



**La transition énergétique...
certes, mais laquelle ?**

**Club 44
11 mai 2015**

Jean-Marc Jancovici

jmj@manicore.com

jean-marc.jancovici@carbone4.com

jean-marc.jancovici@theshiftproject.org

Commençons par la petite note de bas de page qui dit l'essentiel

En 1 heure d'exposé, on fait... 1 heure.

Si mon exposé n'apporte pas la réponse à toute question que vous vous posez, il est possible que cette limite horaire joue un tout petit rôle !

En général, les malentendus (et les procès d'intention) iront se nicher dans tout ce qui n'aura pas été dit faute de temps



Selon vous, qu'est-ce que l'énergie ?

♦A:

**Ma facture d'électricité
(voire de gaz)**

♦B:

**Il faut l'économiser, mais
pourquoi ?**

♦C:

**Ce que l'on ressent un matin
où l'on est en forme**

♦D:

**Ce qui organise le monde,
ou j'ai dit une bêtise ?**

Nietzsche voulait des surhommes : le pétrole l'a fait



80 kg + 10 kg
x 2000 m de
dénivelée
≈ 0,5 kWh

→
x 10

1 jour sur 2 : 100 kWh/an
Au SMIC : 200 €/kWh

→
÷ 500

Même un esclave : 4-40 €/kWh

→
÷ 10-100

6 m³ terre x 1 m
0,05 kWh
(10 kWh/an)
2000 €/kWh



→
x 100

→
÷ 5000



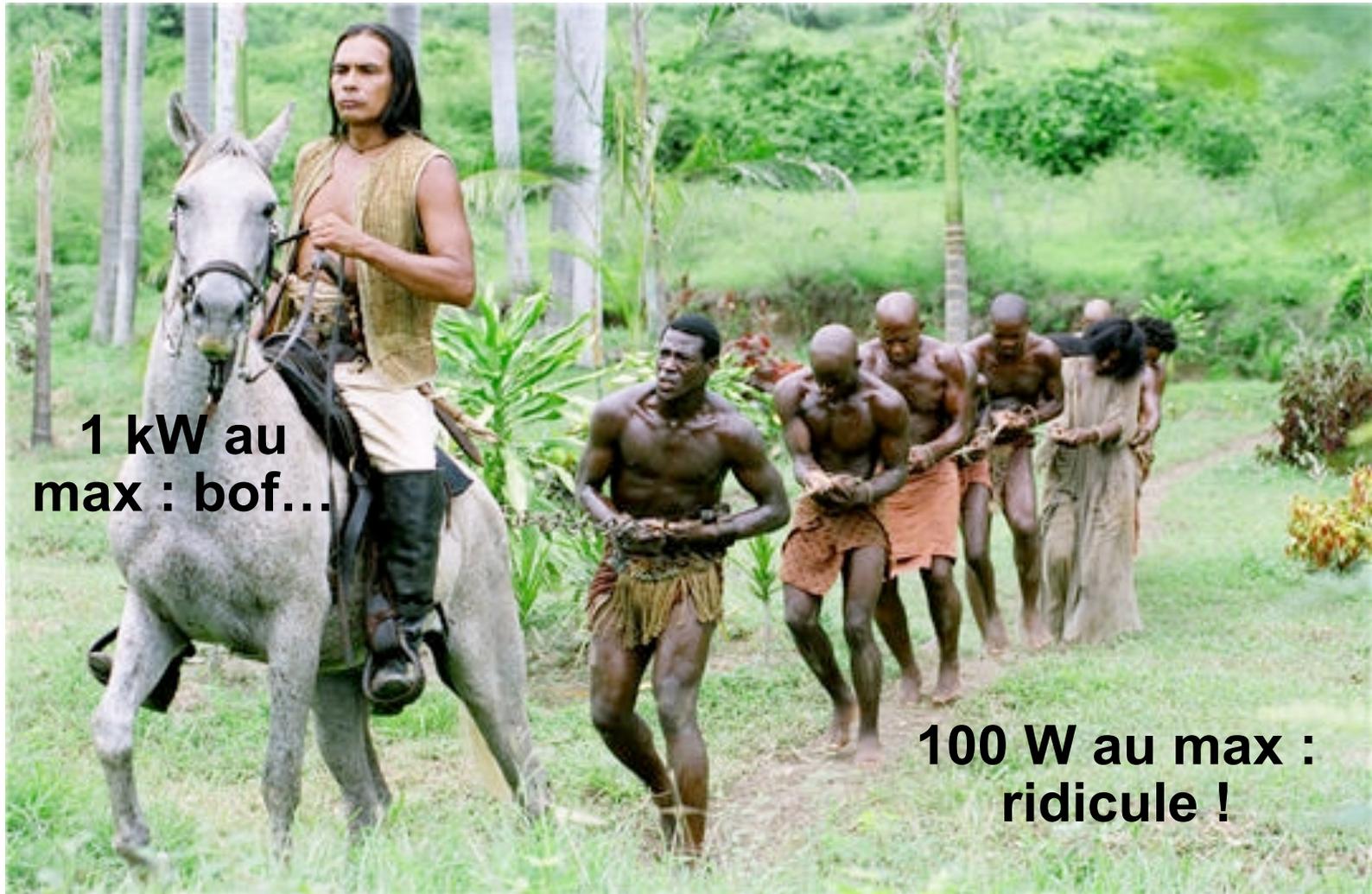
1,5 €/L :
0,4 €/kWh

10 kWh
2-4 kWh
mécanique

1 L



Avant charbon, pétrole, & co : pas moral, peu efficace, mais parfaitement durable



1 kW au max : bof...

100 W au max : ridicule !

Avec pétrole & co : très efficace, très moral, mais hélas pas durable du tout...



= 100 W pour les jambes, 10 W pour les bras



= 60 kW \approx **600** paires de jambes
(ou 100 vrais chevaux)



= 100 kW \approx **10.000** paires de bras



= 400 kW \approx **4.000** paires de jambes

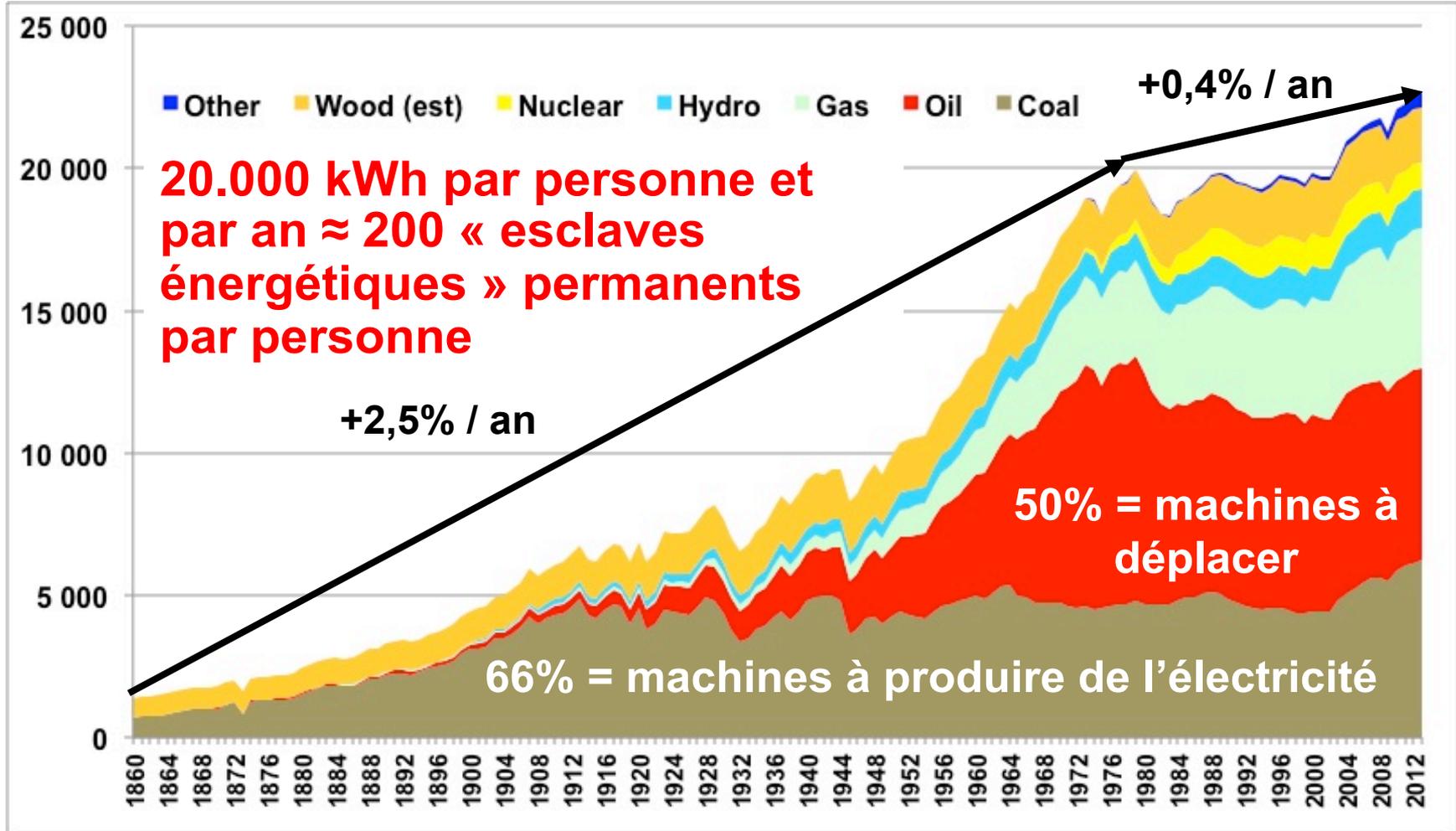


= 100 MW \approx **1.000.000** paires de jambes...



= 100 MW \approx **10.000.000** paires de bras !

Miam miam kWh pour plein de machines...



Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale, de 1880 à 2013.
 Jancovici, 2014, sur sources Schilling et al., 1977, BP Statistical Review, 2014, World Bank, 2014

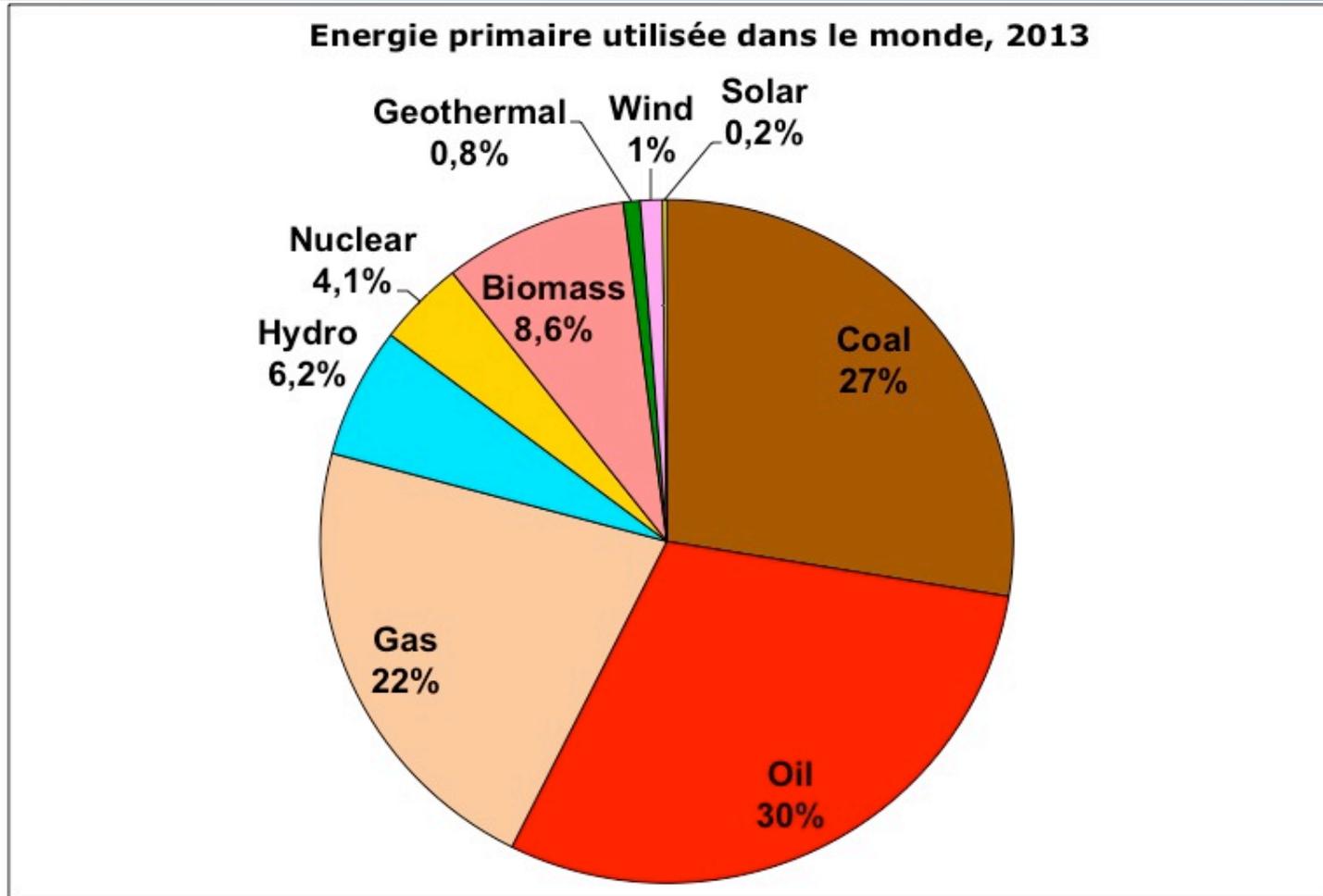
Les voici, nos esclaves des temps modernes !



200 (moyenne mondiale) à 600 (moyenne française)

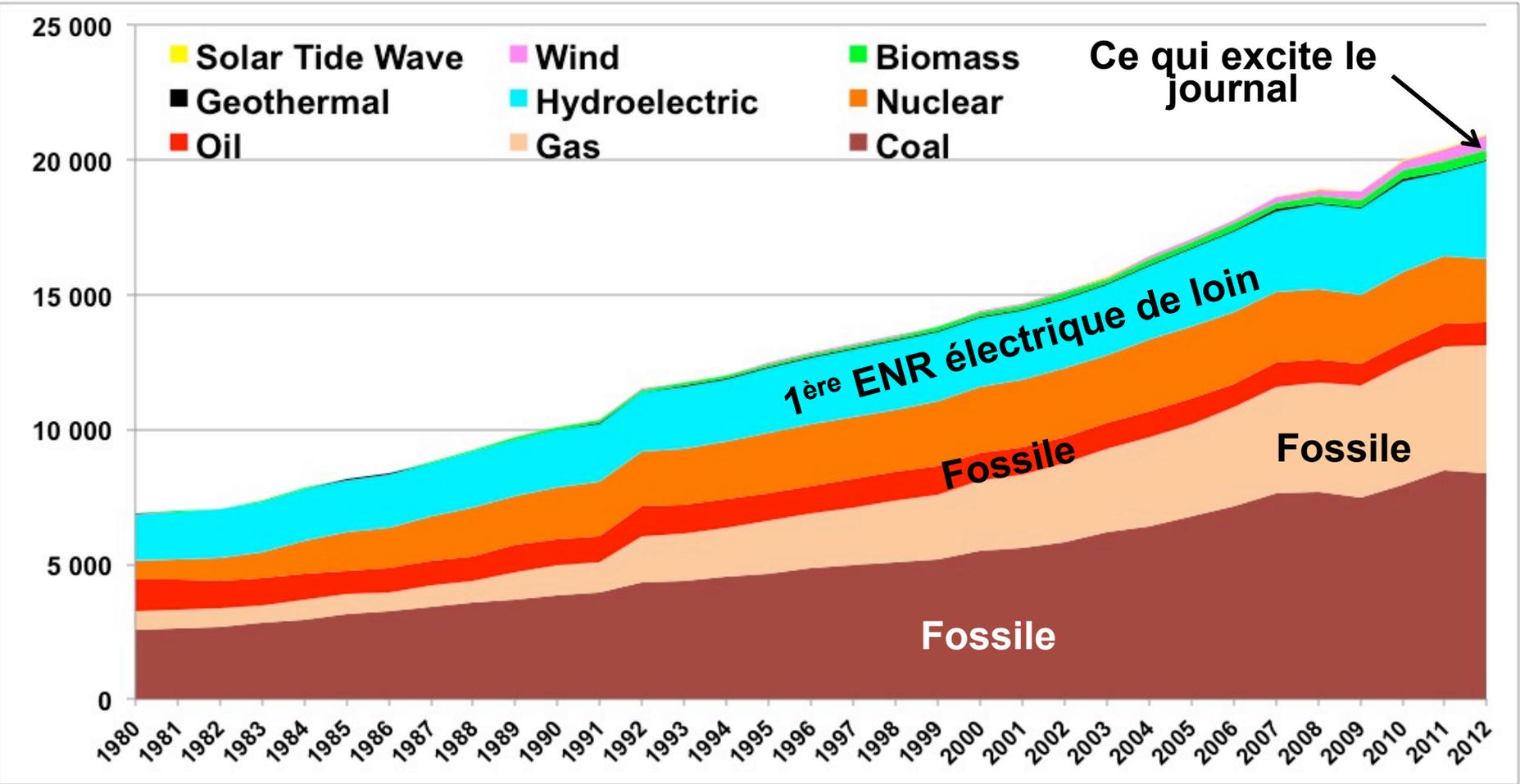


Nos esclaves des temps modernes mangent du carbone, comme nous



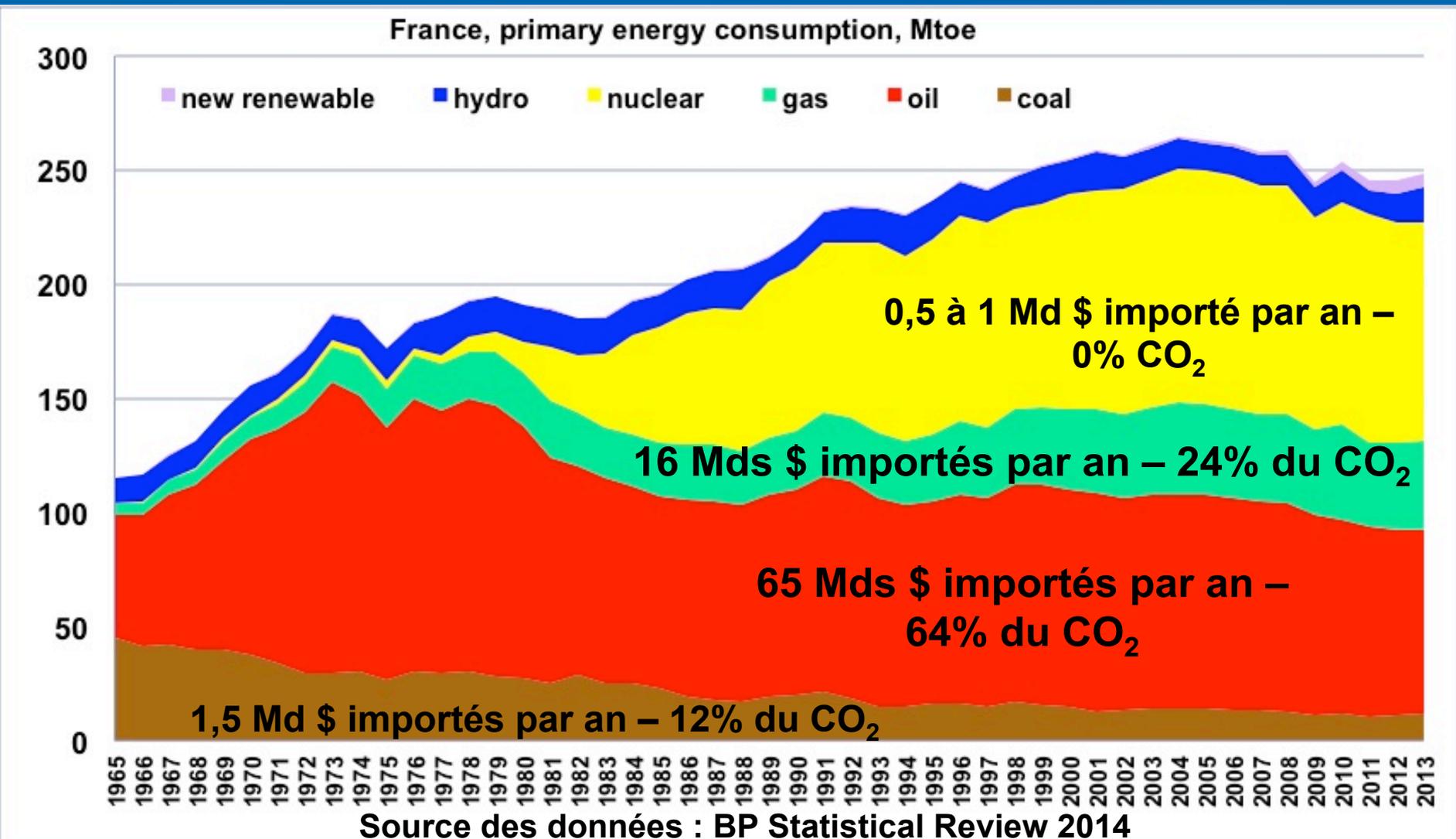
Répartition de la consommation d'énergie primaire dans le monde en 2013. Jancovici, sur données BP Statistical Review

L'électricité sent aussi assez fort le carbone !

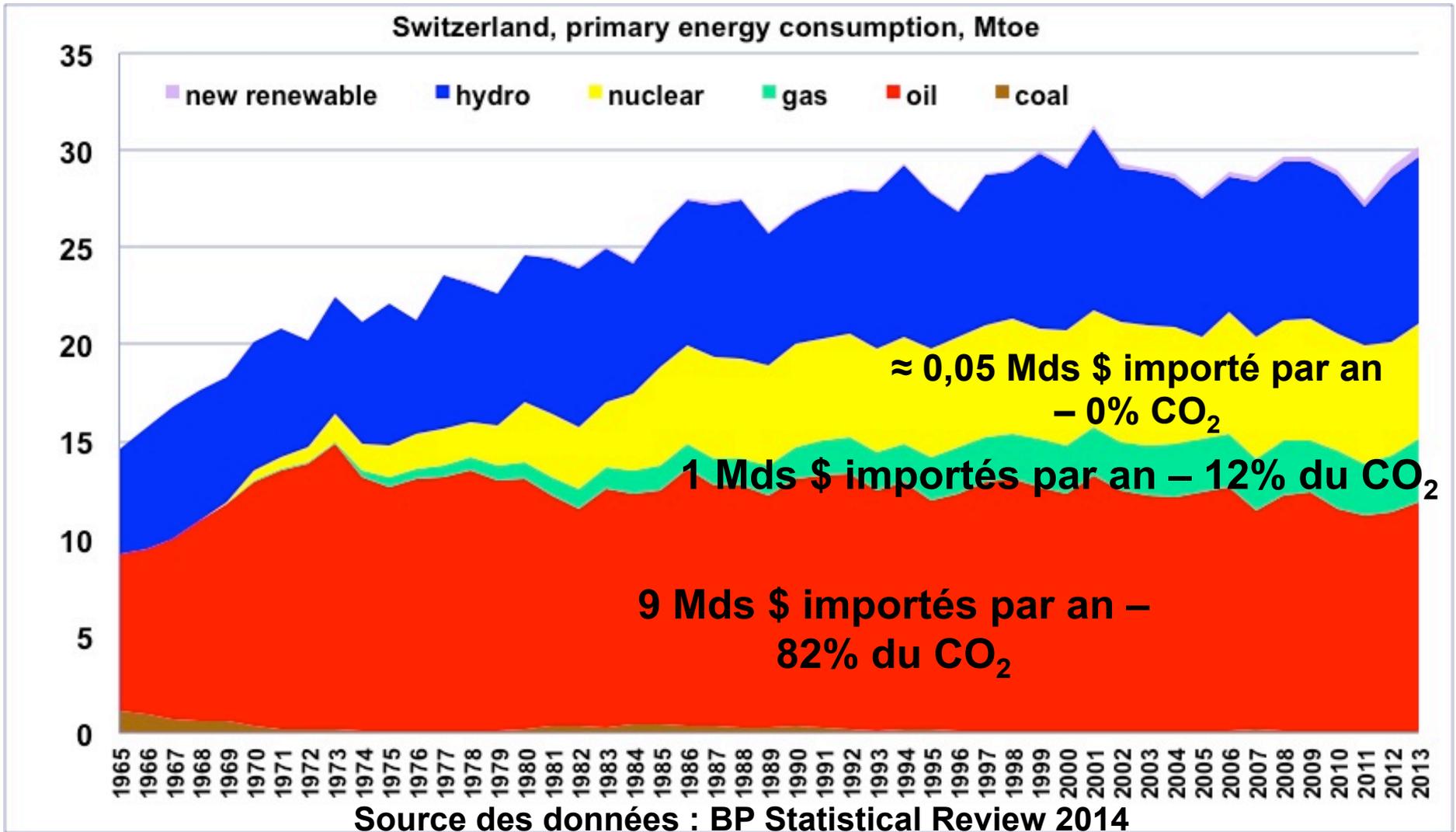


Production mondiale d'électricité, en milliards de kWh, par énergie primaire. Source US EIA Historical Statistics for 1980-2012 in www.tsp-data-portal.org

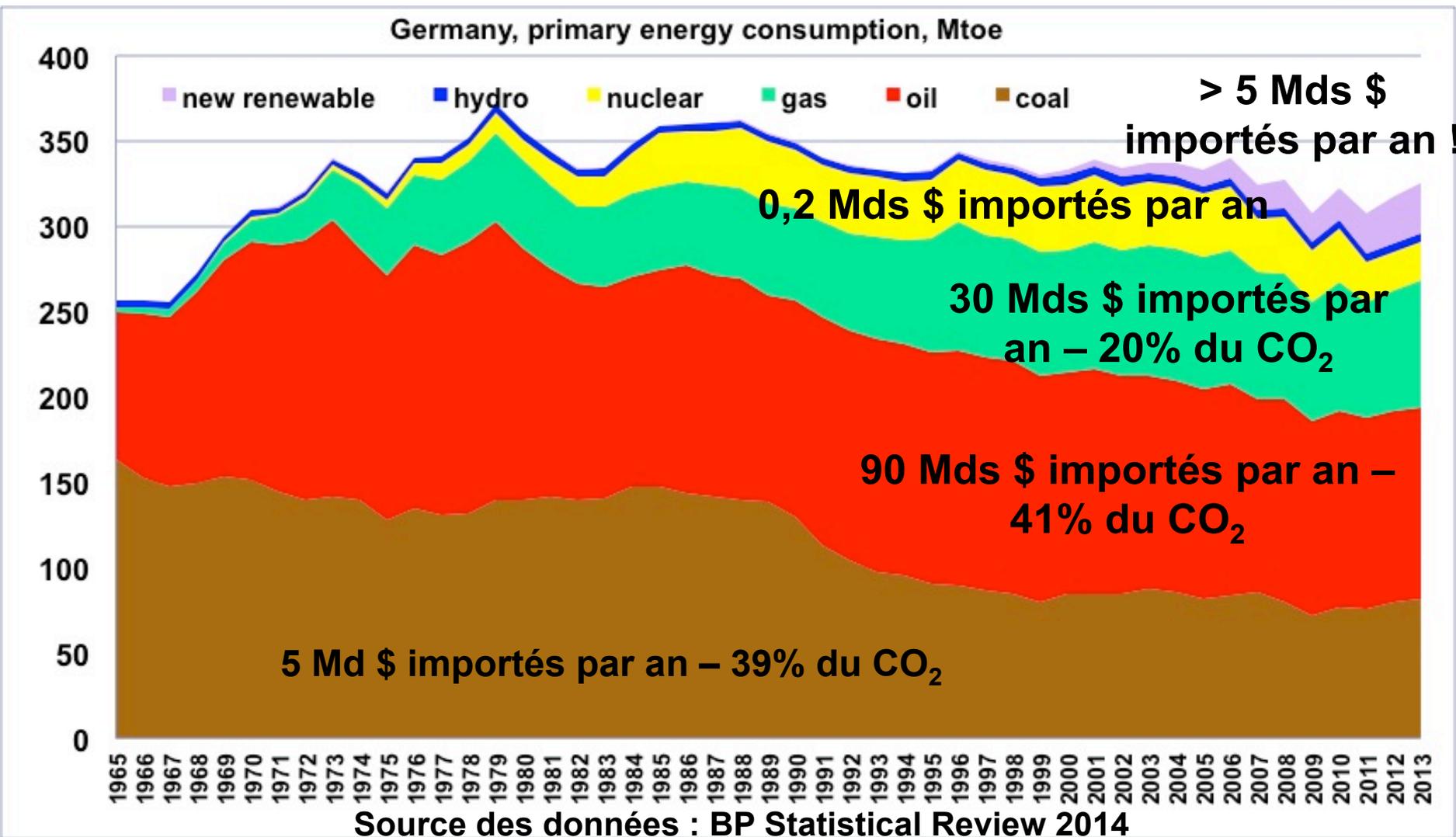
La France, pays « tout nucléaire » ?



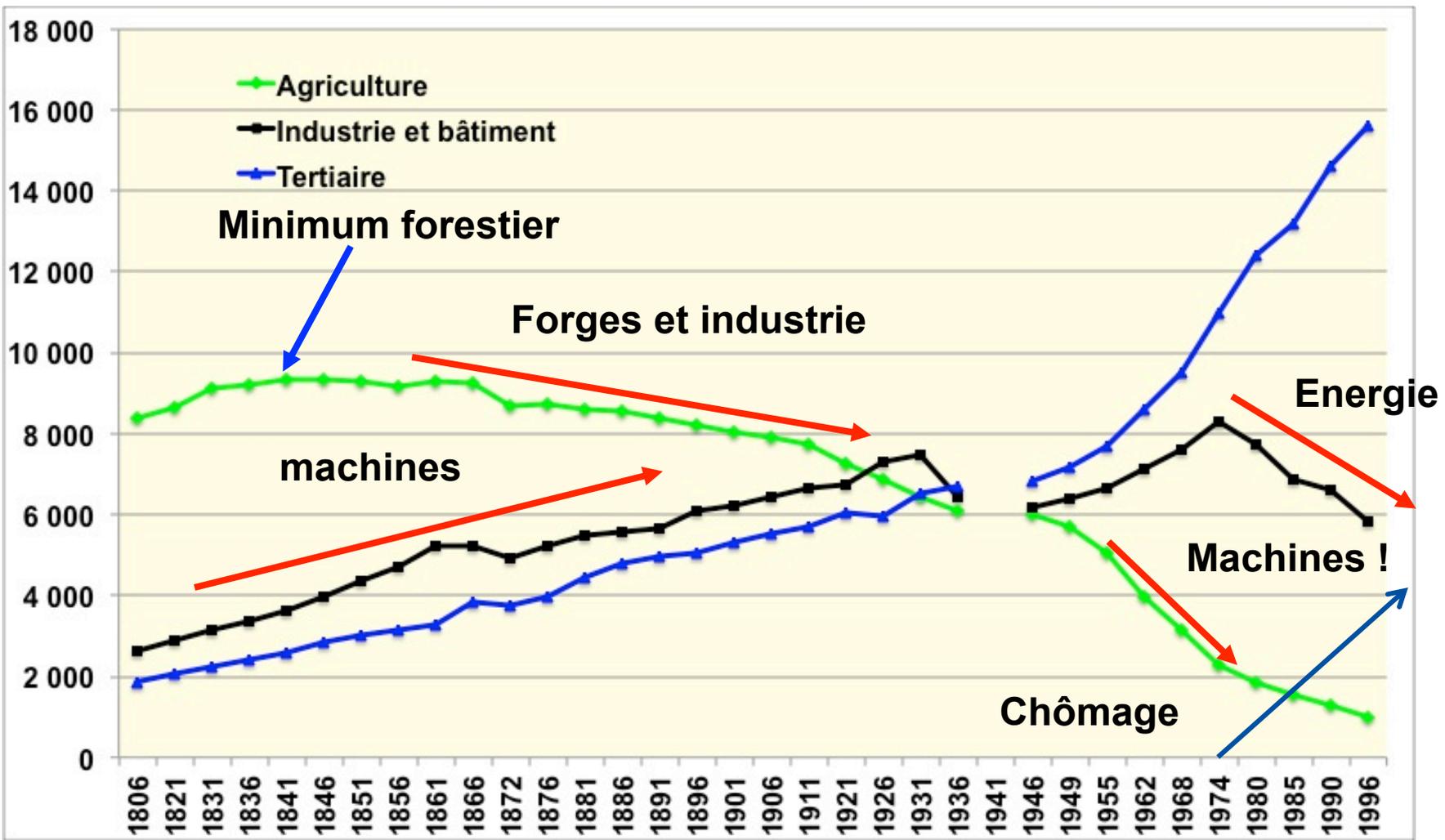
Qui se voisine présente quelques ressemblances...



Qui se voisine présente quelques ressemblances (bis)...

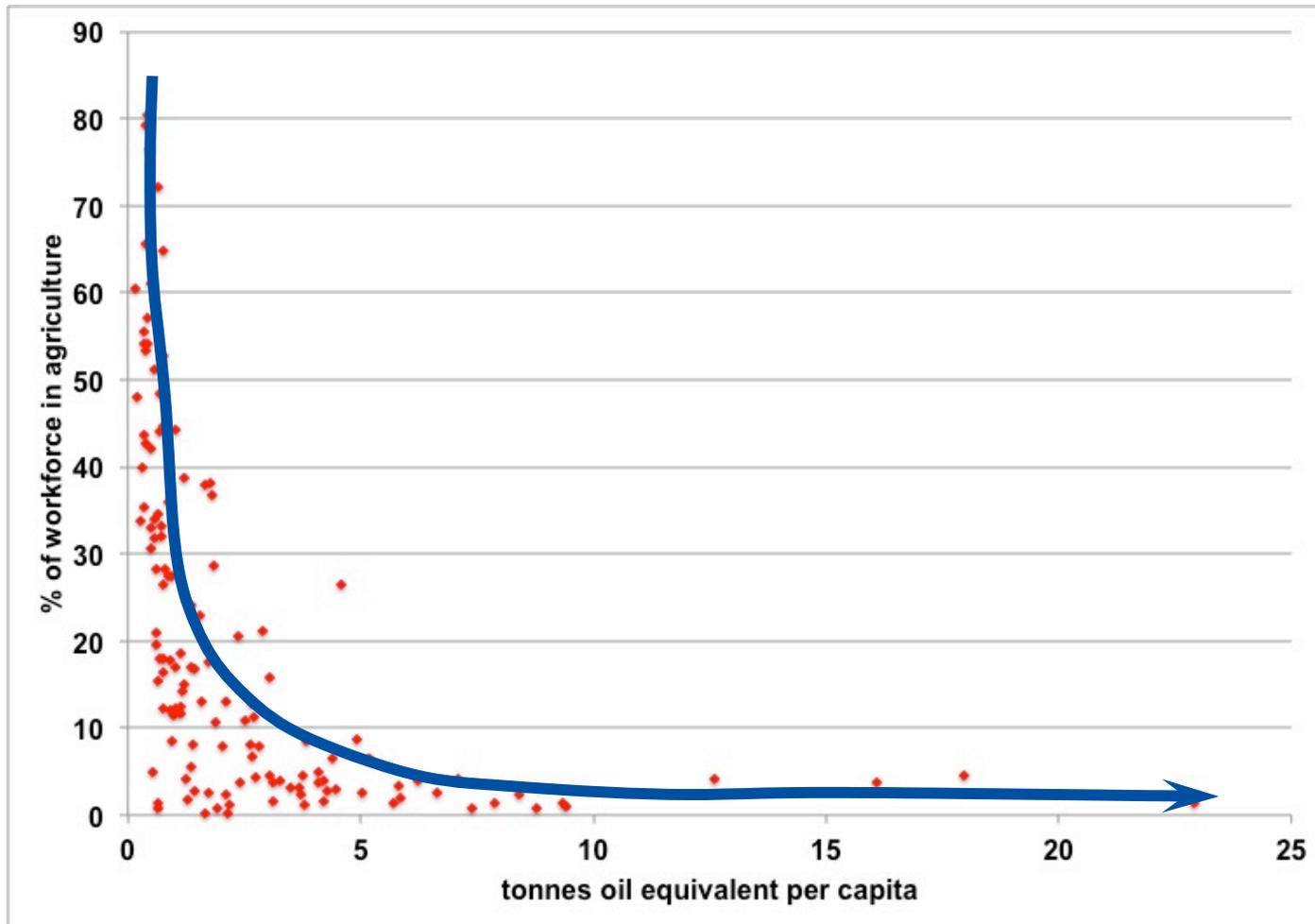


Plus d'énergie = tout le monde à la mine, puis à l'usine, puis au bureau



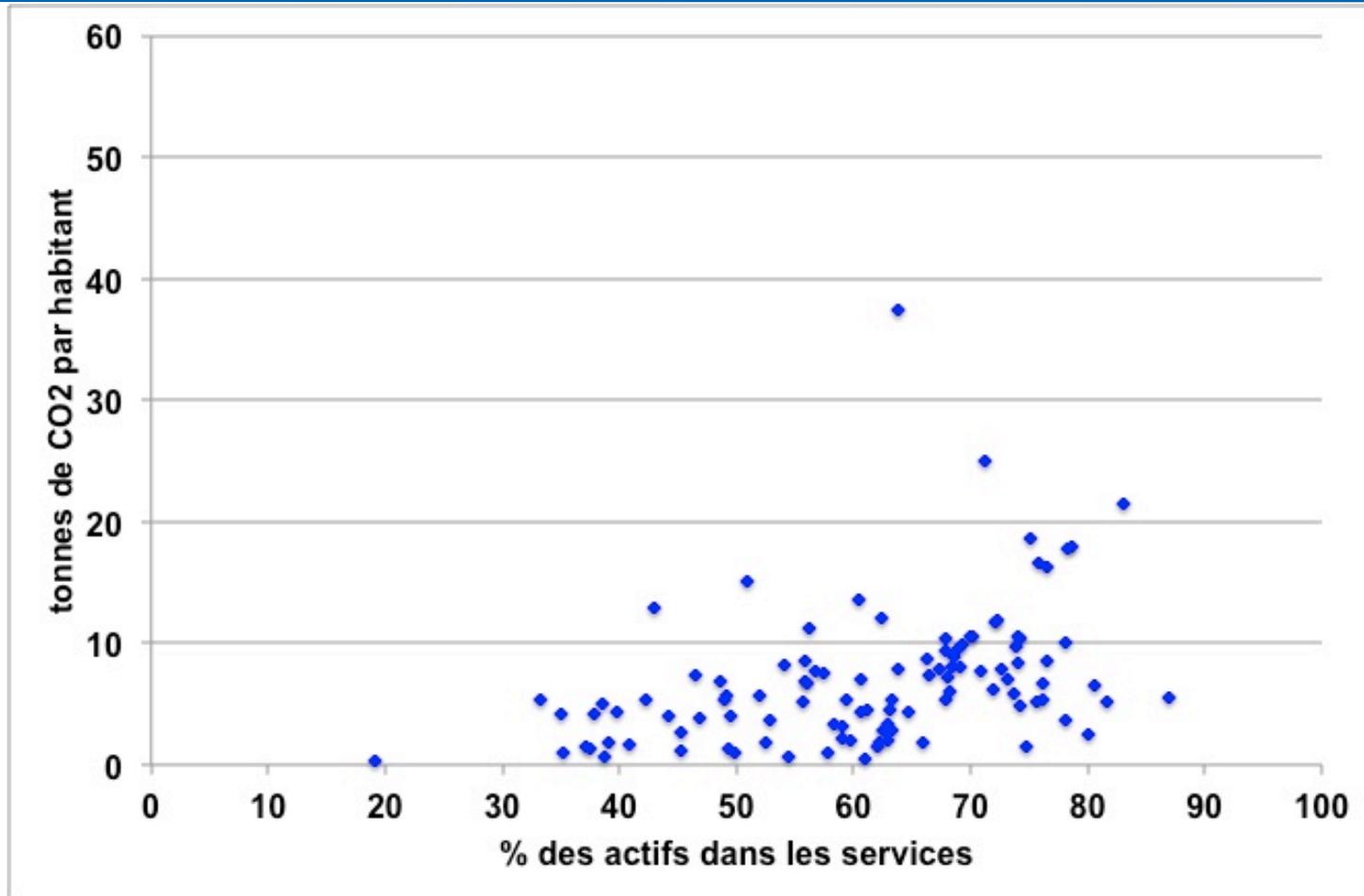
Nombre d'actifs en France par catégorie sur 2 siècles. Source INSEE.

Peut-on cultiver des patates et faire autre chose ?



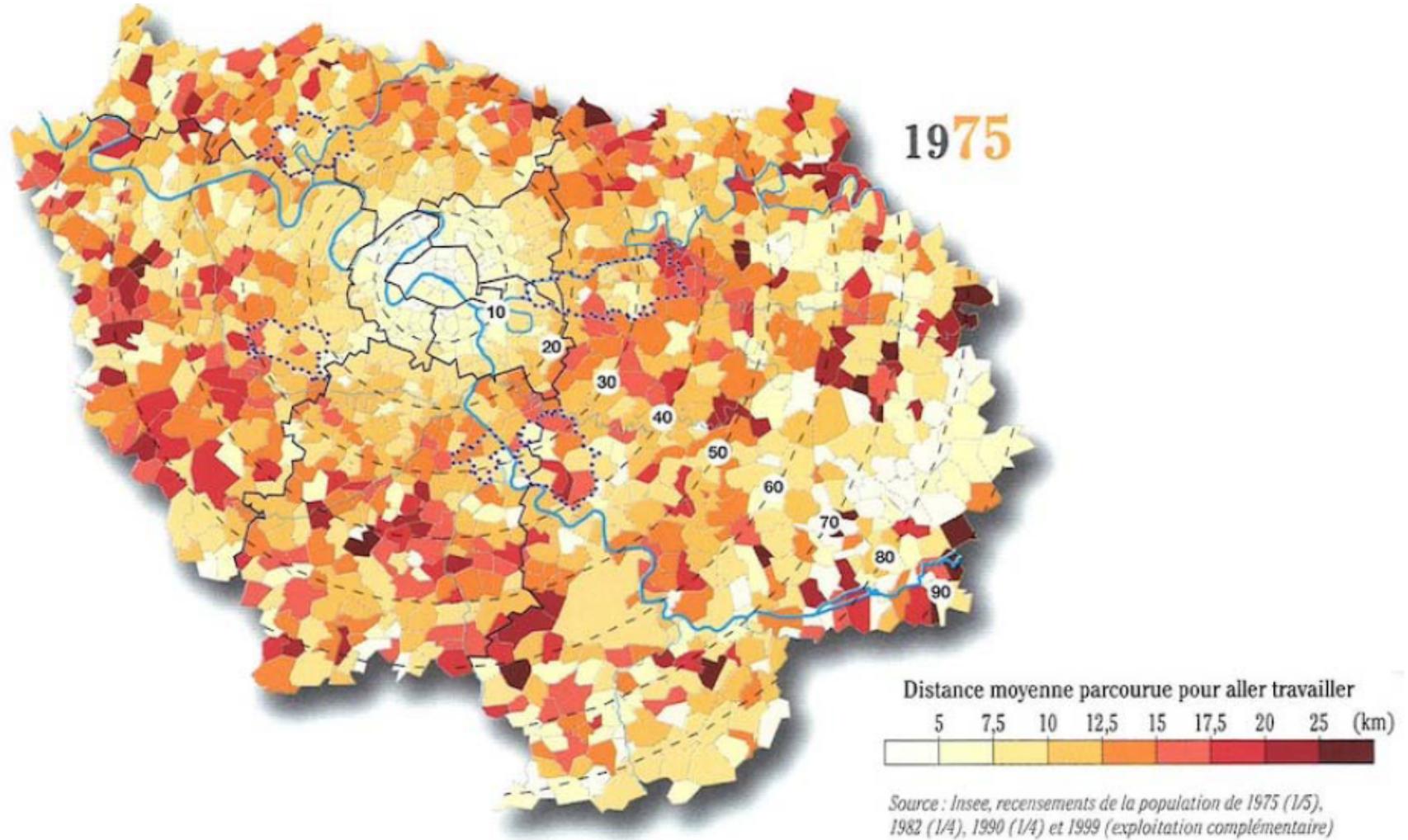
Energie par personne et par an vs. % de l'emploi dans l'agriculture. Données World Bank, 2013

+ tertiaire = + dématérialisation ?



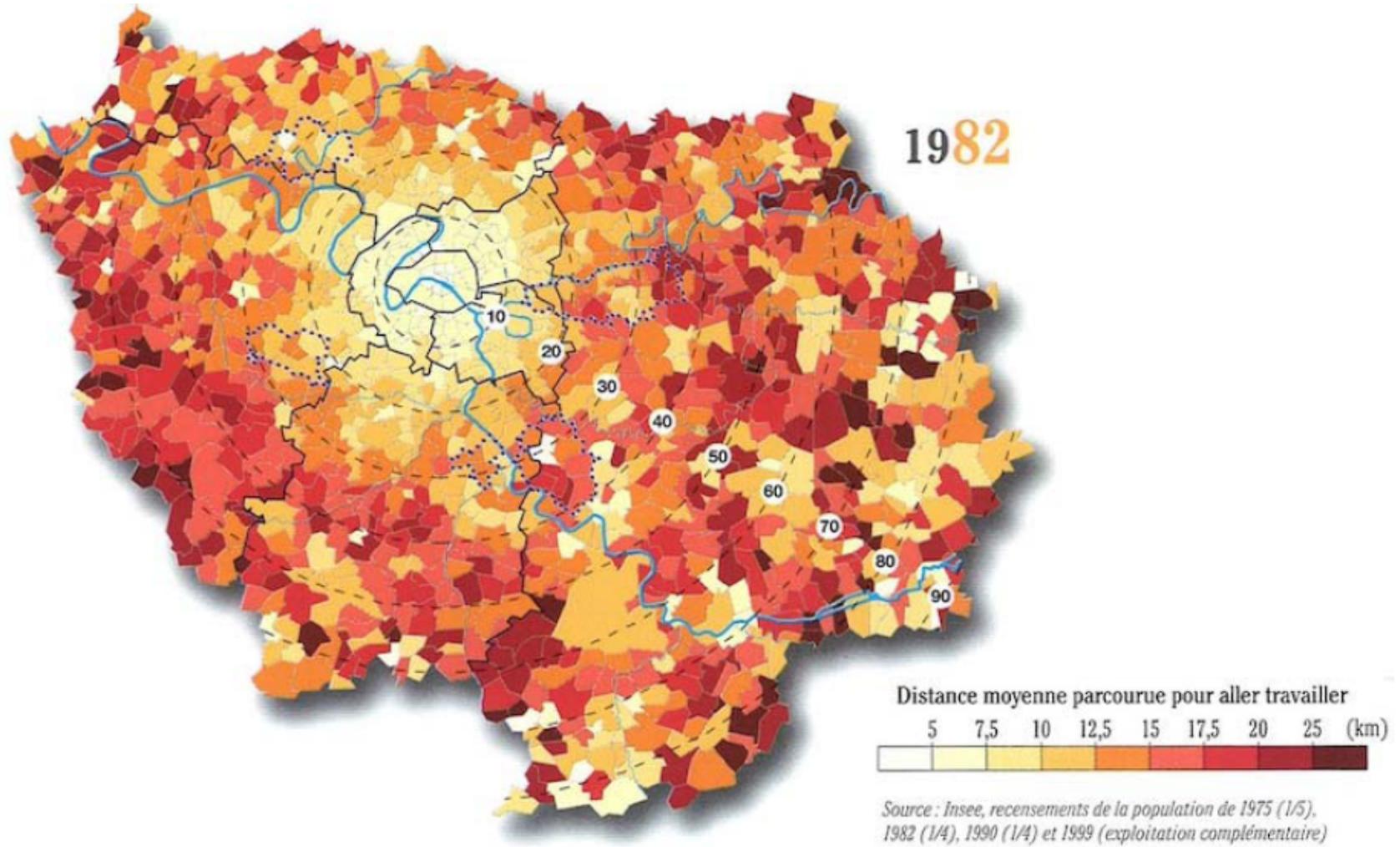
Emissions de CO₂ par personne et par an vs. % de l'emploi dans les services en 2010. Sources World Bank, 2012

Energie à gogo = des gens qui jouent à la ville depuis la campagne



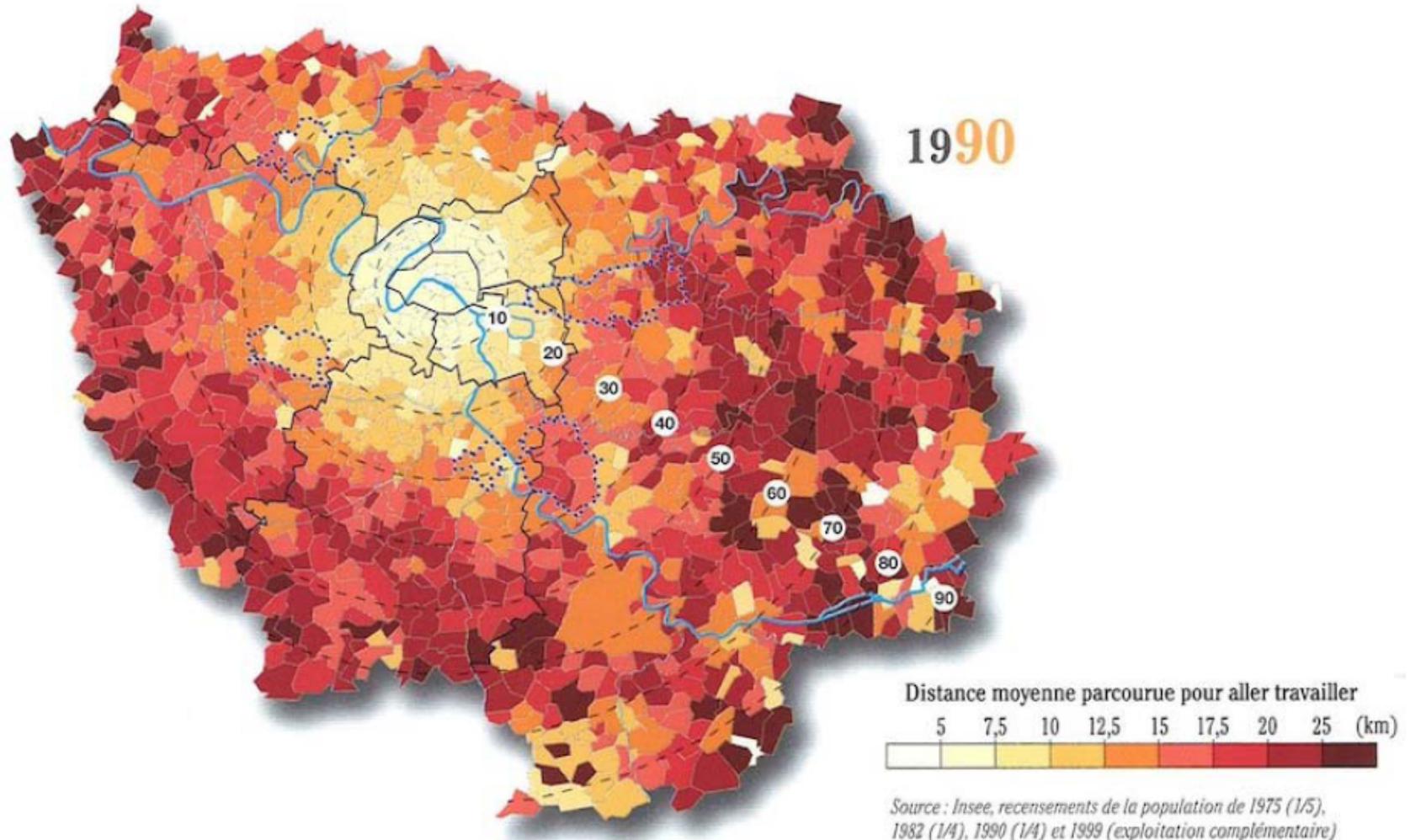
Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ». Source INSEE

Energie à gogo = des gens qui jouent à la ville depuis la campagne



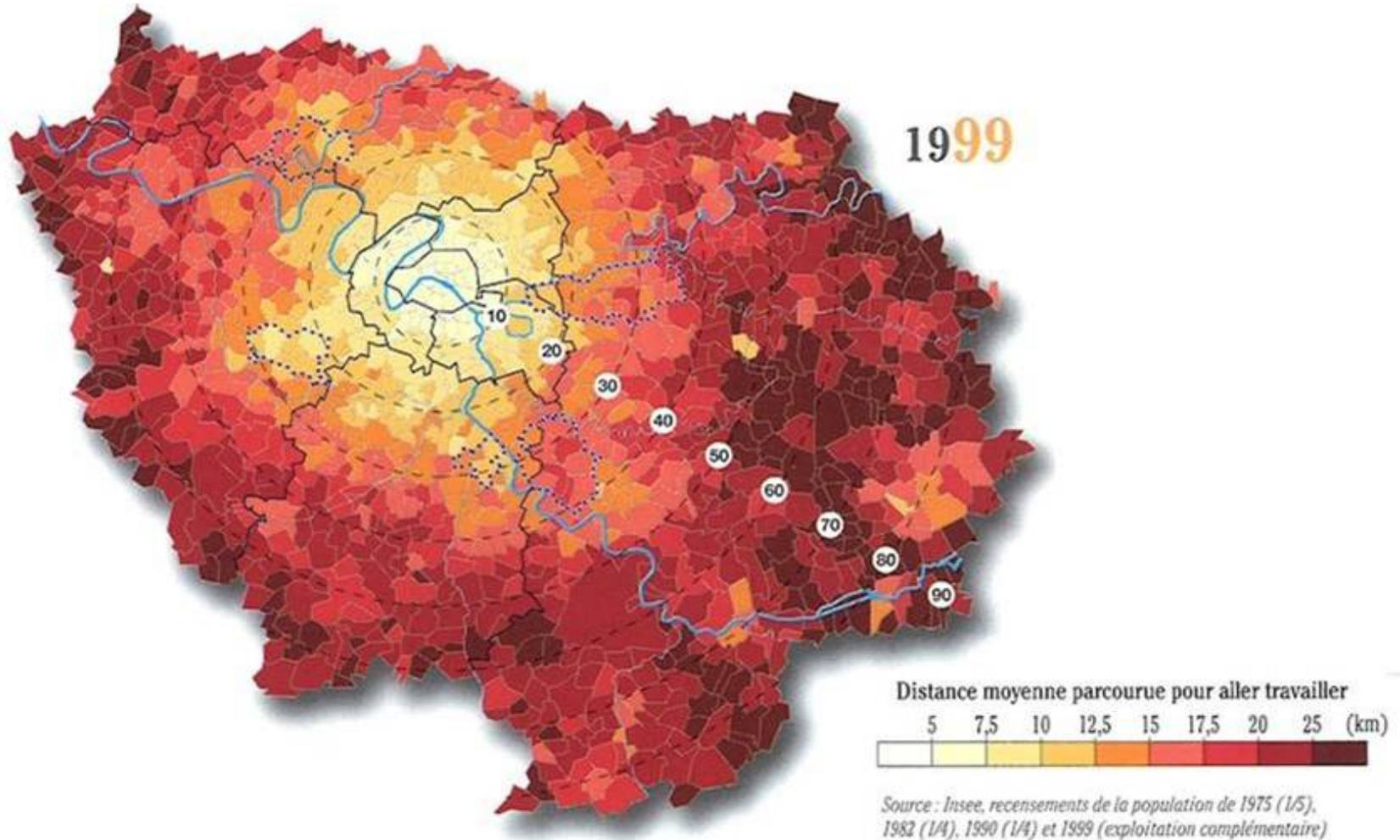
Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ». Source INSEE

Energie à gogo = des gens qui jouent à la ville depuis la campagne



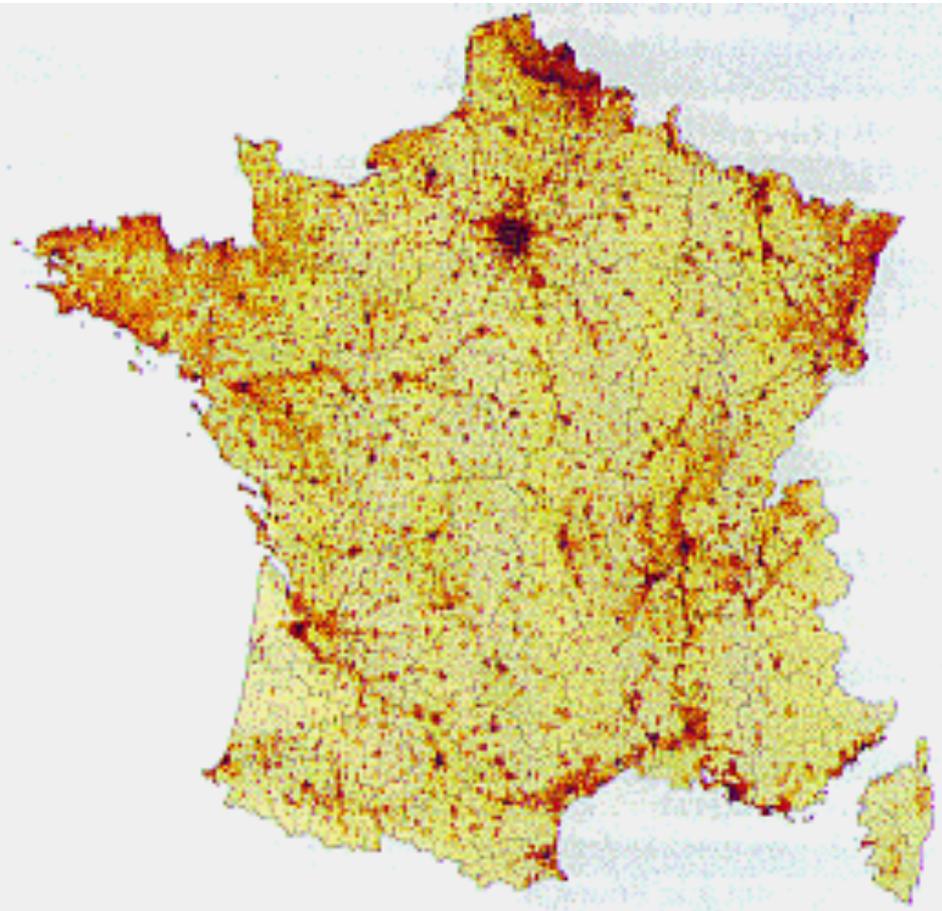
Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ». Source INSEE

Energie à gogo = des gens qui jouent à la ville depuis la campagne

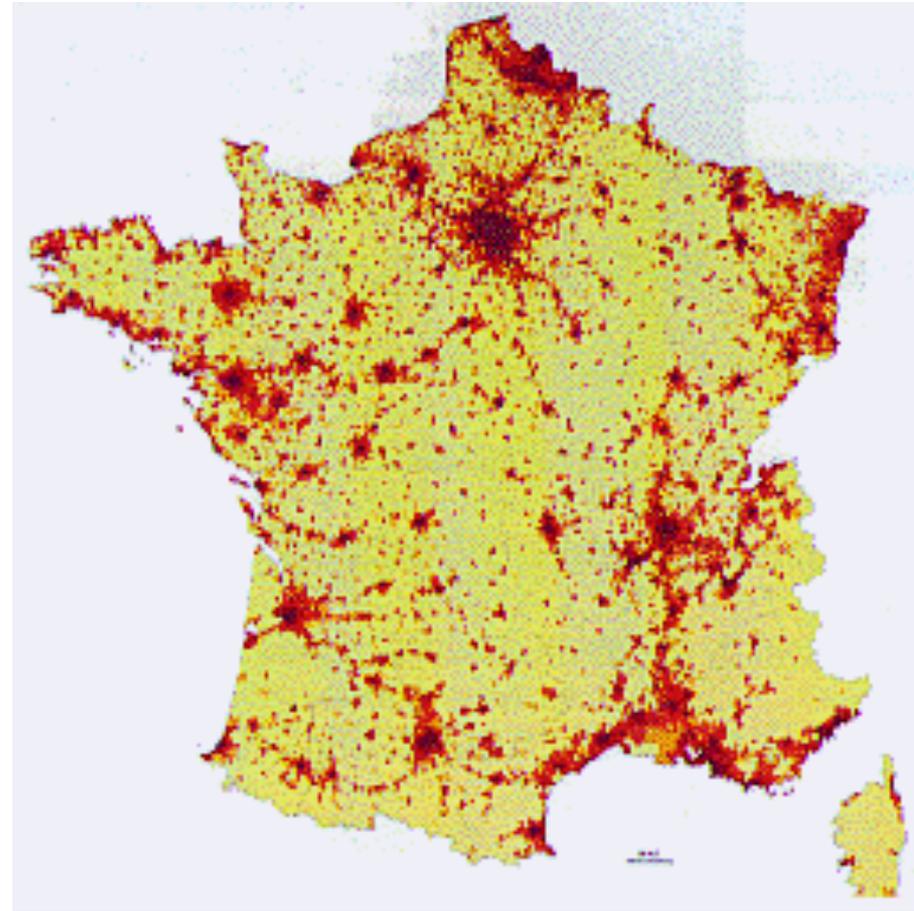


Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ». Source INSEE

Nos élus, ou le pétrole ?



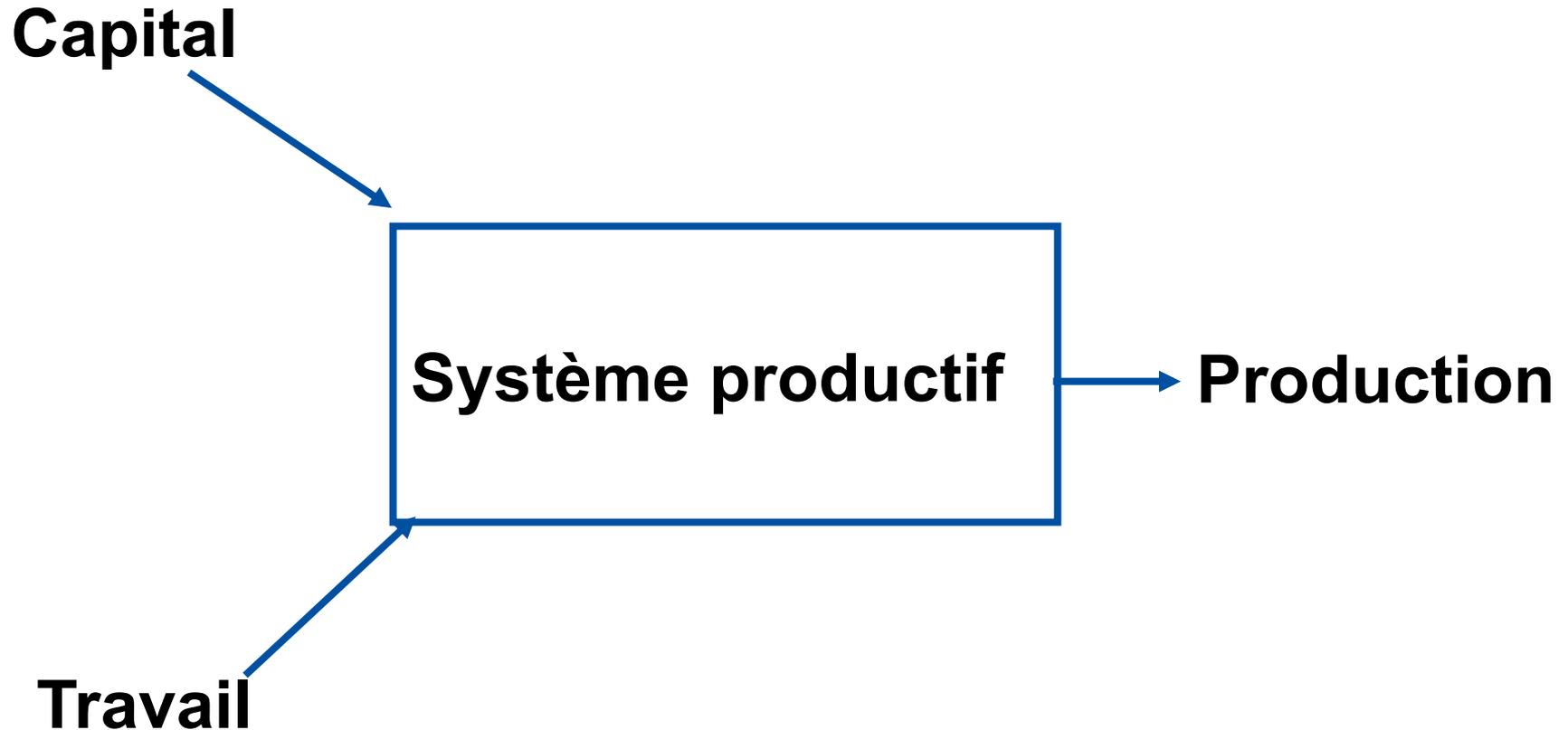
1936, 42 millions d'habitants



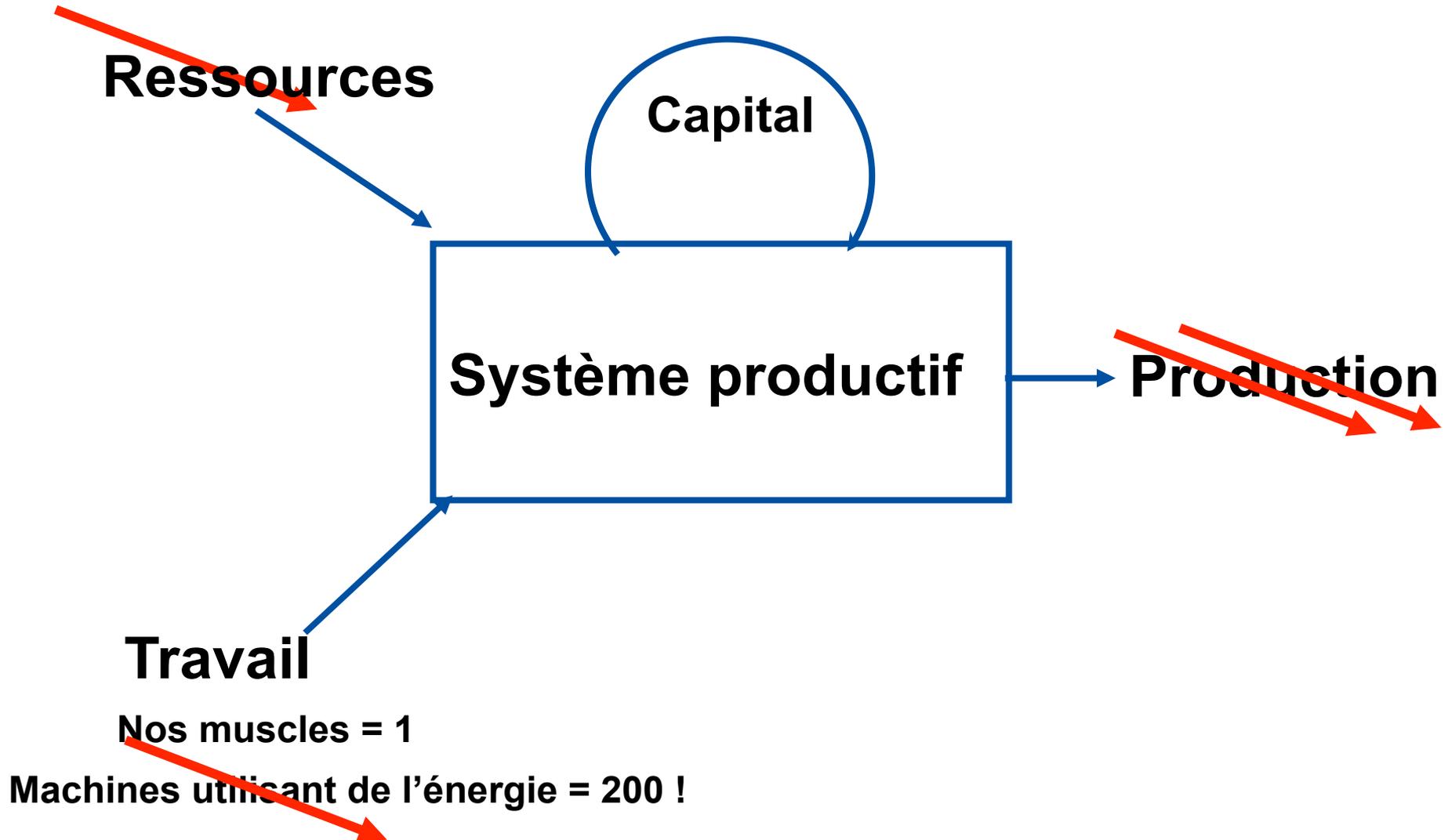
2000, 59 millions d'habitants

Source DATAR

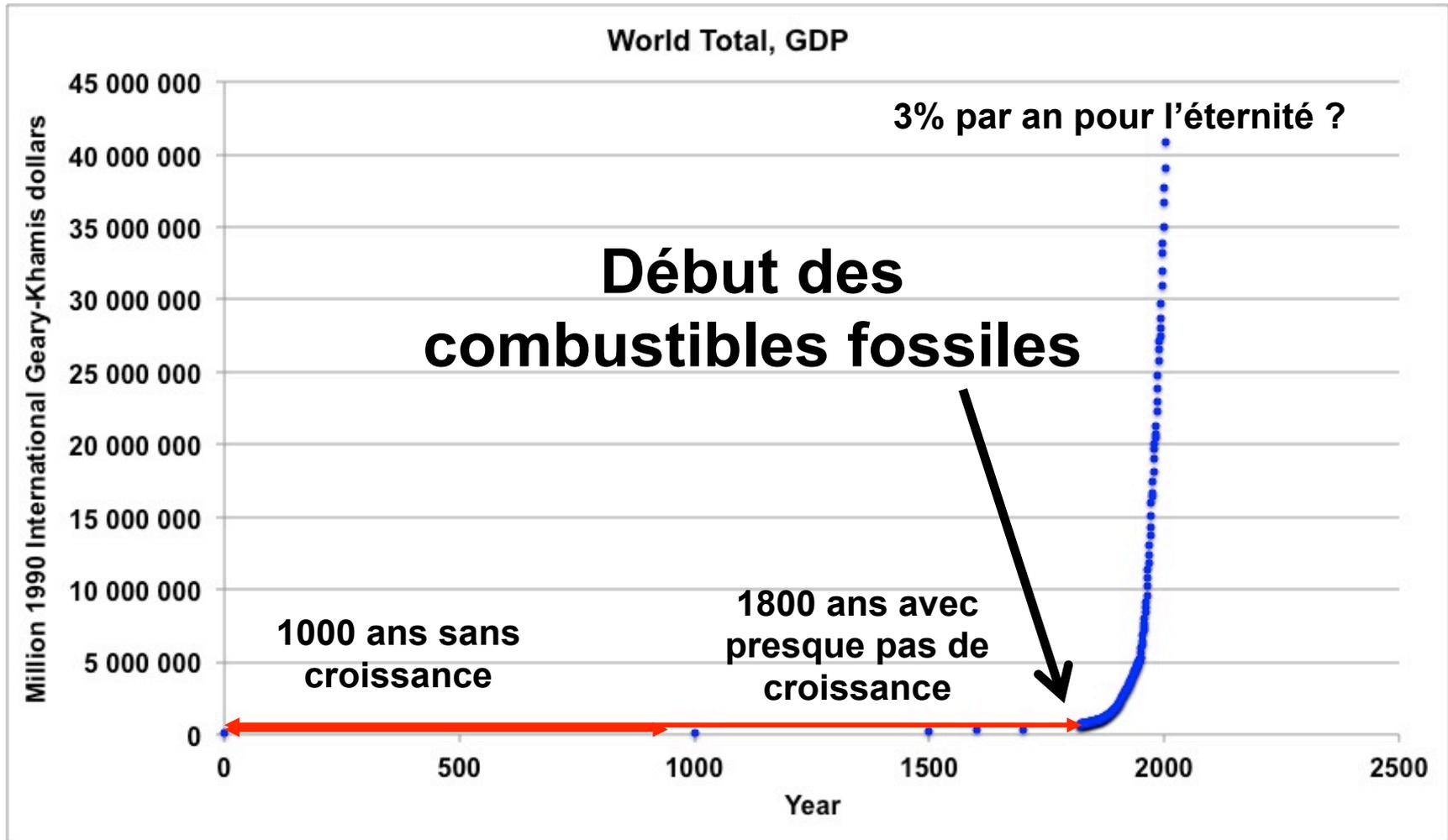
L'économie vue par Super Mario (ou Super (Em)Manuel !)



En fait, il vaut mieux avoir de la ressource !

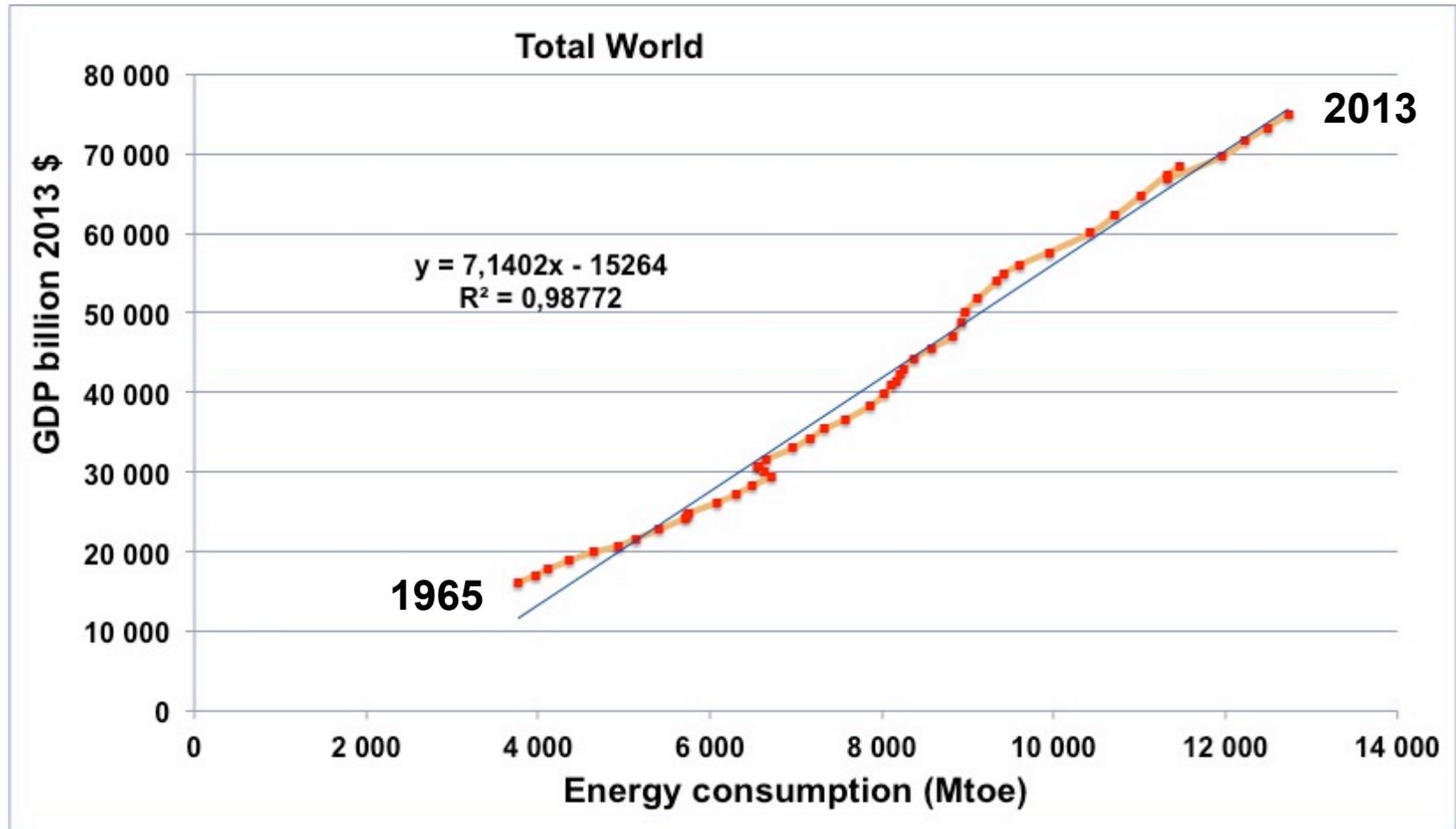


Hollande et Sarkozy auraient du se présenter il y a 1000 ans



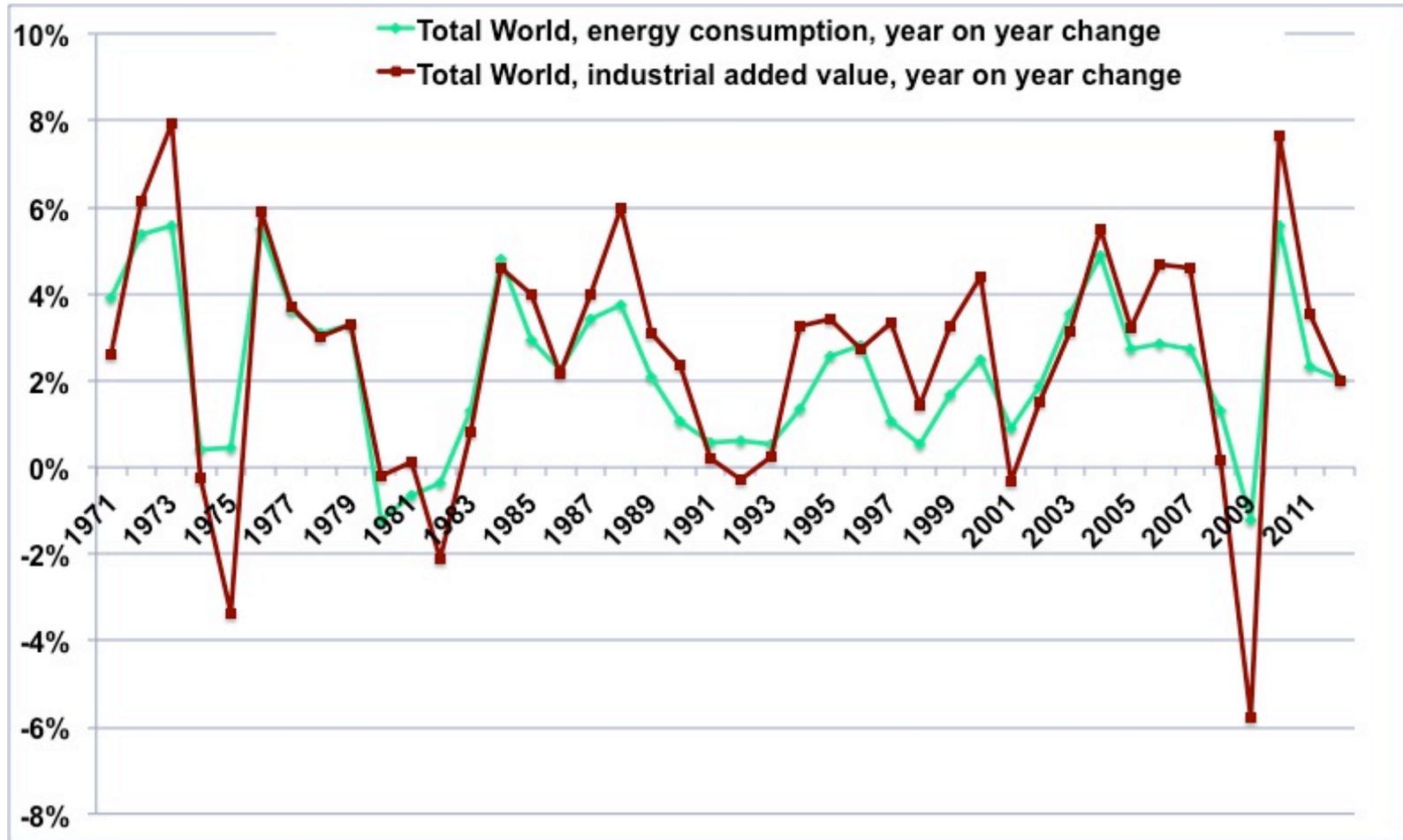
PIB mondial reconstitué de l'an 0 à 2003. Source Maddison, 2010

Le meilleur modèle économique du monde : une droite



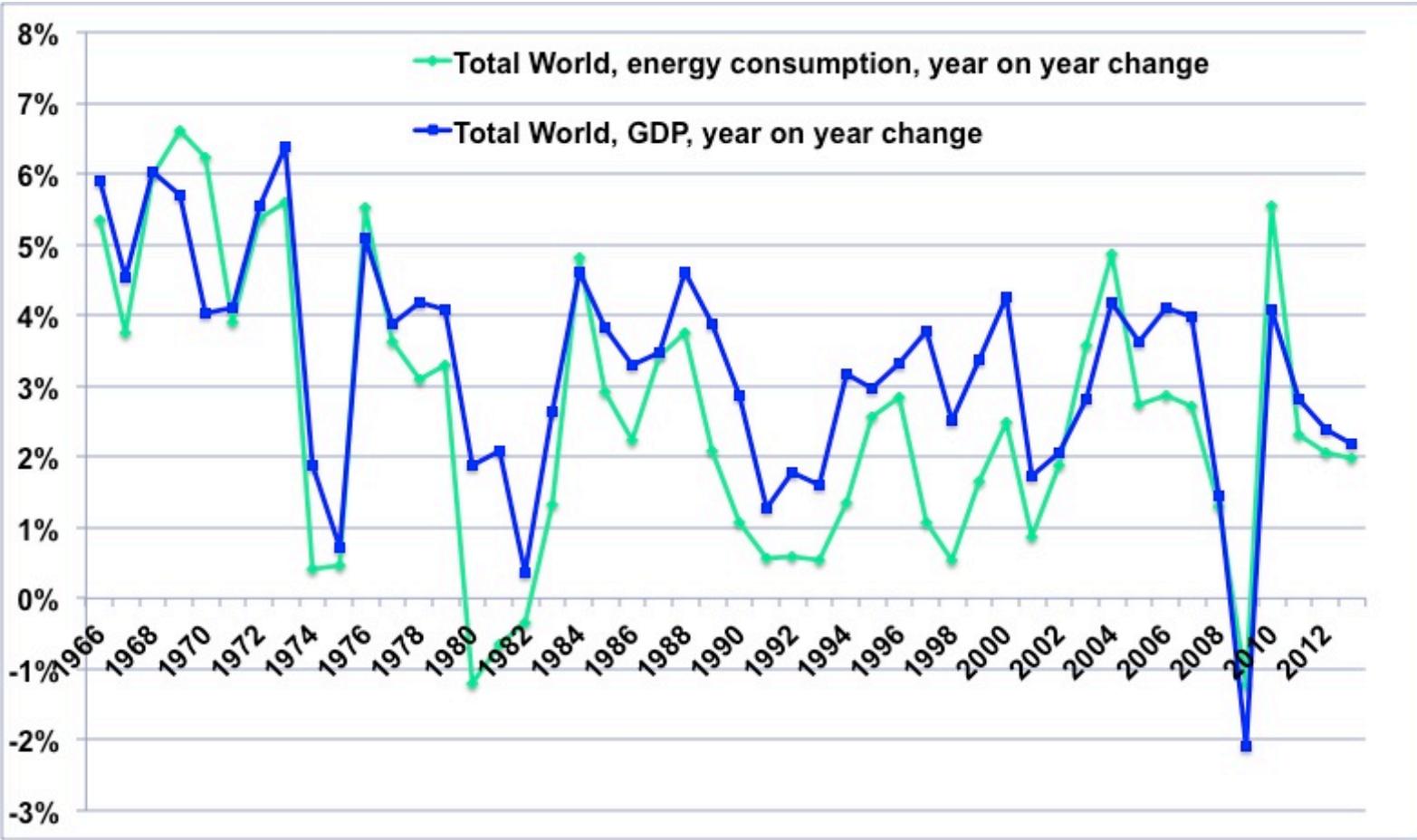
Energie consommée (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde, de 1965 à 2013. Mêmes sources que précédemment.

Puis-je avoir de l'industrie sans énergie ?



Variation annuelle, depuis 1970, de l'énergie consommée et du produit industriel dans le monde. Mêmes sources que précédemment.

Puis-je avoir du PIB sans énergie ?



Variation de la consommation d'énergie (en vert) et du PIB en dollars constants (en bleu), pour le monde. Données World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

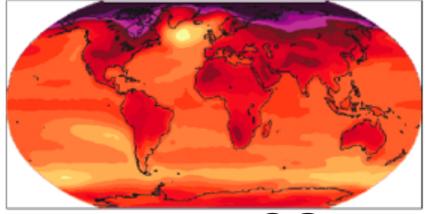
Faites le vide : sortez le pétrole !



L'ère du feu, croissance à gogo et 2 questions...

Boum ?

Minerais, sols, ressources vivantes...
(gratuits aussi)

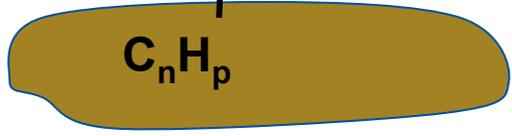


= PIB



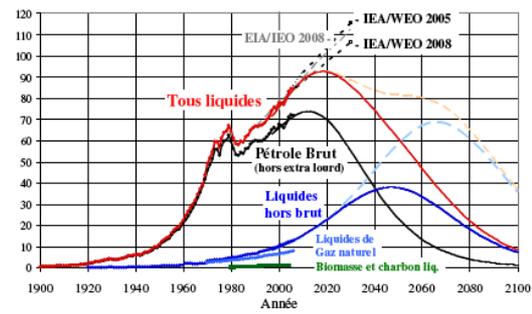
Structure actuelle des métiers, loisirs et vacances, études longues, santé, retraites, mondialisation, concentration urbaine et banlieues étalées...

O₂



Gratuit !!

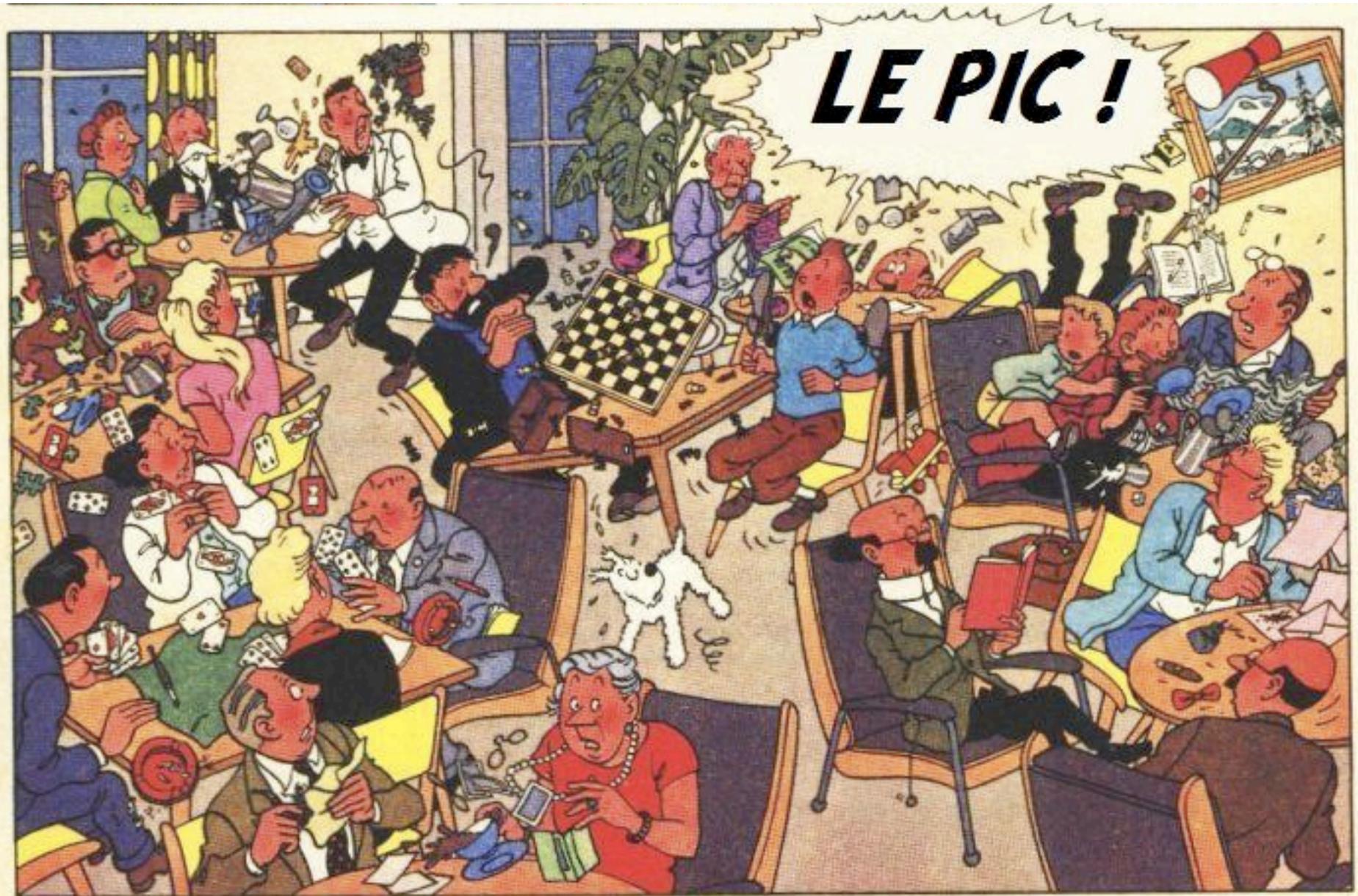
Crac ?



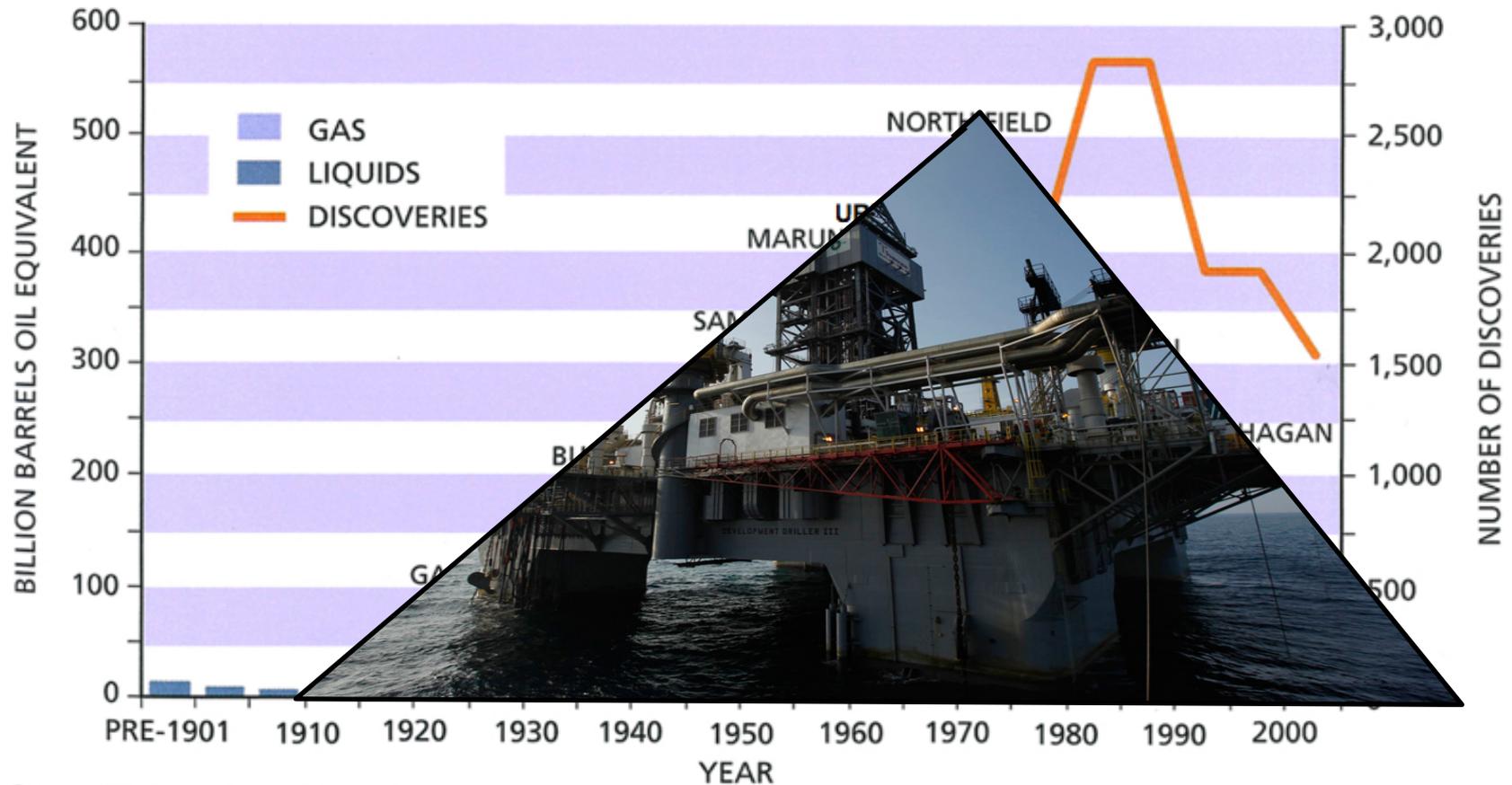
IL VAUT MIEUX POMPER MEME S'IL NE SE PASSE RIEN... (par J. BUREL)



Les maths, c'est décidément détestable...



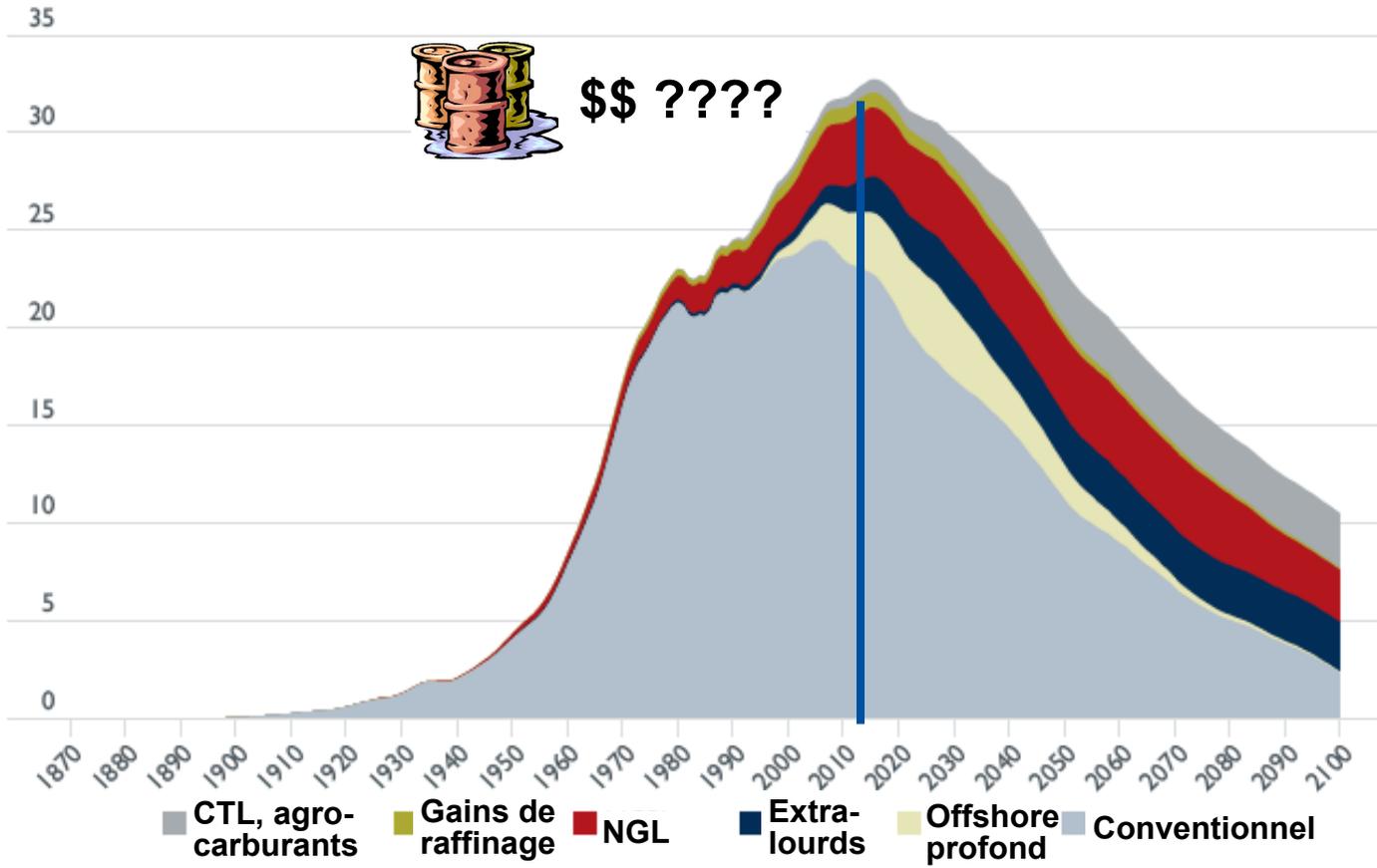
Le pétrole, c'est presque comme les œufs de Pâques



Source: IHS Energy (Bahorich, 2006).

Découvertes mondiales de pétrole et de gaz récupérable depuis 1900 hors US et Canada, en milliards de barils équivalent pétrole par décennie (1 tonne = 7,3 barils). Source : IHS, 2006

Et le pic mondial, il est loin papa ?

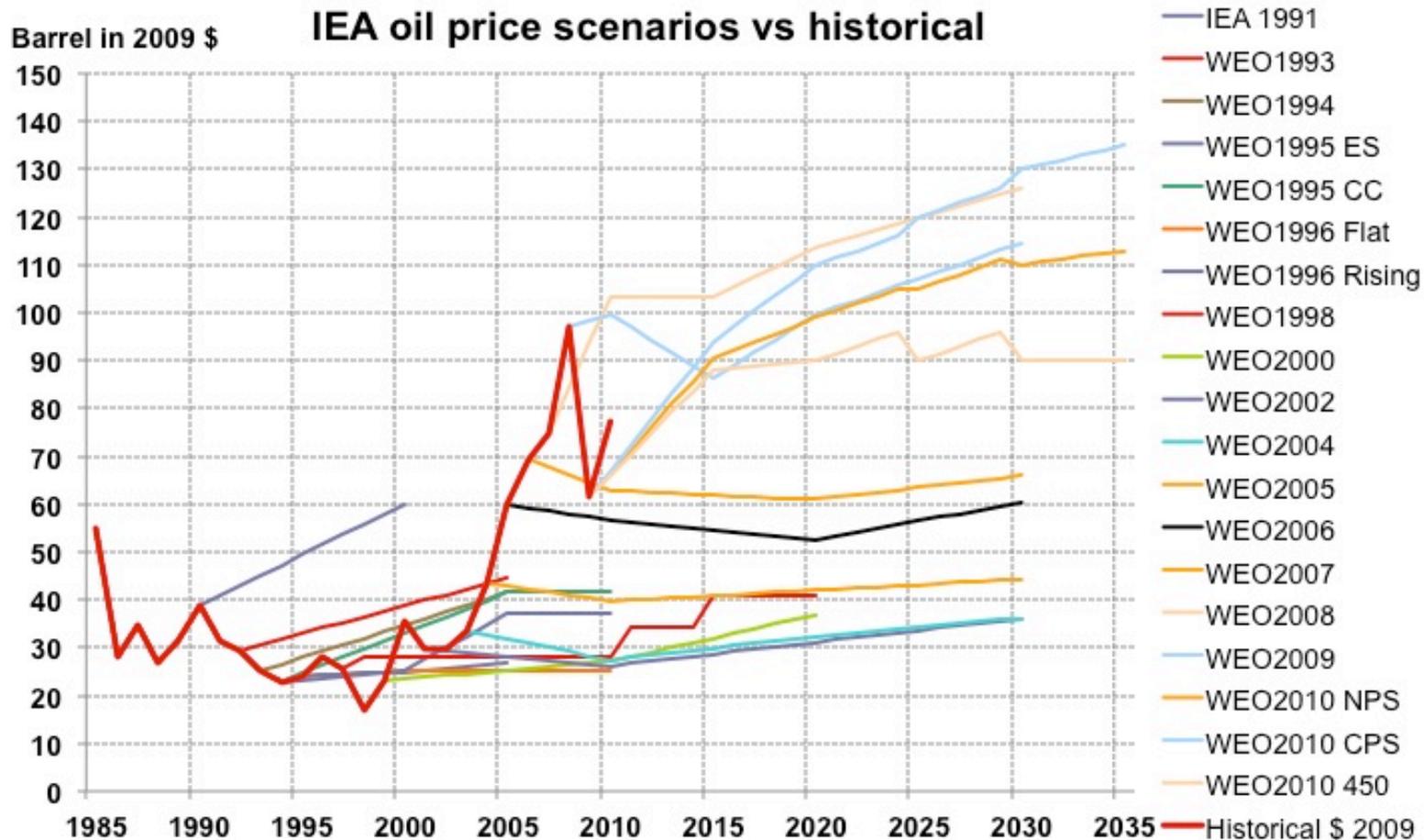


Simulation de la production mondiale de « liquides », discriminée par type de production.

Source : « Transport energy futures: long-term oil supply trends and projections », Australian Government, Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Local Government, Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics (BITRE), Canberra (Australie), 2009

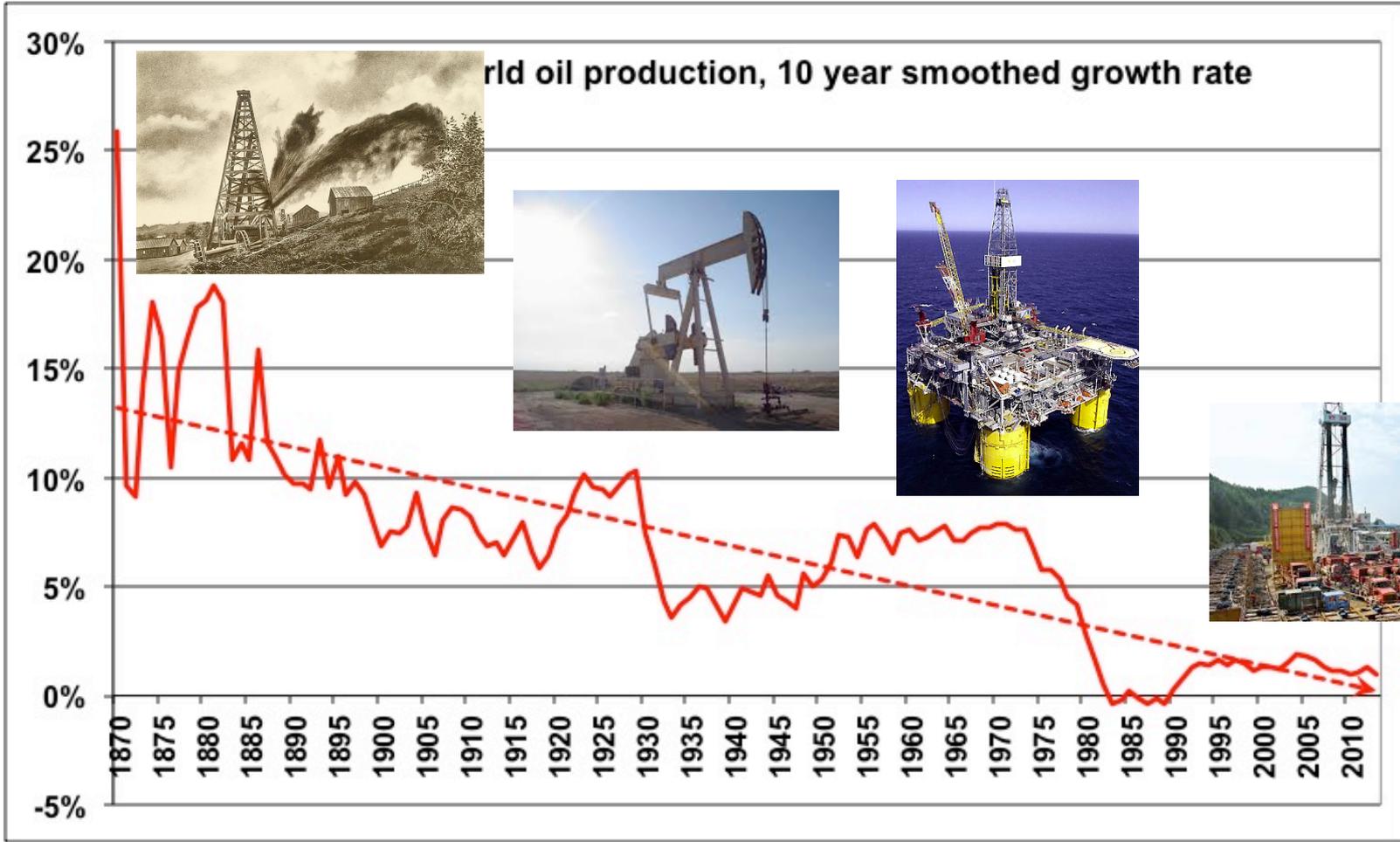


Il vaut mieux prévoir le prix passé que le prix futur

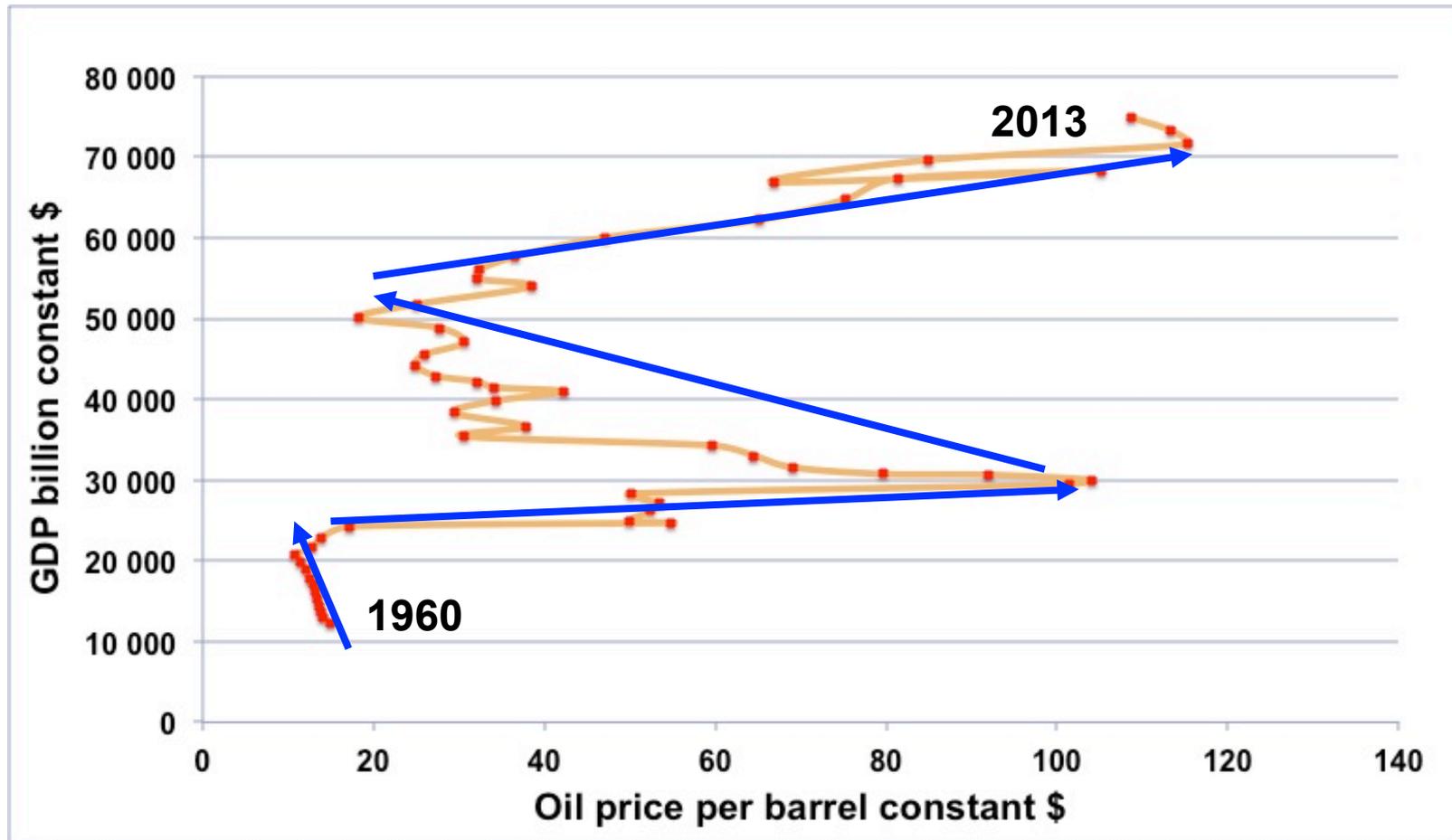


Prix moyen constaté du baril (en rouge) en \$ constants, et projections de l'Agence Internationale de l'Energie de 1991 à 2010. Source Olivier Rech, Carbone 4, 2011

C'est la grosse bête qui descend, qui descend...

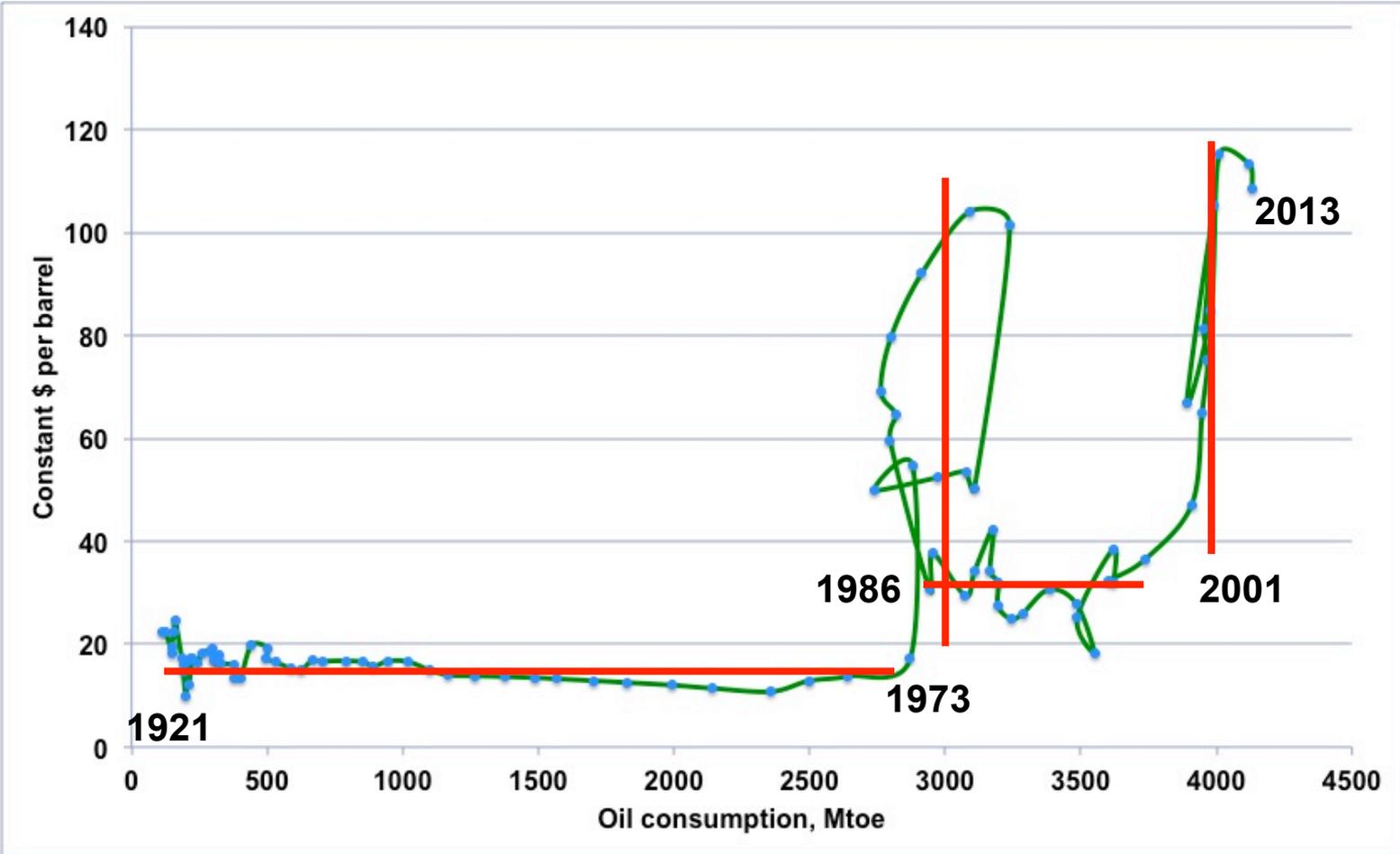


Le pétrole cher serait mauvais pour le PIB ?



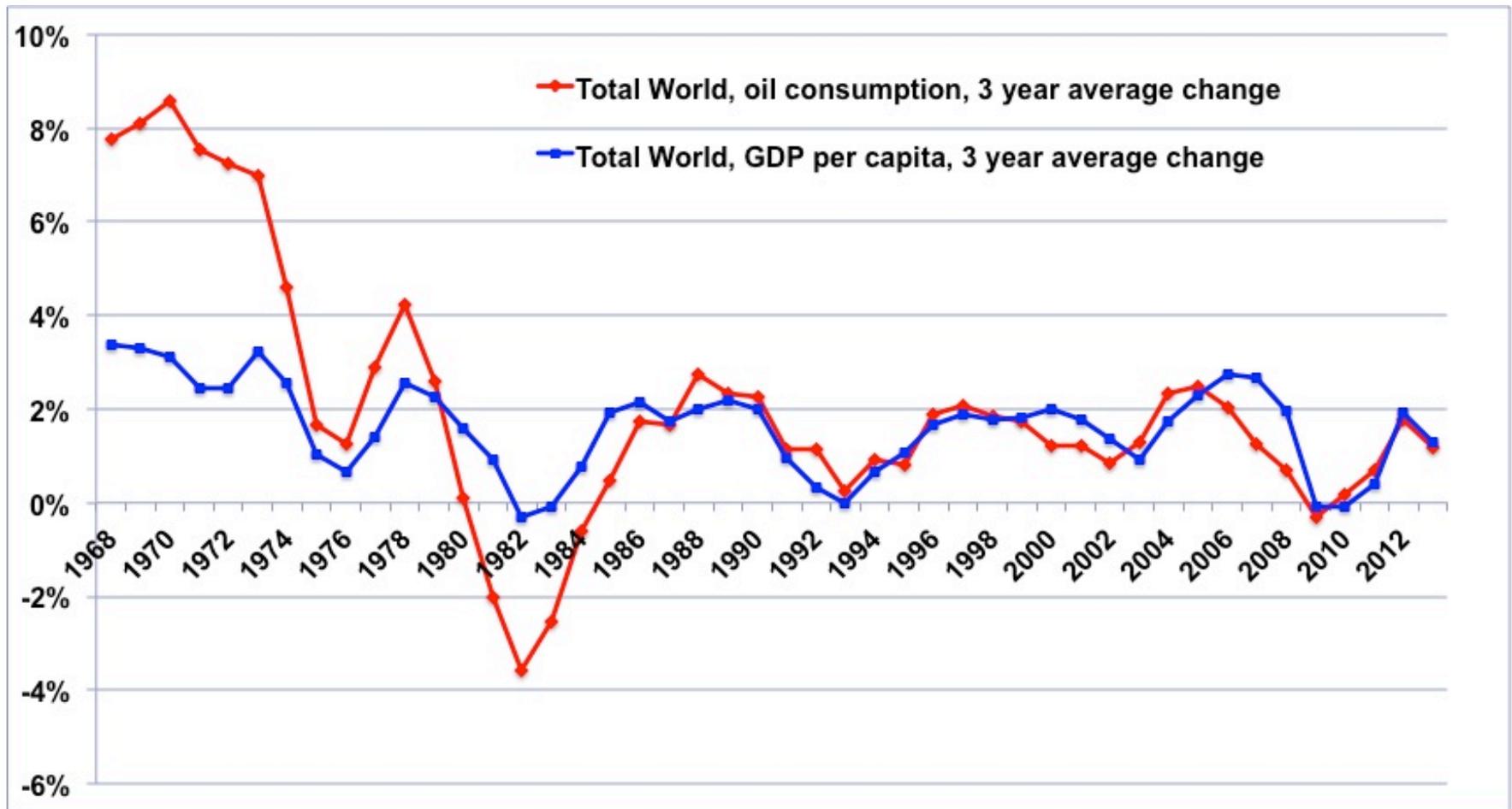
Prix du pétrole (abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde, de 1965 à 2013. Jancovici, sur données World Bank et BP Statistical Review

Le prix du pétrole est-il élastique ?



Prix du baril (en abscisse) vs. PIB en dollars constants (ordonnée) de 1960 à 2013. Jancovici, 2014, sur données World Bank & BP Statistical Review

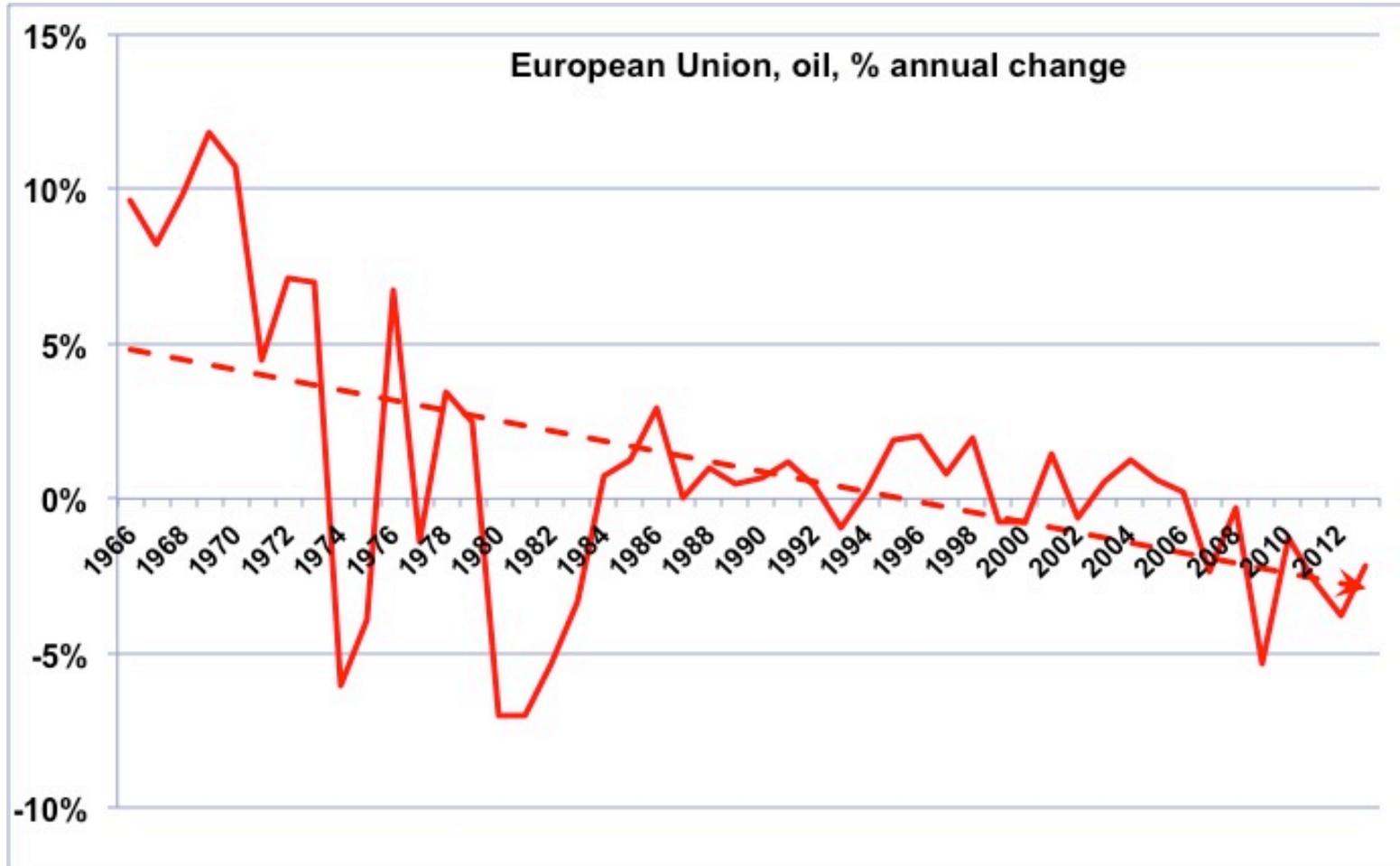
D'abord la croissance qui vient de Mars, ou d'abord le pétrole ?



Variation lissée de la consommation mondiale de pétrole (rouge) et du PIB par personne (bleu). Source World Bank 2014 pour le PIB, BP Stat 2014 pour le pétrole

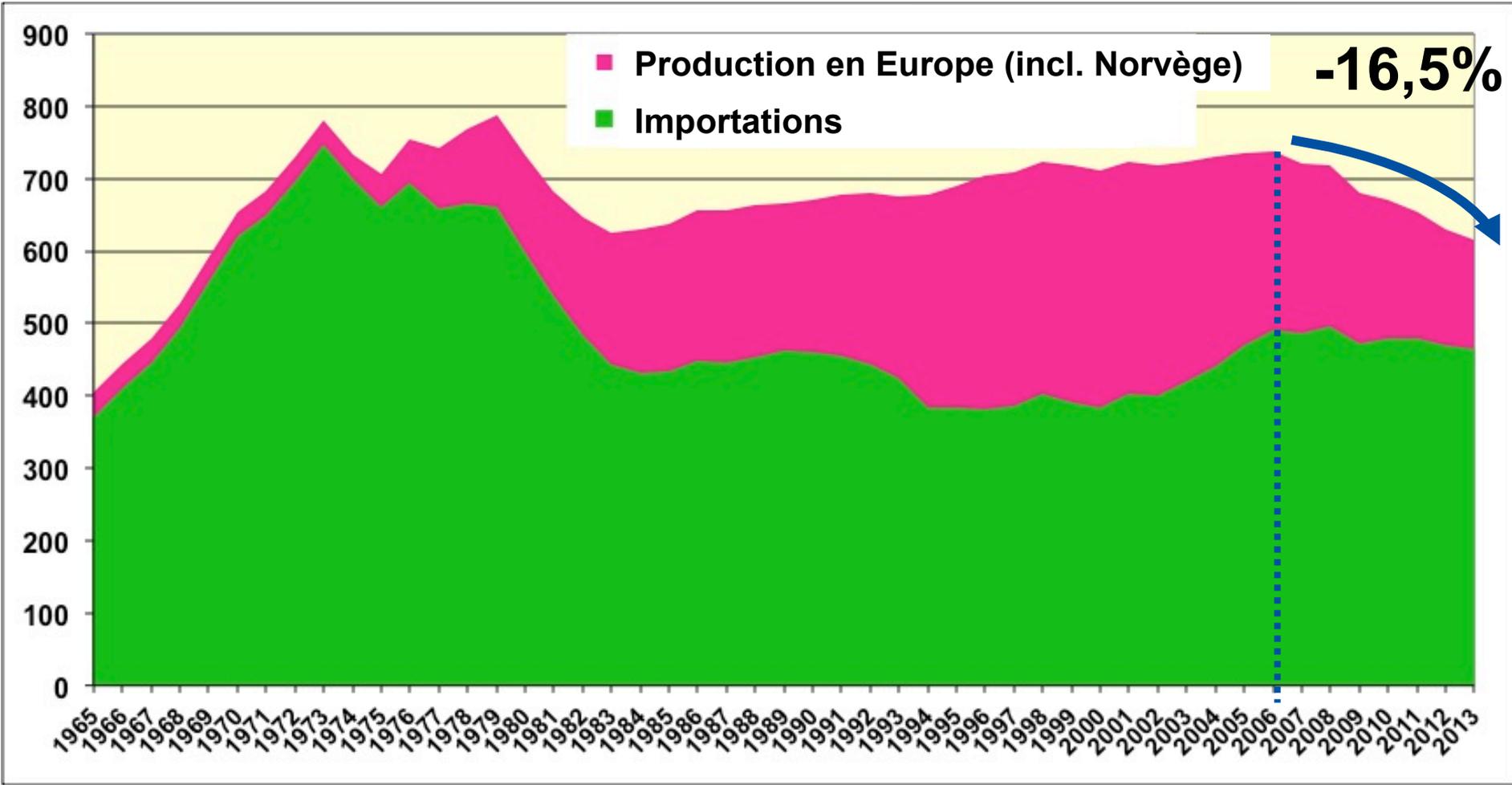


Autant de pétrole qu'on veut, qu'il paraît ?



Variation annuelle de la consommation européenne de pétrole depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review

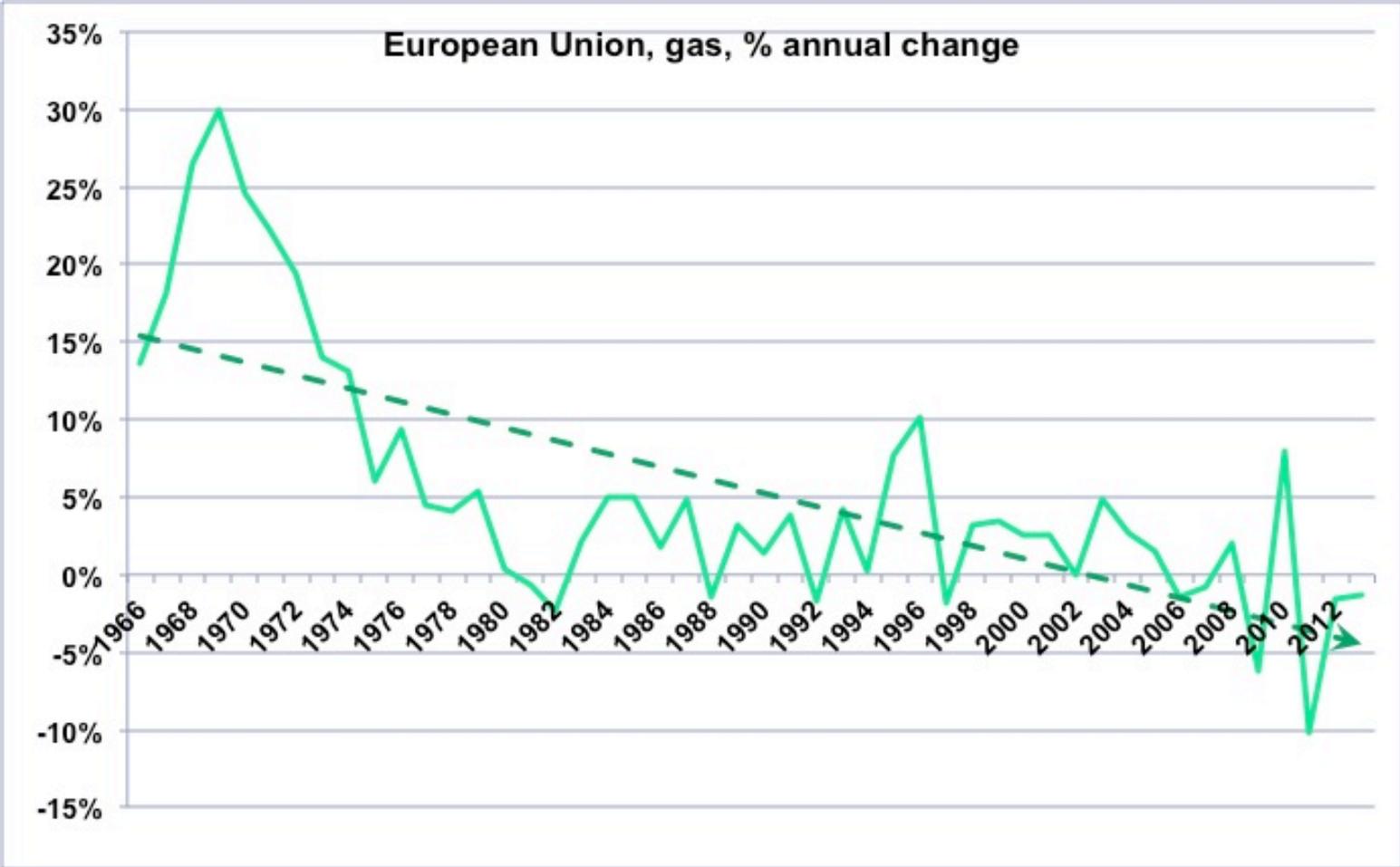
40 ans de pétrole, qu'il paraît ?



Production domestique (rose) et importations annuelles (vert) de pétrole, en millions de tonnes, pour la zone UE+Norvège. Données BP Statistical Review 2014

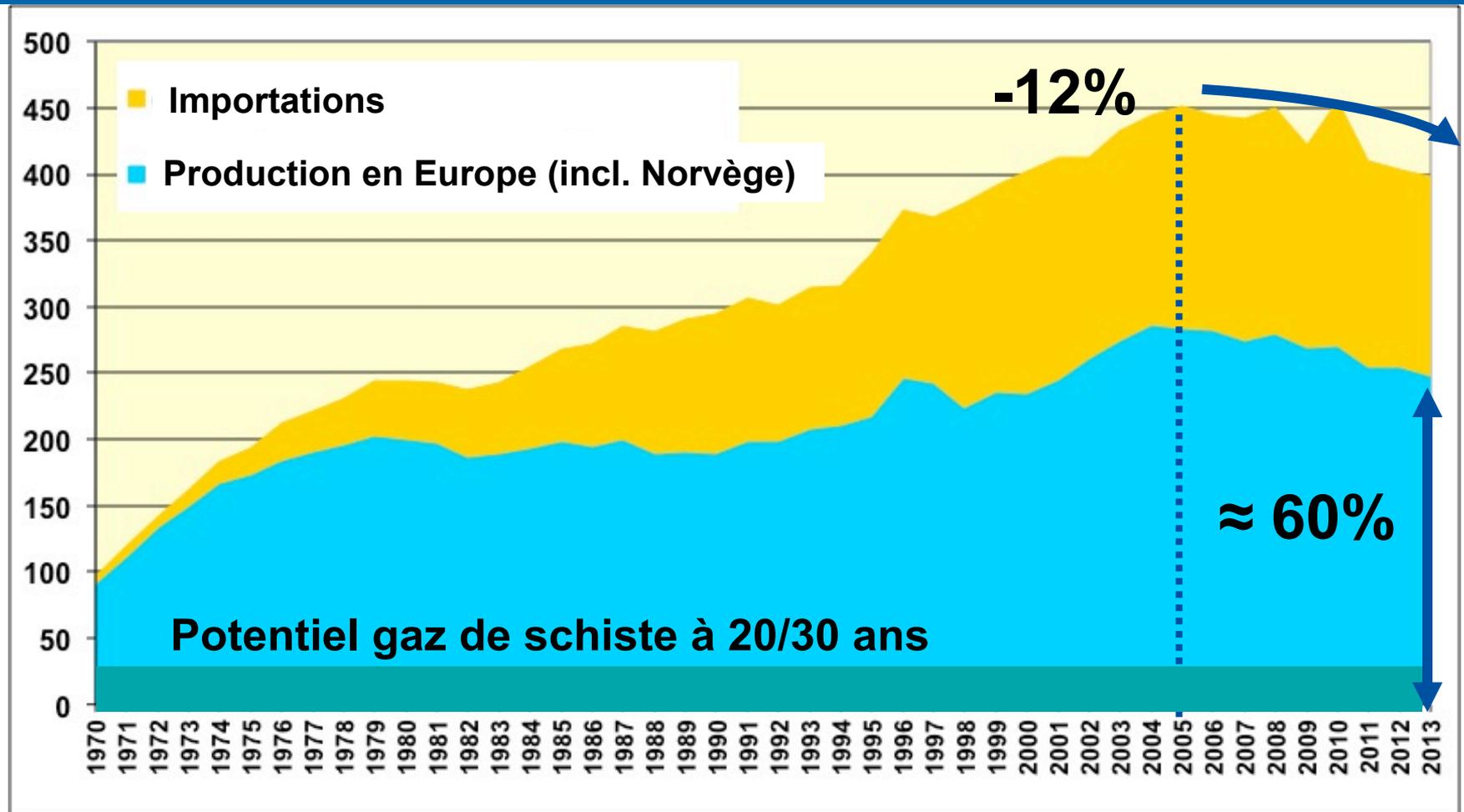


Rodrigue, as-tu du gaz ?



Variation annuelle de la consommation européenne de gaz depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review

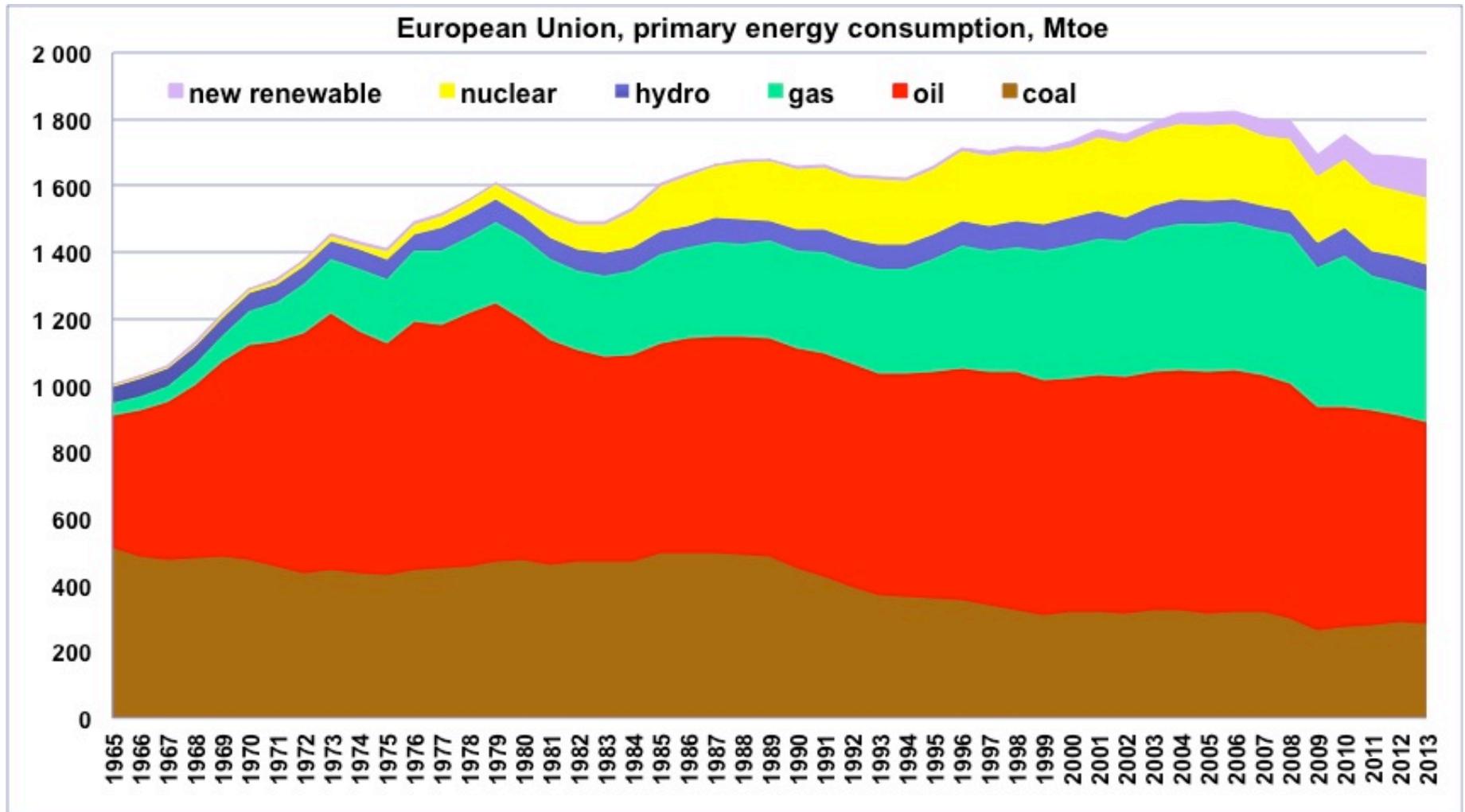
348 ans (au moins) de gaz, qu'il paraît ?



Approvisionnement en gaz UE+Norvège, en millions de tonnes équivalent pétrole par an, depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2014

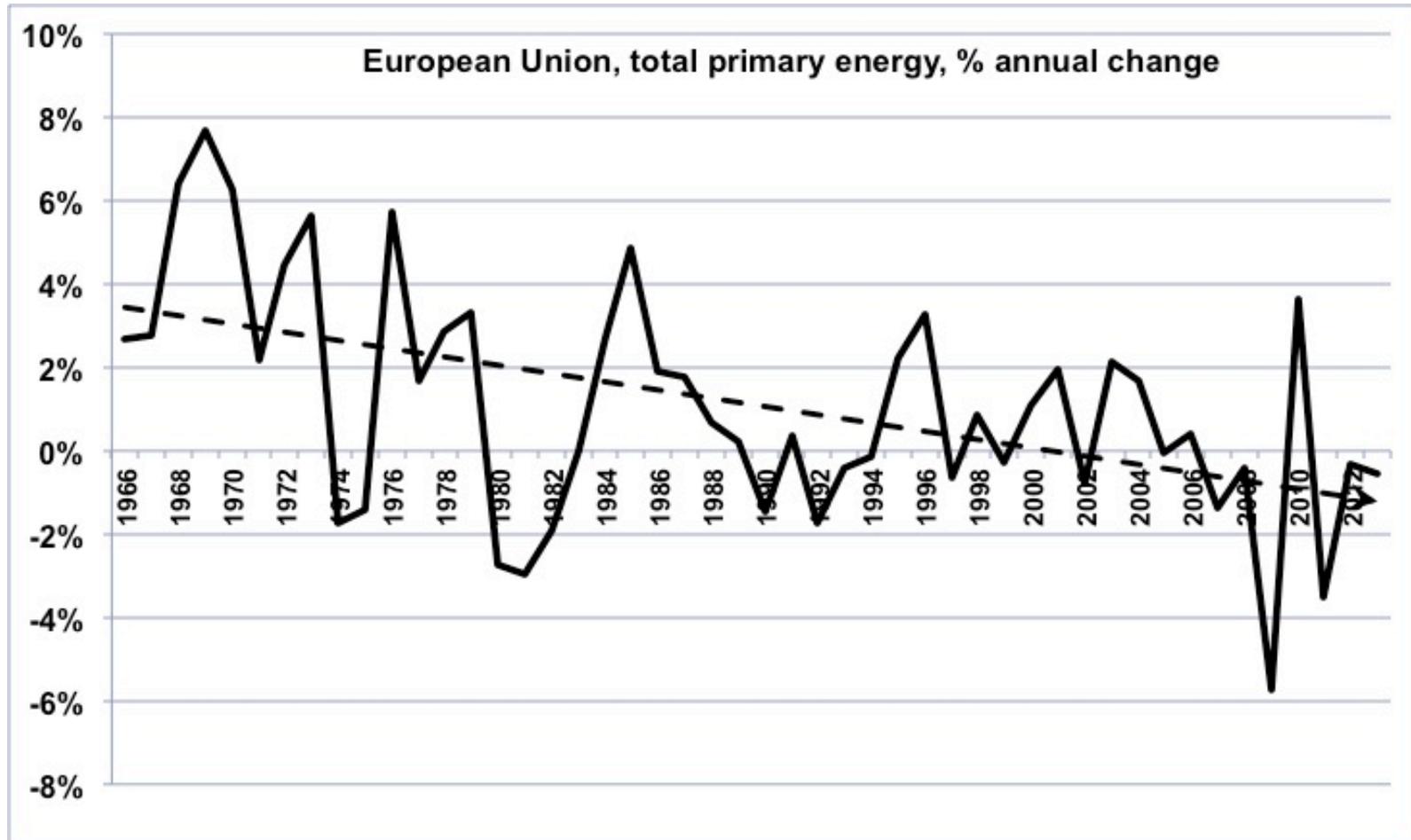
Sécurité d'approvisionnement ?

Quelle sécurité ?



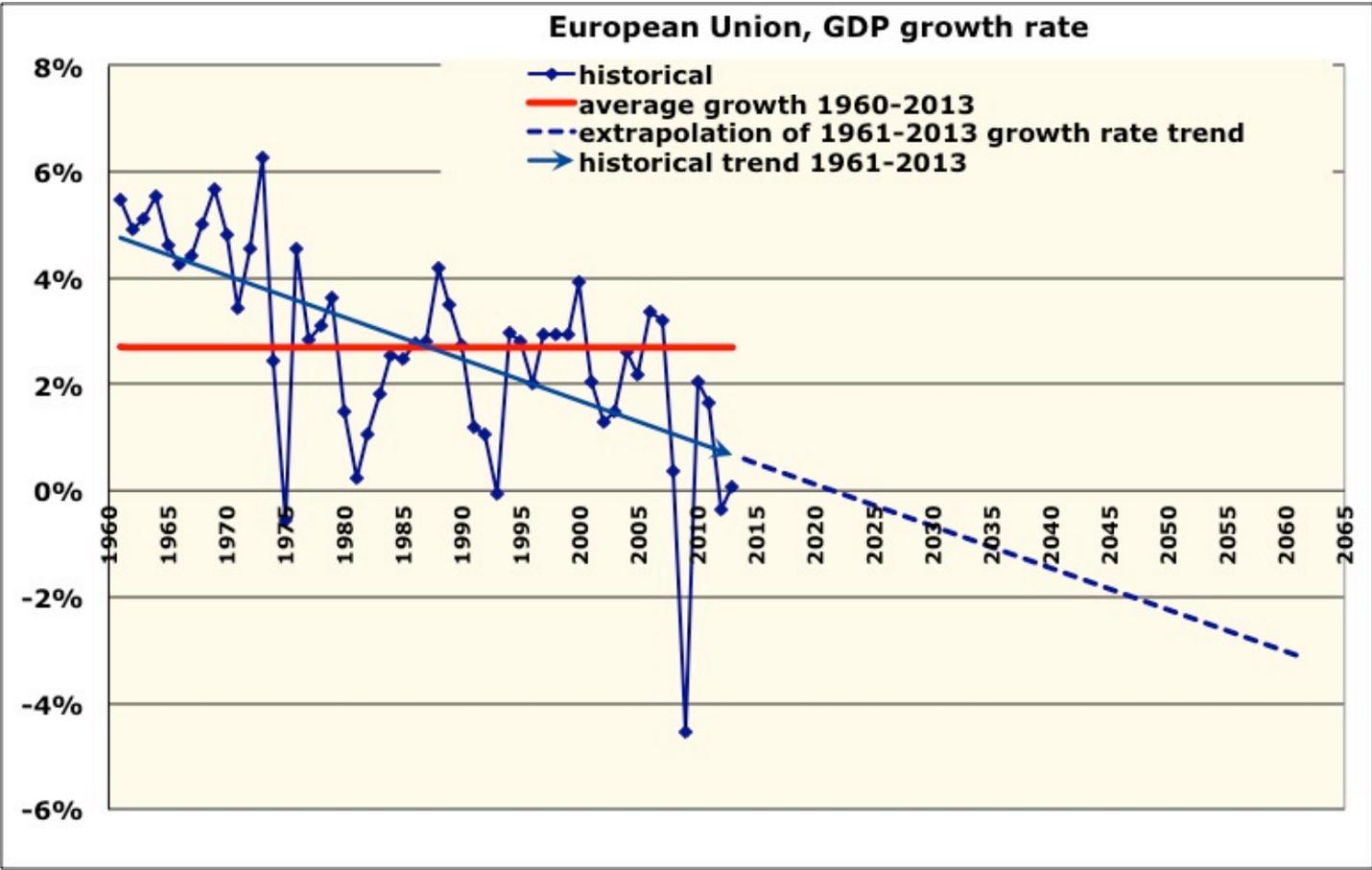
Consommation d'énergie dans l'Union depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2014

La pédale de frein est de plus en plus souvent utilisée pour les kWh....



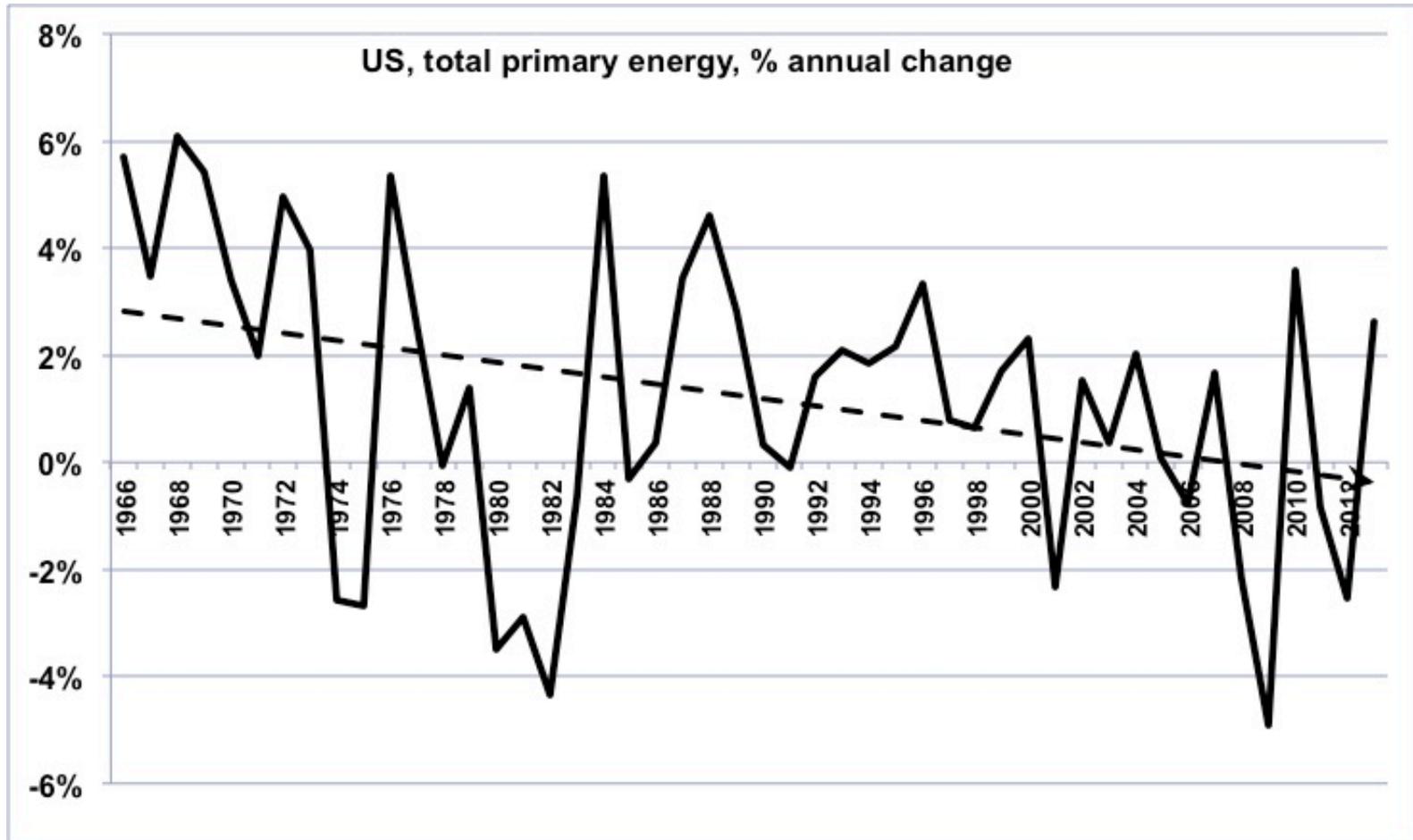
Variation de la consommation d'énergie en Europe depuis 1966. Données BP Statistical Review 2014, traitement par l'auteur.

... et donc aussi pour le PIB



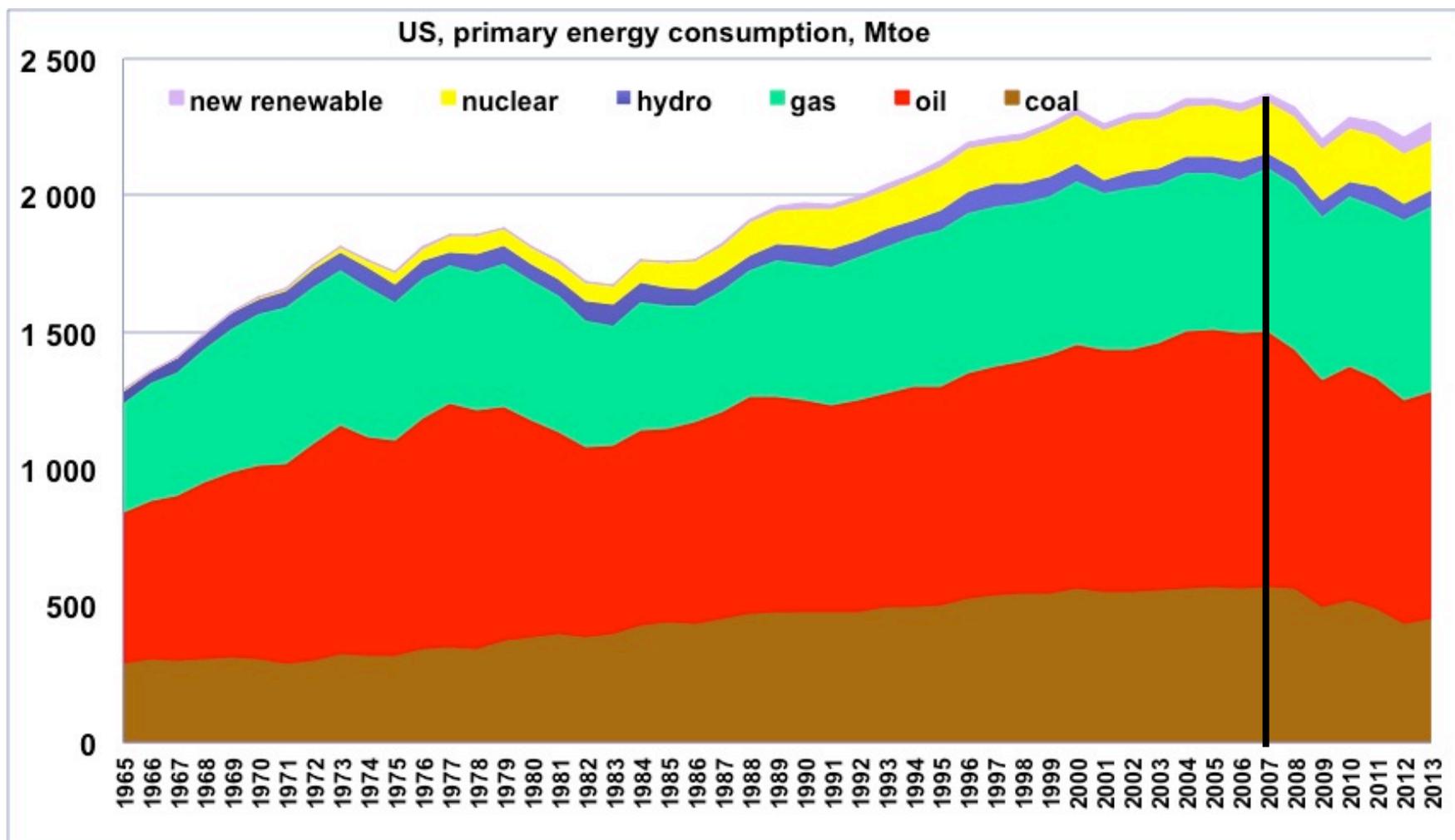
Taux de croissance du PIB européen sur la période 1960-2013 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

Les USA sont bien nos cousins, pas de doute !



Variation de la consommation d'énergie aux USA depuis 1966. Données BP Statistical Review 2014, traitement par l'auteur.

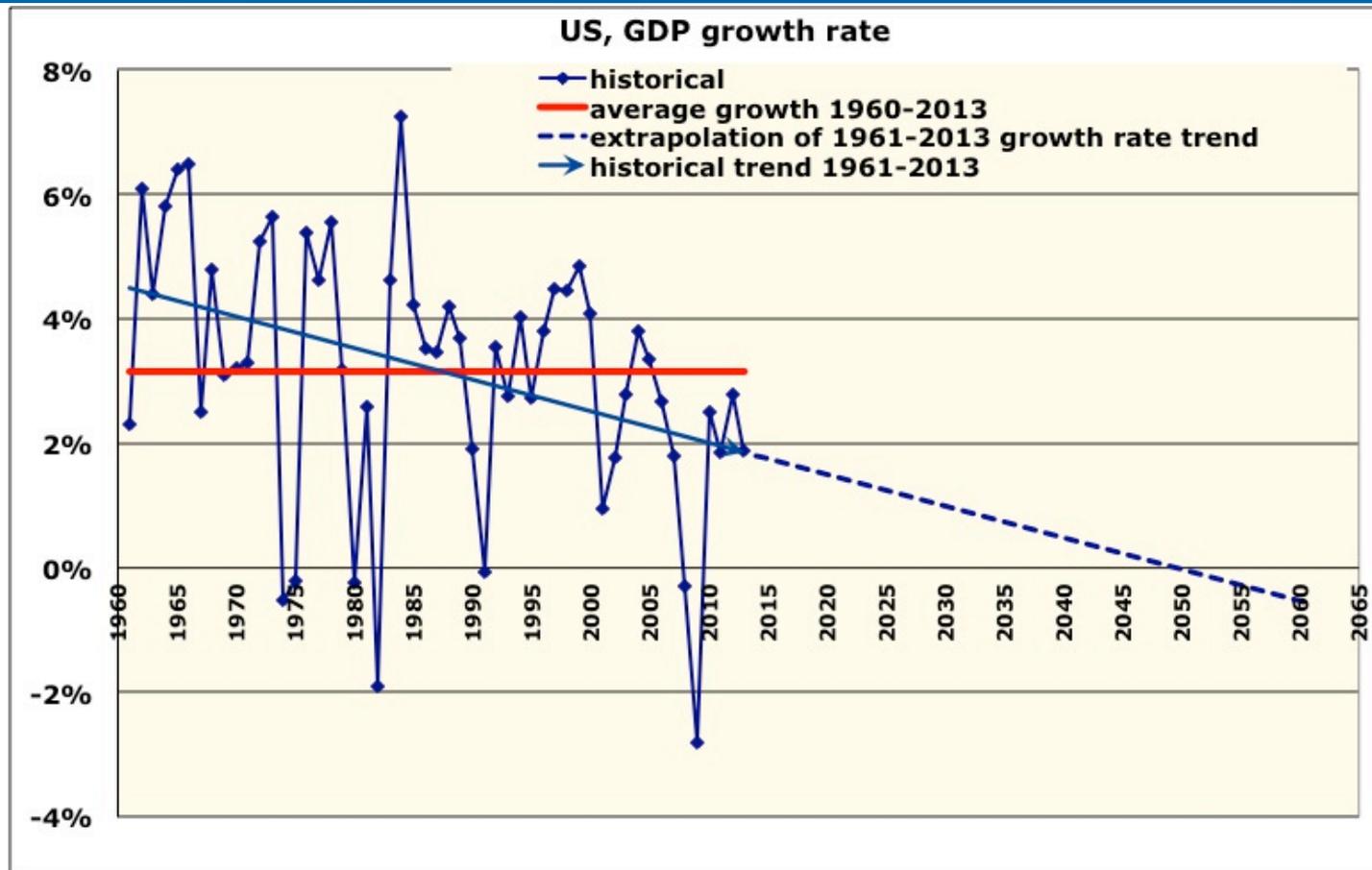
Vive le gaz de schiste !



Consommation d'énergie aux USA depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2014

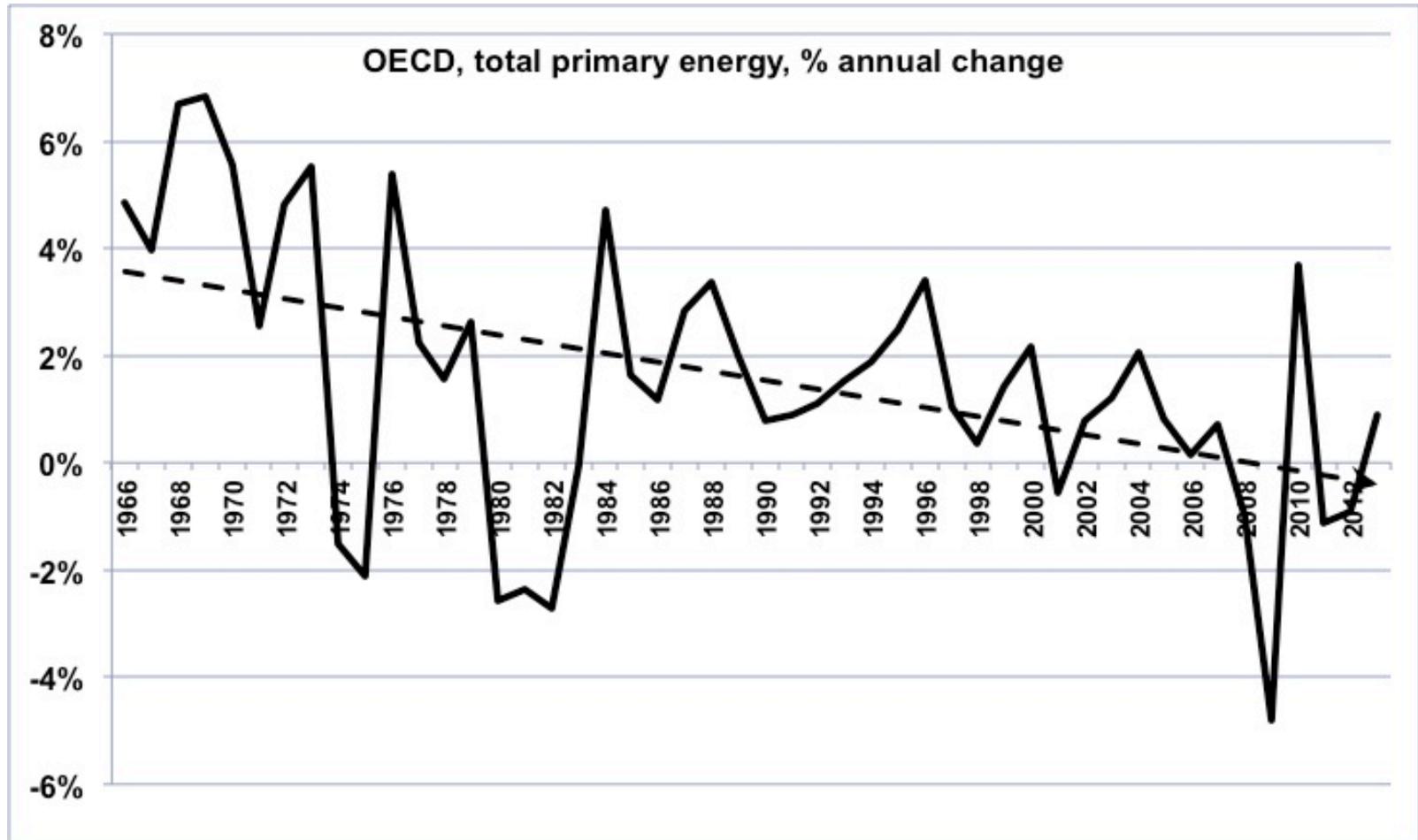


Vive le gaz de schiste ! (bis)



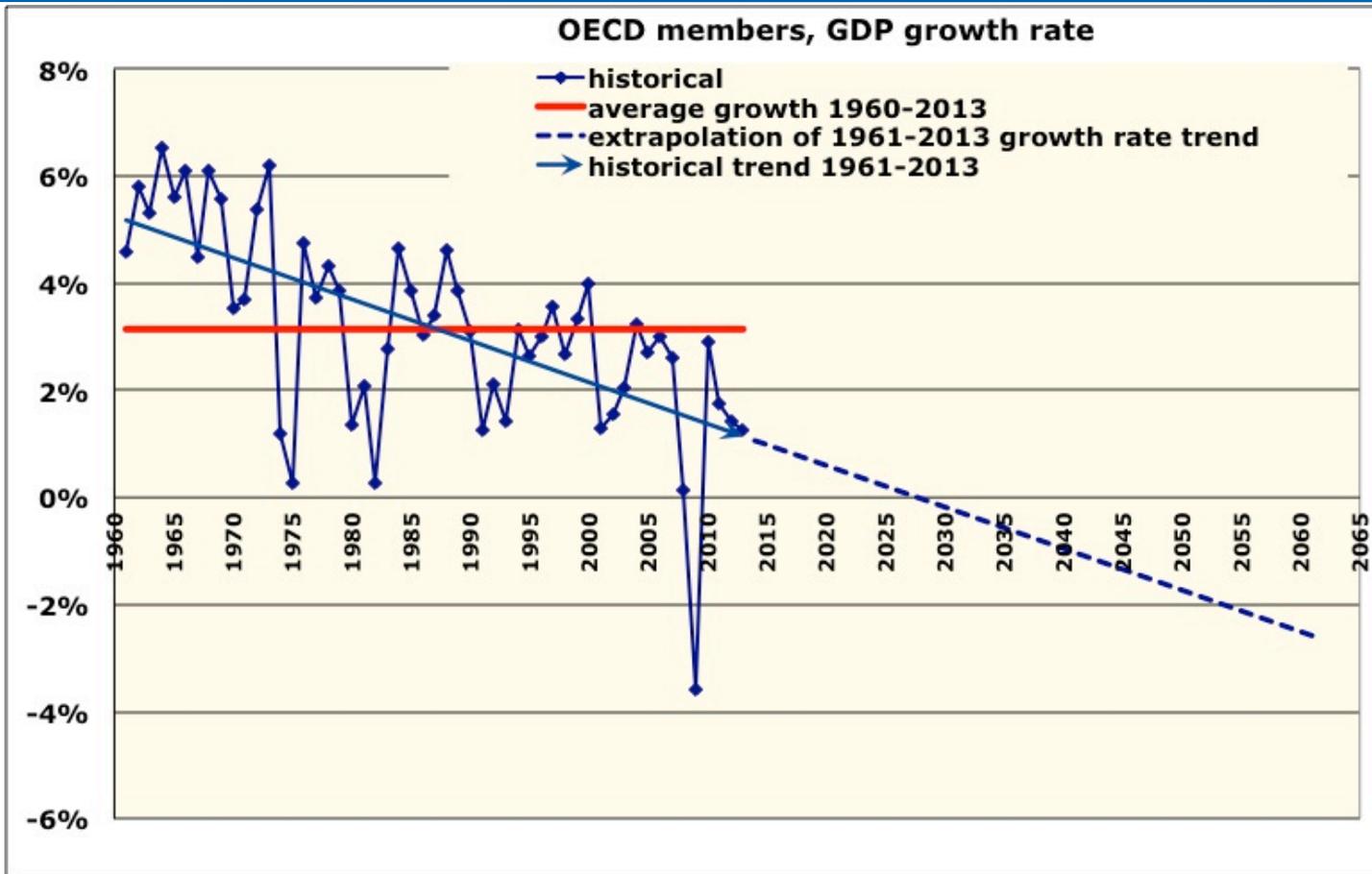
Taux de croissance du PIB des USA sur la période 1960-2013 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

OCDE cherche barils, mines & gazoducs, désespérément



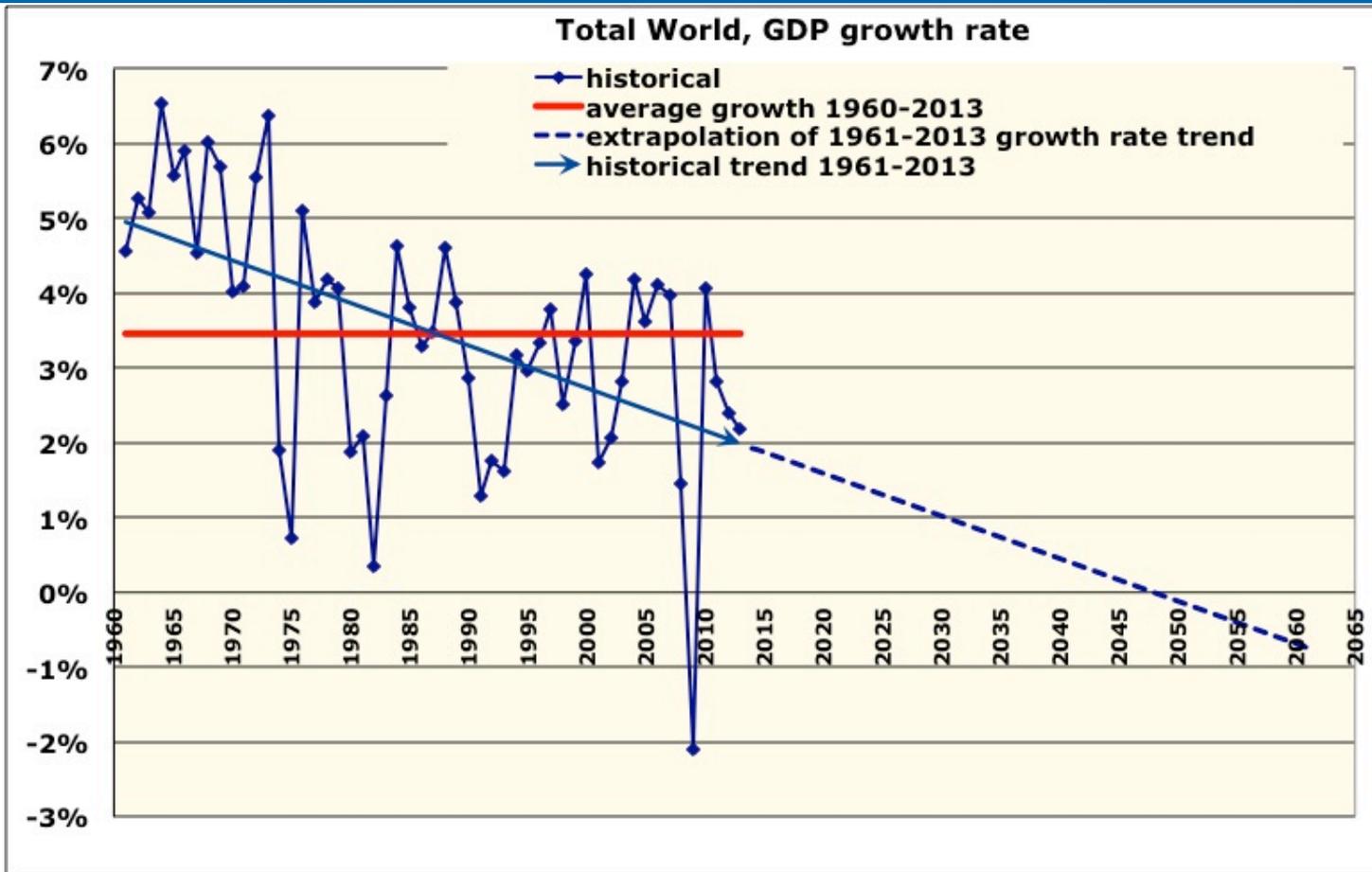
Variation de la consommation d'énergie dans l'OCDE depuis 1966. Données BP Statistical Review 2014, traitement par l'auteur.

OCDE cherche croissance, désespérément



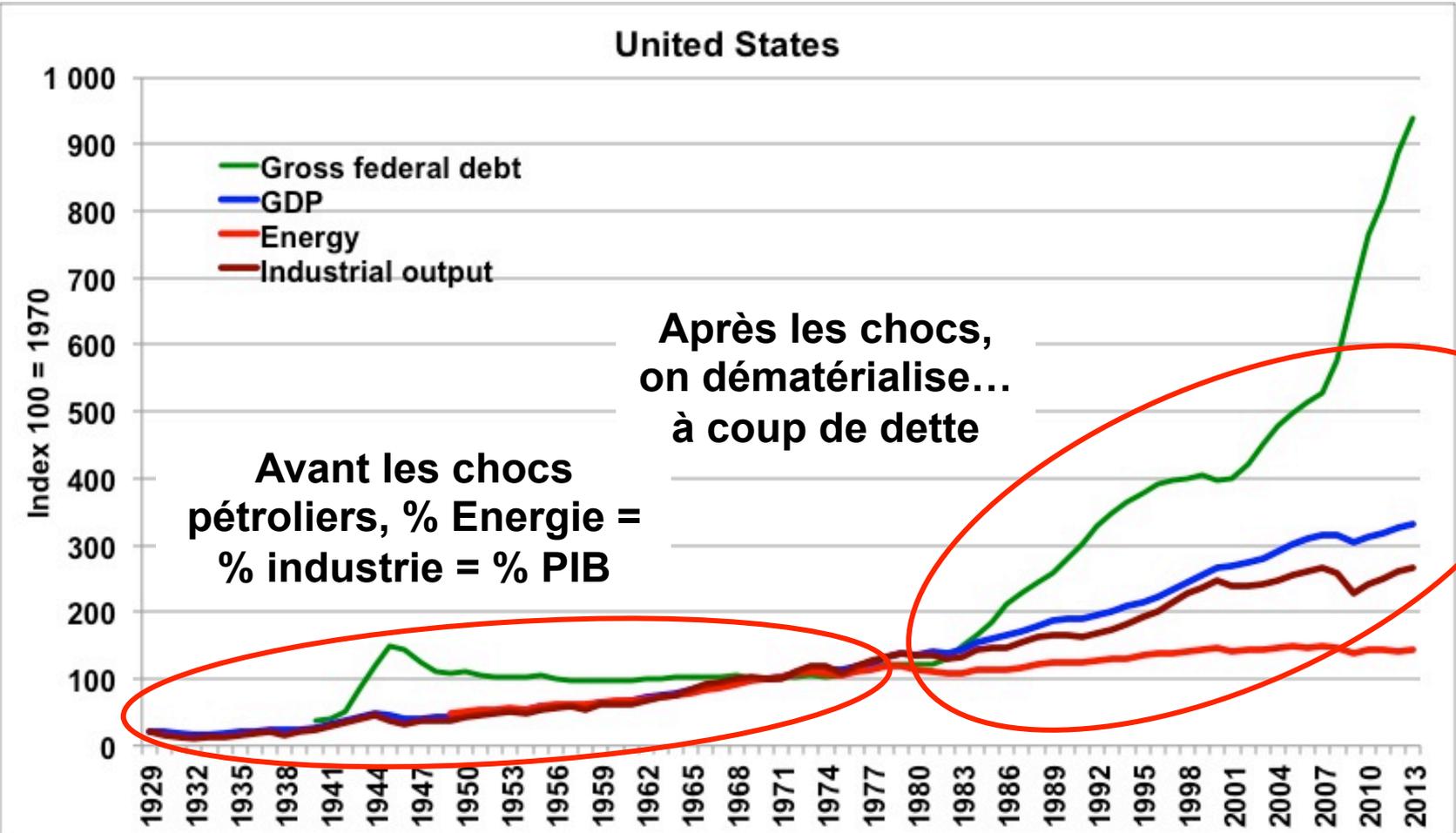
Taux de croissance du PIB de la zone OCDE sur la période 1960-2013 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

En route pour la croissance mondiale perpétuelle ?



Taux de croissance du PIB du monde sur la période 1960-2013 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

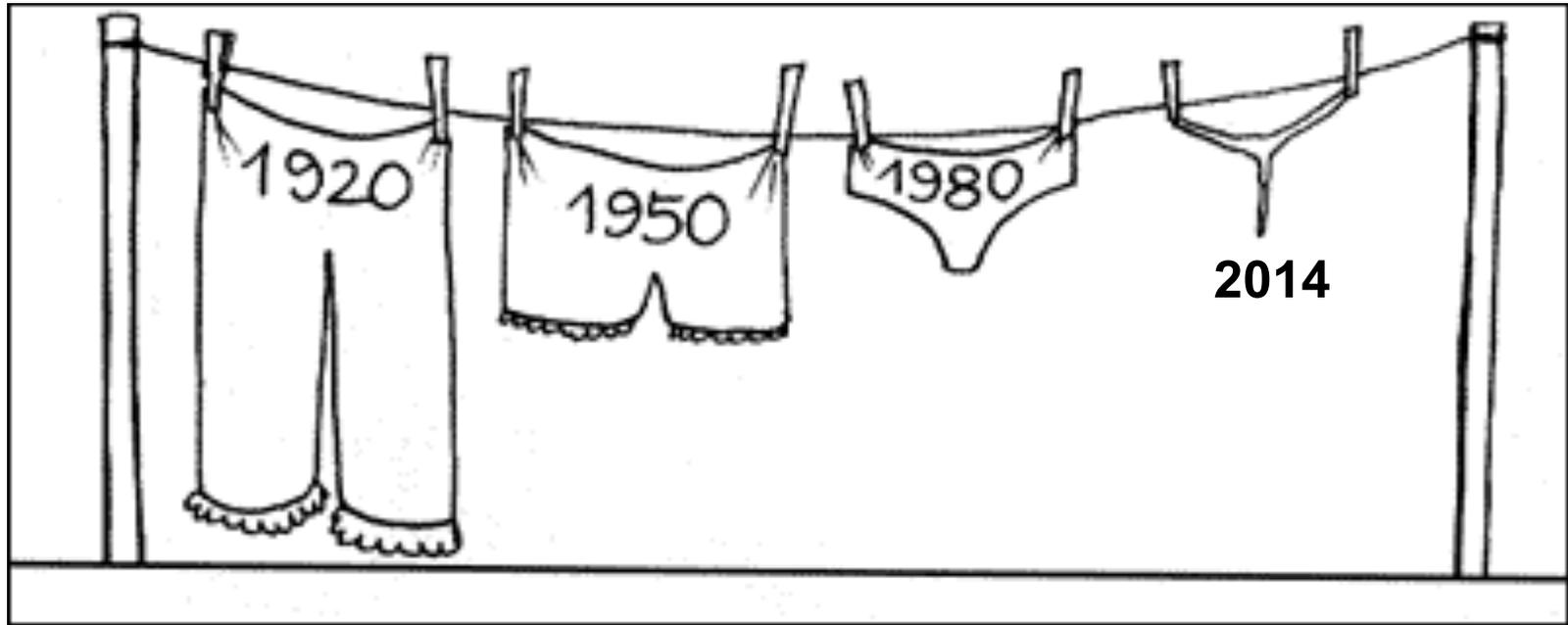
Peut-on avoir de la croissance dématérialisée sans dette ?



Evolution comparée, aux USA, de l'énergie, la production industrielle, le PIB, et la dette fédérale brute. Données EIA, FED, BEA

L'observation, mère de toutes les lois en physique

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



Effet du relèvement des températures l'habillement depuis 1920 Source :
Chantelle ; Playtex ; Aubade ; Princesse Tam Tam

Vivement 2020 ?

L'effet de serre, de la vieille science...

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.

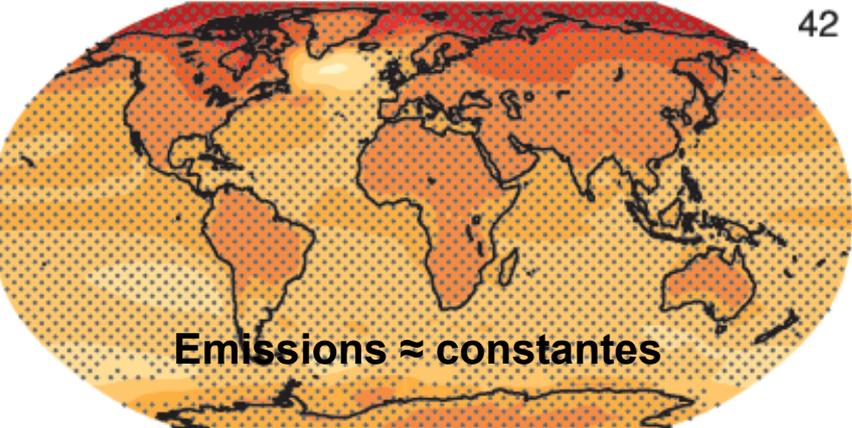
1950 : Le premier ordinateur (l'ENIAC) est utilisé pour expérimenter le premier modèle numérique de prédiction météorologique

Chauffe Marcel



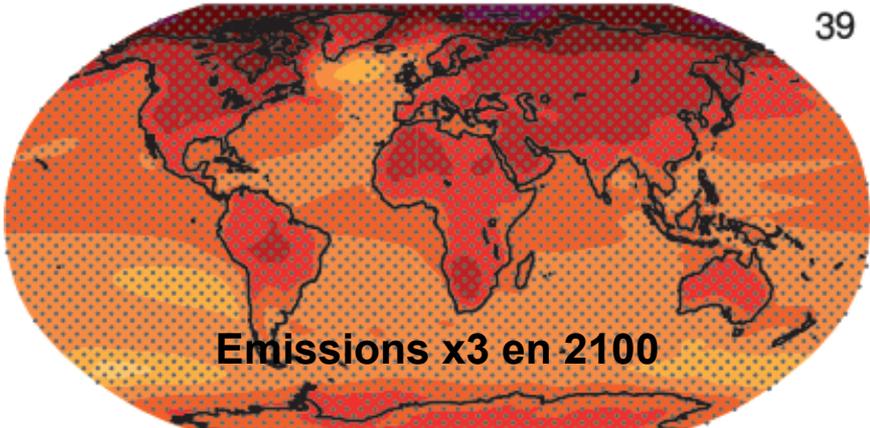
RCP45: 2081-2100

42



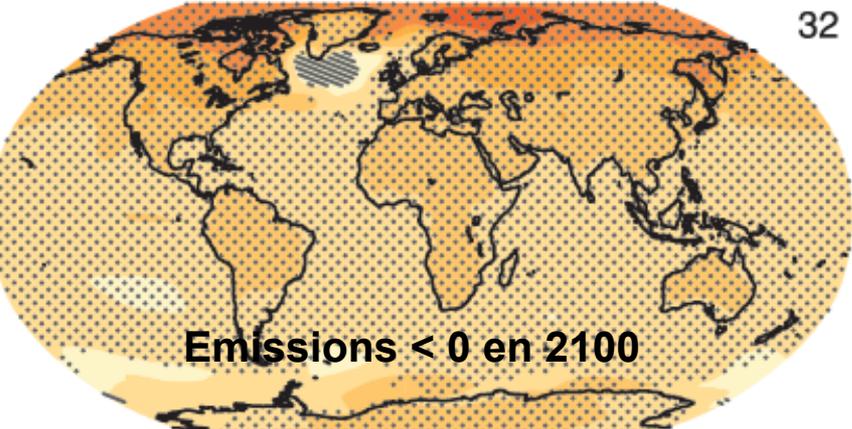
RCP85: 2081-2100

39



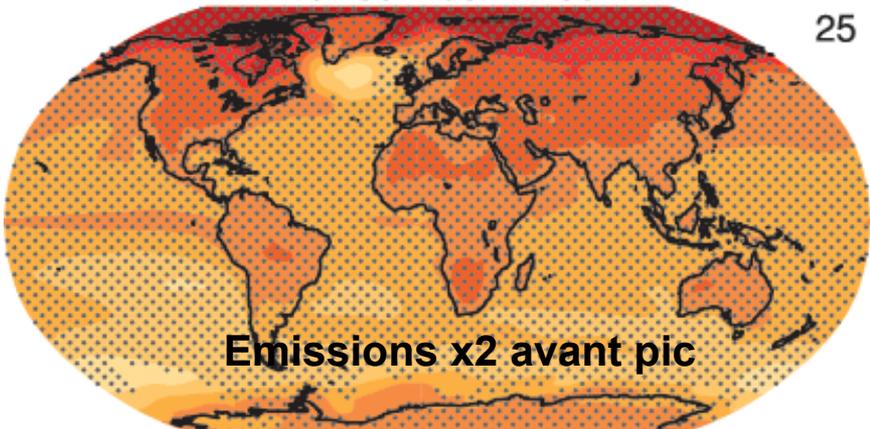
RCP26: 2081-2100

32



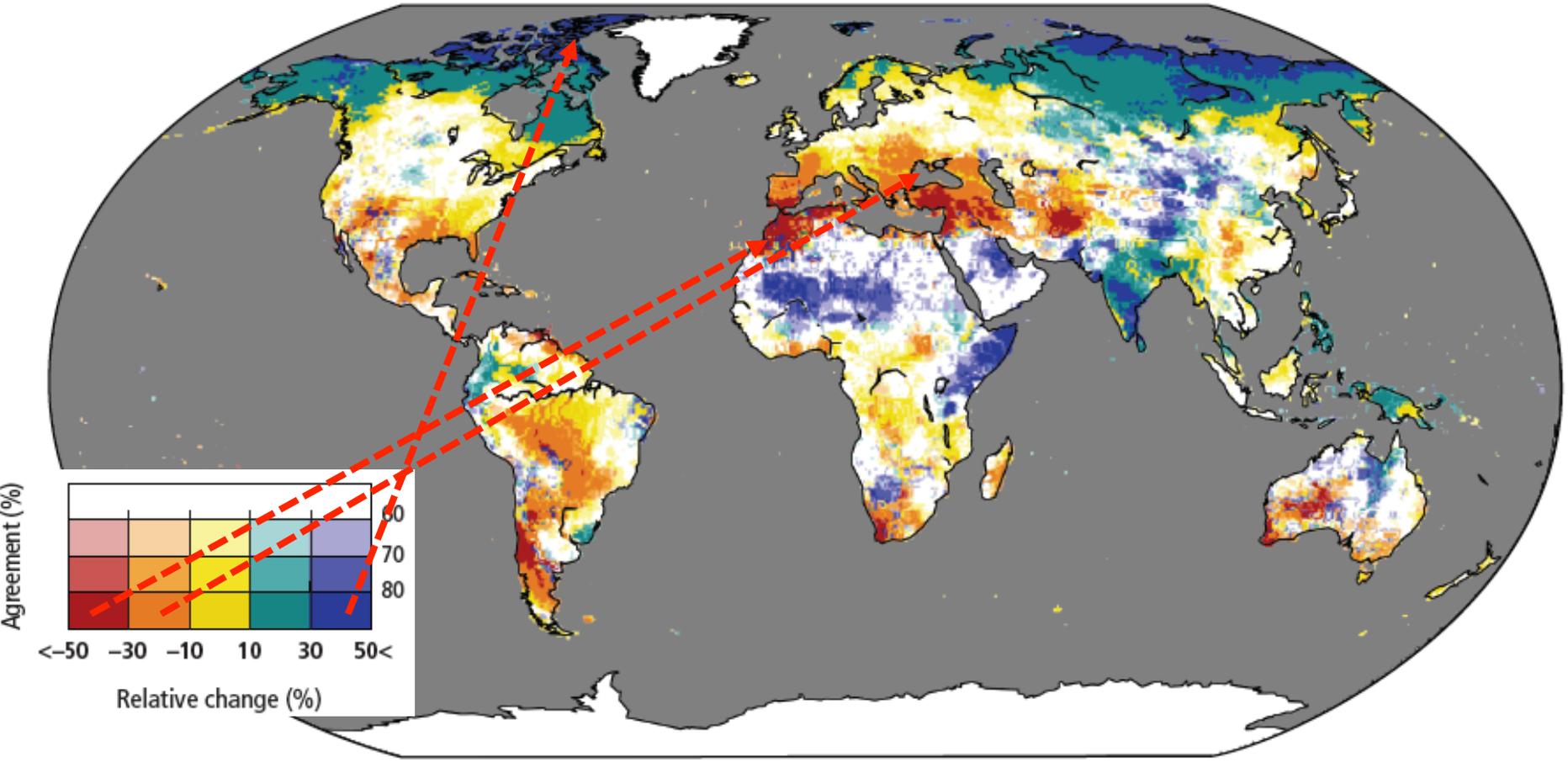
RCP60: 2081-2100

25



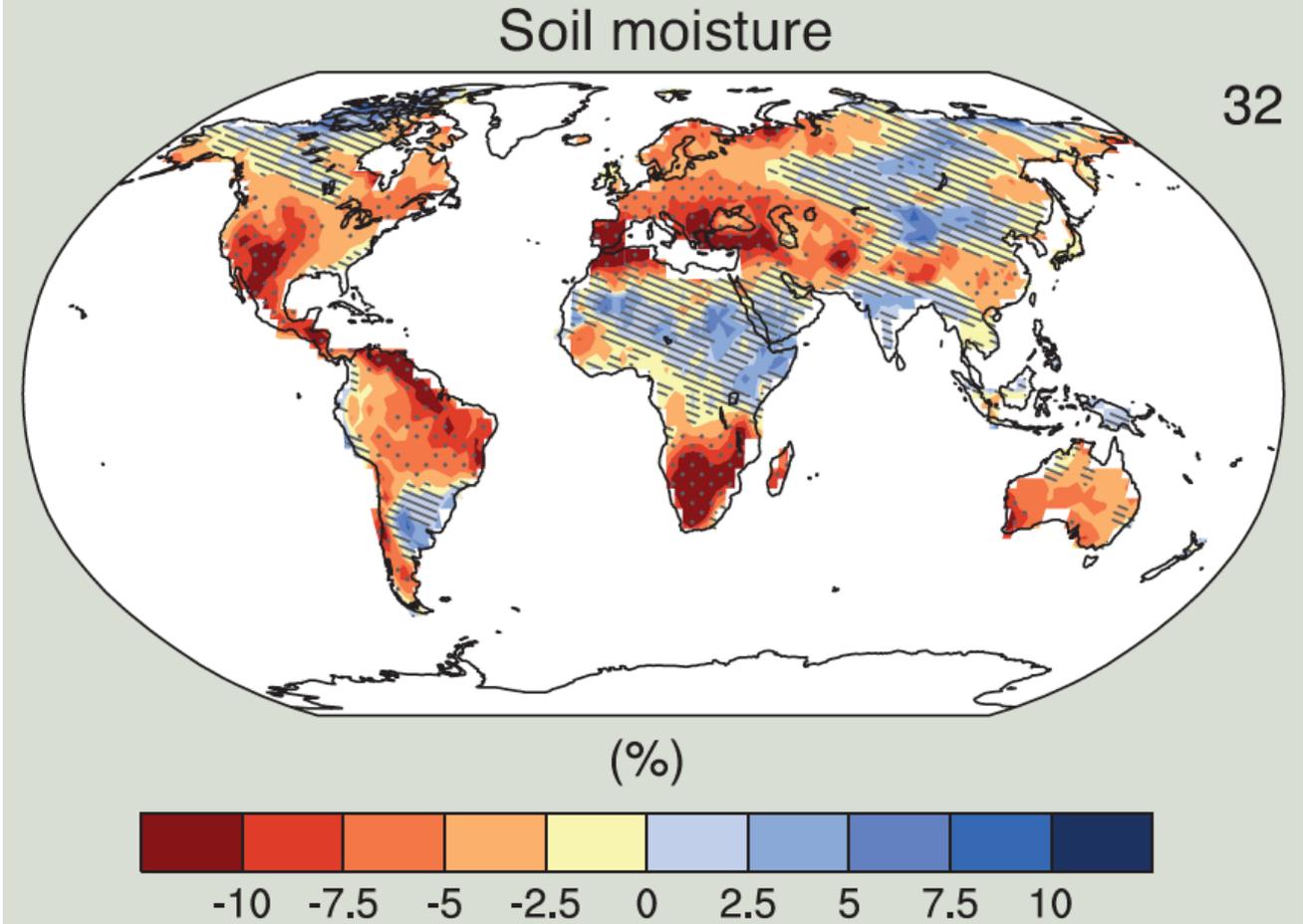
Évolution régionale de la température (°C) par rapport à la moyenne 1986-2005 selon le scénario. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Pleuvra, pleuvra pas ?



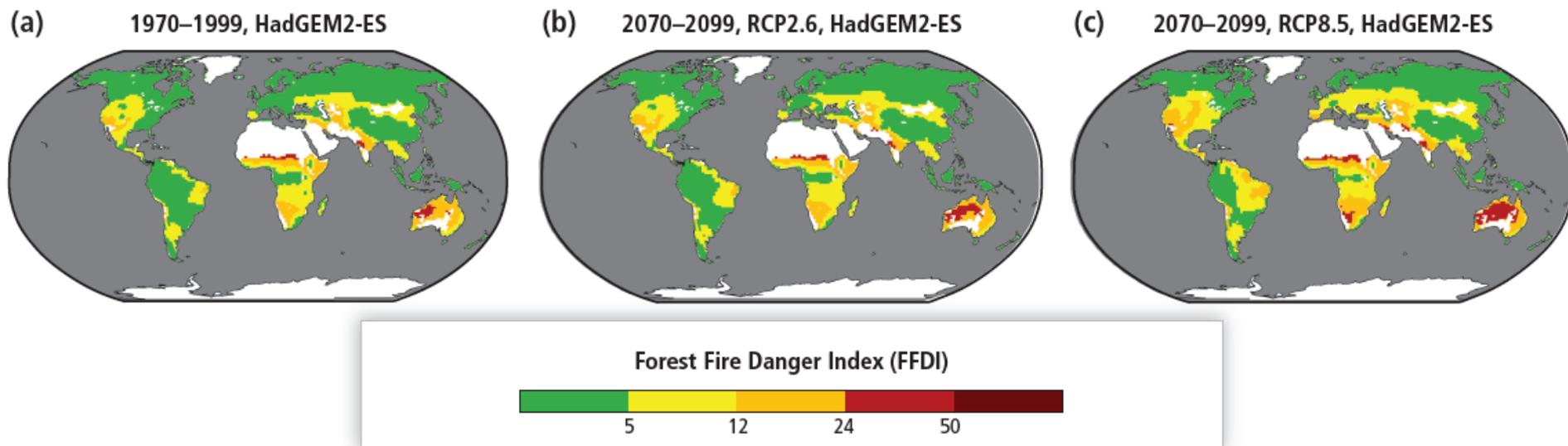
Moyenne inter-modèles de l'évolution des précipitations pour une élévation de 2°C par rapport à 1980-2010. Source : GIEC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Sèchera, sèchera pas ?



Évolution de l'humidité des sols en 2081–2100 par rapport à la moyenne 1986-2005 pour le scénario RCP 8.5 (≈ émissions x3 sur le 21è siècle). Source IPCC, 5è rapport d'évaluation, 2014

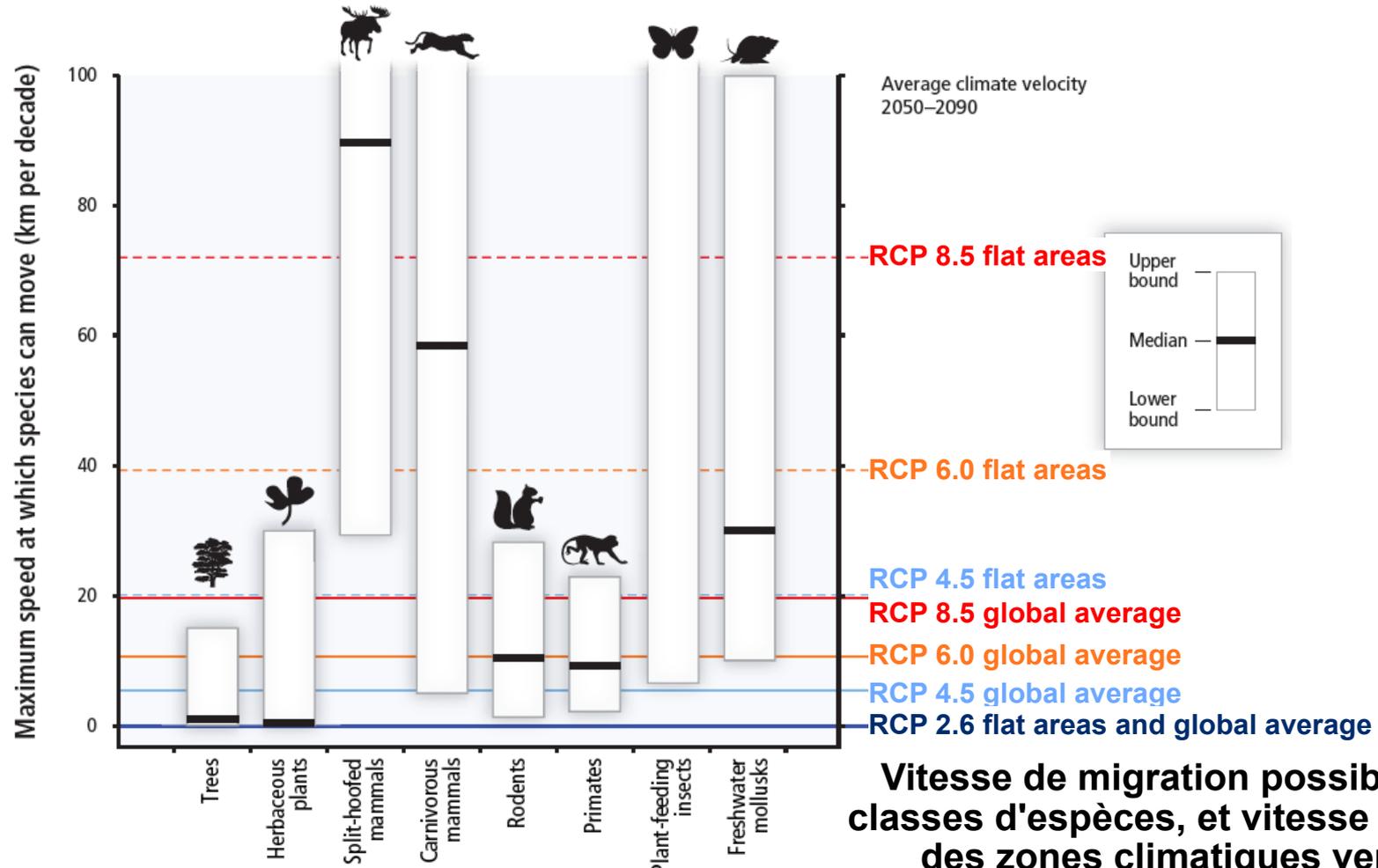
Brûlera, brûlera pas ?



Evolution de l'index de « danger d'incendie » selon le scénario.

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

Survivra, survivra pas ?

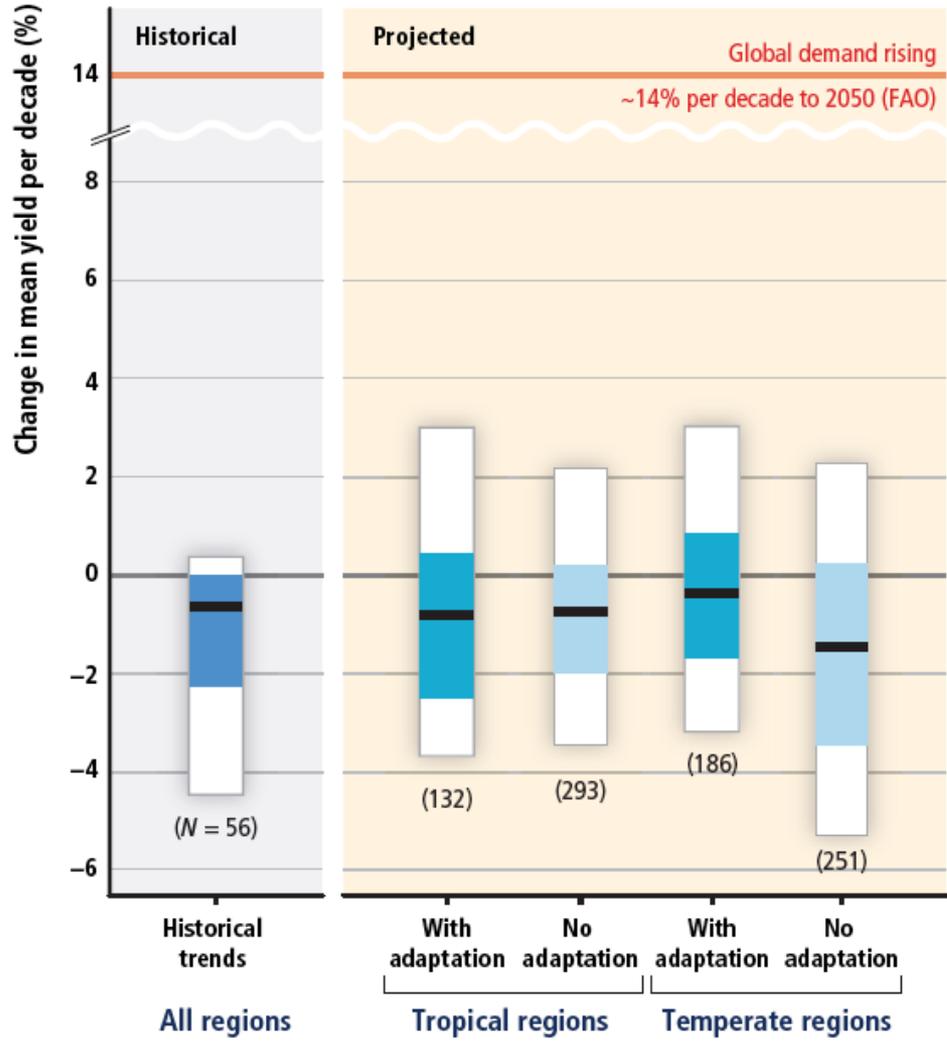


Vitesse de migration possible de diverses classes d'espèces, et vitesse de déplacement des zones climatiques vers les pôles.

Source GIEC, 5è rapport d'évaluation, 2014



Mangera, mangera pas ?

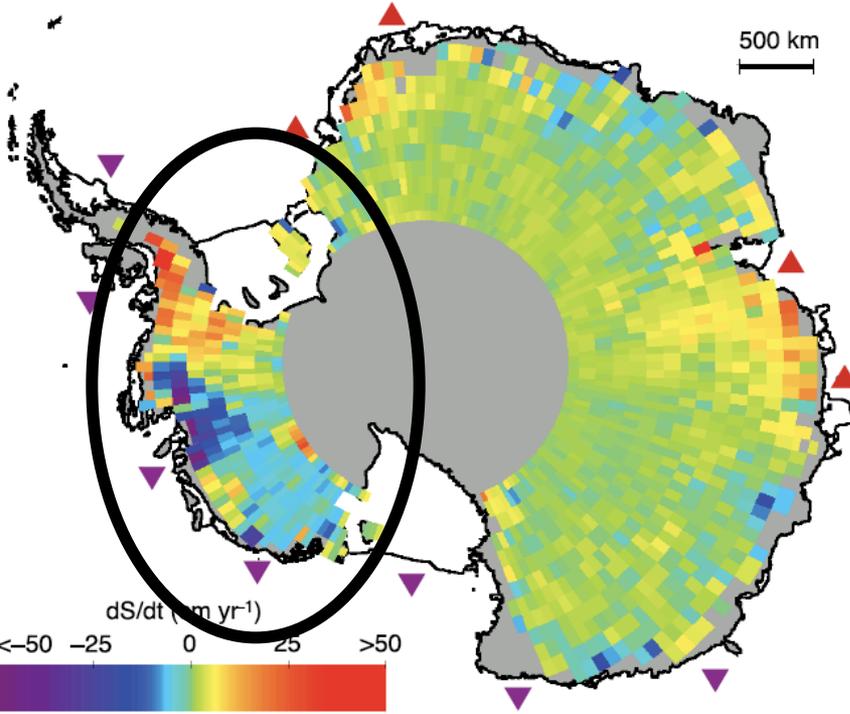


Variation des rendements (% par décennie) des cultures selon la zone climatique et l'existence ou non de mesures d'adaptation.

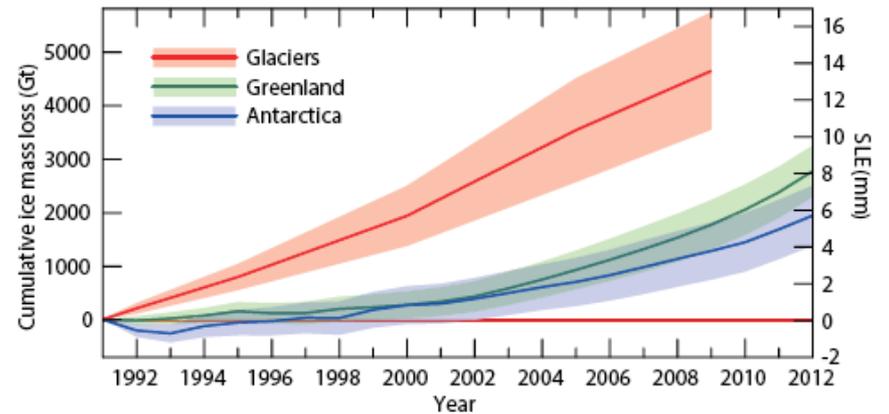
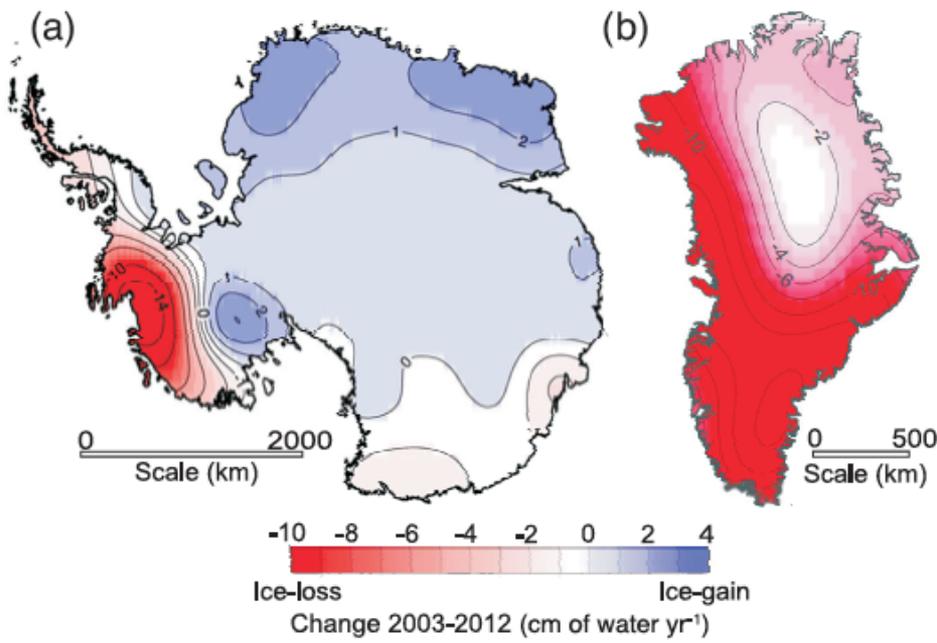
Source GIEC, 5è rapport d'évaluation, 2014



Fondra, fondra pas ?



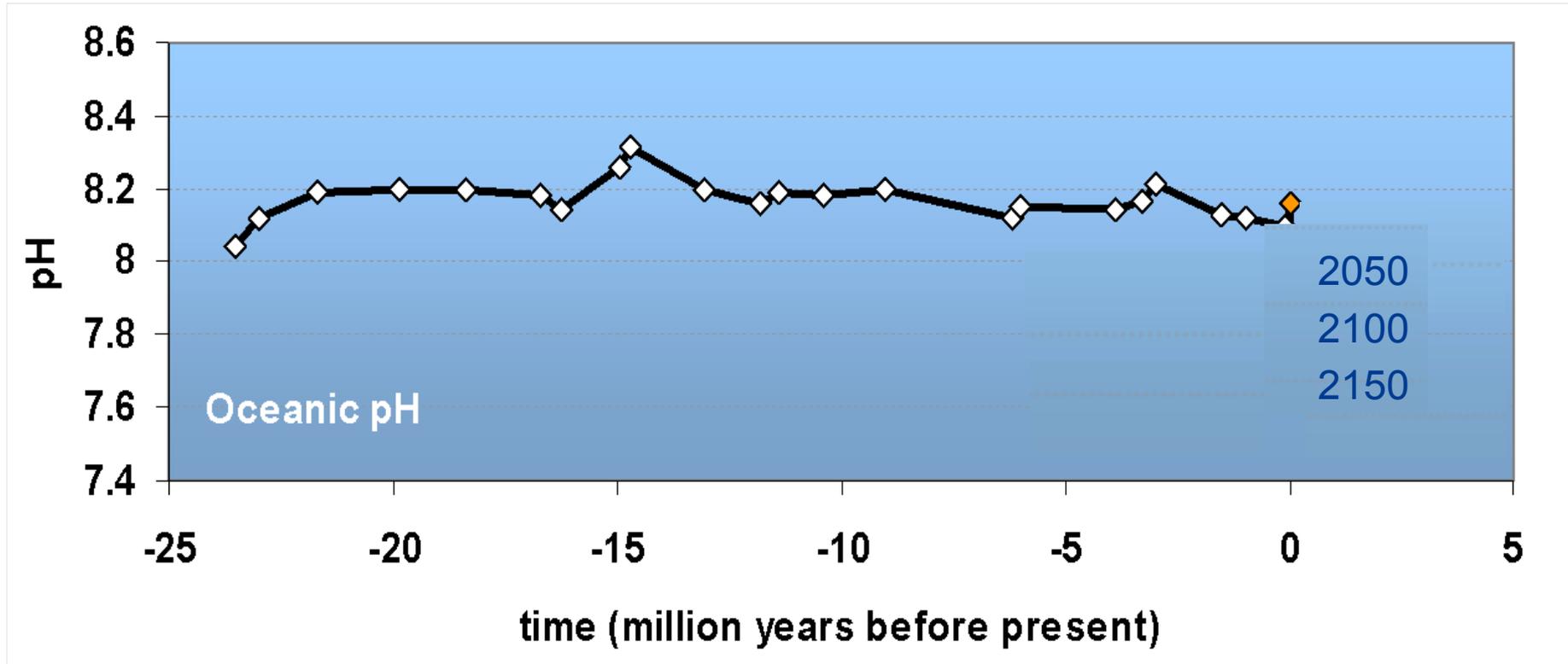
Variation annuelle moyenne de l'altitude du sommet de la calotte Antarctique (en cm), mesurée par altimétrie radar entre 1992 et 2003 (la proximité du pôle Sud n'est pas couverte). (4th Assessment Report, GIEC, 2007)



Variation de la surface des calottes sur la période 2003-2012 (haut), et contribution à la hausse du niveau de l'océan mondial (bas). (5th Assessment Report, GIEC, 2014)



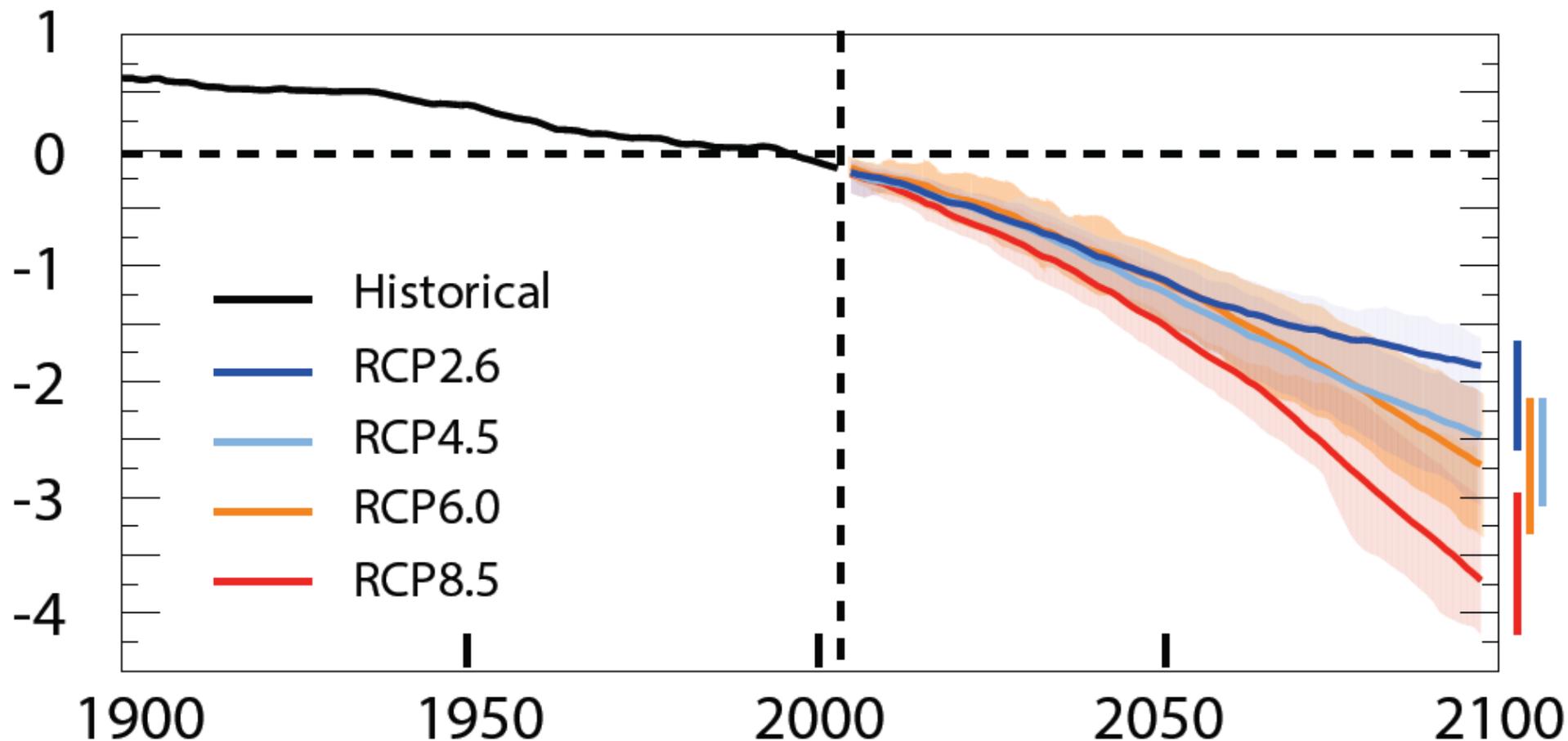
Le pH de l'océan, bien plus stable que tout régime politique !



Variation du pH de l'océan reconstruite depuis 24 millions d'années, et évolution possible à l'avenir.

Source Turley et al. 2006

Anoxie, ou pas anoxie ?

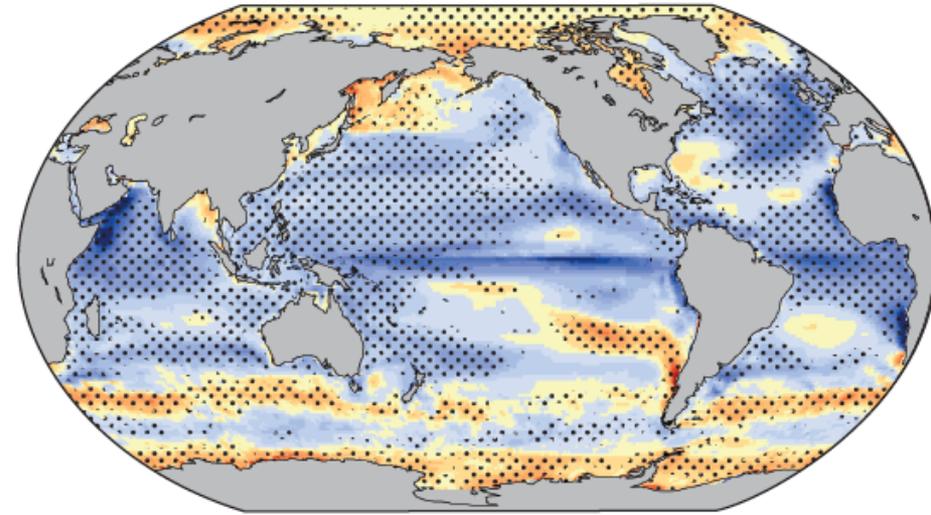
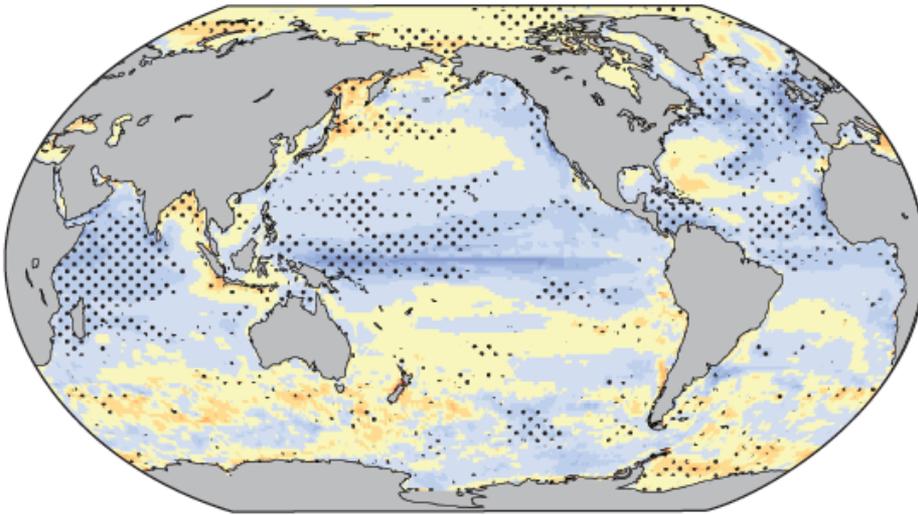


Variation (en %) du contenu de l'océan en oxygène dissous selon les scénarios de forçage radiatif. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Se développera, se développera pas ?

RCP2.6

RCP8.5

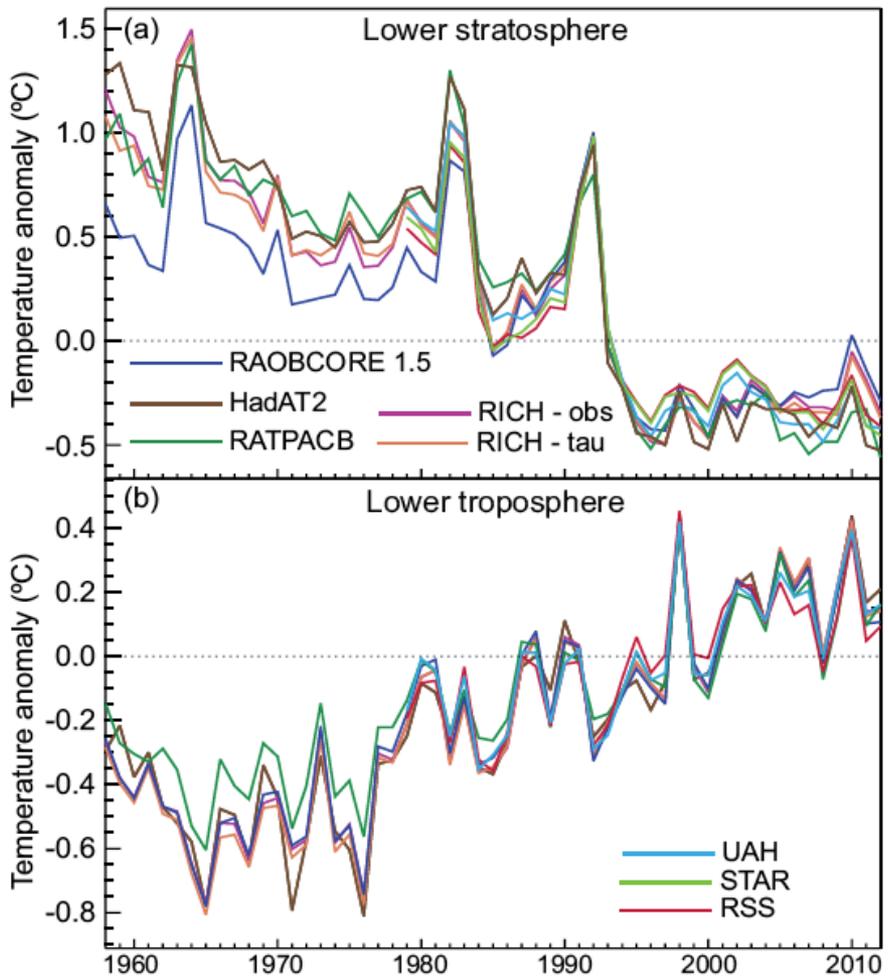


ΔPP ($\text{g C m}^{-2} = \text{year}^{-1}$)



Différence de productivité primaire des écosystèmes marins en 2100 avec la moyenne 1990-1999, selon la trajectoire de forçage radiatif. Source GIEC, 5th assessment report, 2013

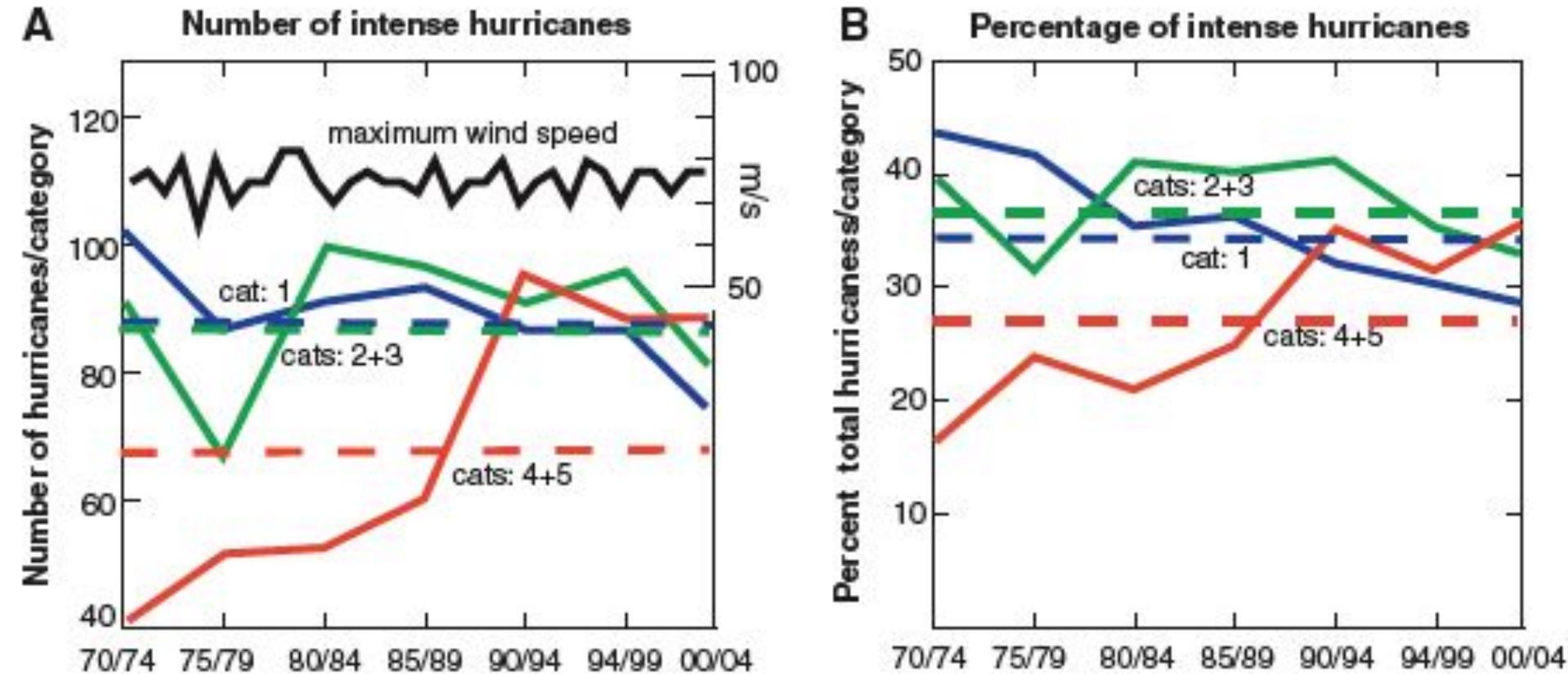
Chaud aux pieds mais froid à la tête



Evolution des températures moyennes près du sol (lower troposphere) et dans la partie basse de la stratosphère. Source IPCC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

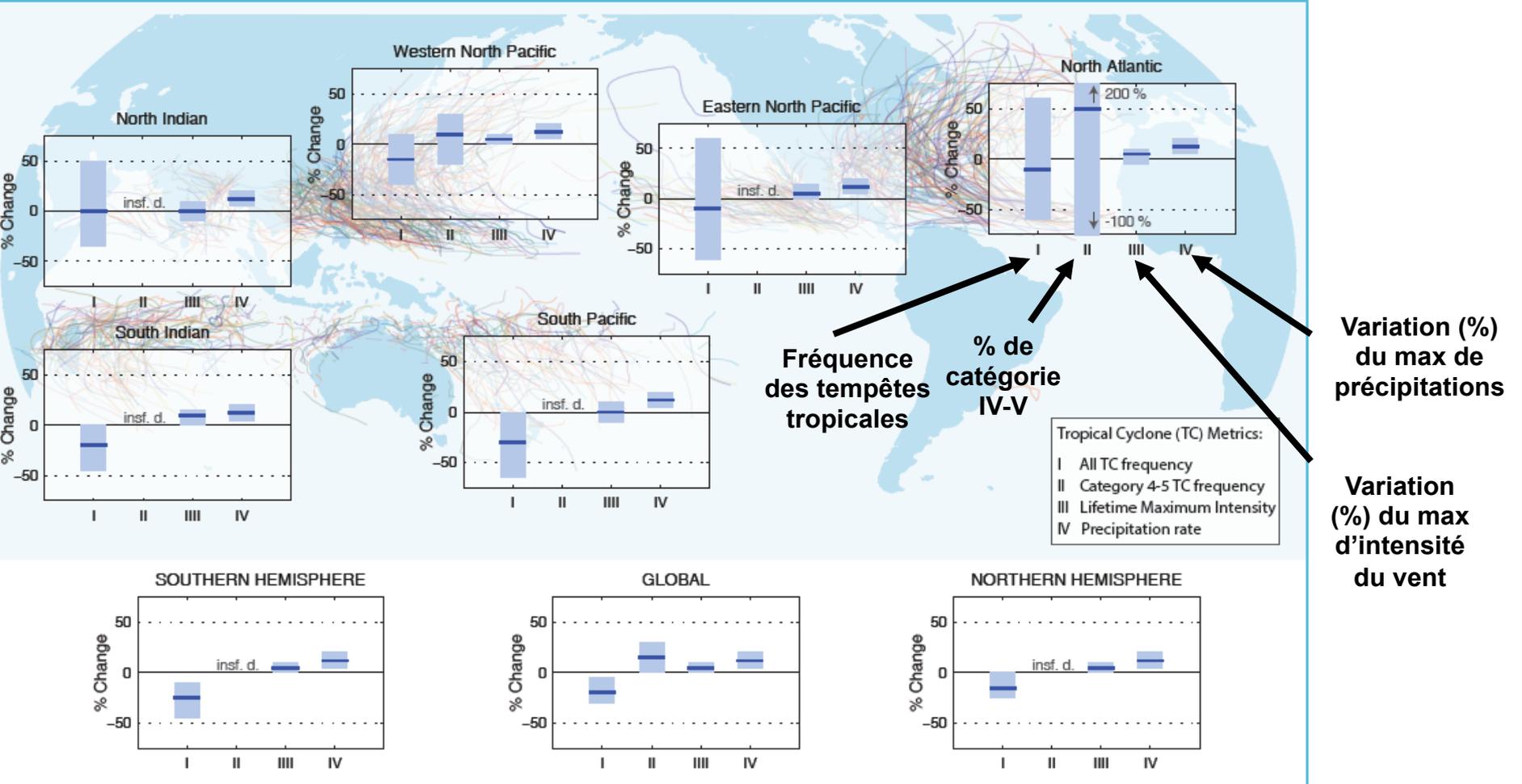


Une puissance cyclonique déjà accrue ? P'têt ben qu'oui....



Evolution sur 30 ans du nombre de cyclone dans le monde par catégorie (gauche), et proportion de chaque catégorie dans le total (droite). Source Science, 2005

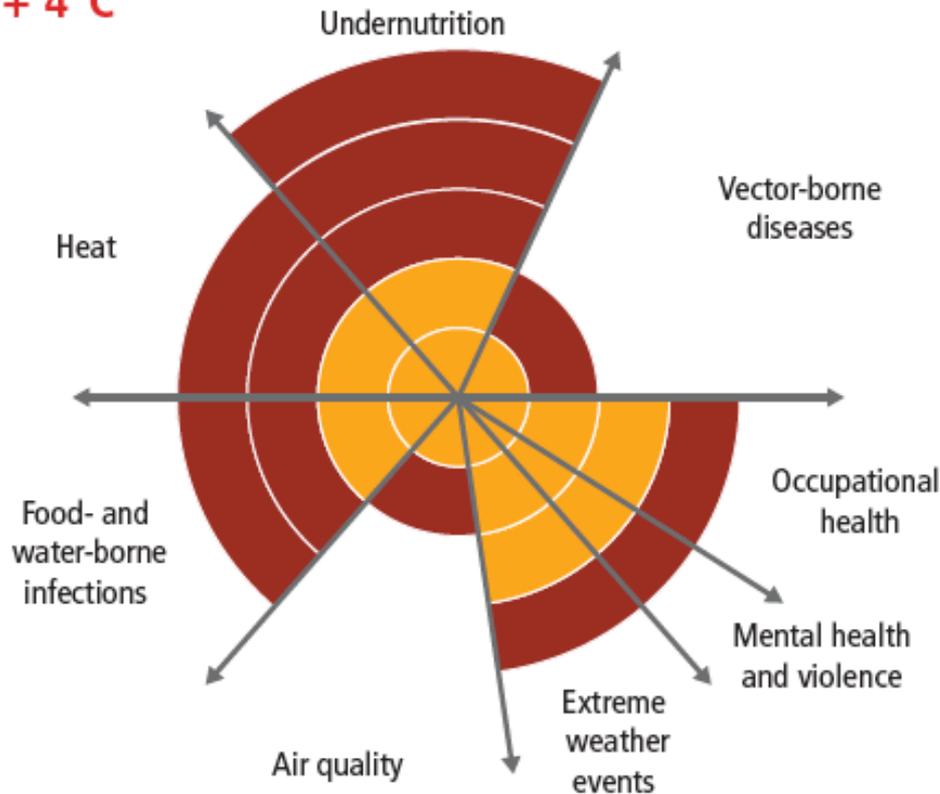
Une puissance cyclonique encore accrue ? P'têt ben qu'oui....



Variation en 2080-2100 (par rapport à 2000-2019) de caractéristiques diverses des tempêtes tropicales. Source GIEC, 5è rapport d'évaluation, 2013

C'est la petite bête qui monte... ou pas ?

+ 4°C



Risk and potential for adaptation

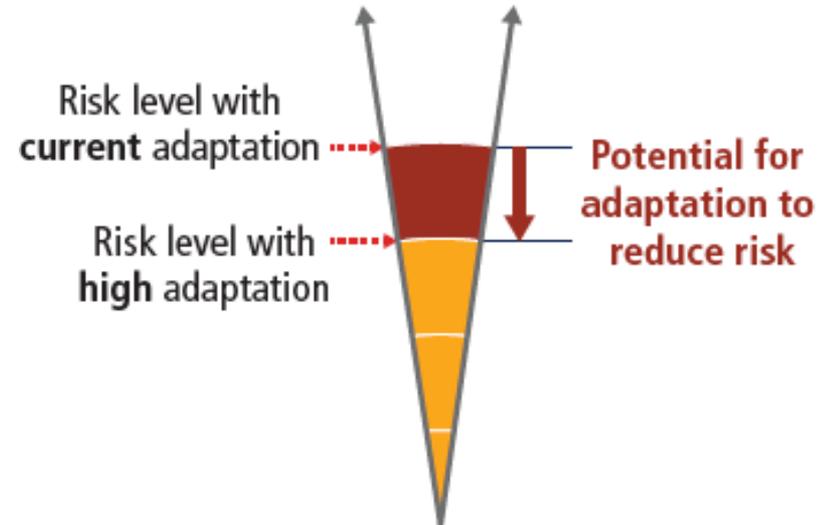


Illustration des divers risques sanitaires liés au changement climatique à l'horizon du siècle. Source GIEC, 5^e rapport d'évaluation, 2014

Crisera, crisera pas ?

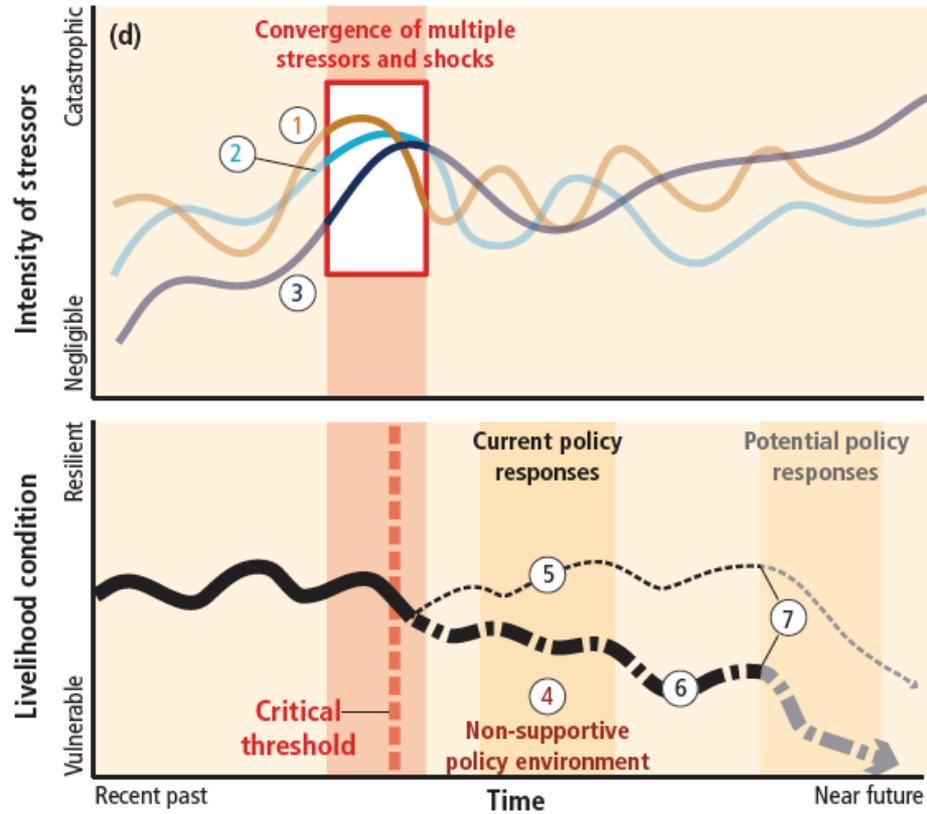
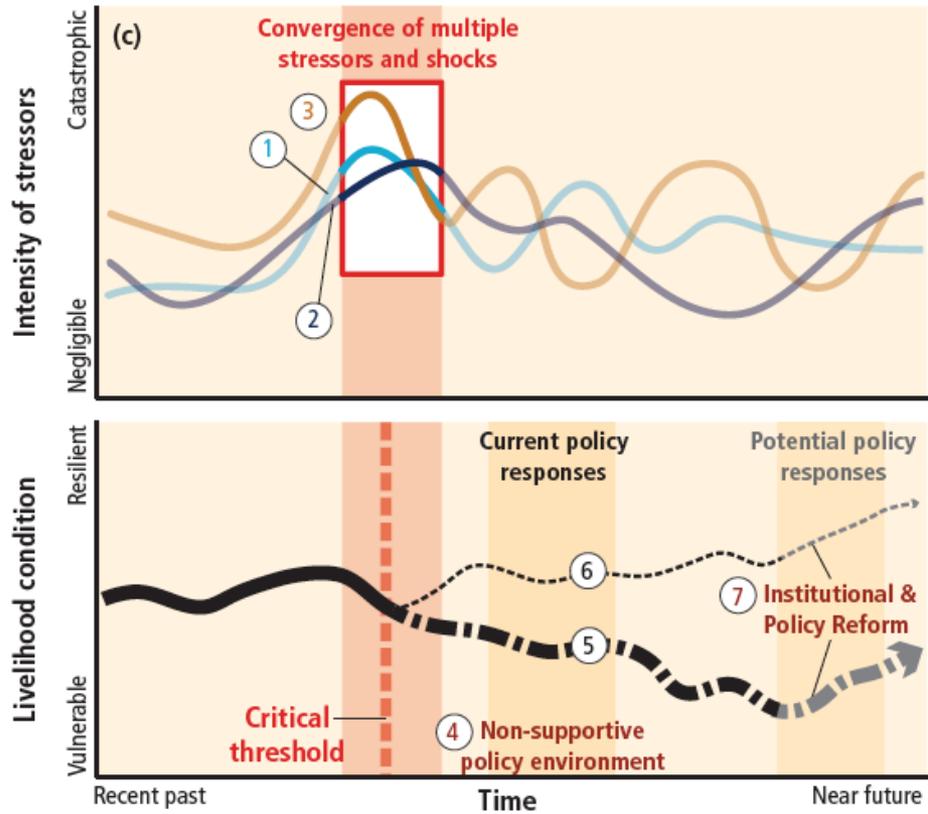


Illustration de l'imbrication des facteurs et de l'effet atténuateur ou amplificateur de la politique de réponse.

Source GIEC, 5è rapport d'évaluation, 2014



5°C, juste un pull en moins ?

22,000 – 14,000 ¹⁴C years ago



Present Potential Vegetation

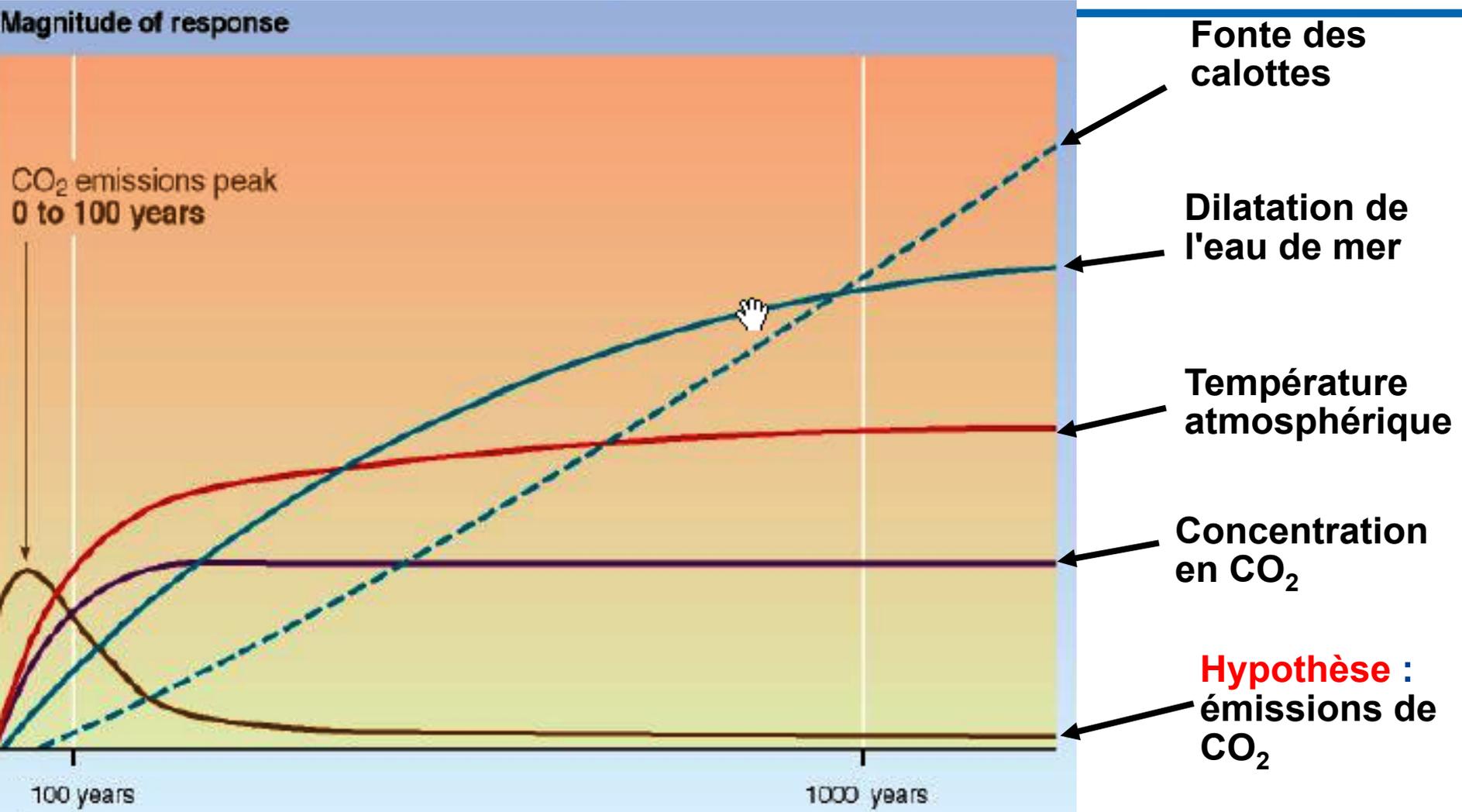


Source: Quaternary Environments Network
L'Europe il y a 20.000 ans

L'Europe actuelle

Moyenne ↗ +5°C

Au secours ! Où est le bouton « reset » ?



Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

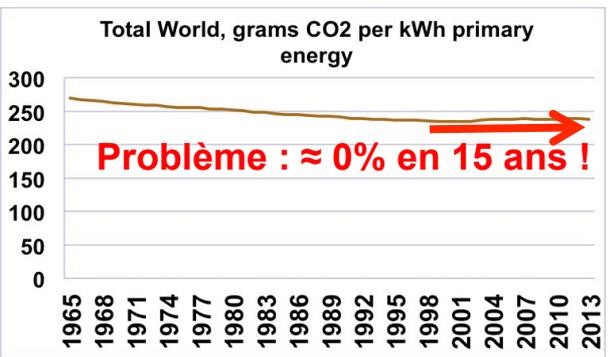
Le défi climatique : redoutable ... mais sans échappatoire

L'équation de Kaya :

**A diviser par 3 d'ici 2050...
et le sera !**

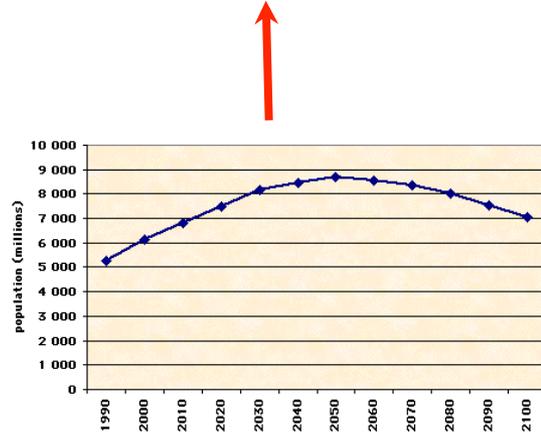
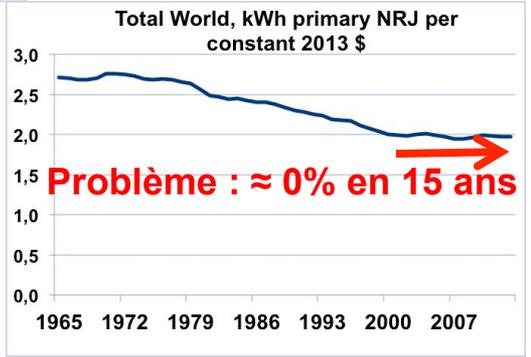
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

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



Magic technique N°2 :
 ↘ CO₂ par kWh = nuke, ENR, CCS & charbon vers gaz

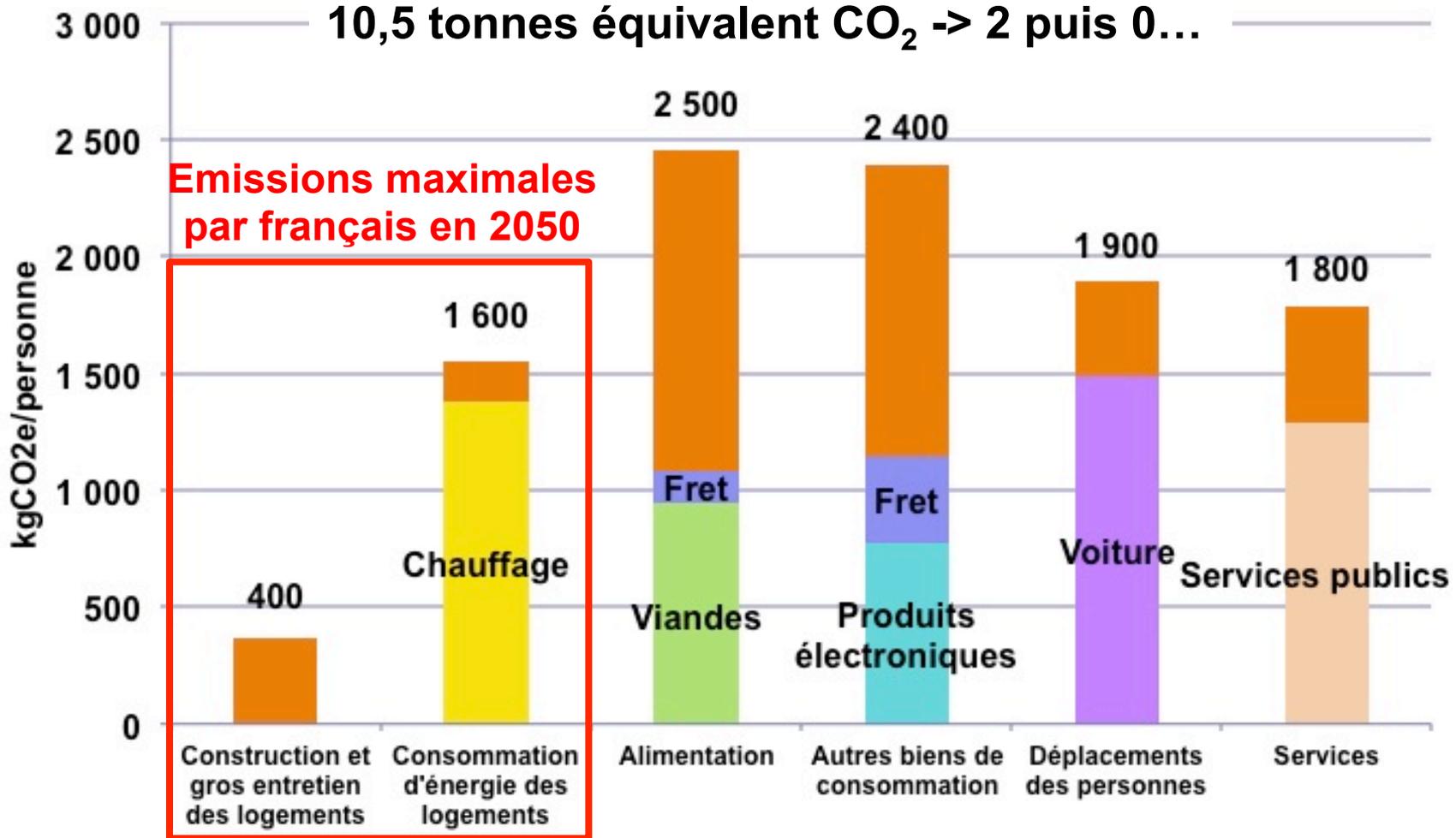
Magic technique N°1 :
 ↘ NRJ par \$ de PIB



+ 2% par an = x 2 en 36 ans ; + 4% par an = x 4 en 36 ans !!!

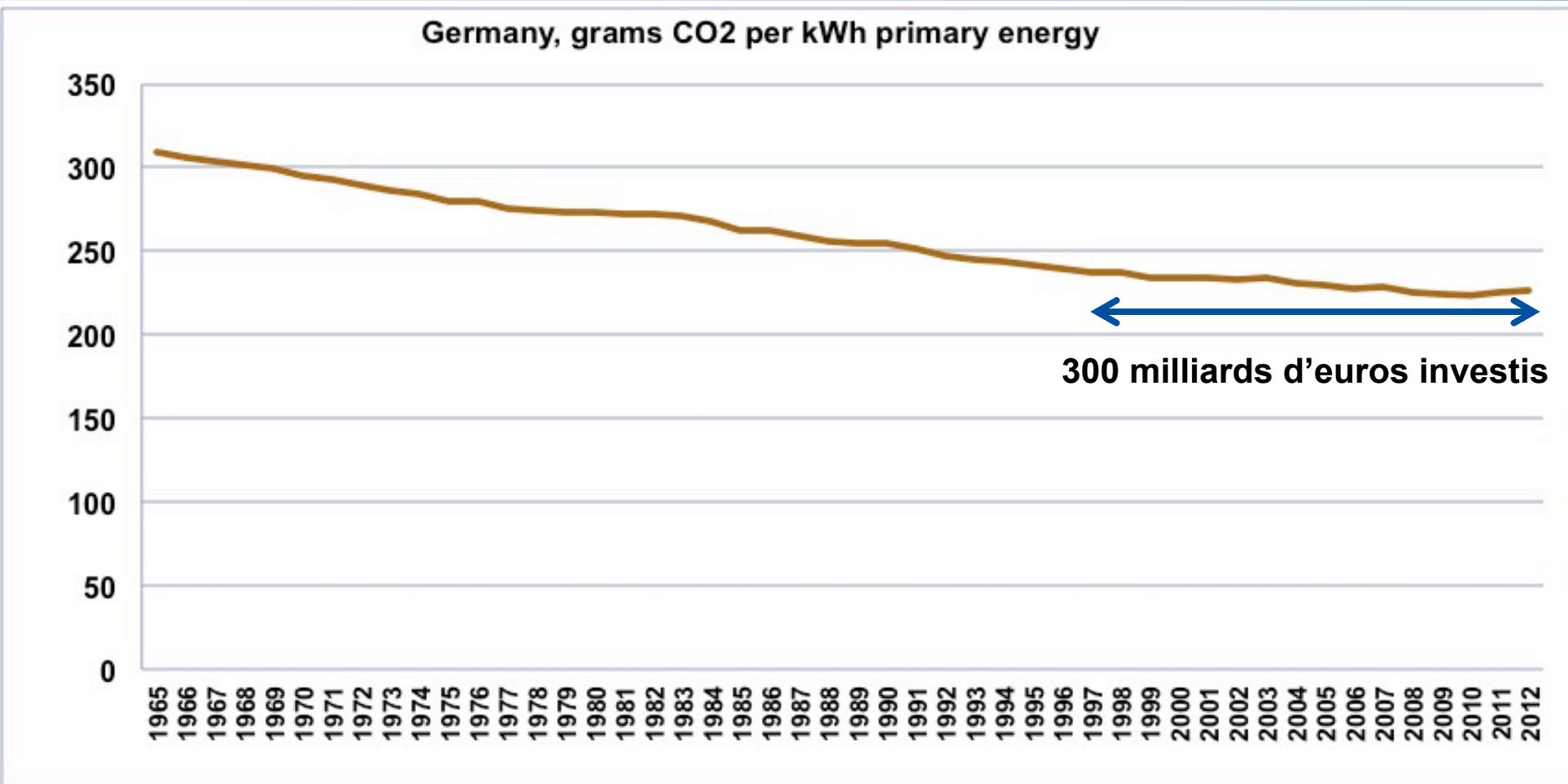


Eviter 5°C, les doigts dans le nez ?



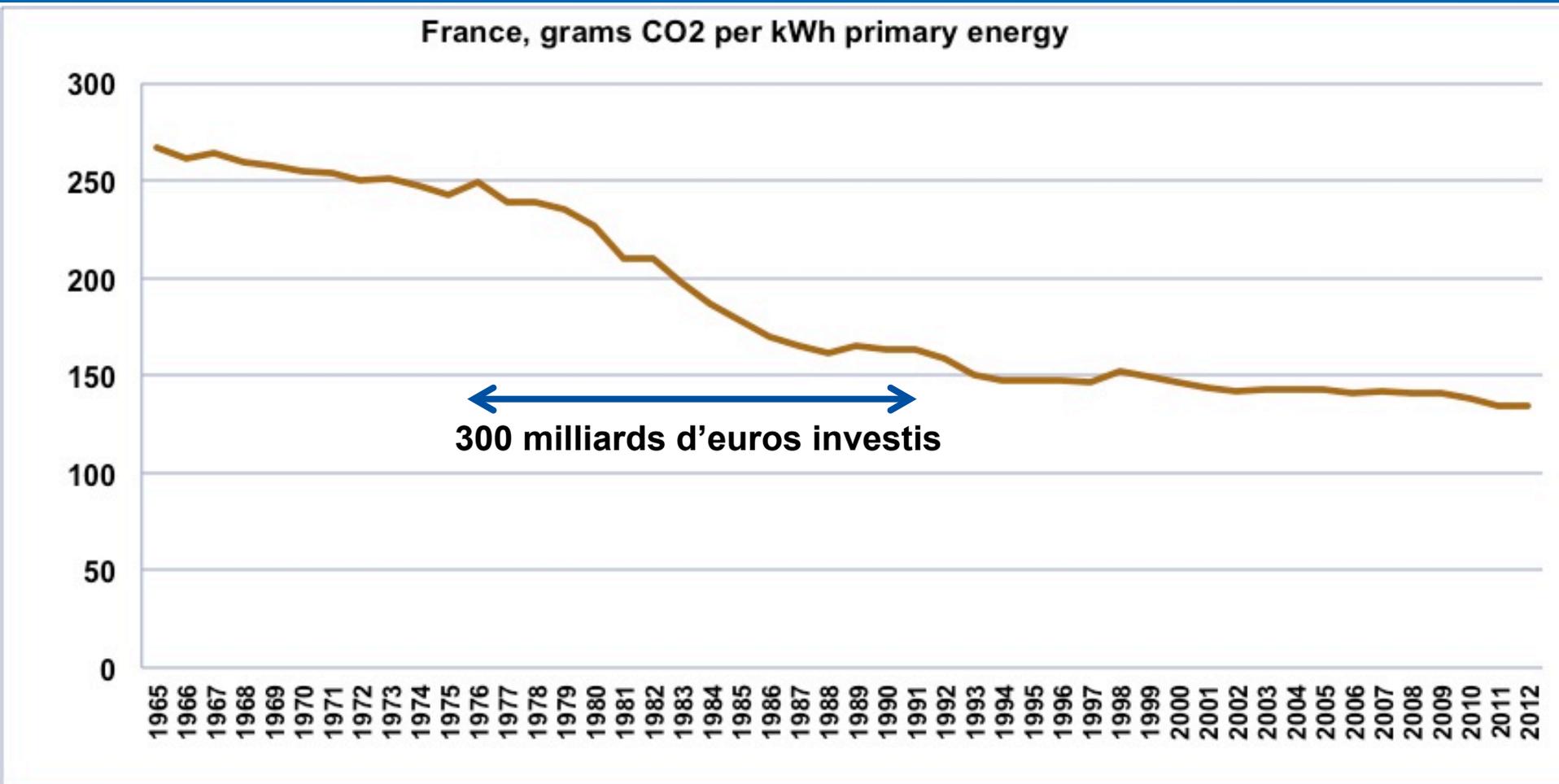
Empreinte carbone d'un français en 2010. Calculs Carbone 4.

Je dépense 300 milliards € pour faire moins de CO₂ : 1^{ère} option



Emissions de CO₂ par kWh d'énergie primaire en Allemagne depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review

Je dépense 300 milliards € pour faire moins de CO₂ : 2^{ème} option



Emissions de CO₂ par kWh d'énergie primaire en France depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review

Moins de nucléaire et plus d'éolien, facile ?

Nucléaire

Eolien

Facteur de charge	80%	$\xrightarrow{\times 4}$	20%
Durée de vie	60 ans	$\xrightarrow{\times 3}$	20 ans
Réseau	≈ 0	$\xrightarrow{\times 2}$	\approx cout éolienne
Stockage	10%	$\xrightarrow{\times 2}$	80%
Cout au kW	4.000 €	$\xrightarrow{\div 2,5}$	1.500 €
Total capex/kWh		$\approx \times 20$	



J'aime les Nations Unies... ou pas !



UNEP

United Nations
Environment Programme



**World
Meteorological
Organization**

Weather • Climate • Water



UNEP

United Nations
Environment Programme



WHO

World Health
Organization



1988



**United Nations Scientific Committee on
the Effects of Atomic Radiation**

1955



Et clairement les antinucléaires n'aiment pas les Nations Unies

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION UNSCEAR 2013 Report

Volume I

REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY

SCIENTIFIC ANNEX A:

Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami

321 pages (personne ne les lit)

Page 10 : The doses to the general public, both those incurred during the first year and estimated for their lifetimes, are generally low or very low. **No discernible increased incidence of radiation-related health effects are expected** among exposed members of the public or their descendants.

Et clairement les antinucléaires n'aiment pas les Nations Unies



United Nations Scientific Committee on
the Effects of Atomic Radiation

2006 report on Chernobyl

Des centaines de pages aussi !

On y trouve : Apart from the dramatic increase in thyroid cancer incidence among those exposed at a young age, and some indication of an increased leukaemia and cataract incidence among the workers, **there is no clearly demonstrated increase in the incidence of solid cancers or leukaemia due to radiation in the exposed populations.** Neither is there any proof of other non-malignant disorders that are related to ionizing radiation.



Bref...

Décarboner le monde n'est pas une option : cela arrivera de toute façon, parce que pétrole, gaz et charbon sont en quantité finie

Ou bien nous le souhaitons, et c'est un programme politique sur 50 à 100 ans, mais qui ne fonctionnera que si nous ne nous trompons pas de mesures

Ou bien nous pensons pouvoir le refuser (des variantes étant de s'attaquer aux problèmes dans le mauvais ordre, ou de les comprendre de travers, etc), mais alors nous le subirons quand même, dans la douleur et le chaos croissant.

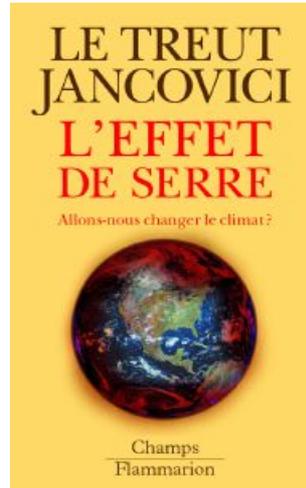
Des questions ?



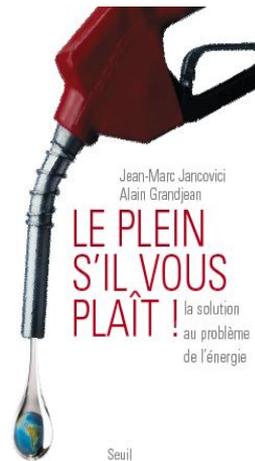
La même chose (ou presque), en 1500 pages



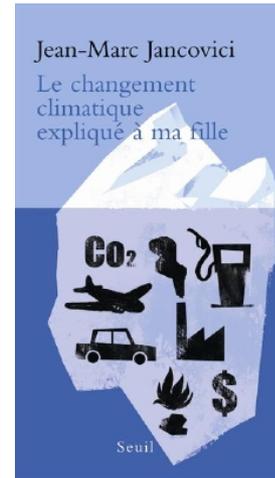
Très cher : 8 €



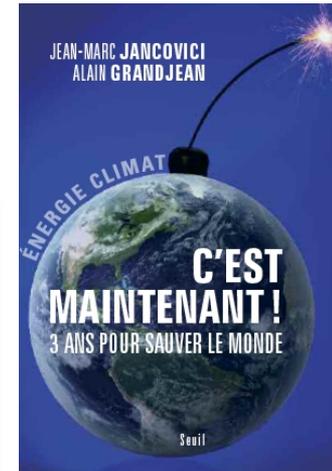
Très cher : 8 €



Très cher : 6,5 €



Très cher : 7 €



Très cher : 8 €



Très cher : 8 €

Gratuit... sous réserve d'avoir un ordinateur à 500 € (au moins), un abonnement internet à 19,99 €/mois, et un patron ou un conjoint complaisant : www.manicore.com