

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



**Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech 2019
Partie 1 - Du big bang à nos jours**



Selon vous, qu'est-ce que l'énergie ?

• A:

Ma facture d'électricité
(voire de gaz)

• B:

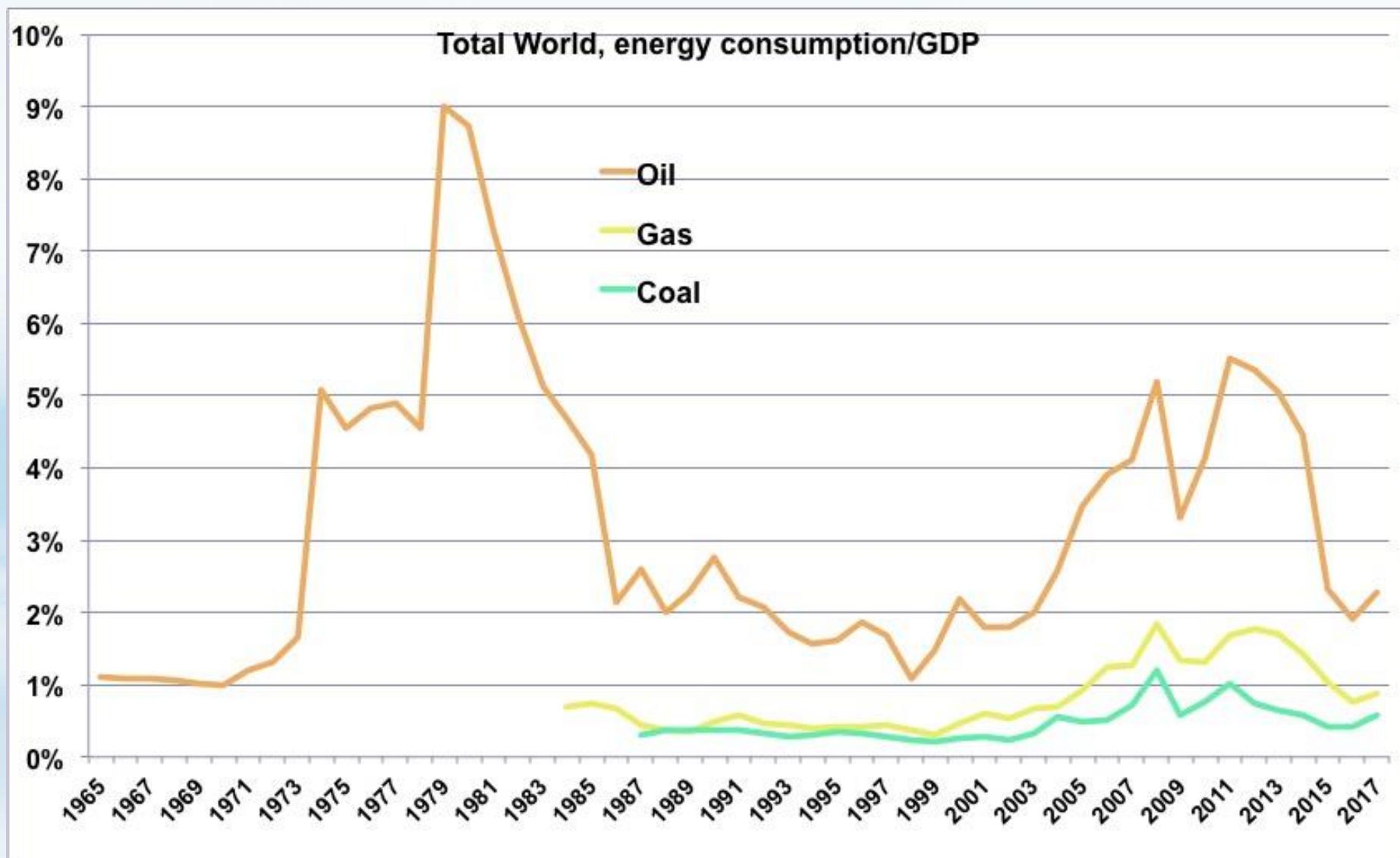
• C:

• D:

Une facture, vous dis-je !



Si l'énergie n'est qu'une facture (bis)...



Fraction du revenu consacré à l'achat d'énergie brute en moyenne mondiale. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review et World Bank.

On ne va quand même pas passer la nuit sur 5% de nos couts



= 5%



= 5%



= 2%





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 compte la transformation,
ou j'ai dit une bêtise ?

Back to basics : qu'est-ce que l'énergie ?

L'énergie est la grandeur physique qui permet de caractériser un changement d'état dans un système :

Modification de température



Modification de la vitesse



Modification de forme



Modification de la composition chimique



Modification de la position dans un champ (magnétique, électrique, gravitationnel...)

Changement de composition atomique



Modification de l'énergie ou du nombre de photons



L'énergie n'est donc rien d'autre que l'unité de compte de la transformation du monde qui nous entoure

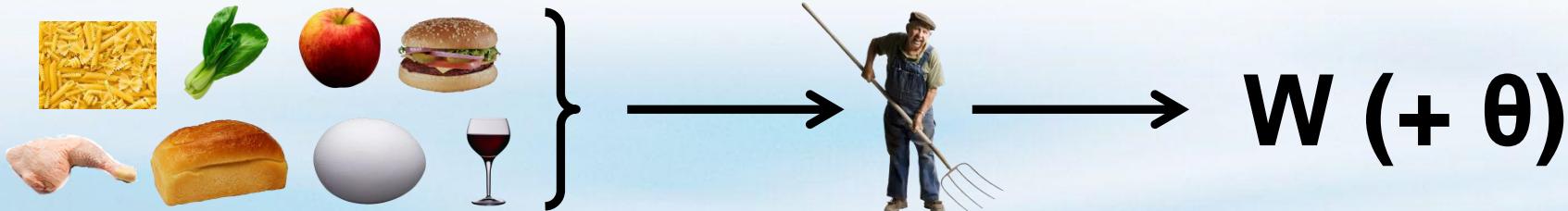
- -500.000 ans : domestication du feu.
- L'antiquité : toutes les renouvelables ont été utilisées ! Bois, vent, soleil, hydraulique, traction animale...
- Le pétrole est connu des Summériens (-3.000 av. JC environ), bien avant Drake et son premier forage (1859 à Tittusville).
- Le charbon est exploité dans la Chine antique 1000 ans avant notre ère.
- Ce qui caractérise l'ère « moderne », ce n'est pas l'utilisation de sources « nouvelles » (sauf le nucléaire et le photovoltaïque), mais le **changement d'ordre de grandeur dans leur usage**.

Oubliez « énergie », pensez « machines »

L'énergie, c'est ce qui **quantifie** la transformation de l'environnement

A cause de la loi de conservation de l'énergie, « utiliser de l'énergie », c'est en pratique **extraire de l'énergie de l'environnement (où elle se trouve déjà)** et la transformer avec un convertisseur.

La seule énergie que les hommes peuvent convertir en direct, c'est la biomasse et ses dérivés comestibles



Pour utiliser « plus puissant que soi » il faut un autre convertisseur, et l'énergie qui l'alimente



« Utiliser de plus en plus d'énergie », c'est aujourd'hui en pratique « commander de plus en plus de machinerie »

Enfiler une culotte ? De l'énergie !



En coton



En synthétique



Tout le temps



Dès qu'elle est rose
(ou bleue)



Tout le temps



Tout le temps



Tout le temps

Se laver les dents devant la glace ? De l'énergie !



Sorbitol



Plastique



Mise en forme



La glace à sa naissance...



Tout transport d'un maillon au suivant

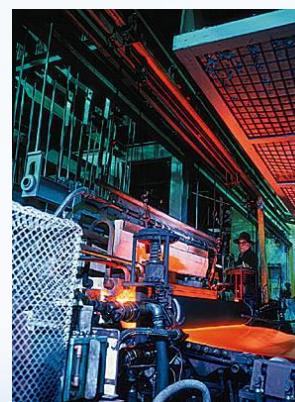


Construction des usines, magasins, entrepôts...



Filtration de l'eau potable

Passer un coup de fil ? De l'énergie !



**Supports
d'antenne**

**Passage des
câbles**

serveurs

Il existe de multiples unités pour « compter » l'énergie :

La seule orthodoxe (normalement) : le joule. Un Français utilise (directement et indirectement) environ 170 GJ par an

La plus usuelle pour un Français : le kWh (3,6 MJ), ou... le litre de carburant (soit ≈ 10 kWh). Un Français utiliser 50.000 kWh par an

La plus fréquente chez l'énergéticien « global » : la tonne équivalent pétrole (tep) et ses multiples ; une tep $\approx 41,8$ GJ ≈ 11.600 kWh.

Celle du physicien des particules : l'électron-volt. 1 ev $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ J

La mienne (vous verrez pourquoi) : l'équivalent esclave ; un EE = 100 kWh.

Nietzsche voulait des surhommes : le carbone l'a fait



$80 \text{ kg} + 10 \text{ kg}$
 $\times 2000 \text{ m de}$
 dénivelée
 $\approx 0,5 \text{ kWh}$

$\rightarrow \times 10$

$\rightarrow \div 500$

$\rightarrow \div 10$

$100 \rightarrow \times 100$

$\rightarrow \div$

5000

1 jour sur 2 : 100 kWh/an

Au SMIC : 200 €/kWh

Même un esclave : 4-40 €/kWh

$6 \text{ m}^3 \text{ terre} \times 1 \text{ m}$

$0,05 \text{ kWh}$
(10 kWh/an)

2000 €/kWh



La physique sera toujours plus forte que les slogans

La loi de conservation impose que l'homme ne peut rien faire d'autre que d'exploiter à son profit une source d'énergie déjà existante dans l'environnement

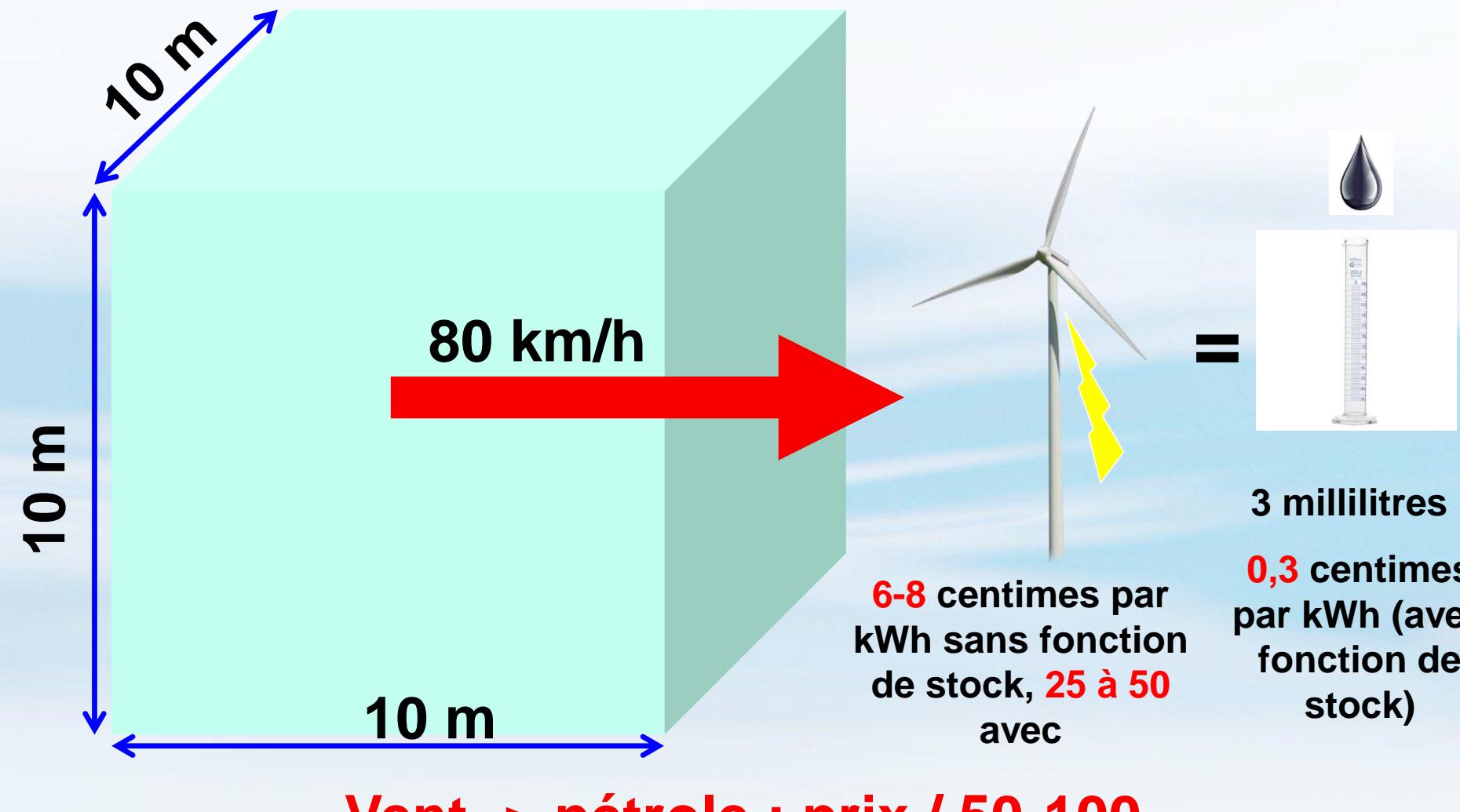
L'énergie étant par définition la marque de la transformation, il n'existe aucune énergie propre ou sale dans l'absolu : choisir une énergie, c'est choisir les contreparties, pas les supprimer

Toutes les énergies primaires sont gratuites : personne n'a rien payé pour que se forment le pétrole, le gaz, l'uranium, le soleil ou le vent. **Les hydrocarbures sont aussi gratuits que les renouvelables.**

Le « cout de l'énergie » représente uniquement les revenus humains qu'il a fallu payer pour extraire l'énergie de l'environnement. La nature ne se fait jamais payer.

Plus une énergie est diffuse et non pilotable, plus elle coutera cher à extraire. C'est juste de la physique.

Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



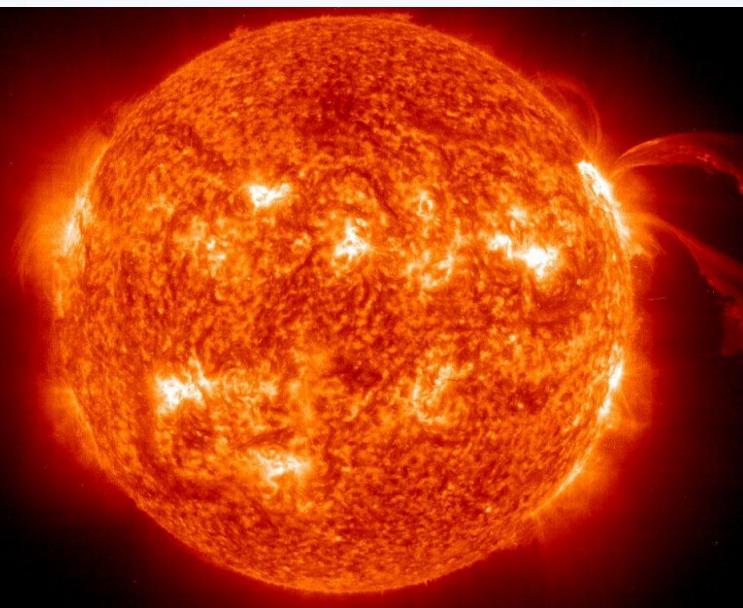
Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



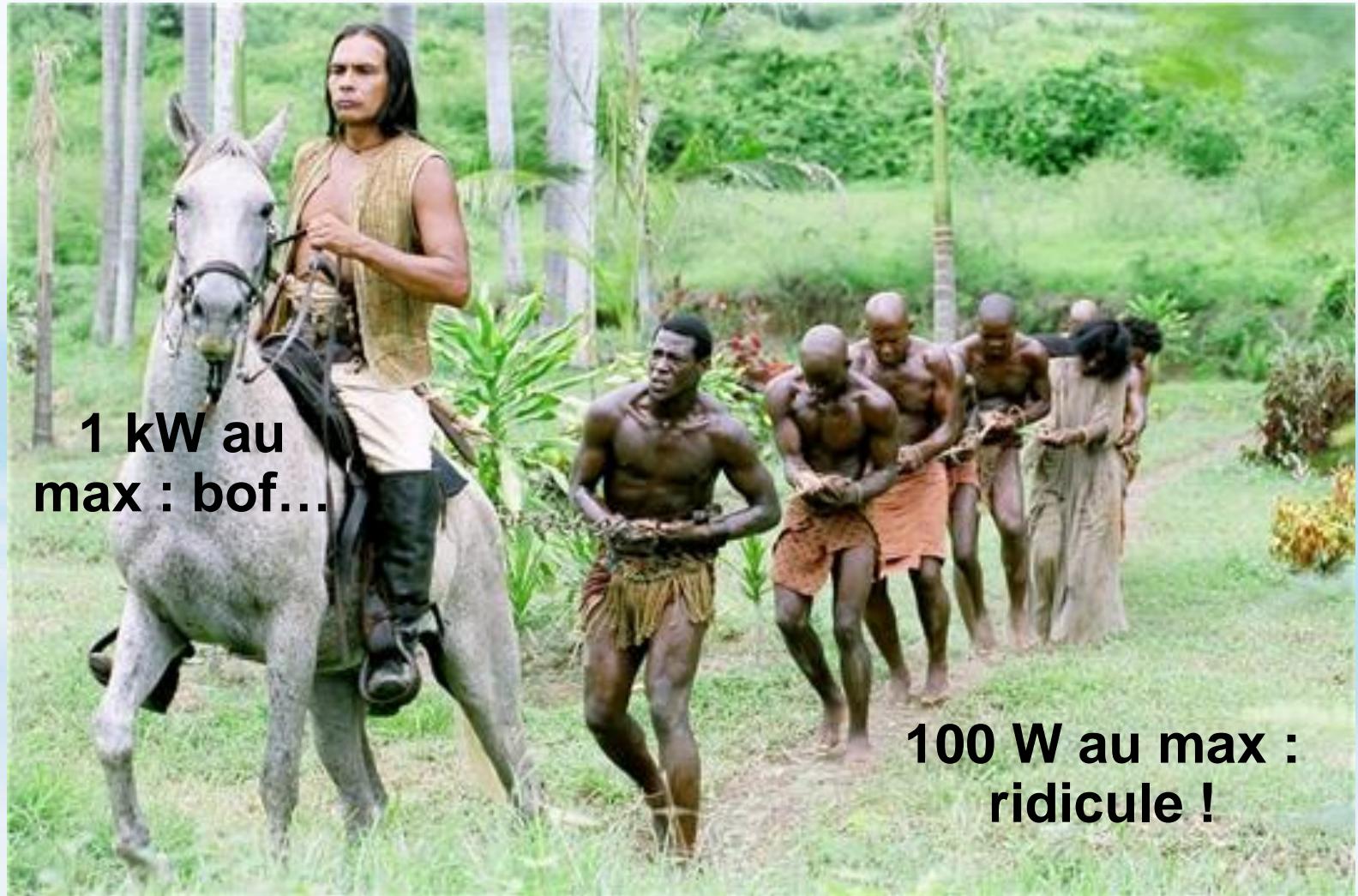
Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Avant pétrole & co : ni moral ni efficace, mais très durable



L'homme produit avec machine, ou la machine produit avec hommes ?



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



= 60 kW ≈ 600 paires de jambes



= 100 kW ≈ 10.000 paires de bras



= 400 kW ≈ 4.000 paires de jambes



= 100 MW ≈ 1.000.000 paires de jambes...

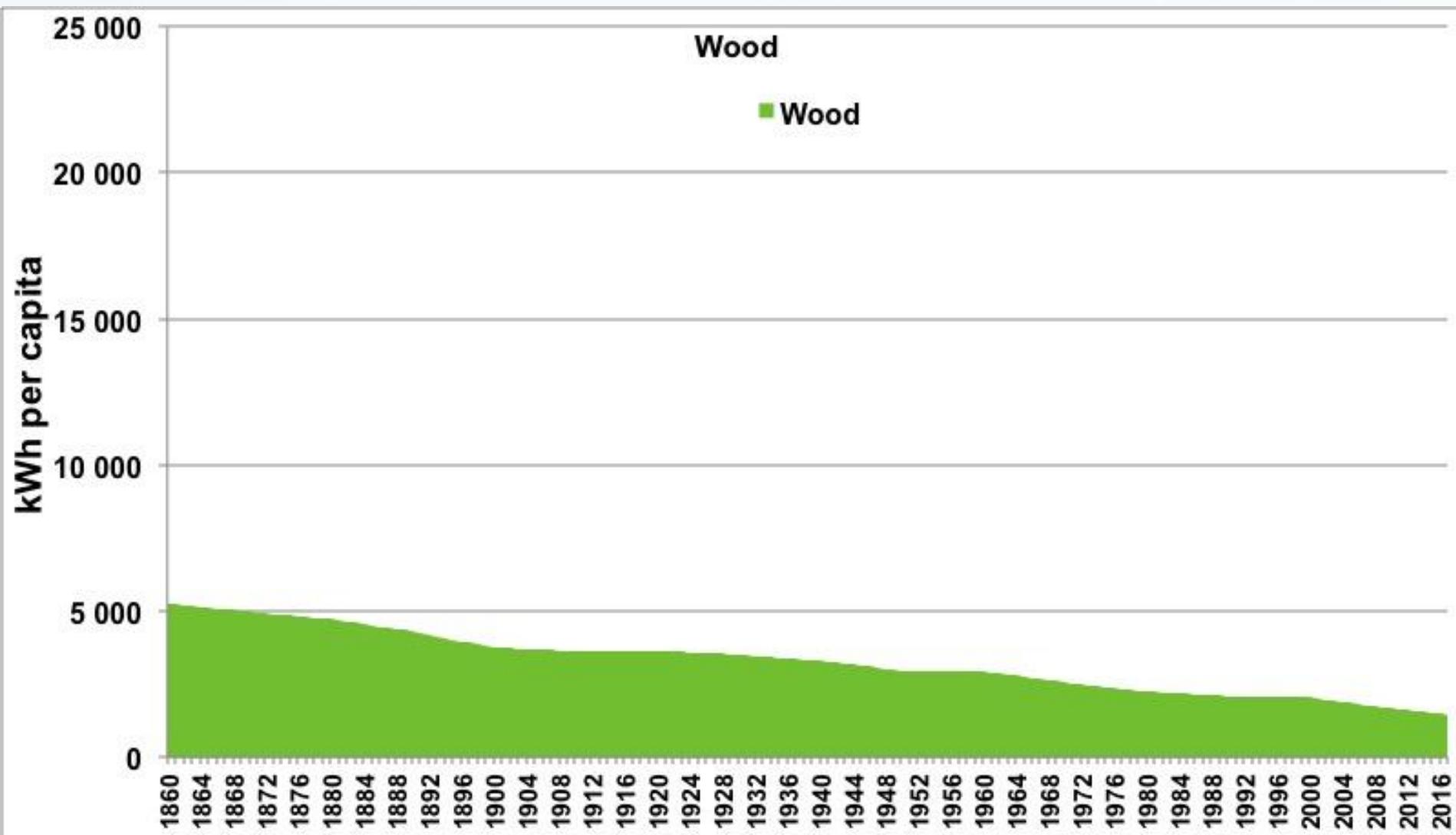


= 100 MW ≈ 10.000.000 paires de bras !



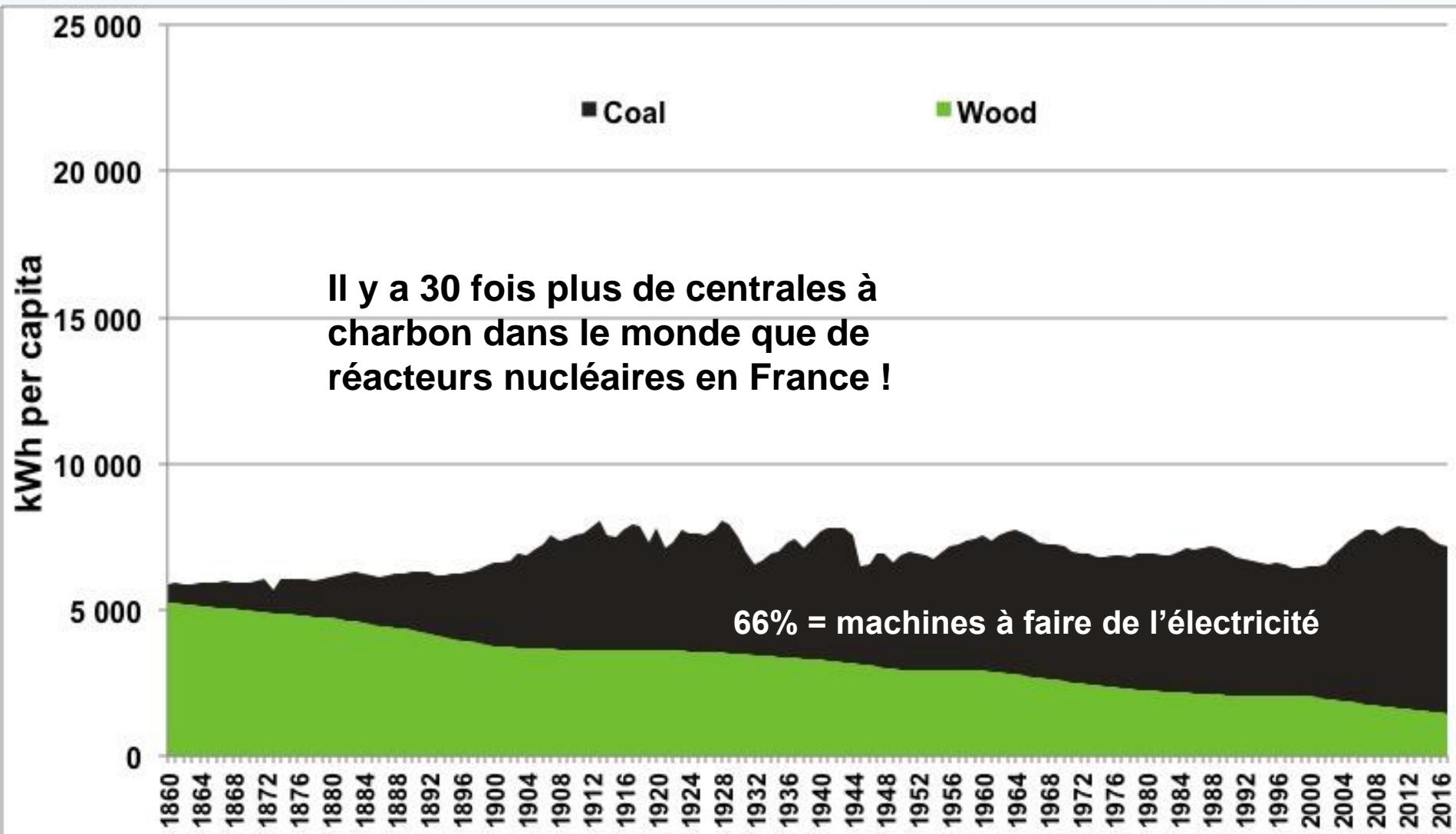
Un autre auxiliaire de l'agriculture qui vaut quelques millions de paires de bras...

Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



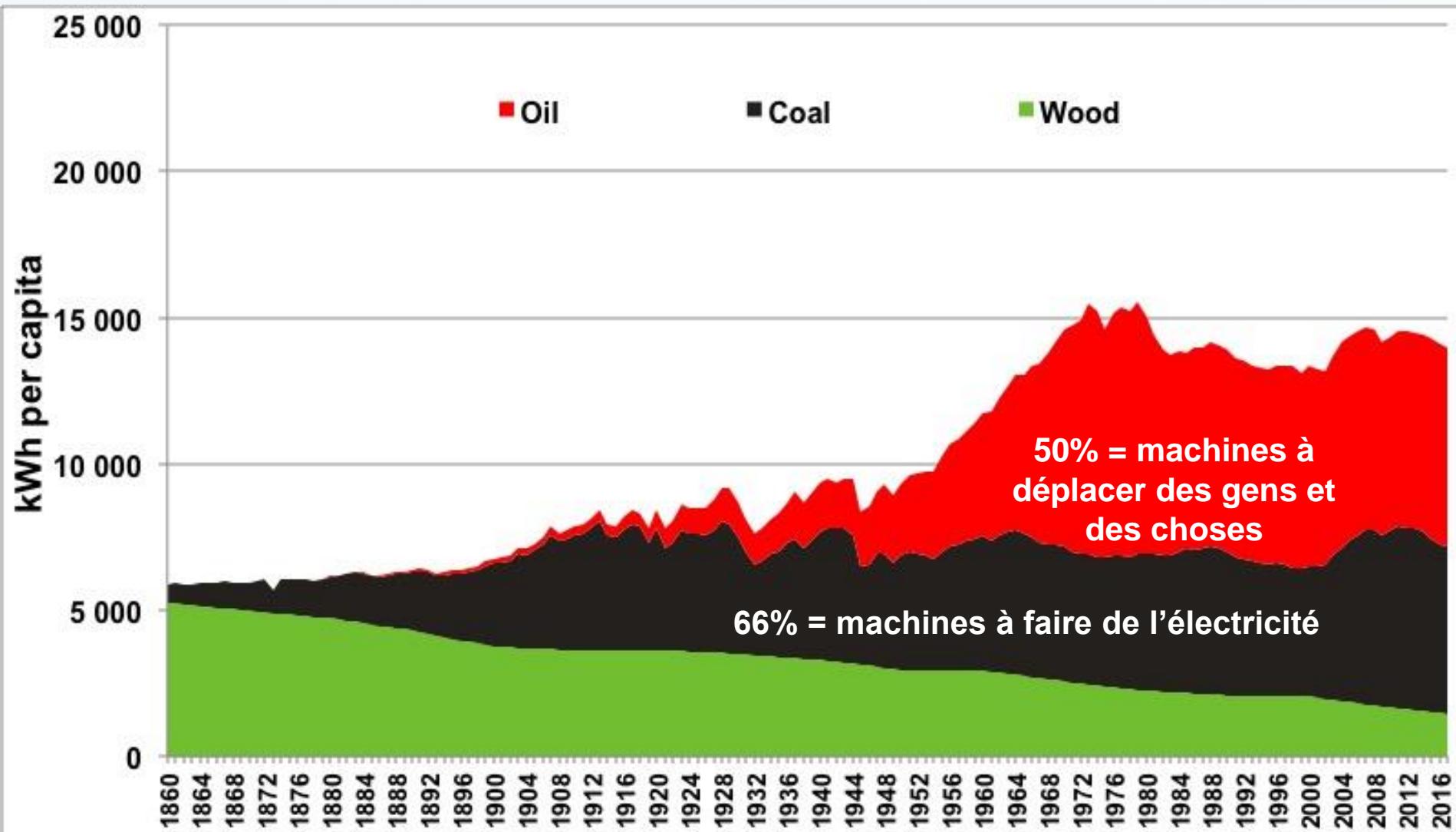
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



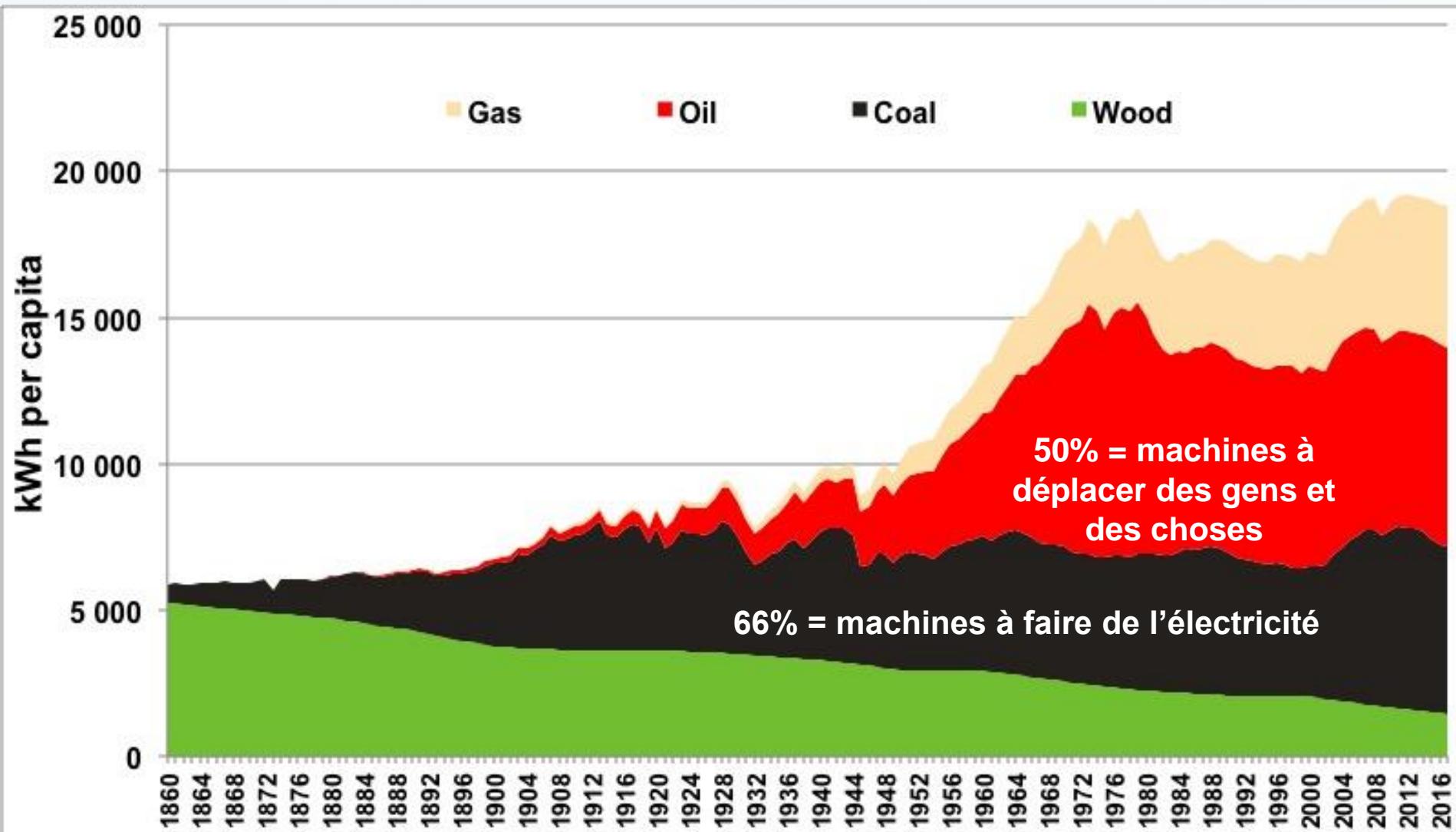
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



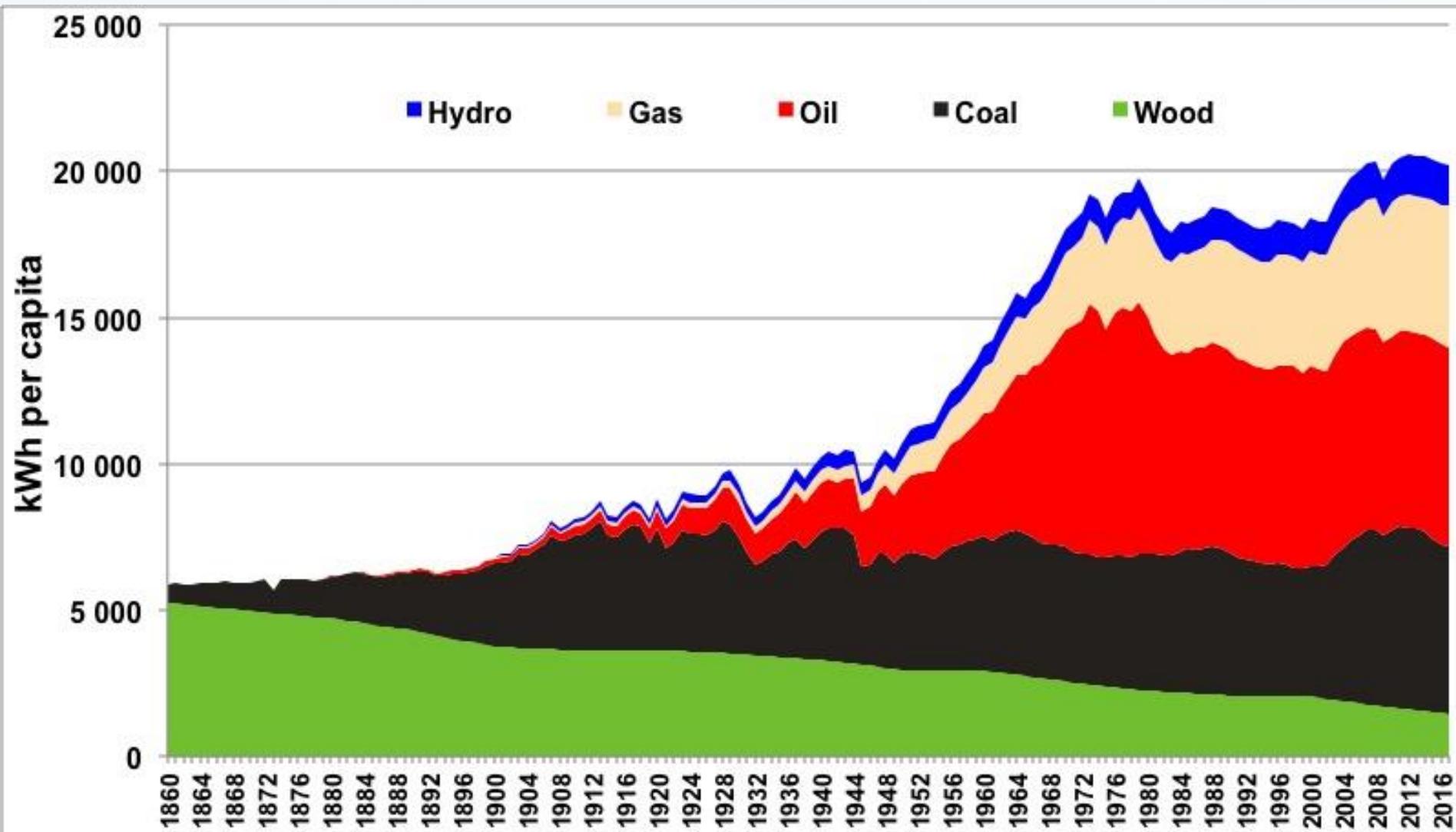
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



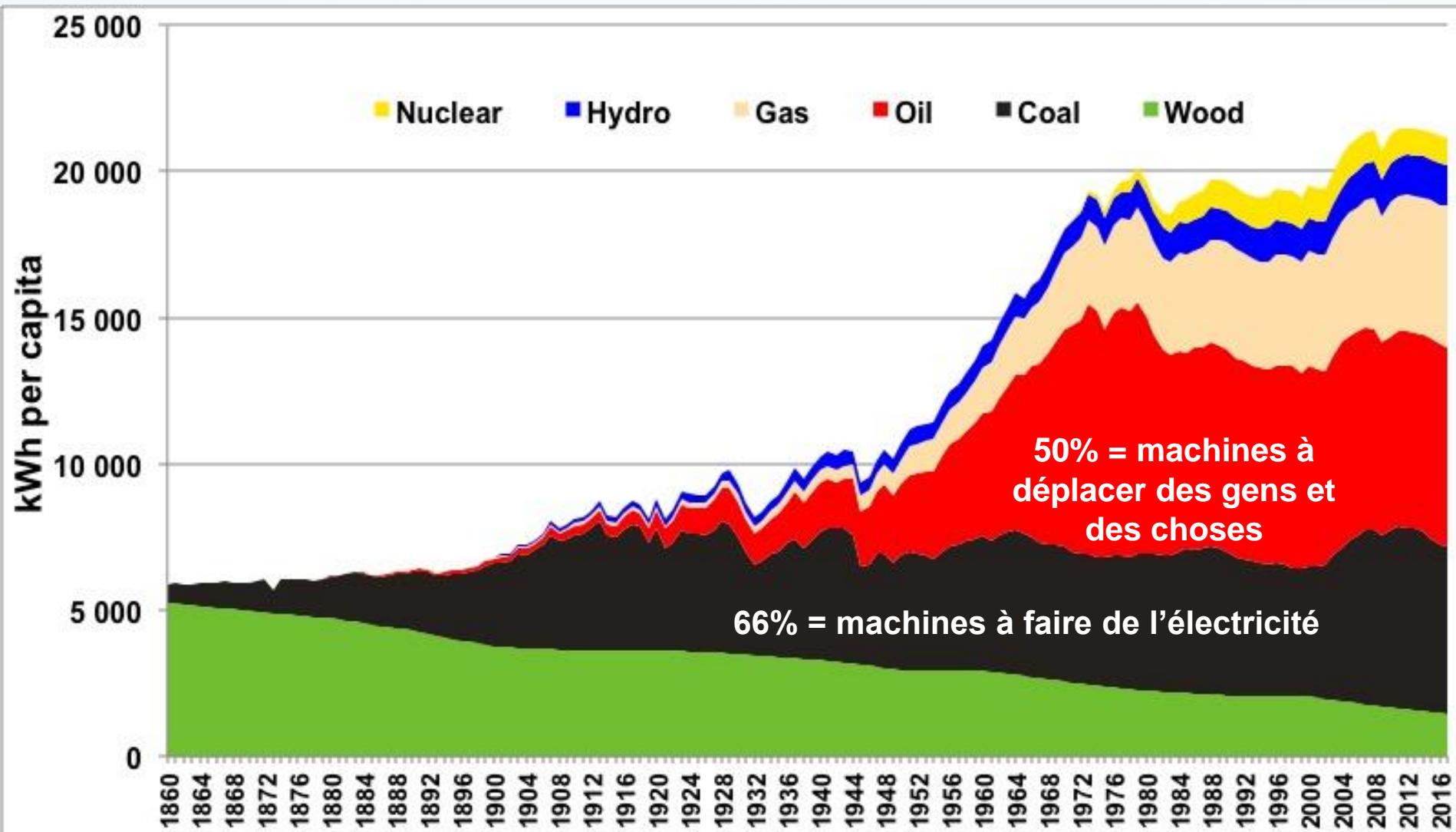
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...

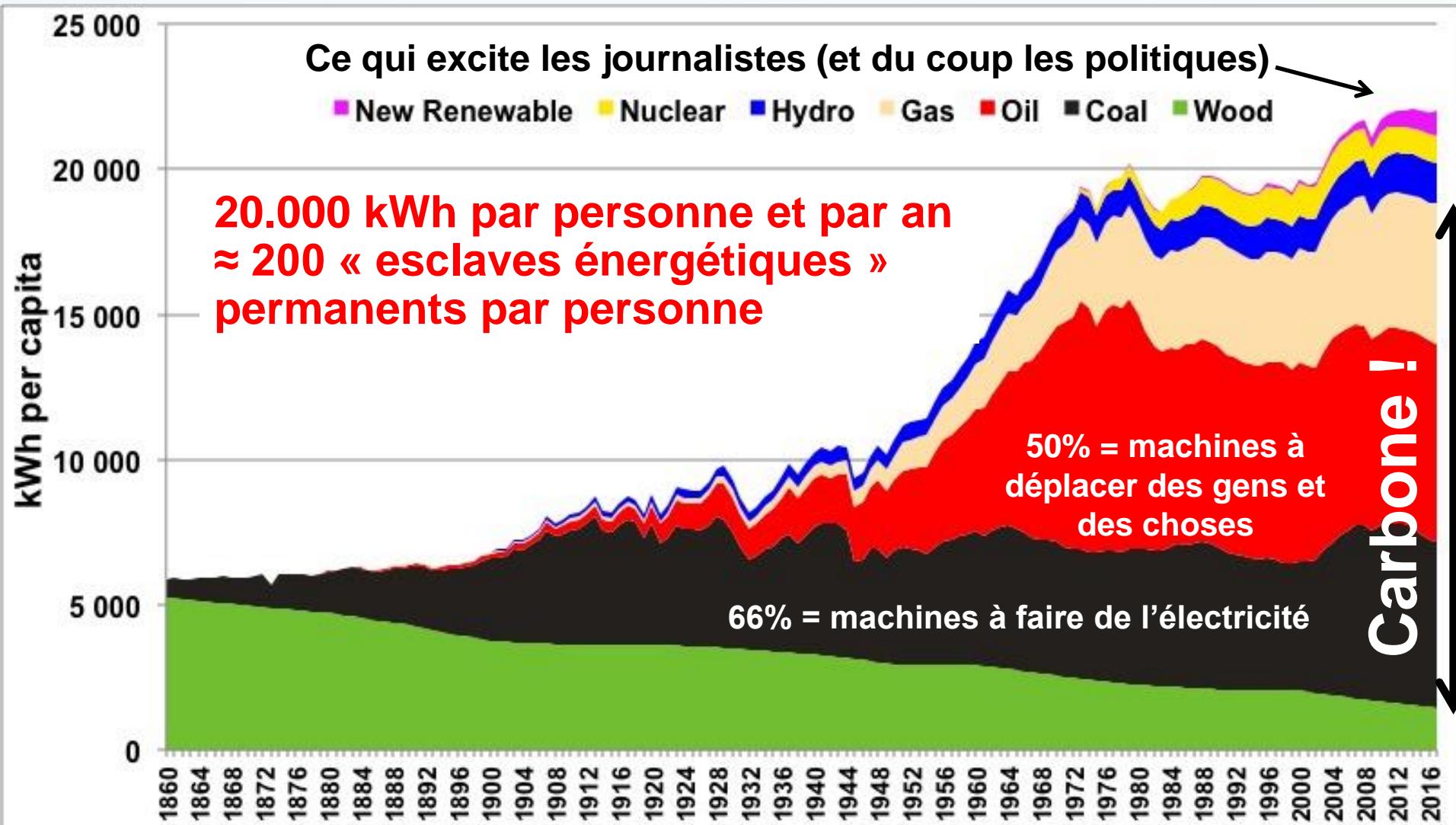


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018



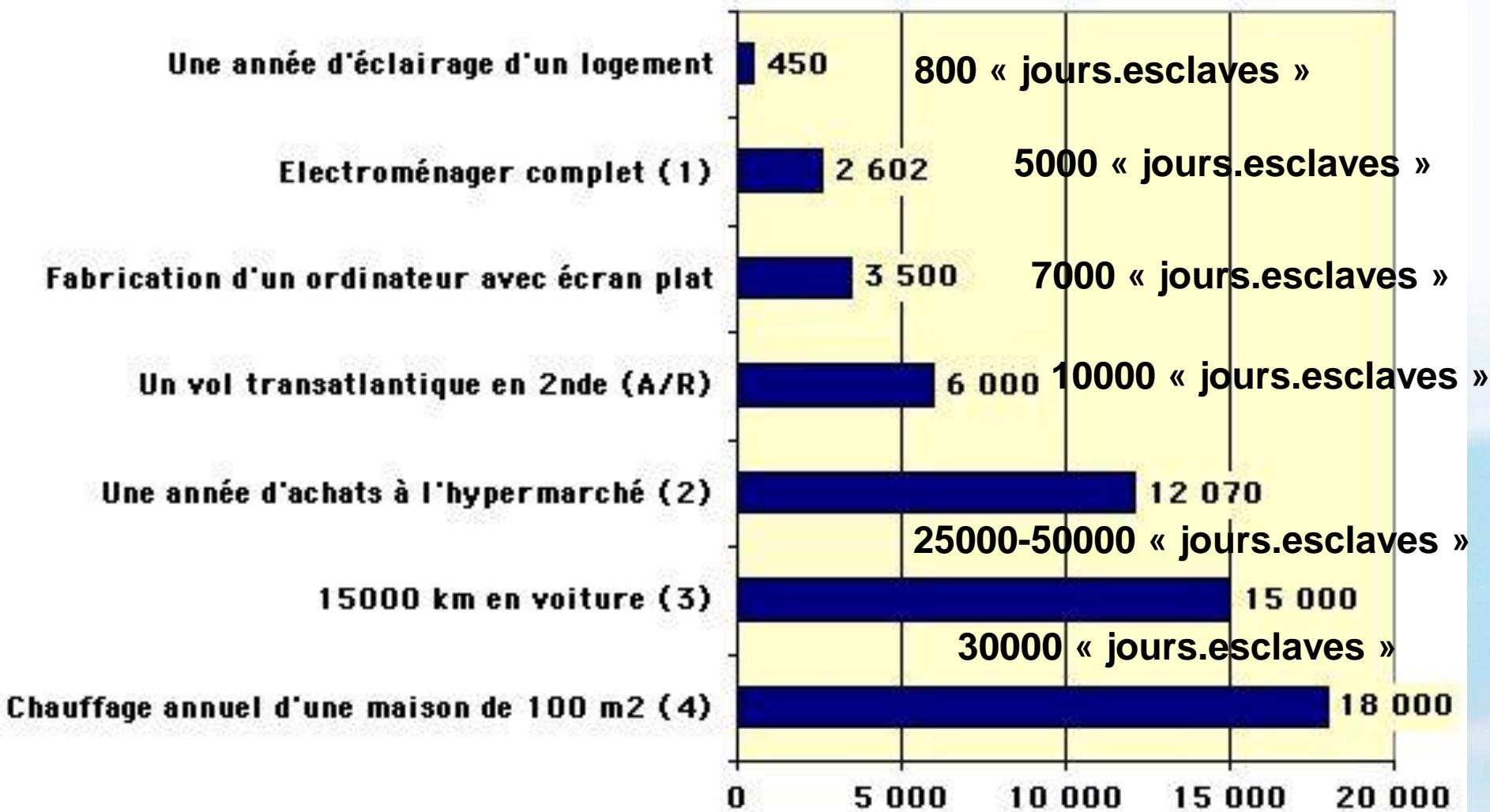
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Les voici, nos esclaves des temps modernes !



200 (moyenne mondiale) à 600 (moyenne française)

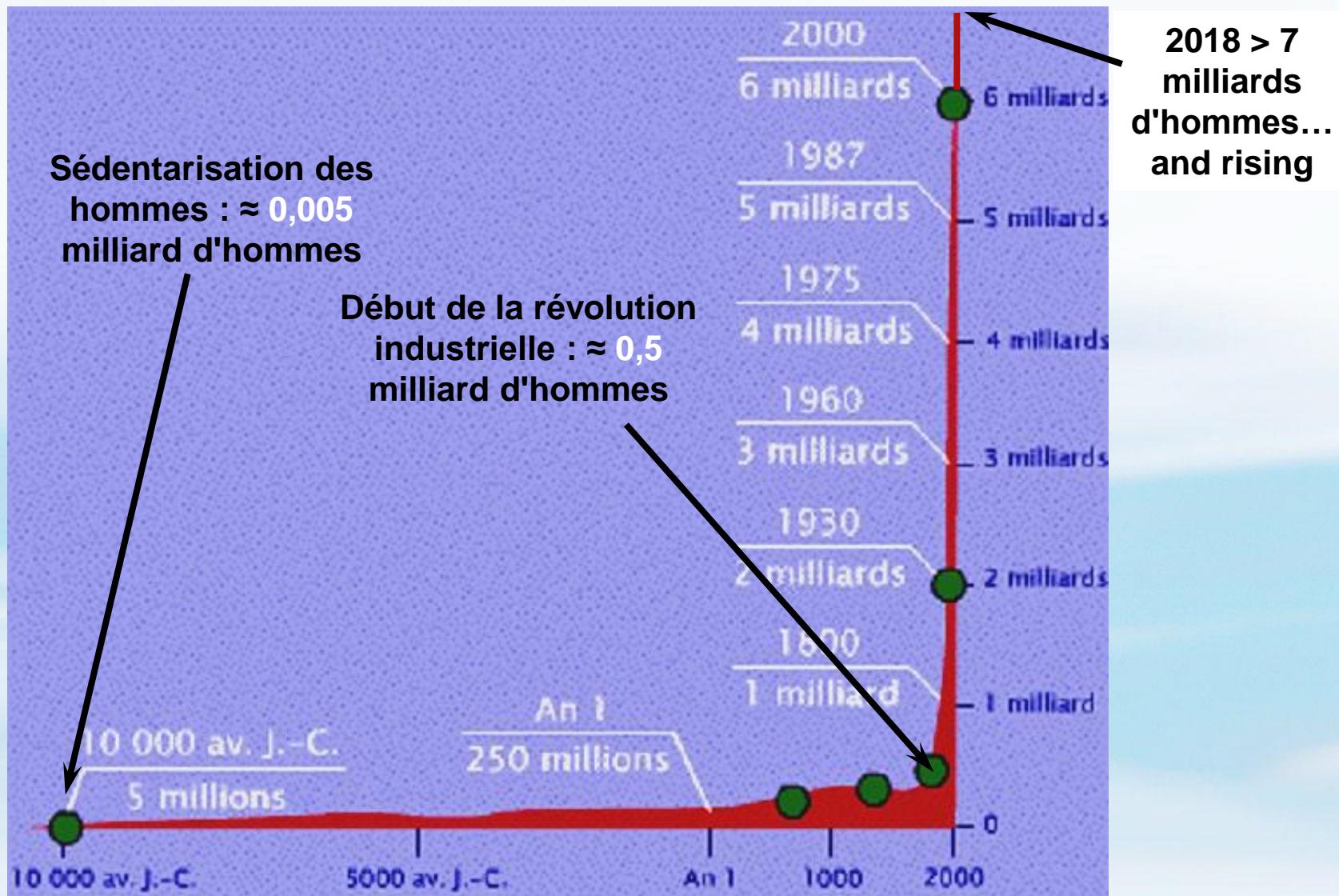
En kWh, les hommes sont très primaires...



Consommation annuelle par usage en kWh. Un Français ≈ 60.000 kWh « primaires » par an tous usages confondus (importations incluses).

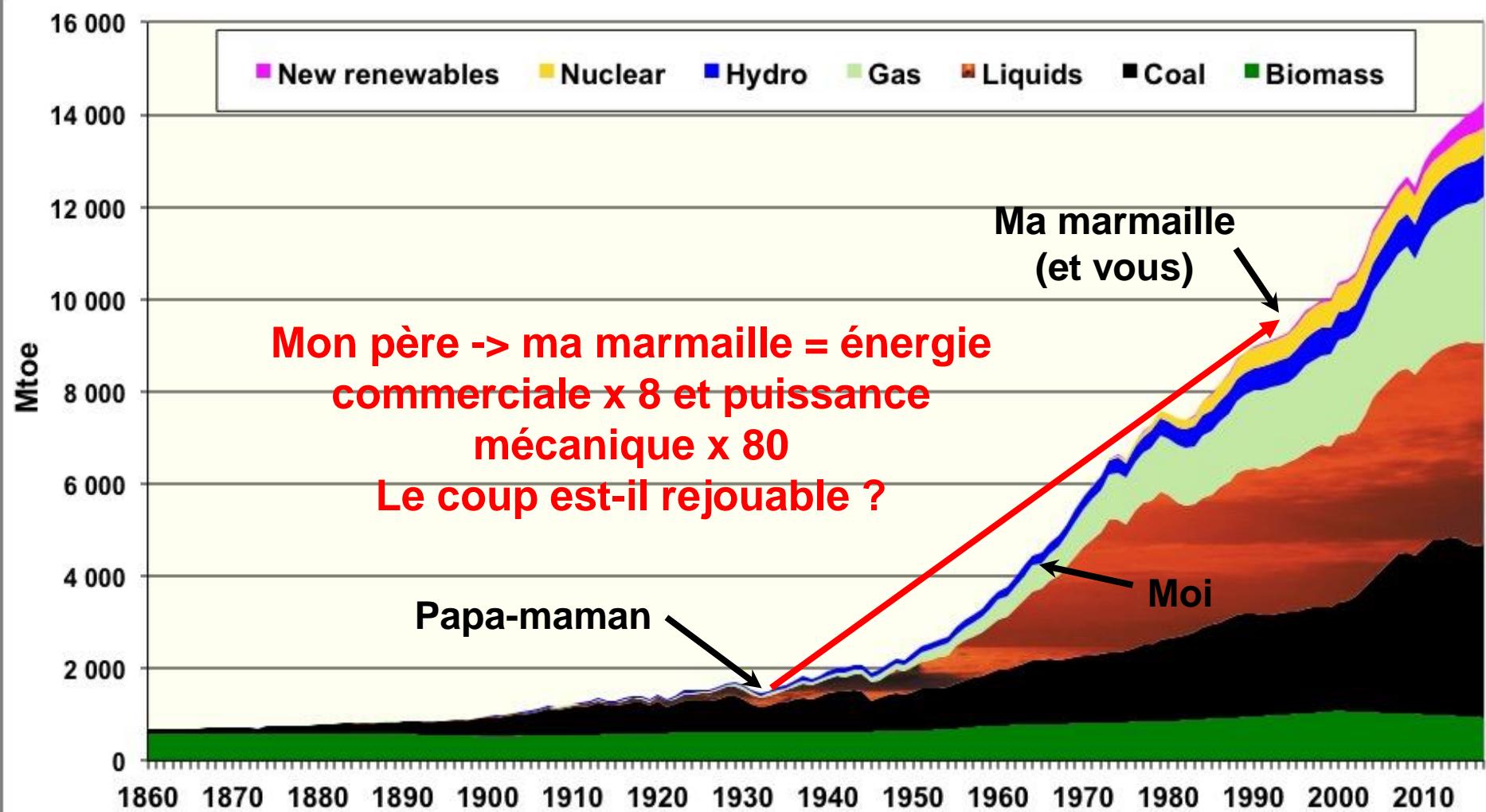
Calculs Jancovici, 2006

Un autre changement d'ordre de grandeur : la population



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

Gaz et électricité à tous les étages : au résultat



Parc de machines en service $\div 10$ dans le monde 1860-2016. Jancovici, 2017

Population x 1000 + énergie x 10 = croissance attitude

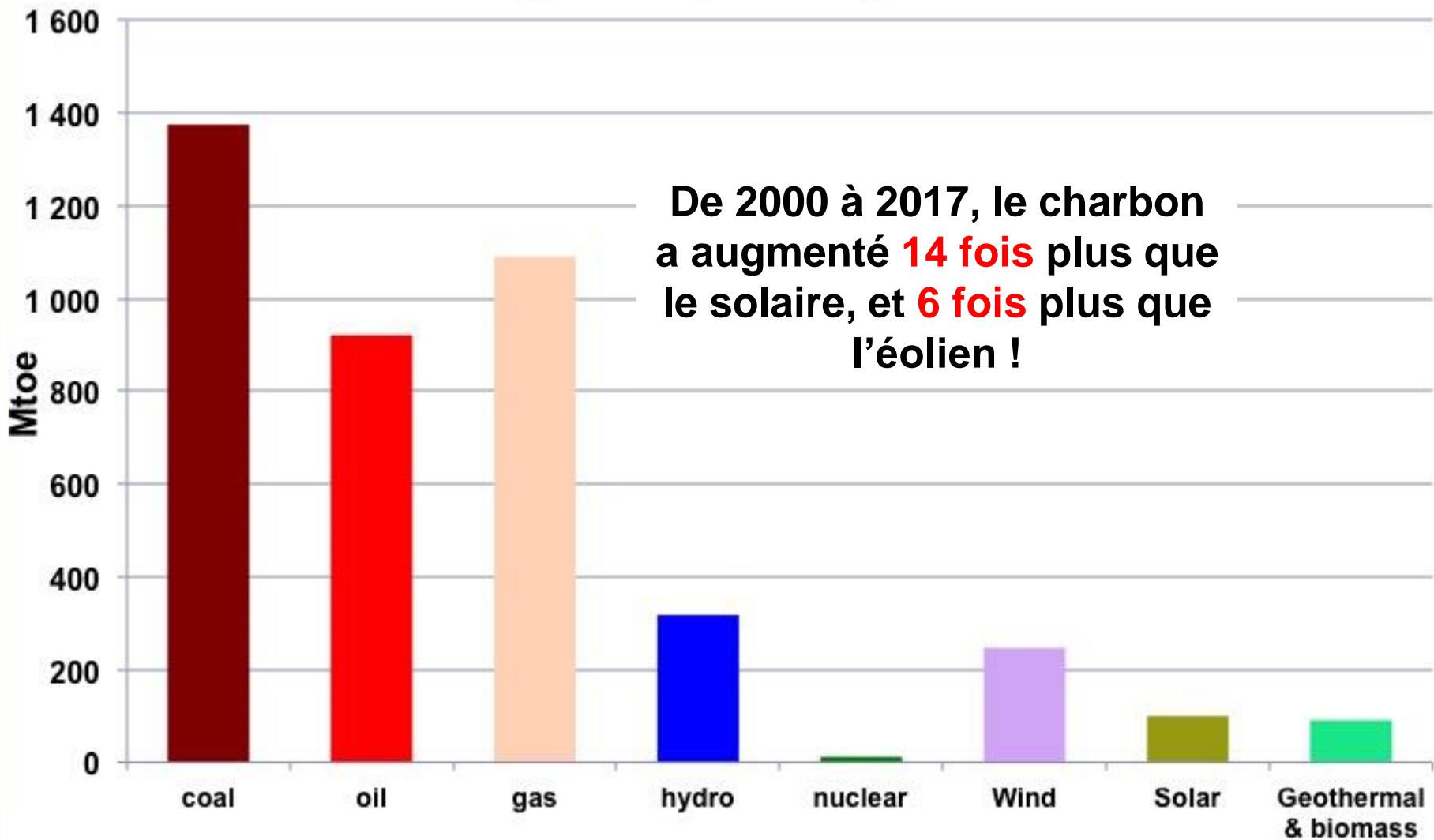
**La « taille de la boîte »
(l'environnement) est en
train de devenir un
problème majeur**

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



Si l'énergie, c'est - par définition - la modification d'un système, voici l'évolution de notre marque sur l'environnement

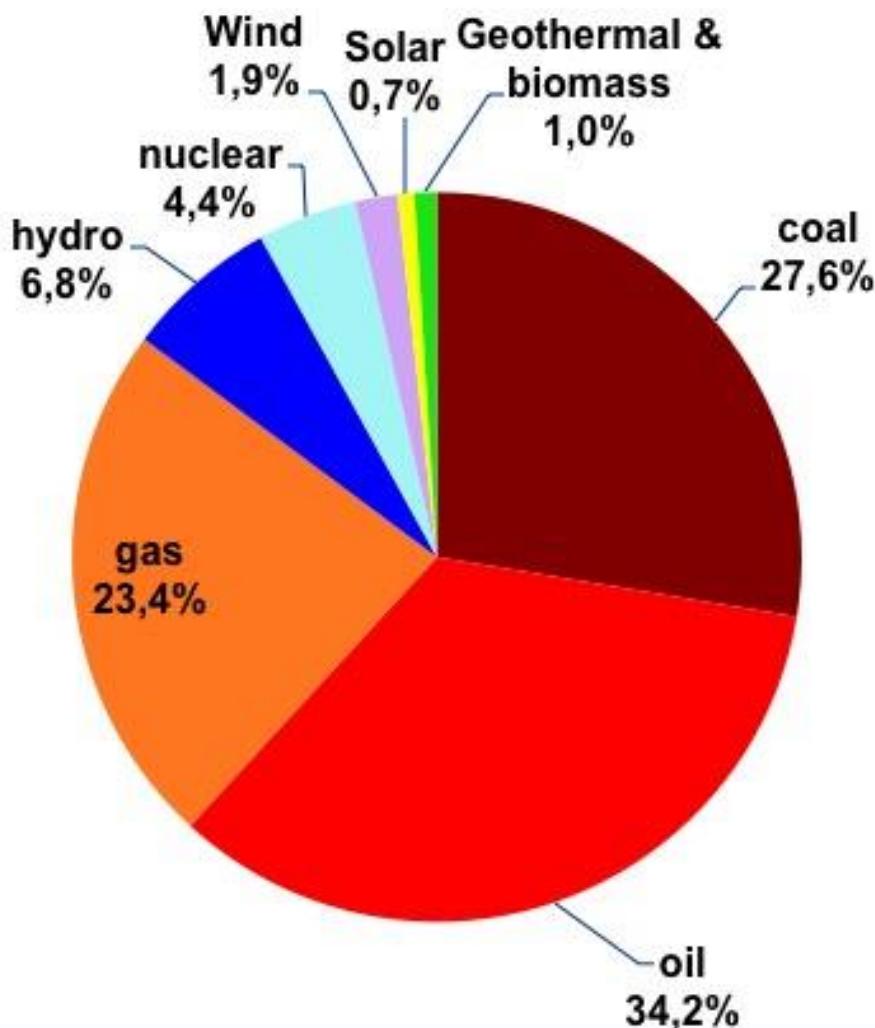
Total World, energy consumption change 2000 - 2017, Mtoe



Surplus de consommation mondiale par énergie entre 2000 et 2016. Jancovici, sur données BP Statistical Review 2017 & divers

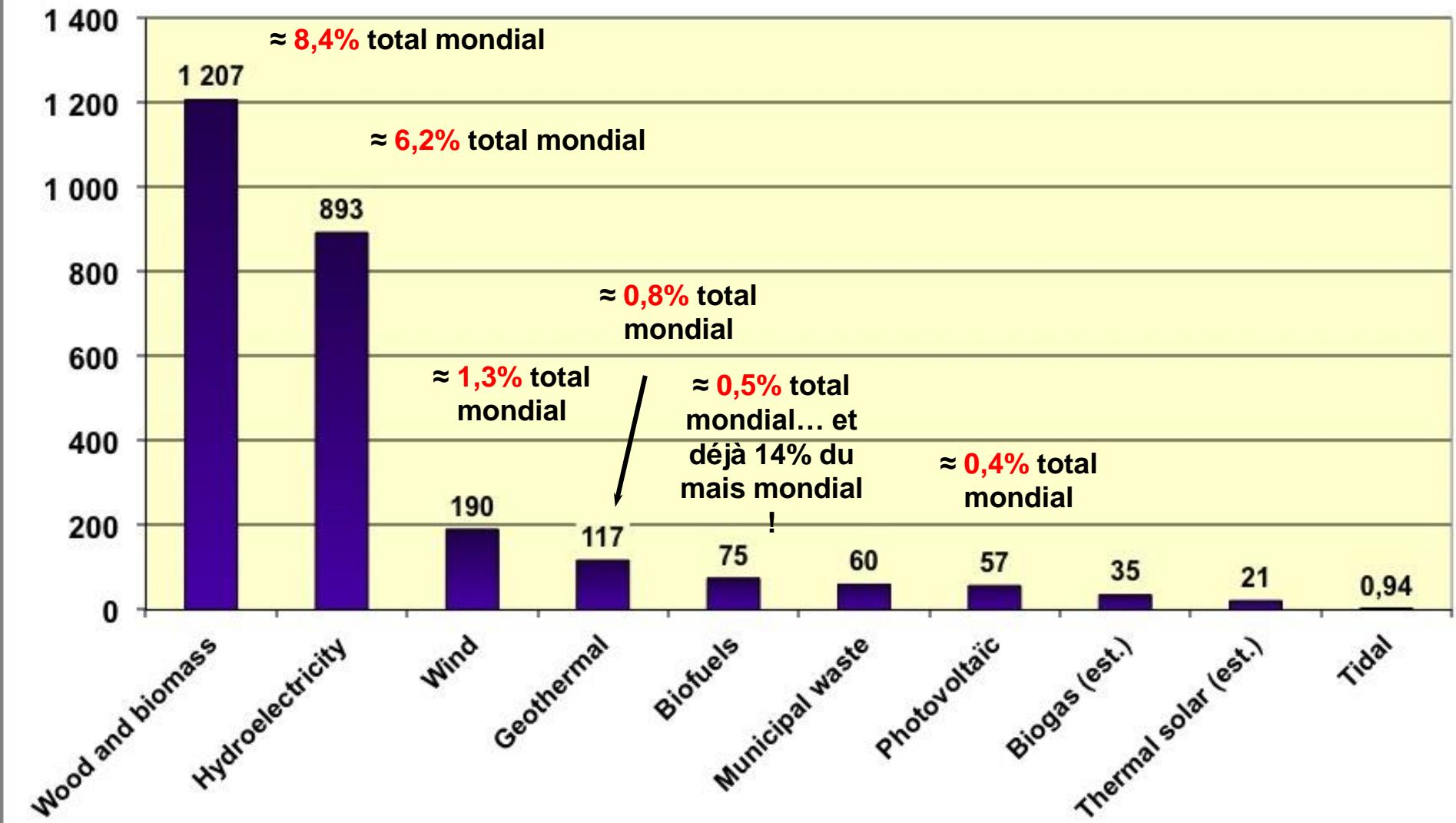
Gaz et électricité à tous les étages : au résultat (bis)

Total World, primary energy use



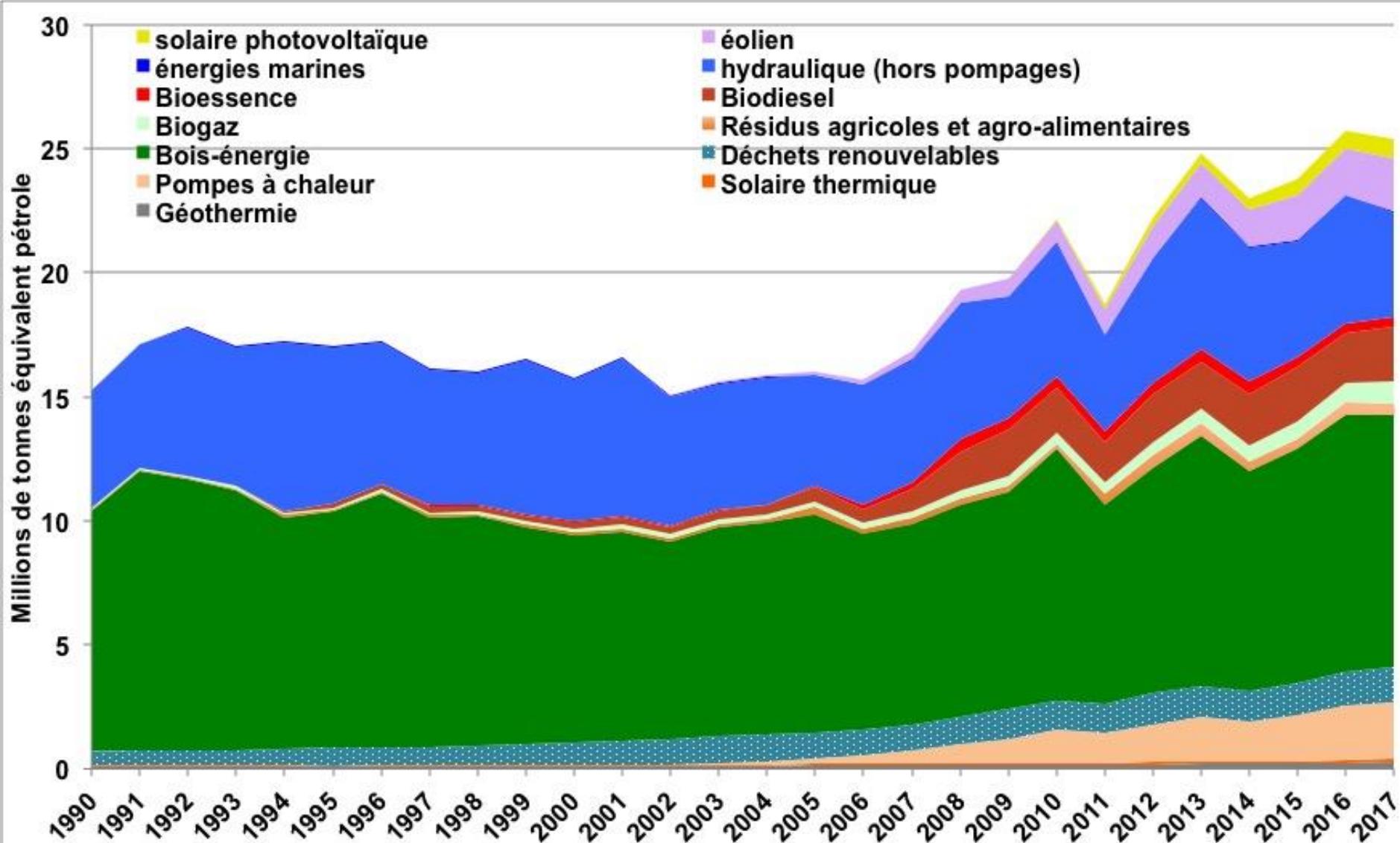
Décomposition de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017. Données BP statistical review

Quid des énergies renouvelables ?



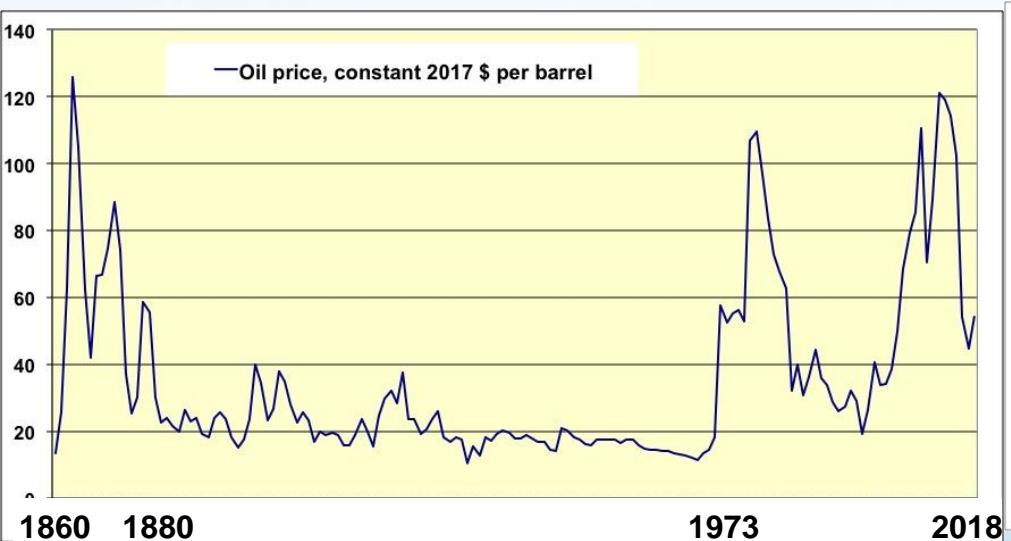
Contribution des énergies renouvelables au bilan énergétique mondial en 2015. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Compilation de l'auteur.

Quid des énergies renouvelables tricolores ?



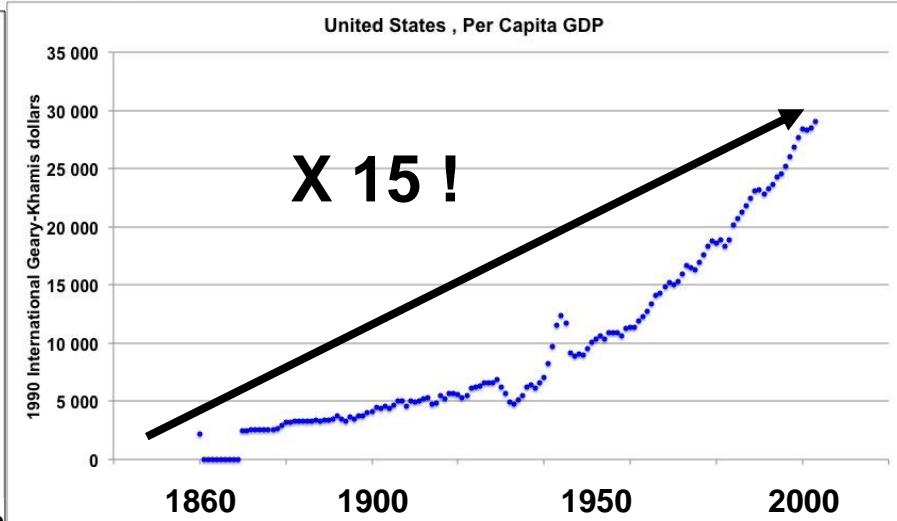
Energies renouvelables « produites » en France. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Ministère de la transition écologique, 2019

L'énergie plus chère ? Allons donc !



Prix du baril de 1861 à 2017 en \$ de 2017.

Source BP Statistical Review, 2018



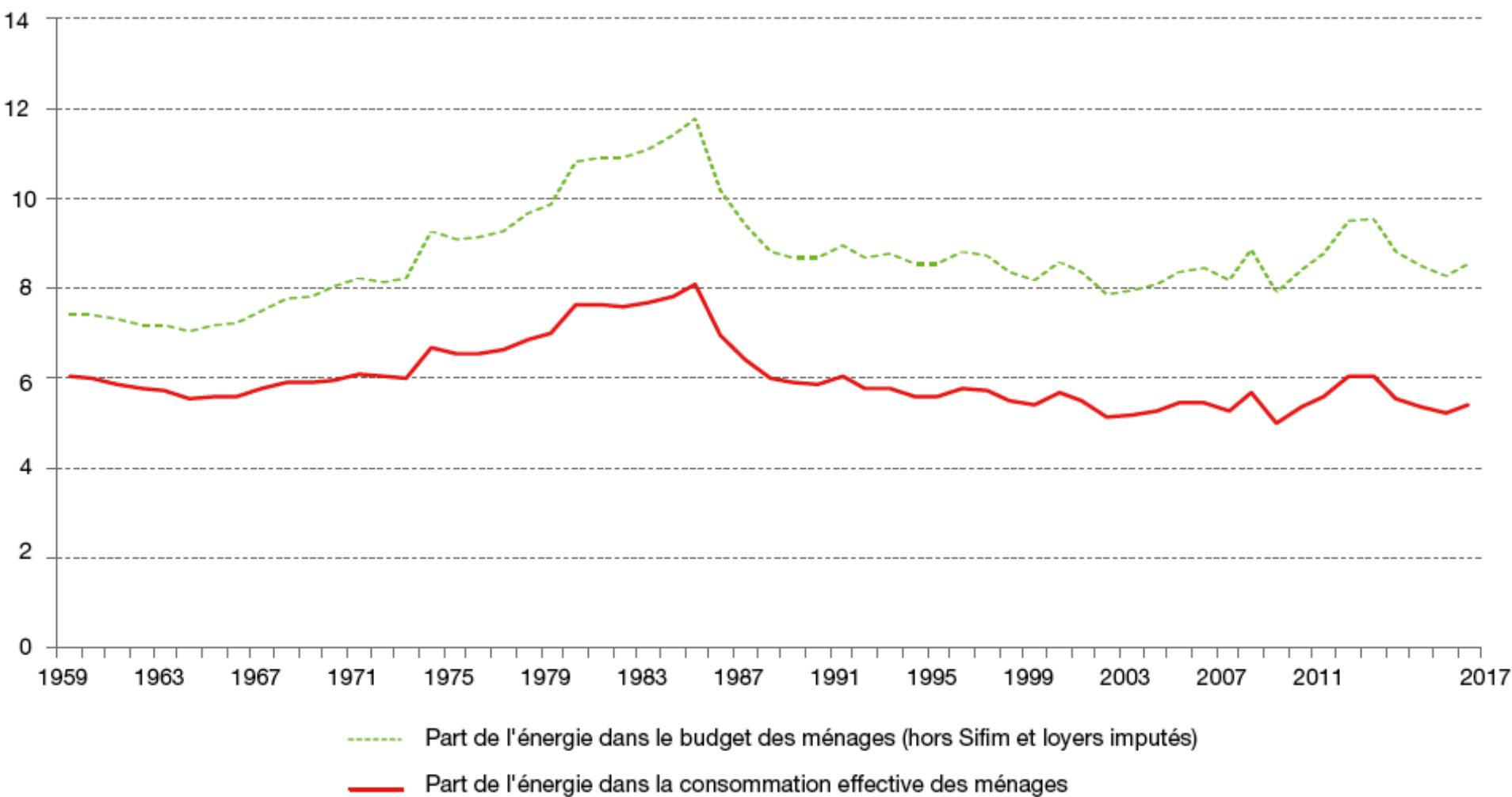
Reconstruction du PIB par habitant aux USA depuis 1860 (le PIB est une notion qui date du début du 20^e siècle)

Source : Historical Statistics for the World Economy, Angus Maddison, 2007

En 100 ans, le prix d'un kWh mécanique a été divisé par 30 à 50 en occident -> diviseur identique sur le cout de création d'un flux physique

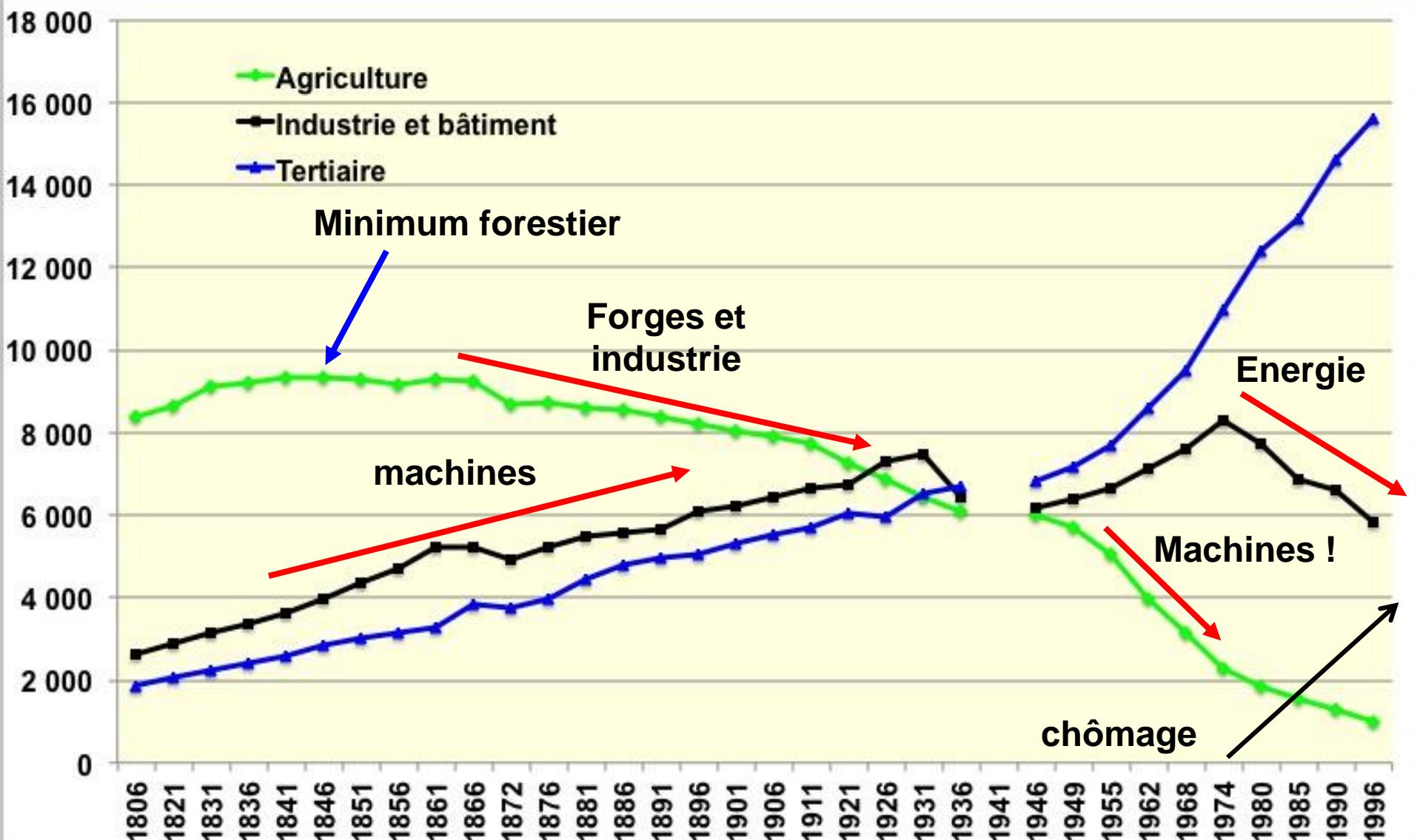
Plus chère l'énergie ? La bonne blague ! (bis)

En %



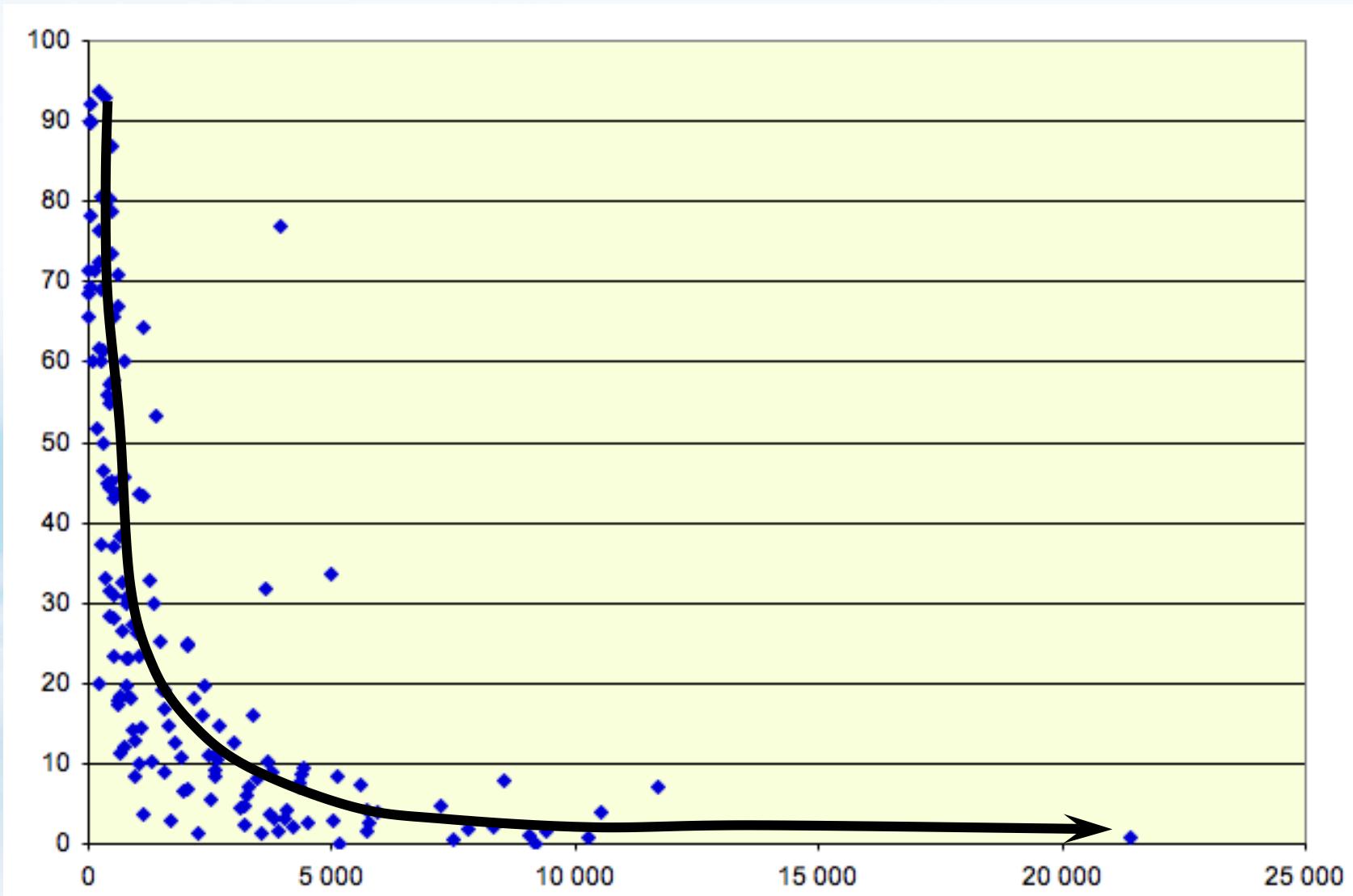
Général au Développement Durable, 2017

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



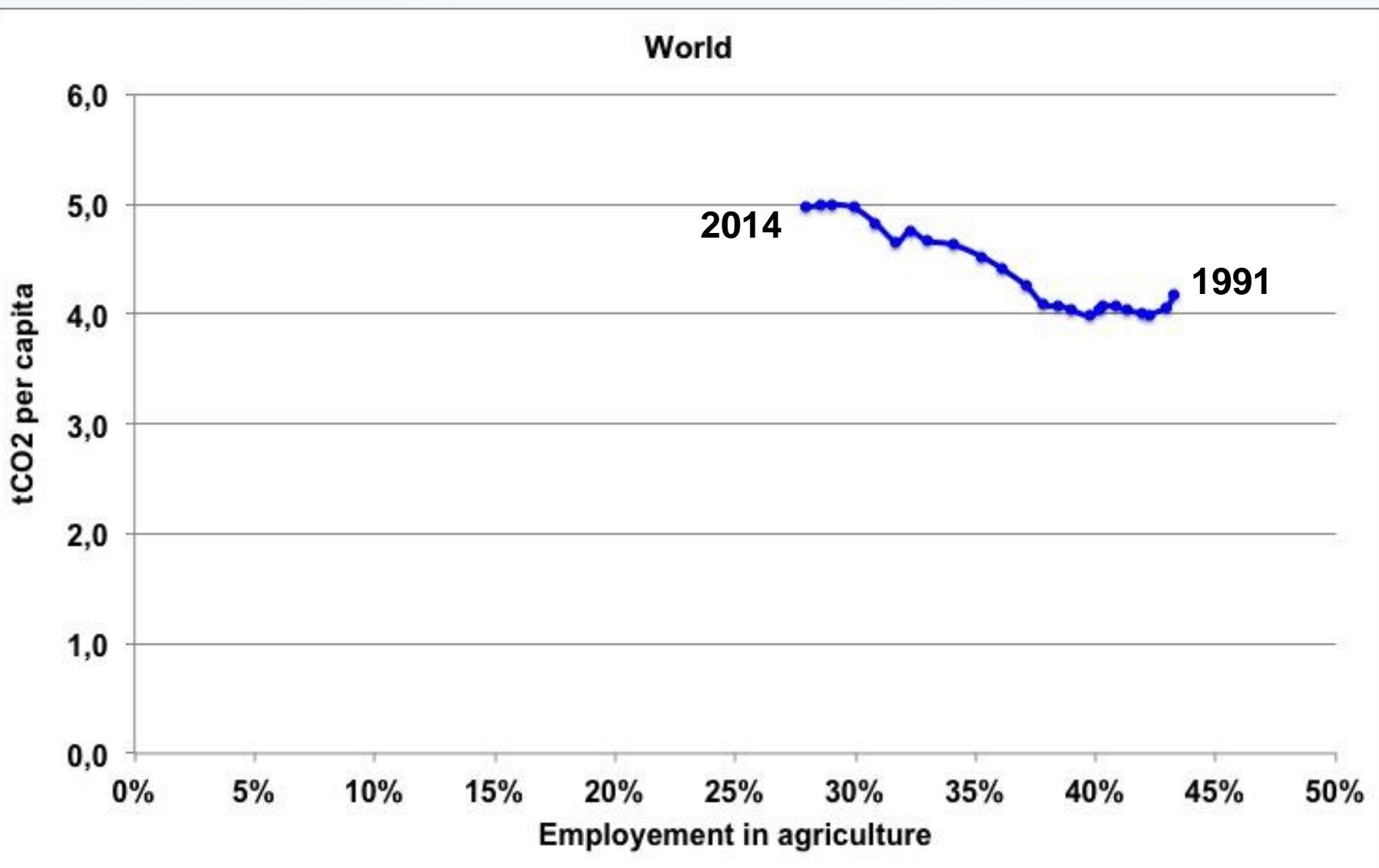
Nombre d'actifs en France par catégorie sur 2 siècles. Source INSEE.

Plus d'énergie = moins de paysans



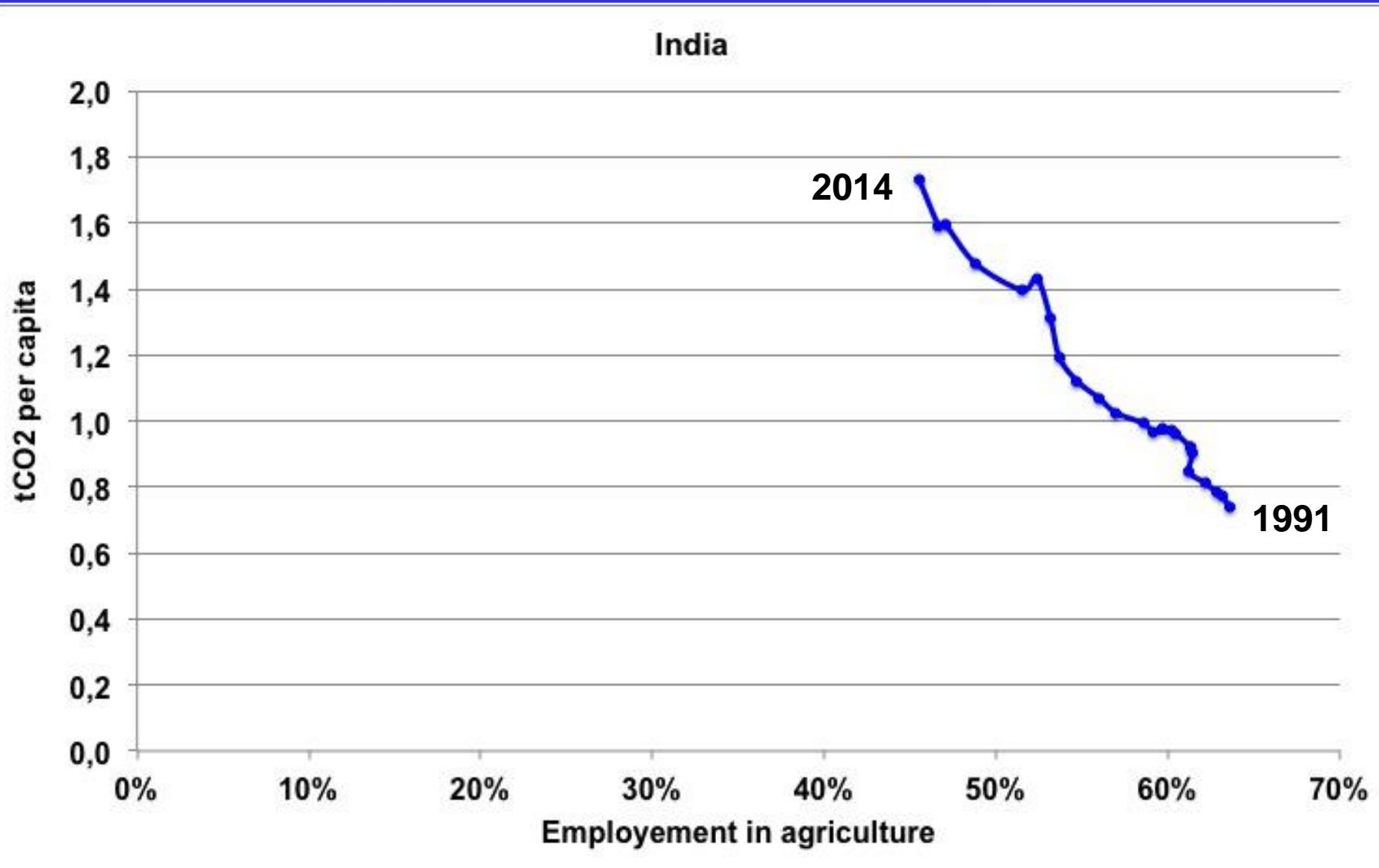
Consommation d'énergie par personne et par an (kep) vs. % de l'emploi dans l'agriculture. Sources WRI, US DOE

Plus d'énergie fossile = moins de paysans



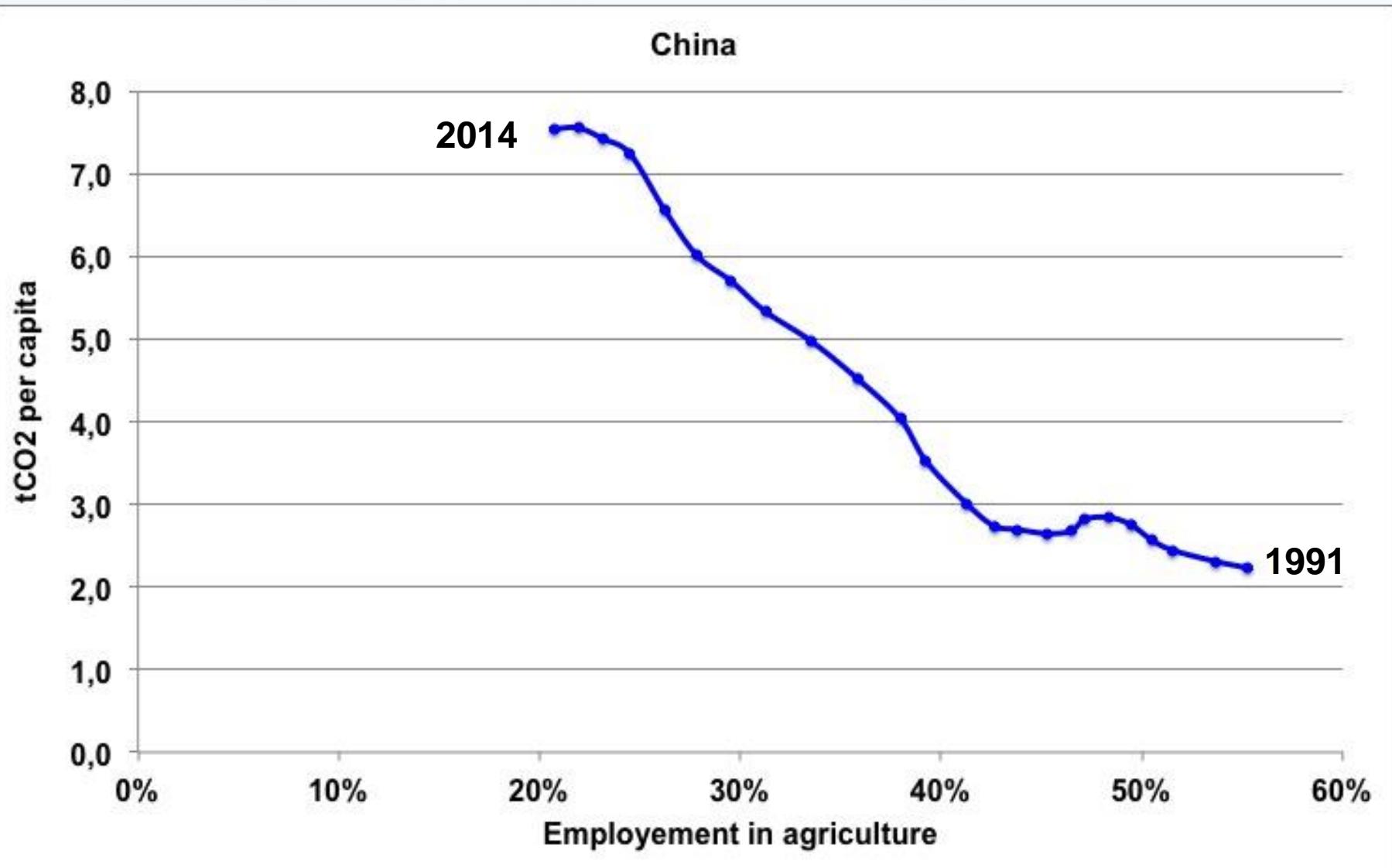
Emissions de CO₂ par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture dans le monde. Sources World Bank

Plus d'énergie fossile = moins de paysans (bis)



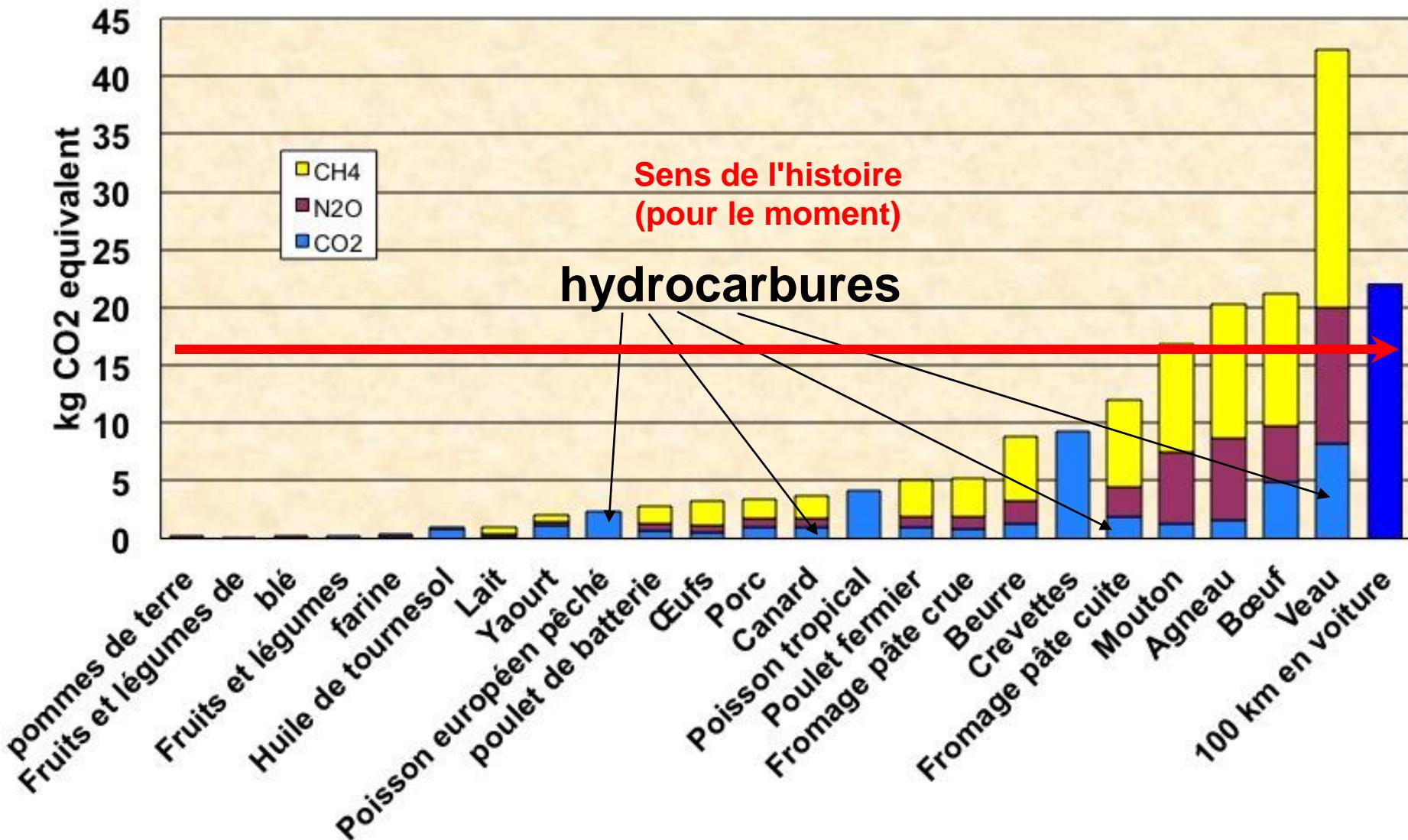
Emissions de CO₂ par personne vs. % de l'emploi dans
l'agriculture en Inde. Sources World Bank

Plus d'énergie fossile = moins de paysans (ter)



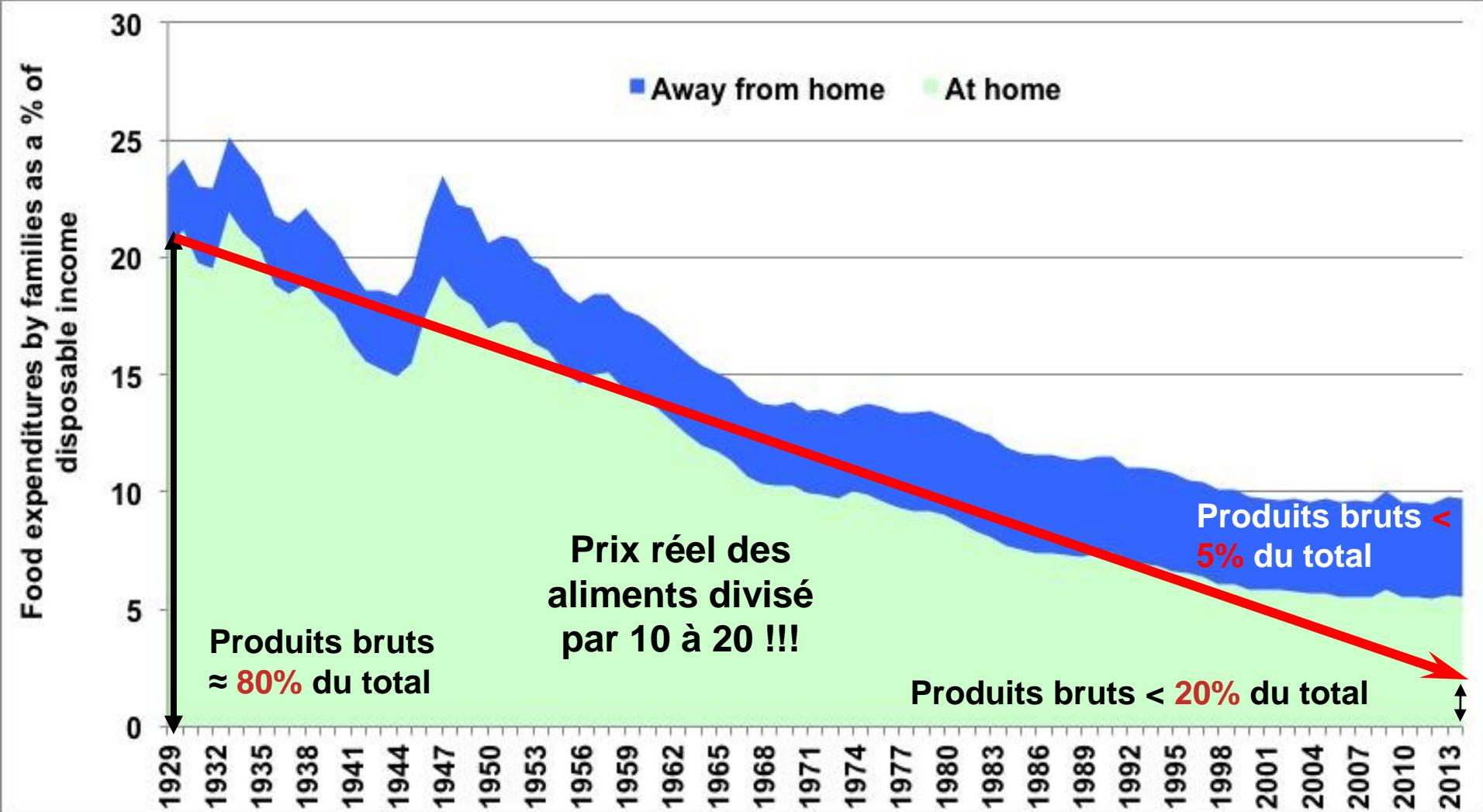
Emissions de CO₂ par personne vs. % de l'emploi dans
l'agriculture en Inde. Sources World Bank

Miam miam kWh pour de vrai



Source : Jancovici/Ademe, 2009

Plus de pétrole = moins de sous

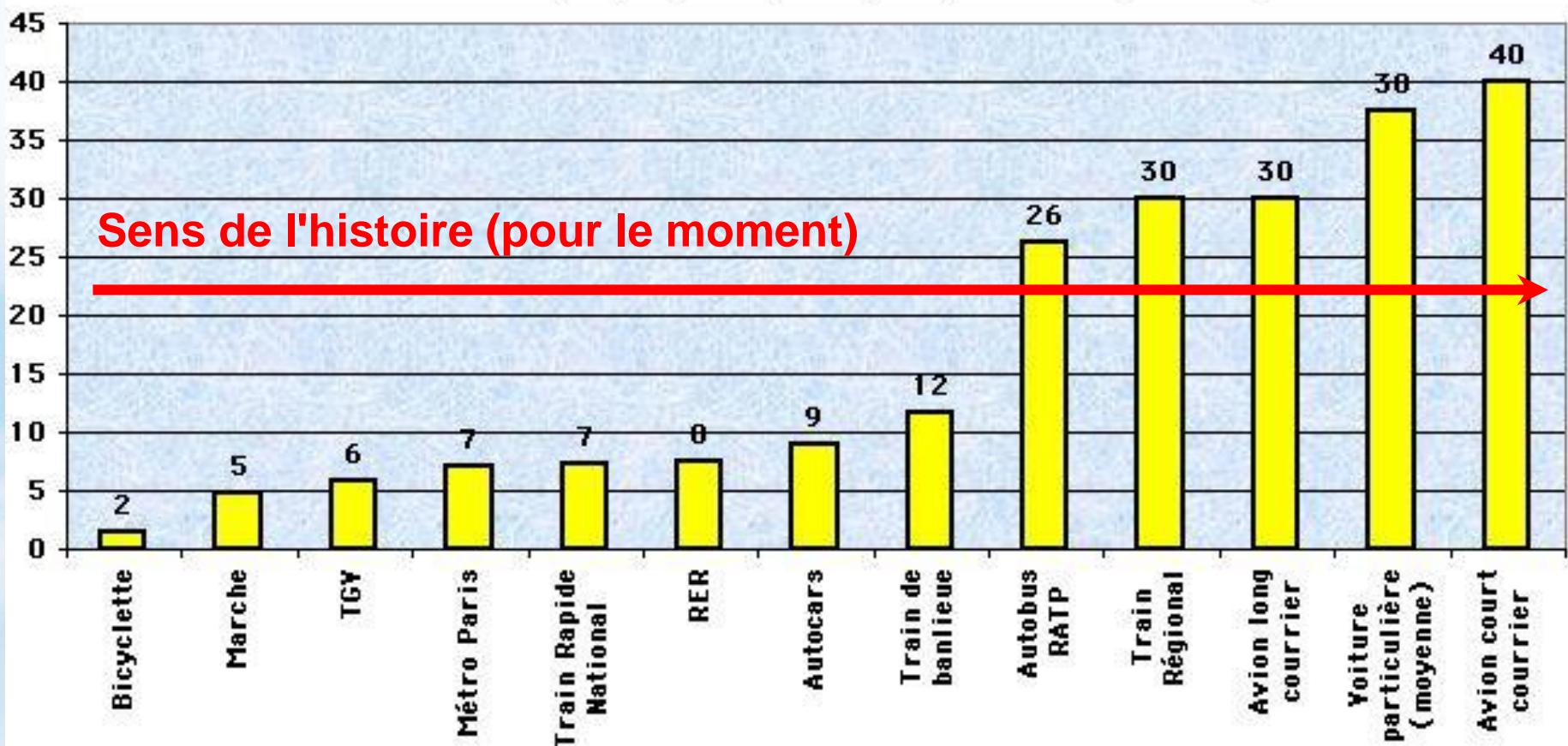


Evolution de la part de l'alimentation dans le budget des ménages américains de 1929 à 2014, en pourcentage.

Source : US Department of Agriculture, 2017

Transports : plus c'est moderne, et plus cela pompe...

Consommation d'énergie par passager.km, en grammes équivalent pétrole



Consommation d'énergie par passager **pour un km** (la voiture tient compte du taux de remplissage moyen) en grammes équivalent pétrole. Sources diverses.

**Des tas d'ingénieurs géniaux = (peut-être)
une voiture géniale**

**La même chose avec plein d'énergie = une
voiture géniale par terrien**

Qu'est-ce qu'une voiture exactement ?

Une voiture, ce n'est qu'un moyen de transport ? Pas vraiment ! C'est aussi :

Une pièce supplémentaire sur roulettes,
avec ses objets, sa radio, ses odeurs,
ses repères.... (« service » majeur
oublié dans les calculs)



Et... un objet de statut social
(« service » majeur oublié dans
les calculs)

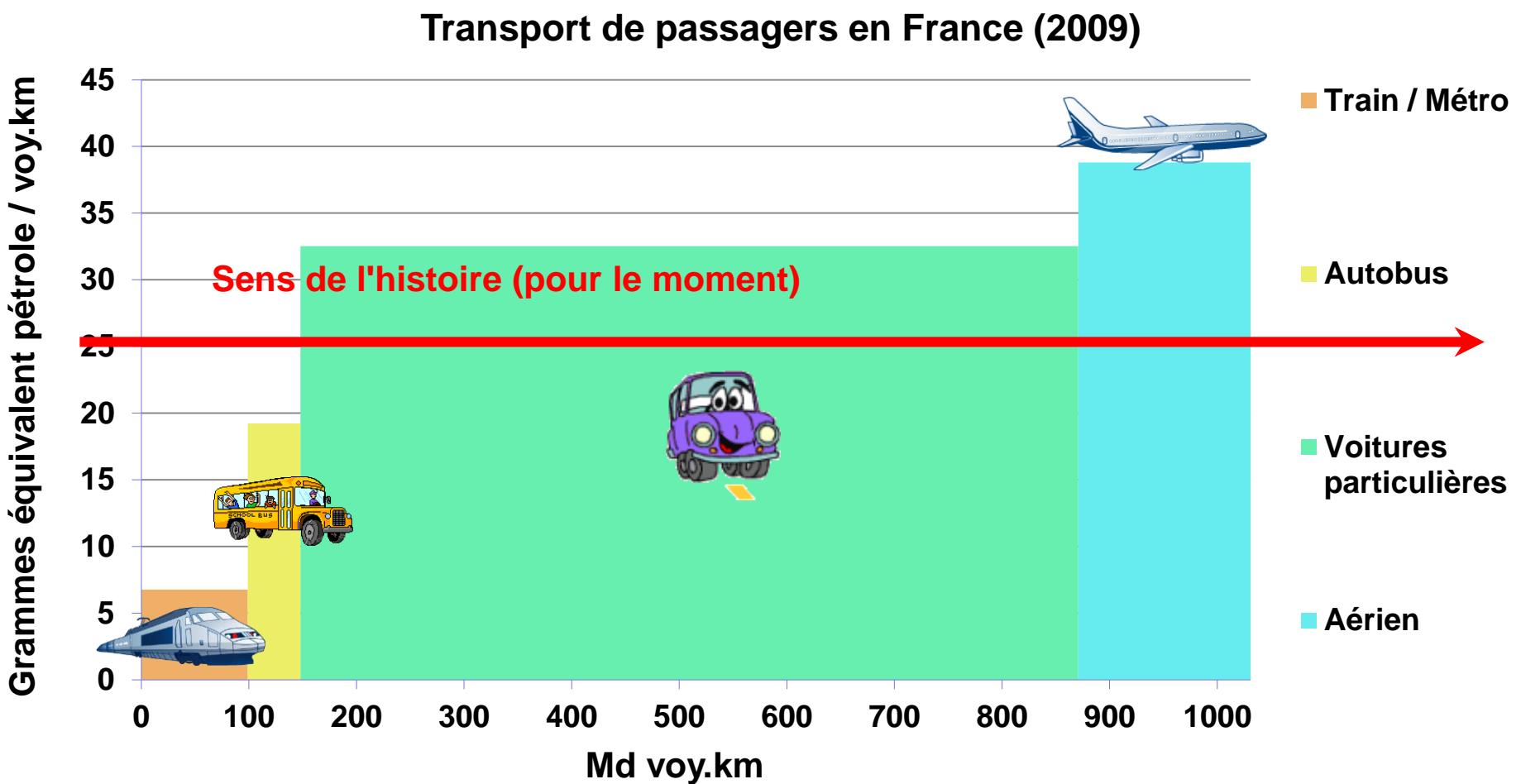


Qu'est-ce qu'une voiture exactement ? (bis)



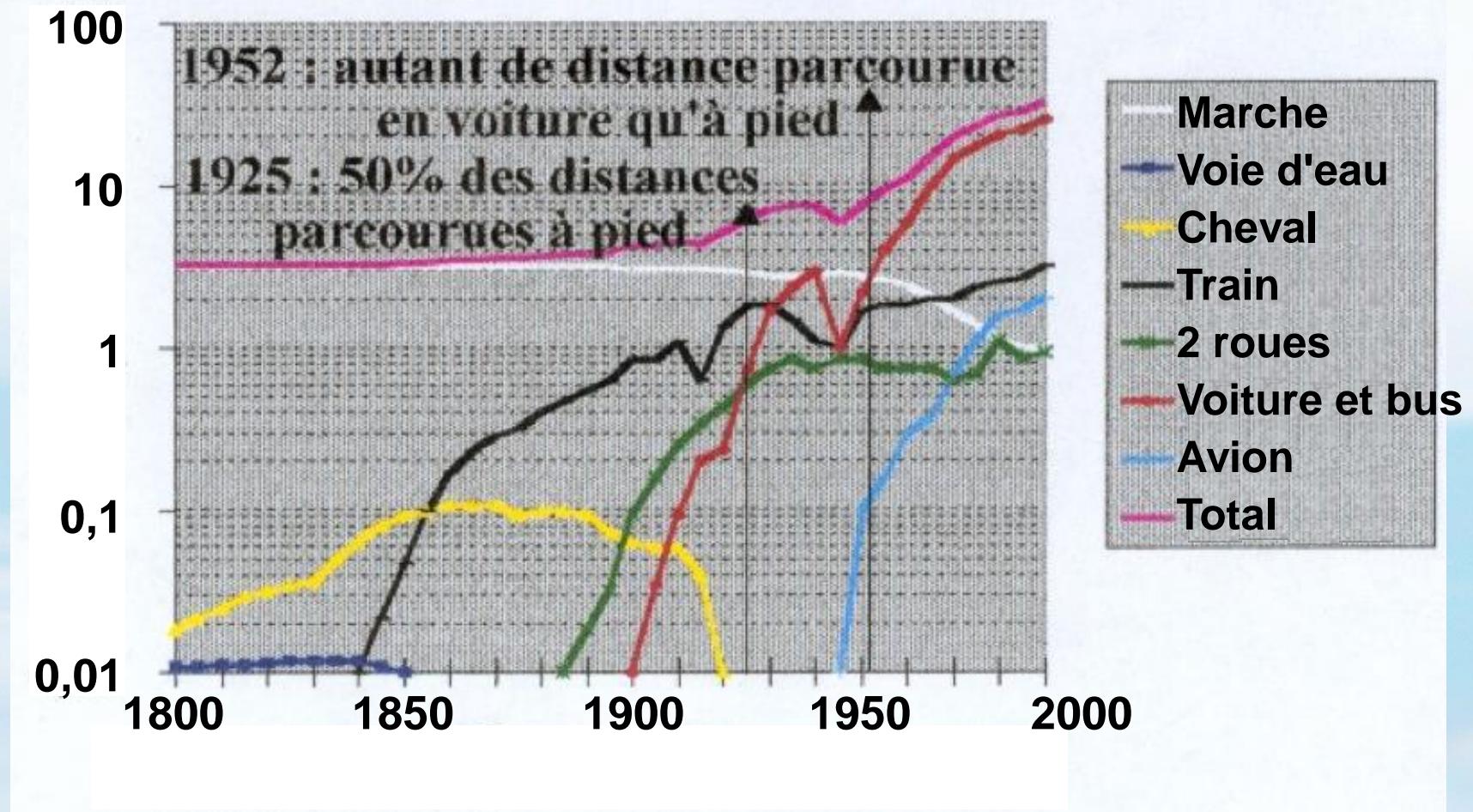
Est-ce : une voiture, accessoirement autonome ? Un salon, accessoirement mobile ? Un poste de travail, accessoirement mobile ? Un ordinateur sur roues, qui accessoirement transporte du monde ? Un truc inutile mais qui sert à afficher son statut ?

Et je dirais même plus : plus c'est moderne, plus ça pompe...



Source des données : Compte des transports 2009, Mémento du tourisme 2009, Calculs Carbone 4

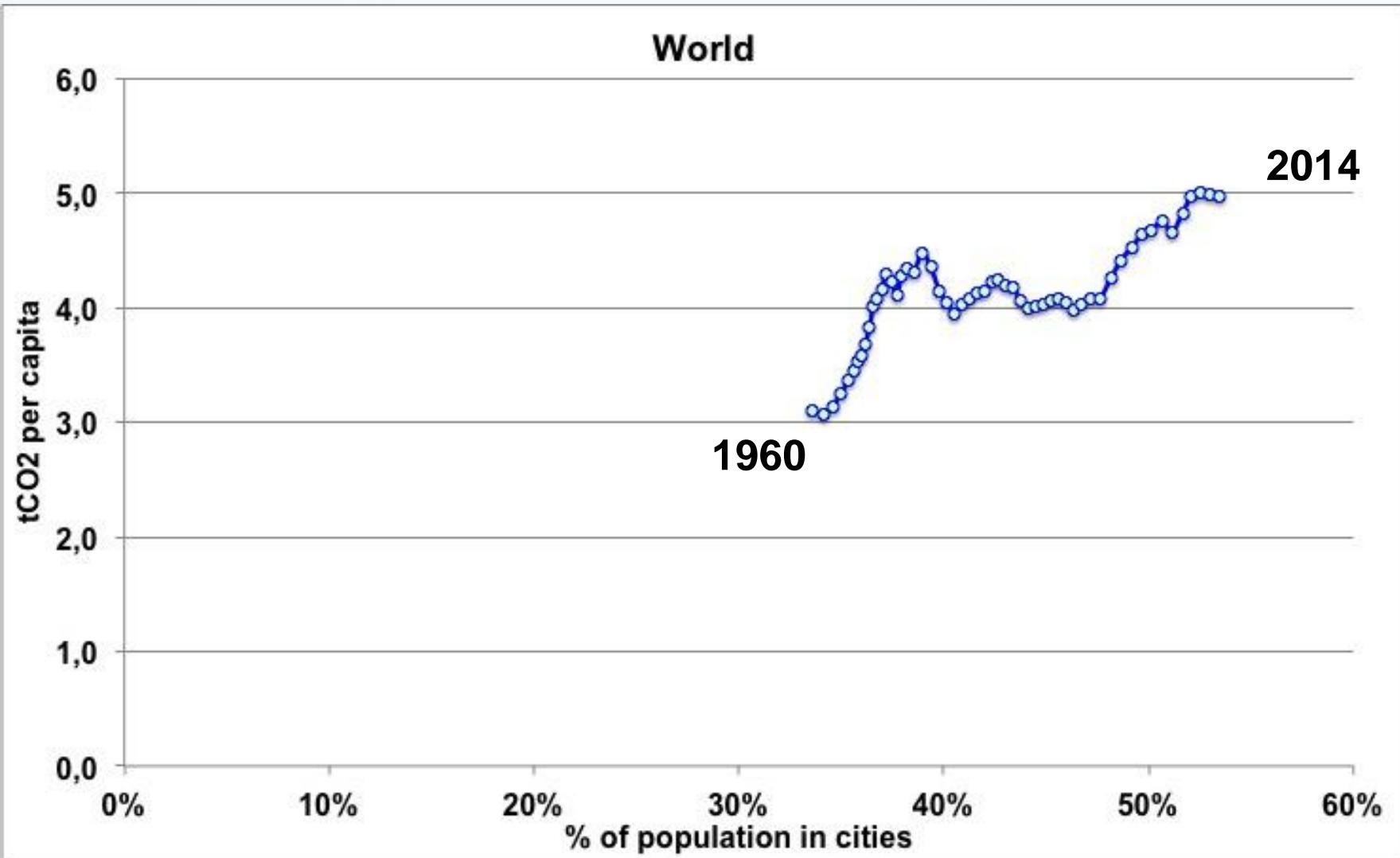
Transports : plus loin, plus vite, moins cher (pour l'instant)



Evolutions des distances parcourues par personne et par jour, en France, depuis 1800.

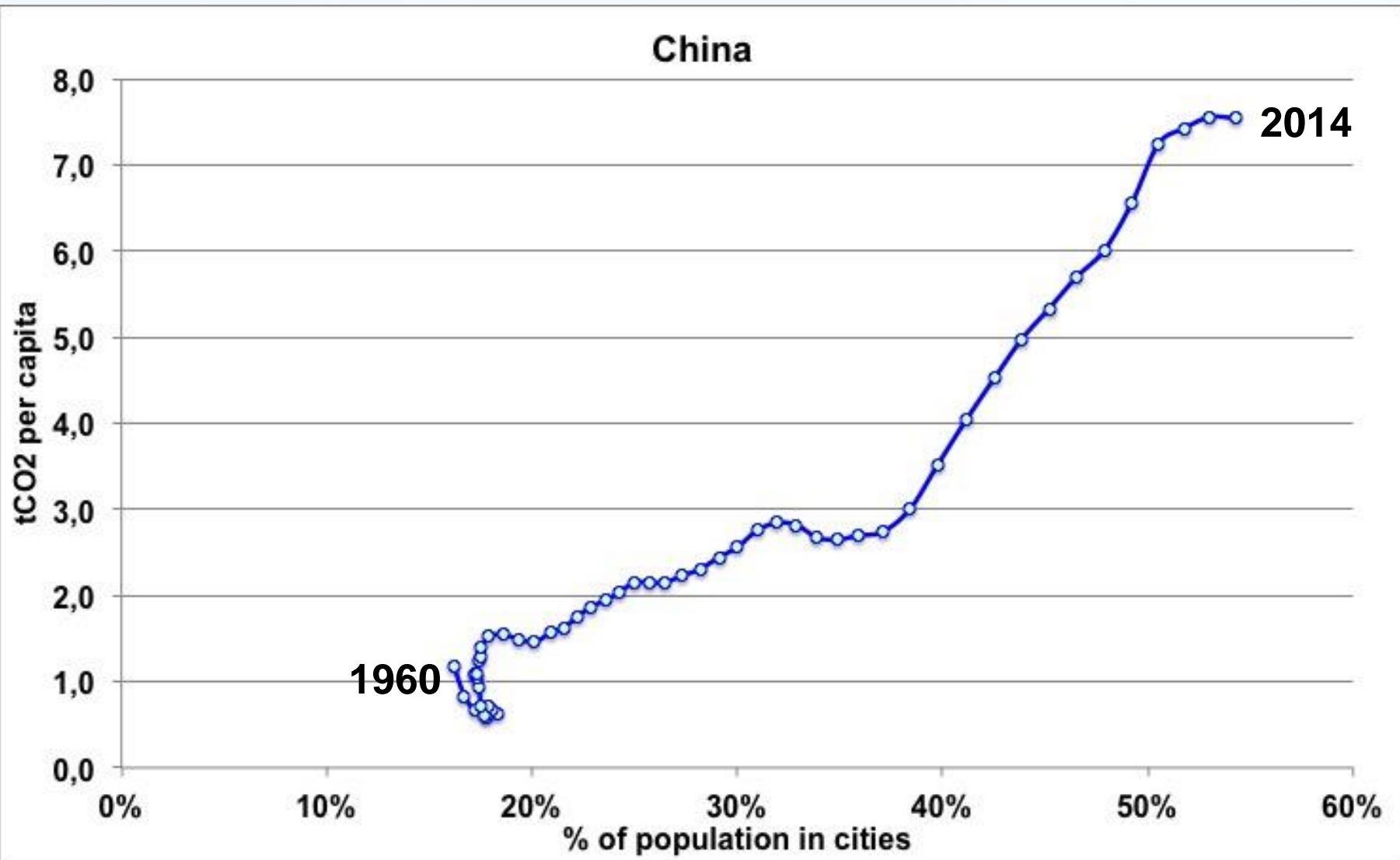
Grübler & Nakicenovic, 1991 et estimations de Francis Papon pour la marche

Plus d'énergie fossile = plus de villes !



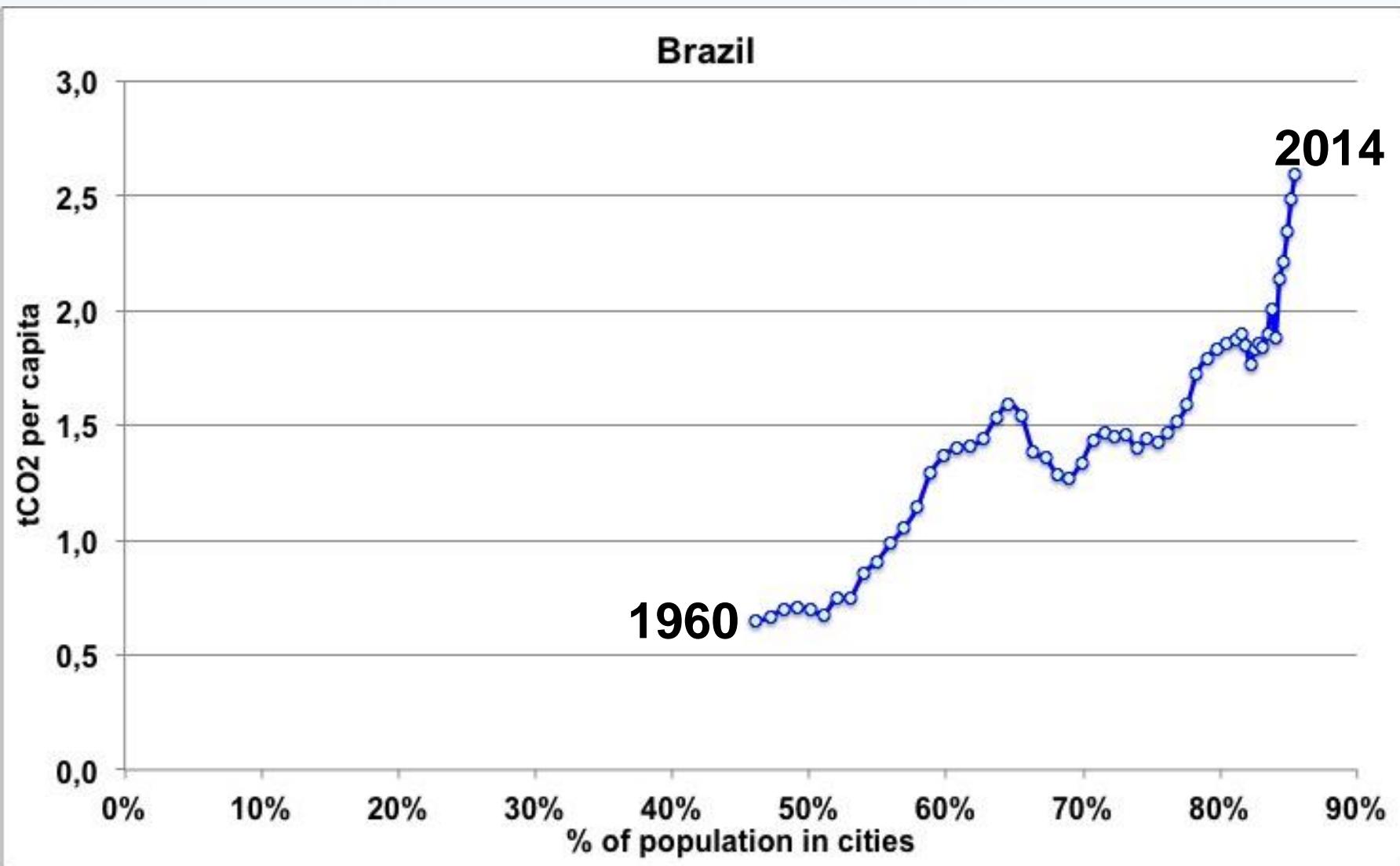
Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne dans le monde. Donnés Banque Mondiale

Plus d'énergie fossile = plus de villes !



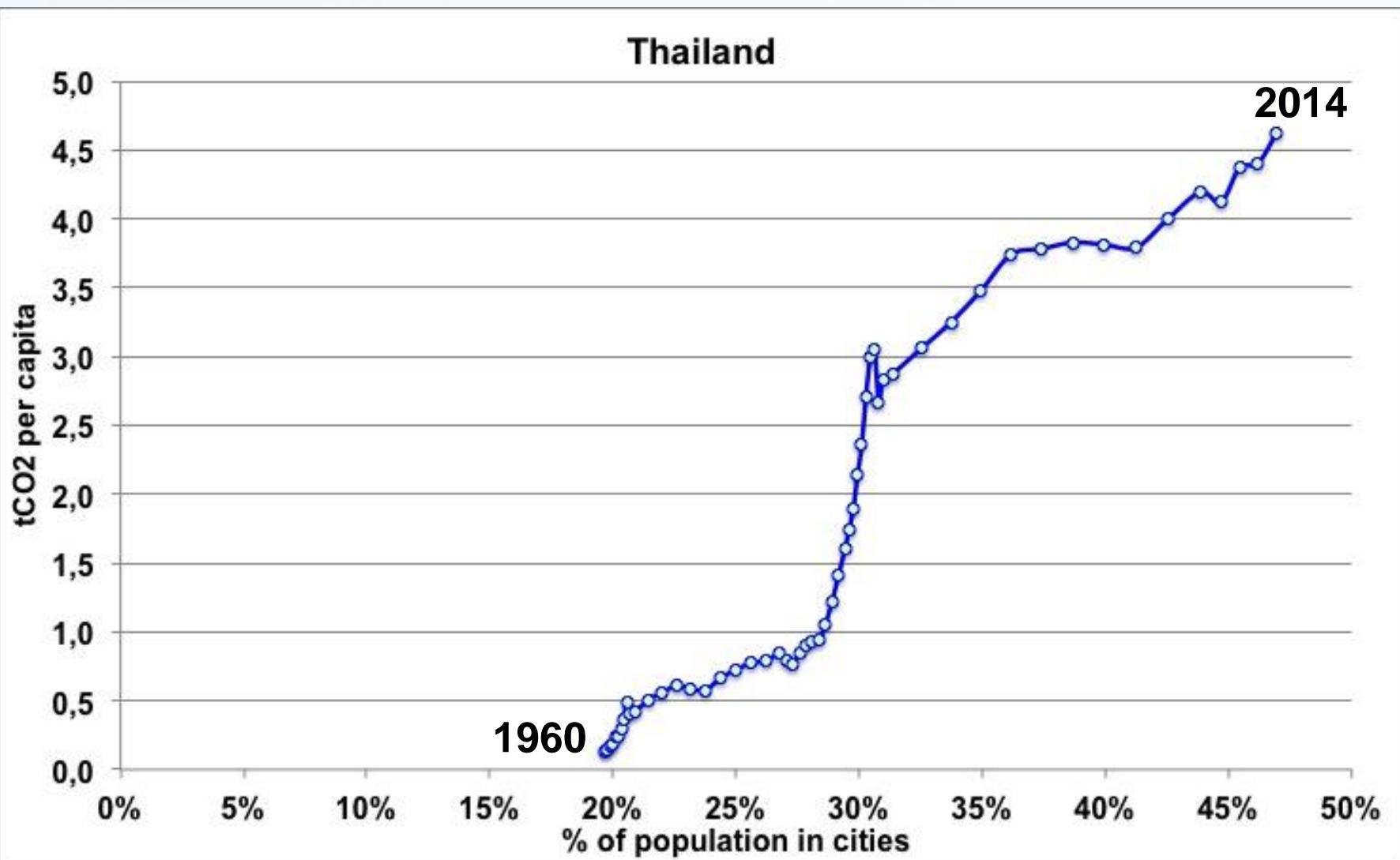
Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Chine. Donnés Banque Mondiale

Plus d'énergie fossile = plus de villes !



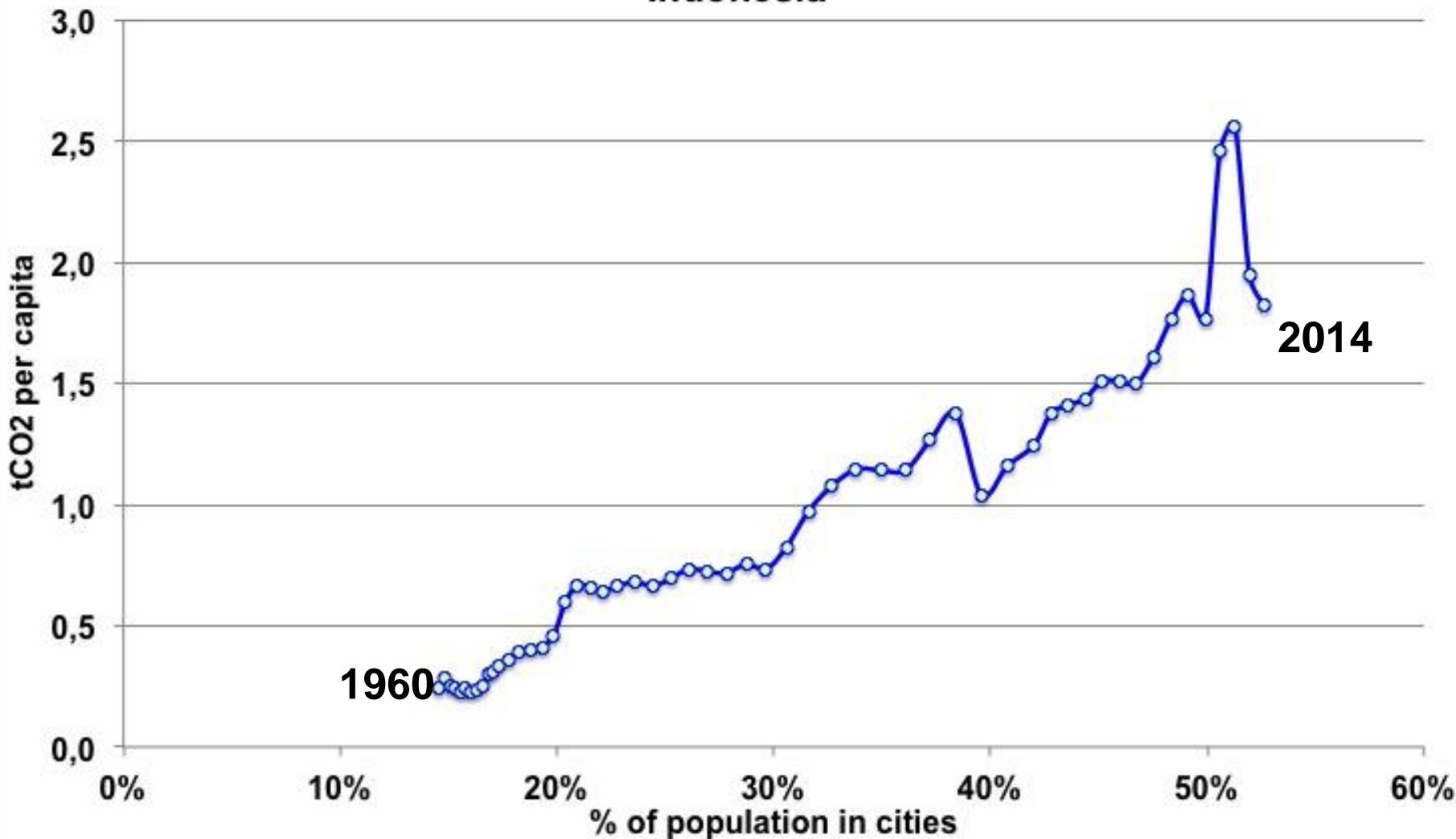
Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Donnés Banque Mondiale

Plus d'énergie fossile = plus de villes !



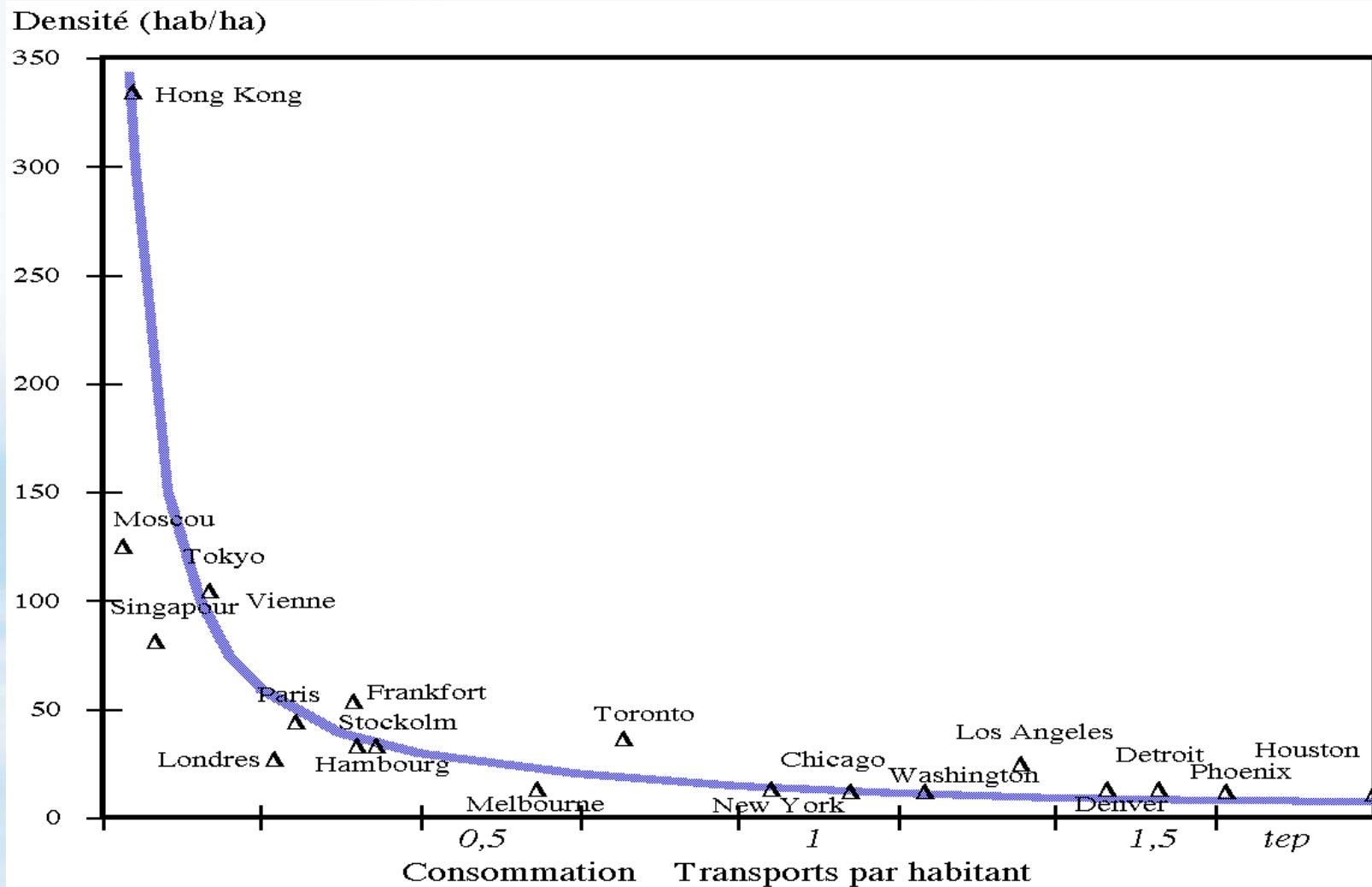
Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Thaïlande. Donnés Banque Mondiale

Indonesia



Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Indonésie. Données Banque Mondiale

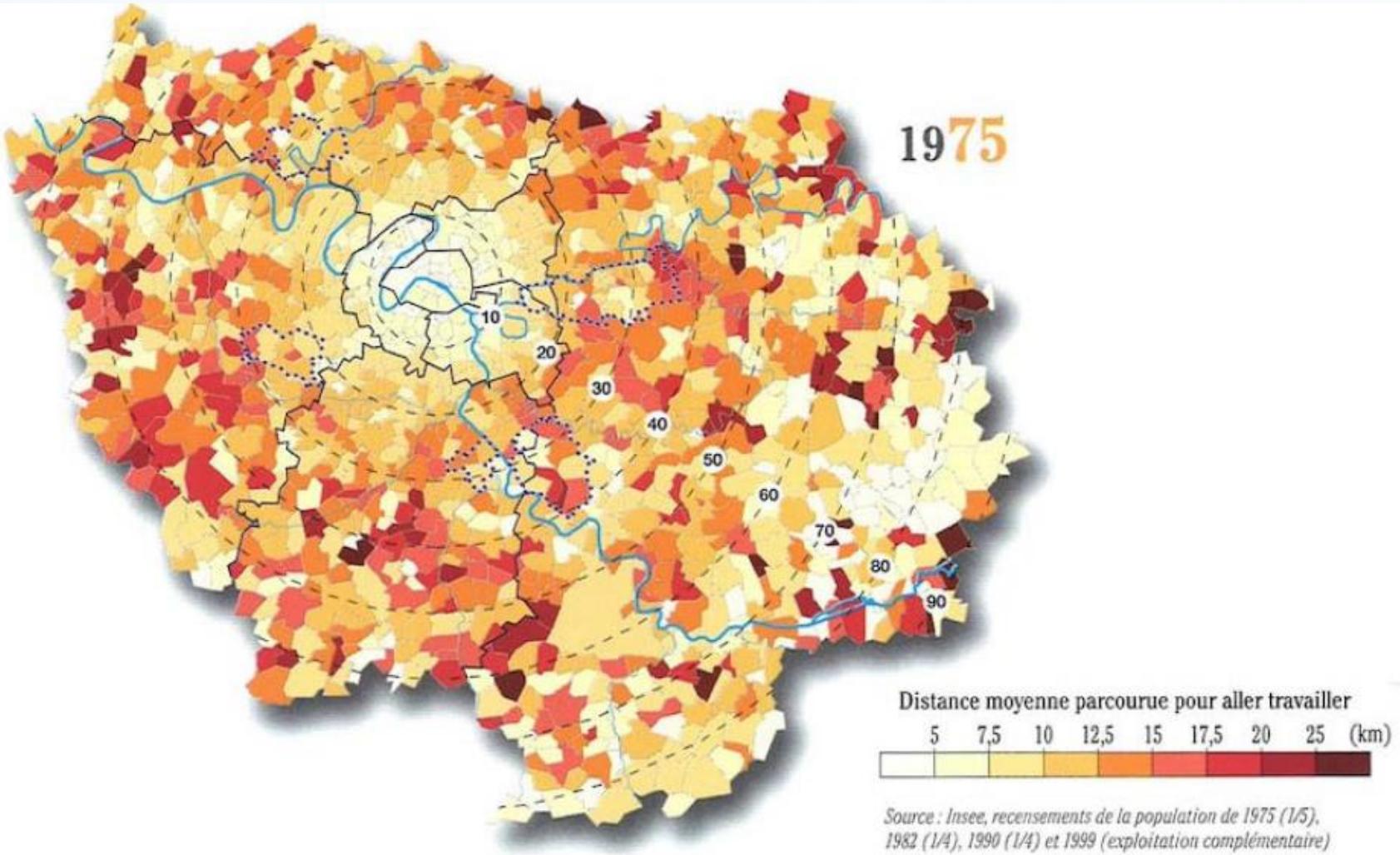
Si je suis moderne, je m'étale...



Consommation énergétique par habitant liée aux transports urbains (axe horizontal, en tonnes équivalent pétrole par an) en fonction de la densité de la zone urbaine (axe vertical, en habitants à l'hectare).

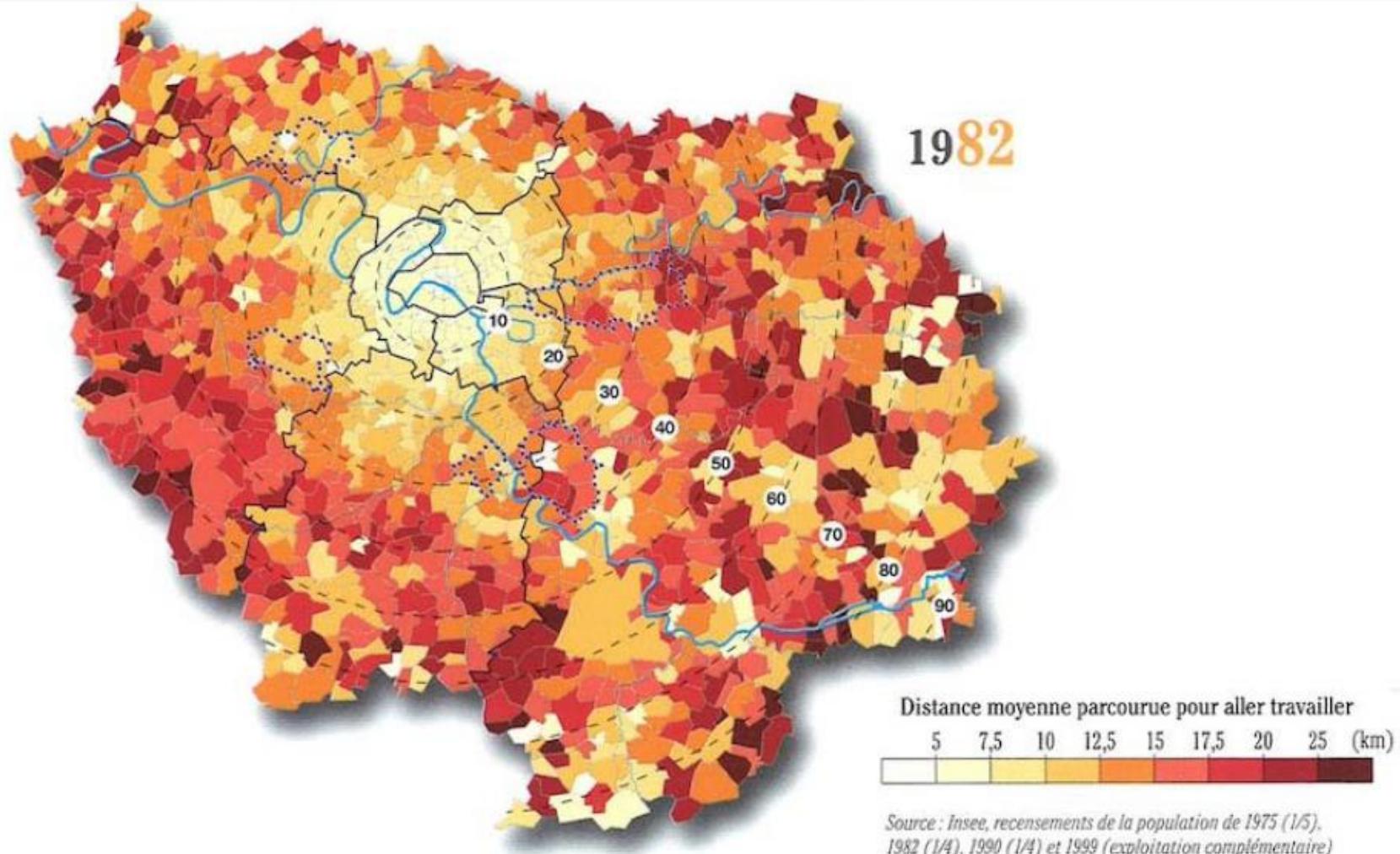
Source : Newman and Kenworthy, " Cities and automobile dependance ", Gower, 1989

Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



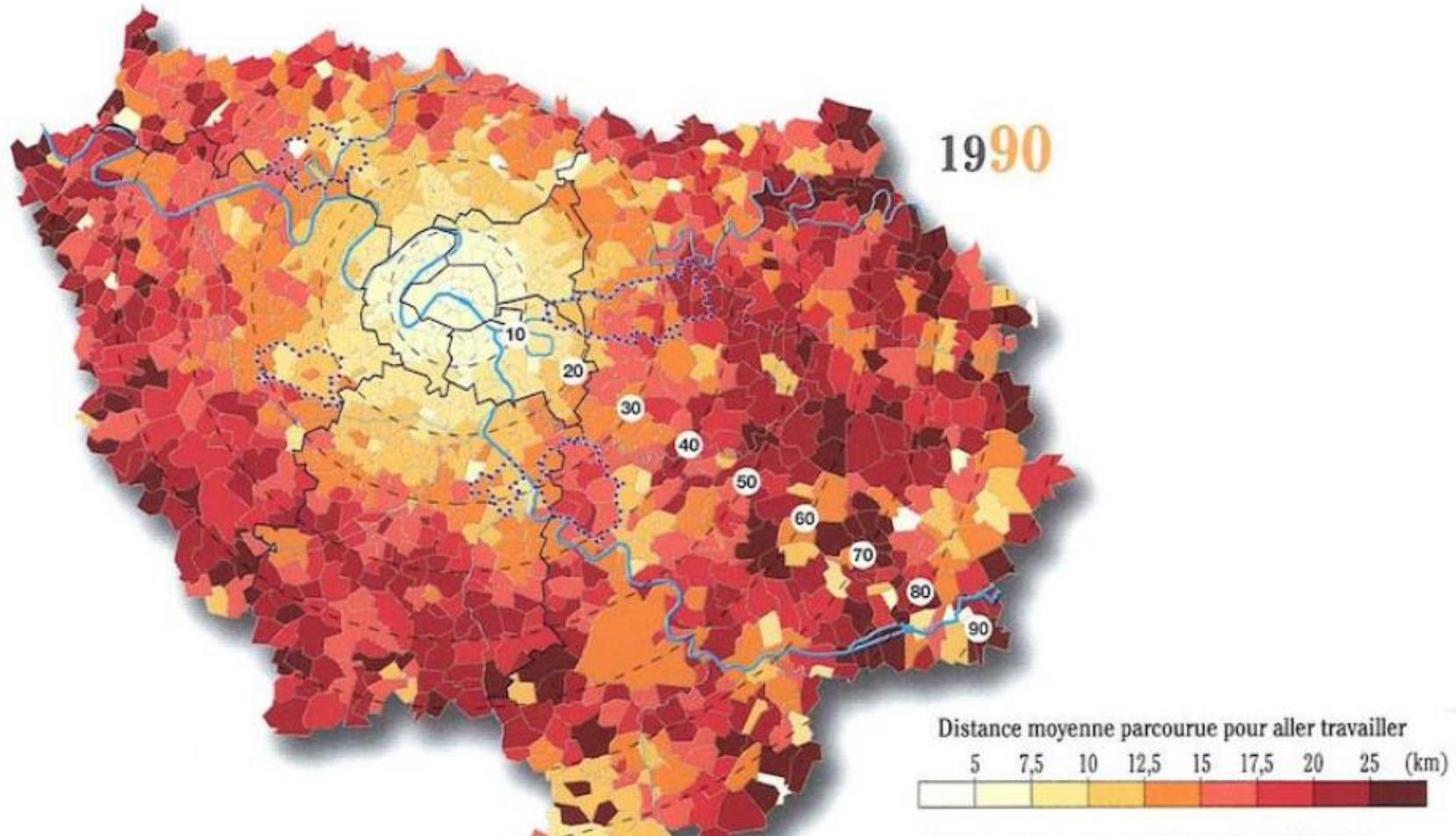
**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».
Source INSEE**

Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



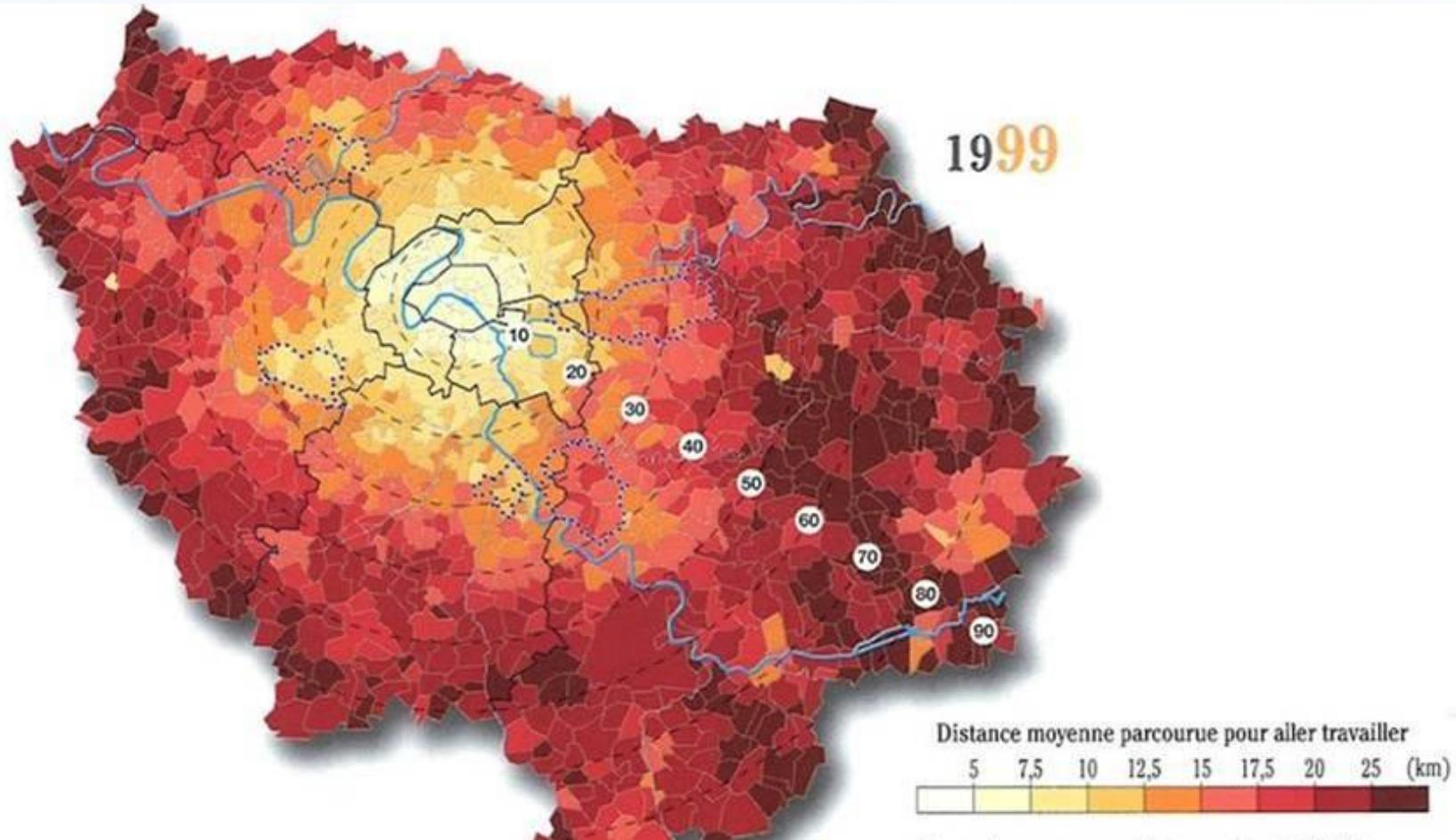
**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».
Source INSEE**

Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



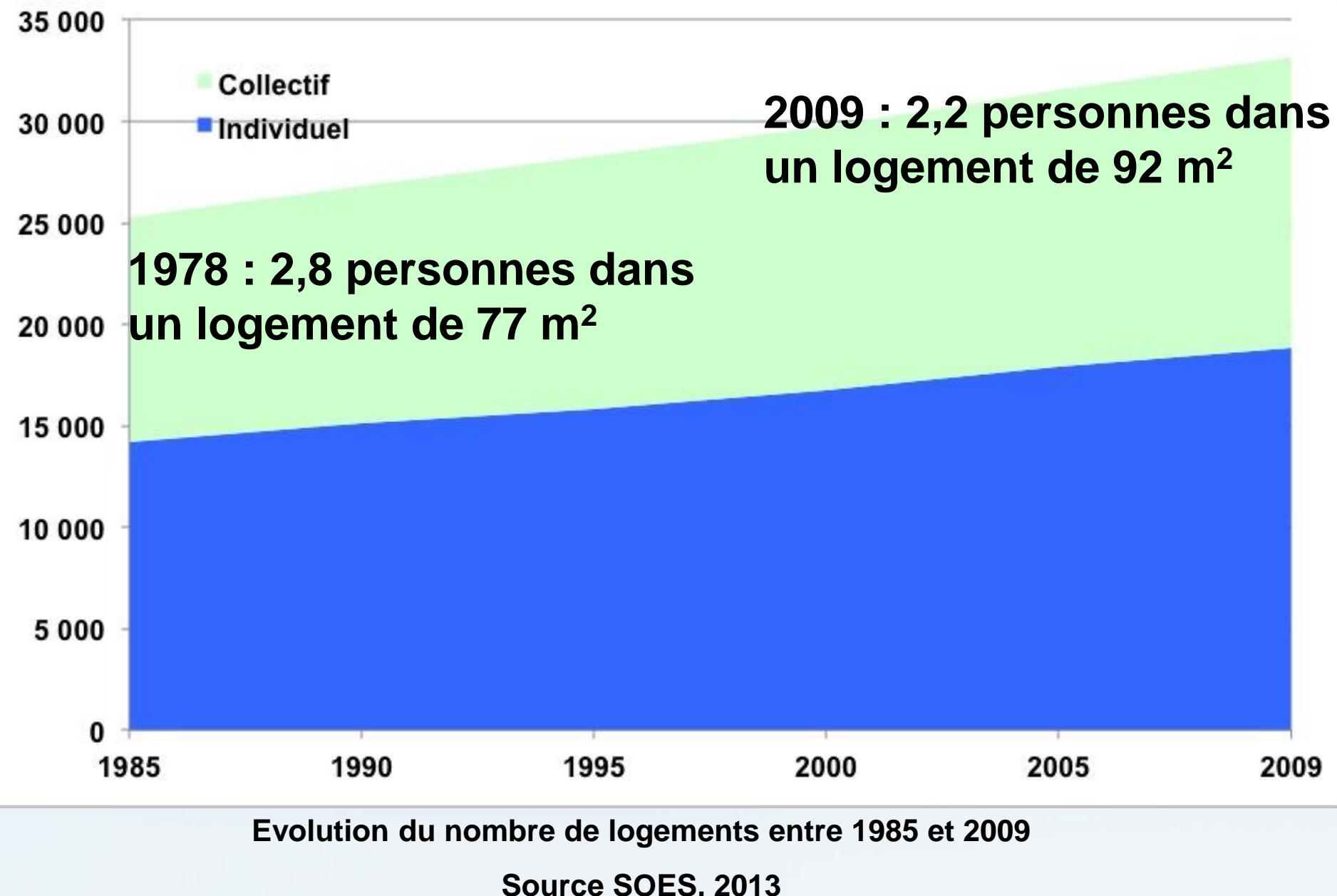
**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».
Source INSEE**

Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai

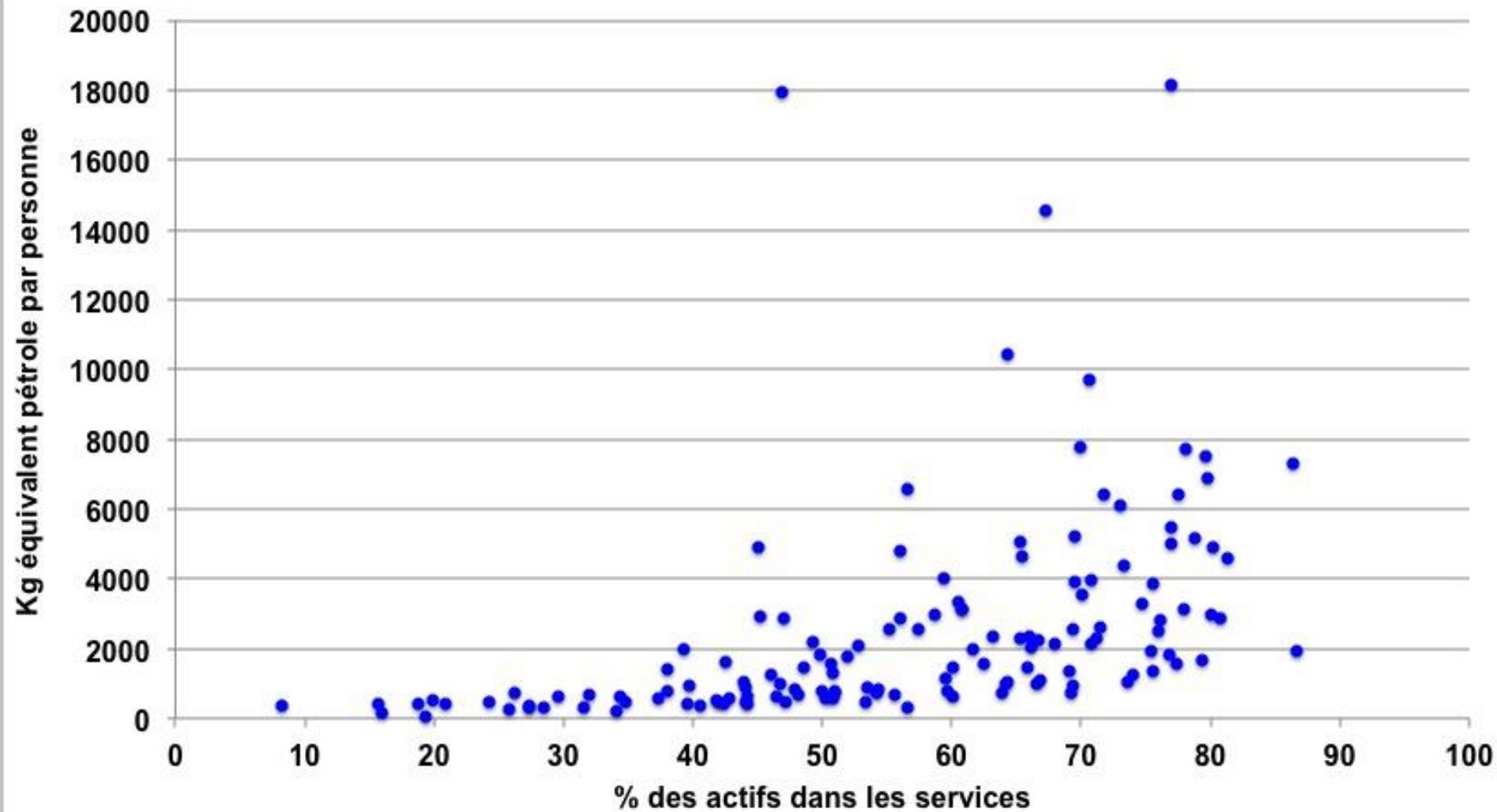


**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».
Source INSEE**

Utiliser des hydrocarbures sans se déplacer, c'est possible !



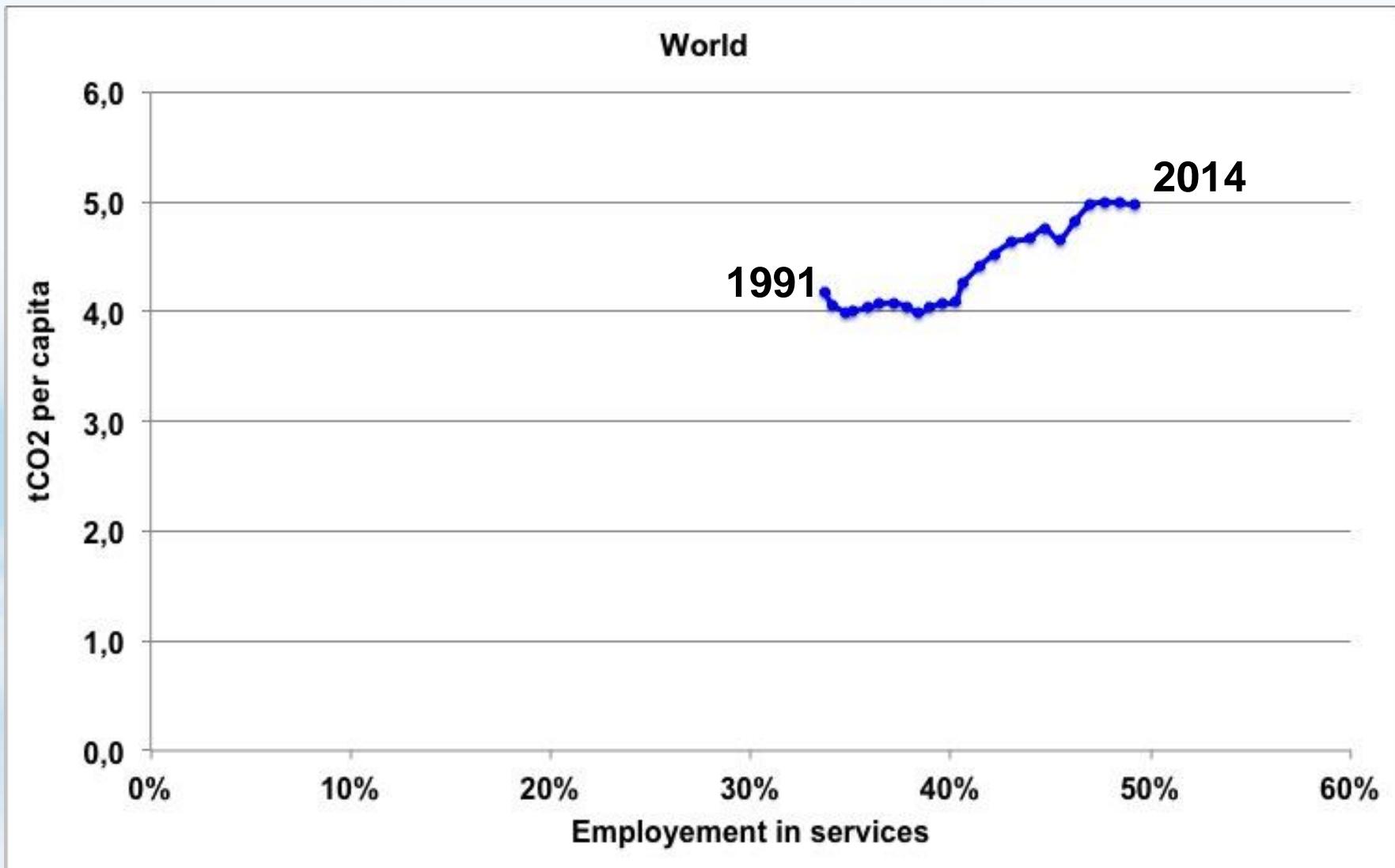
Vous avez dit dématérialisation ?



Utilisation de l'énergie par personne et par an vs. % de l'emploi dans les services en 2013.

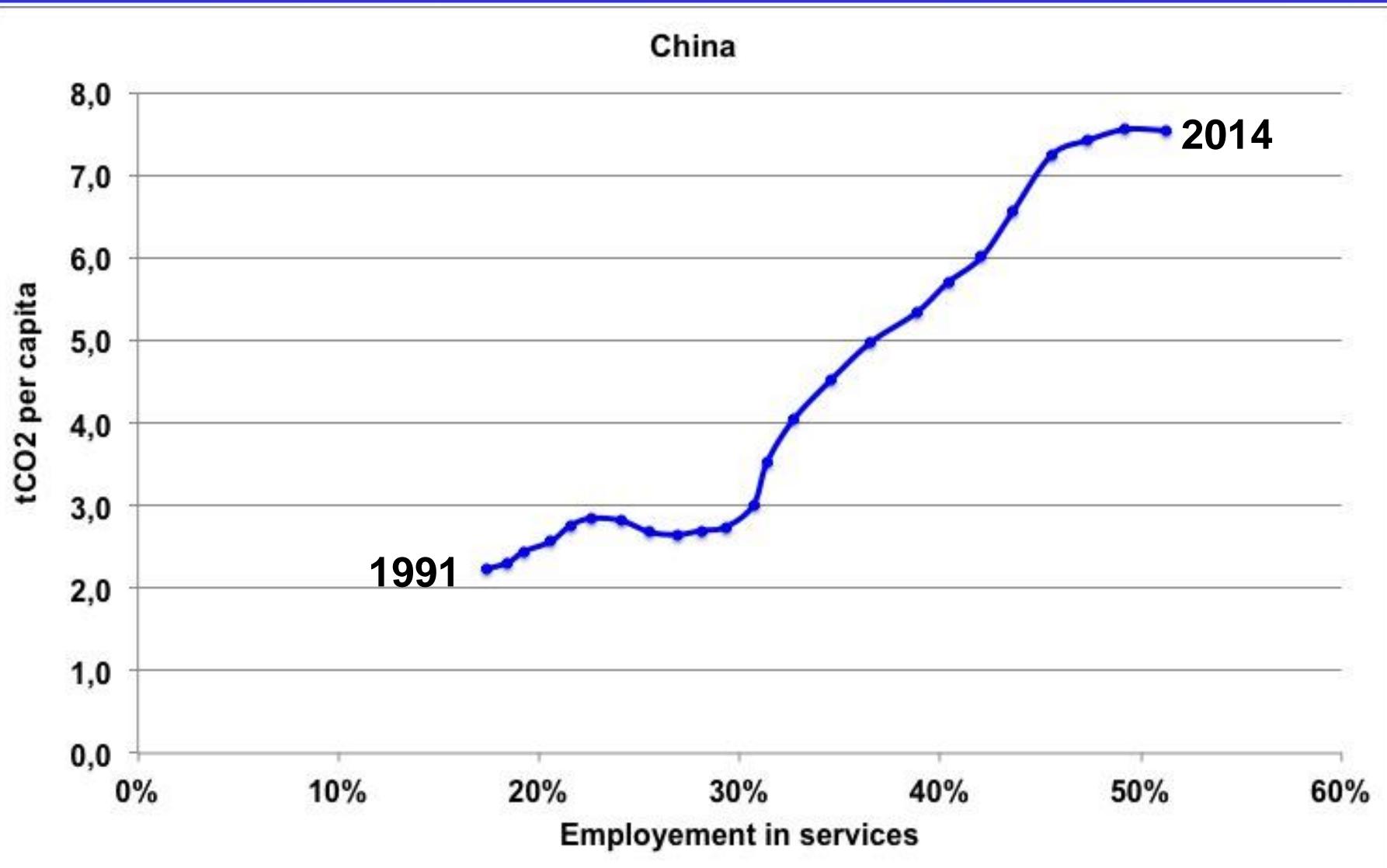
Données primaires World Bank, 2018

Plus d'énergie fossile = plus de services !



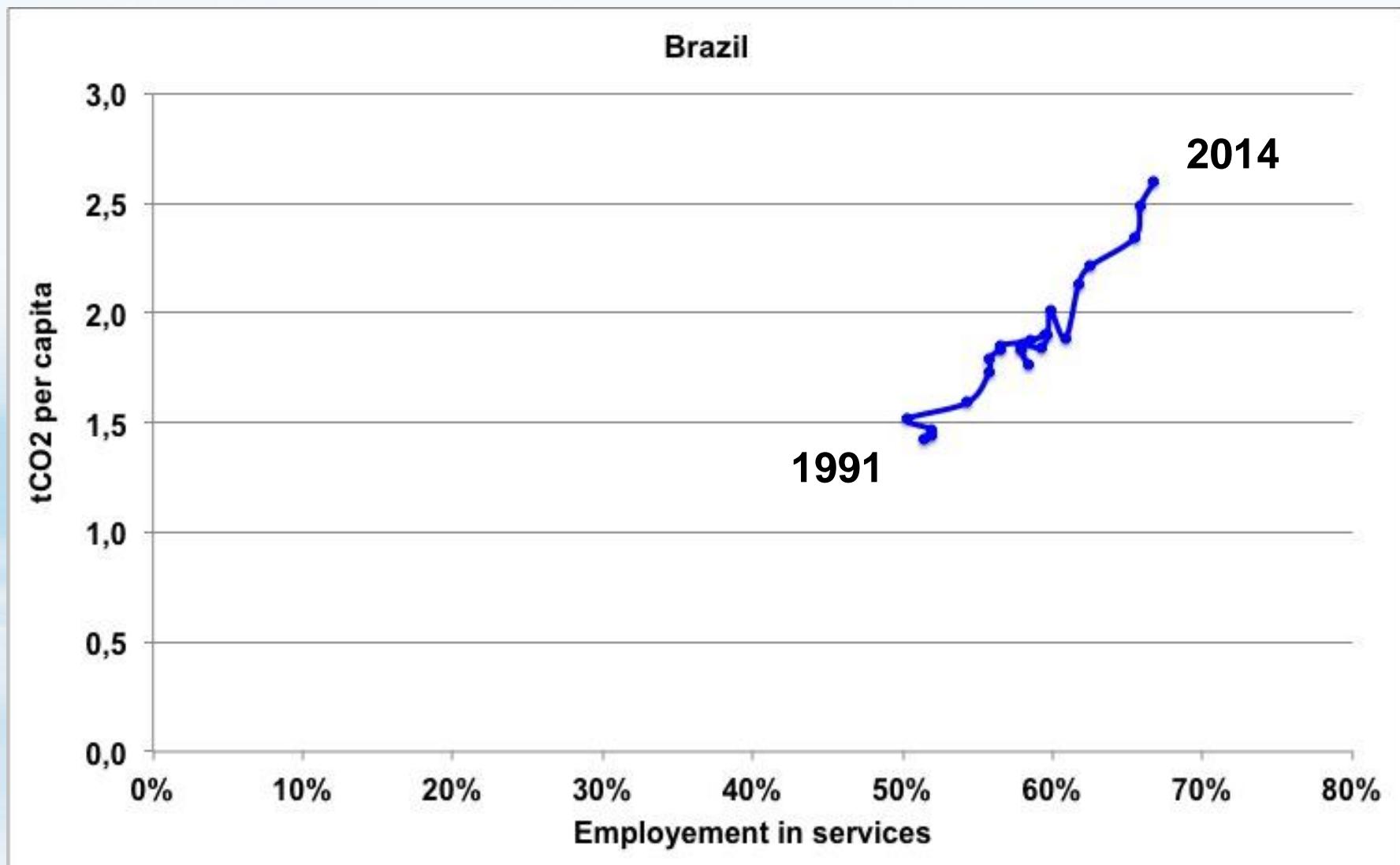
Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne dans le monde. Donnés Banque Mondiale

Plus d'énergie fossile = plus de services !



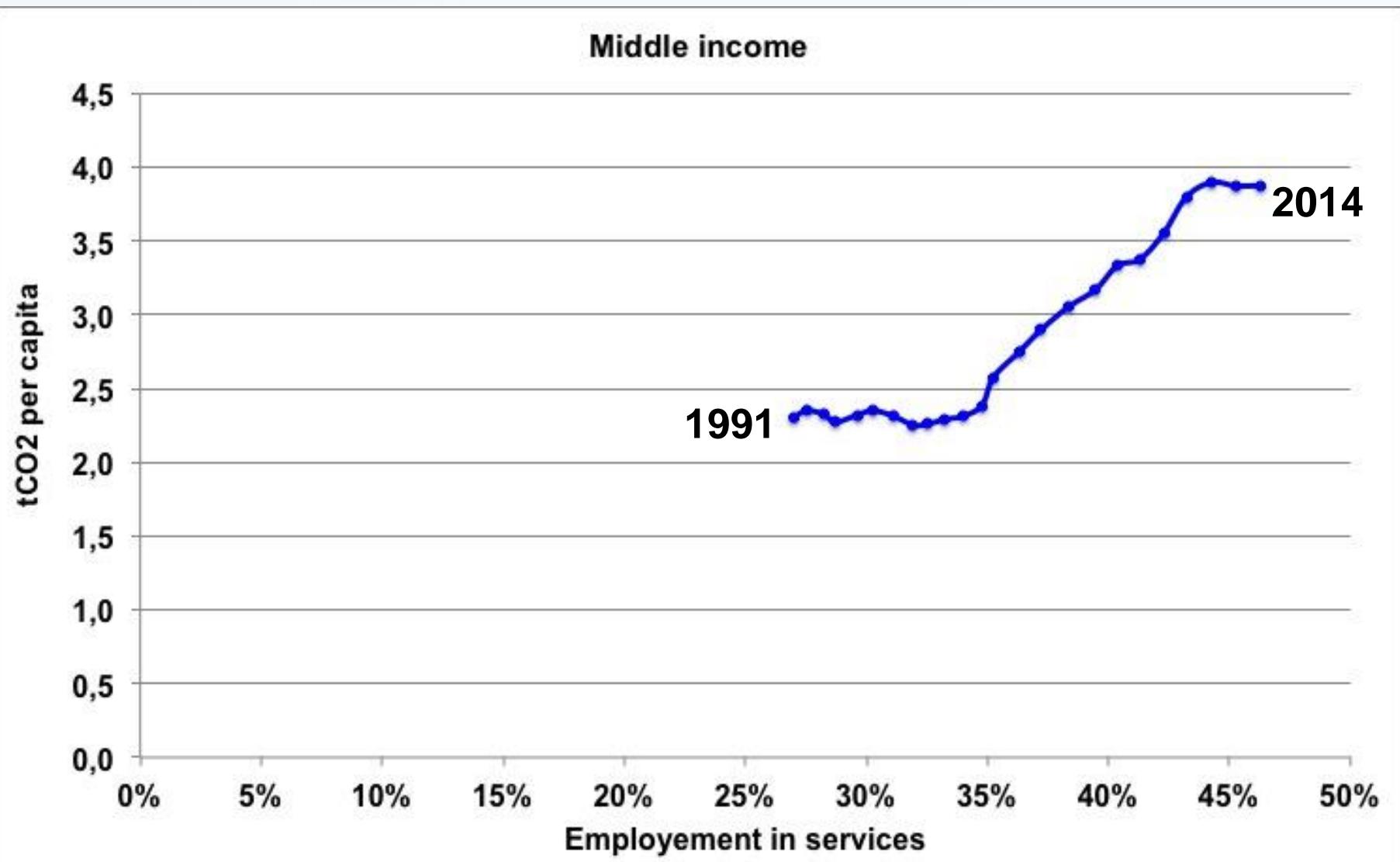
Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne en Chine. Donnés Banque Mondiale

Plus d'énergie fossile = plus de services !



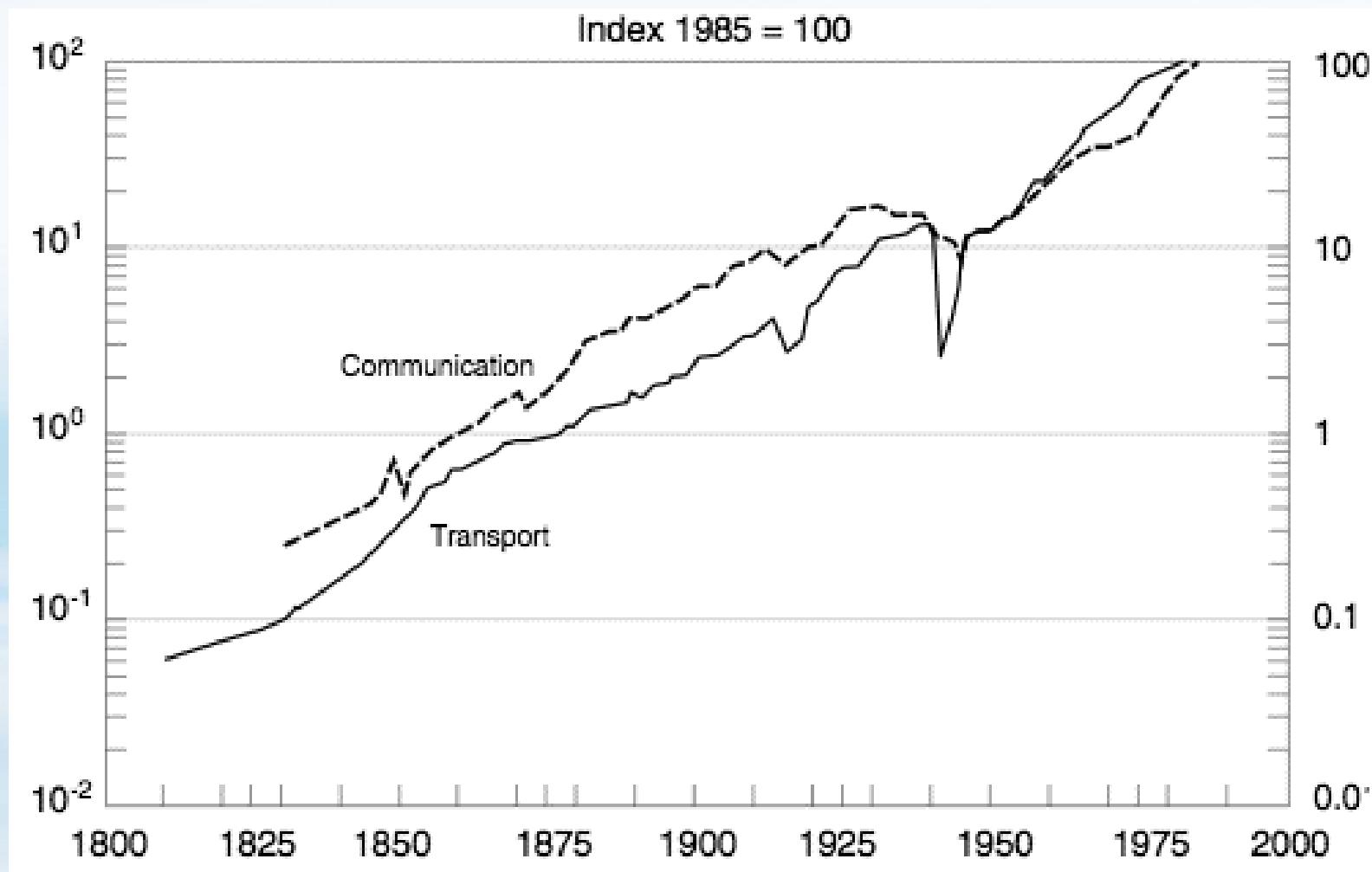
Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Donnés Banque Mondiale

Plus d'énergie fossile = plus de services !



Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Donnés Banque Mondiale

Les kilo-octets n'ont pas tué les kilomètres !



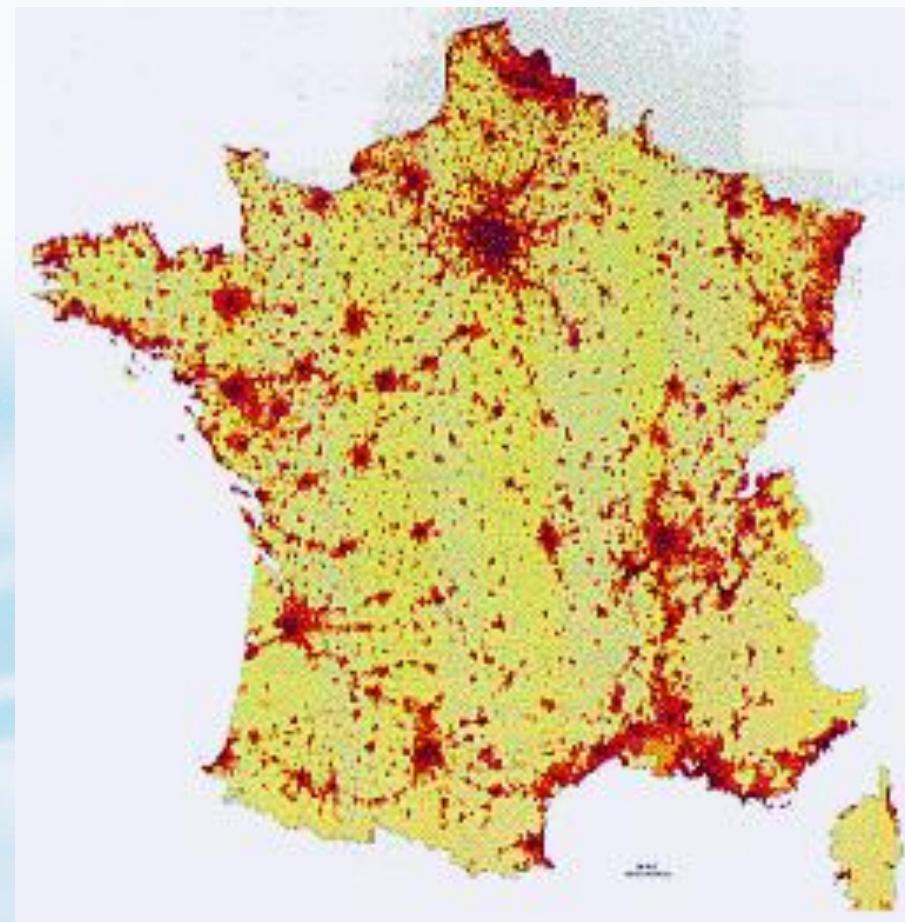
Evolution comparée des flux d'information et des flux de transport de 1800 à 1990.

Source : Arnulf GRÜBLER, the Rise and Fall of Infrastructures, 1990

Plus d'énergie = des campagnes vides et des villes étalées



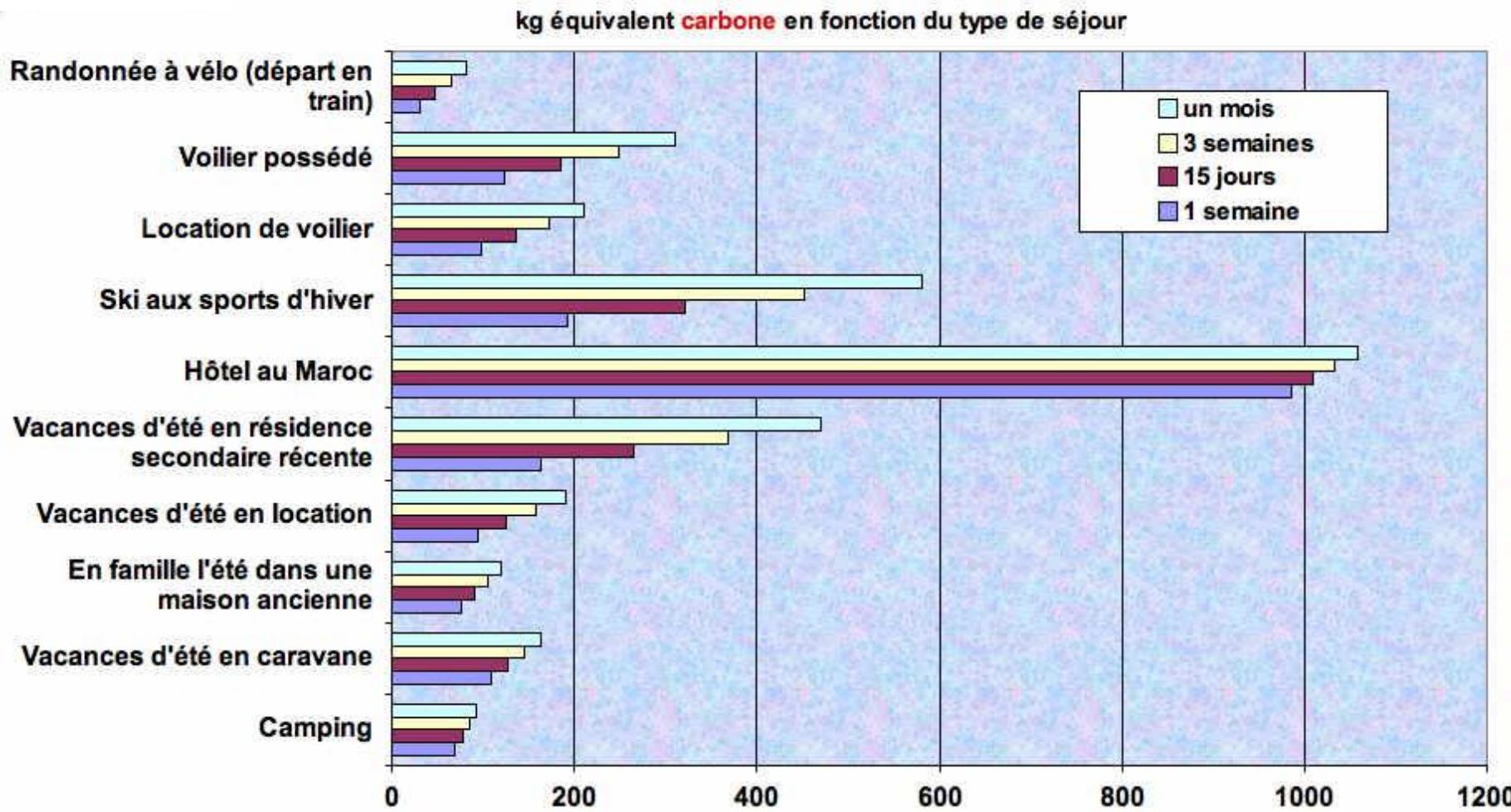
1936, 42 millions d'habitants



2000, 59 millions d'habitants

Source DATAR

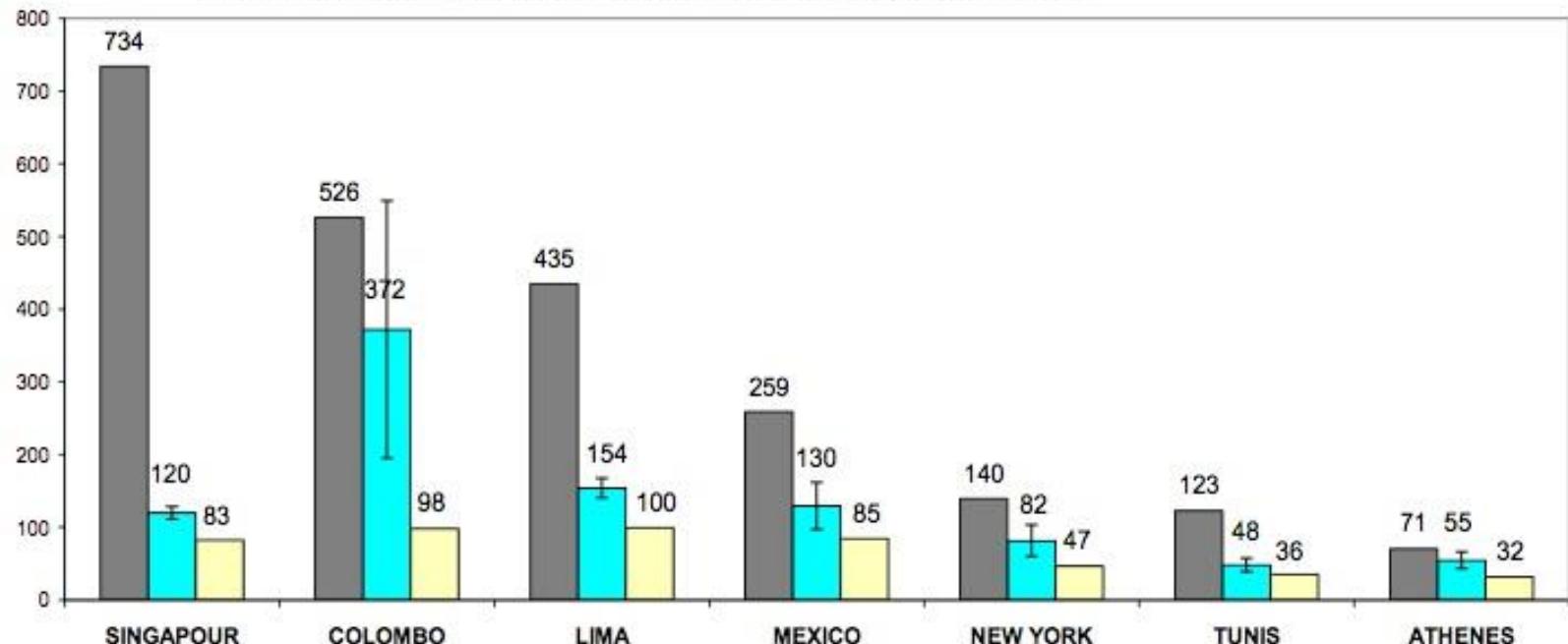
Vacances pour tous = du carbone, encore !



Emissions de gaz à effet de serre liées au séjour d'une famille de 4 personnes selon le type de tourisme et la durée. Source Jancovici, 2004

Le carbone aéroporté est lui aussi en solde

- 1980
- 2005, moyenne
- 2005, prix le plus bas disponible

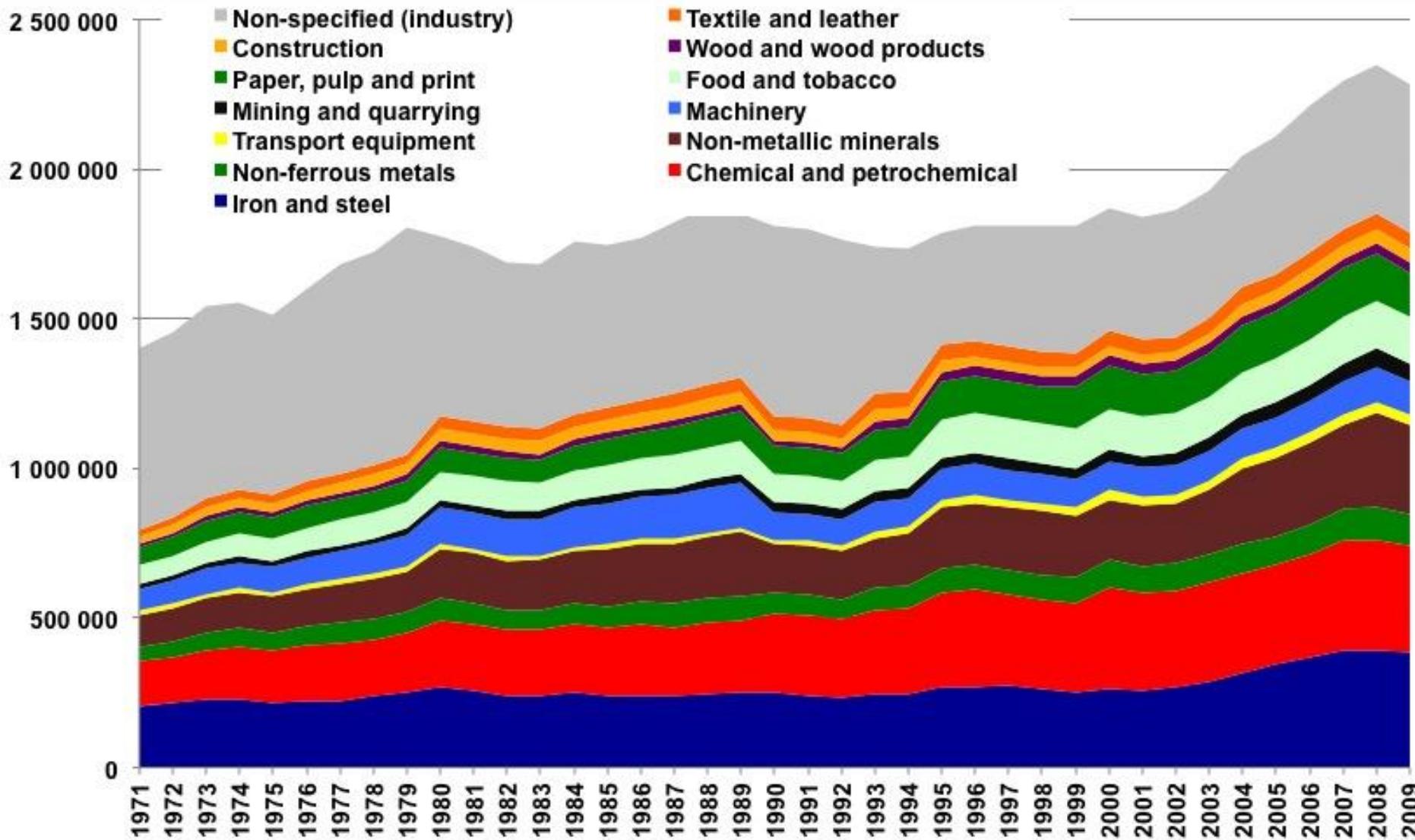


Extrait du travail de thèse "Optimisation Spatio-Temporelle des Déplacements Touristiques", v. Bagard, LET 2005

Prix d'un billet d'avion exprimé en heures de SMIC

Source LET, 2005

Matériaux pour pas cher... et objets qui vont avec



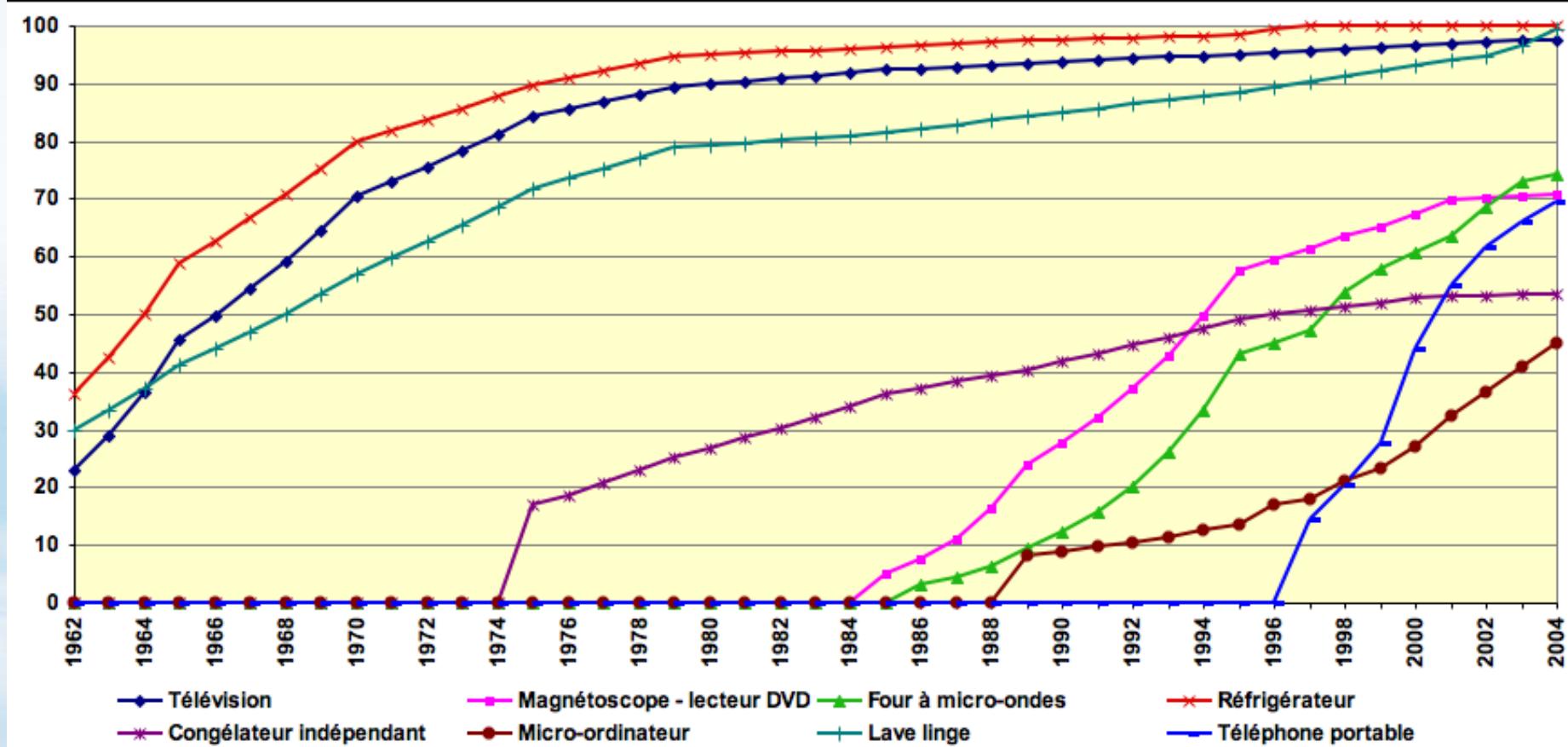
Énergie utilisée par secteur industriel (total monde) de 1971 à 2009, en milliers de tonnes équivalent pétrole. Source AIE

Se passer de pétrole ou vider son logement, c'est pareil



© Sarah Leen /National Geographic Stock

Plus d'électrons pour les français aussi



Evolution du taux d'équipement des ménages français en appareils électroménagers de 1962 à 2004. Source : INSEE, 2010

Divorcer = +60% d'énergie par ex-conjoint

2 fois plus de logements (à construire, à chauffer) -> énergie

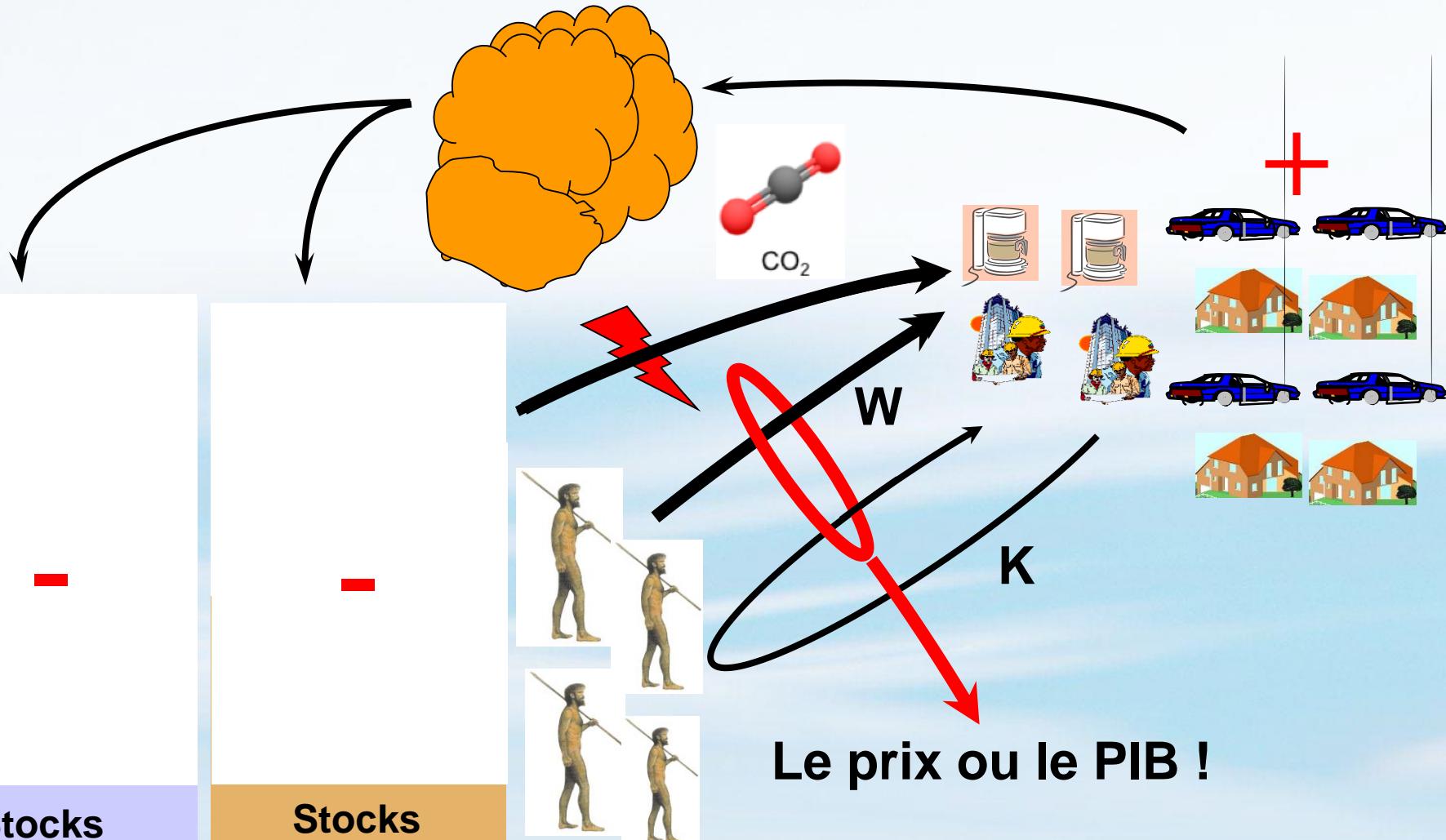
2 fois plus d'objets à fabriquer (et utiliser) : électroménager, meubles, véhicule, etc -> énergie

Et quelques déplacements supplémentaires pour les enfants...

La retraite, les études, les vacances, l'assurance chômage = le fruit de la formidable hausse de la productivité du travail -> énergie

1 employé du National Health Service (en Grande Bretagne) « utilise » 14 tonnes équivalent CO₂ par an -> l'hôpital est sous perfusion d'énergie !

L'économie mondiale en un clin d'œil



Stocks
naturels
renouvelables

Stocks
naturels non
renouvelables

Résultat de 14 milliards
d'années d'évolution, gratuit !

Le prix ou le PIB !



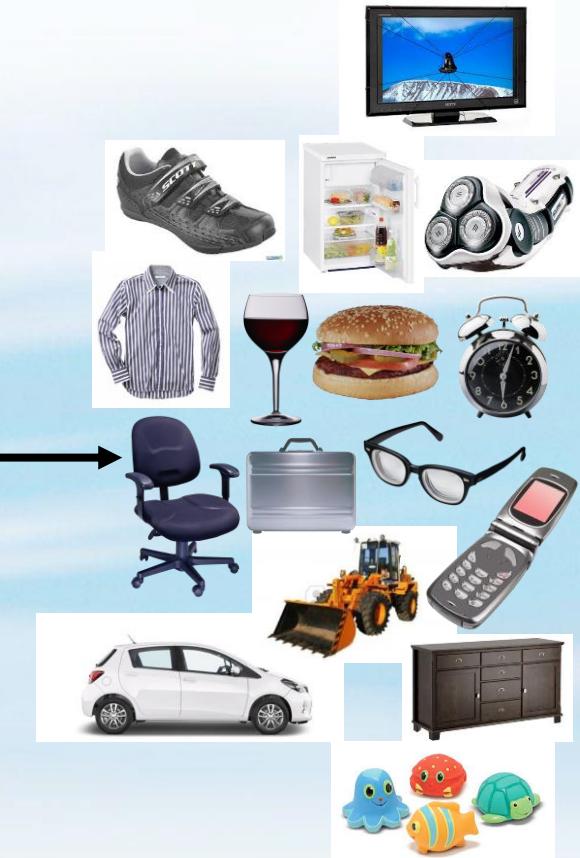
Les ressources naturelles sont inépuisables, car sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant ni être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques

Traité d'économie politique (1803)

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



Système productif



L'ingénieur avait tout compris à la force des machines !



Comparaison faite par le Baron Charles Dupin (X 1801) sur les « forces productives » françaises et anglaises en 1820

	<i>France</i>		<i>Grande-Bretagne</i>	
Moulins et machines hydrauliques	1 500 000	hommes.	1 200 000	hommes.
Moulins à vent	253 333		240 000	
Vent et navigation	3 000 000		12 000 000	
Machines à vapeur	480 000		6 400 000	

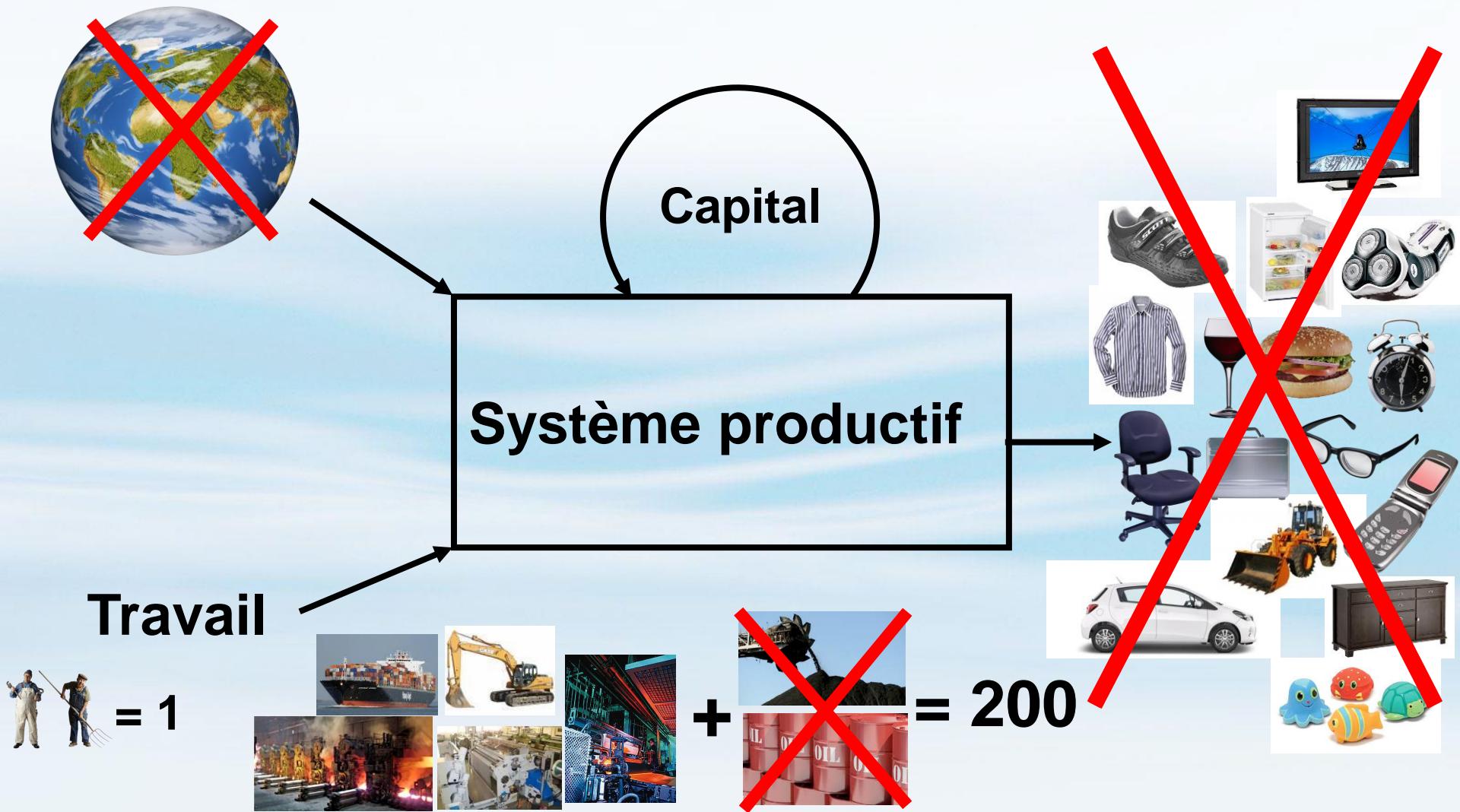
TOTAUX

5 233 333

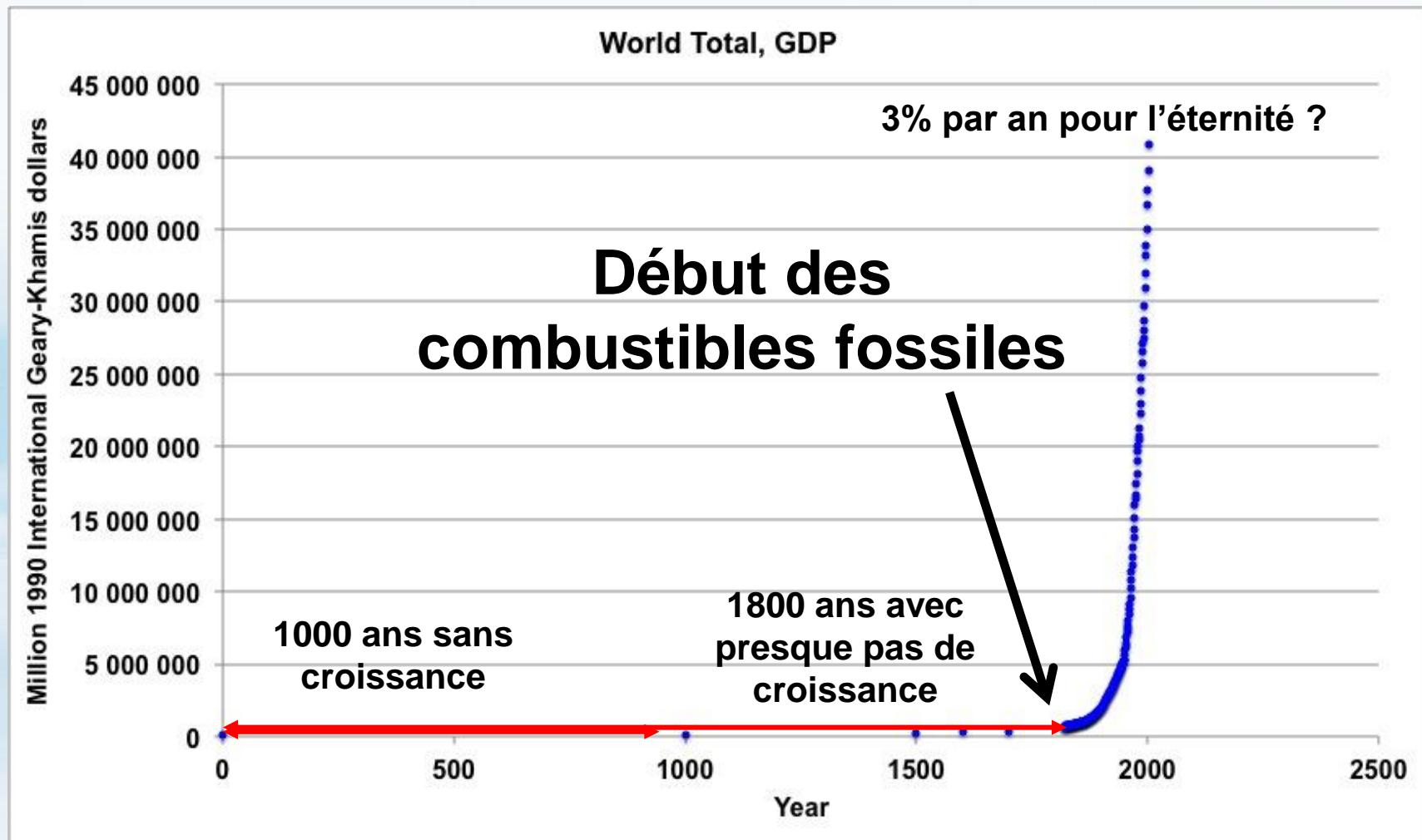
19 840 000

Tableau général des forces industrielles et commerciales

	France	Grande-
Bretagne		
Forces vivantes	6 303 019	7 275 497
Forces inanimées	5 233 333	19 840 000
FORCE TOTALE INDUSTRIELLE	11 536 352	27 115 497

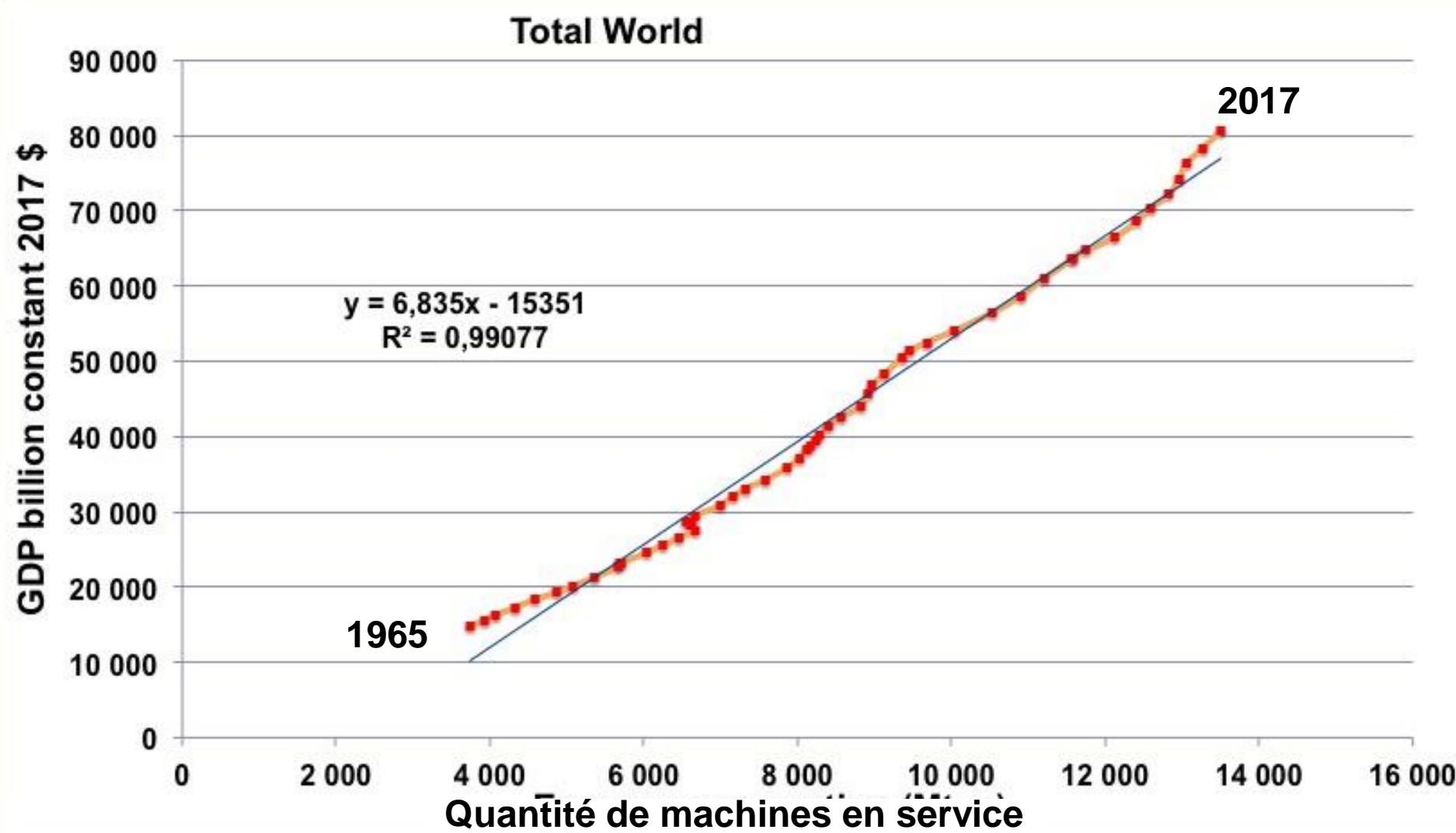


Les promesses électorales étaient plus faciles il y a 1000 ans



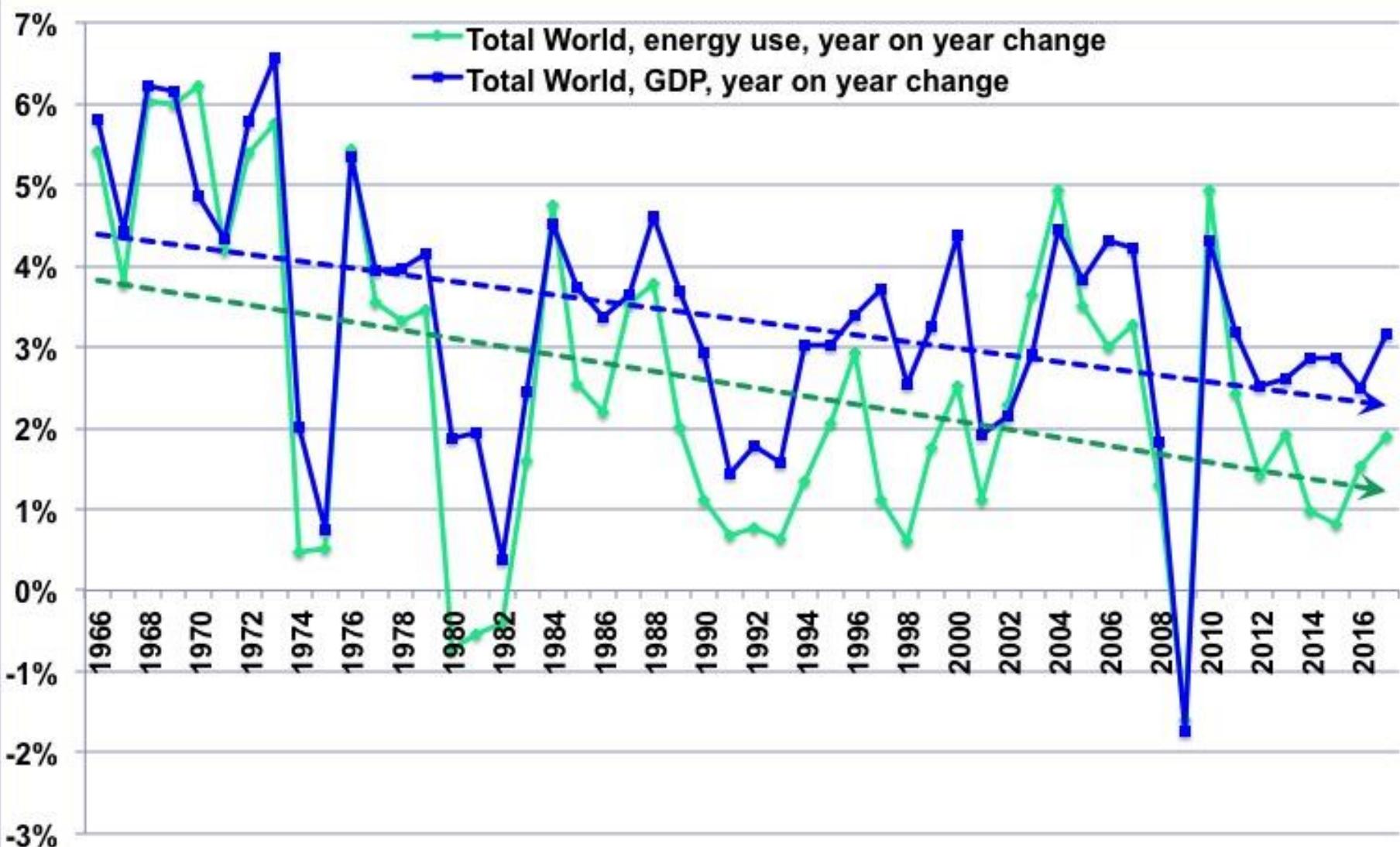
PIB mondial reconstitué de l'an 0 à 2003. Source : Angus Maddison

Le meilleur modèle macro-économique du monde : une droite



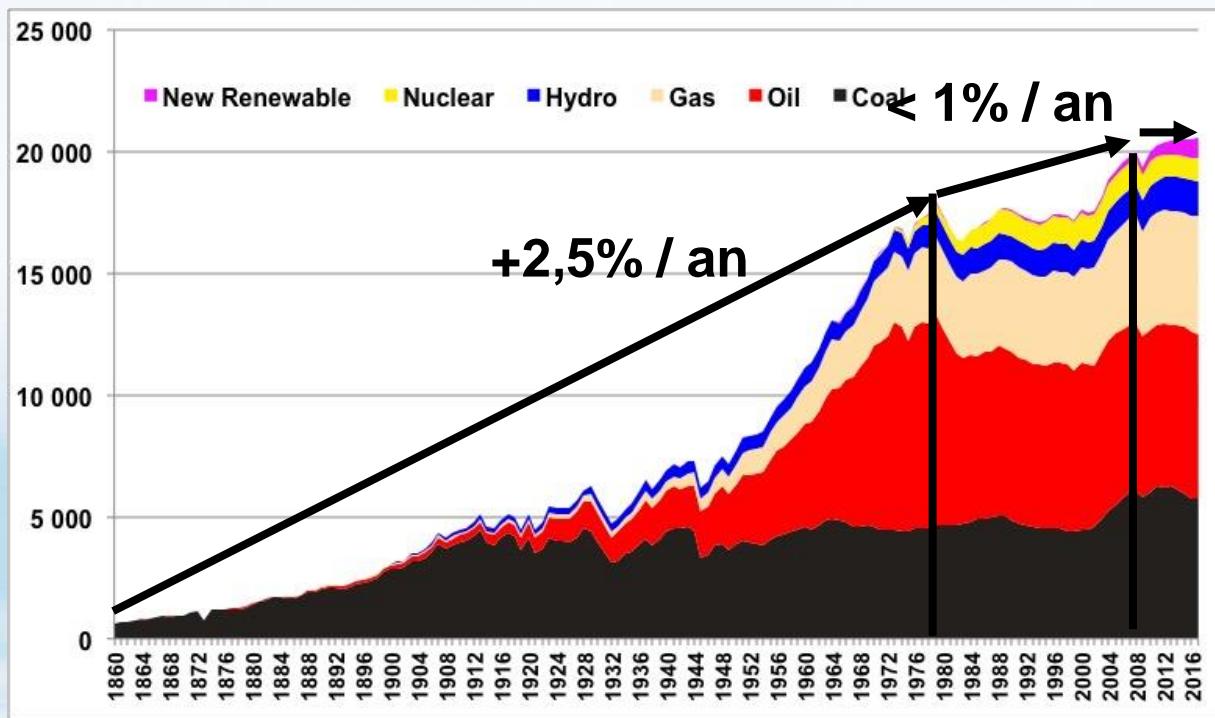
Energie consommée (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde. Données primaires World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

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

C'est la valse à trois temps...



≈ 0

Midas se fatigue, et appelle à sa rescouasse la tertiarisation et la dette

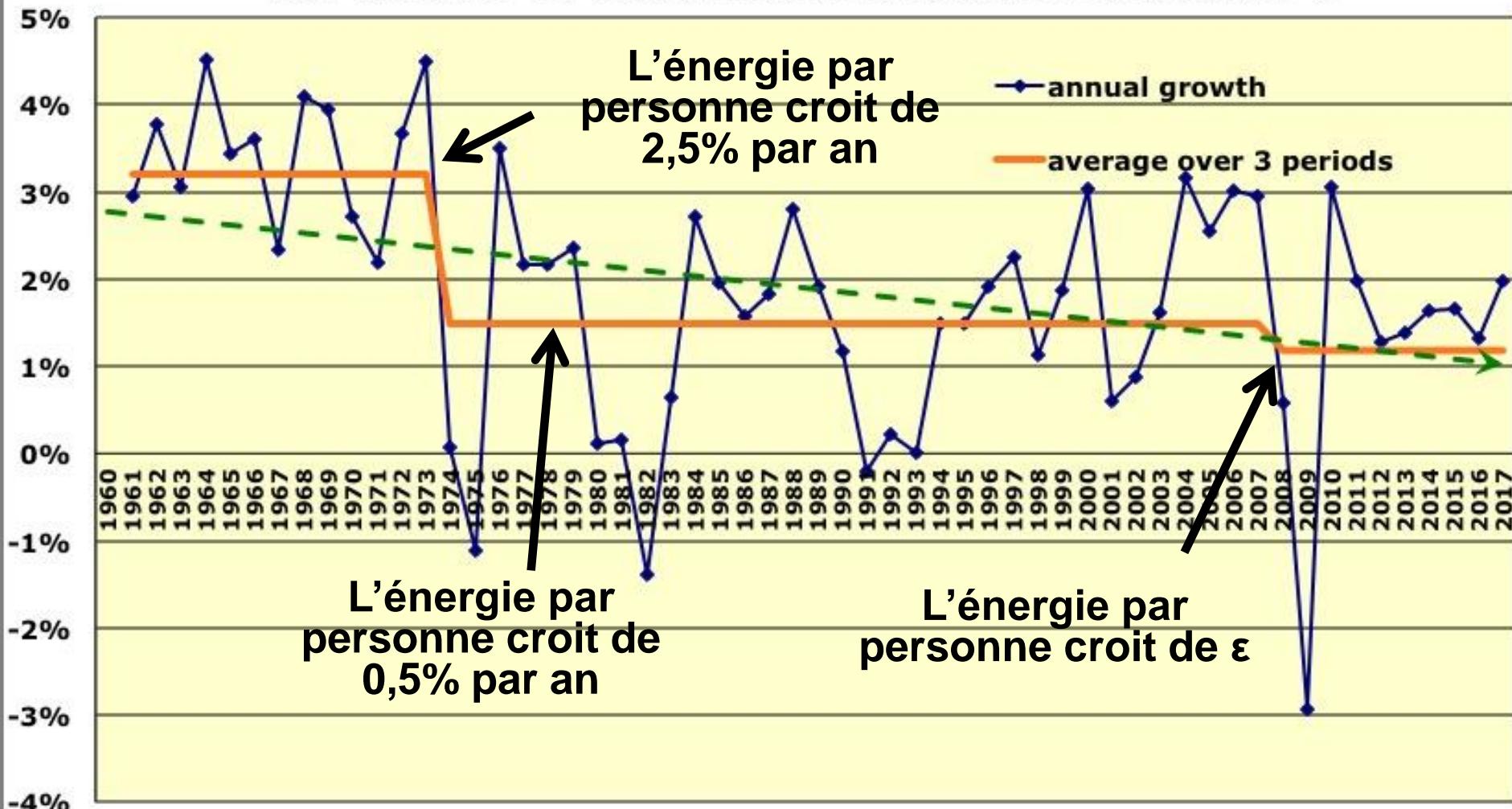
Midas part en vacances, la dette explose, le taux d'emploi baisse, les inégalités s'accroissent...

<=> chaque année, le parc de machines par personne augmente d'au moins 2,5%

<=> chaque année, la transformation de ressources par personne augmente d'au moins 2,5%

<=> chaque année, la production économique par personne augmente d'au moins 2,5%

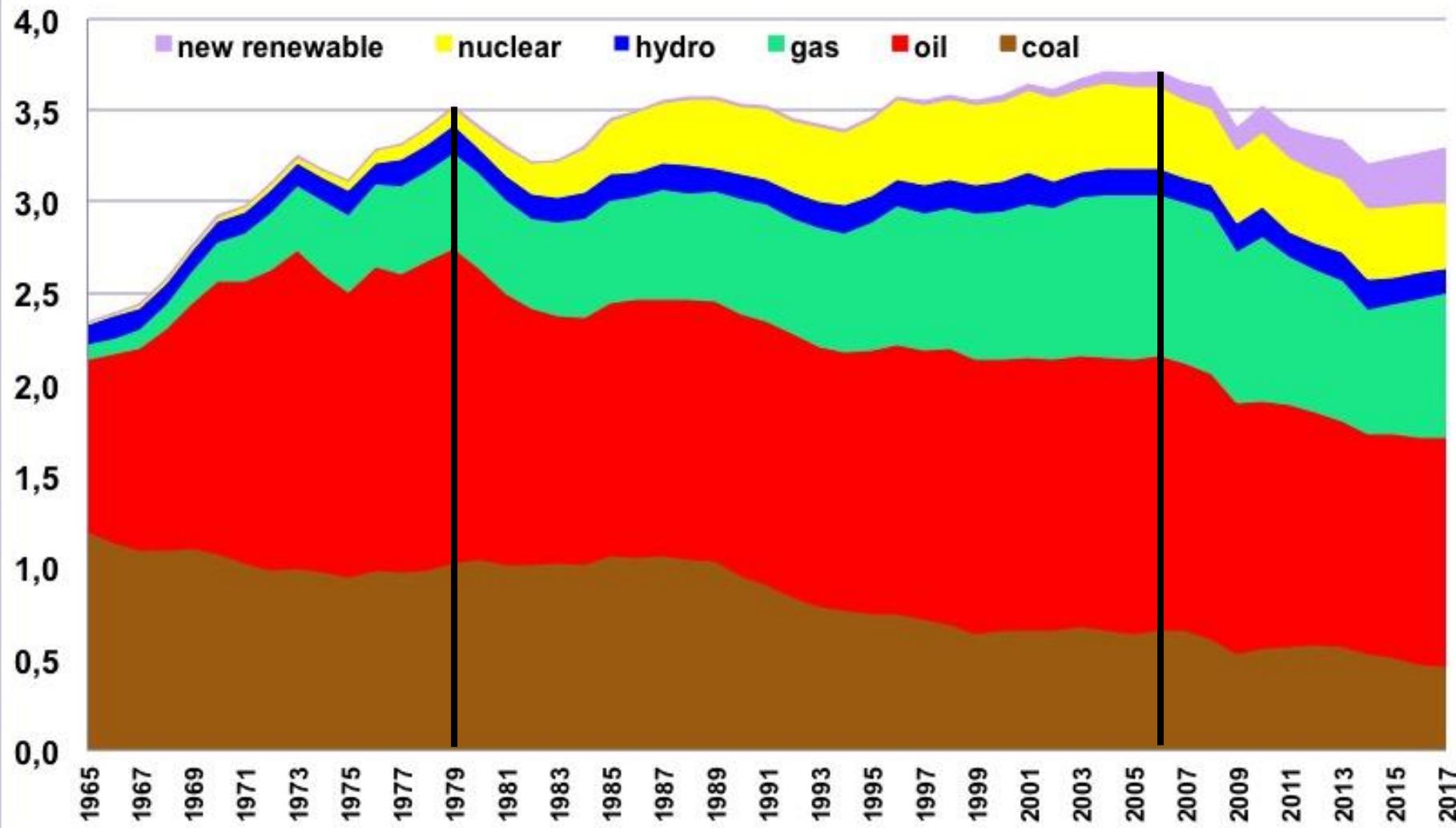
Total World, GDP per capita, annuel growth and 3 period average, in %



Variation annuelle du PIB par personne en moyenne mondiale. Jancovici, sur données World Bank.

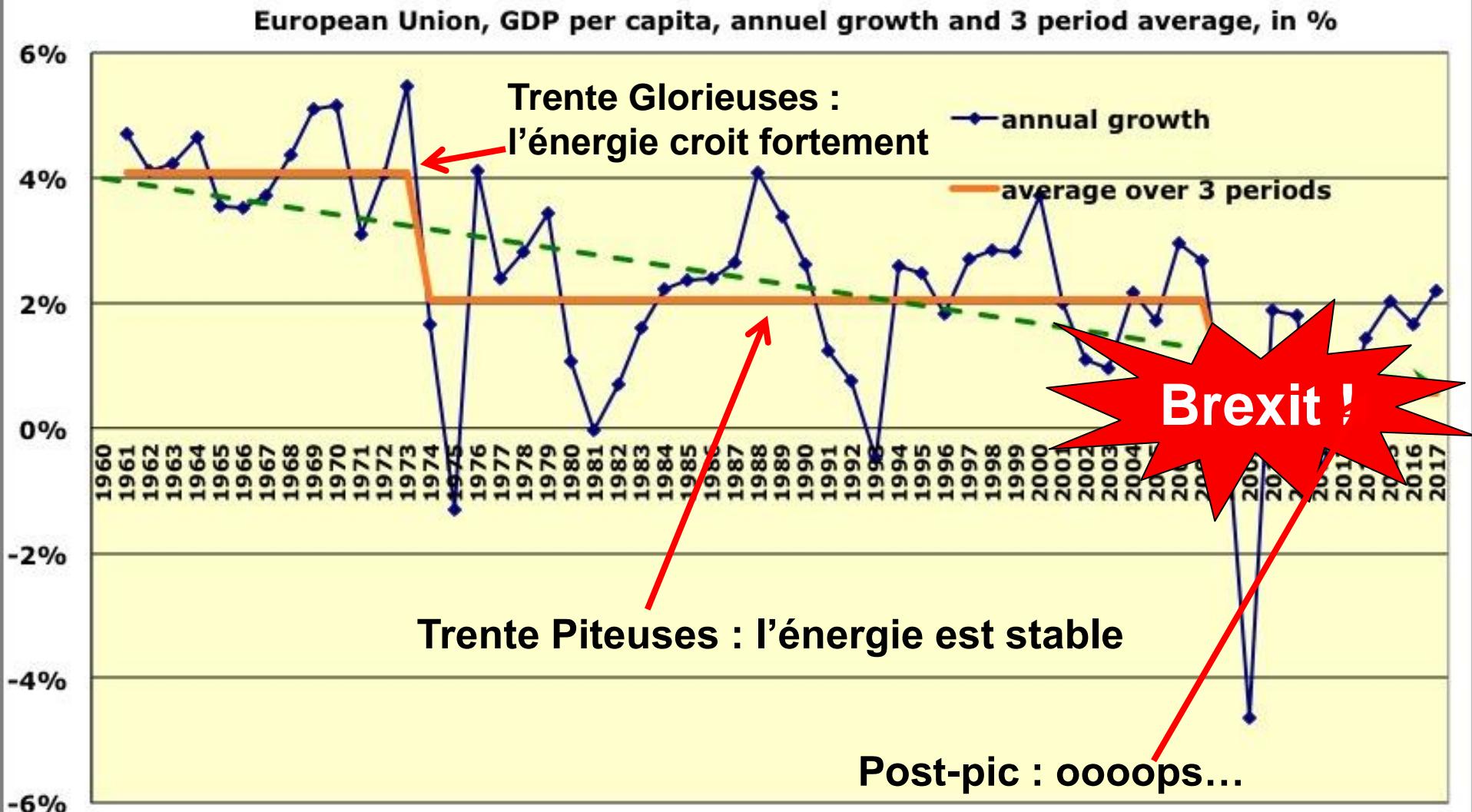
Sécurité d'approvisionnement ? Quelle sécurité ?

European Union, primary energy use per capita, toe



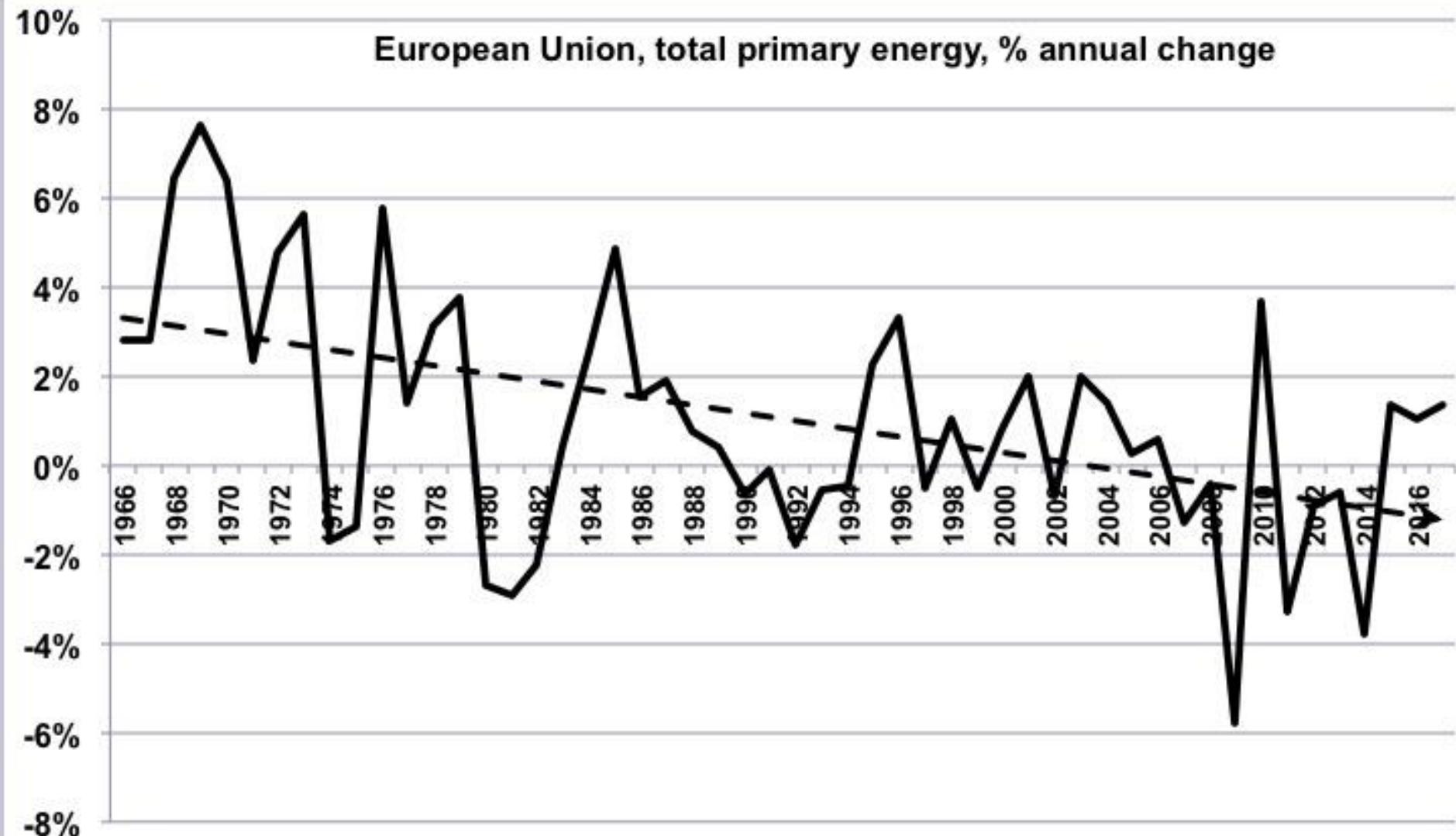
Consommation d'énergie en Europe depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2016

C'est (à nouveau) la valse à trois temps



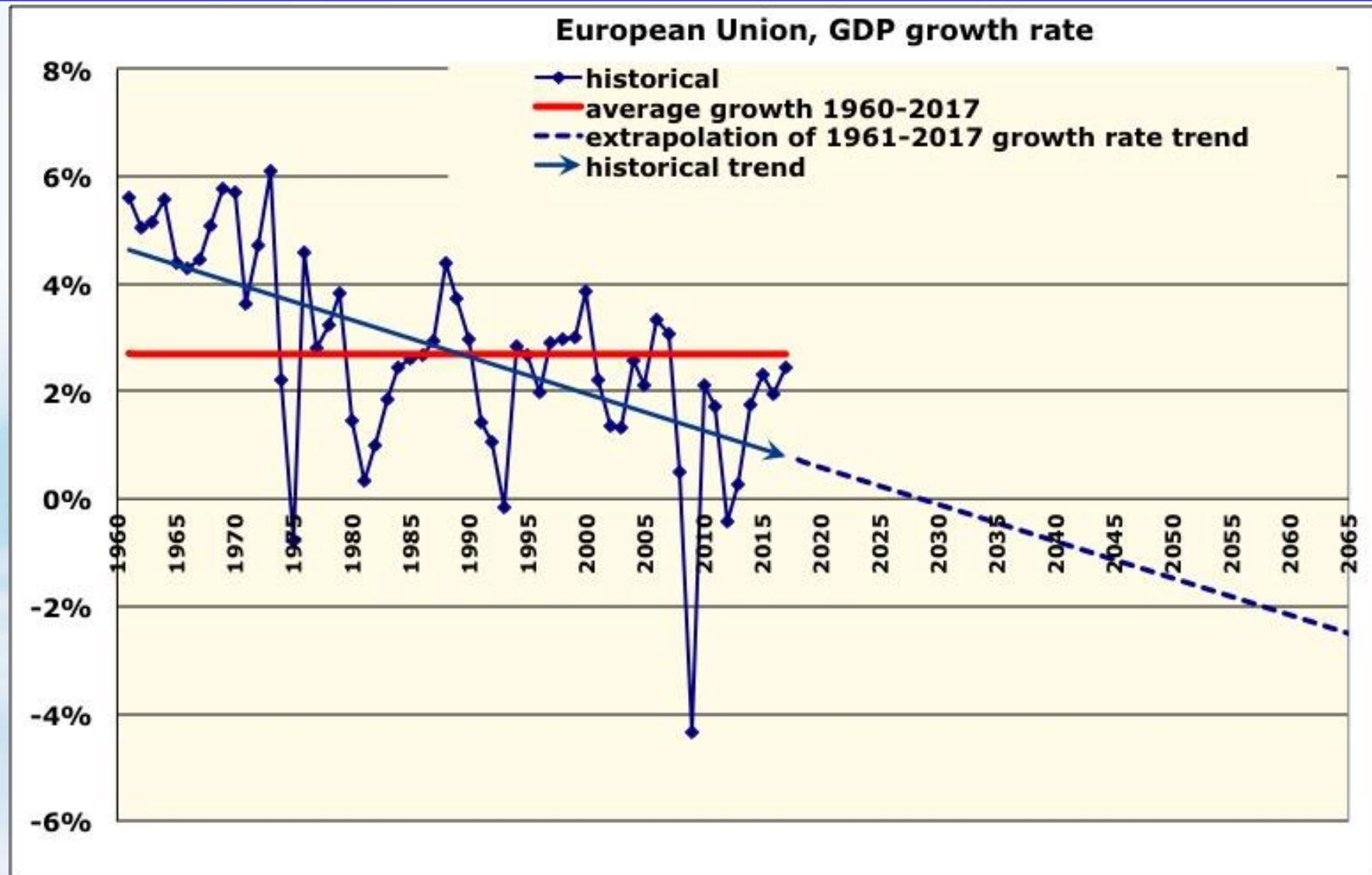
Variation annuelle du PIB par personne en Europe. Jancovici, sur données World Bank.

Une pédale de frein pour les kWh....



Variation de la consommation d'énergie en Europe depuis 1966. Données BP Statistical Review 2011!, traitement par l'auteur.

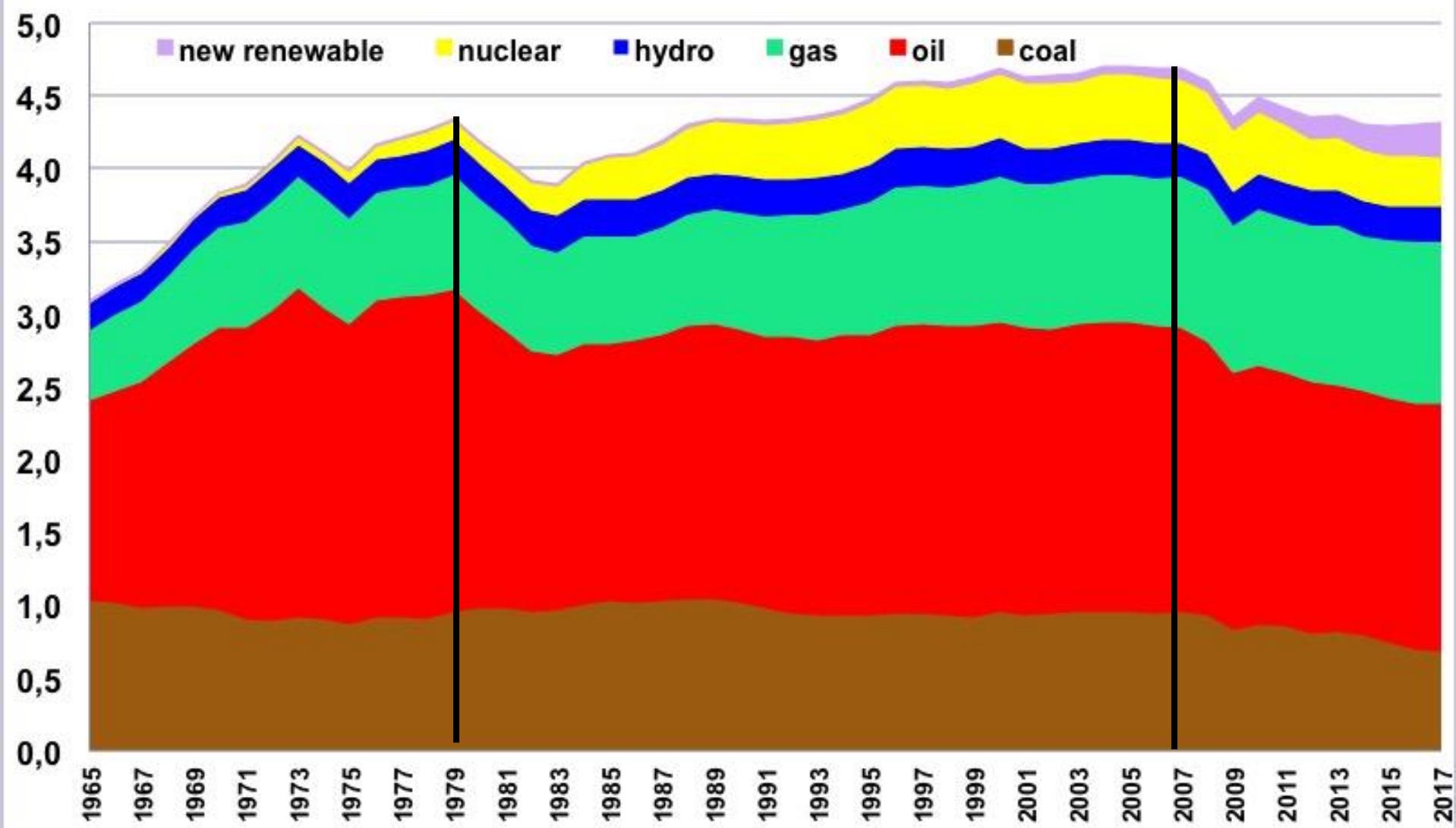
... et donc aussi pour le PIB



Taux de croissance du PIB européen sur la période 1960-2017 (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

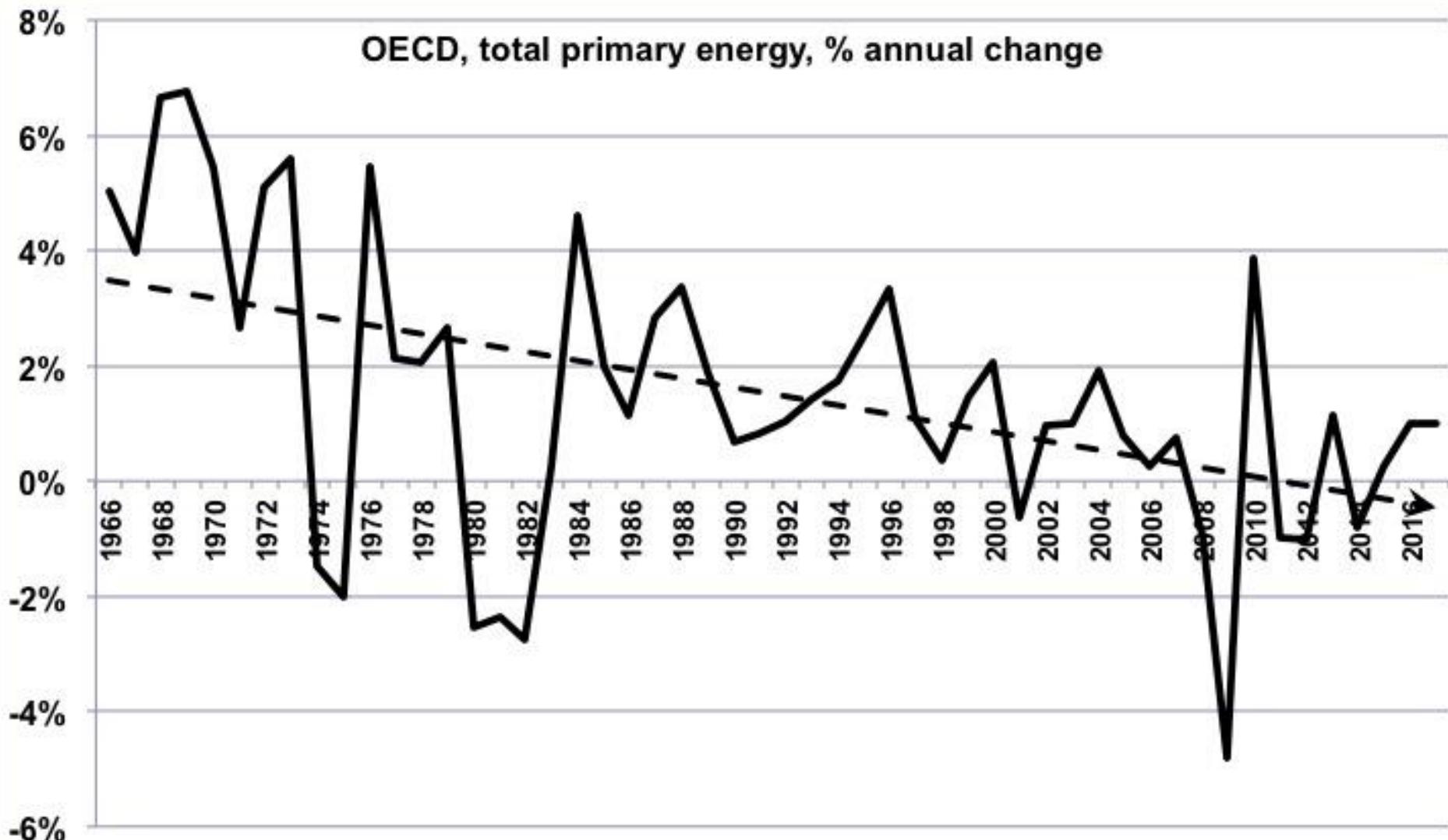
Nous ne sommes pas seuls !

OECD, primary energy use per capita, toe



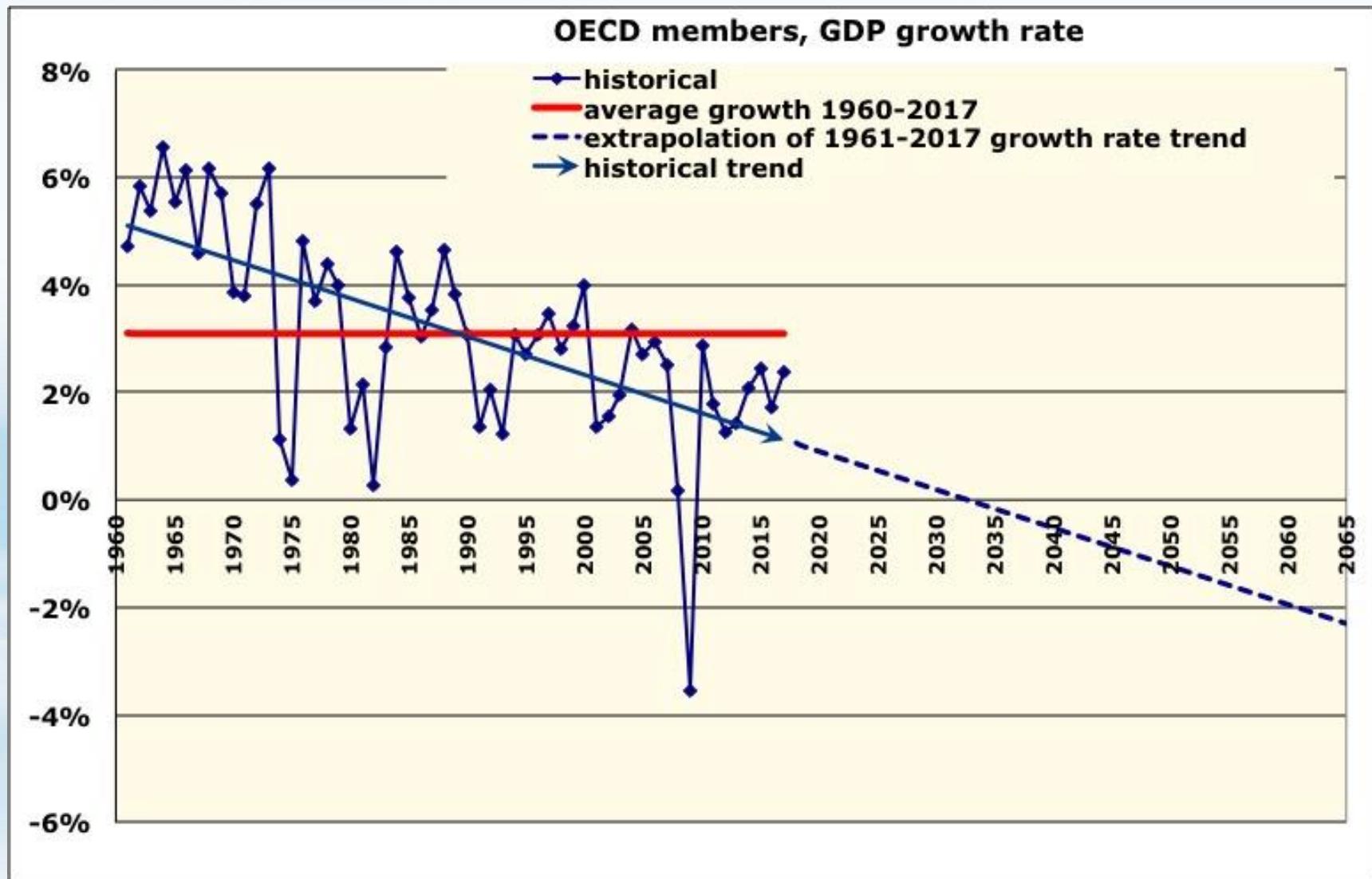
Consommation d'énergie de l'OCDE depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2018

Tous les pays « riches » ralentissent



Variation de la consommation d'énergie dans la zone OCDE depuis 1966. Données BP Statistical Review 2018, traitement par l'auteur.

...et une partie de votre carrière se fera « dans l'autre sens »

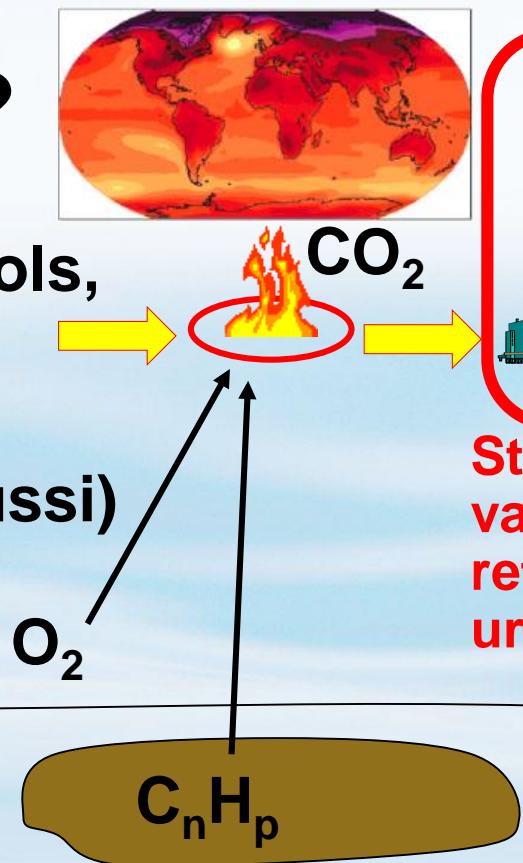


Taux de croissance du PIB de la zone OCDE sur la période 1960-2017 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

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

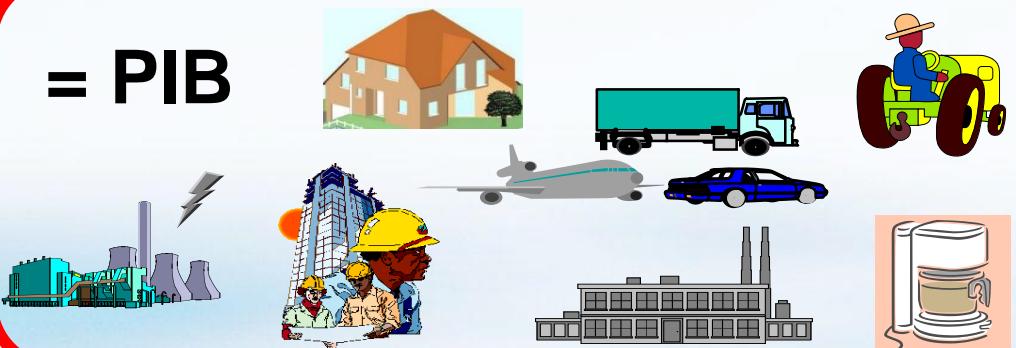
Boum ?

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



Gratuit !!

= PIB



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

Crac ?

