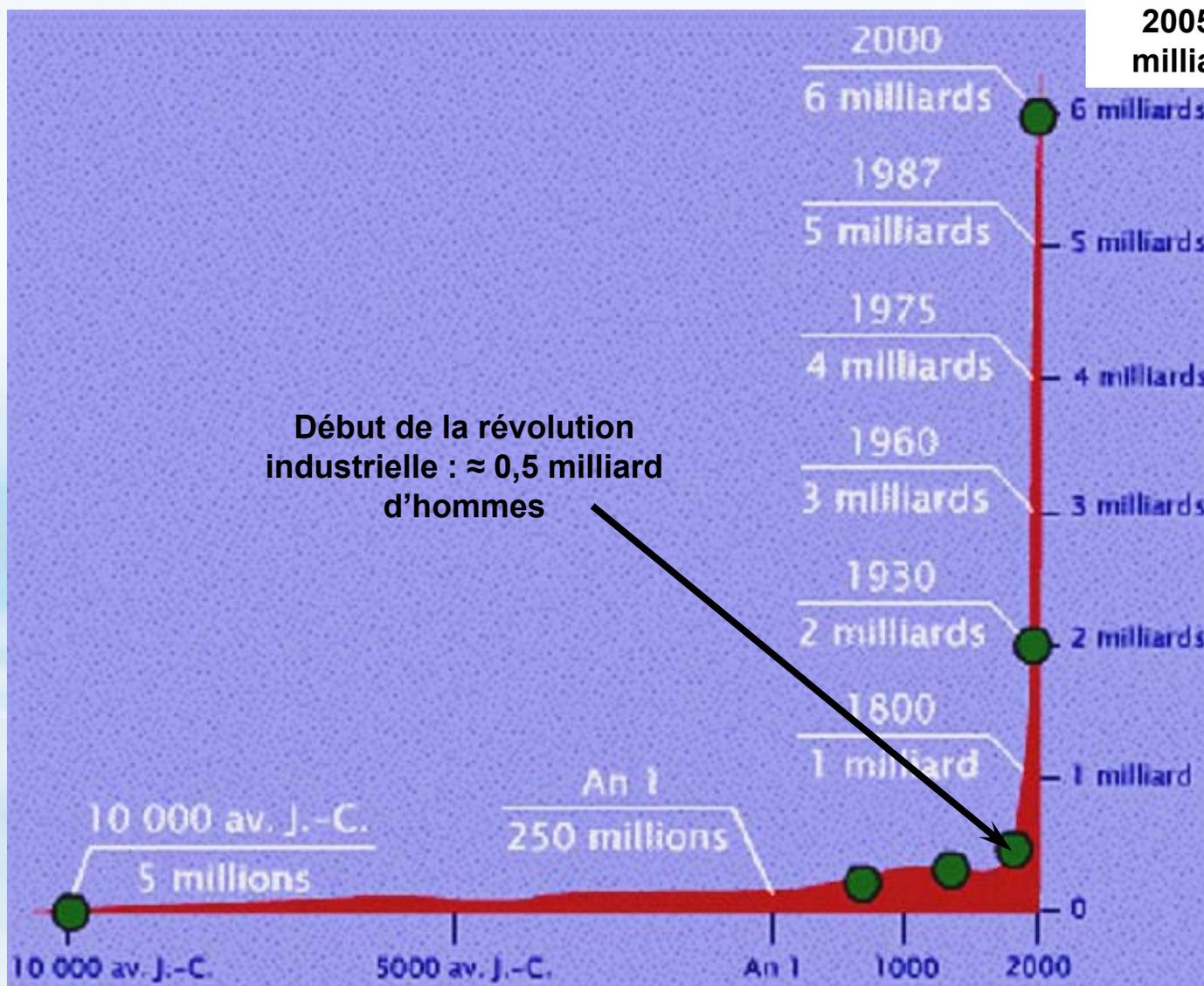
La « facilité » nous évitera-t-elle « la guerre », ou est-ce simplement un moyen d'augmenter la facture future... ?

En sortie du Grenelle, aurons-nous un Churchill ou un Chamberlain ?

De *Sapiens* à *Industrialis* : c'est pareil, sauf le nombre de zéro

- 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 varie depuis 4 milliards d'années, 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 certes multimillénaire, et certes pas toujours vérifiable à ce jour (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 » !

Un premier changement d'ordre de grandeur : la population



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

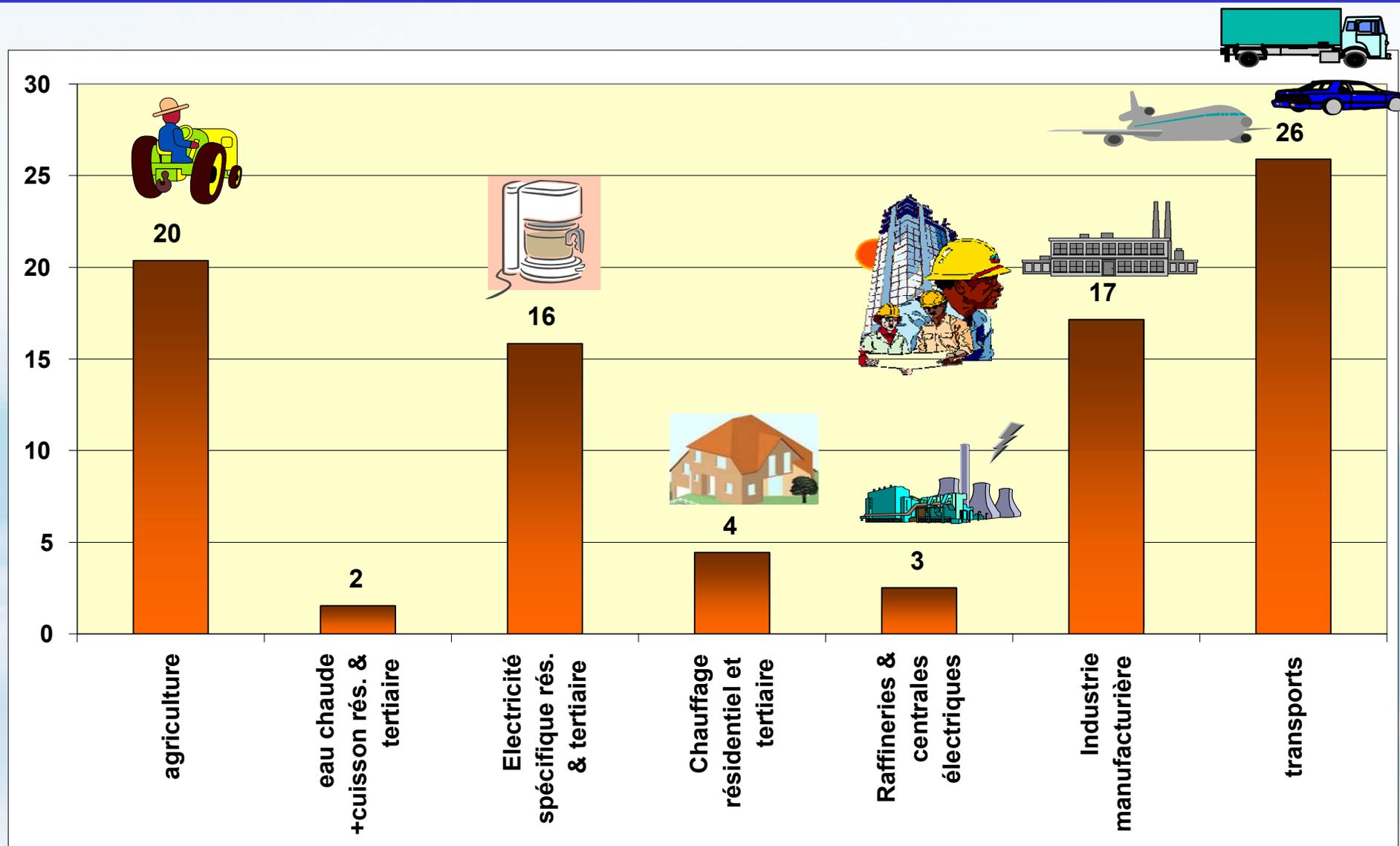
Un deuxième changement d'ordre de grandeur : énergie



Conso. d'énergie primaire hors biomasse en tep par habitant. Une tep \approx 42 GJ \approx 11.600 kWh.
L'énergie, en physique, c'est ce qui caractérise un changement d'état : **par définition, plus l'homme consomme d'énergie, plus il modifie l'environnement !**

Compilation de l'auteur (Sources diverses)

Nietzsche voulait des surhommes : nous voici...



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

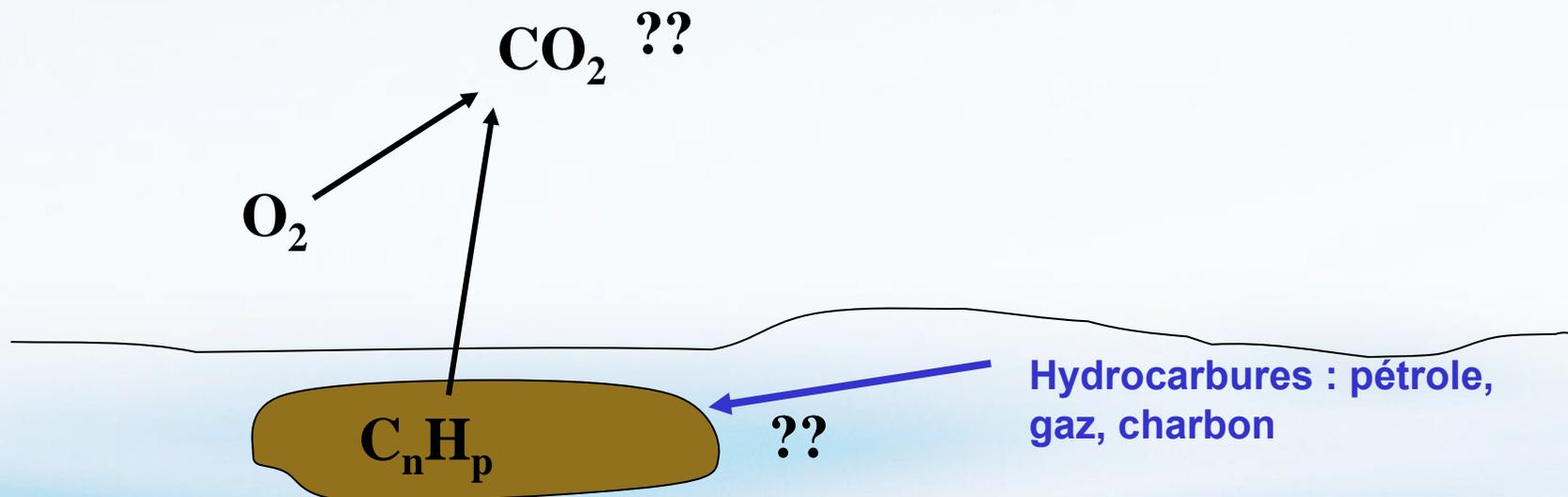
Calcul de l'auteur, 2005

Population x 1000 + énergie x 10 = un sacré changement !



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

La civilisation industrielle, c'est presque aussi simple que cela...



Combien de temps pouvons nous 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**

Du passé vers quel futur ?

**Consommation
en énergies
fossiles**



**Période
sans énergies fossiles**

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



**1850–2150
Période
avec énergies
fossiles**

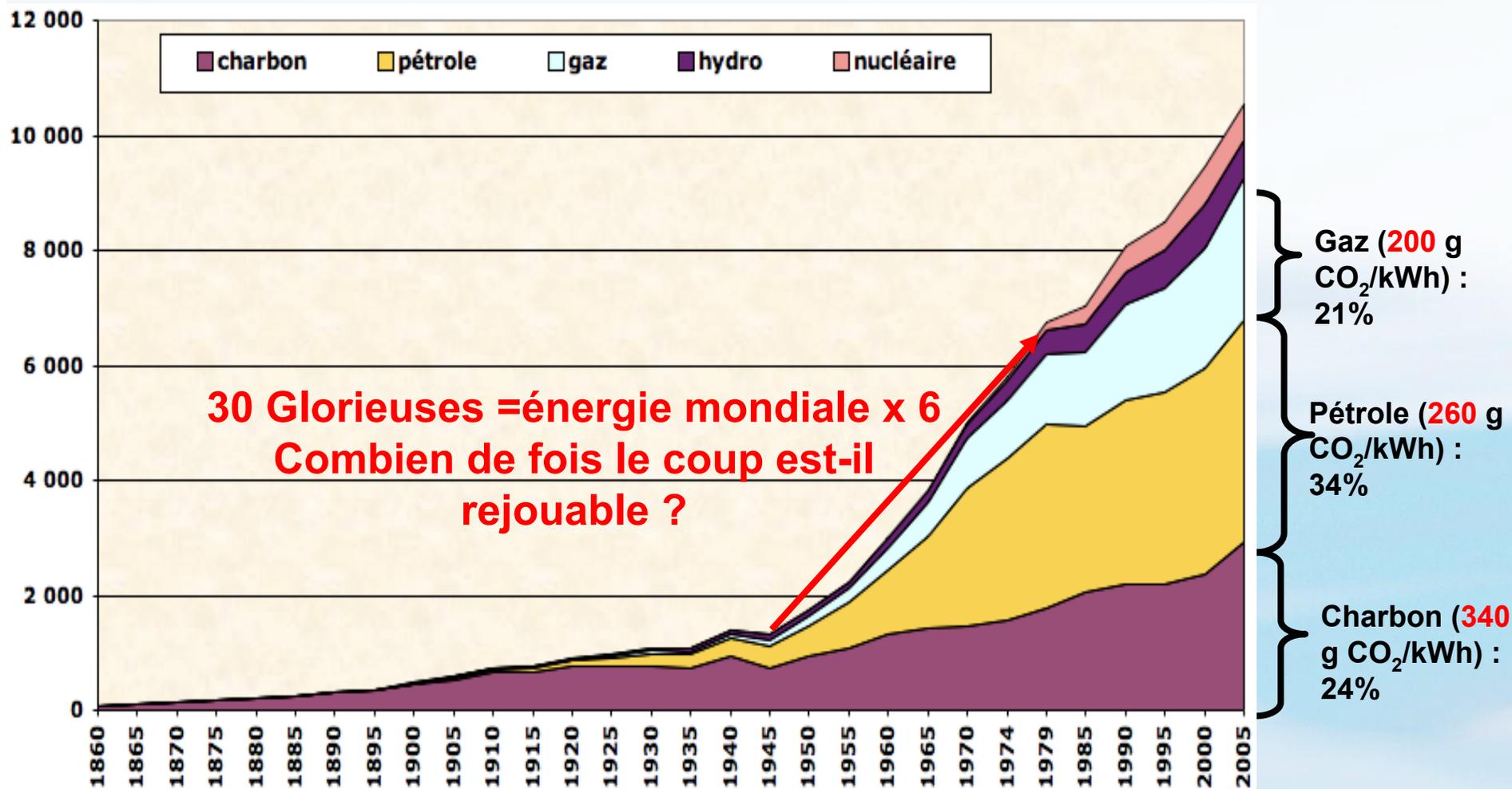
© Yves Mathieu (IFP)



**Période
sans énergies fossiles**

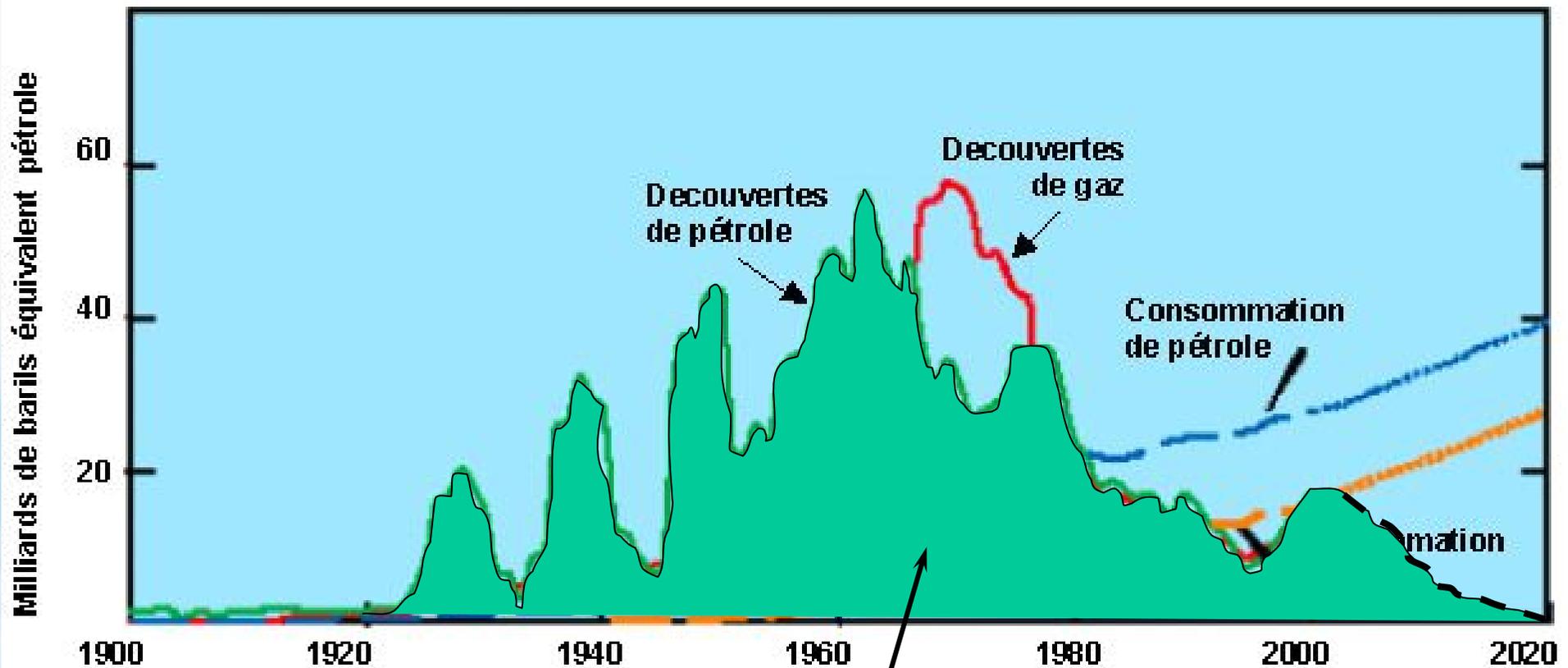


Energie x 10 en 60 ans, mais 85% issue de stocks non renouvelables



Consommation mondiale en Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) depuis 1860.
Données Schilling & al ; Observatoire énergie ; AIE ; BP stat, compilation de l'auteur

Avant d'extraire du pétrole, il est bon de pouvoir le découvrir

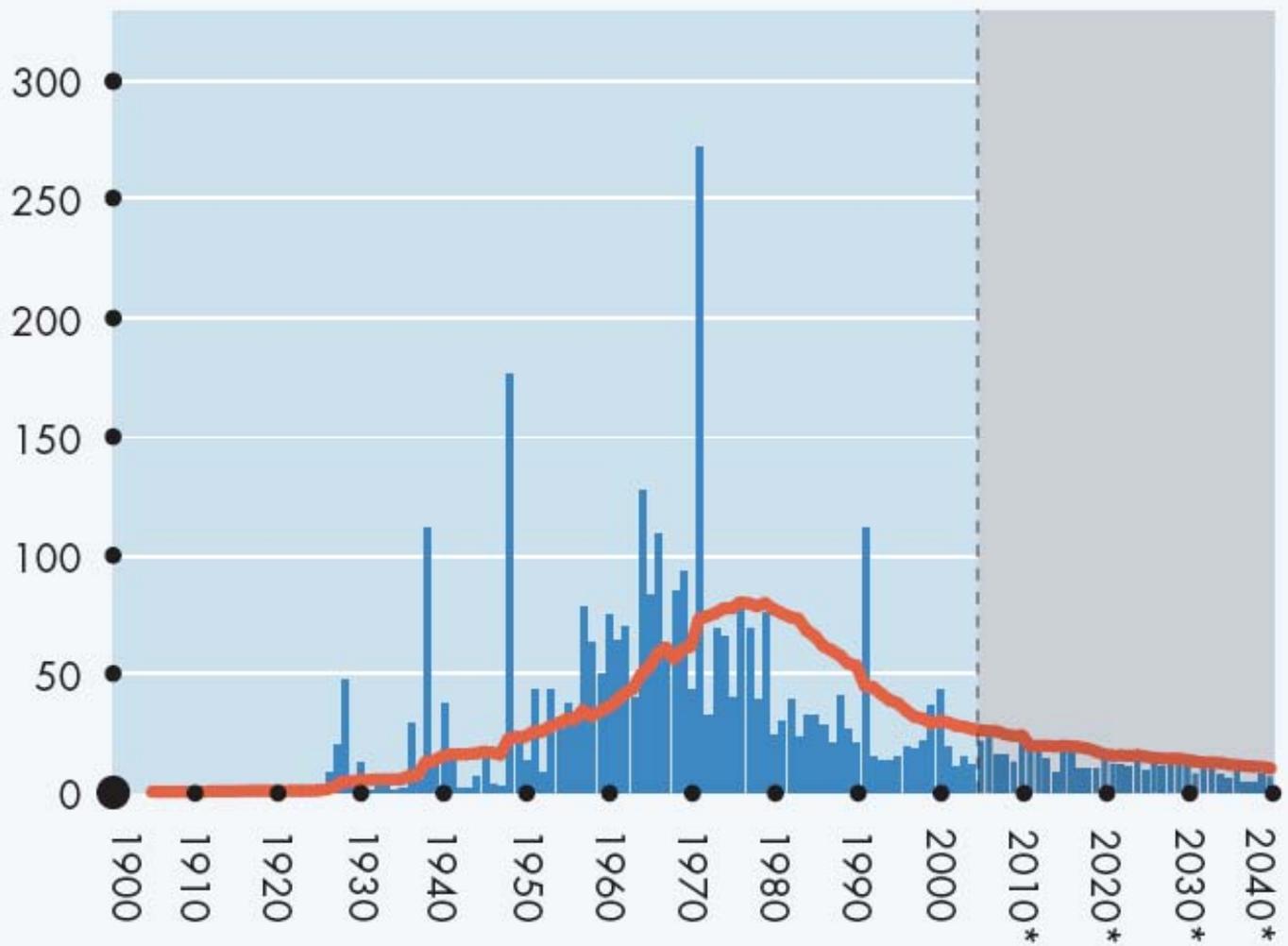


Découvertes cumulées de pétrole récupérable = réserves **ultimes** = max de la production cumulée possible de $-\infty$ à $+\infty$!

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

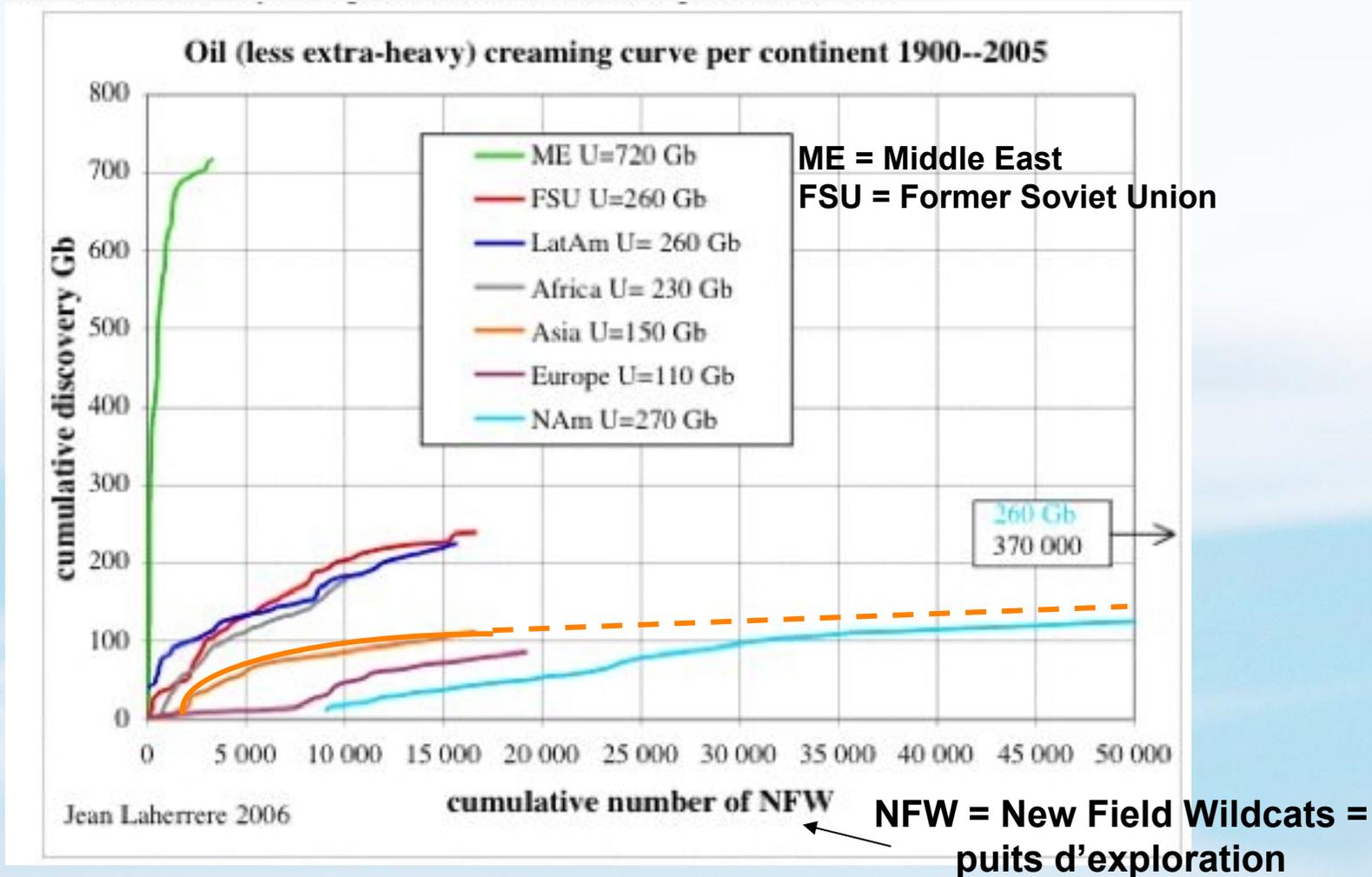
Source : Exxon Mobil, 2002

Le gross kapital, décidément imprécateur d'apocalypse



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). Les opérateurs considèrent que le monde est de mieux en mieux connu. Source : Shell/IHS Energy, 2005**

Moins de pétrole parce que moins d'exploration ?

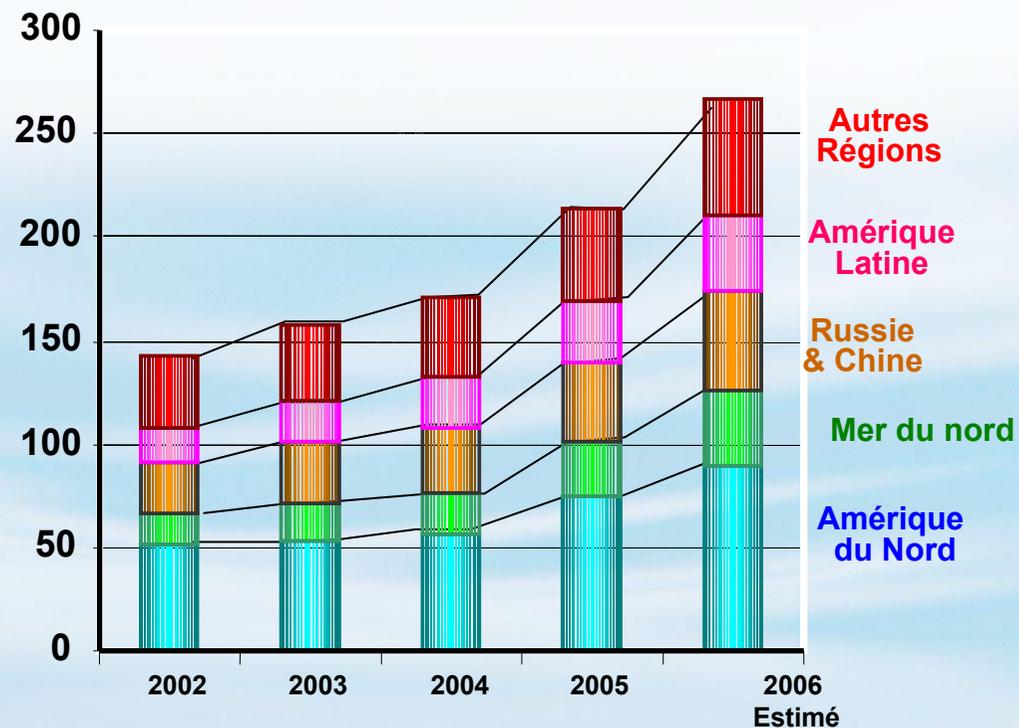


Découvertes cumulées en fonction du nombre de puits forés pour le monde. On ne trouve pas moins parce que l'on cherche moins, mais simplement parce que chaque nouveau puit « ramène » de moins en moins de pétrole.

Source Jean Laherrère, 2006

On cherche partout, et cela n'a jamais coûté aussi cher !

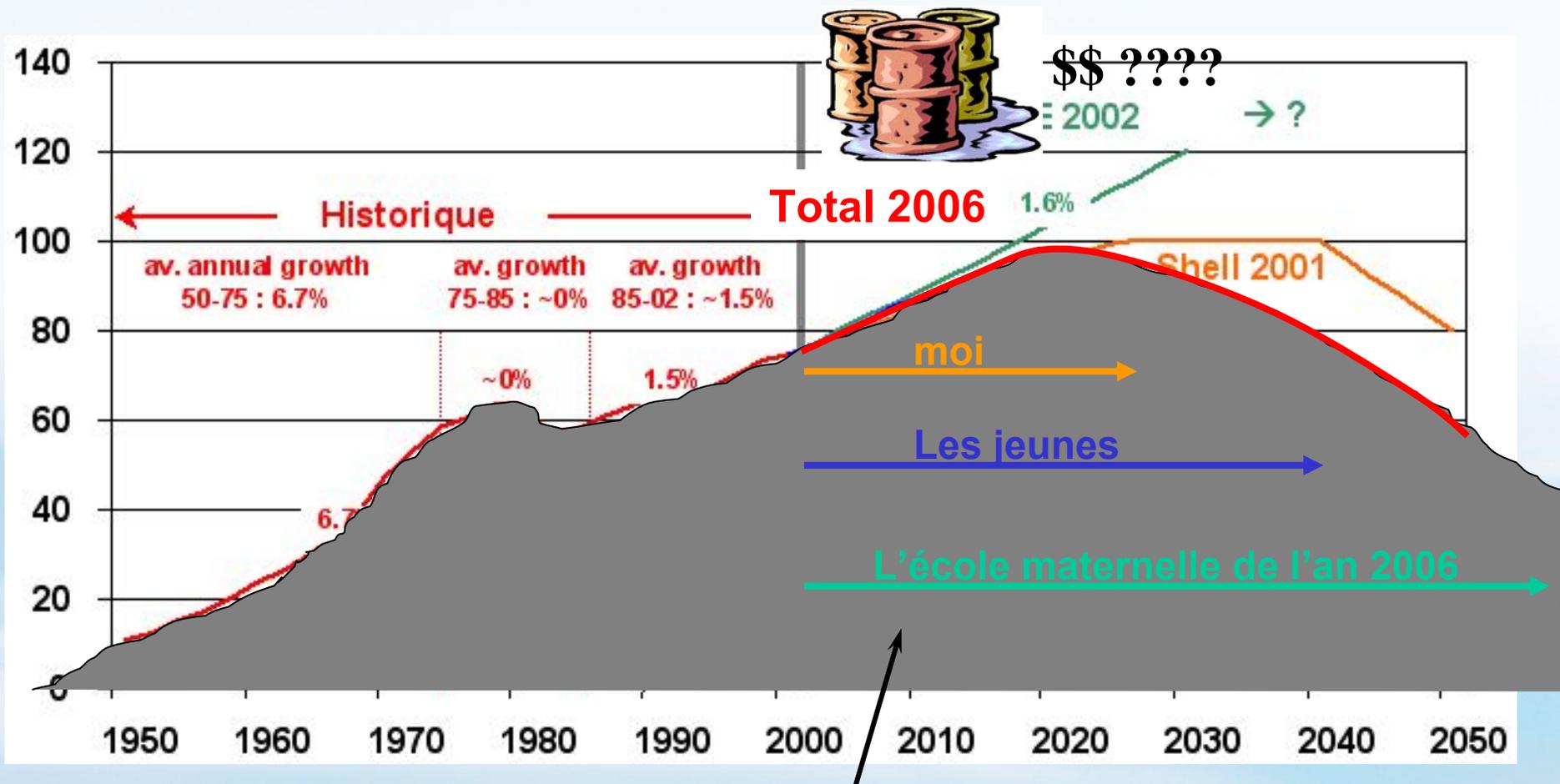
Investissements en milliards de \$



Dépenses d'exploration dans le monde, par zone, en G\$.

Source IFP, 2007

De plus en plus de pétrole, pour combien de temps ?

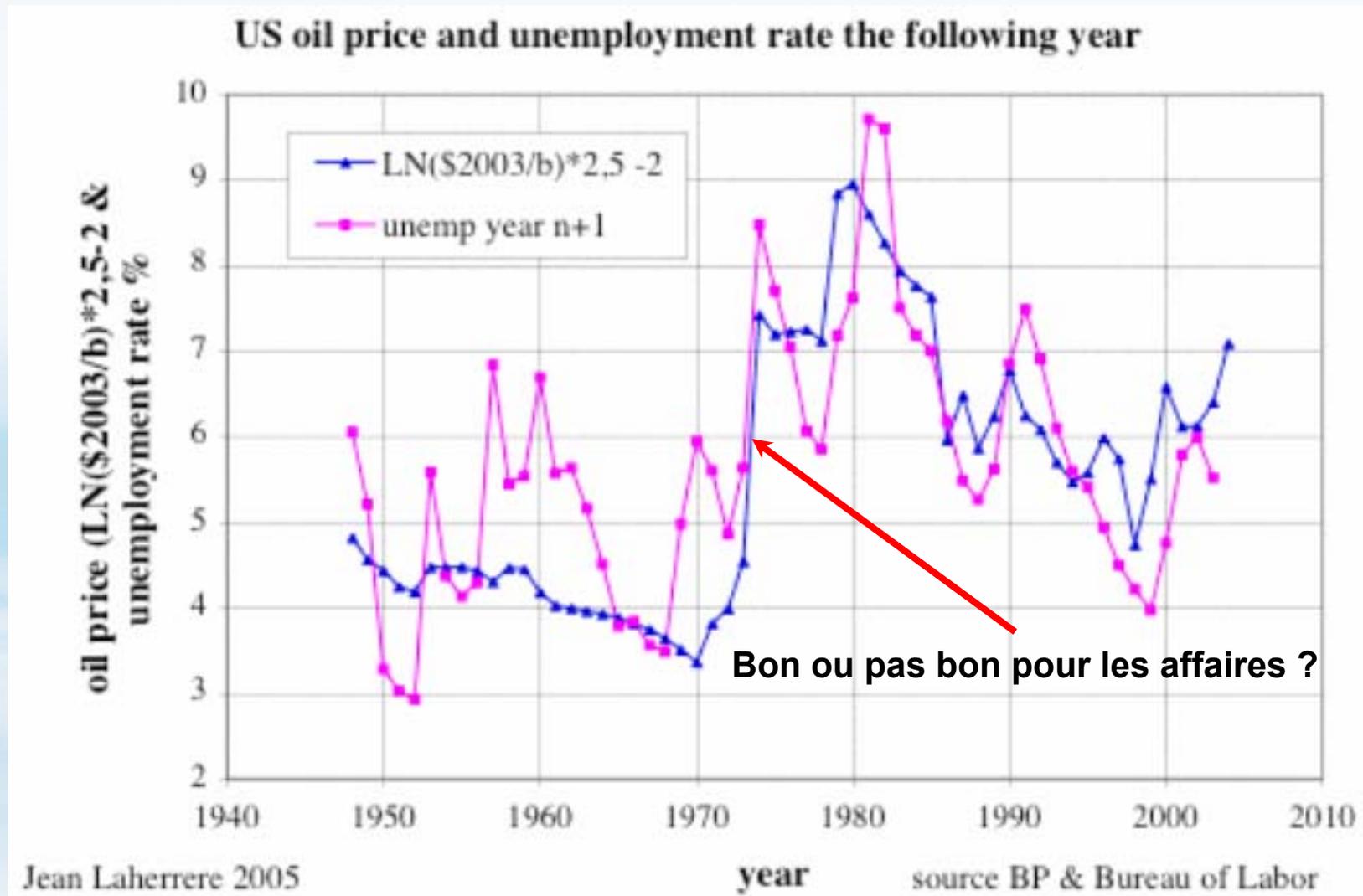


Production cumulée < découvertes cumulées de pétrole récupérable = réserves ultimes

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

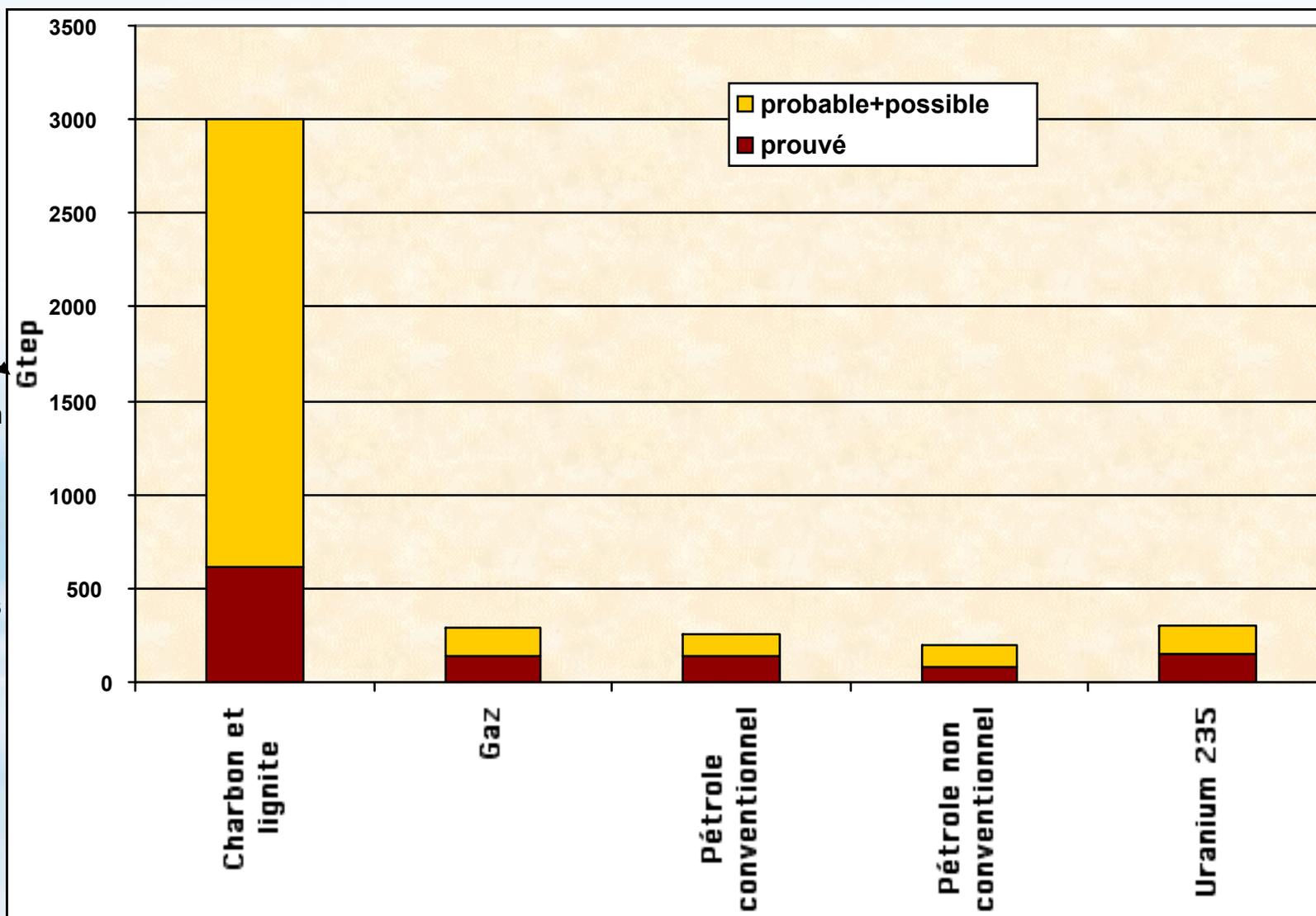
La pénurie, c'est grave docteur ?



Corrélation aux US entre prix du pétrole année N, et chômage année N+1

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

1 Gtep = 1 milliard de tonnes équivalent pétrole. La consommation d'énergie annuelle de l'humanité en 2005 est d'environ 10,5 Gtep hors bois

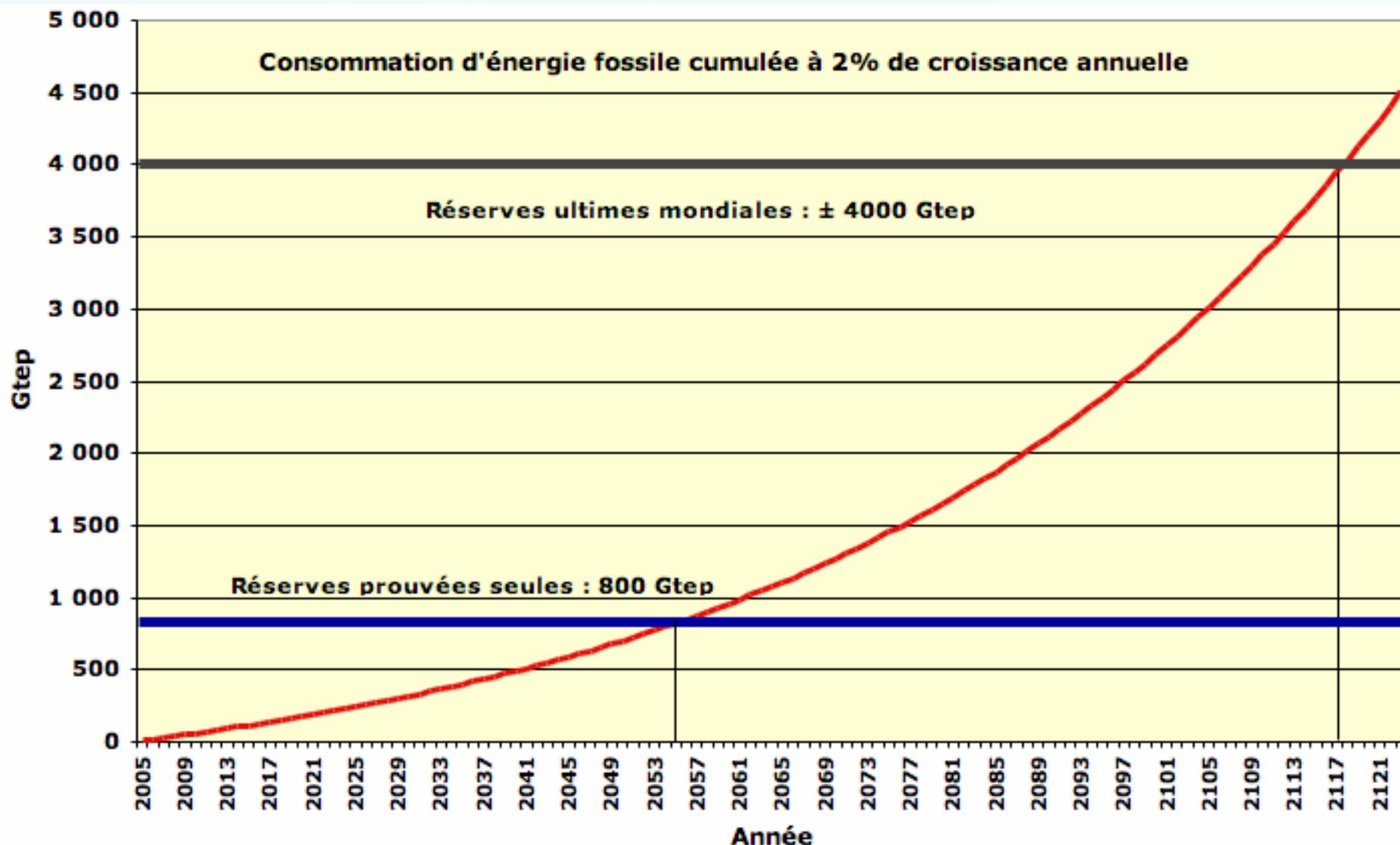


Total des réserves prouvées : ≈ 800 Gtep, ultimes restantes < 4000 Gtep.

Source IFP

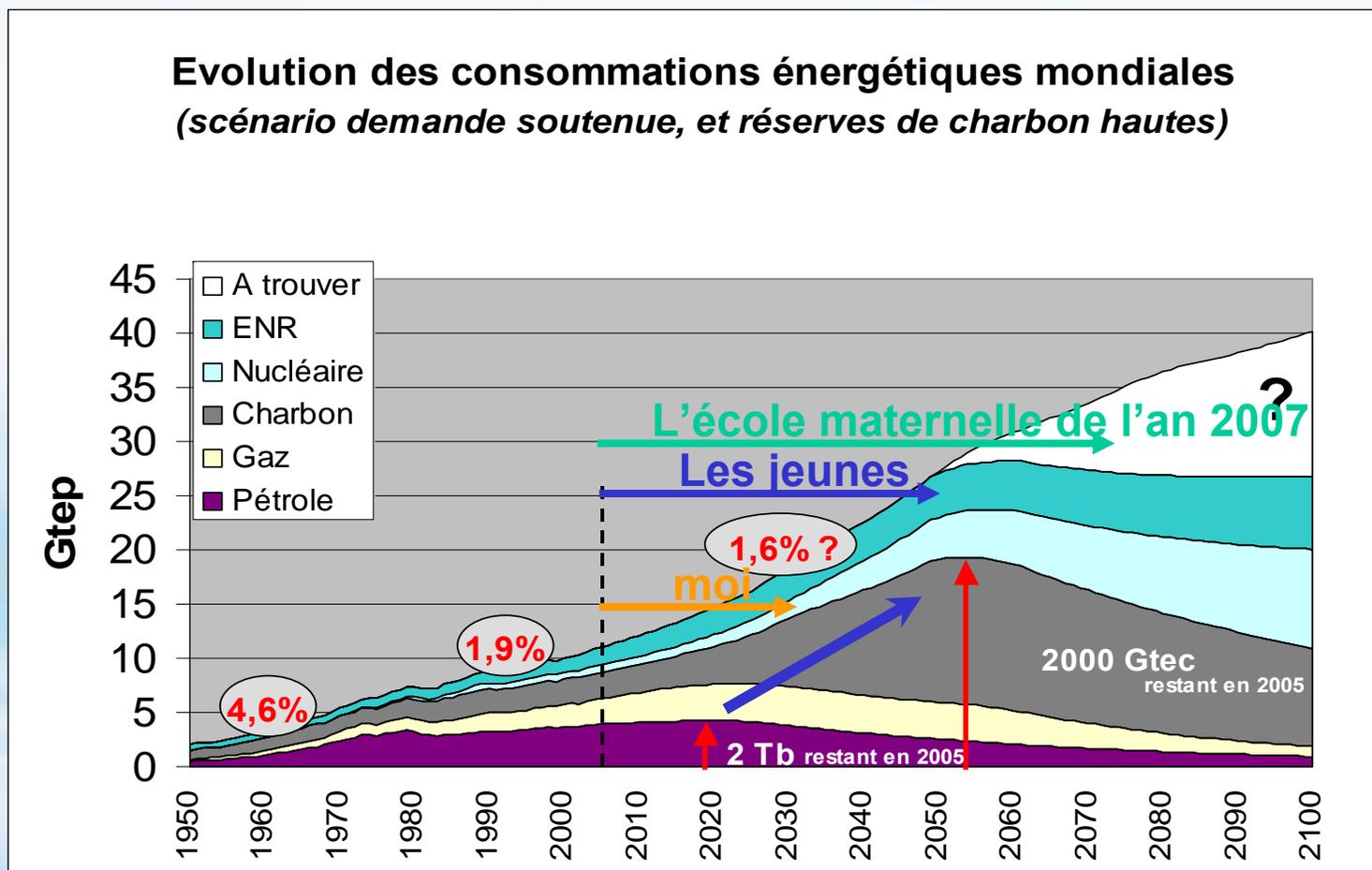
Jean-Marc Jancovici - Audition du 9 octobre 2007

« Durables » avec le charbon ? Ne pas haïr les maths, c'est utile !



Avec 4000 Gtep, nous pouvons faire croître la consommation de 2% par an pendant... un siècle, mais pas plus ! Et la concentration atmosphérique en CO₂ aurait dépassé 2000 ppmv... Calcul de l'auteur.

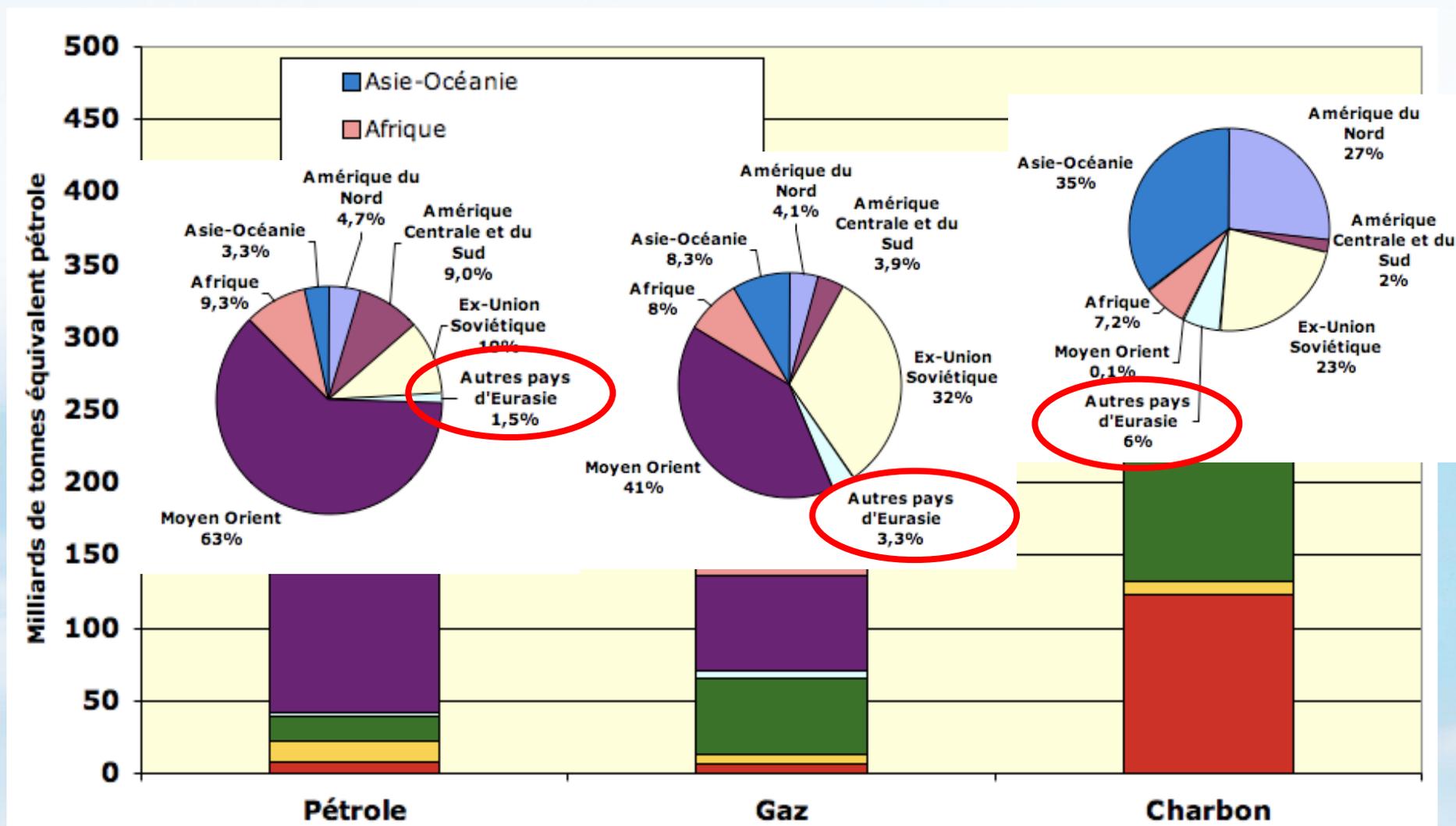
Se reporter de pétrole sur charbon : 30 à 40 ans de rab, mais guère plus...



1000 raffineries aujourd'hui (2 à 3 G\$ pièce)
2 unités CTL
Vitesse de transition pour construire 4.000 unités CTL ?

Source du graphique : EDF R&D, Revue de l'énergie, avril 2007

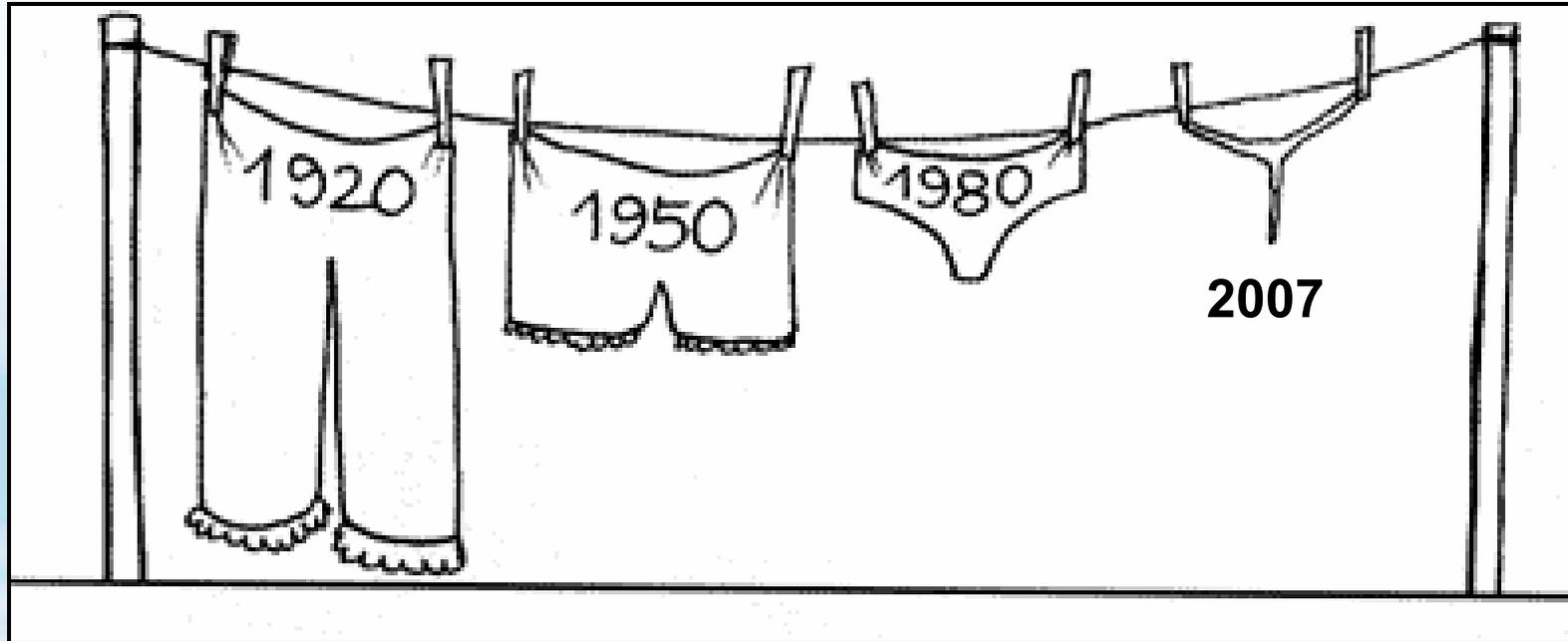
Le problème se complique beaucoup : le rab est ailleurs



Réserves de combustible fossile par nature (Source : BP Statistical Review, juin 2007).

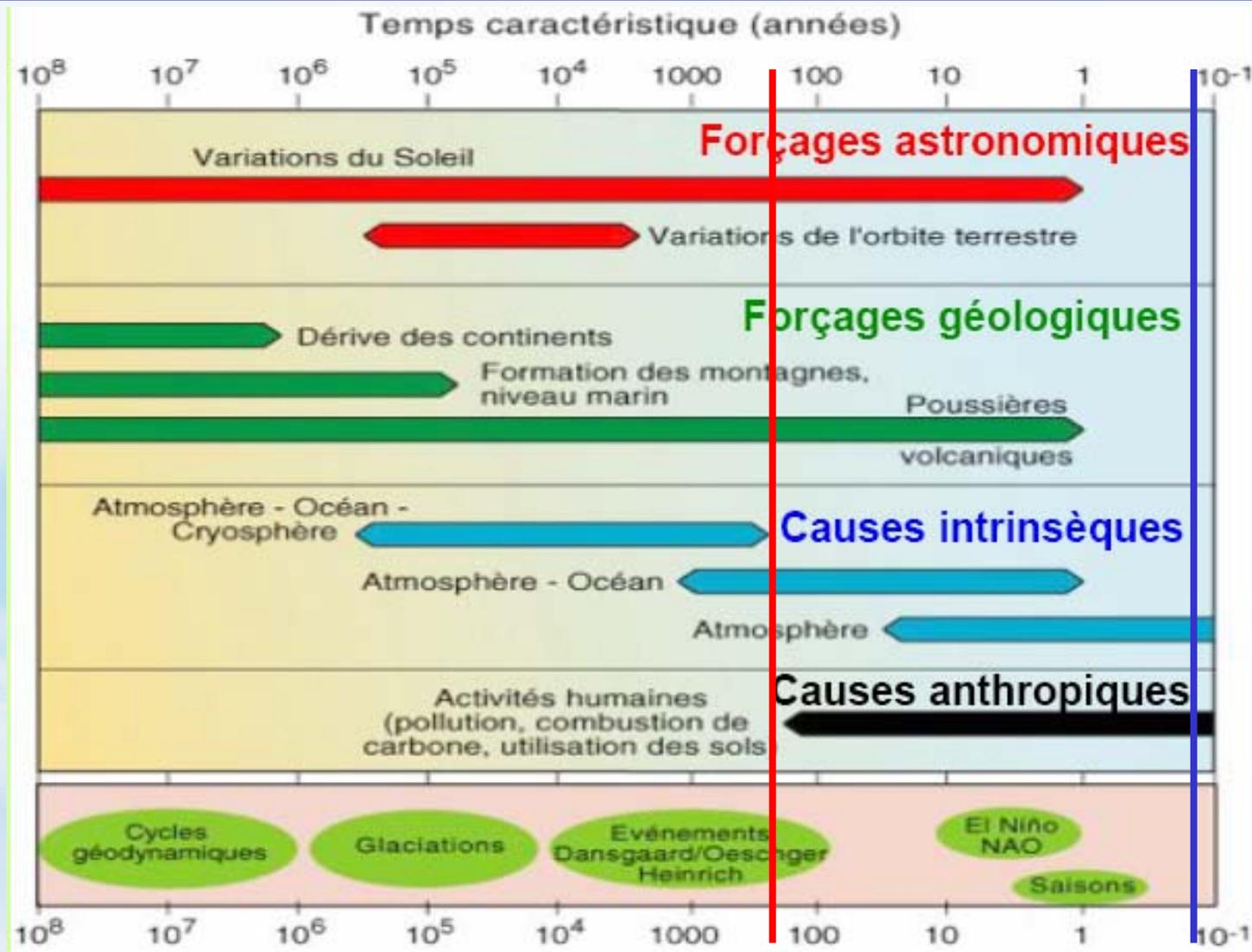
Avec ou sans climat, l'Europe devrait sérieusement se gratter la tête...

Encore des doutes sur la réalité du changement climatique ?



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

Le climat, ce n'est pas juste des hommes... ni juste l'atmosphère



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

Climatologue, cela n'existe 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,

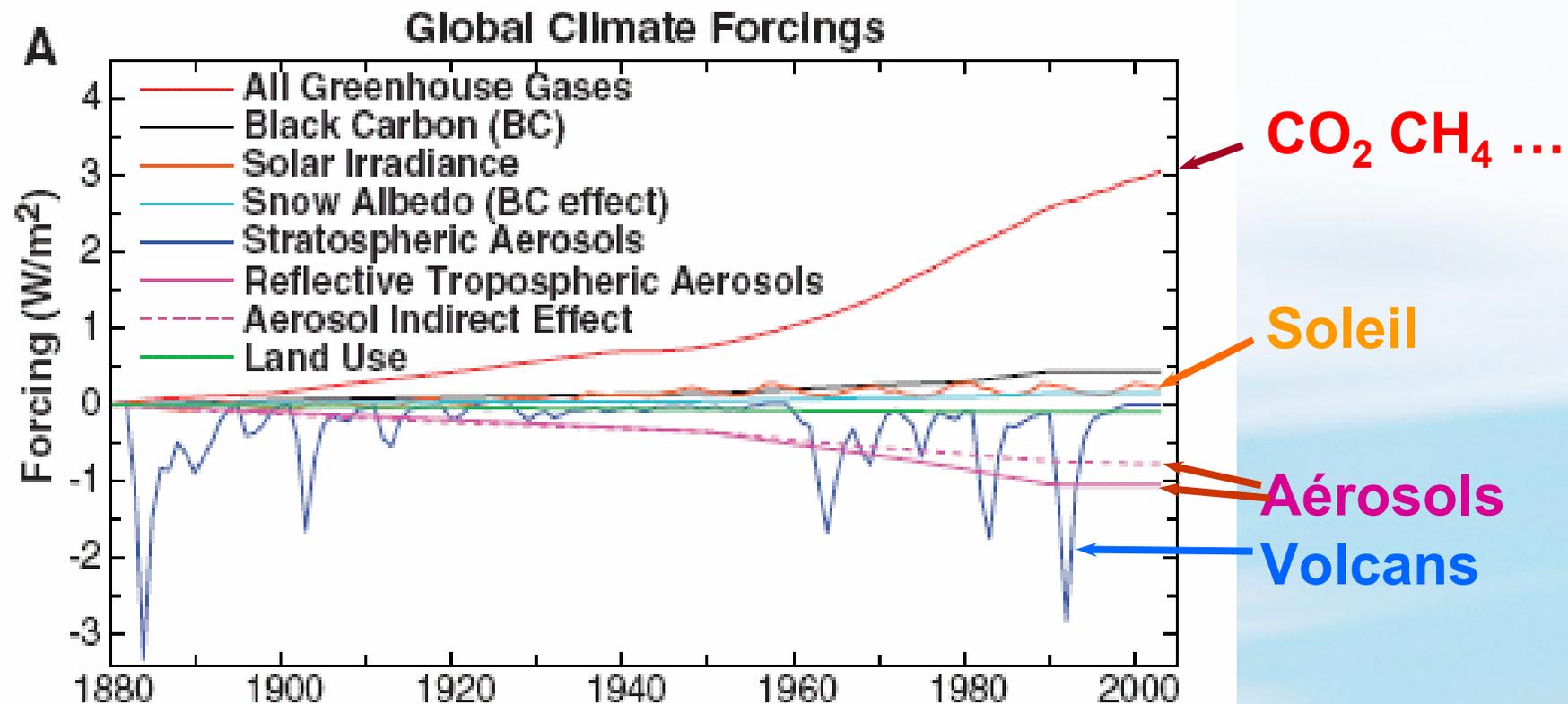
Géophysiciens -> dérive des continents,

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

Biologistes -> végétation,

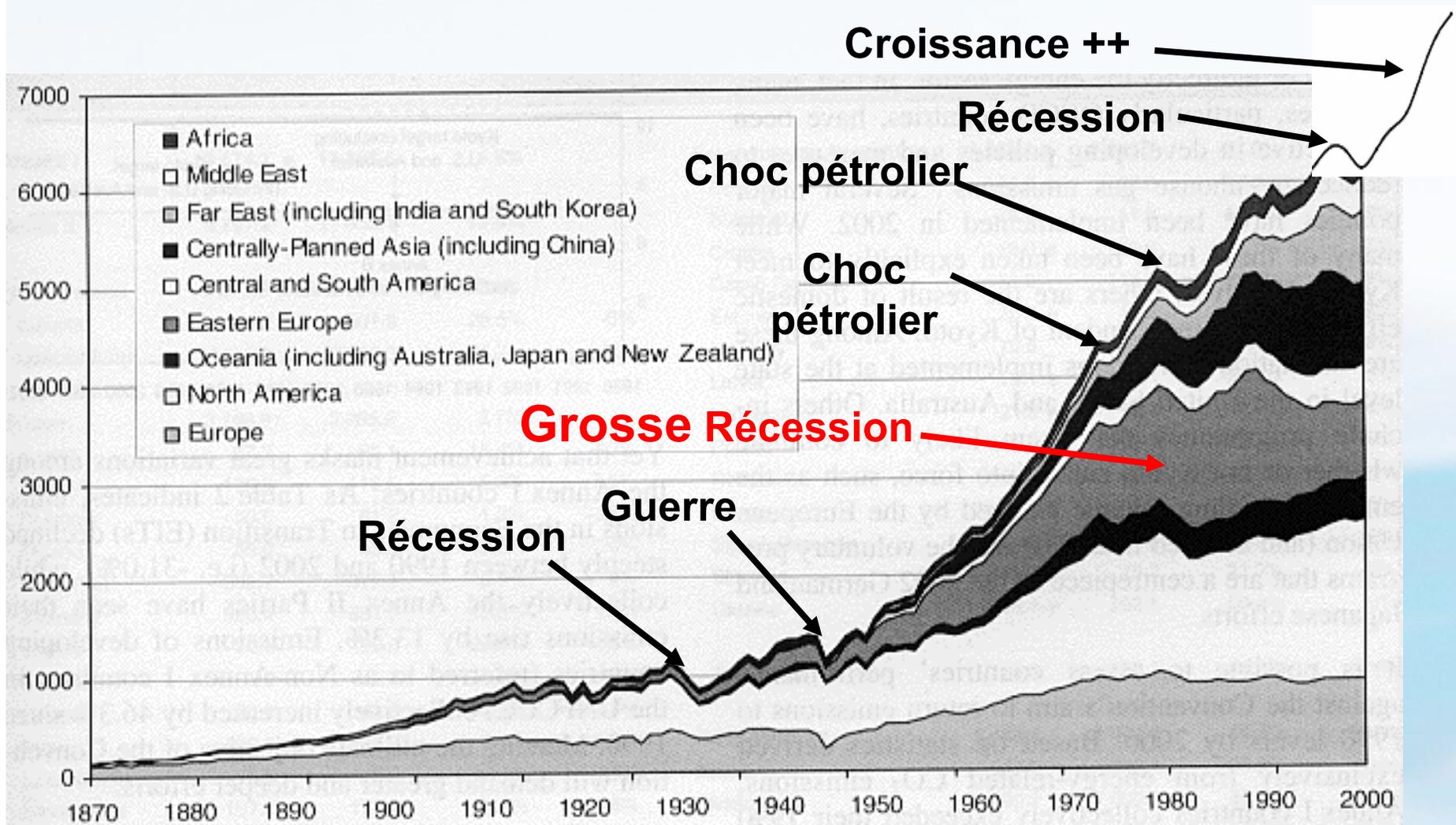
Sans parler de toutes les sciences humaines, puisque l'homme est devenu un agent climatique....

On sort la calculette : qui influe le plus aujourd'hui ?



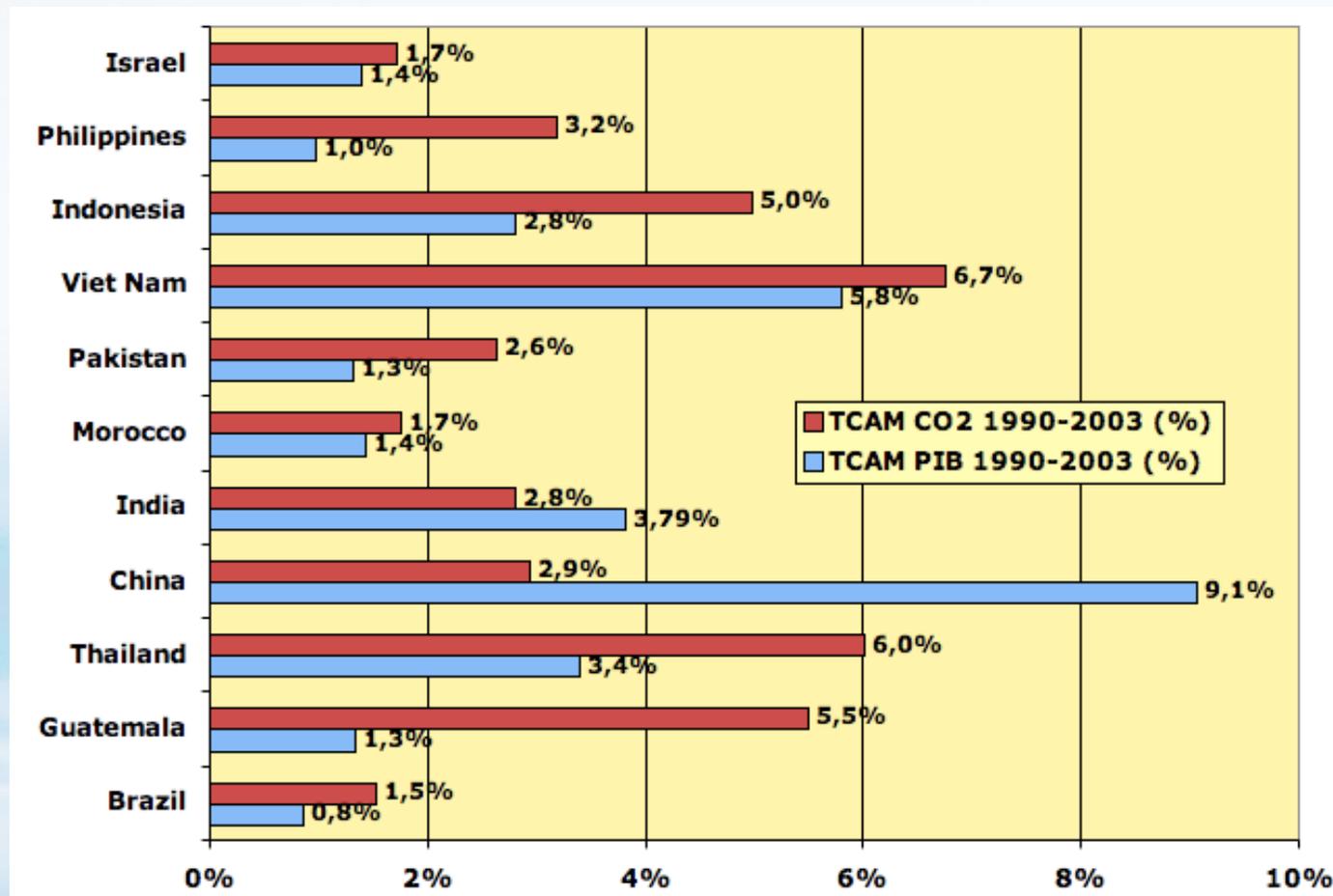
Comparaison des diverses influences (naturelles et humaines) sur un climat stable à l'échelle du siècle. Source Hansen et al., Science, 2005

Plus de PIB, c'est plus de CO₂... et inversement



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

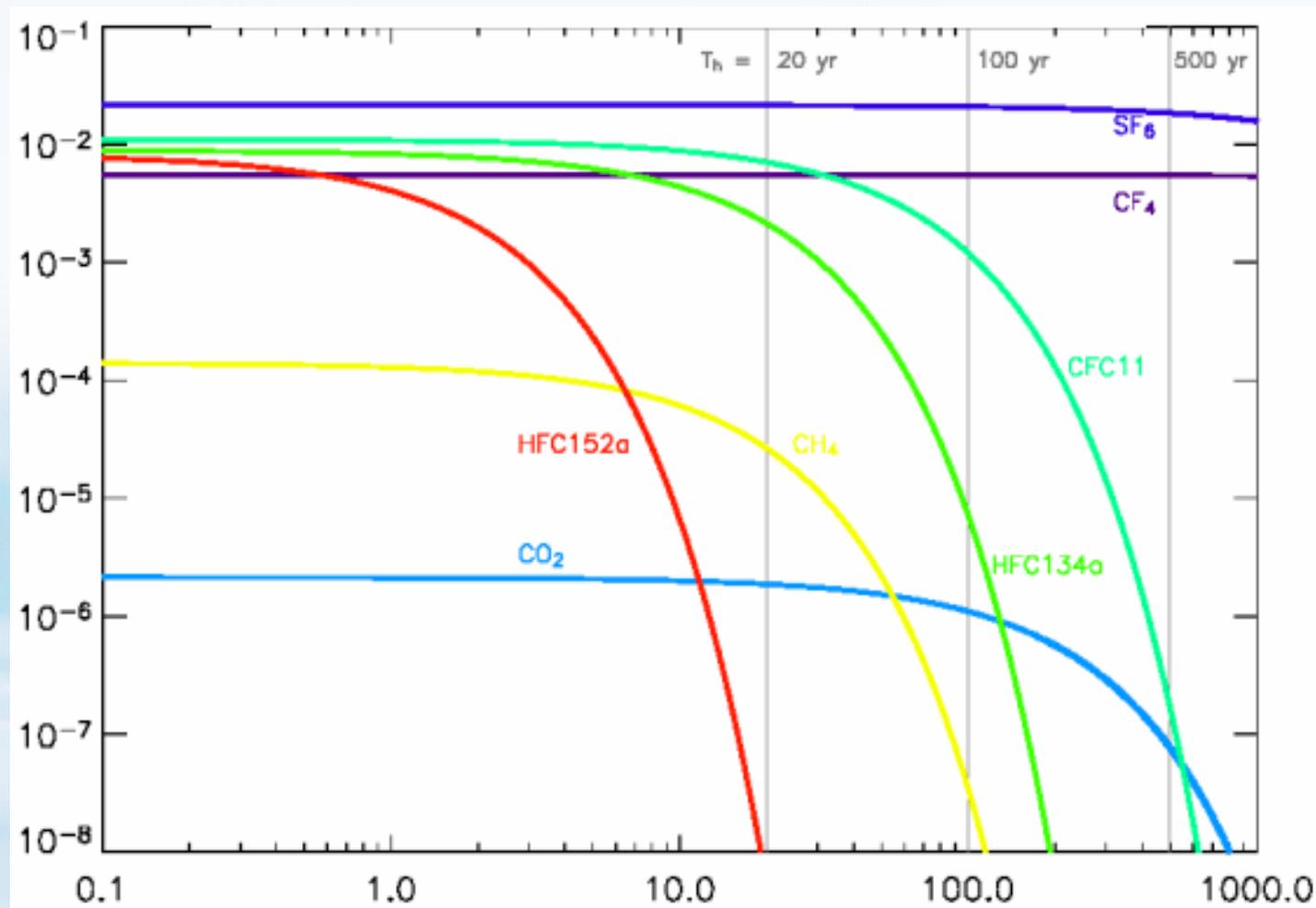
S'il faut émettre pour « émerger », à quand la noyade ?



Comparaison, pour un certain nombre de pays « émergents », entre le taux de croissance annuel moyen des émissions de CO₂ par personne de 1990 à 2003, (rouge), et le taux de croissance annuel moyen du PIB par personne sur la même période.

Source Banque Mondiale pour le PIB et AIE pour les émissions par tête.

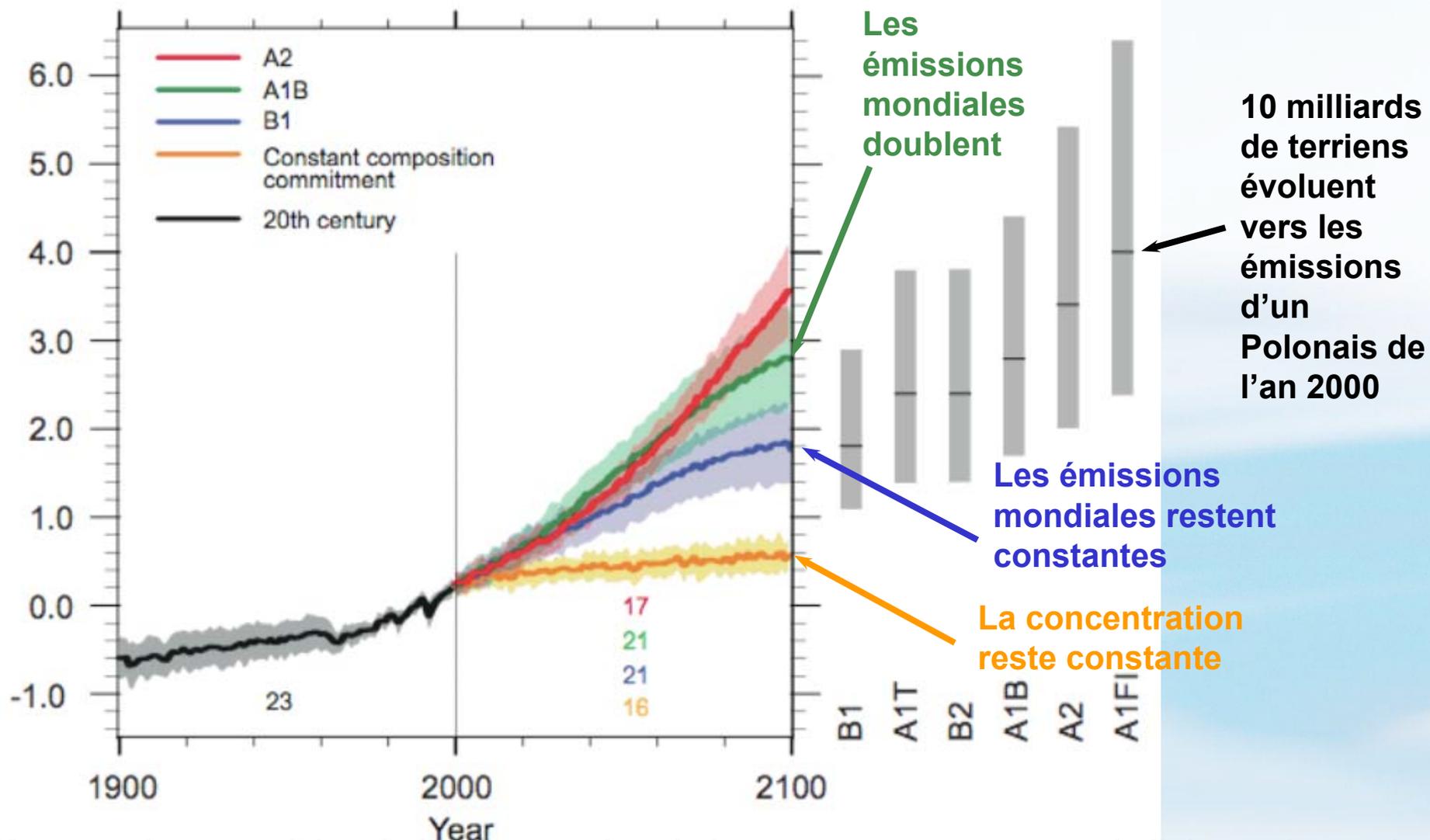
Les gaz à effet de serre : une pollution globale et irréversible



Effet résiduel (axe vertical, en watts/m²) au cours du temps (axe horizontal, en années) d'une tonne de gaz émise à l'instant 0 (attention ! échelles logarithmiques). Ces courbes reflètent la quantité résiduelle de gaz dans l'atmosphère après émission.

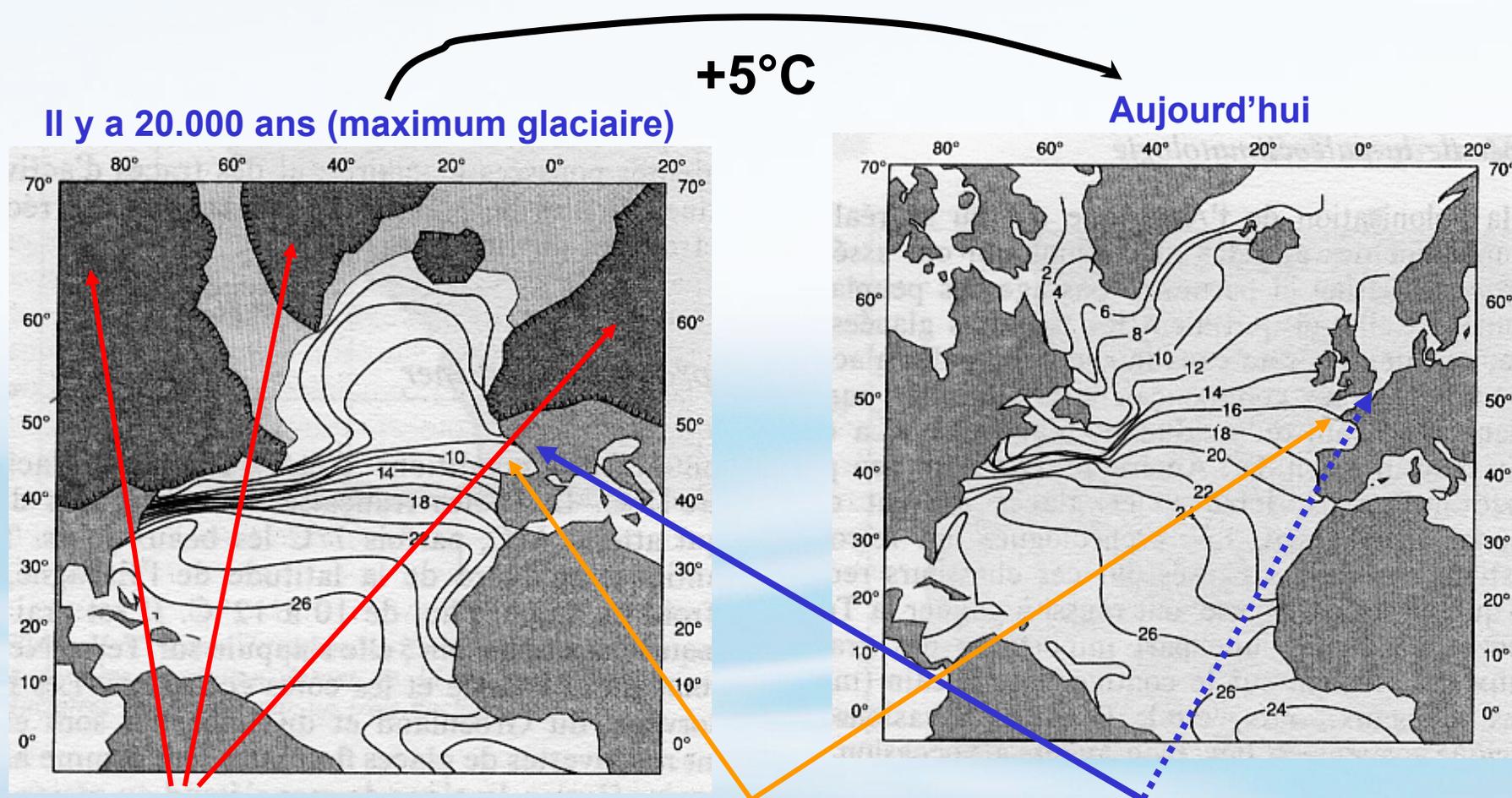
D. Hauglustaine, LSCE.

Je mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid ?



Moyenne inter-modèles de l'augmentation de la température moyenne de l'air au niveau du sol en 2100 par rapport à la moyenne 1980-1999, selon les scénarii (pas de couplage avec le cycle du carbone). Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

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



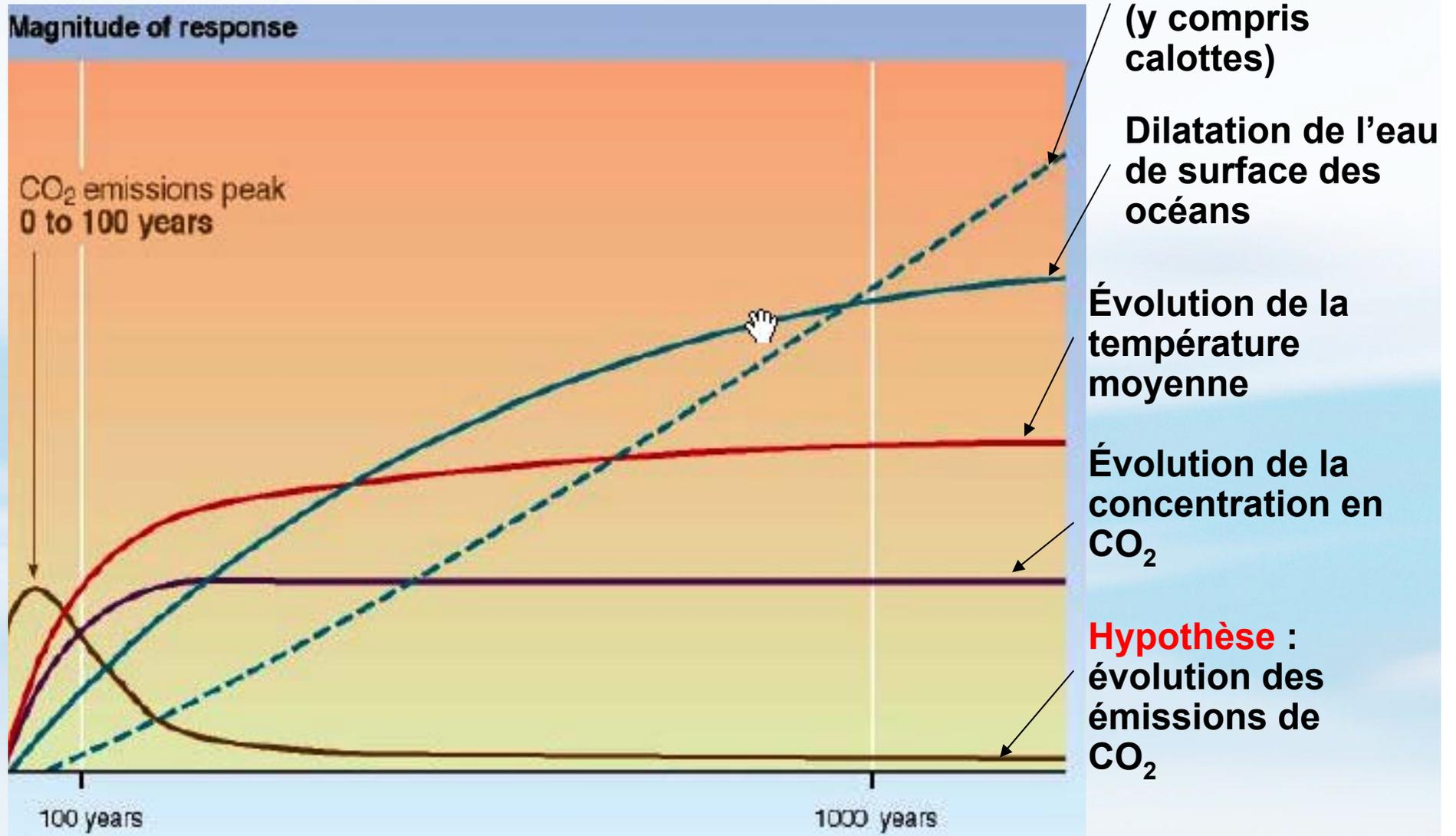
Période glaciaire : d'immenses glaciers, épais de plusieurs km, recouvrent l'Amérique et l'Europe du nord. Le sol de la France est gelé en permanence, et inapte aux cultures

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 !

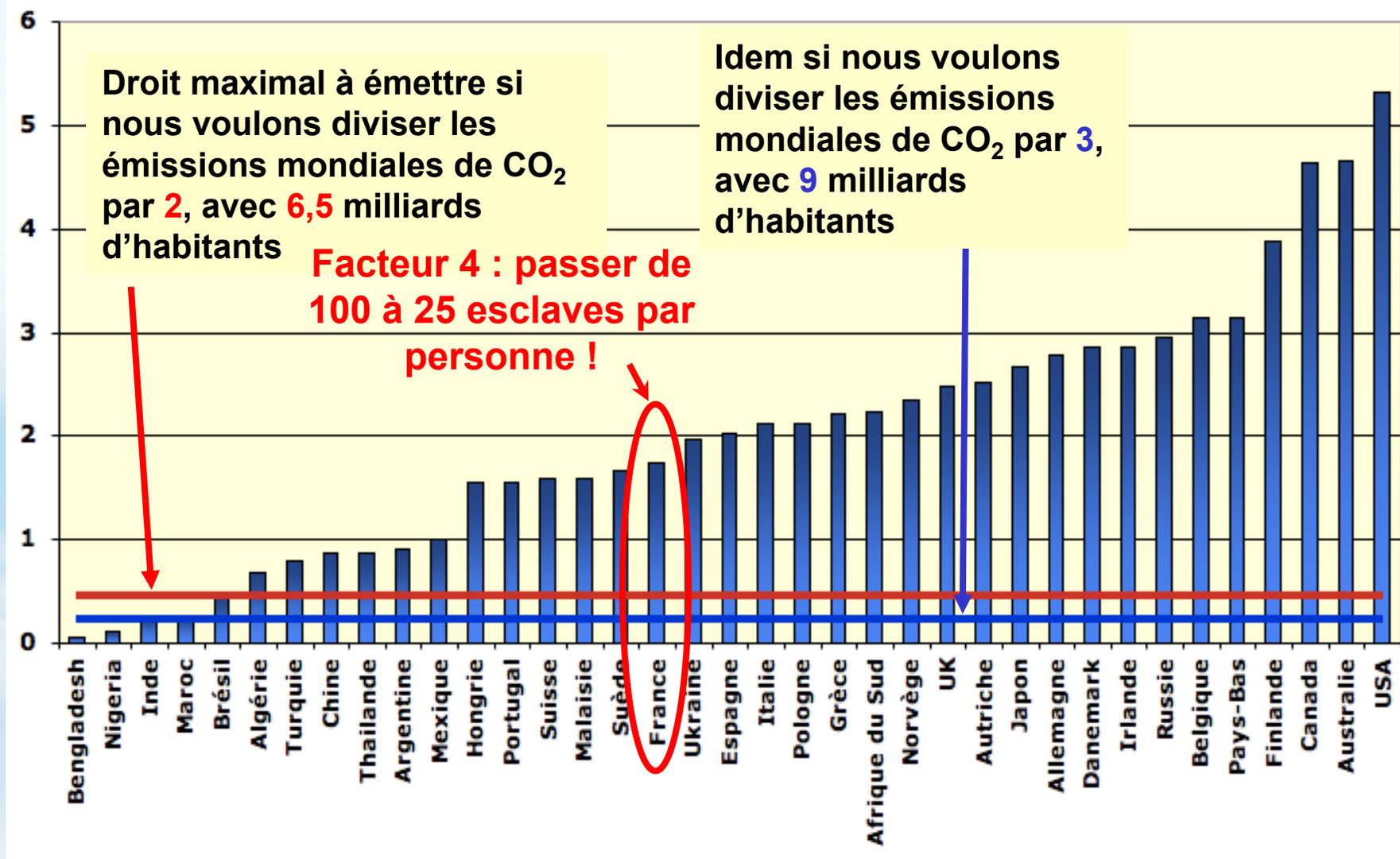
-> Quelques °C en un siècle, ce sera(it) un choc massif et ingérable

Pas question de revenir en arrière à bref délai : bel héritage...



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.

Au restaurant « le bon développement durable », plat unique !

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,

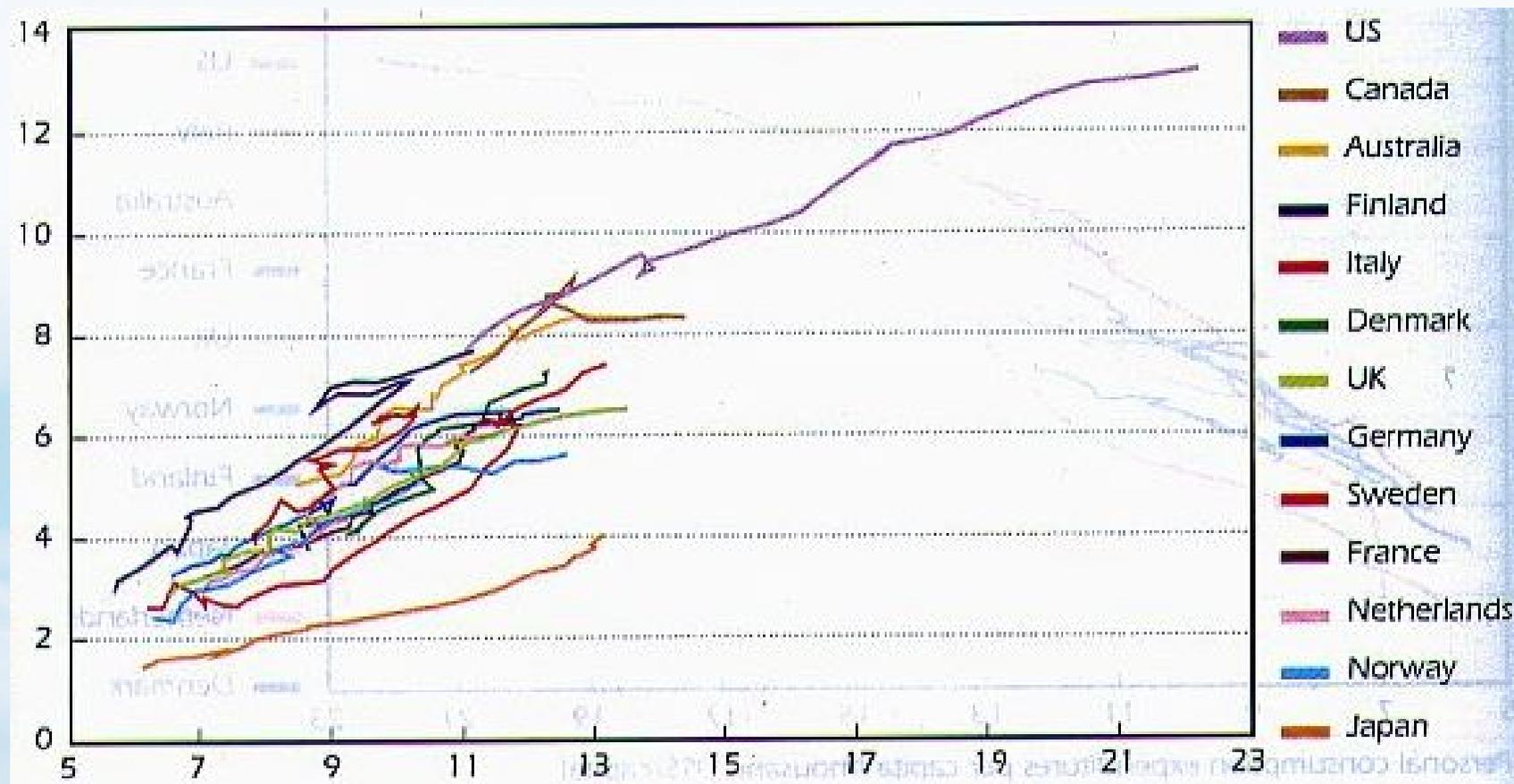
ou produire 2 tonnes de ciment (une maison moderne de 100 m² en nécessite environ 10),

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

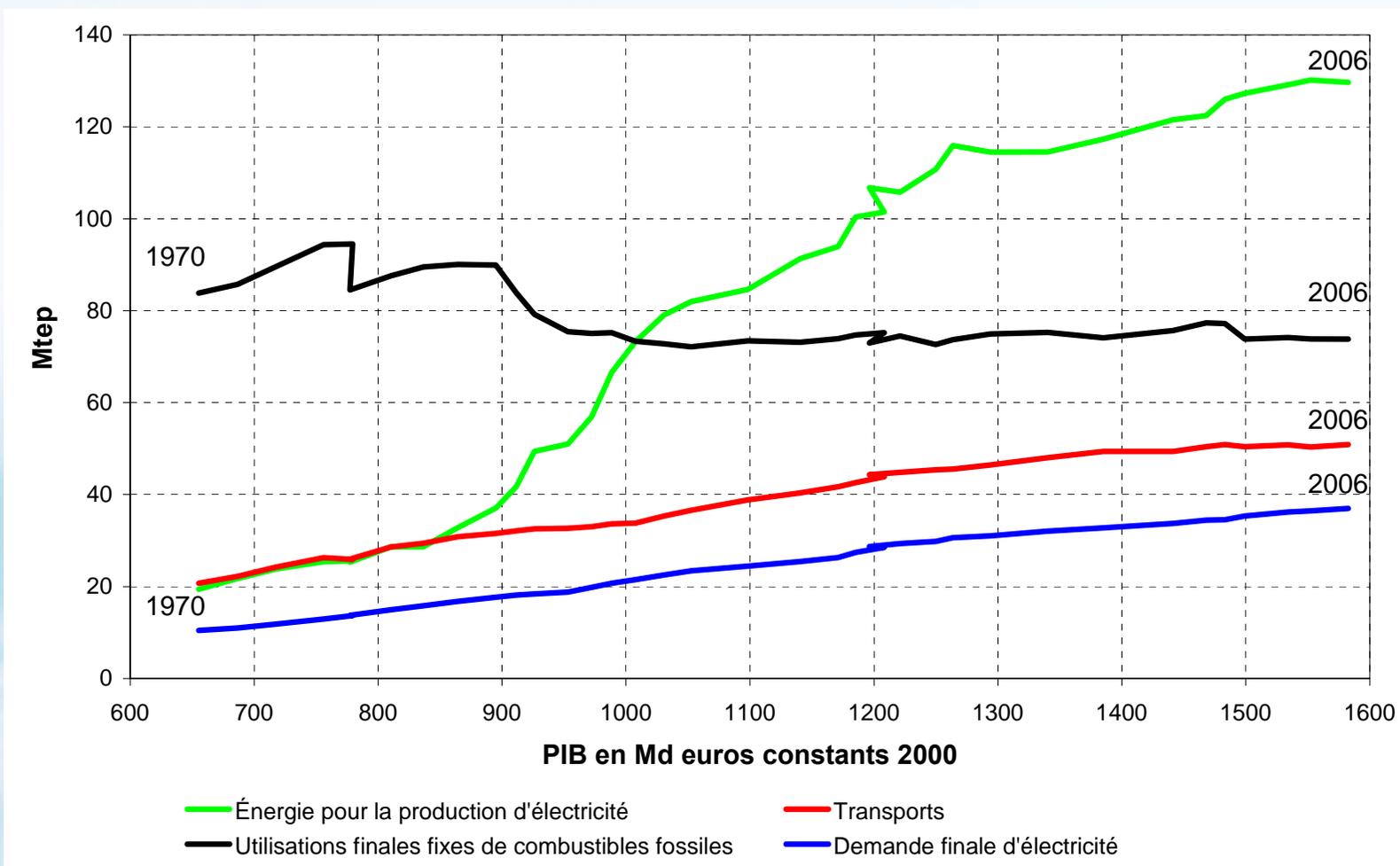
Une croissance sans voitures ? Pas facile...



Evolution, de 1970 à 2000, du nombre de véhicule.km par habitant (axe vertical) en fonction du PIB par tête en \$ US (axe horizontal). Vous avez dit découplage ?

Source AIE, 2005

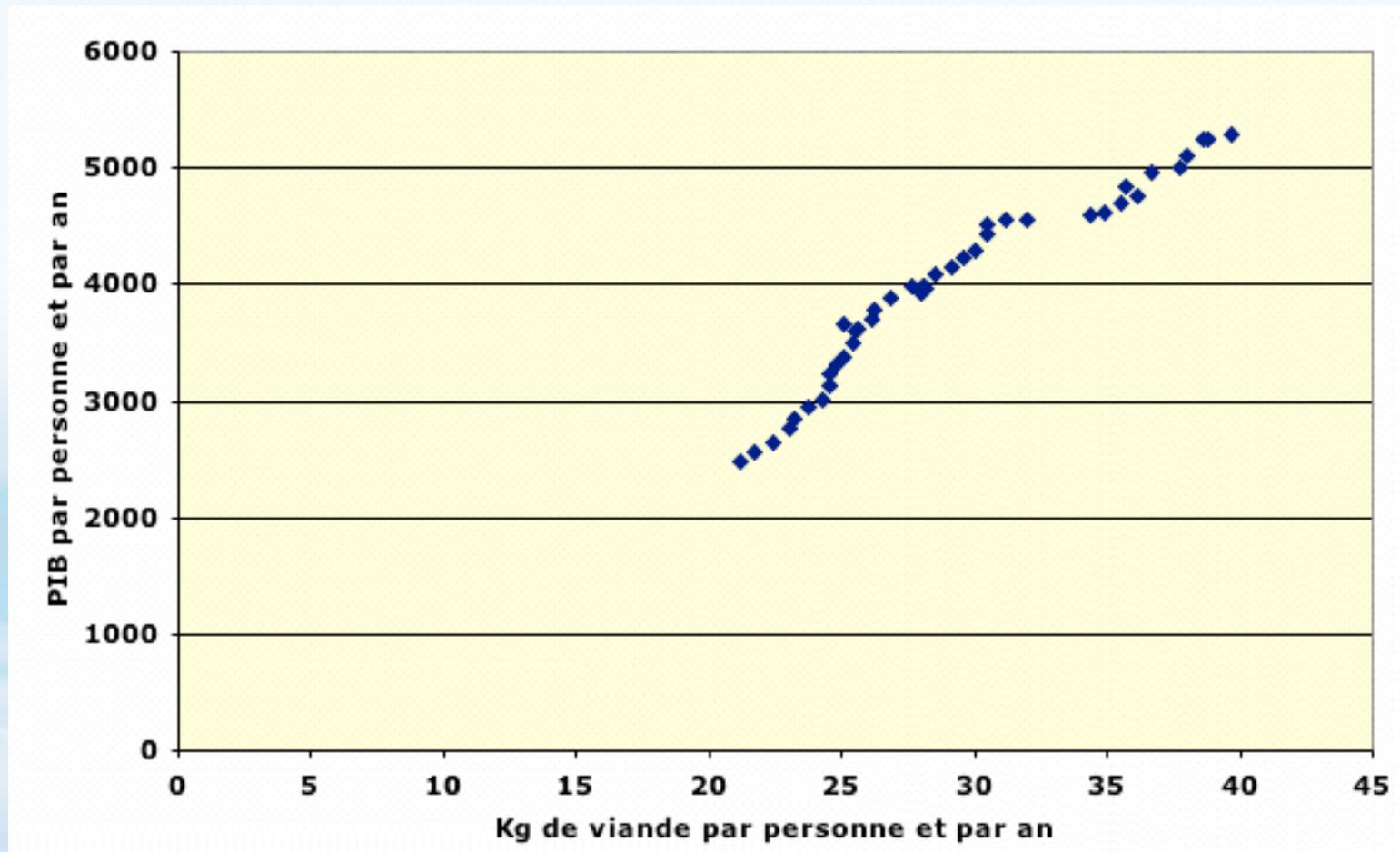
Un PIB sans voitures et... sans électricité ?



Corrélations entre PIB, énergie des transports et électricité en France, de 1970 à 2006.
Le PIB a triplé, la **demande d'électricité** aussi, et la **consommation d'énergie des transports** a fait plus que doubler.

Source Observatoire de l'Énergie, 2007

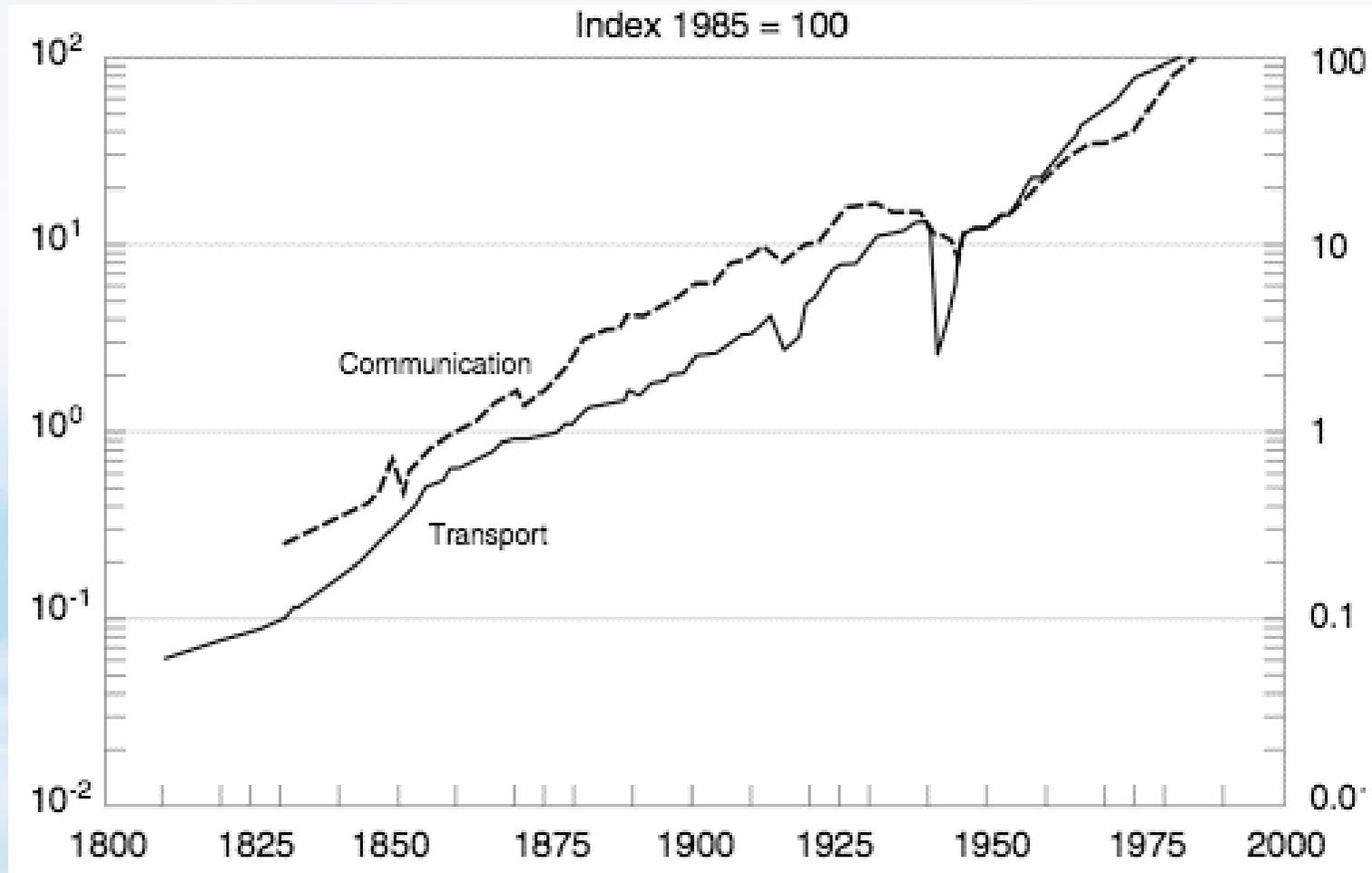
Un PIB sans viande ?



Corrélations entre PIB par personne et viande consommée par personne (en bas à gauche, 1961, en haut à droite, 2002).

Sources World Bank et FAO.

Un PIB sans camions ?



Jusqu'à maintenant, la circulation accrue des informations n'a pas empêché l'augmentation parallèle des flux physiques (source : Source : Arnulf GRÜBLER, the Rise and Fall of Infrastructures, 1990) . **Un employé du tertiaire de 2006** (un employé de banque, de la sécu, d'une mairie, un agent de France Telecom...) **consomme presque autant d'énergie, pour son seul travail, qu'un Français de 1960 pour tous ses usages.**

Aurons nous croissance et monde fini ?

L'équation de Kaya

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

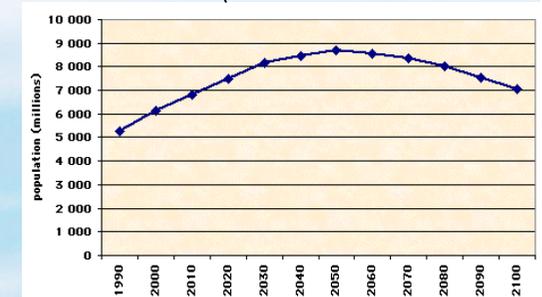
Emissions de gaz carbonique = Contenu en gaz carbonique de l'énergie * Intensité énergétique de l'économie * Production par personne * Population

A diviser par 2

-25% en 30 ans en France, -50% en 50 ans ?

A 2% de croissance par an, multiplication par 2,7 en 50 ans - à 4% par an, c'est x 7 en 50 ans !!!

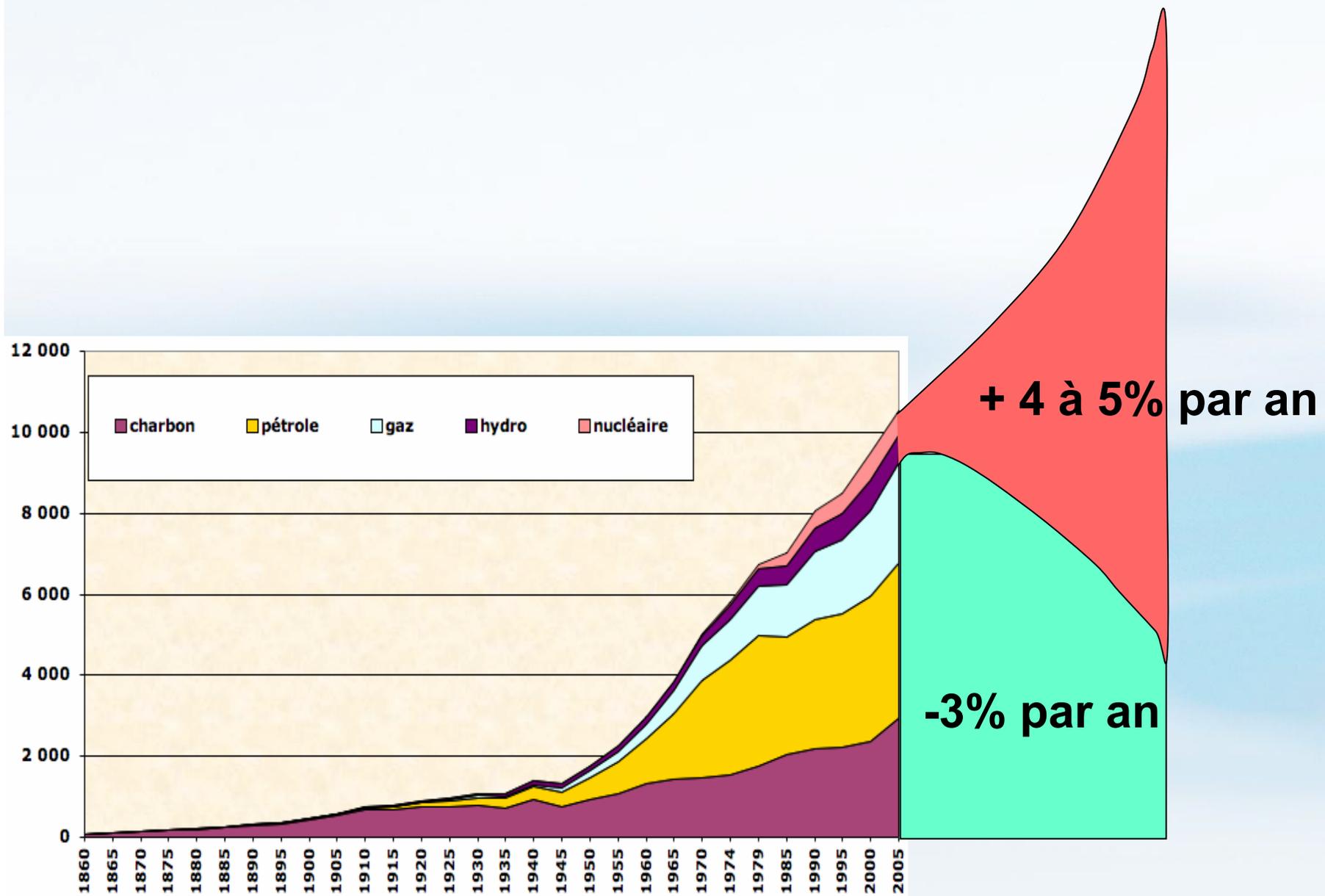
A diviser par 4 en 50 ans tout en multipliant la production d'énergie par 2 !!!



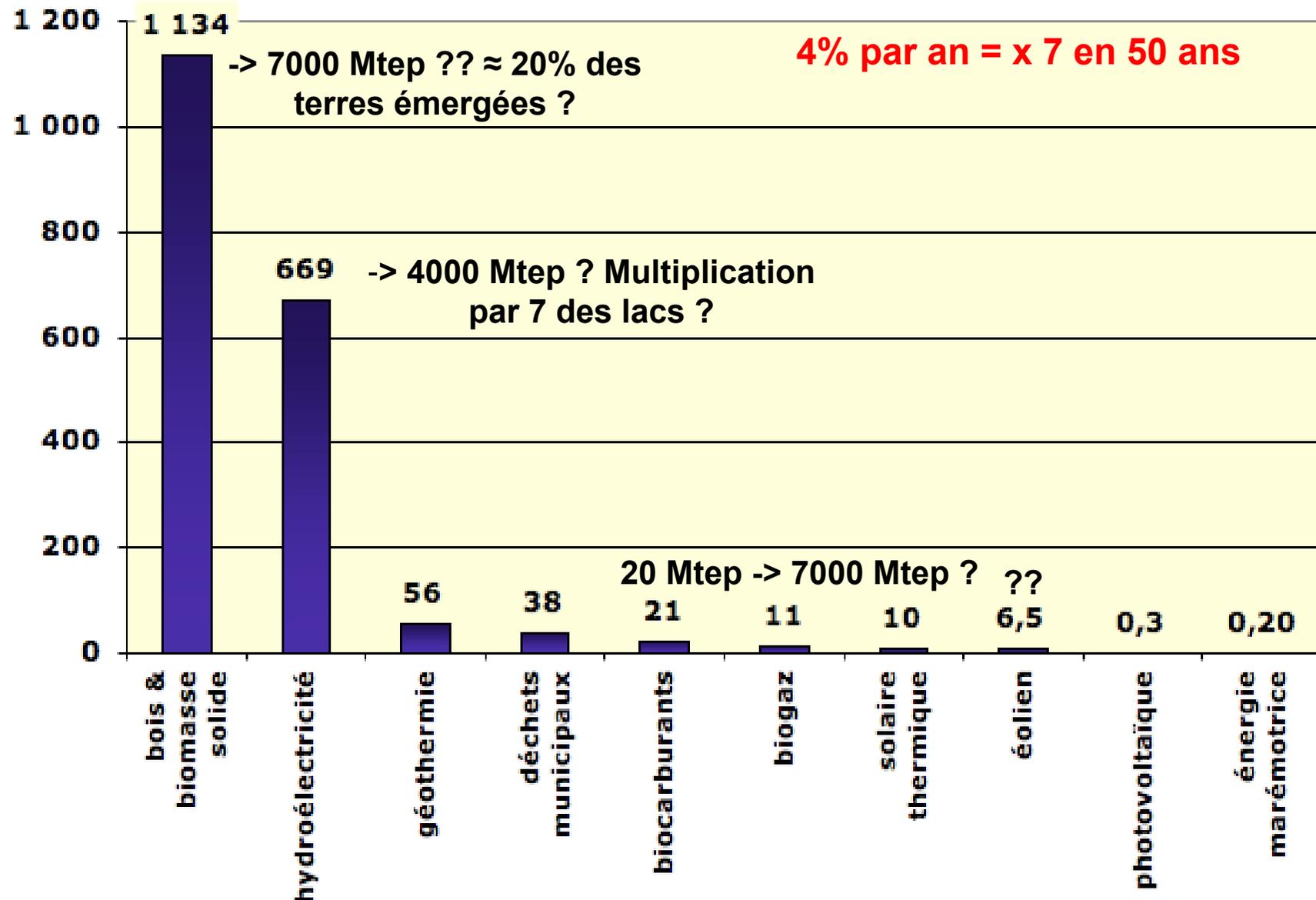
Augmentée de 50% d'ici 2050 ?

Le problème est donc d'une simplicité biblique...

Une croissance « libérée » sans CO₂, cela devrait donner ceci

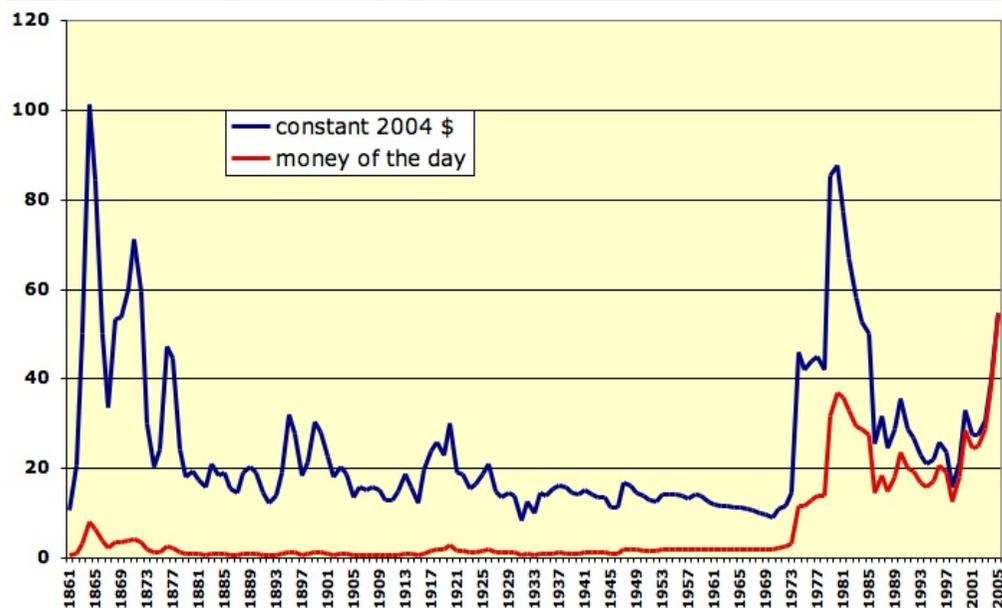


Peut-on utiliser des énergies renouvelables ?

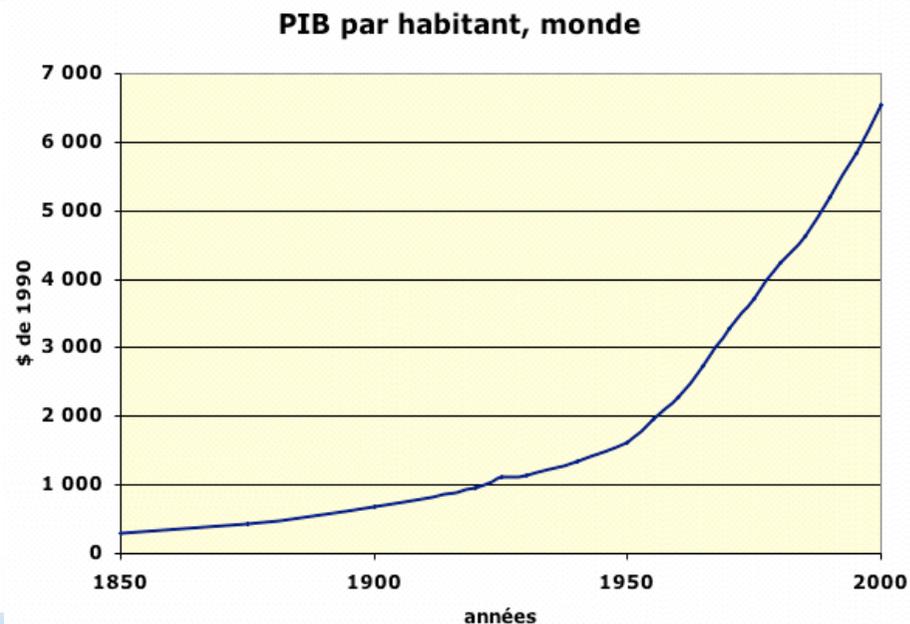


Contribution des énergies renouvelables au bilan énergétique mondial en 2005

Ce qui ne fonctionne pas : utiliser directement l'indicateur monétaire



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

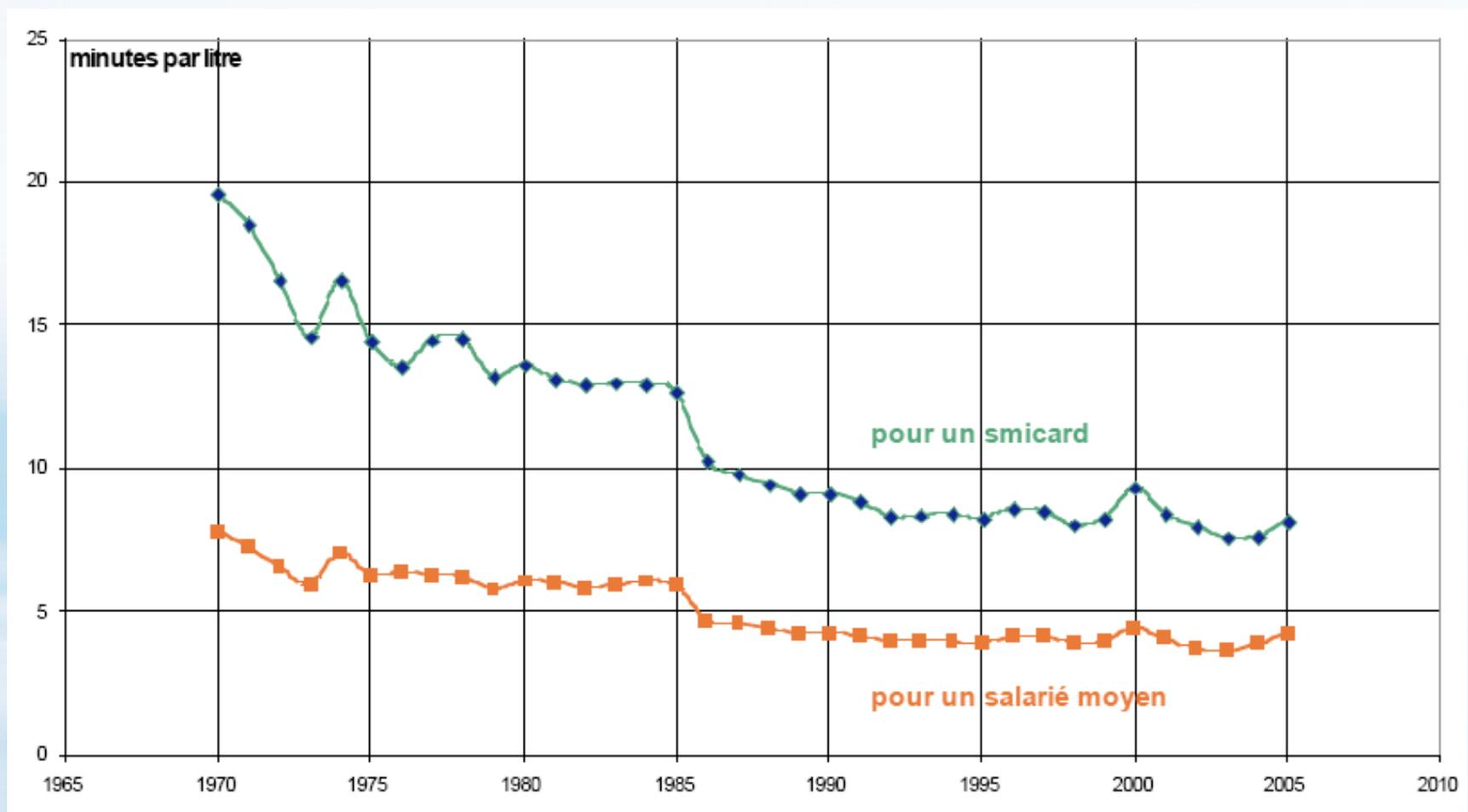


Reconstruction du PIB mondial depuis 1850 (le PIB est une notion qui date de la fin de la Seconde Guerre Mondiale)

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 30 -> il est devenu quasi-invisible dans la formation des prix

Rouler coûte par exemple de moins en moins cher, et non l'inverse



**Prix du carburant exprimé en minutes de temps de travail par litre
(prix rapporté au pouvoir d'achat).**

Source FNAUT, 2007

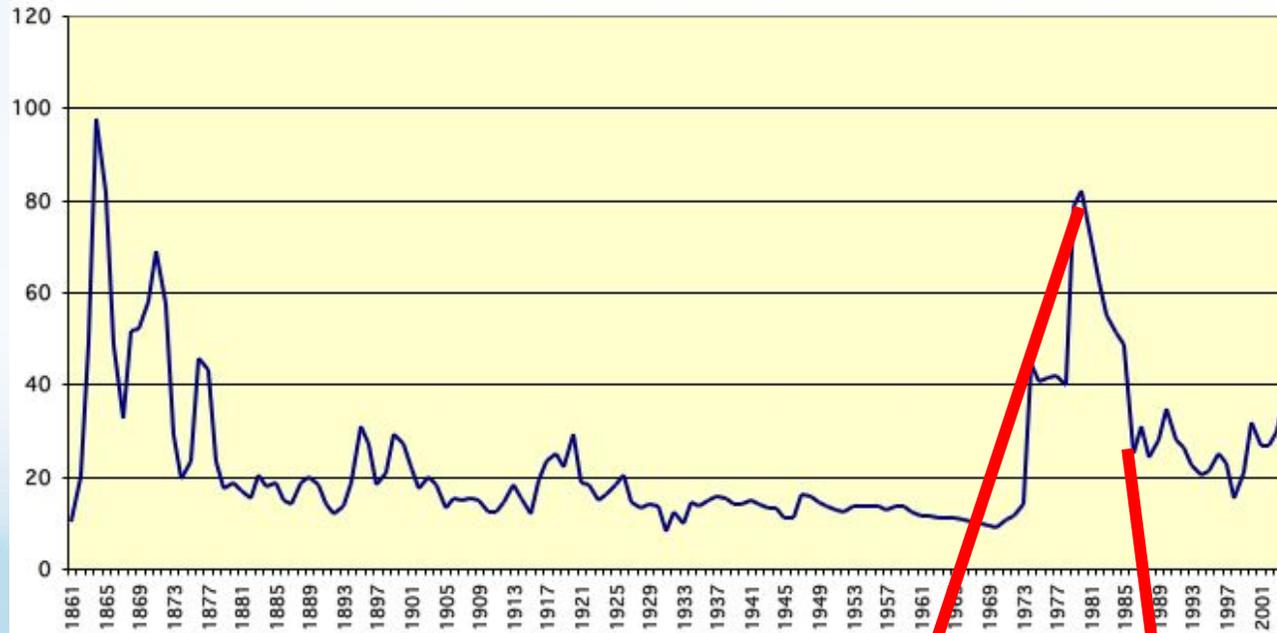
Nous avons tous appris ~~$P = F(K, W)$~~ . Les ressources naturelles ne sont pas dans la formation des prix : seuls y figurent le coût du travail humain, et le consentement - humain - à se défaire de sa propriété

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

Puisque le carbone n'est pas dans la formation des prix, l'économie ne permet pas de voir venir « toute seule » les risques présentés plus haut -> il faut une **investigation spécifique** (par exemple un Bilan Carbone)

Et quand le prix intervient, tout rentre dans l'ordre...



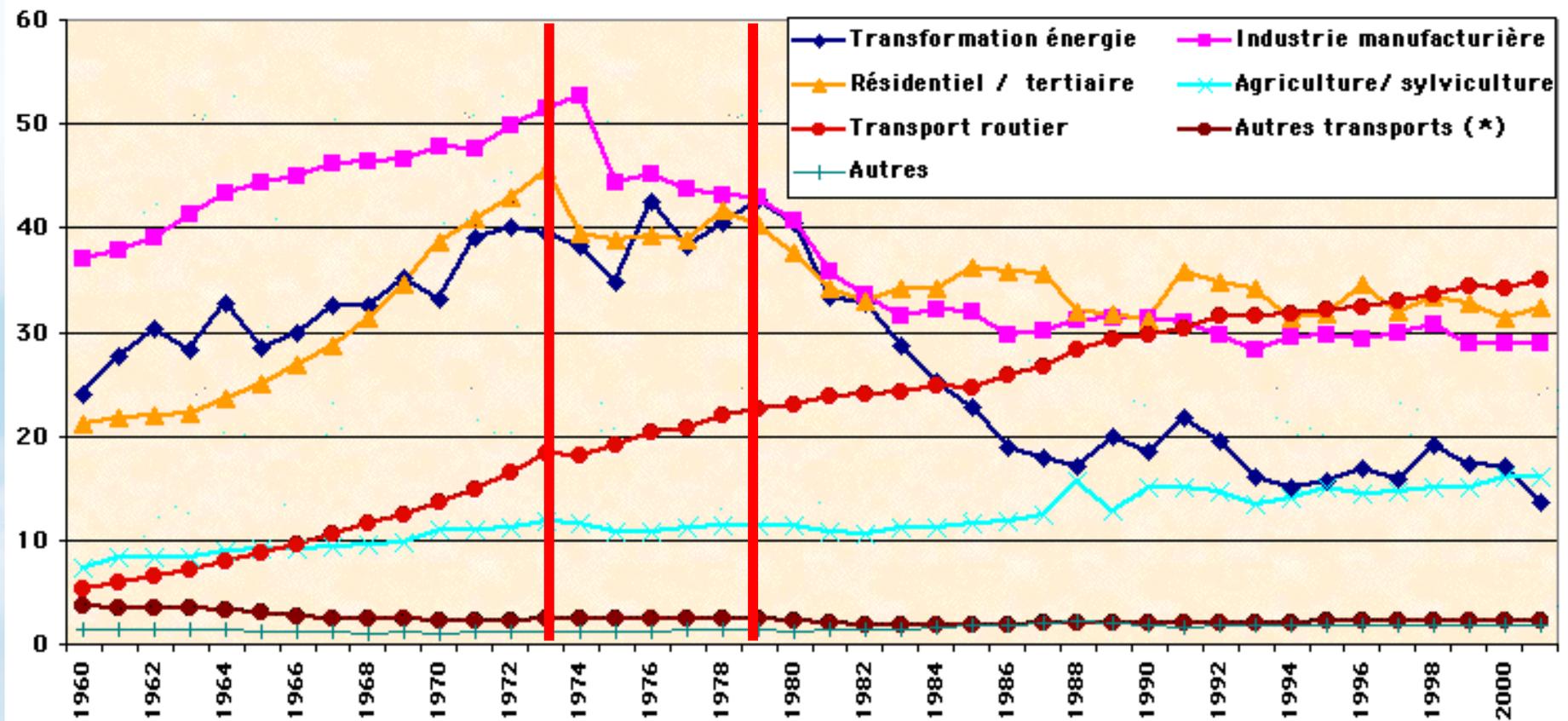
Prix du pétrole en
\$ constants (de
2004) depuis 1861.
Source BP
Statistical Review,
juin 2005

Consommation aux 100 km des
voitures neuves vendues dans
divers pays de l'OCDE.

Source GIEC



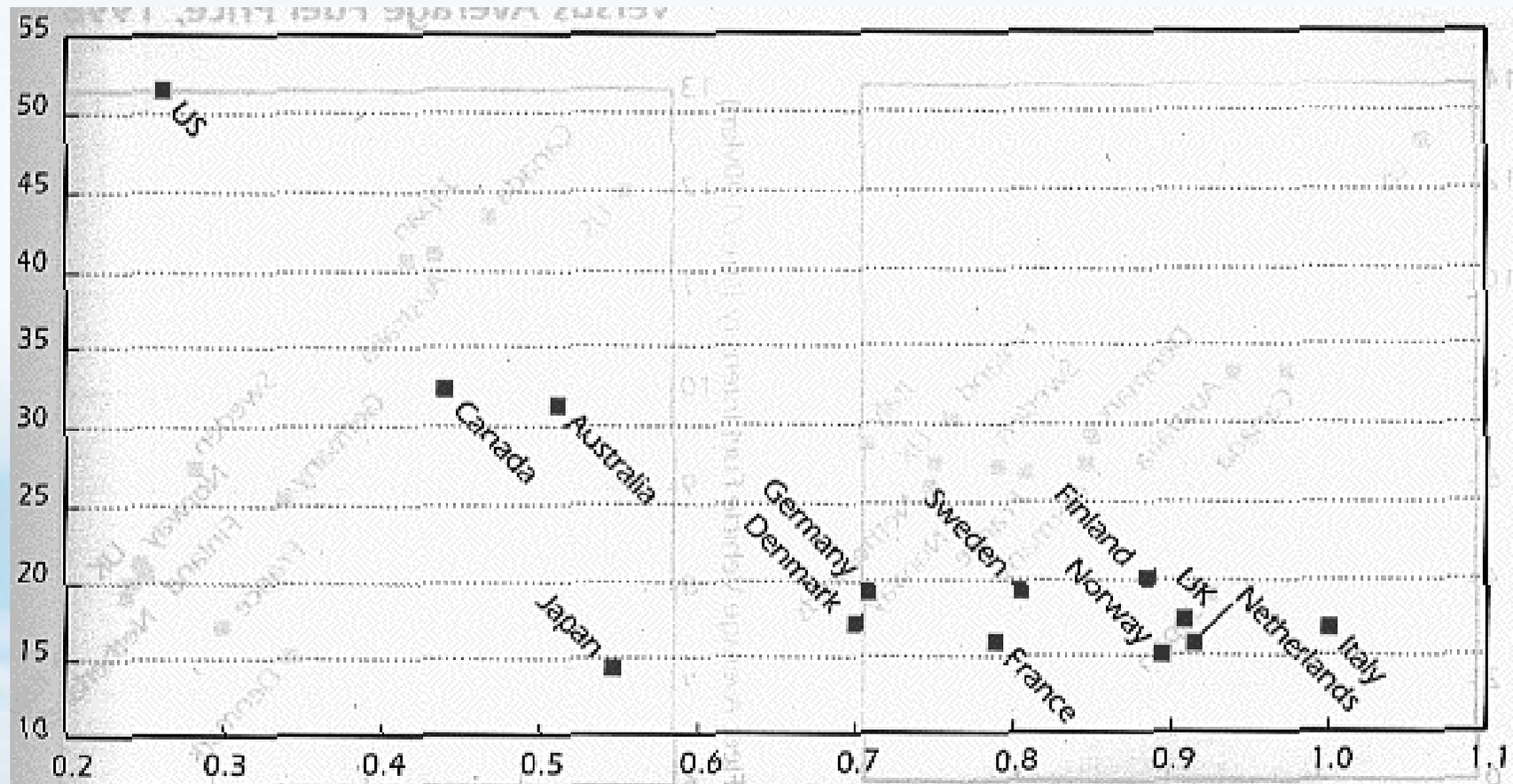
Et là ça marche ! (bis)



Emissions de CO2 par secteur entre 1960 et 2002 en France. L'effet des chocs pétroliers est très variable selon le secteur

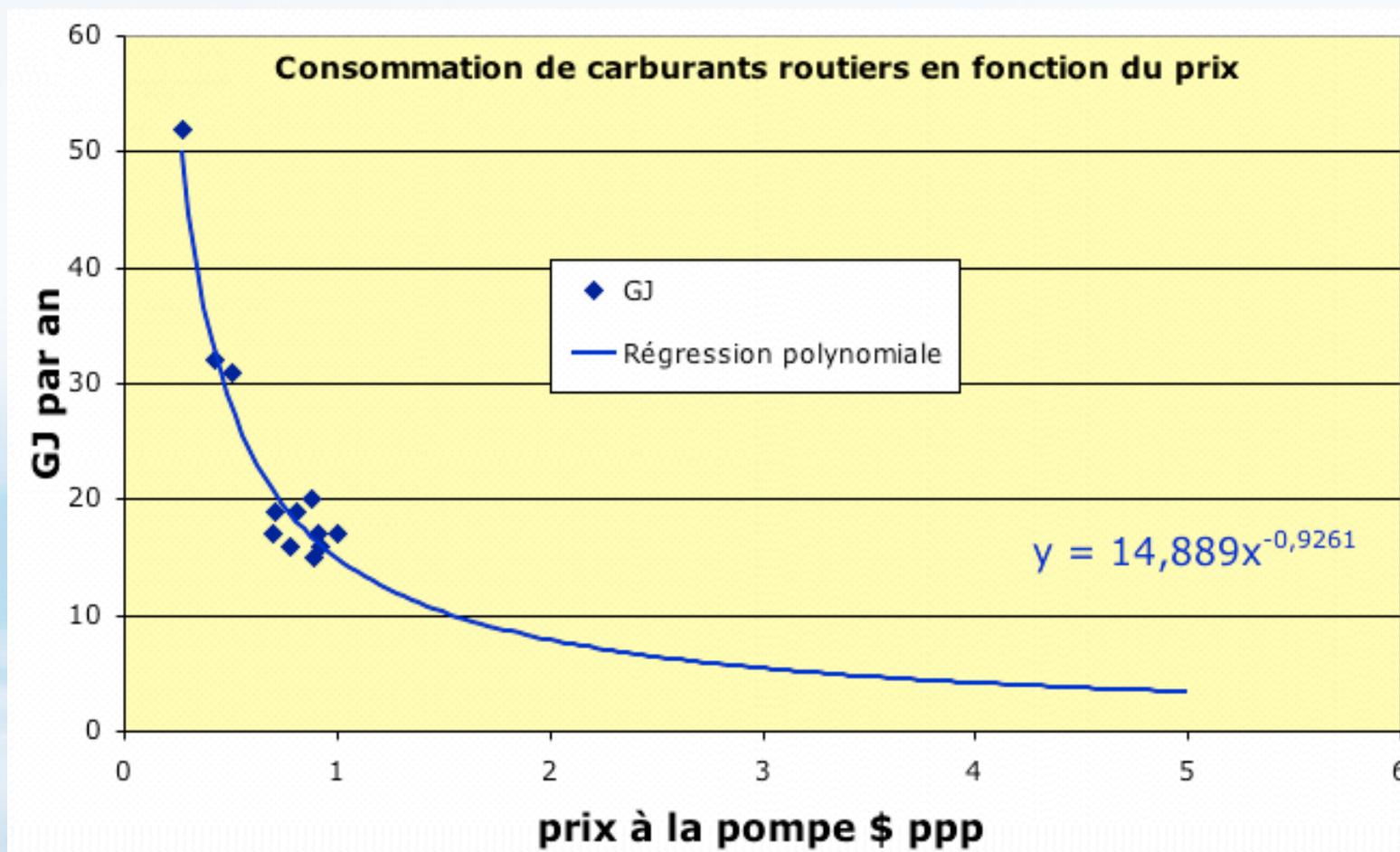
Source CITEPA, format SECTEN, 2002

Bis repetita placent....



Consommations de carburants routiers par habitant en 1998 (axe vertical, en gigajoules ; une tonne de pétrole \approx 42 GJ) en fonction du prix de détail TTC des carburants en \$ par litre (axe horizontal). Source AIE, 2004

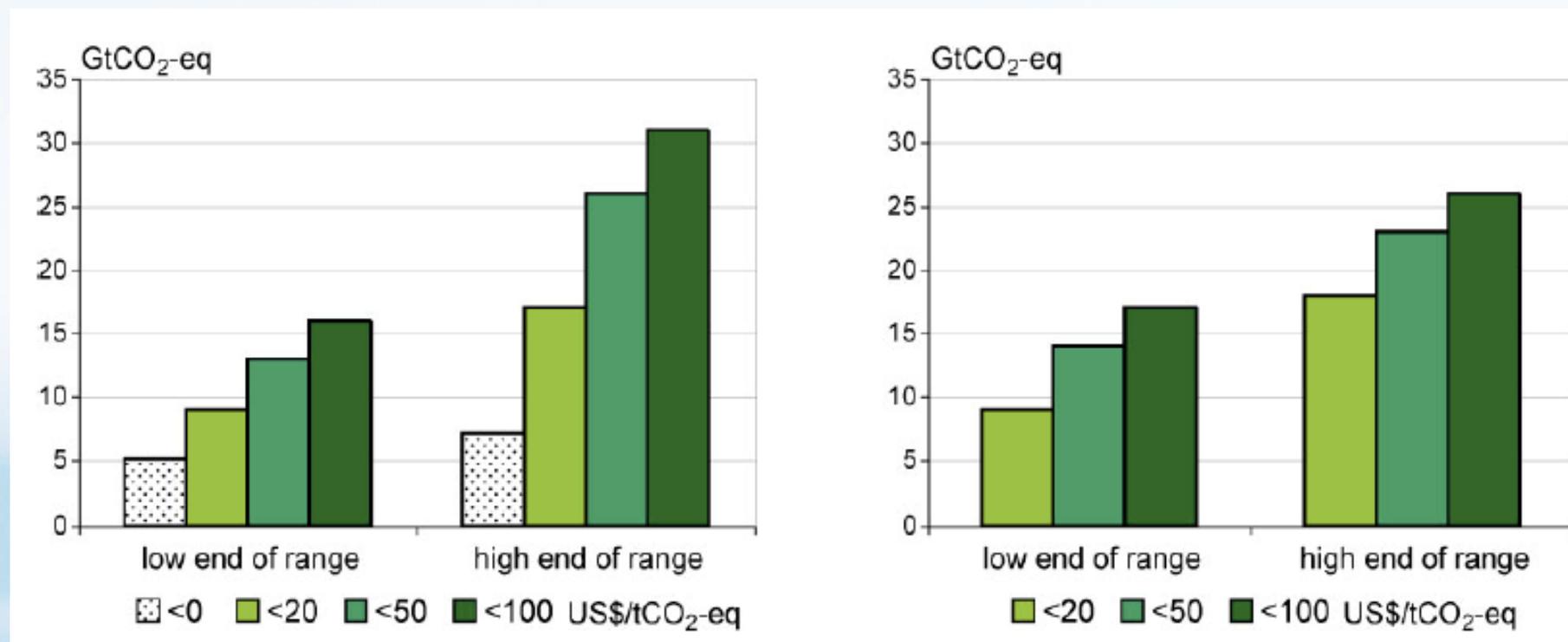
Bis repetita placent....



Même graphique que précédemment, avec prolongation tendancielle. Il faut que l'essence coûte (sur une période longue) environ 4 \$/litre (en prix constants) pour que la consommation soit divisée par 4 en France.

Calcul de l'auteur.

La vertu a un prix...



Ordre de grandeur des émissions évitées en 2030 par rapport au tendanciel en fonction du prix de la tonne de CO₂ (taxe, ou dispositif équivalent) :

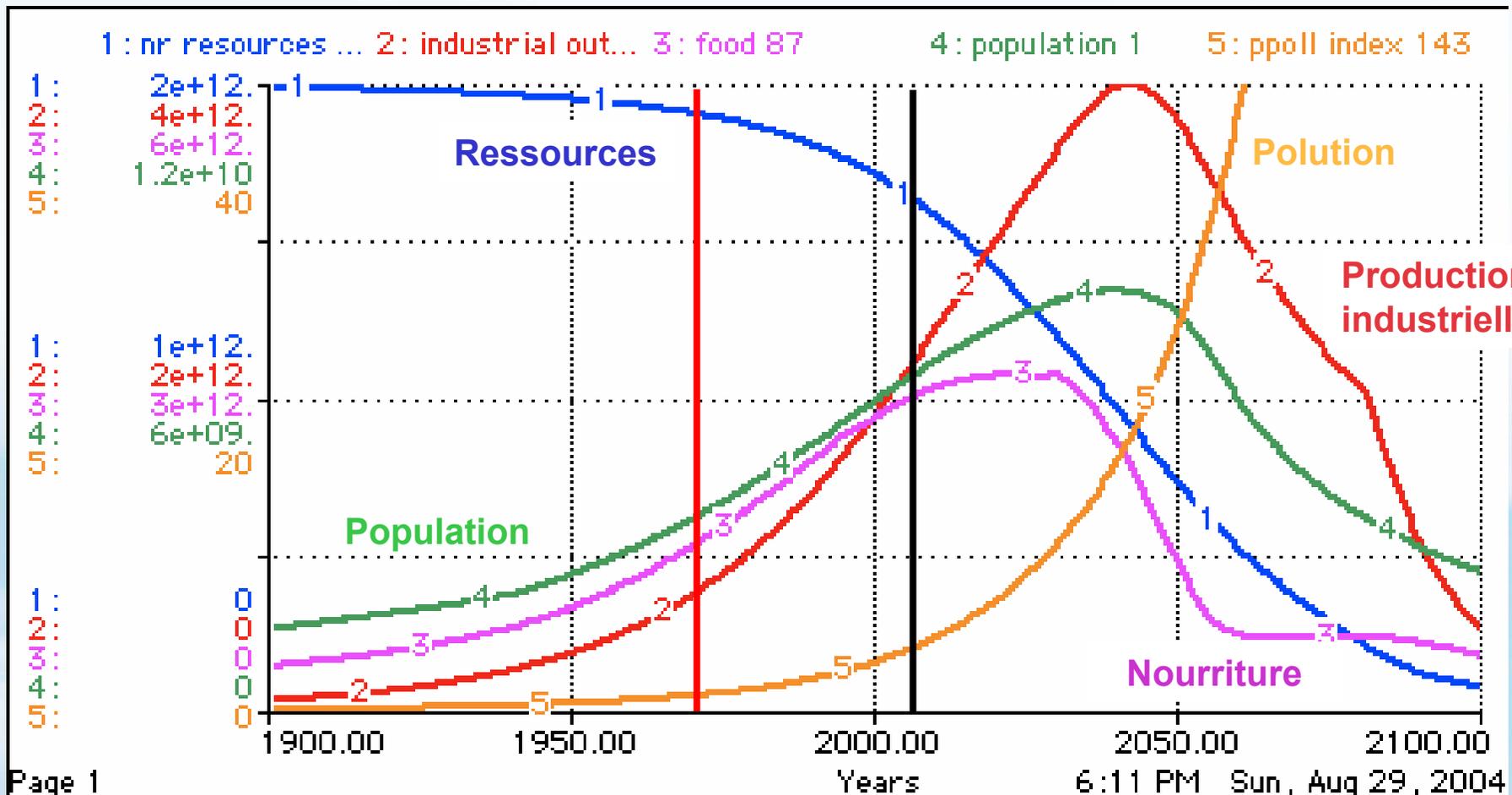
à gauche, addition d'études sectorielles

à droite, analyses macro.

NB : les émissions tendanciellees en 2030 sont comprises entre 50 et 80 Gt CO₂-eq.

Source : GIEC, 2007

...mais pas de vertu en a un bien plus élevé encore.



Page 1



?

State of the World

Scénario « business as usual » du rapport Meadows (« The Limits To Growth », improprement traduit en Français par « Halte à la croissance ? »)