

# Éléments de base sur l'énergie au 21<sup>è</sup> 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:

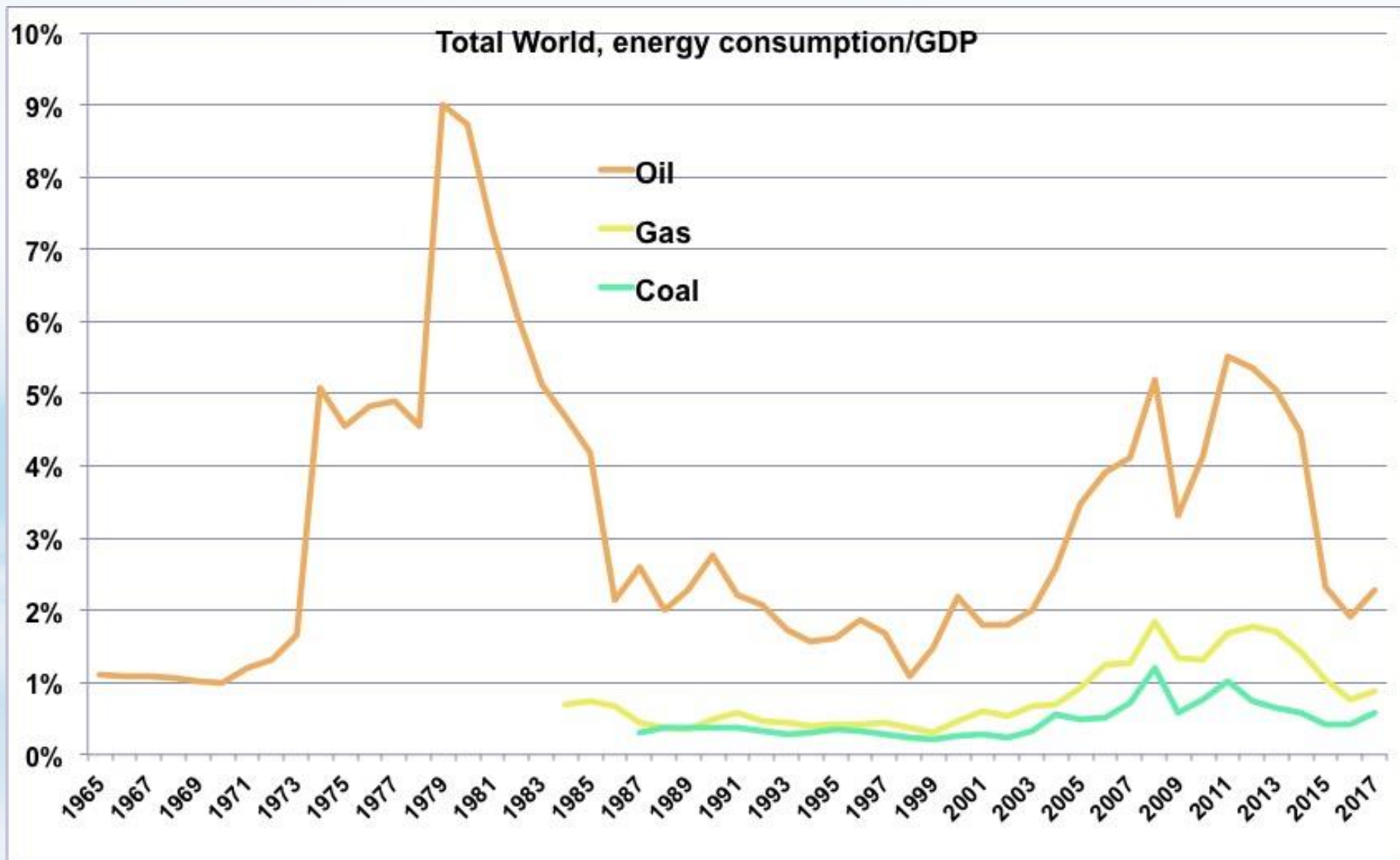
♦D:



# 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.

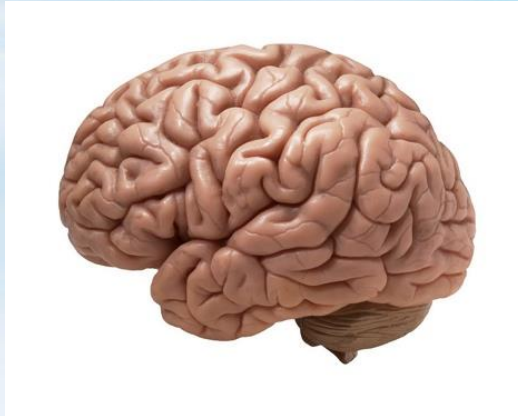
# On ne va quand même pas passer la nuit sur 5% de nos couts



**= 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**



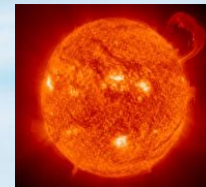
**Modification de la composition chimique**



**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**



**Dès qu'elle est rose  
(ou bleue)**



**Tout le temps**



**Tout le temps**



**Tout le temps**



**Tout le temps**



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



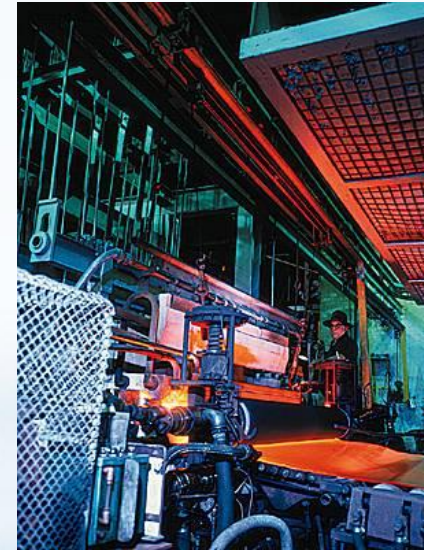
**Sorbitol**



**Plastique**



**Mise en forme**



**La glace à sa naissance...**



**Tout transport d'un maillon au suivant**



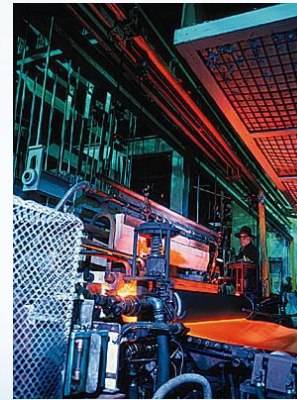
**Filtration de l'eau potable**



**Construction des usines, magasins, entrepôts...**



# Passer un coup de fil ? De l'énergie !



**Supports  
d'antenne**

**Câbles, composants**



**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  $\approx 10$  kWh). Un Français utilise 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  $\approx 11.600$  kWh.**

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

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



# Nietzsche voulait des surhommes : le carbone l'a fait



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

→  
x 10

→  
÷ 500

→  
÷ 10-

100 →  
x 100

→  
÷

5000



1 jour sur 2 : 100 kWh/an

**Au SMIC : 200 €/kWh**

**Même un esclave : 4-40 €/kWh**

6 m<sup>3</sup> terre x 1 m

0,05 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**

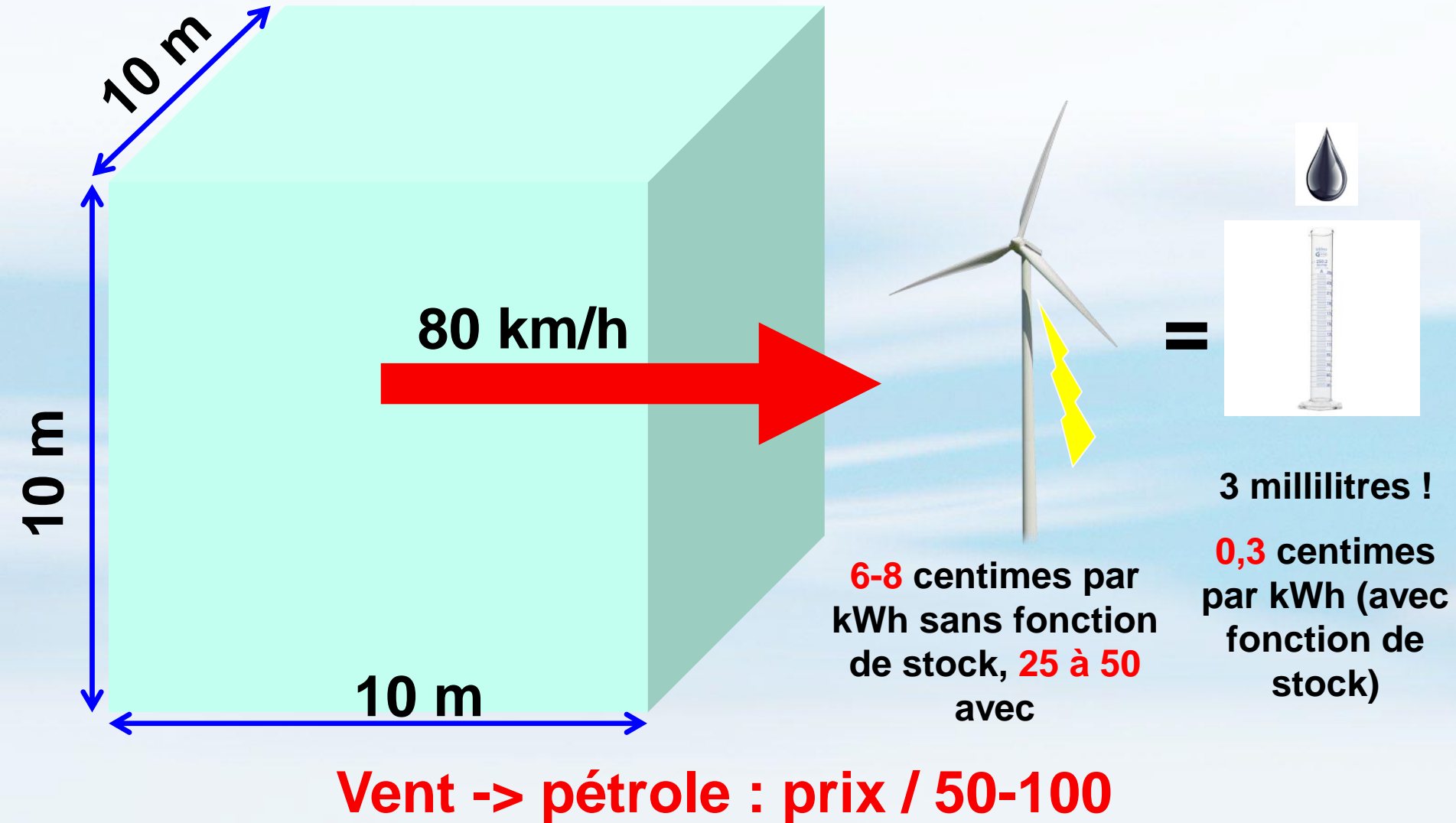
**L'énergie étant par définition la marque de la transformation, il n'existe aucune énergie propre ou sale dans l'absolu : choisir une énergie, c'est choisir les contreparties, pas les supprimer**

**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 ?

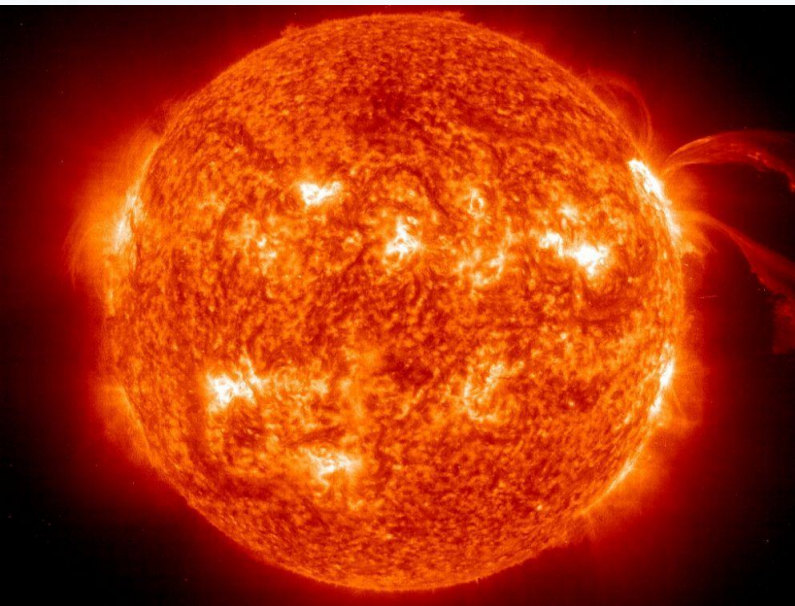


# Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



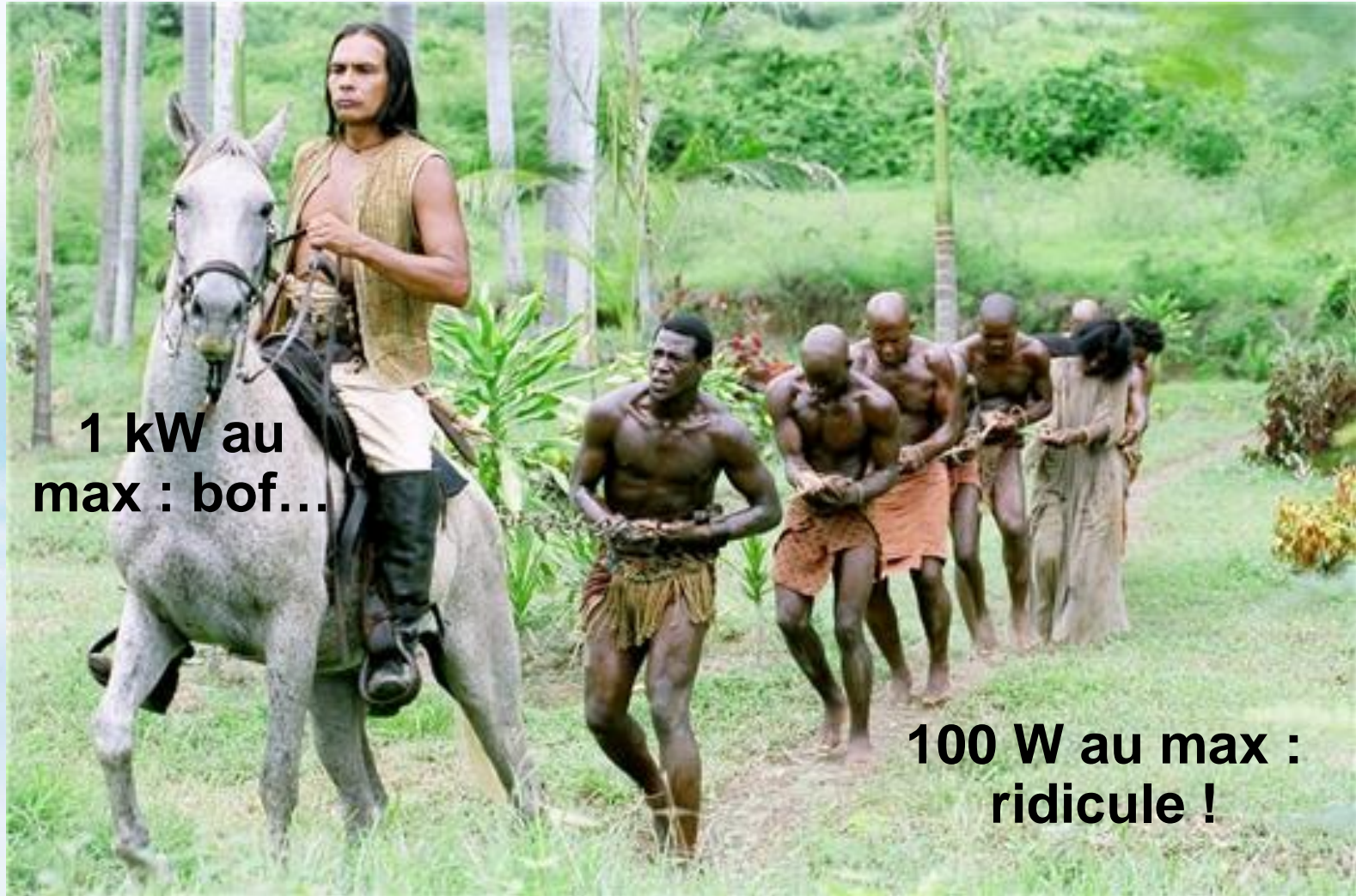


# Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?





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



**1 kW au  
max : bof...**

**100 W au max :  
ridicule !**

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



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



= 60 kW  $\approx$  **600** paires de jambes



= 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...



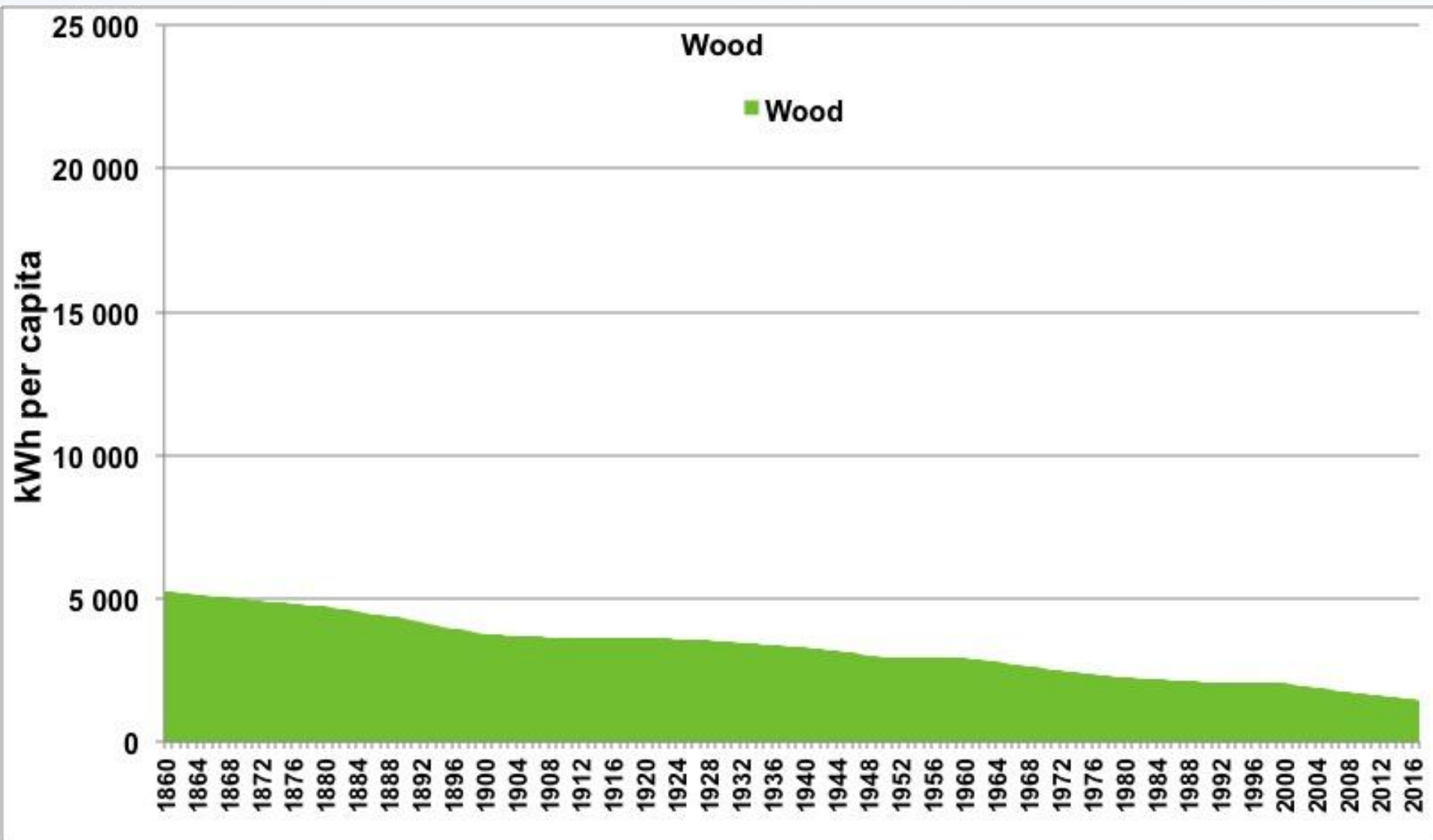
= 100 MW  $\approx$  **10.000.000** paires de bras !



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

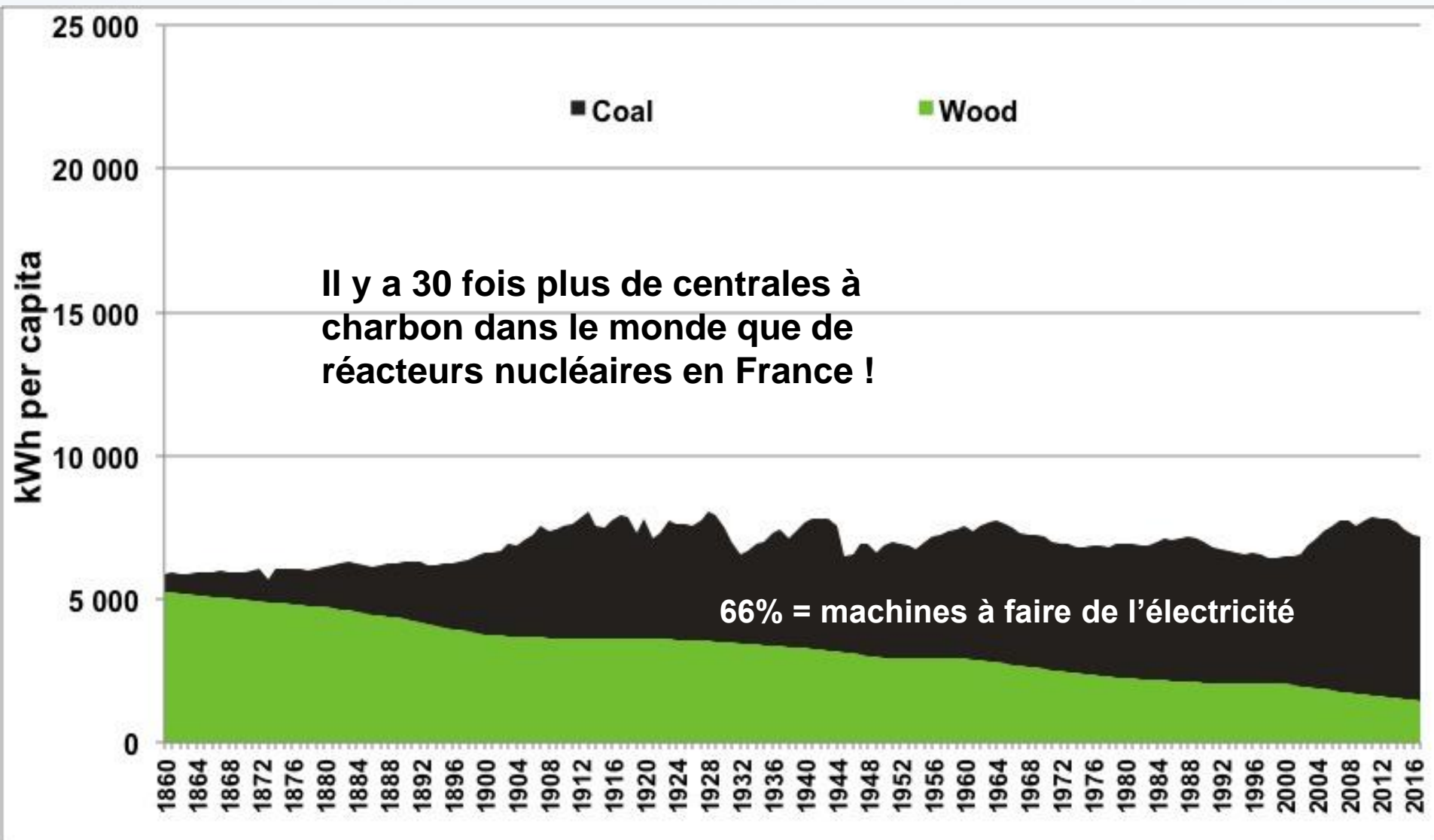


# Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



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

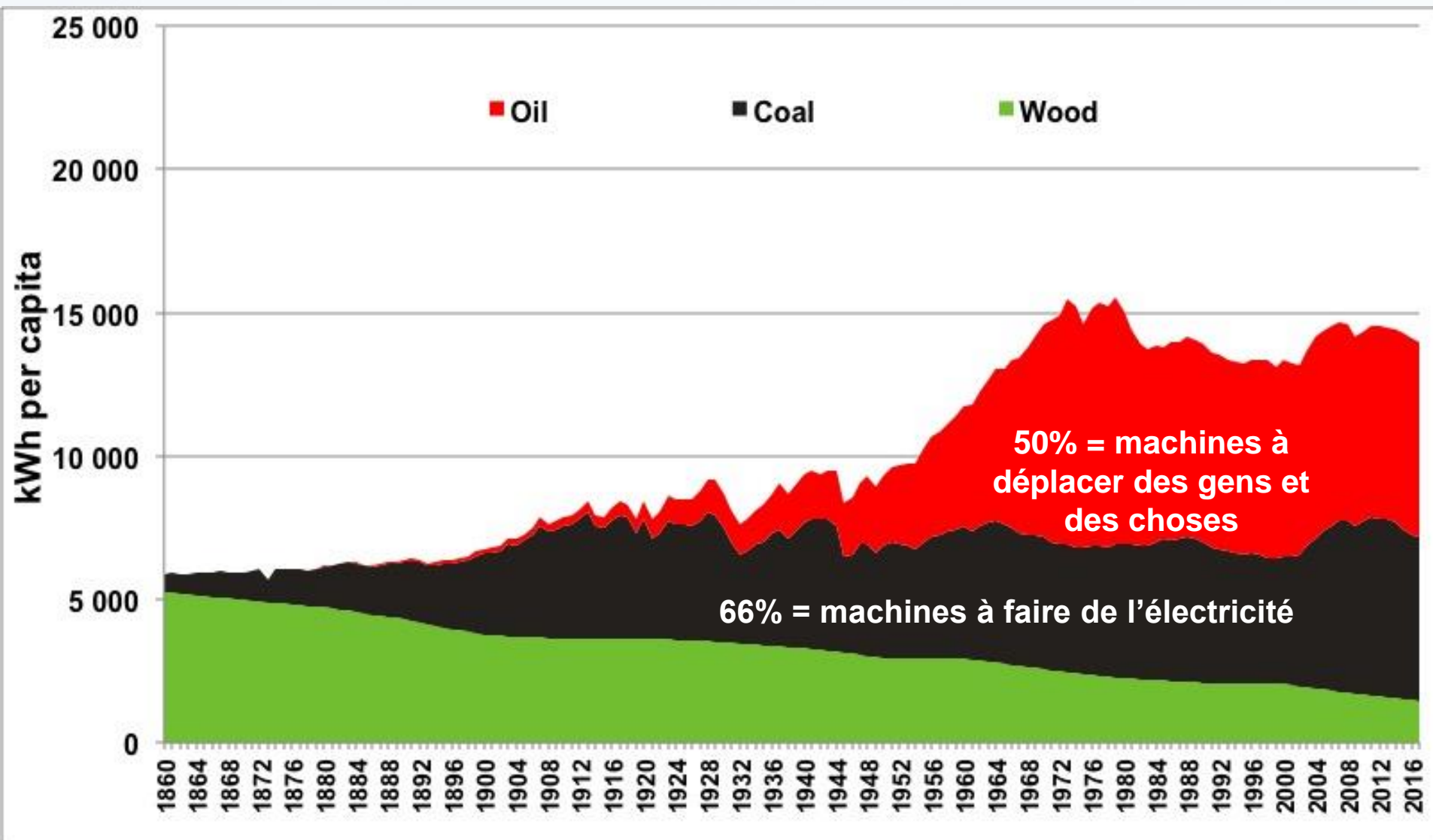
# Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



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

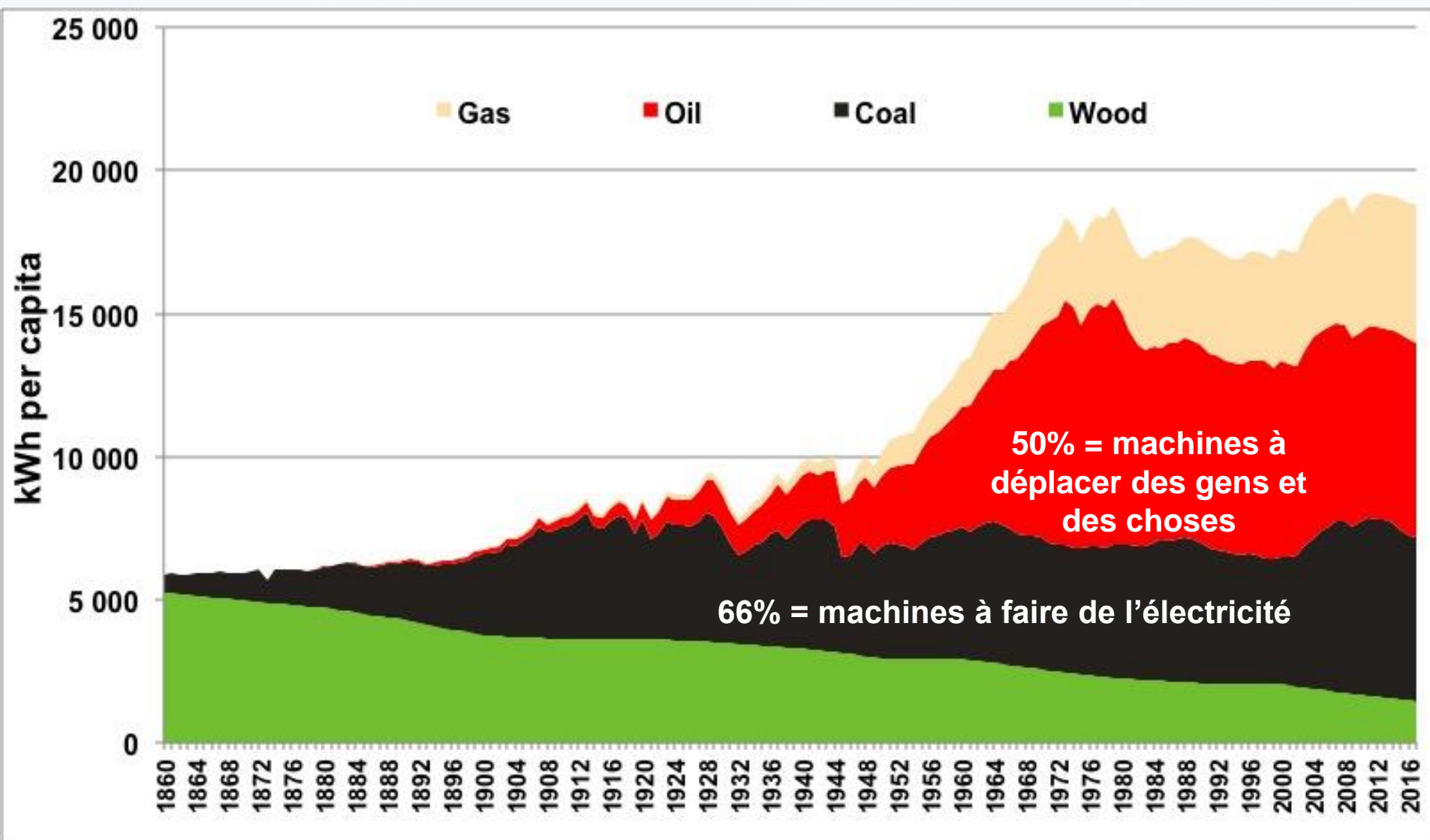


# Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



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

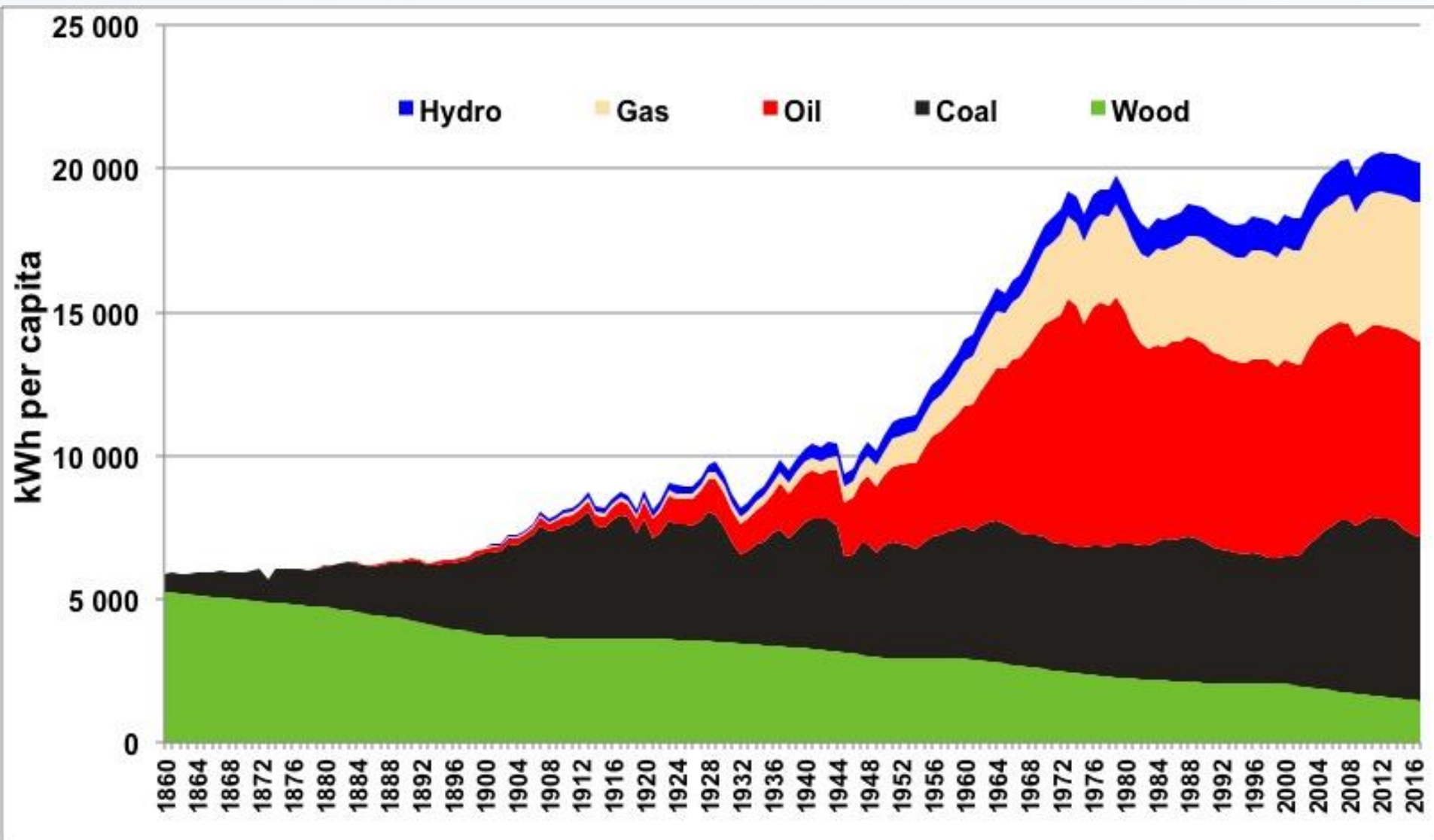
# Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



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

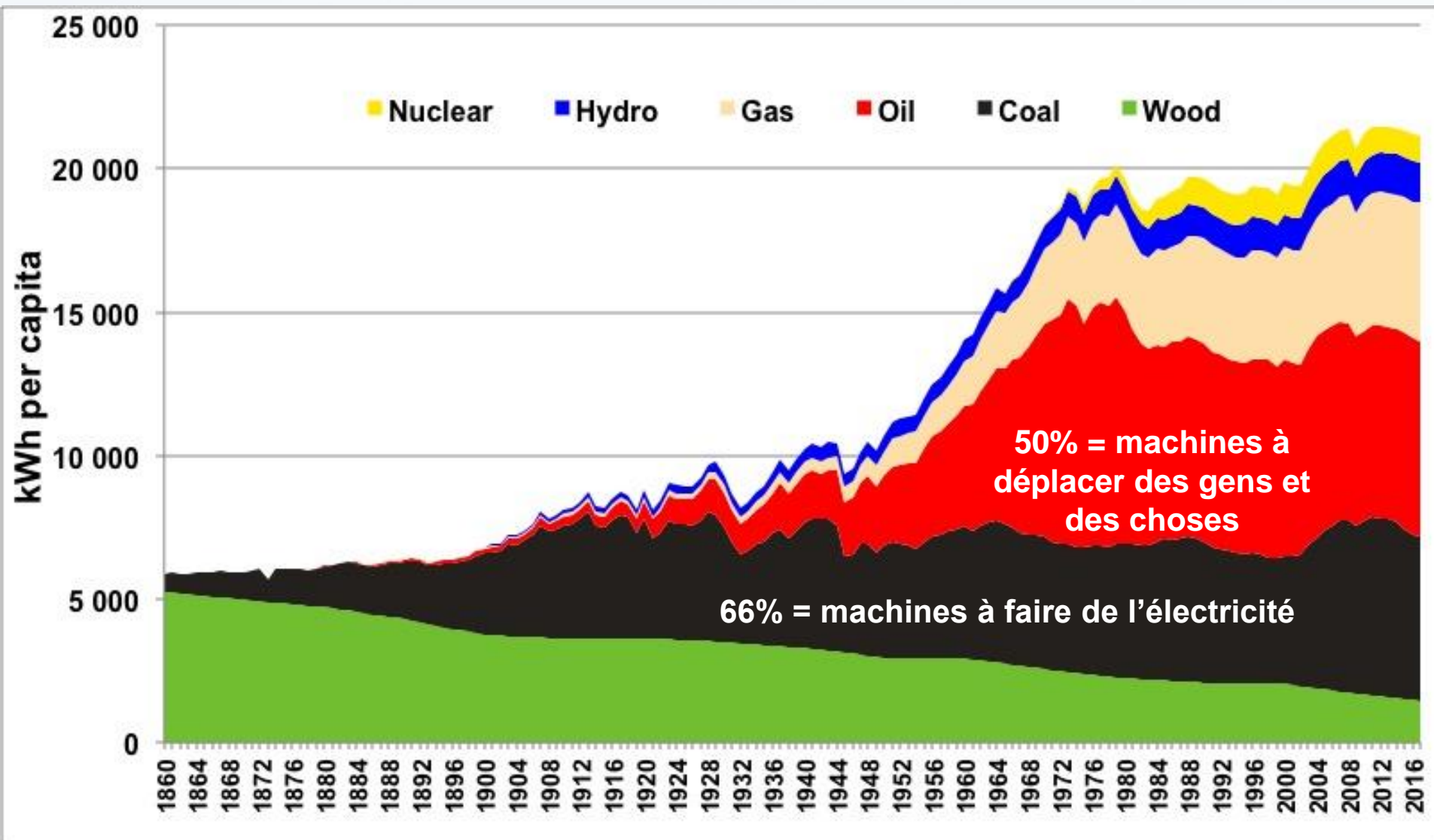


# Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



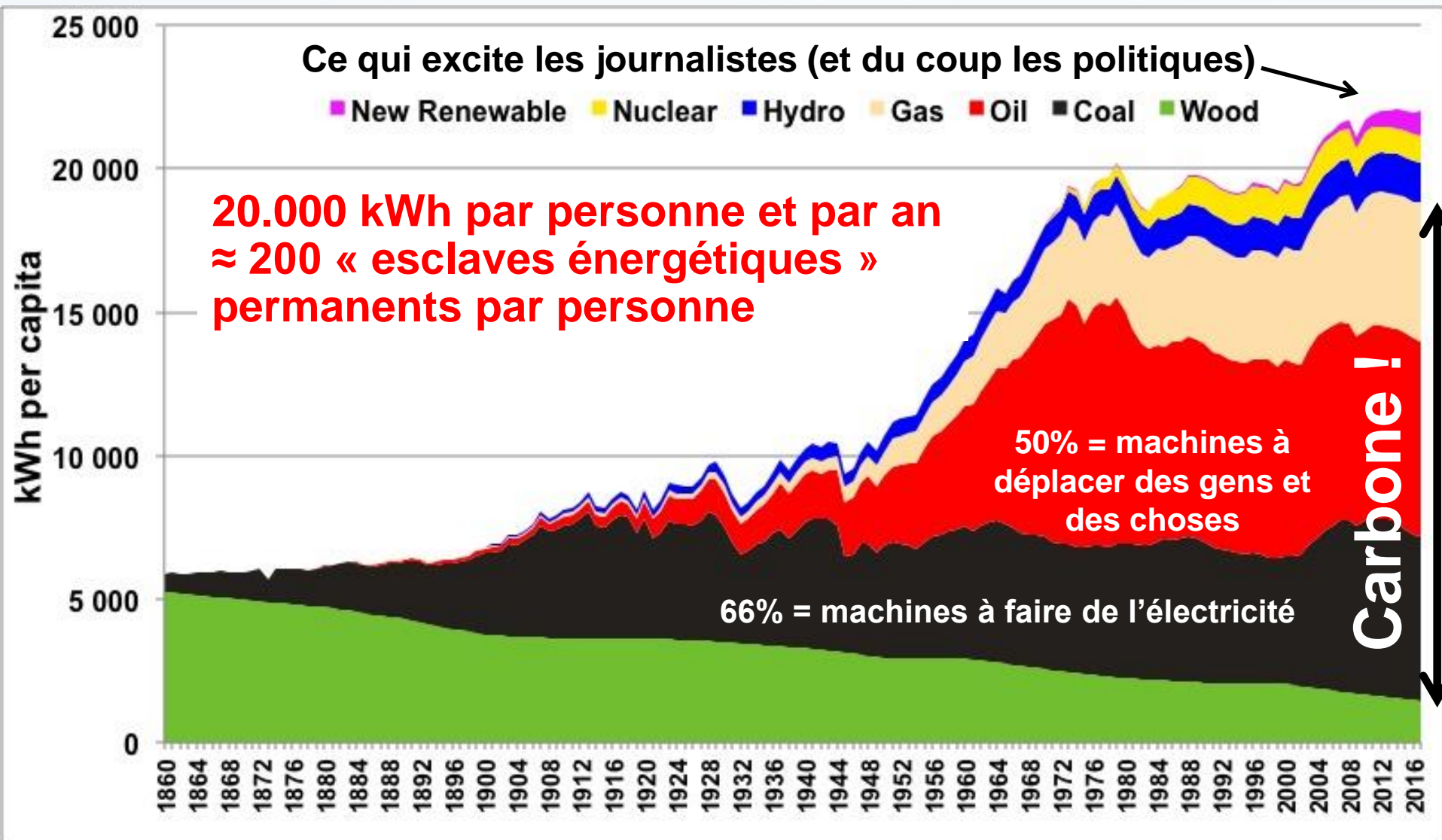
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

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



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





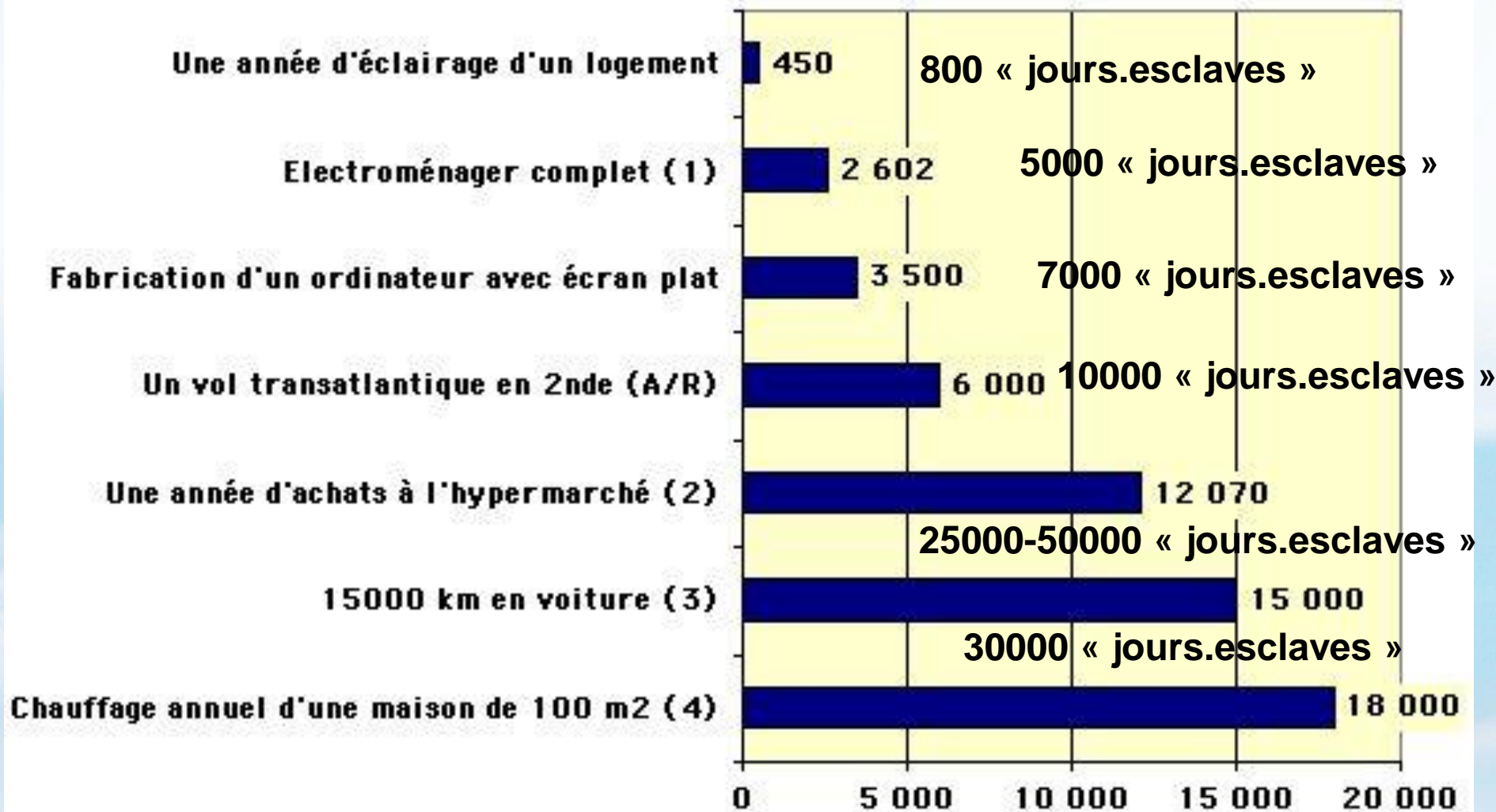
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

# Les voici, nos esclaves des temps modernes !





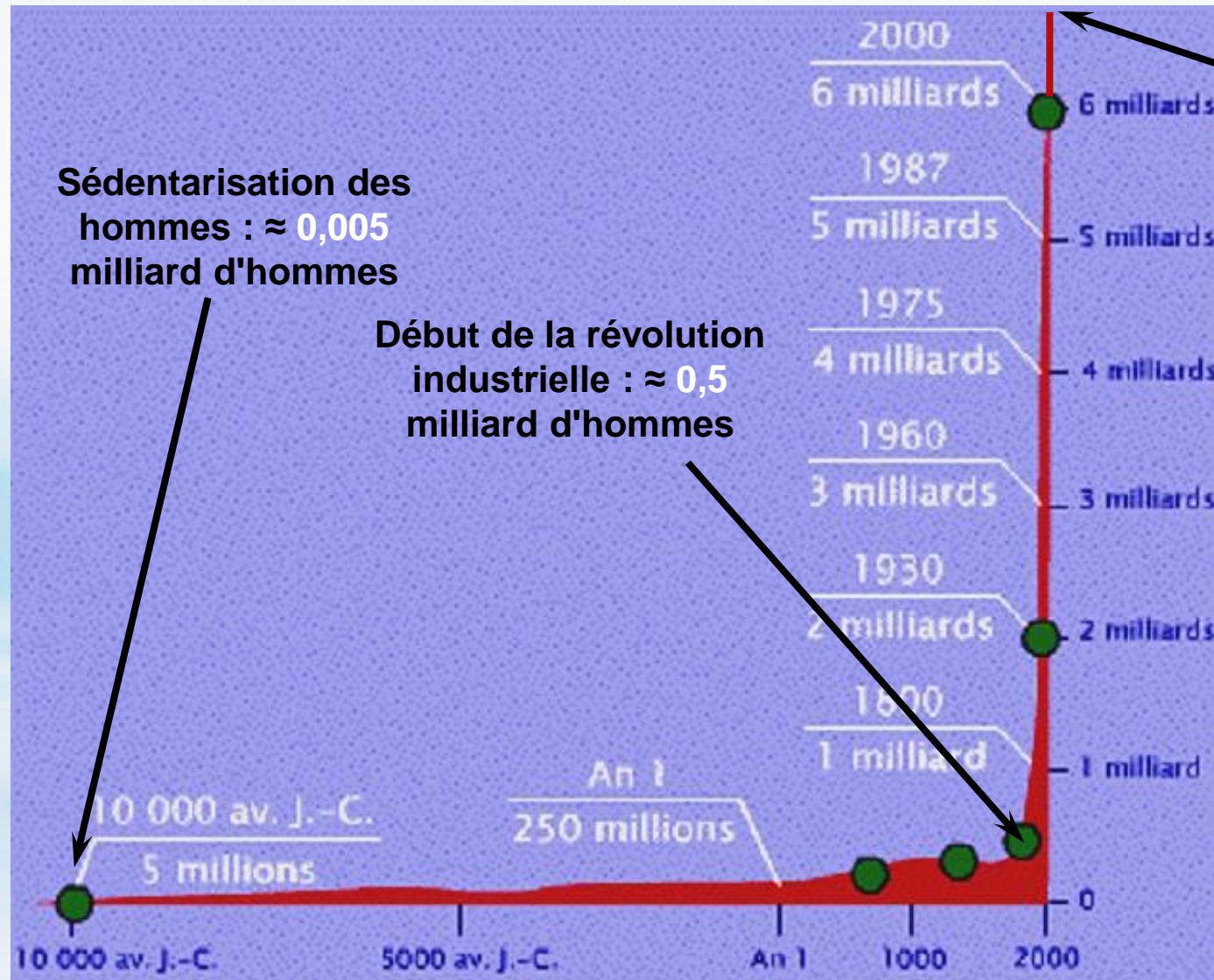
# En kWh, les hommes sont très primaires...



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

Calculs Jancovici, 2006

# Un autre changement d'ordre de grandeur : la population

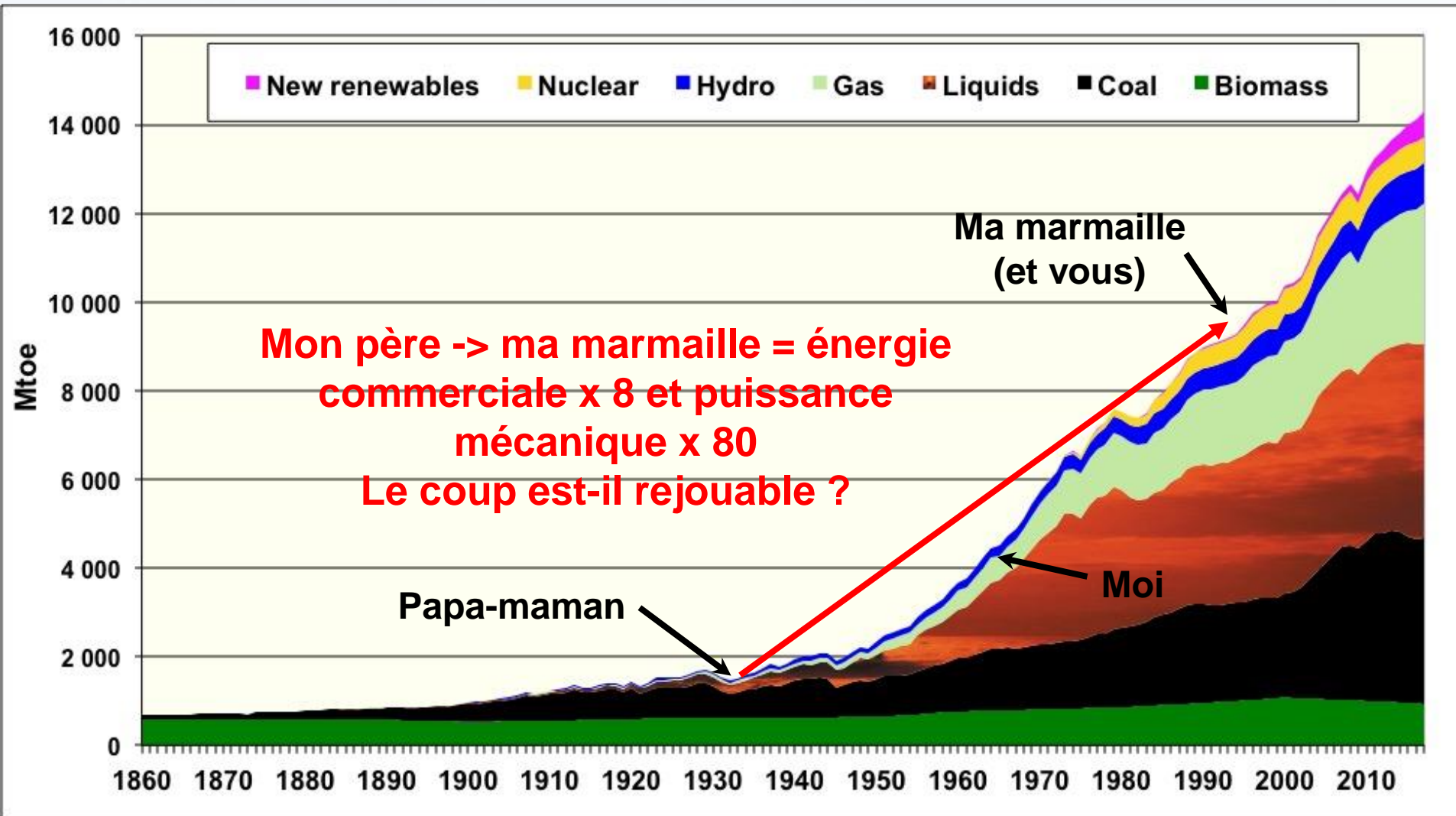


2018 > 7 milliards d'hommes... and rising

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



# Gaz et électricité à tous les étages : au résultat

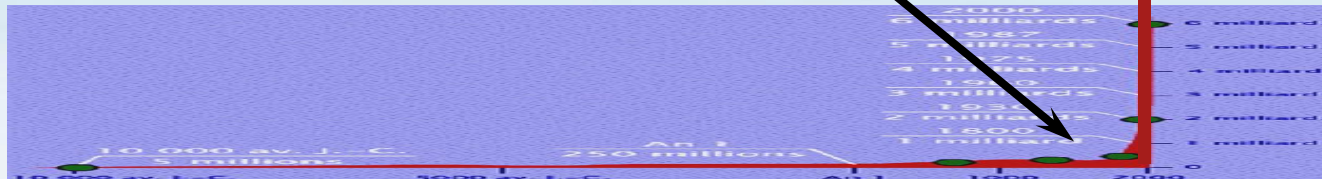


Parc de machines en service  $\div 10$  dans le monde 1860-2016. Jancovici, 2017

# Population x 1000 + énergie x 10 = croissance attitude

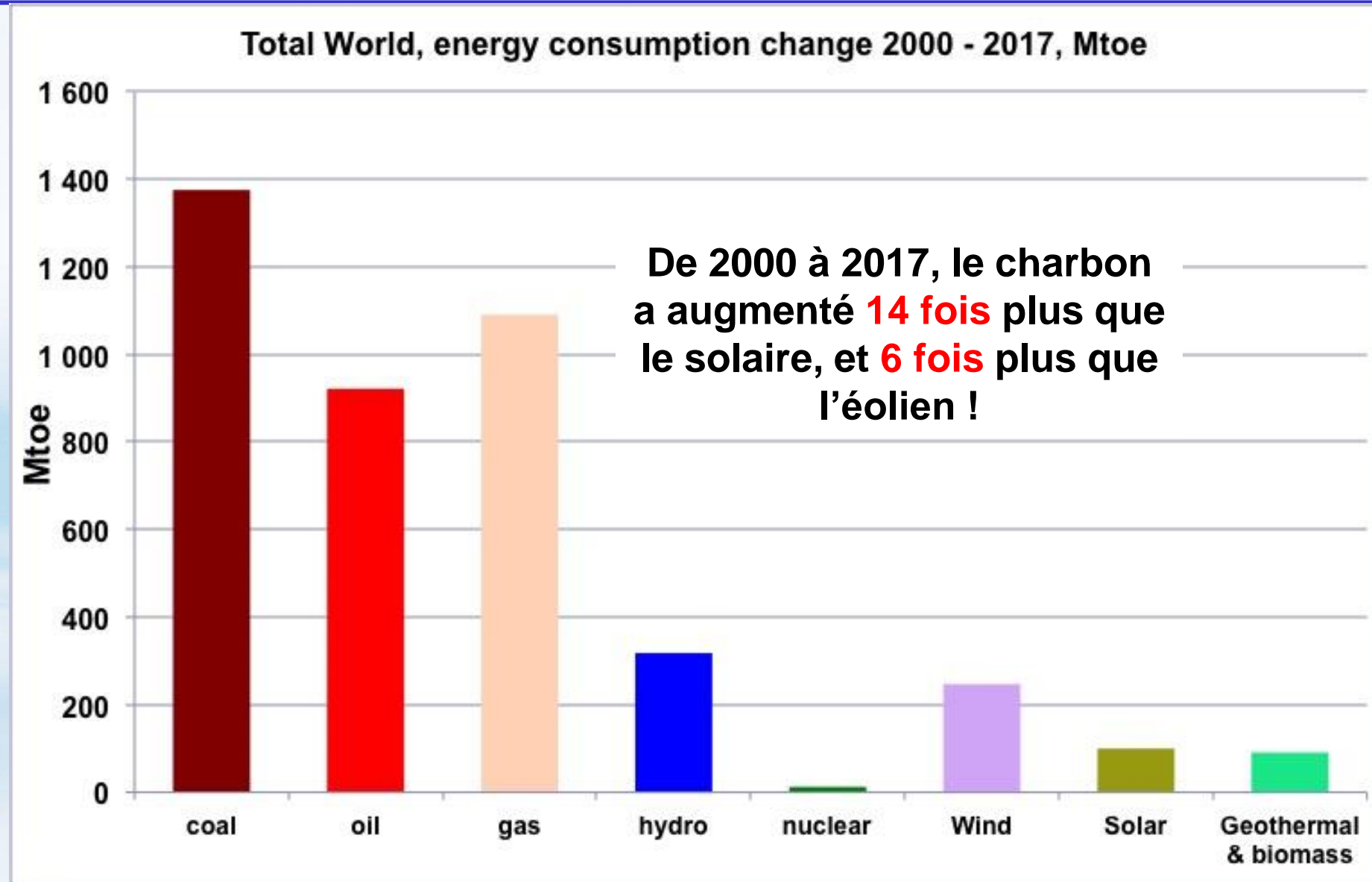
La « taille de la boîte »  
(l'environnement) **est en**  
**train de devenir un**  
**problème majeur**

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



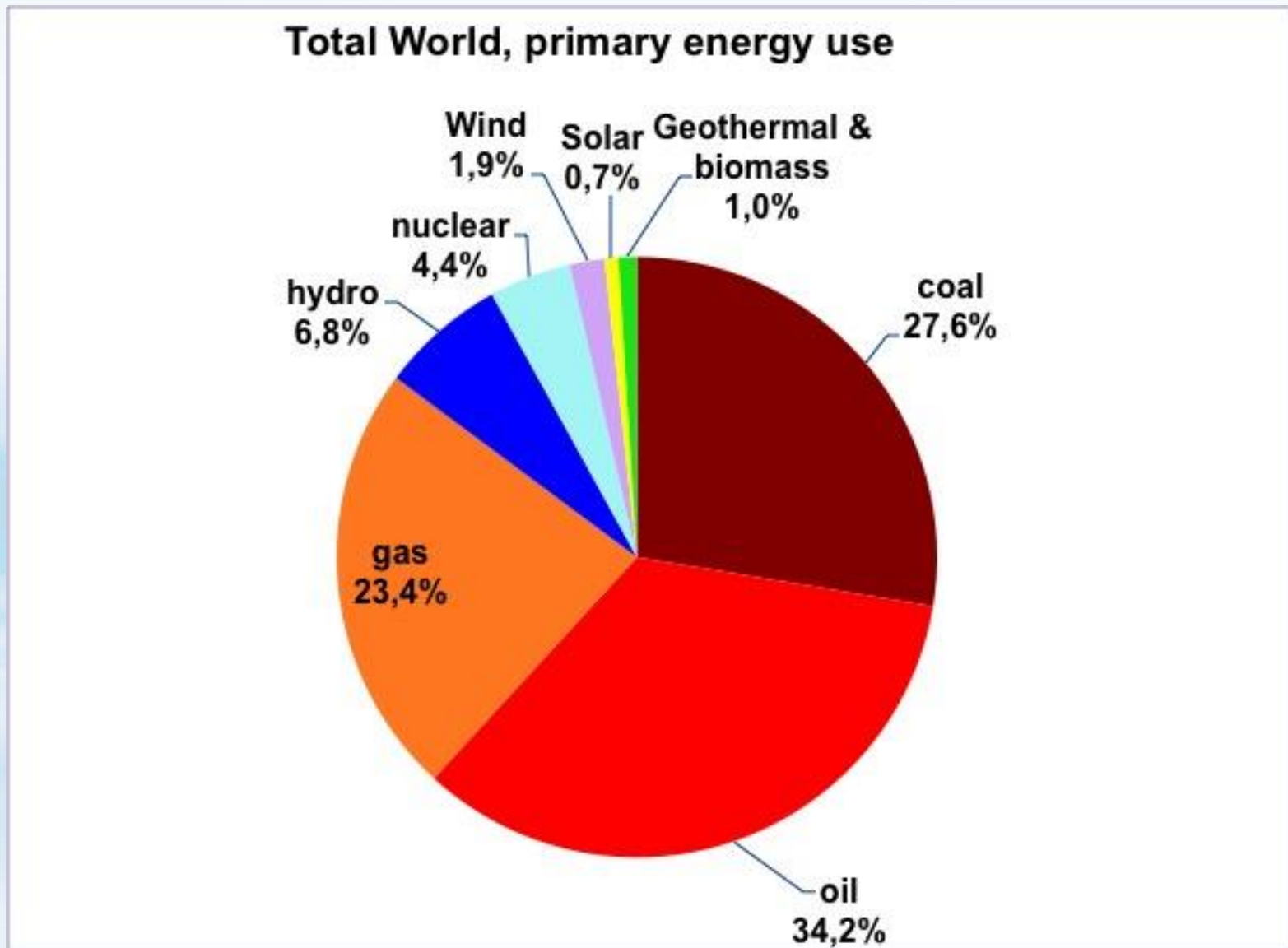
Si l'énergie, c'est - par définition - la modification d'un système, voici l'évolution de notre marque sur l'environnement





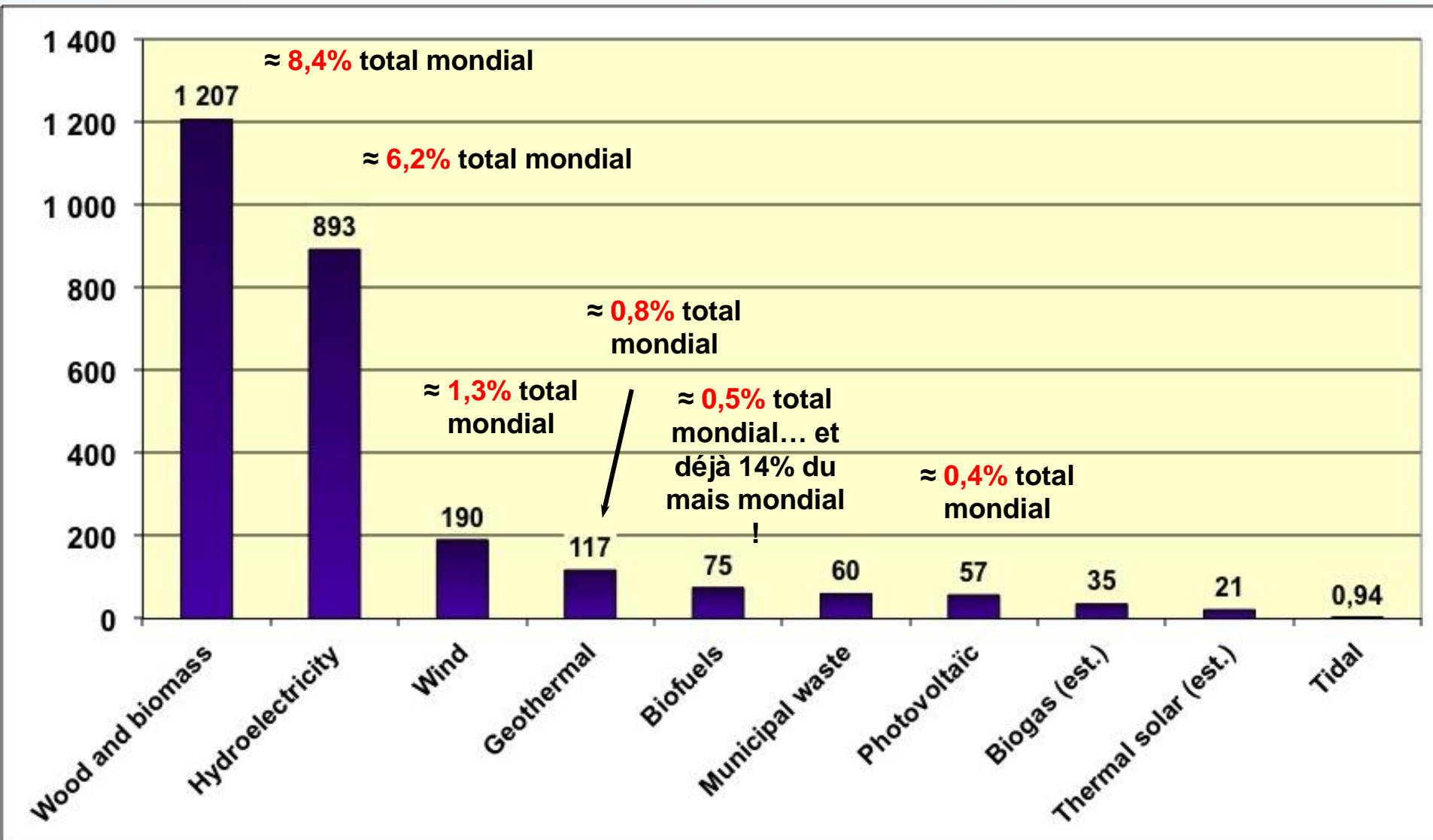
Surplus de consommation mondiale par énergie entre 2000 et 2016. Jancovici, sur données BP Statistical Review 2017 & divers

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



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

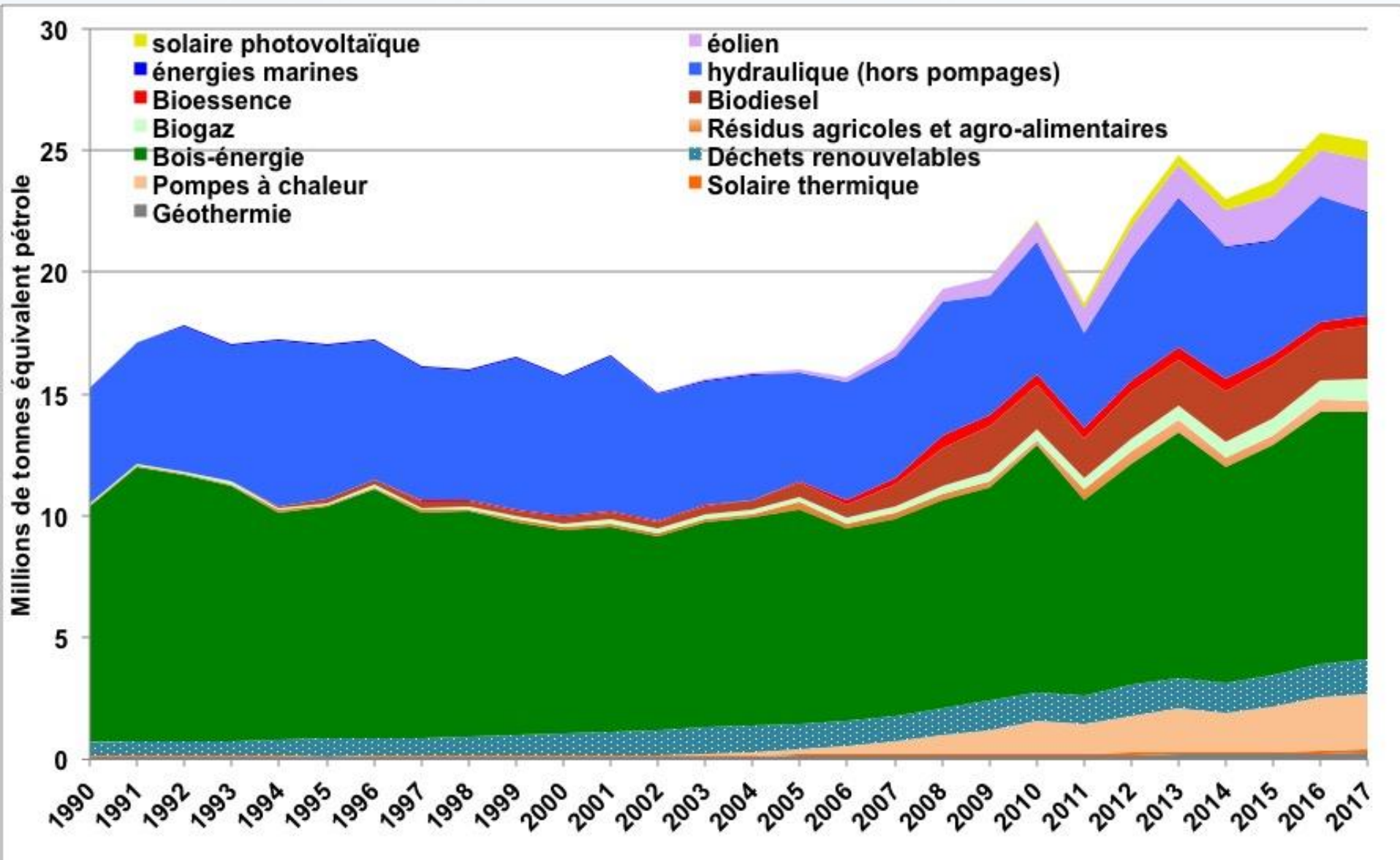
# Quid des énergies renouvelables ?



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

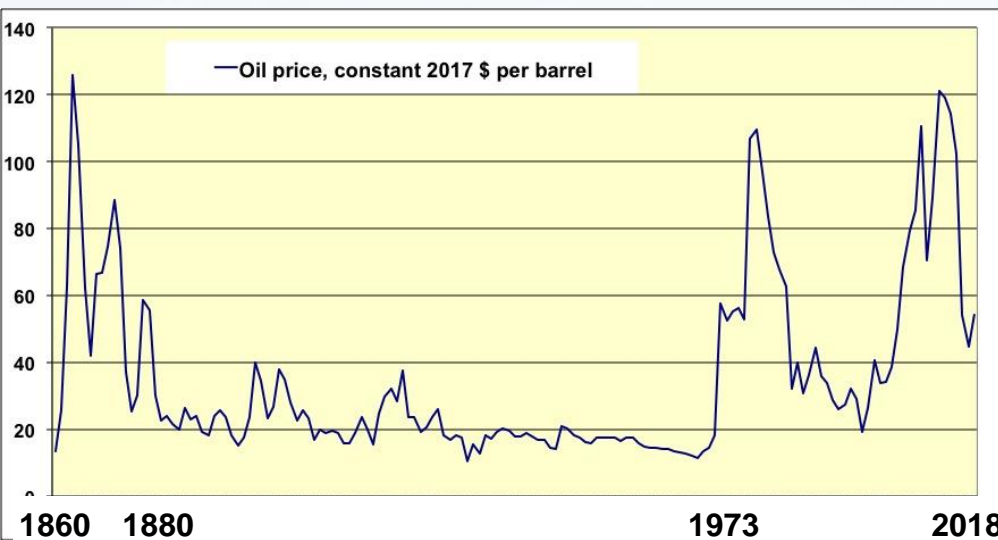


# Quid des énergies renouvelables tricolores ?

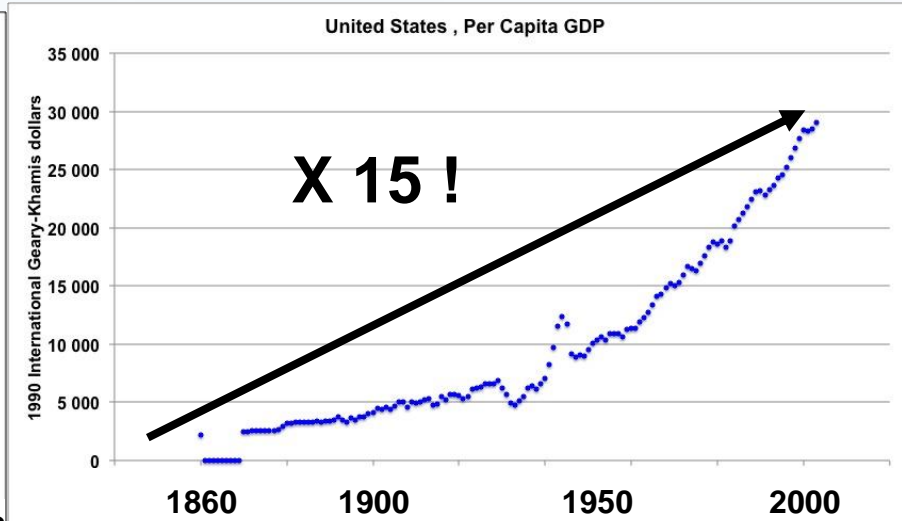


**Energies renouvelables « produites » en France. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Ministère de la transition écologique, 2019**

# L'énergie plus chère ? Allons donc !



Prix du baril de 1861 à 2017 en \$ de 2017.  
Source BP Statistical Review, 2018



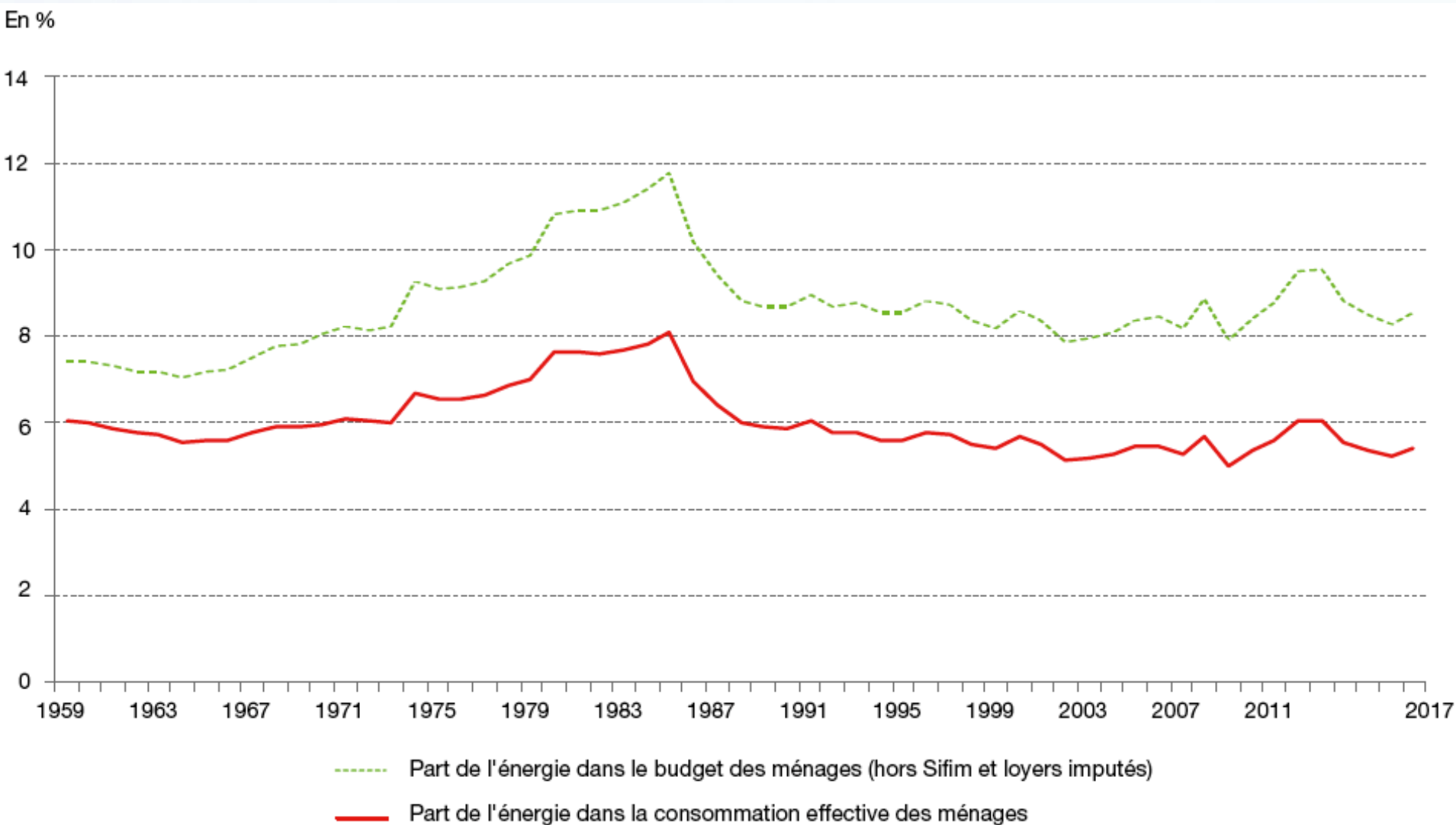
Reconstruction du PIB par habitant aux USA depuis 1860 (le PIB est une notion qui date du début du 20<sup>è</sup> siècle)

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**

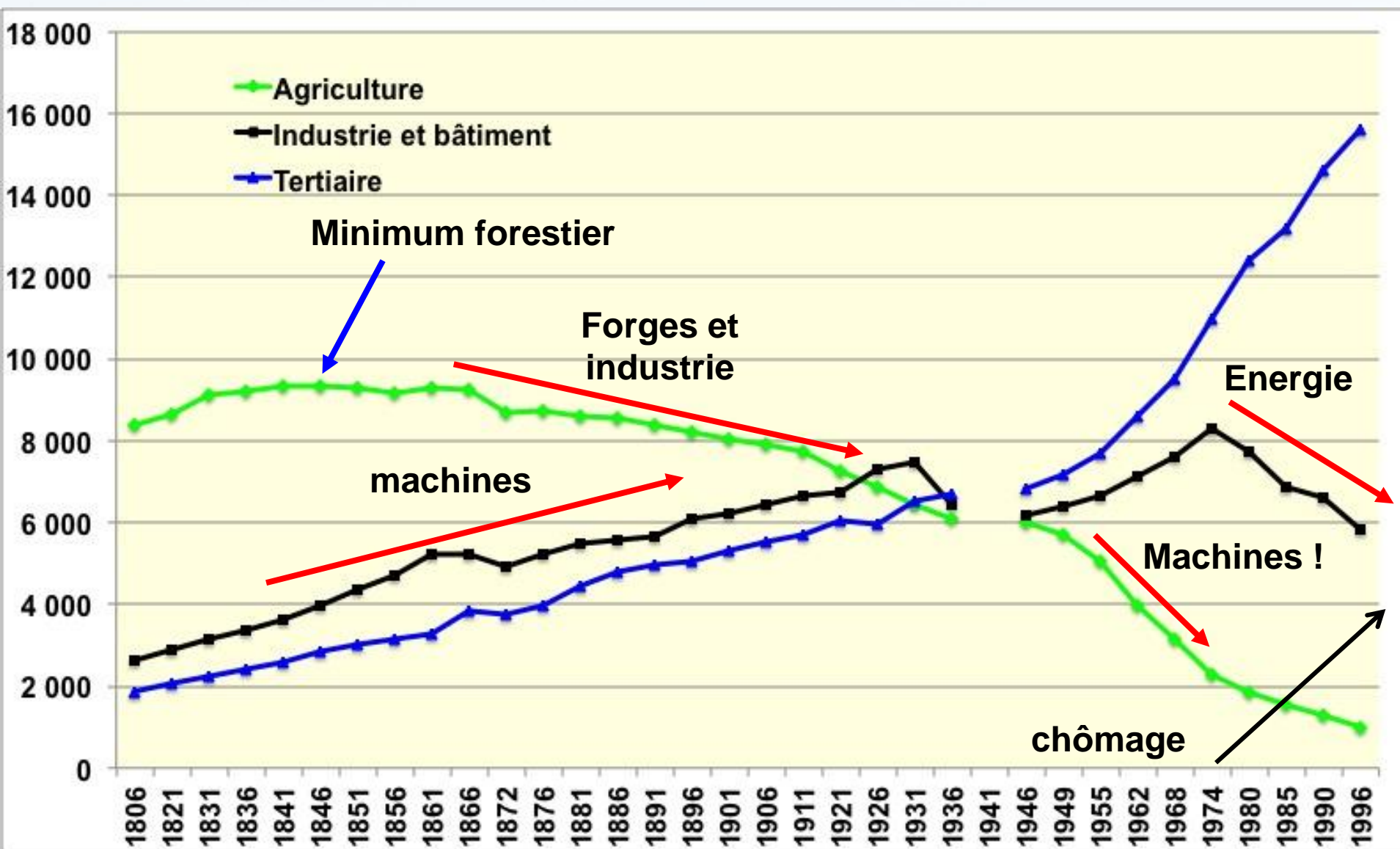


# Plus chère l'énergie ? La bonne blague ! (bis)



Général au Développement Durable, 2017

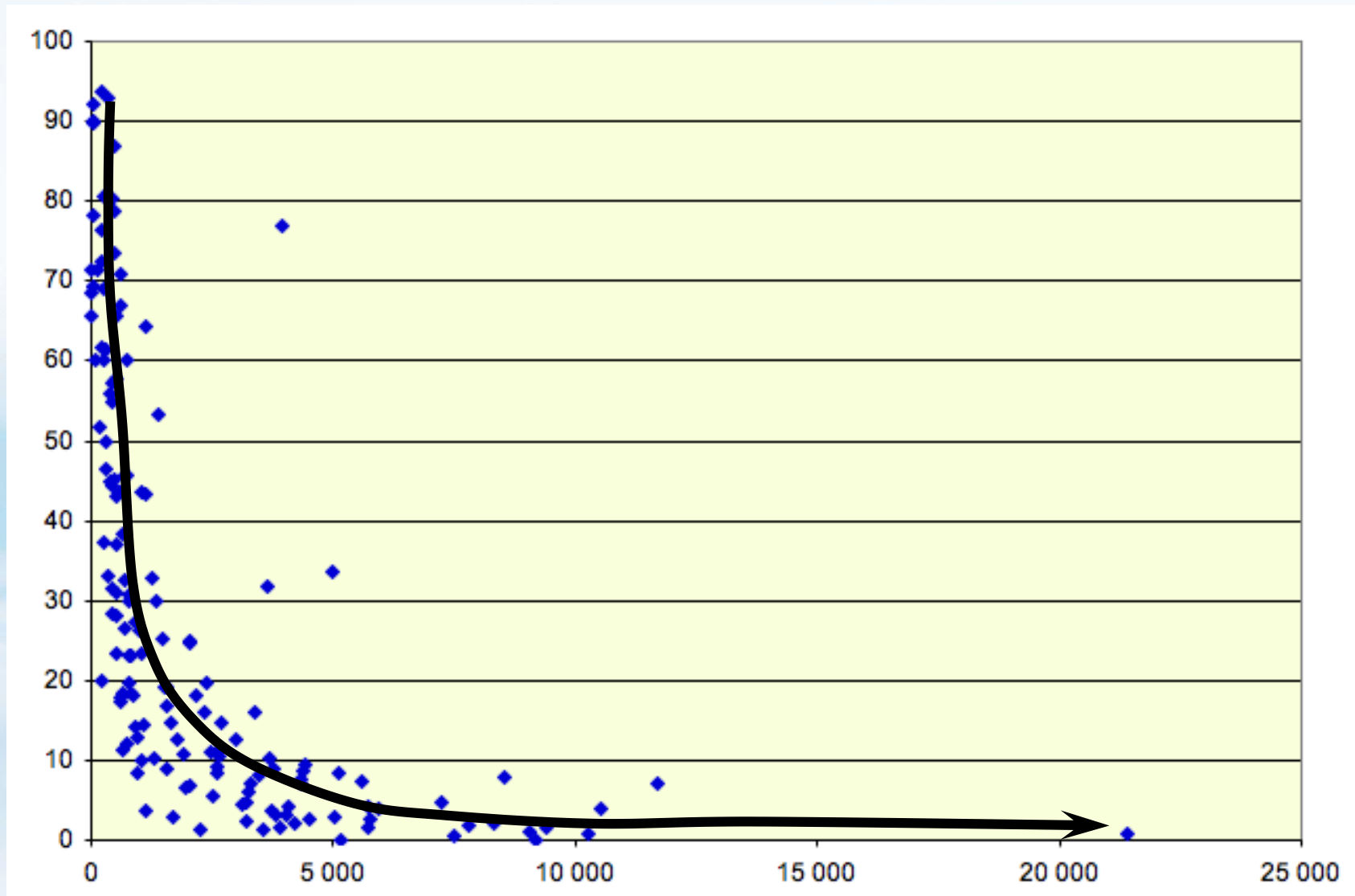
# Plus d'énergie = tout le monde à l'usine, puis au bureau



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

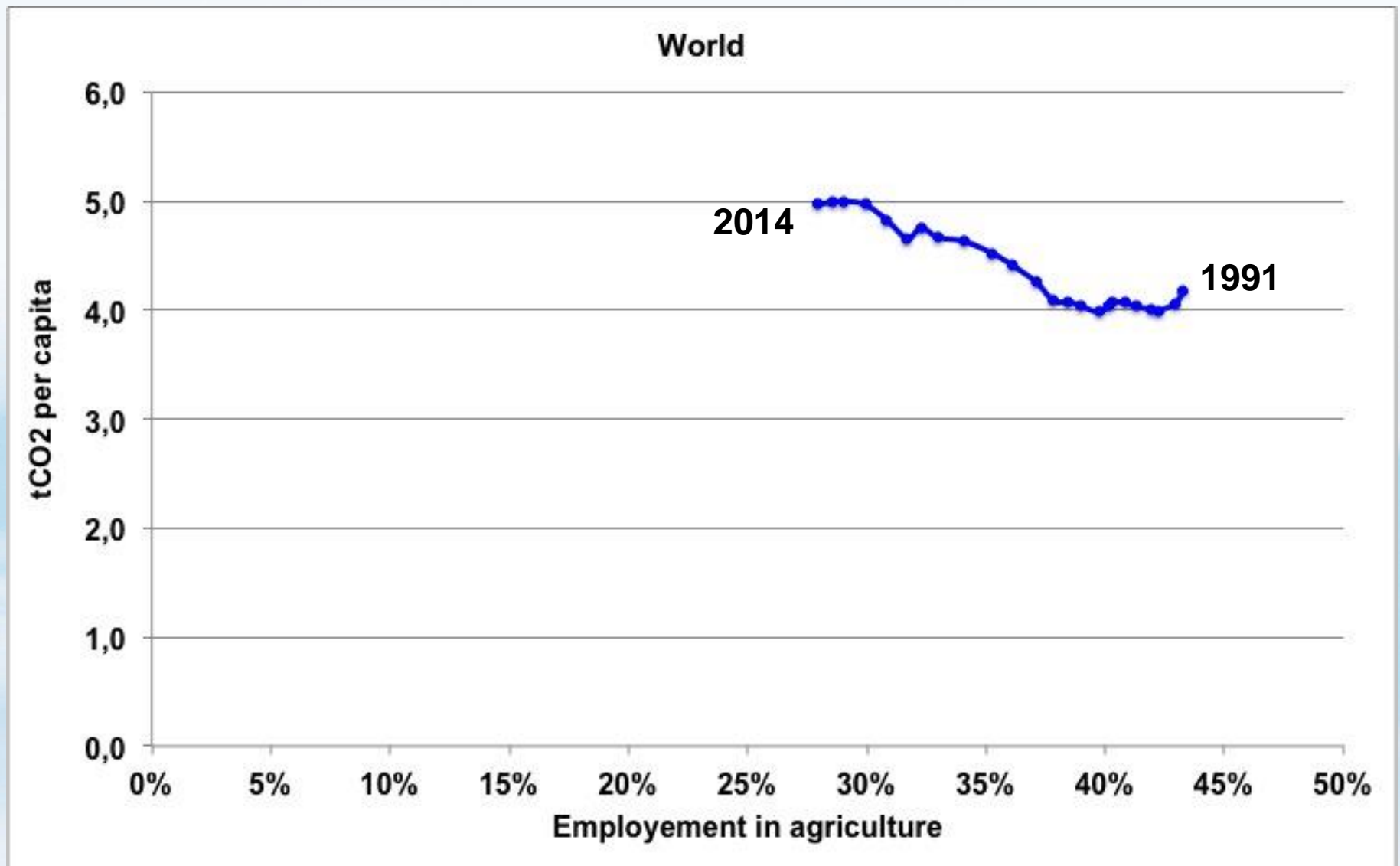


# Plus d'énergie = moins de paysans



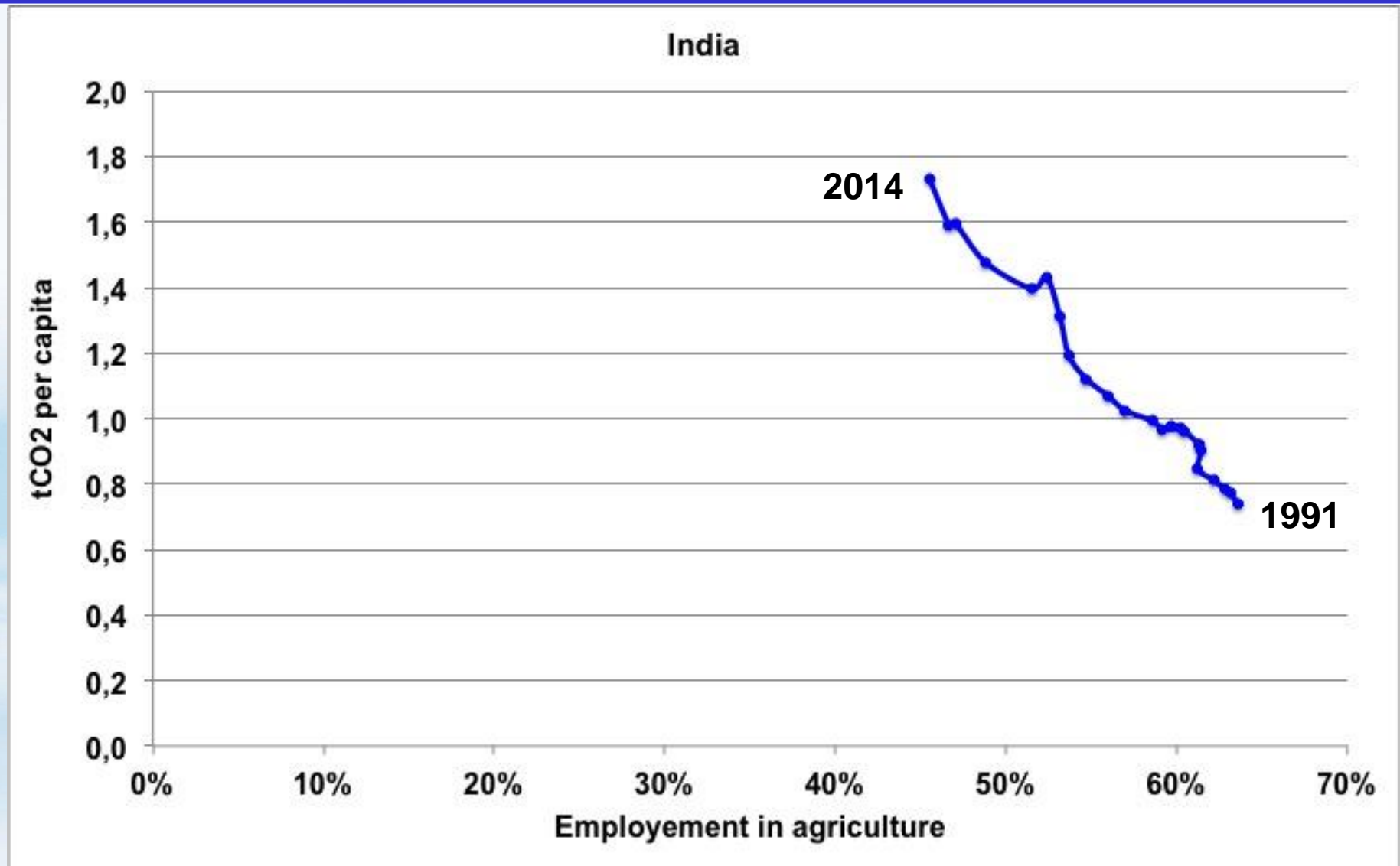
**Consommation d'énergie par personne et par an (kep) vs. % de l'emploi dans l'agriculture. Sources WRI, US DOE**

# Plus d'énergie fossile = moins de paysans



**Emissions de CO<sub>2</sub> par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture dans le monde. Sources World Bank**

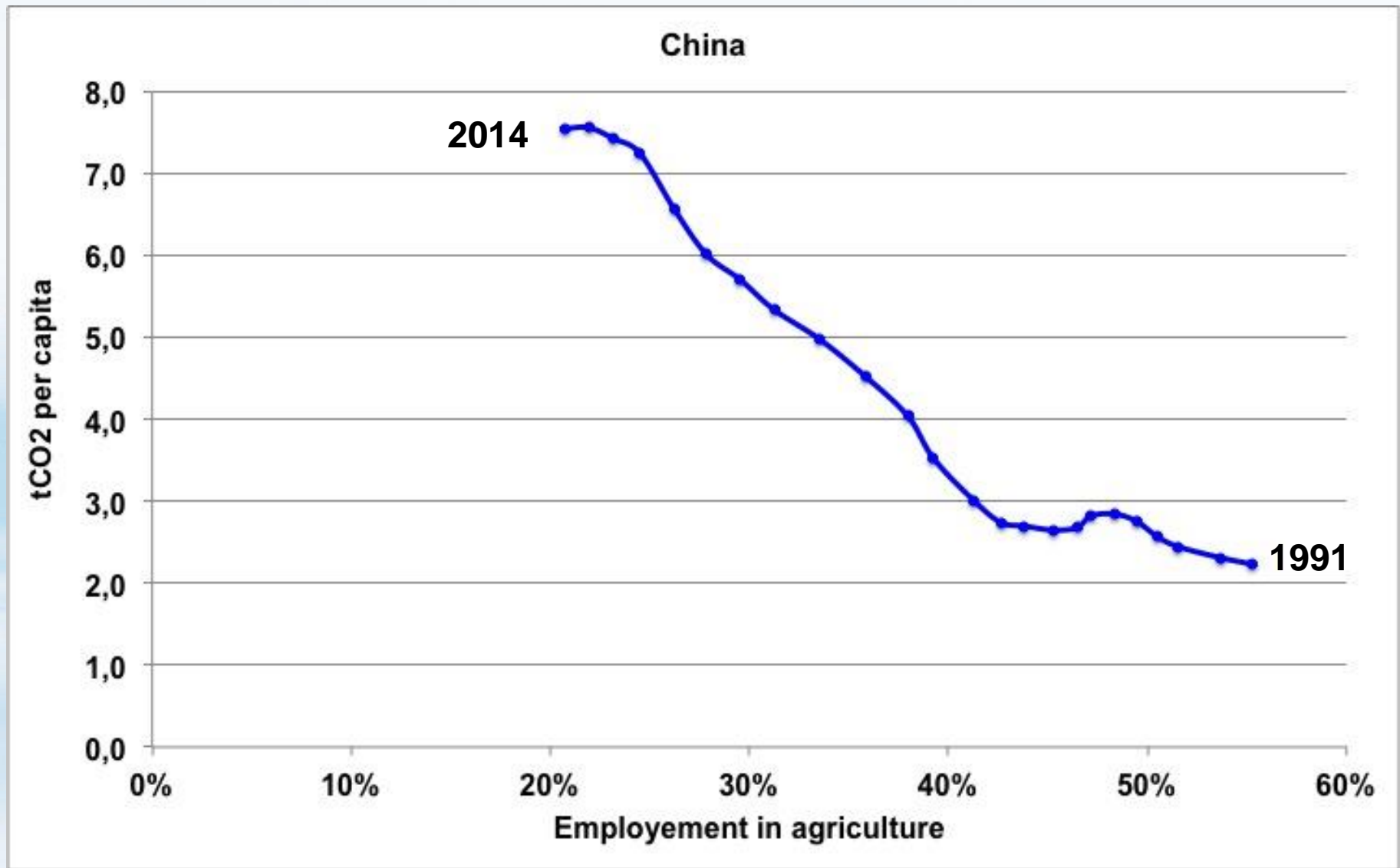
# Plus d'énergie fossile = moins de paysans (bis)



**Emissions de CO<sub>2</sub> par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture en Inde. Sources World Bank**

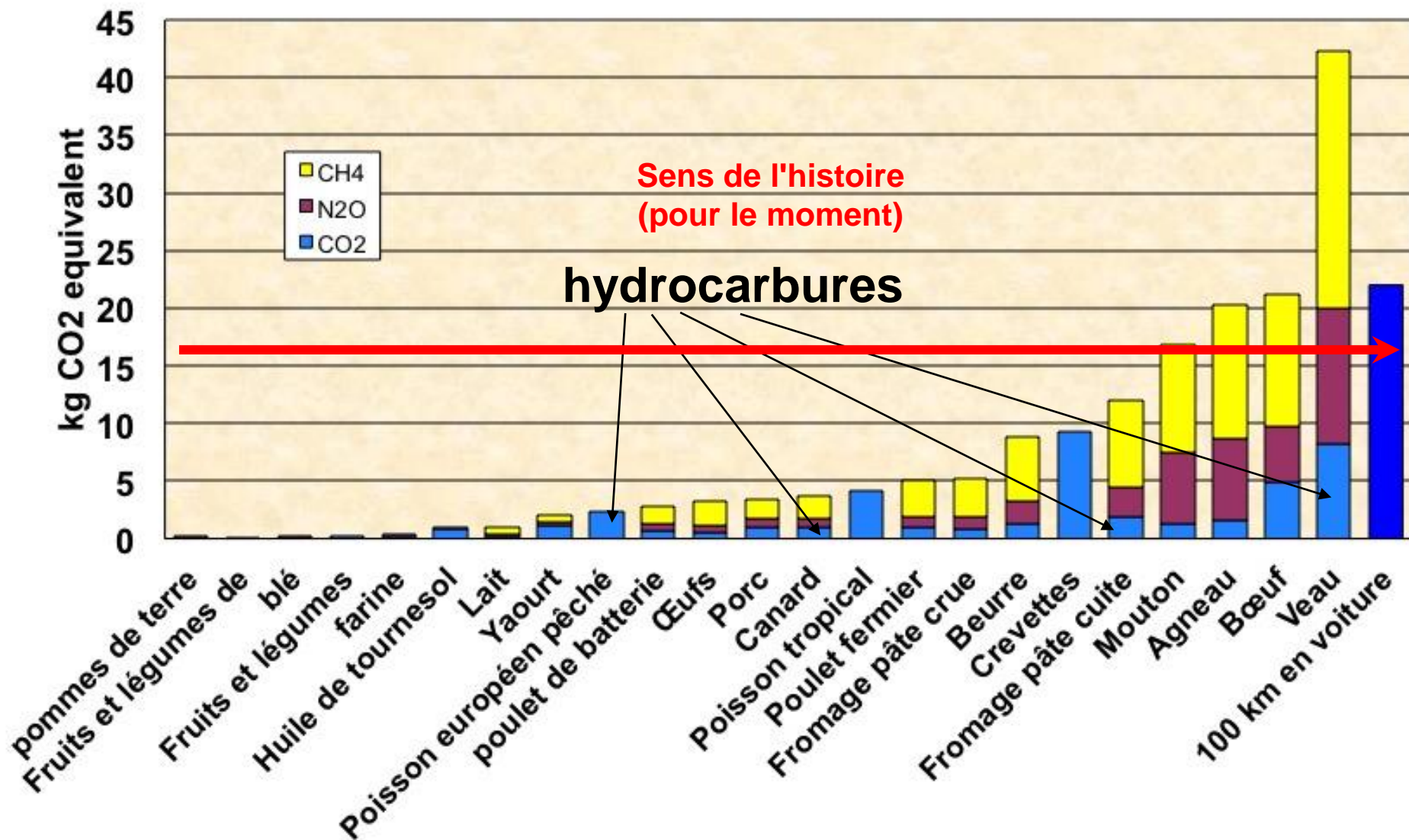


# Plus d'énergie fossile = moins de paysans (ter)



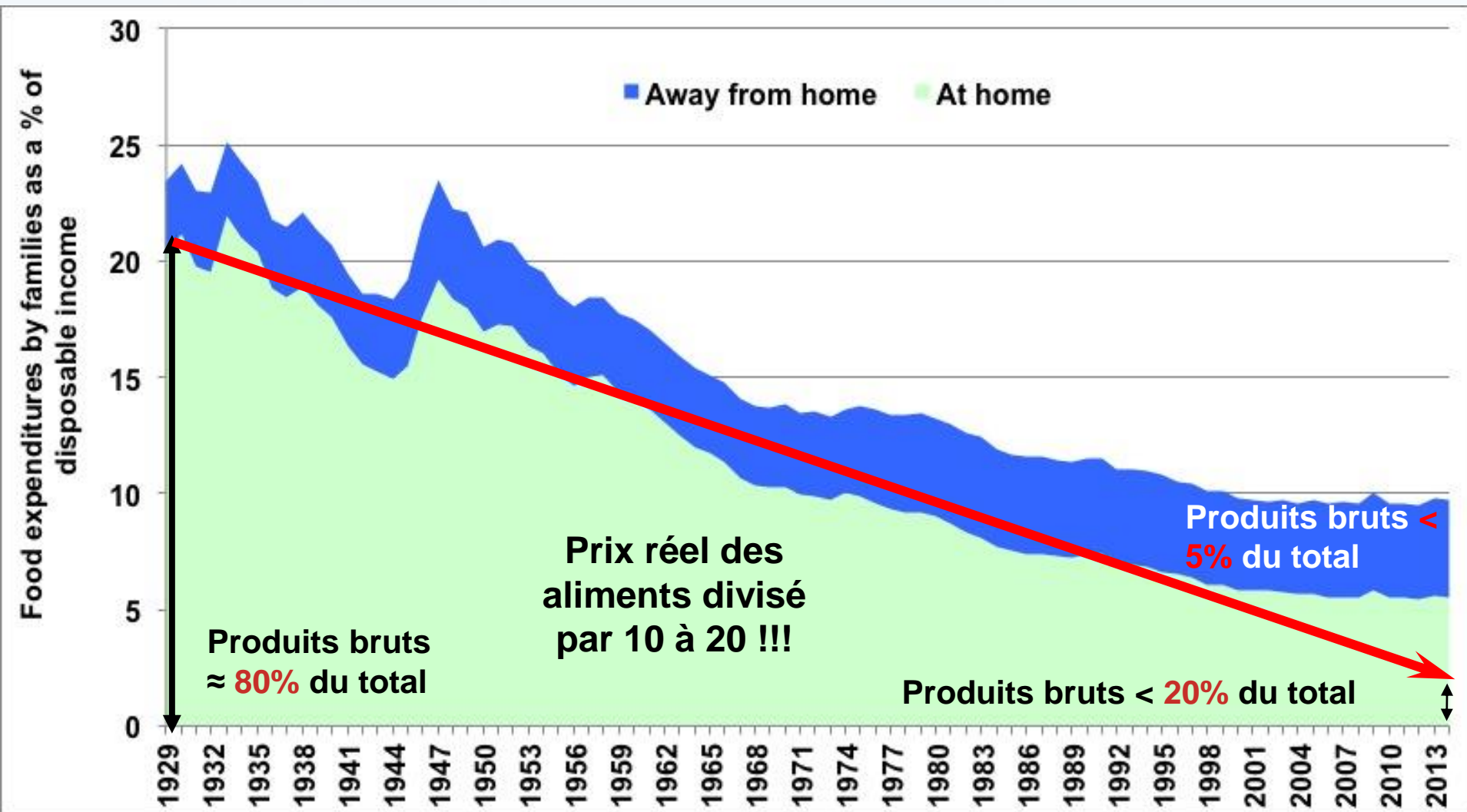
Emissions de CO<sub>2</sub> par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture en Inde. Sources World Bank

# Miam miam kWh pour de vrai



Source : Jancovici/Ademe, 2009

# Plus de pétrole = moins de sous



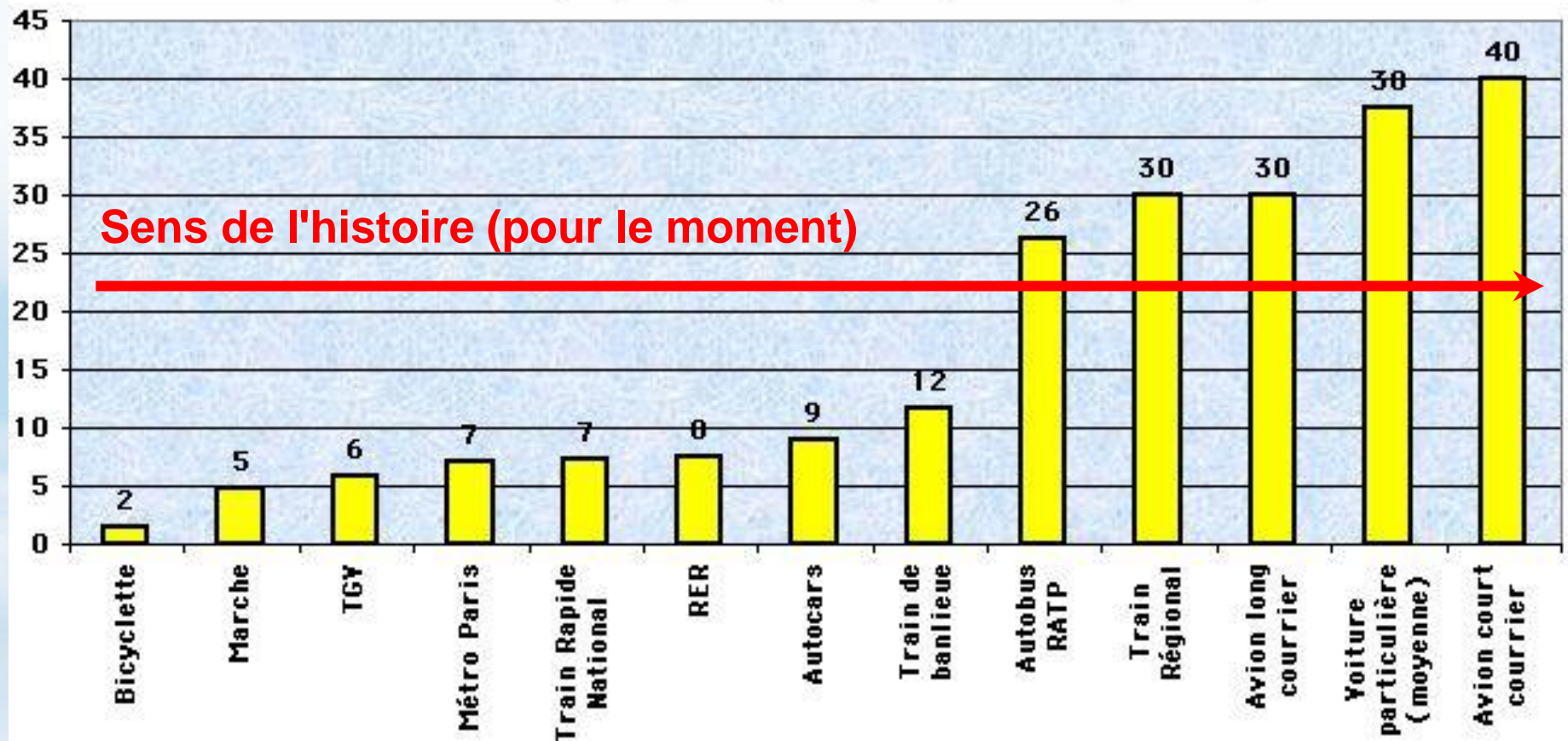
Evolution de la part de l'alimentation dans le budget des ménages américains de 1929 à 2014, en pourcentage.

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)**



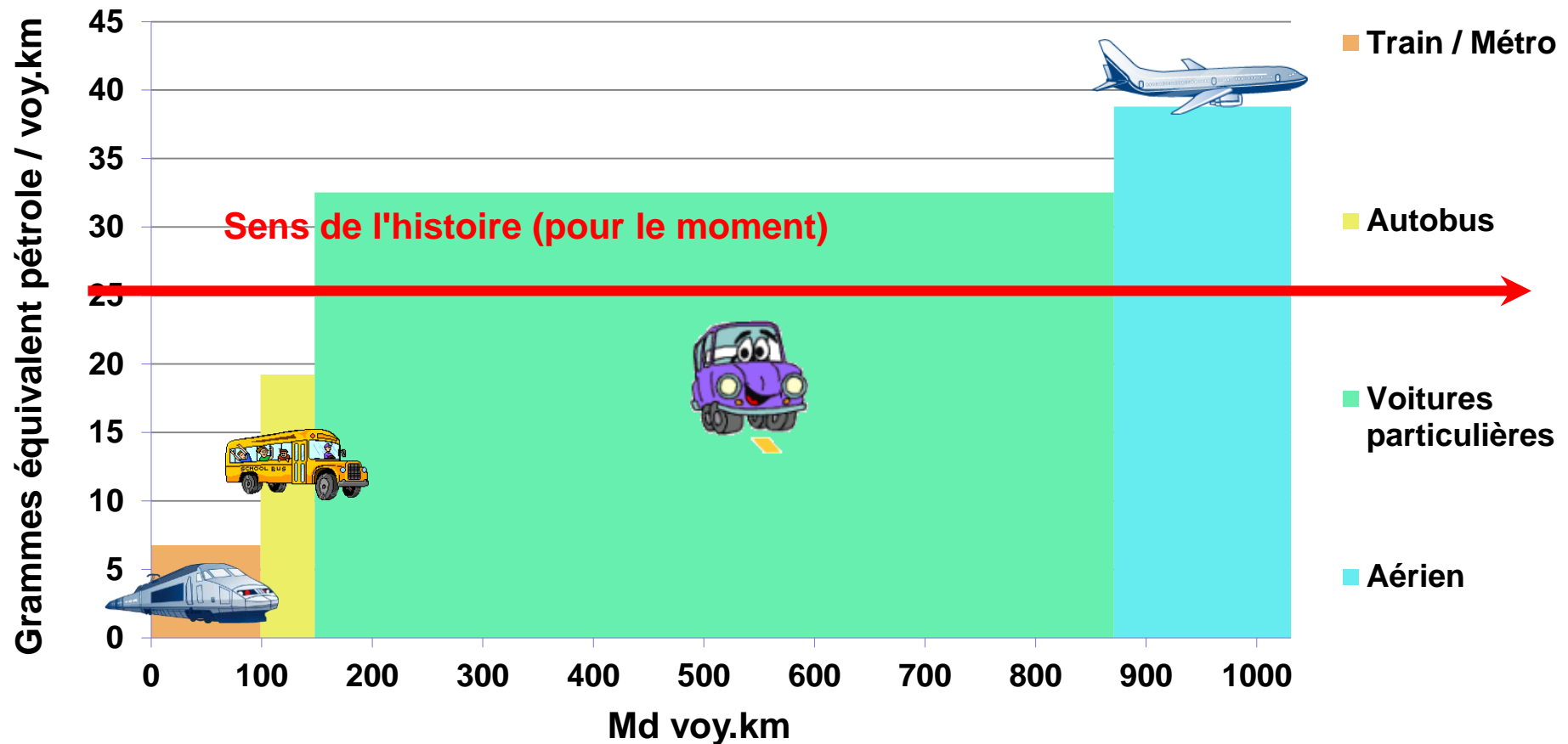
# Qu'est-ce qu'une voiture exactement ? (bis)



**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 ?**

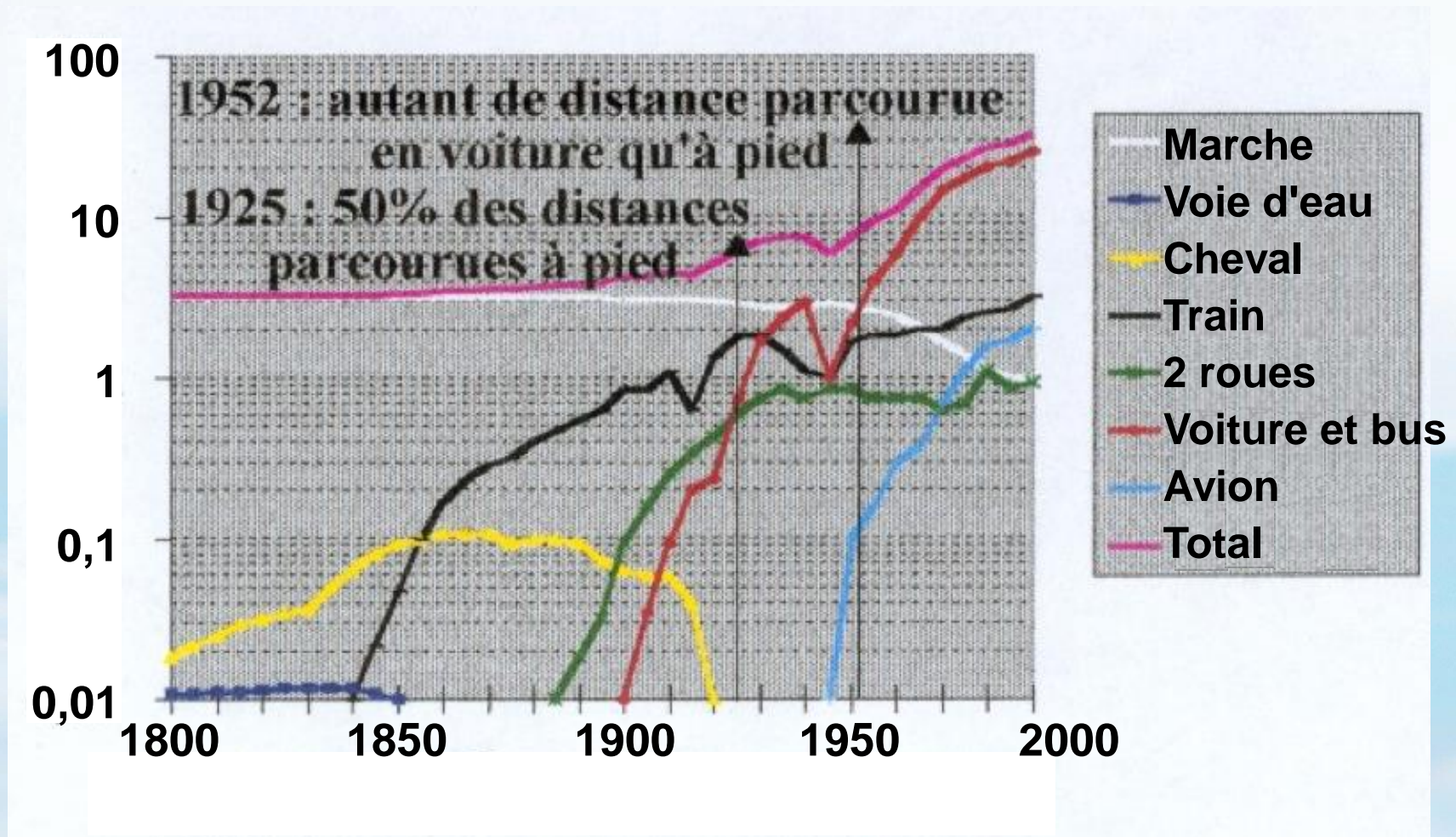
# Et je dirais même plus : plus c'est moderne, plus ça pompe...

## Transport de passagers en France (2009)



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

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

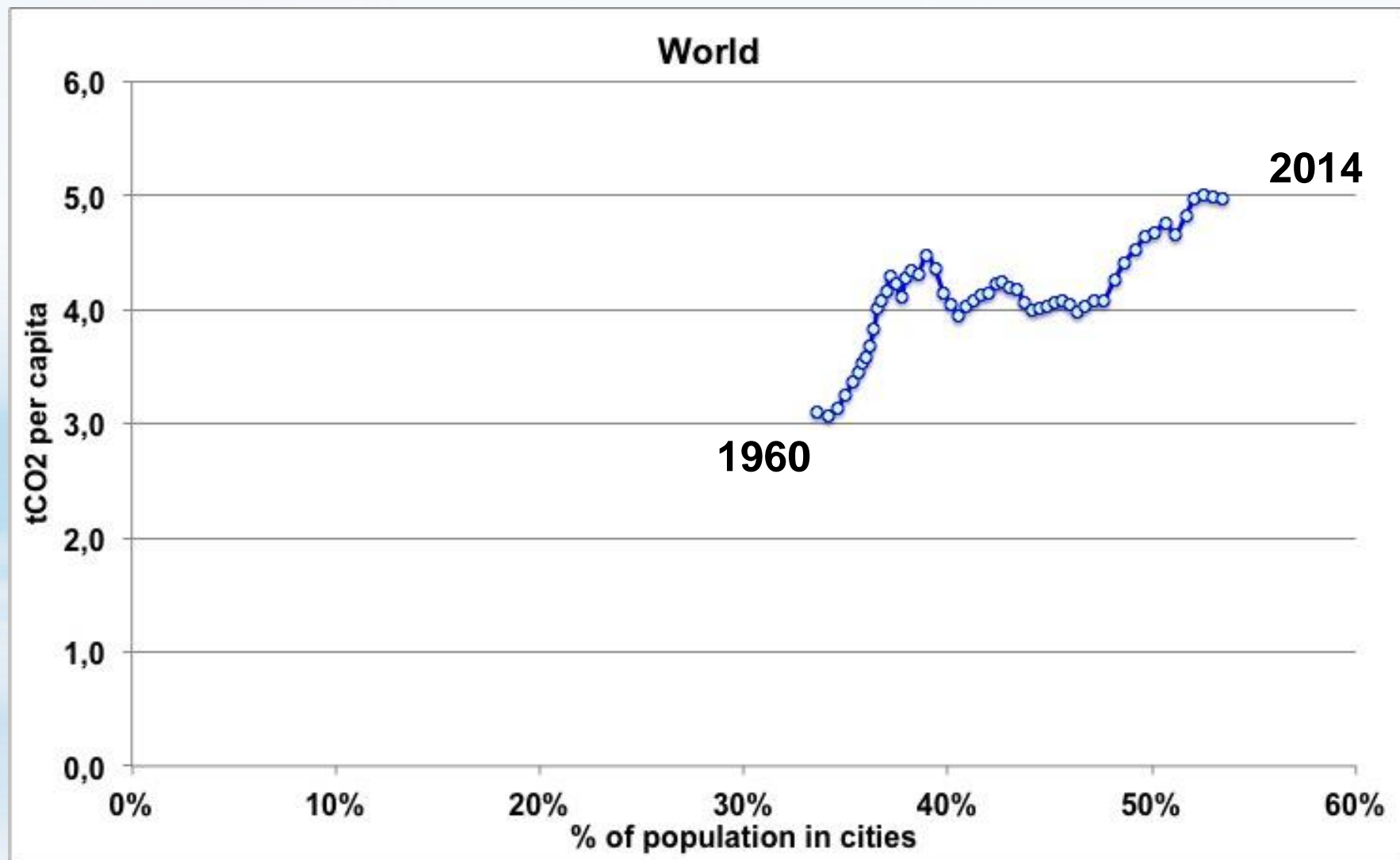


Evolutions des distances parcourues par personne et par jour, en France, depuis 1800.

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

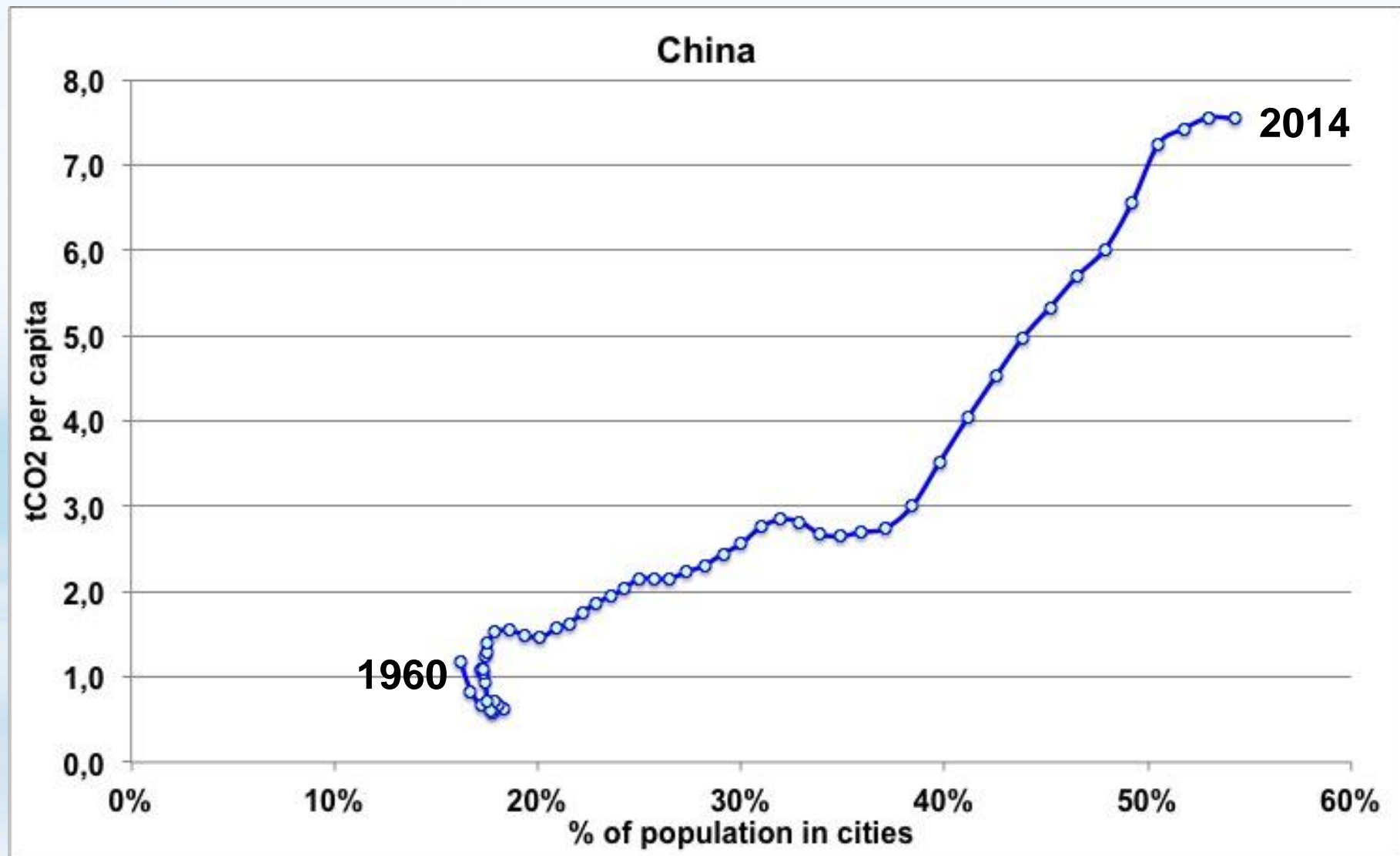


# Plus d'énergie fossile = plus de villes !



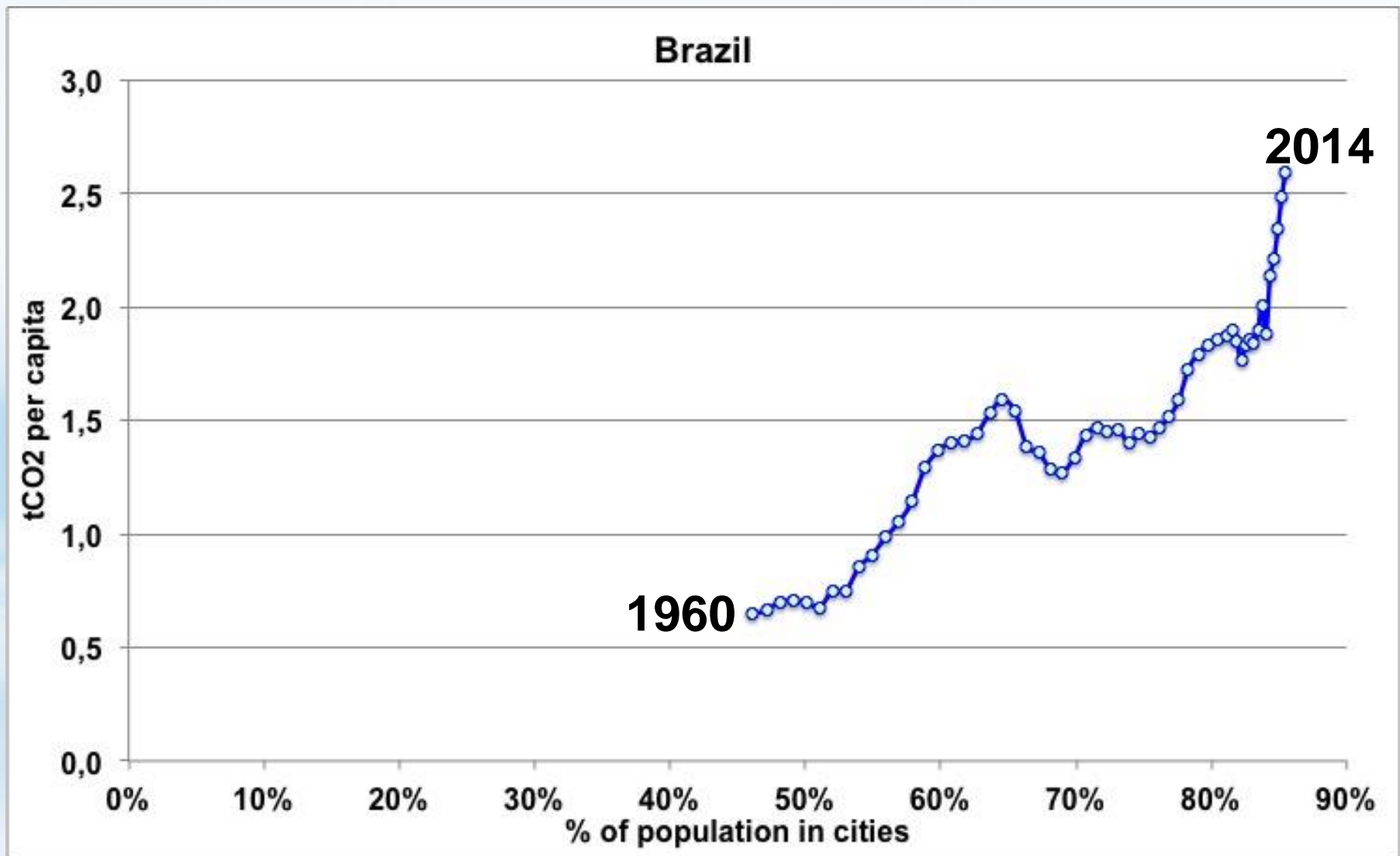
**Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne dans le monde. Données Banque Mondiale**

# Plus d'énergie fossile = plus de villes !



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

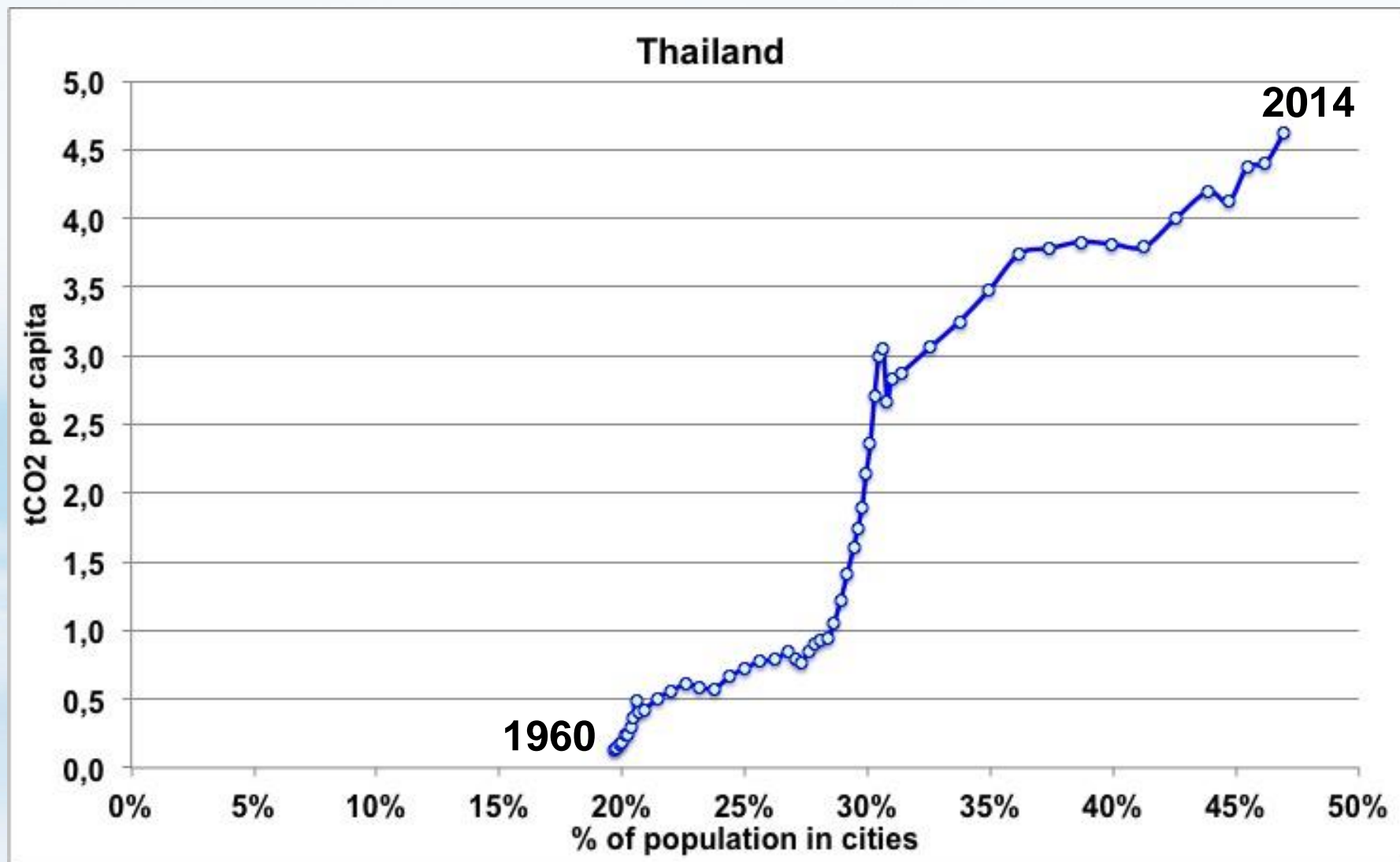
# Plus d'énergie fossile = plus de villes !



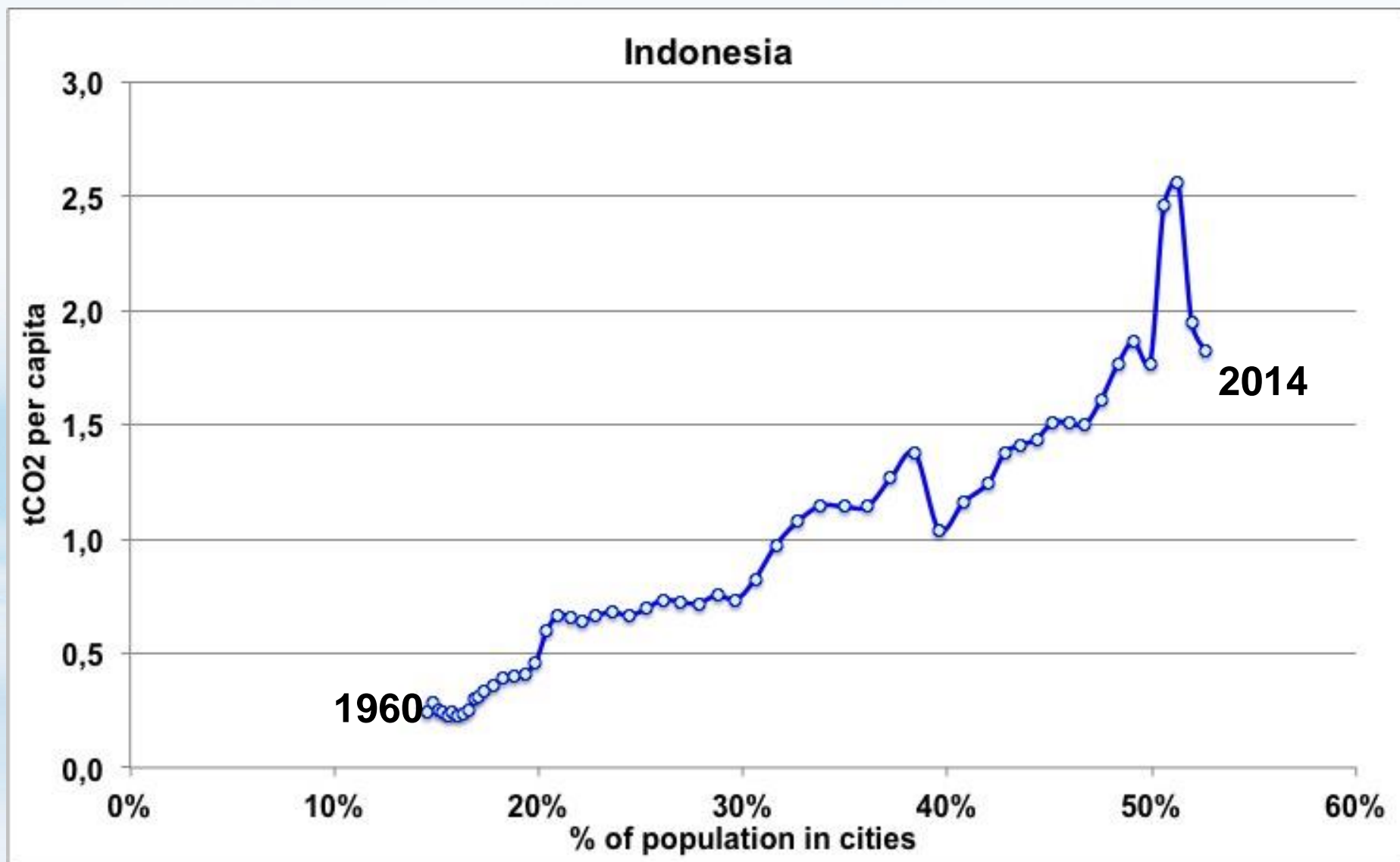
**Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Données Banque Mondiale**



# Plus d'énergie fossile = plus de villes !

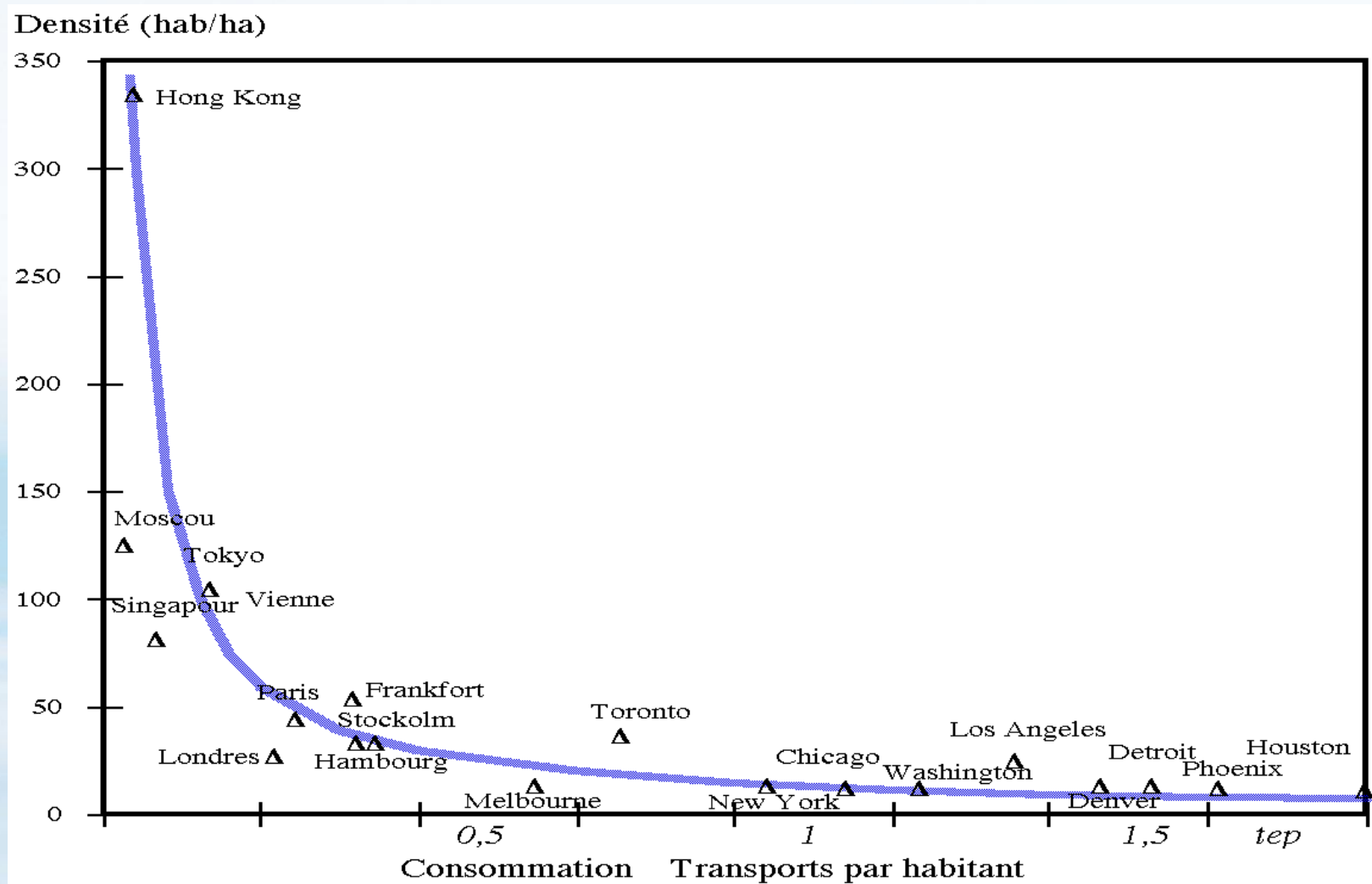


Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Thaïlande. Données Banque Mondiale



**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...

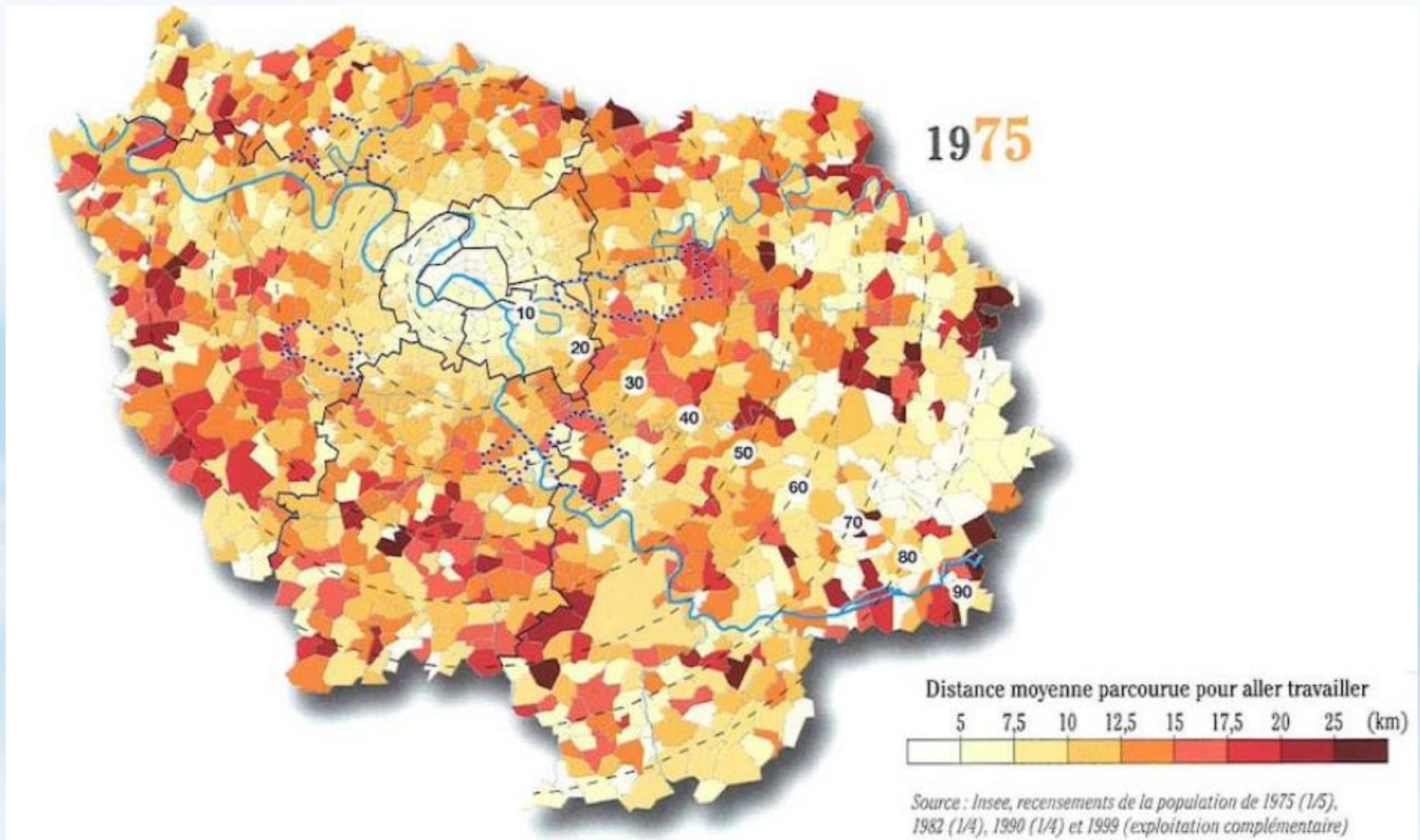


Consommation énergétique par habitant liée aux transports urbains (axe horizontal, en tonnes équivalent pétrole par an) en fonction de la densité de la zone urbaine (axe vertical, en habitants à l'hectare).

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

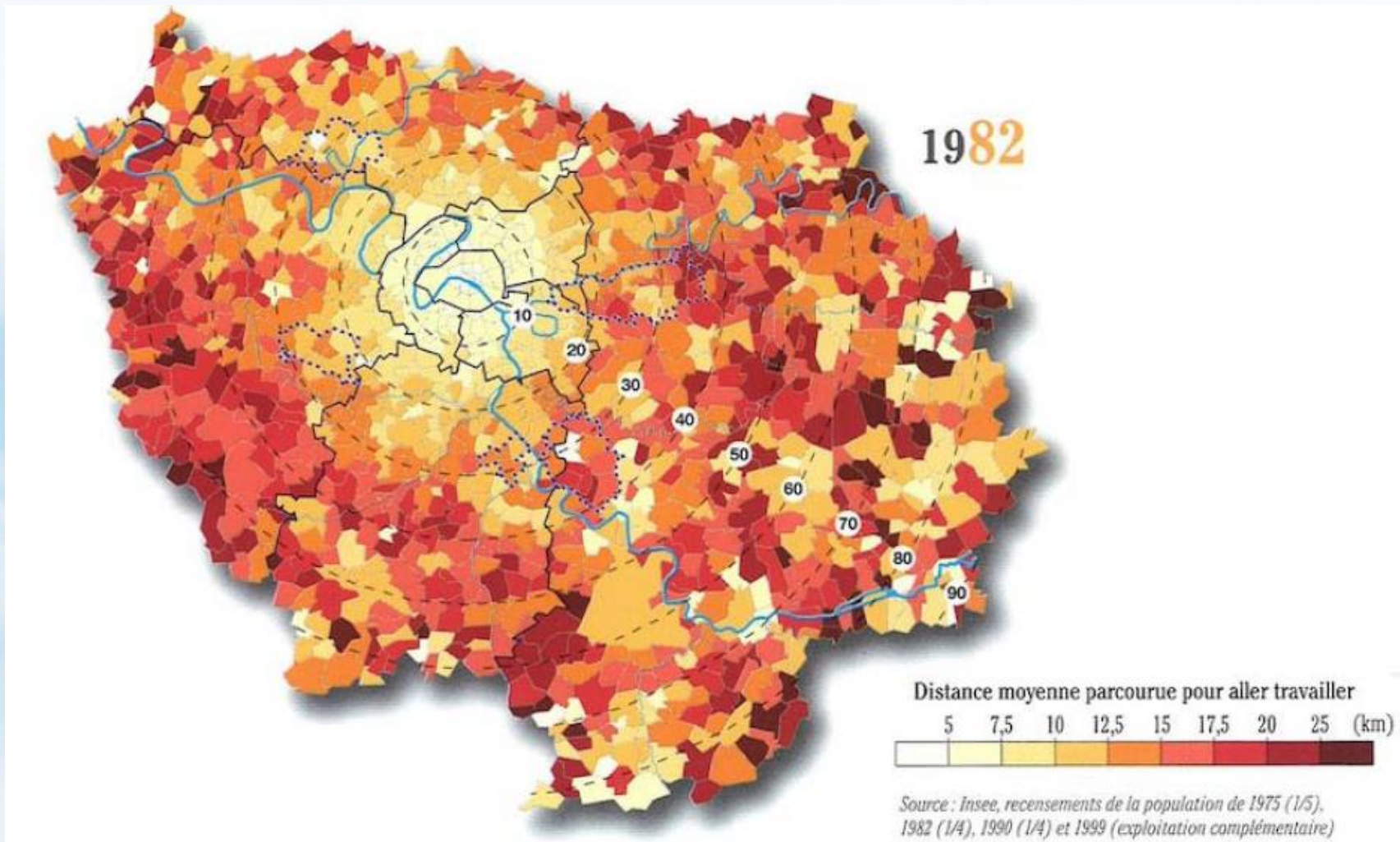


# Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



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

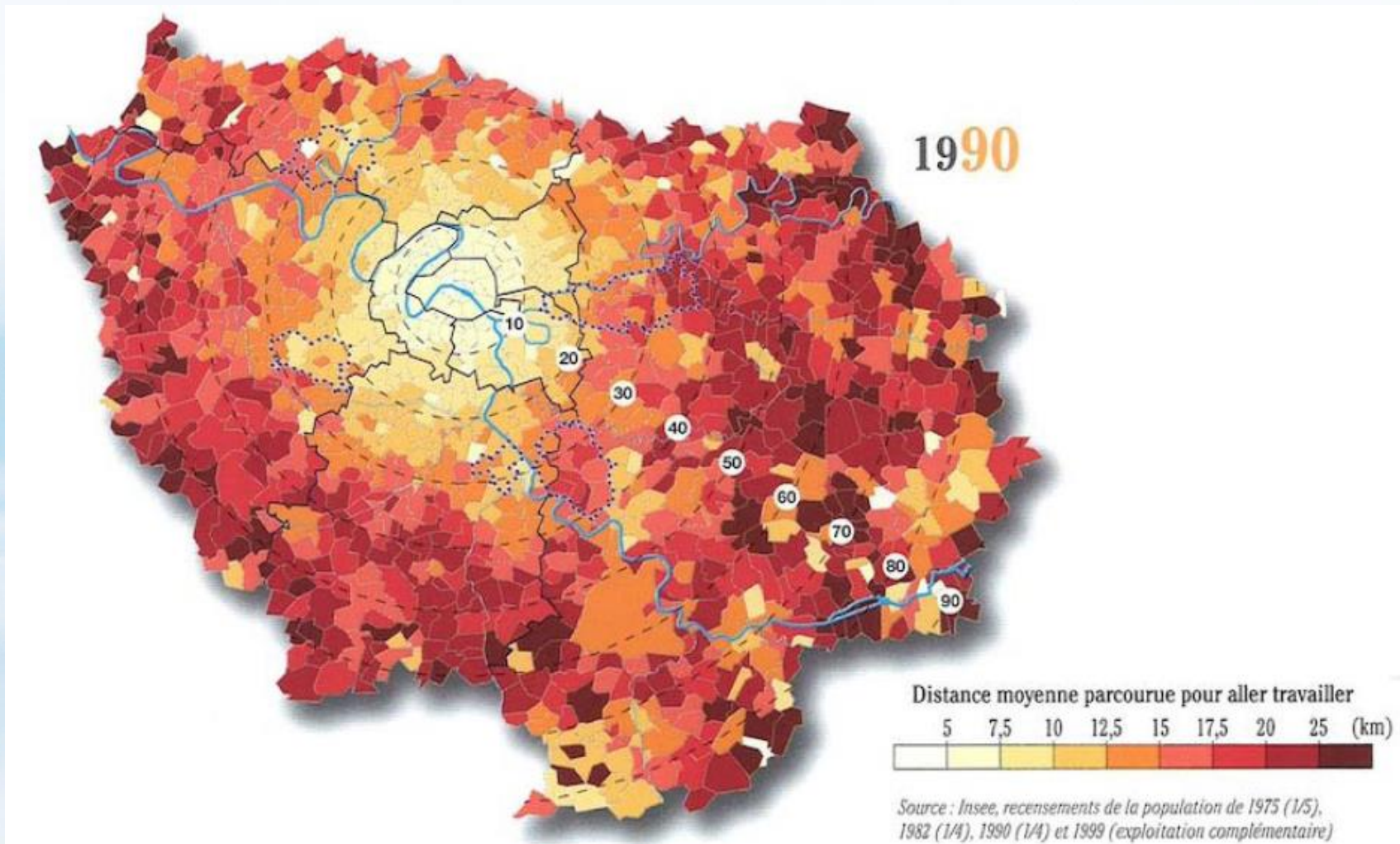
# Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



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



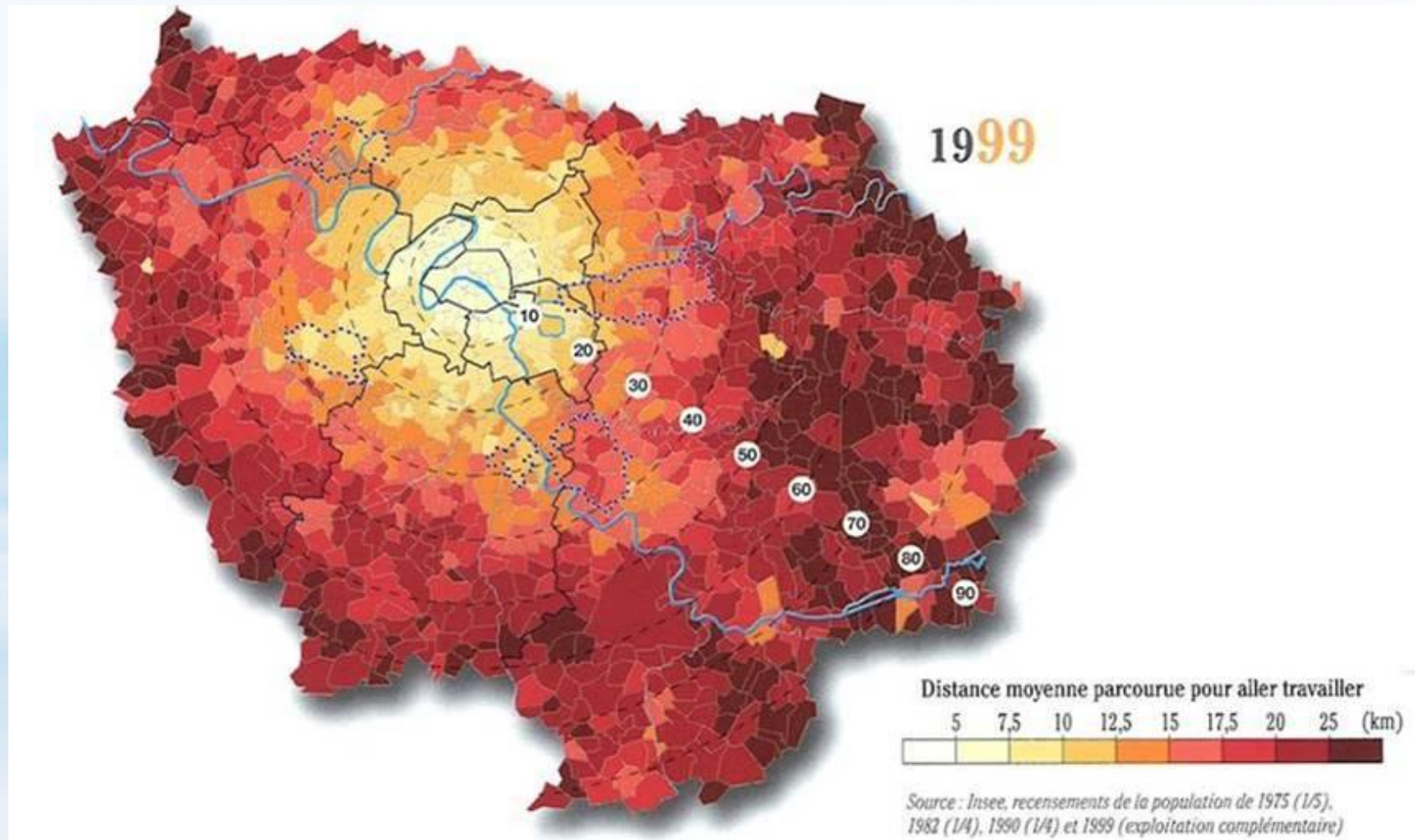
# Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



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

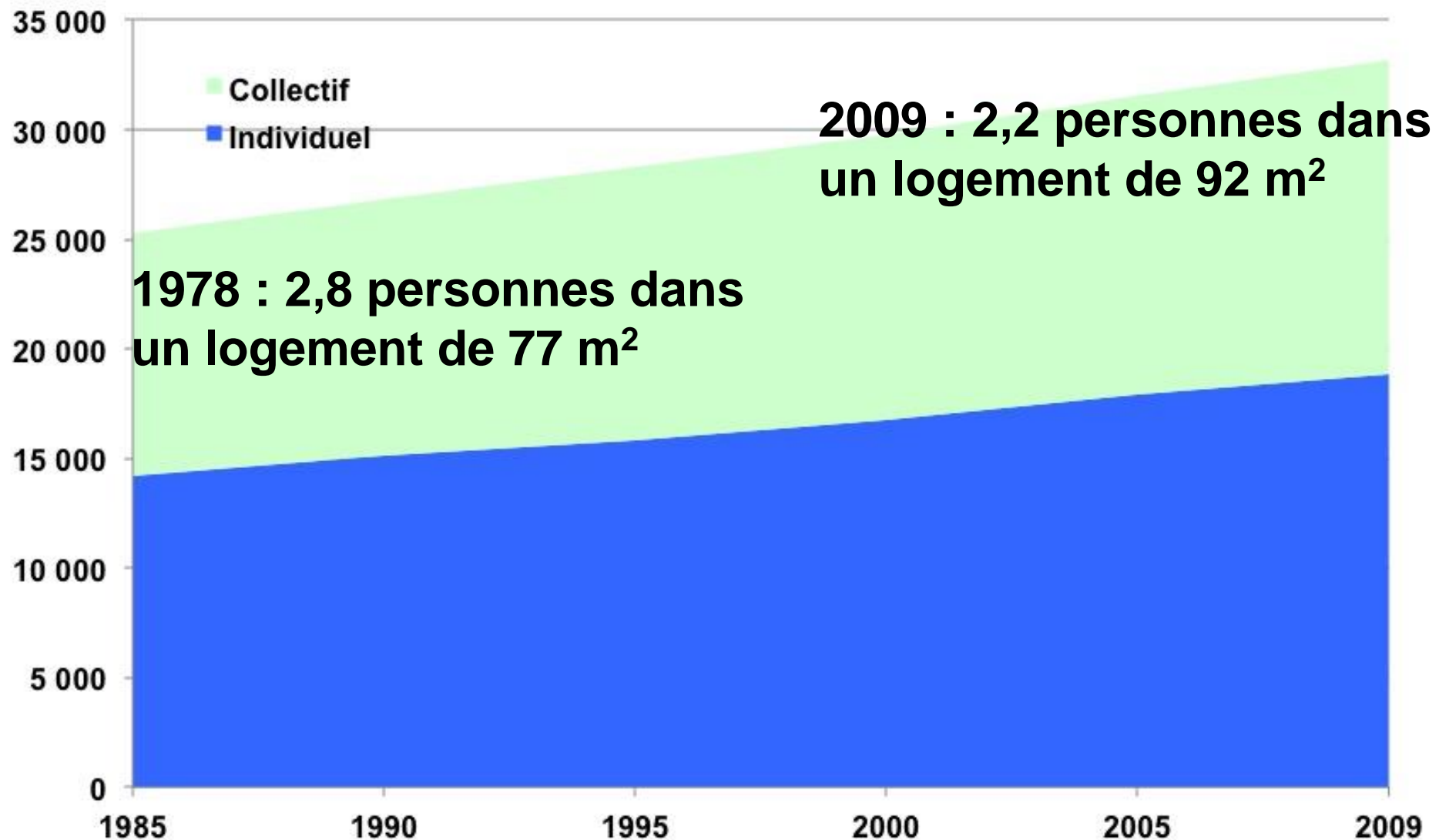


# Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



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

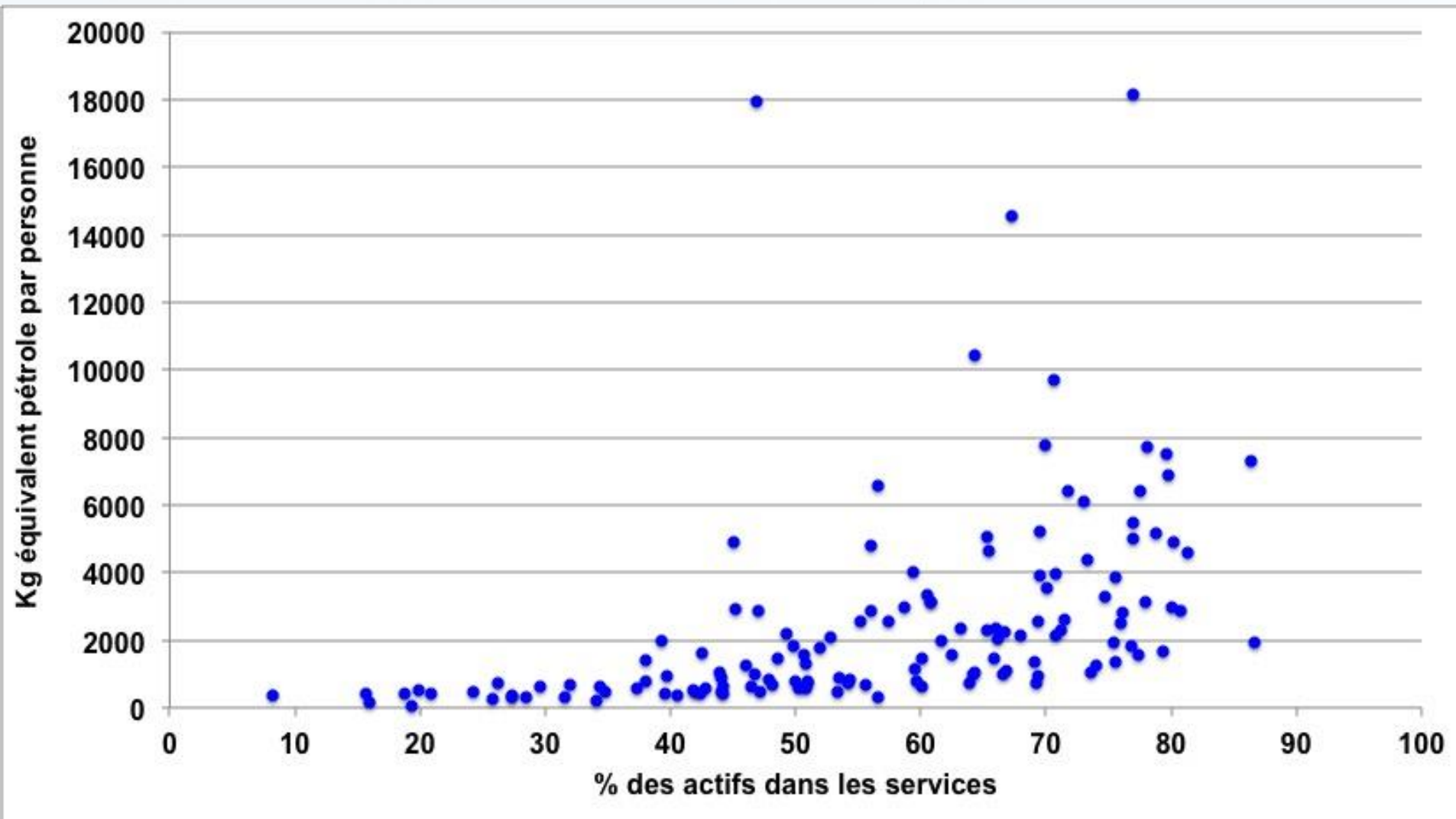
# Utiliser des hydrocarbures sans se déplacer, c'est possible !



Evolution du nombre de logements entre 1985 et 2009

Source SOES, 2013

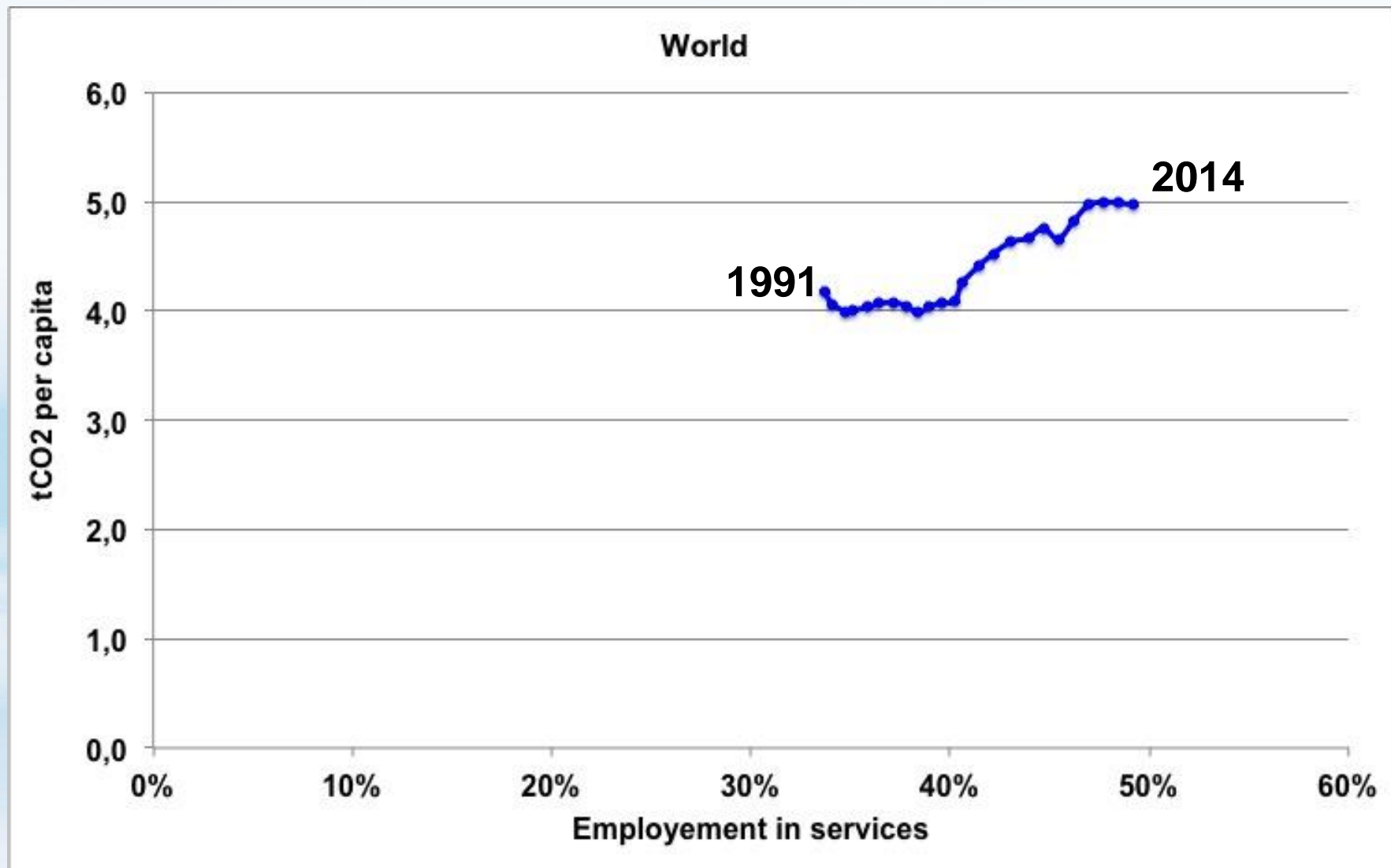
# Vous avez dit dématérialisation ?



**Utilisation de l'énergie par personne et par an vs. % de l'emploi dans les services en 2013.  
Données primaires World Bank, 2018**

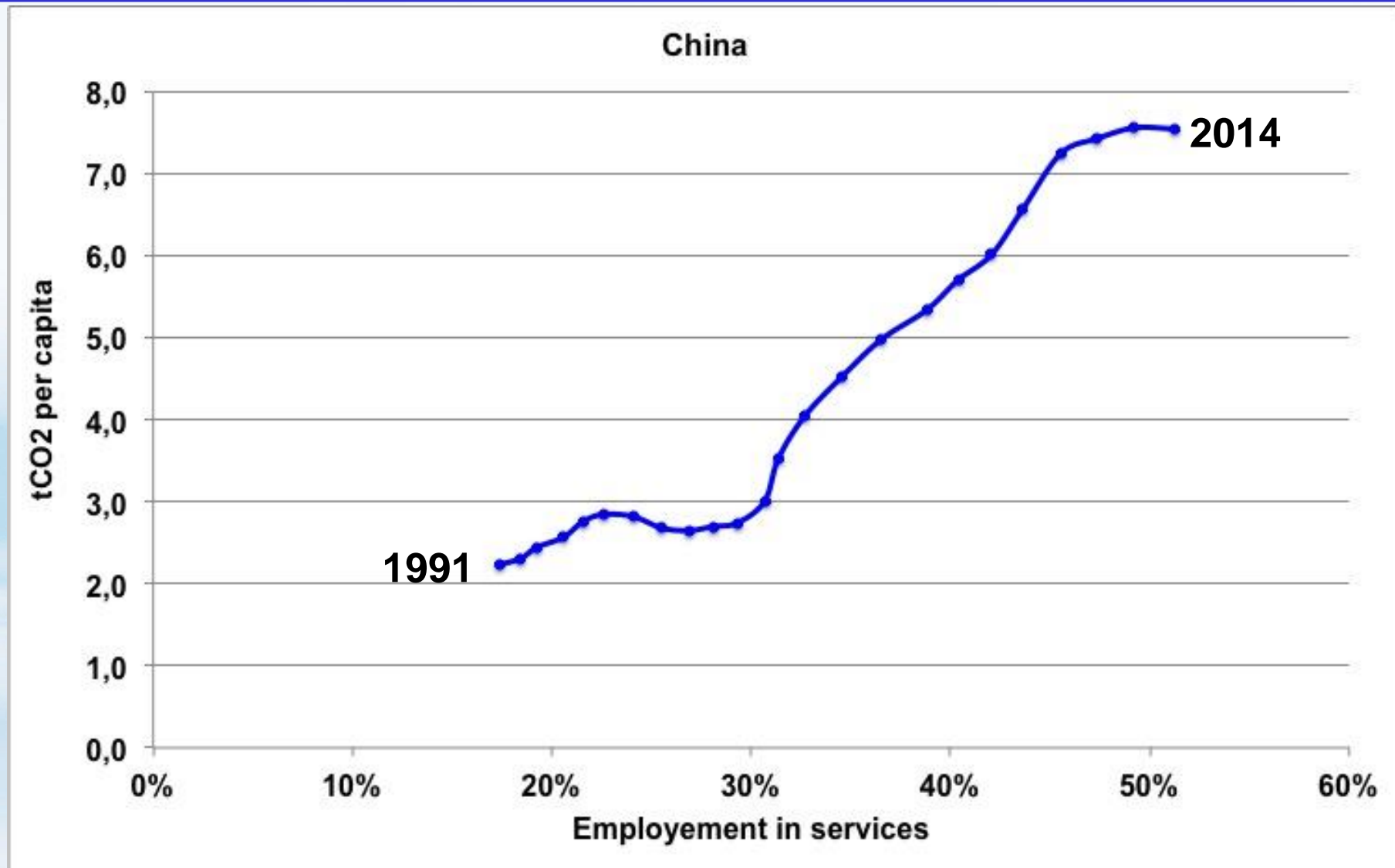


# Plus d'énergie fossile = plus de services !



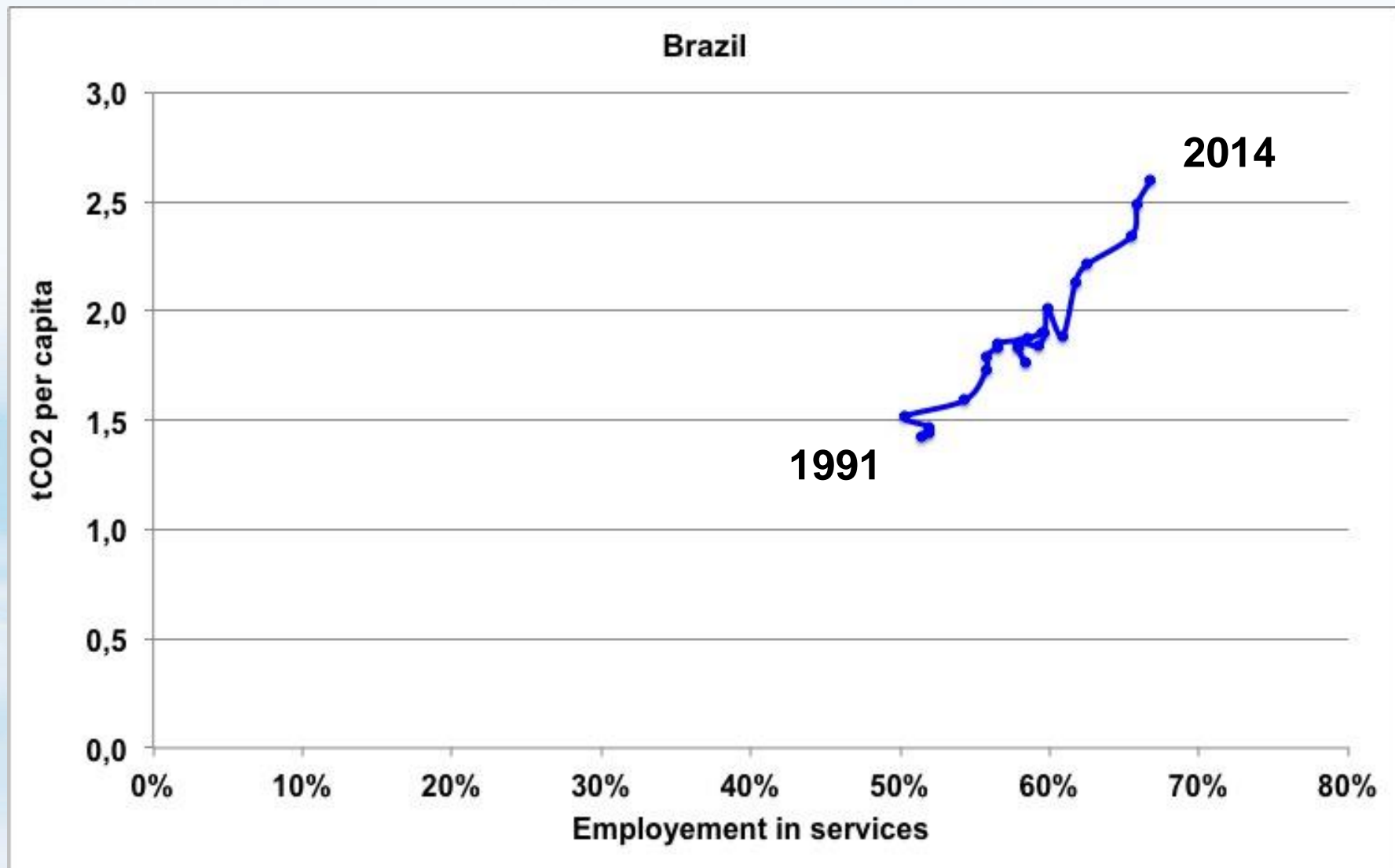
**Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne dans le monde. Données Banque Mondiale**

# Plus d'énergie fossile = plus de services !



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

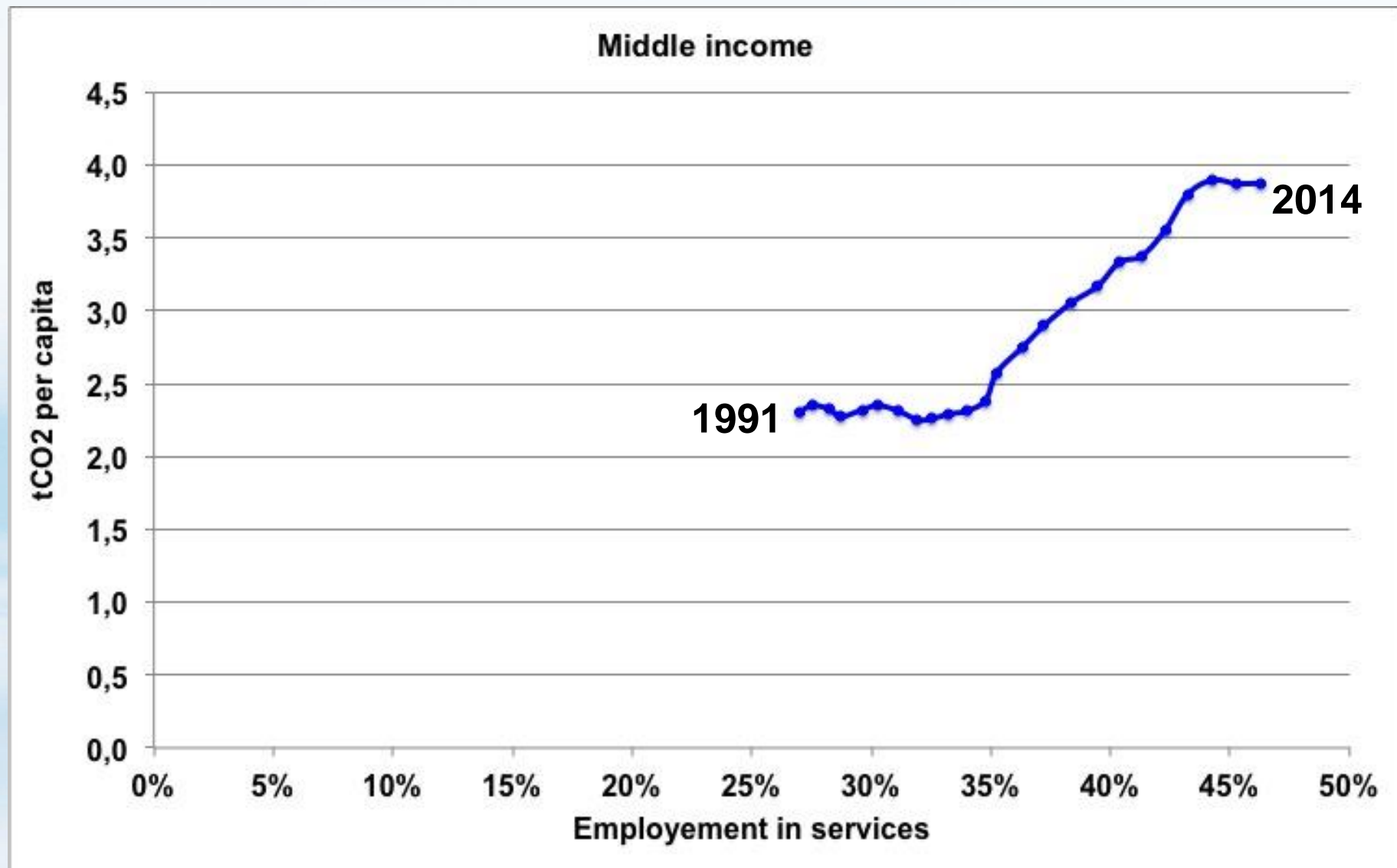
# Plus d'énergie fossile = plus de services !



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

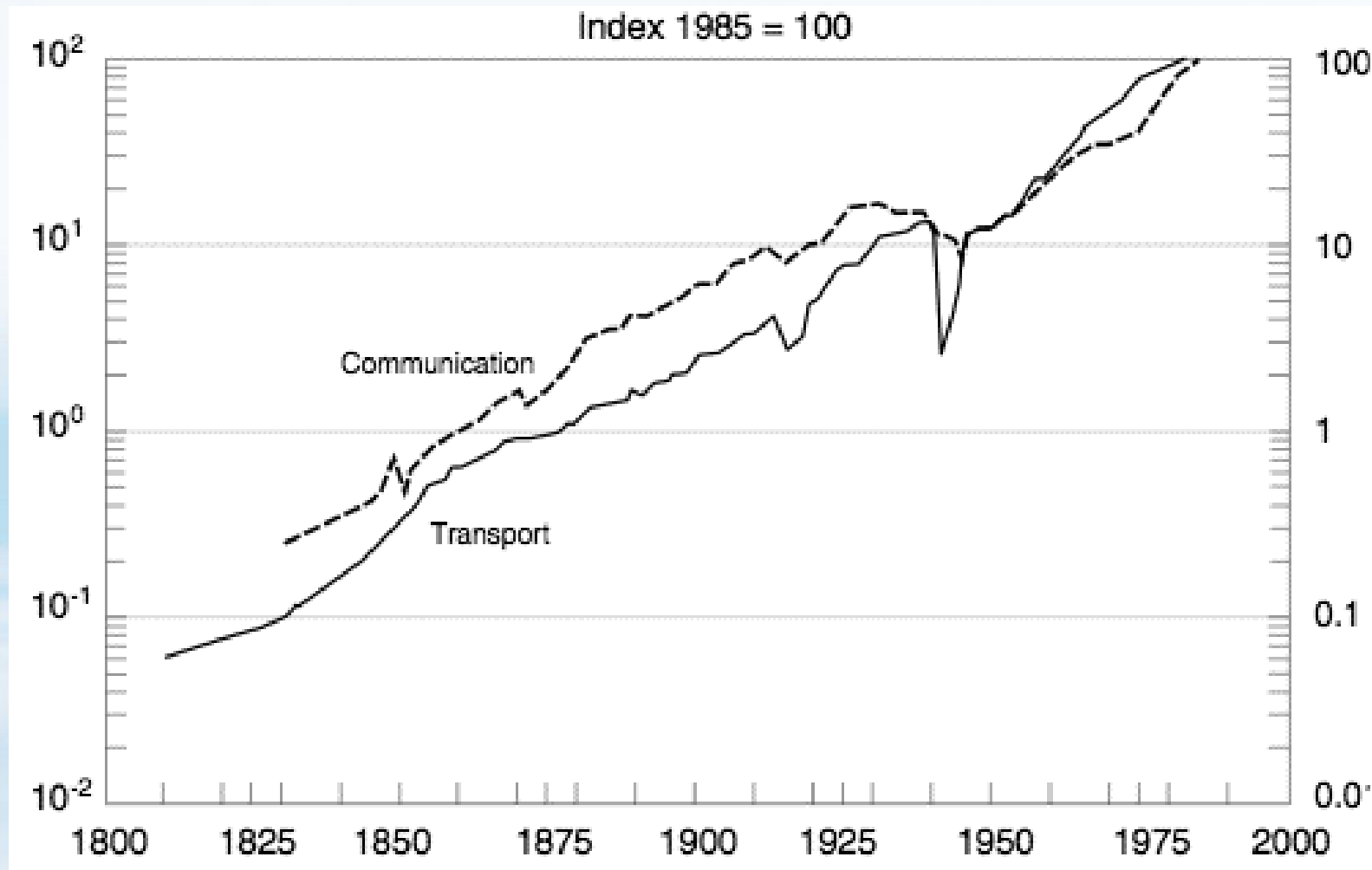


# Plus d'énergie fossile = plus de services !



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

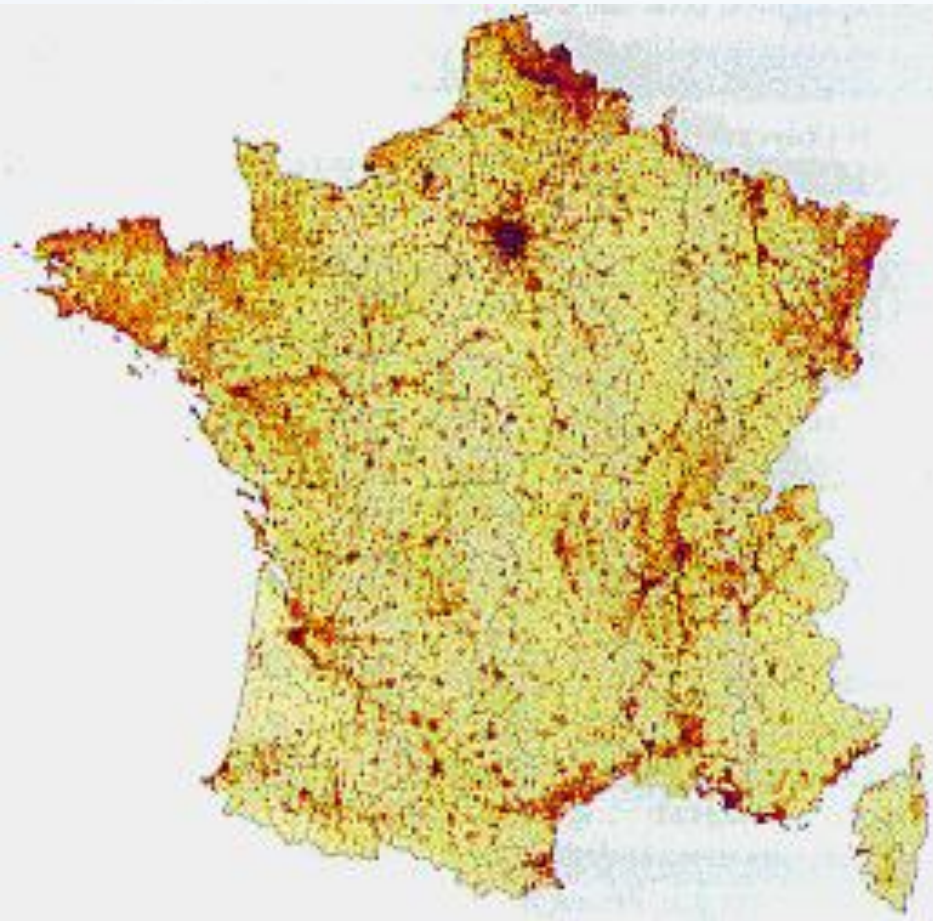
# Les kilo-octets n'ont pas tué les kilomètres !



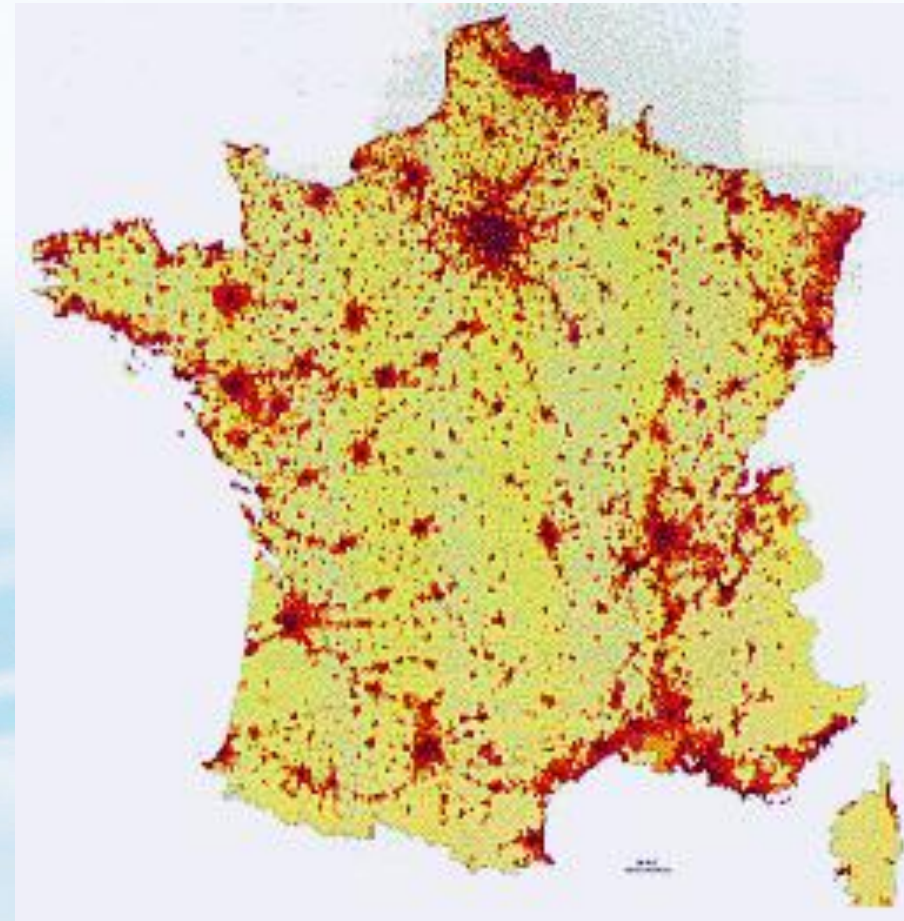
Evolution comparée des flux d'information et des flux de transport de 1800 à 1990.

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

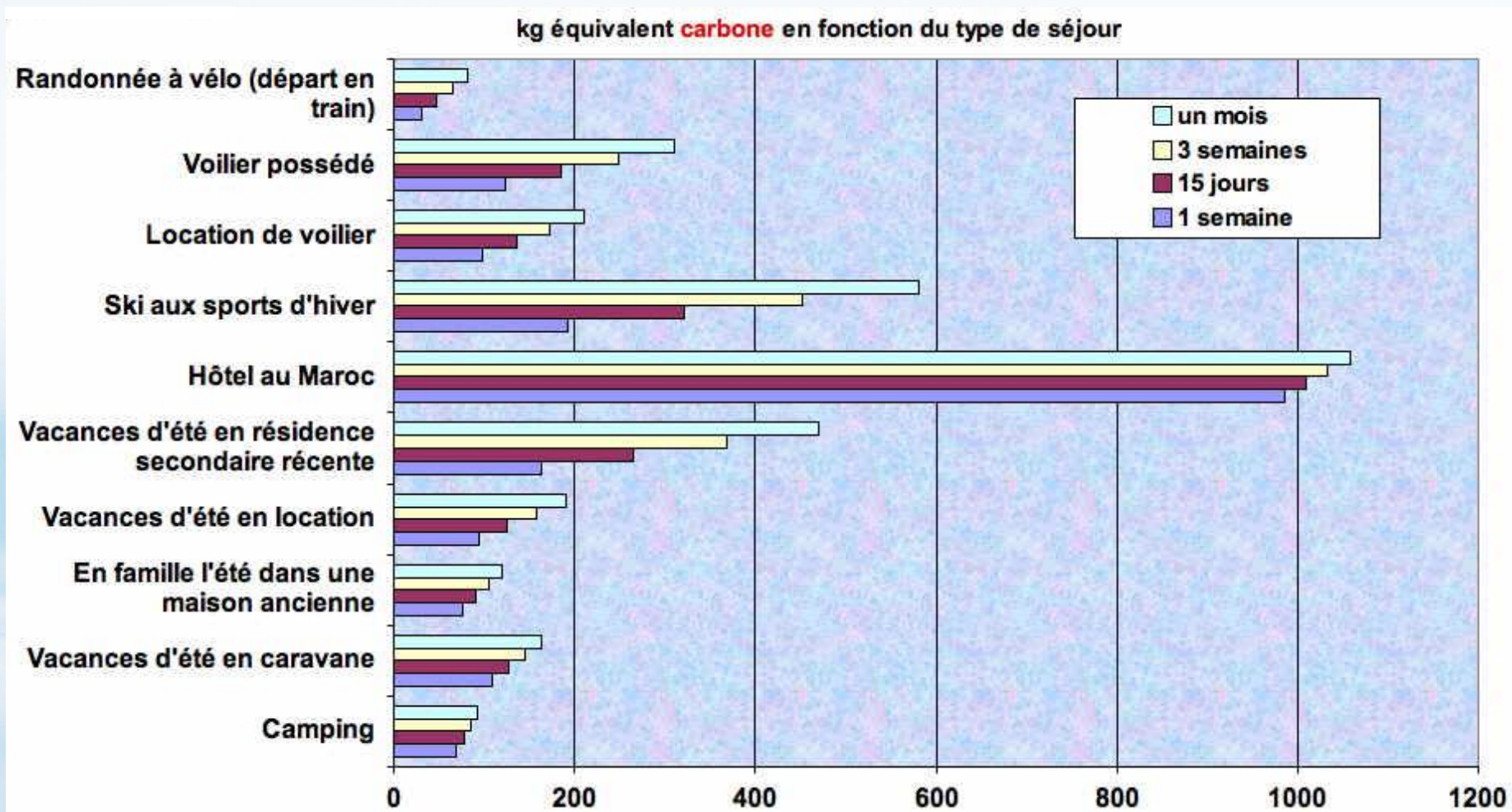


2000, 59 millions d'habitants

Source DATAR

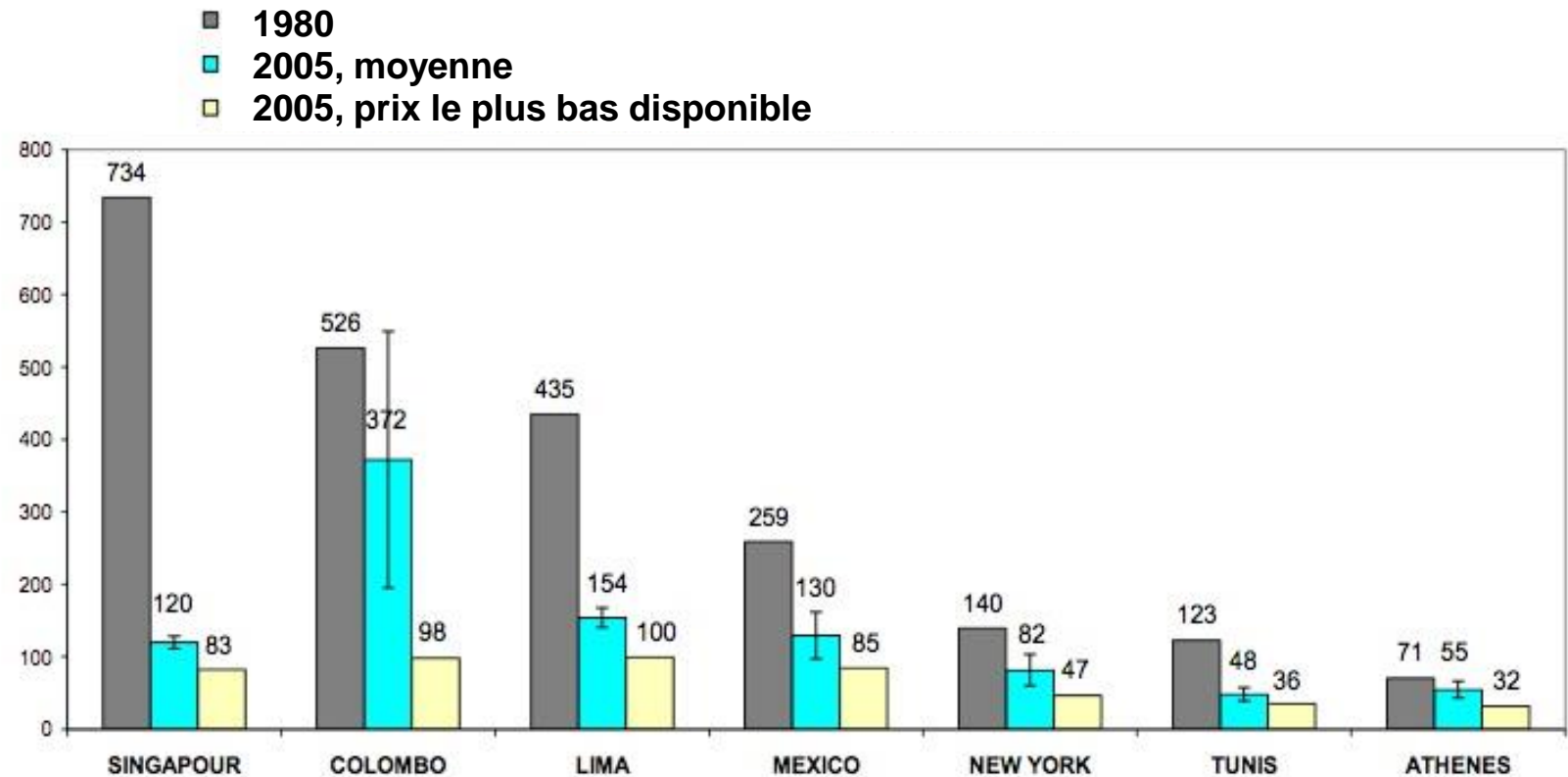


# Vacances pour tous = du carbone, encore !



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

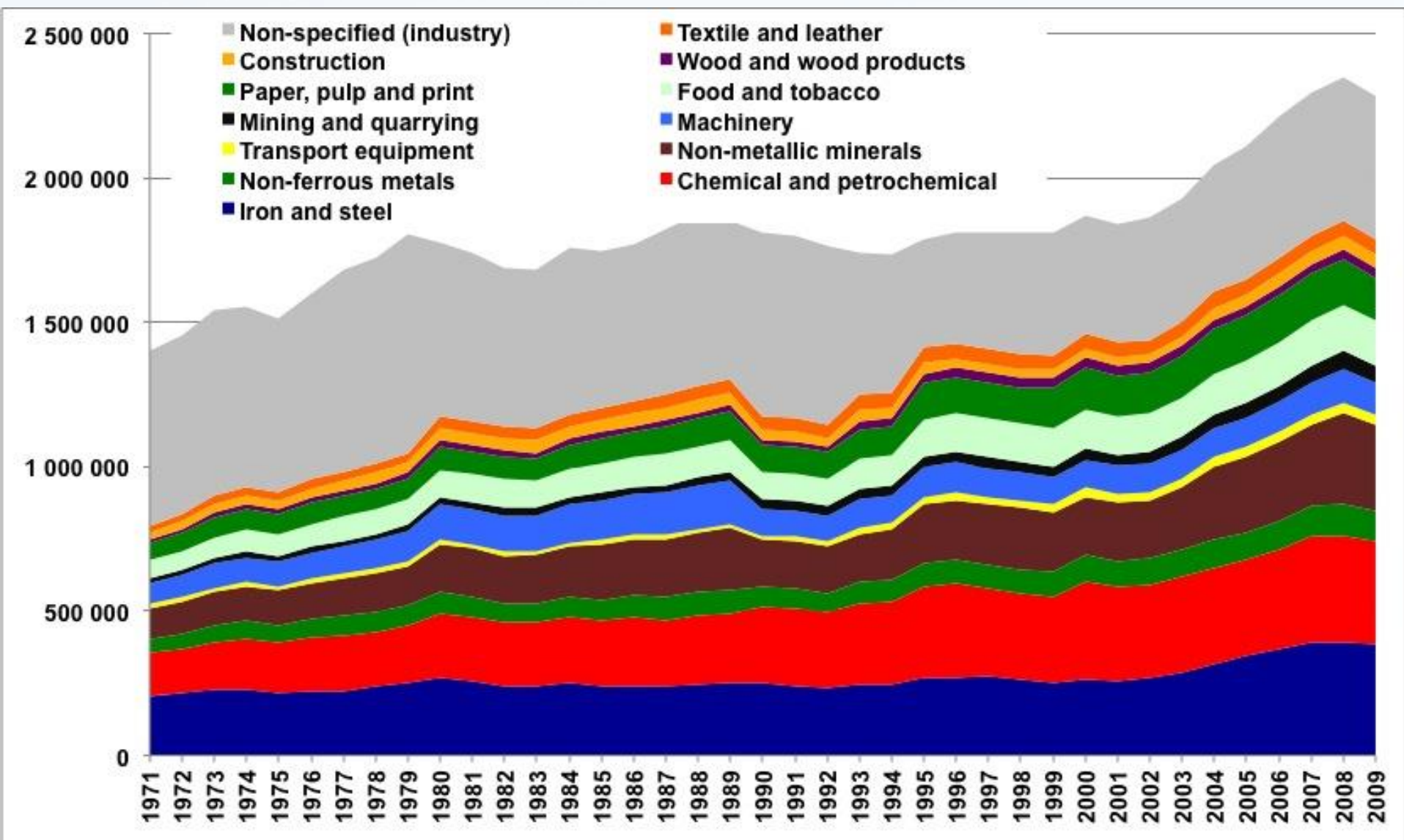


Extrait du travail de thèse "Optimisation Spatio-Temporelle des Déplacements Touristiques", v. Bagard, LET 2005

**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



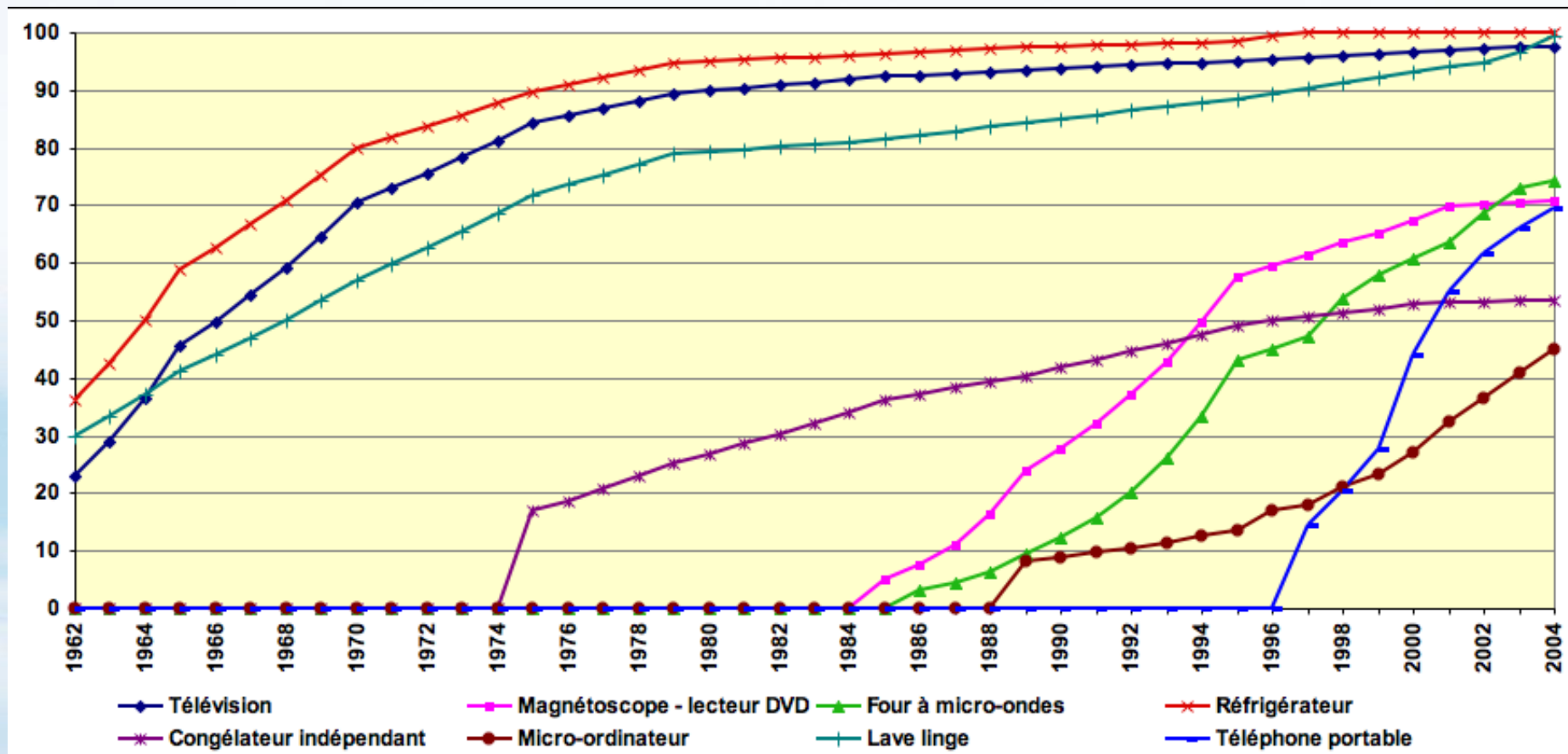
# Se passer de pétrole ou vider son logement, c'est pareil



© 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**

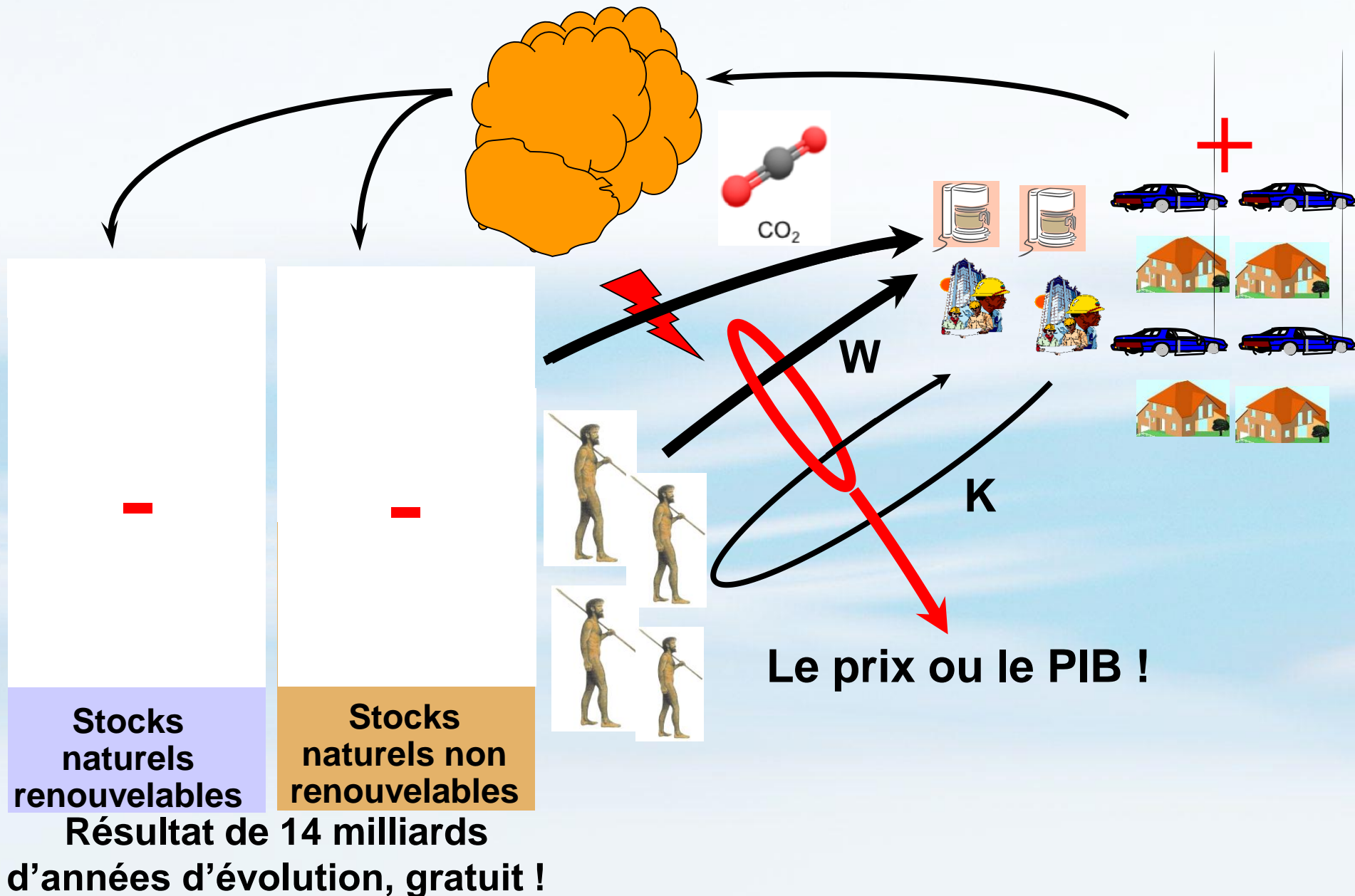
**Et quelques déplacements supplémentaires pour les enfants...**

**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 CO<sub>2</sub> par an -> l'hôpital est sous perfusion d'énergie !**



# L'économie mondiale en un clin d'œil



**Si nous sommes ici, c'est un peu à cause de lui...**



**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 !)



# Systeme 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

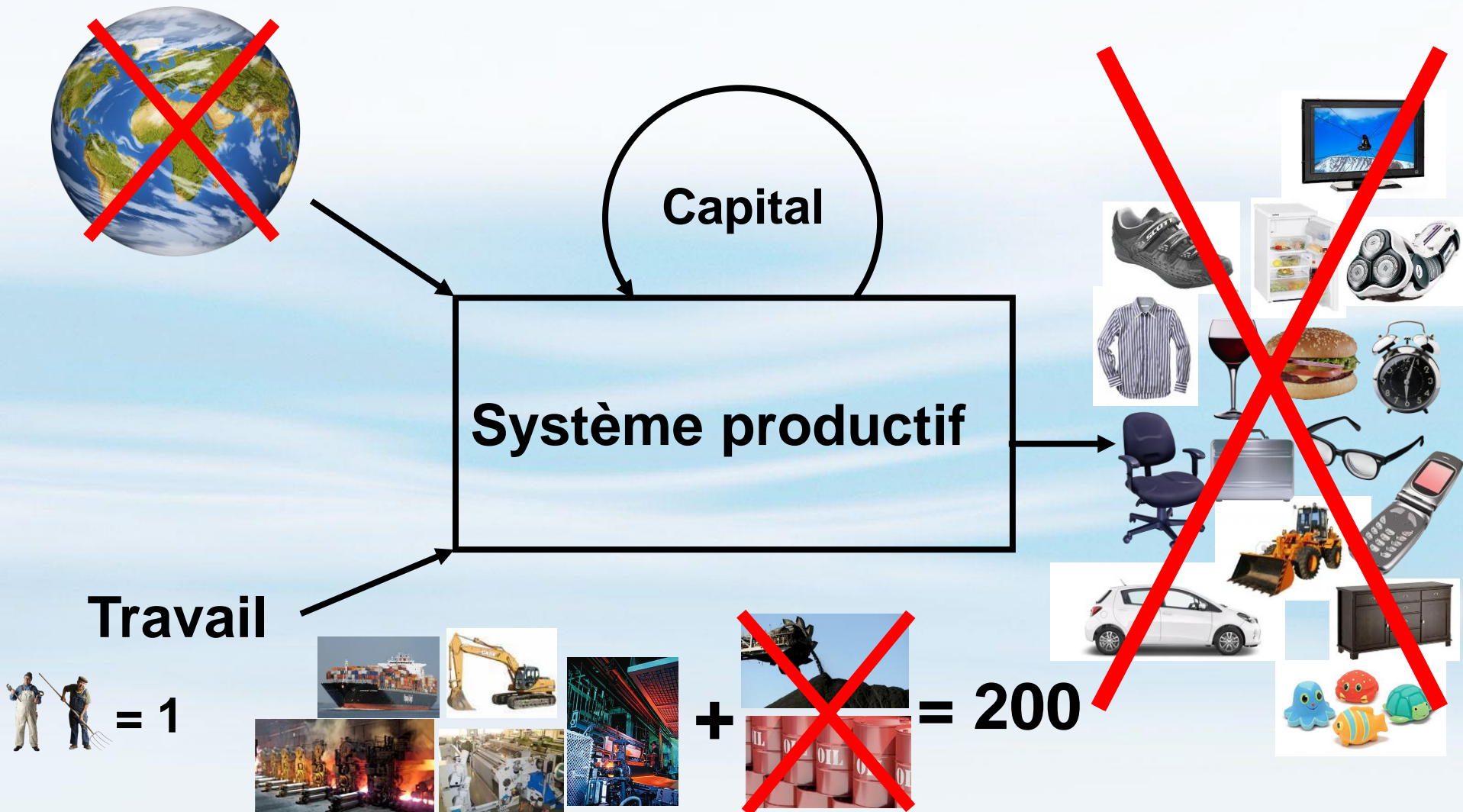
19 840 000

FORCE TOTALE INDUSTRIELLE

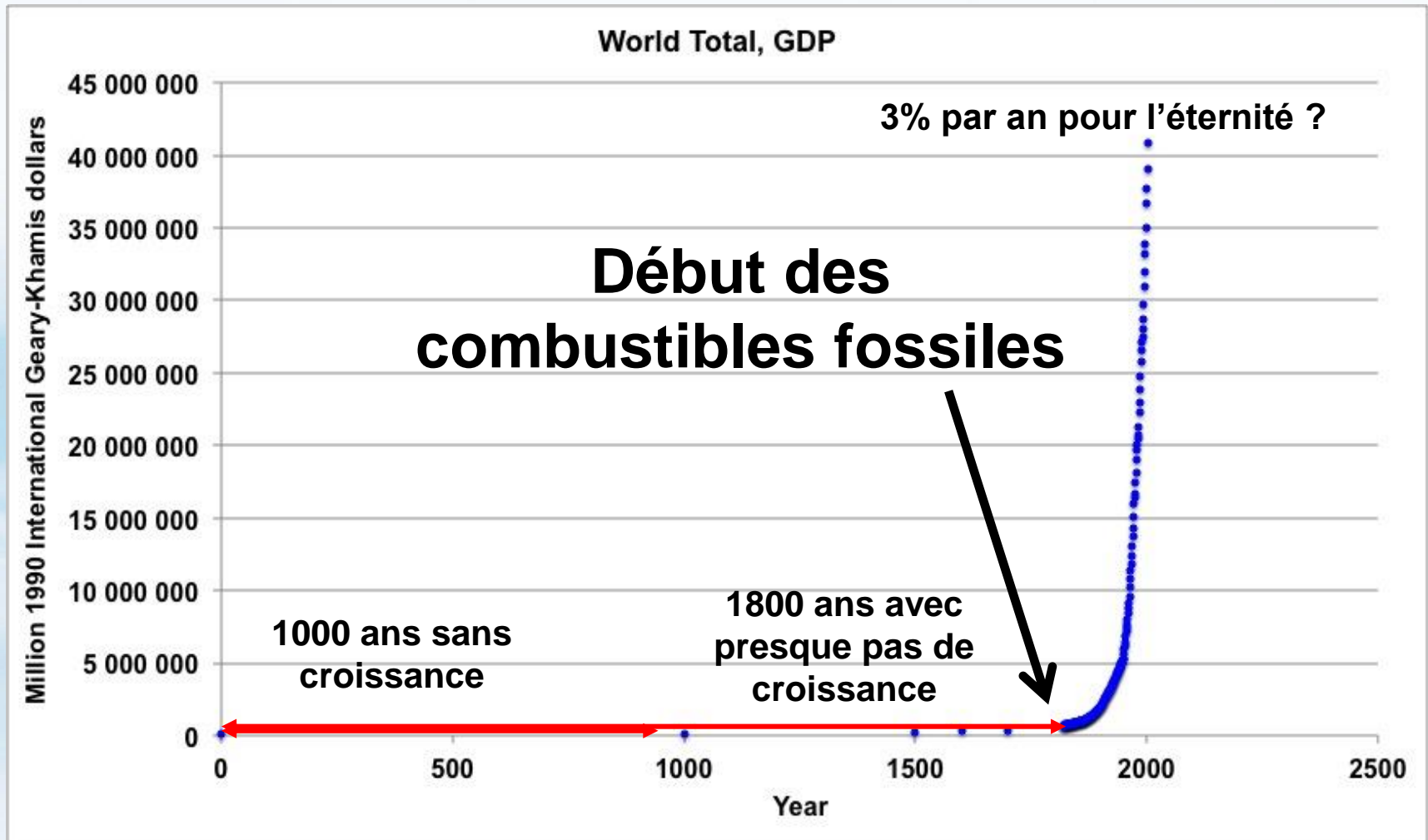
11 536 352

27 115 497

# En fait, il vaut mieux avoir de la ressource !



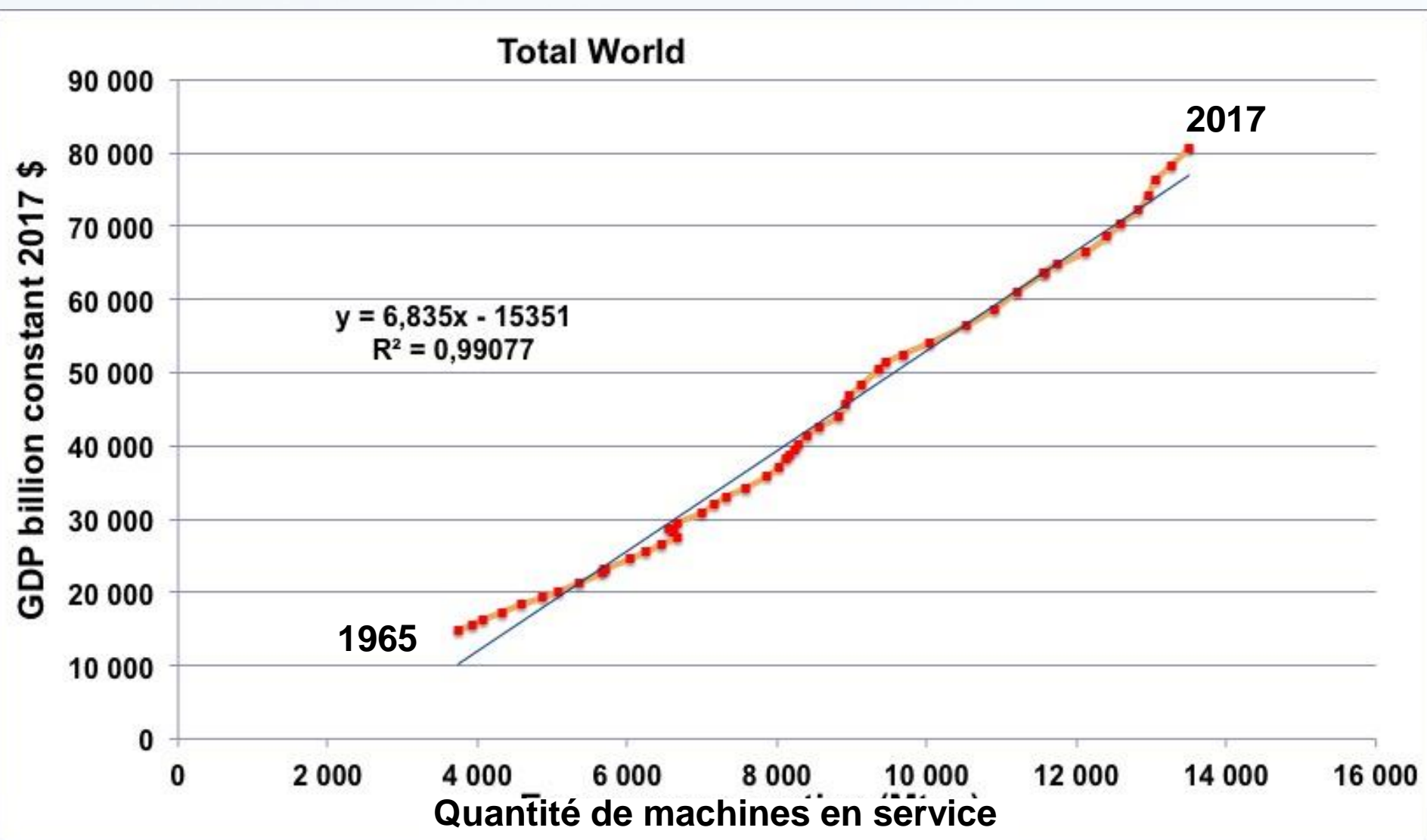
# Les promesses électorales étaient plus faciles il y a 1000 ans



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

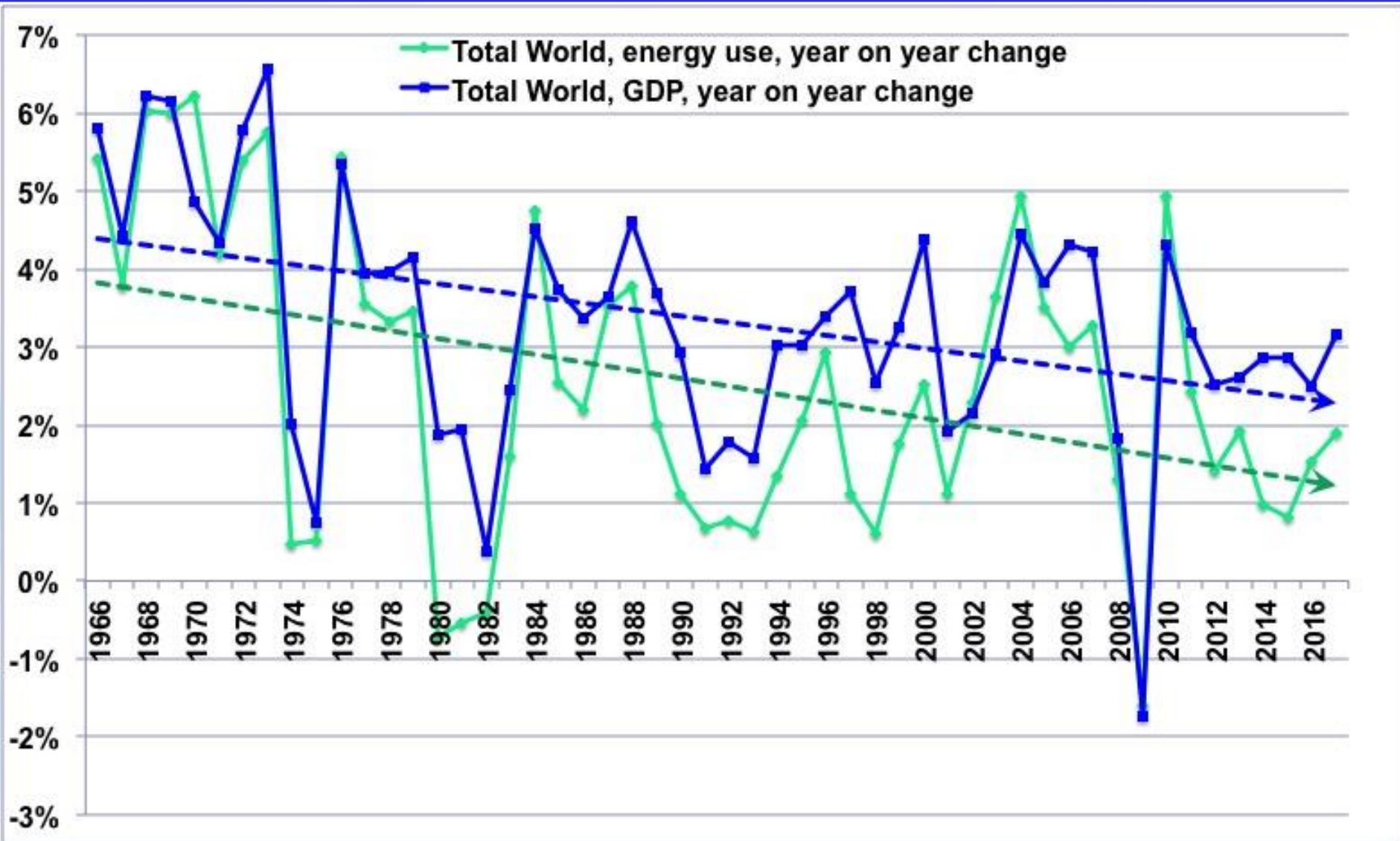


# Le meilleur modèle macro-économique du monde : une droite



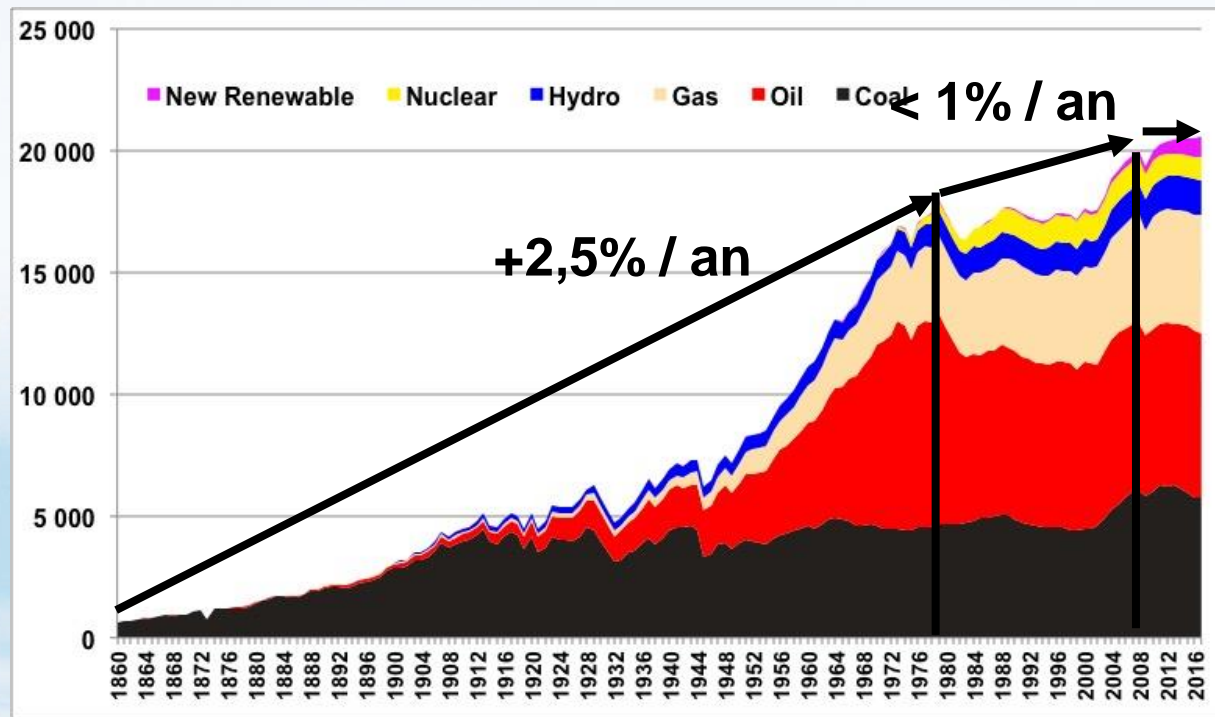
**Energie consommée (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde. Données primaires World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie**

# 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 rescousse la tertiarisation et la dette

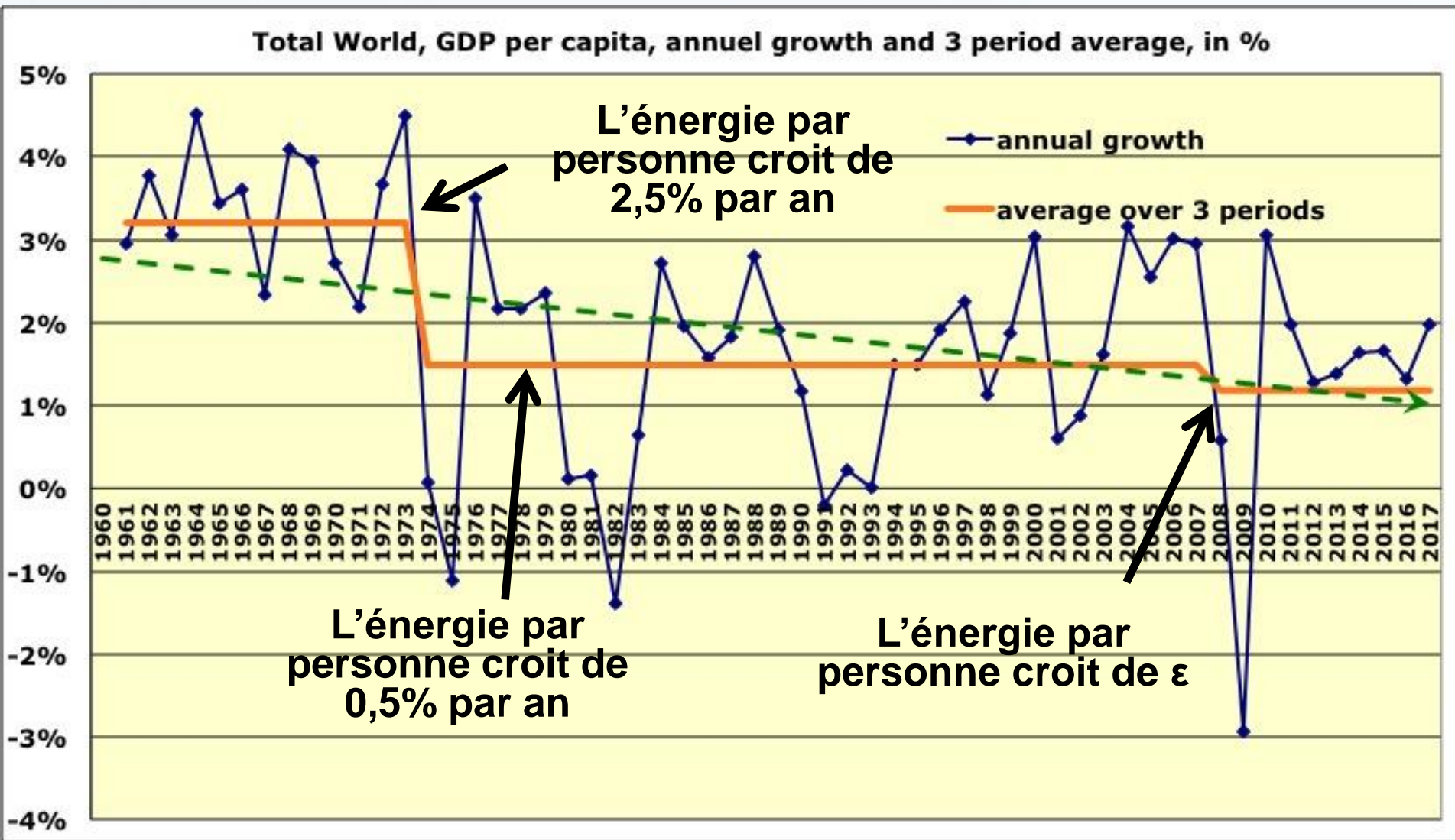
Midas part en vacances, la dette explose, le taux d'emploi baisse, les inégalités s'accroissent...

**<=> 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%**

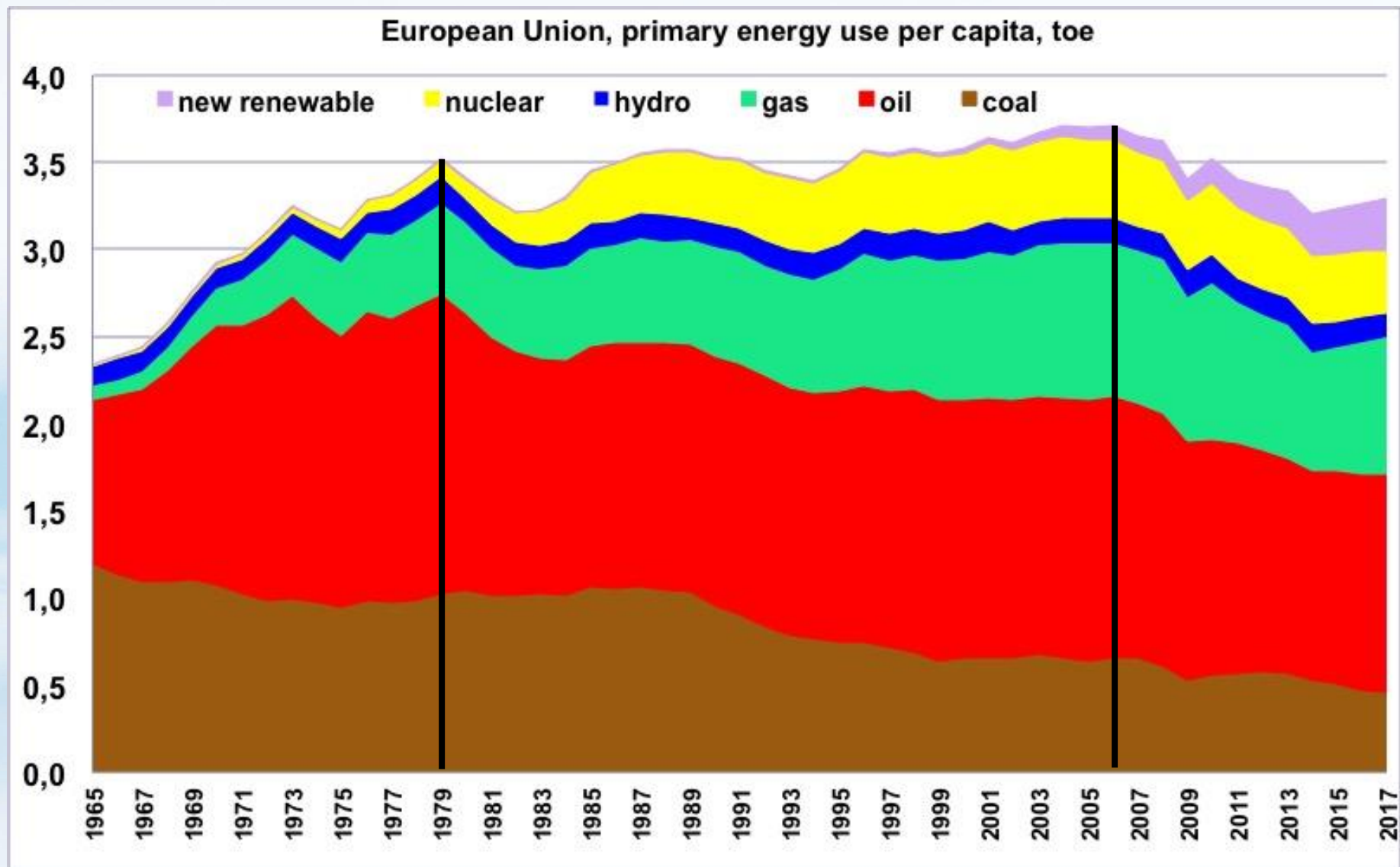
**<=> chaque année, la production économique par personne augmente d'au moins 2,5%**





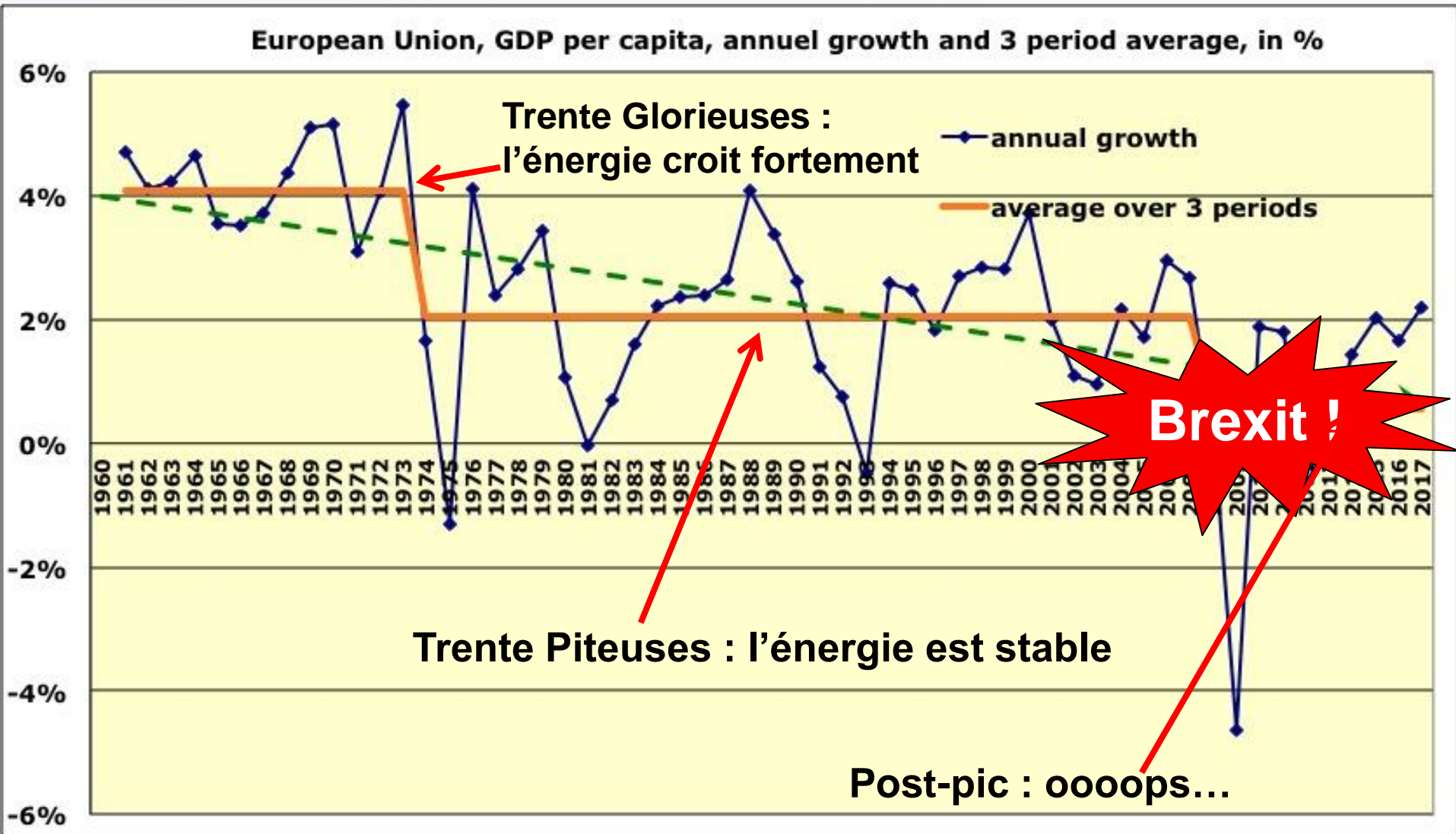
Variation annuelle du PIB par personne en moyenne mondiale. Jancovici, sur données World Bank.

# Sécurité d'approvisionnement ? Quelle sécurité ?



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

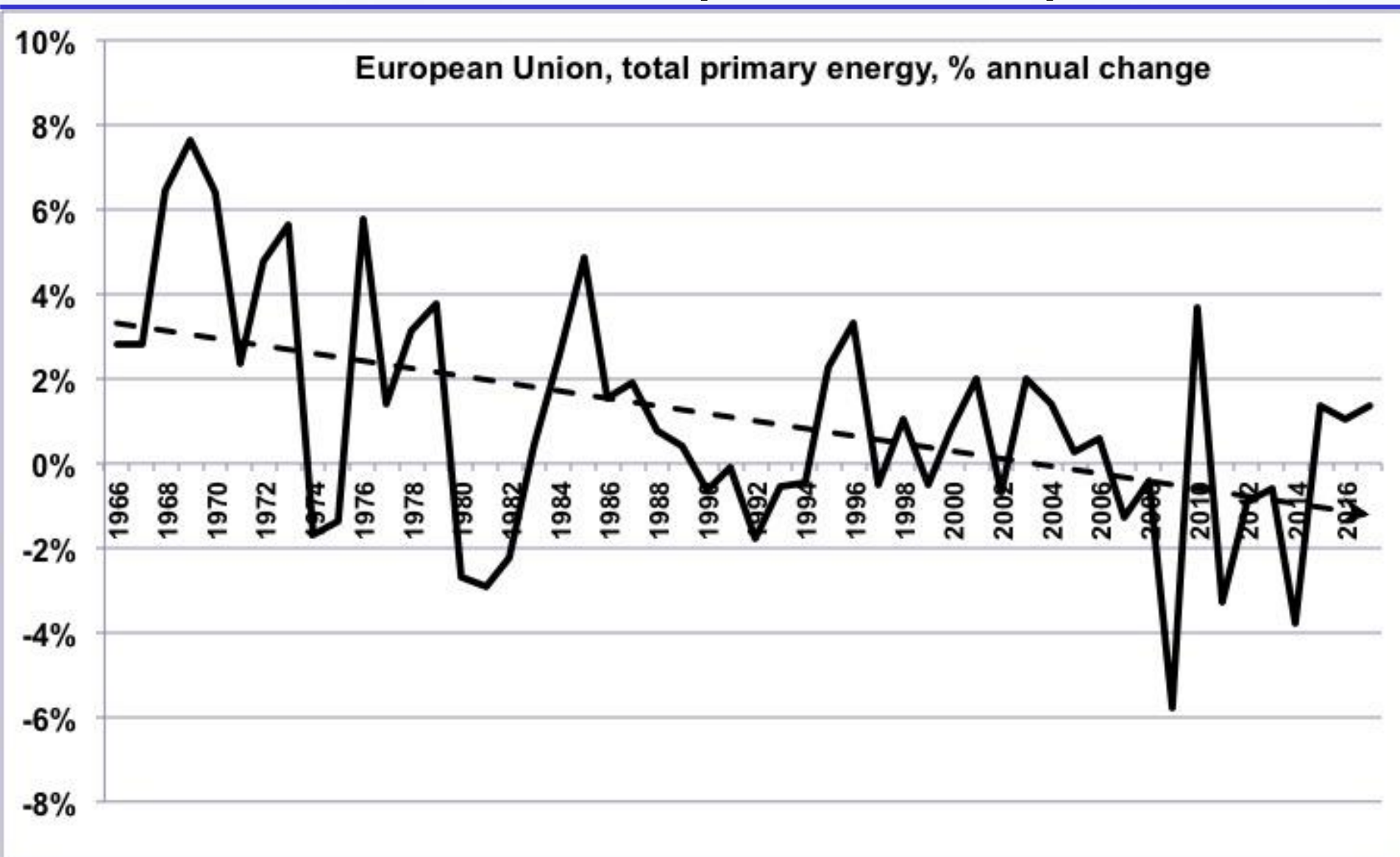
# C'est (à nouveau) la valse à trois temps



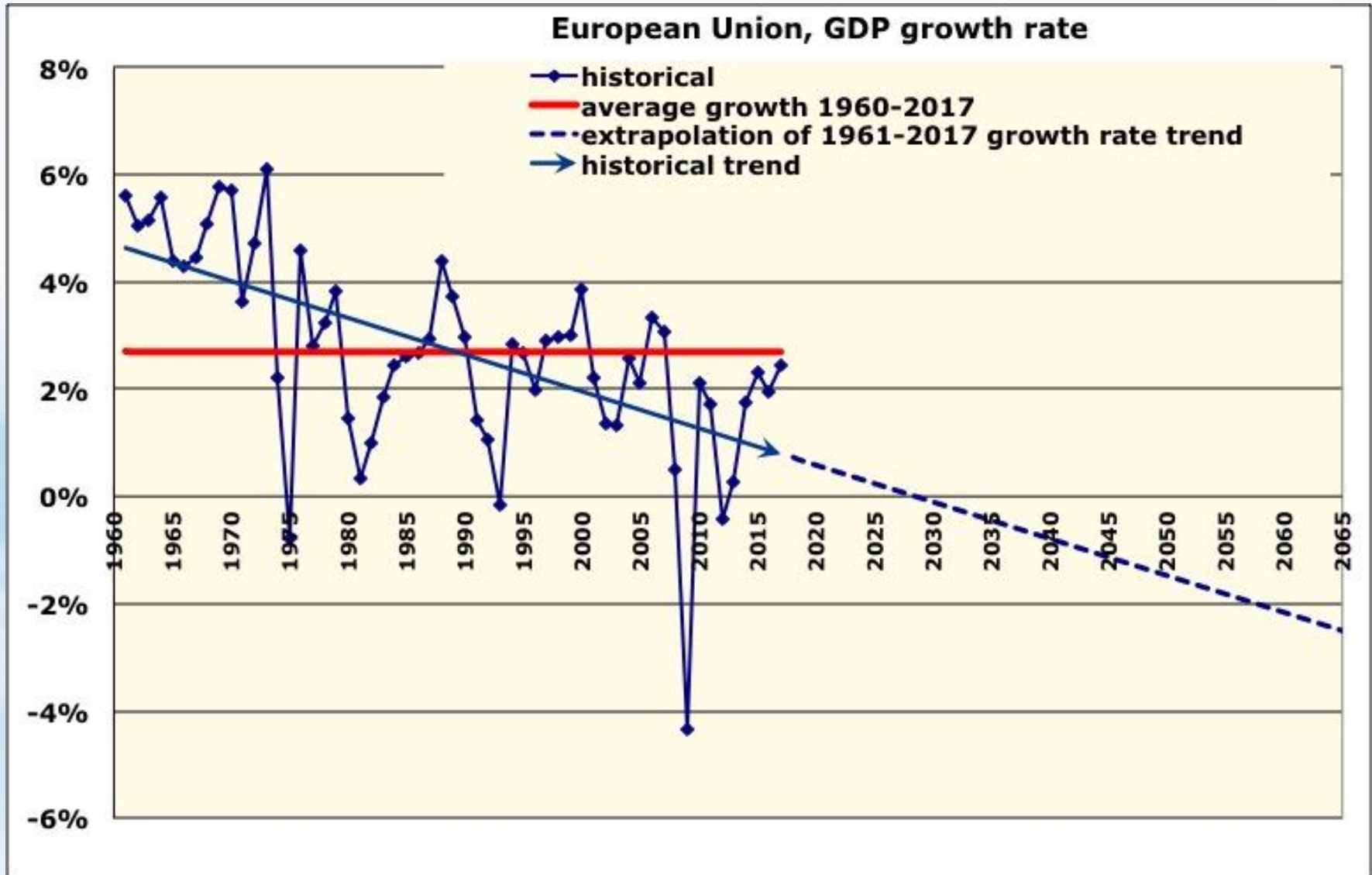
Variation annuelle du PIB par personne en Europe. Jancovici, sur données World Bank.



# Une pédale de frein pour les kWh....

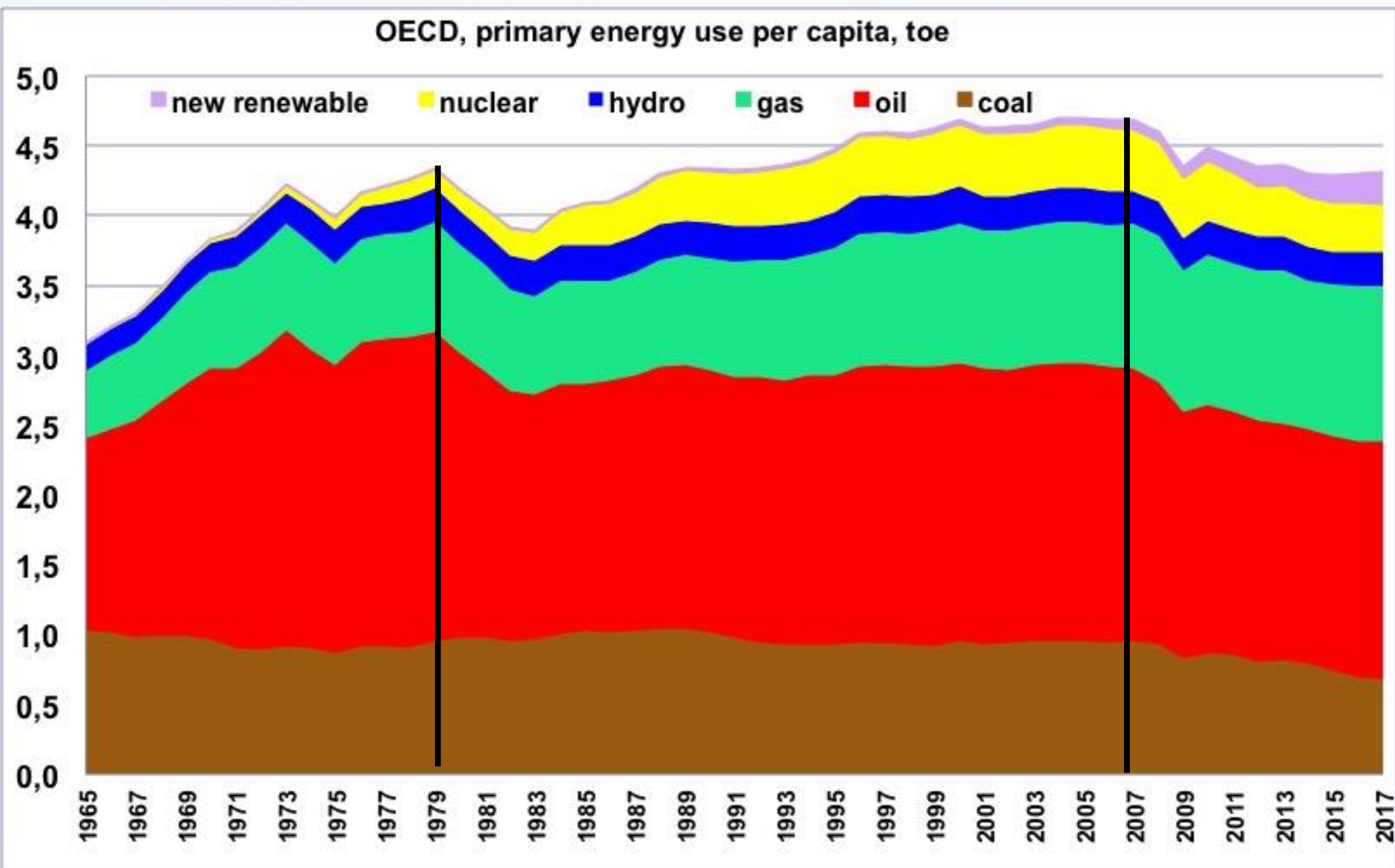


**Variation de la consommation d'énergie en Europe depuis 1966. Données BP Statistical Review 2011, traitement par l'auteur.**



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

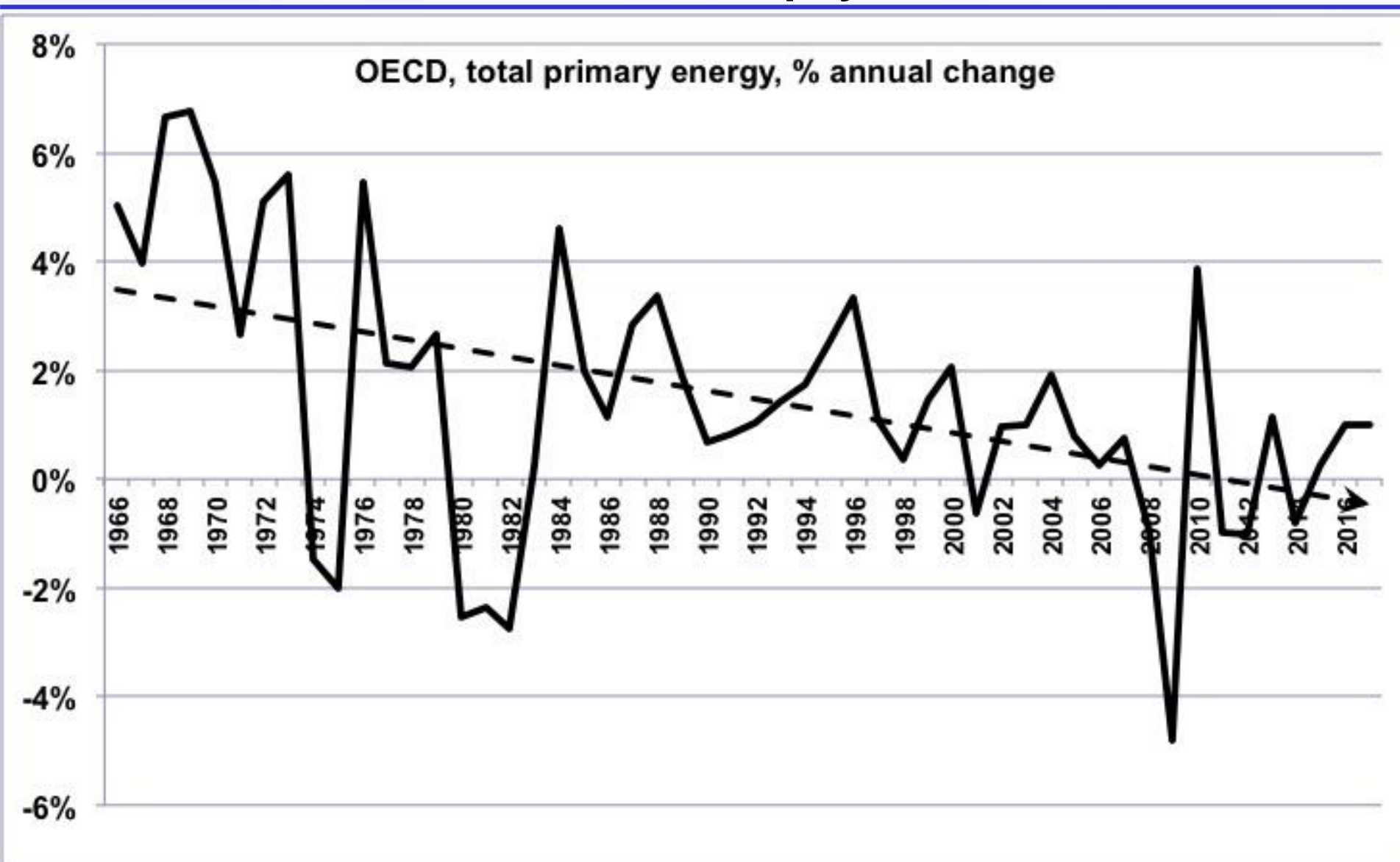
# Nous ne sommes pas seuls !



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

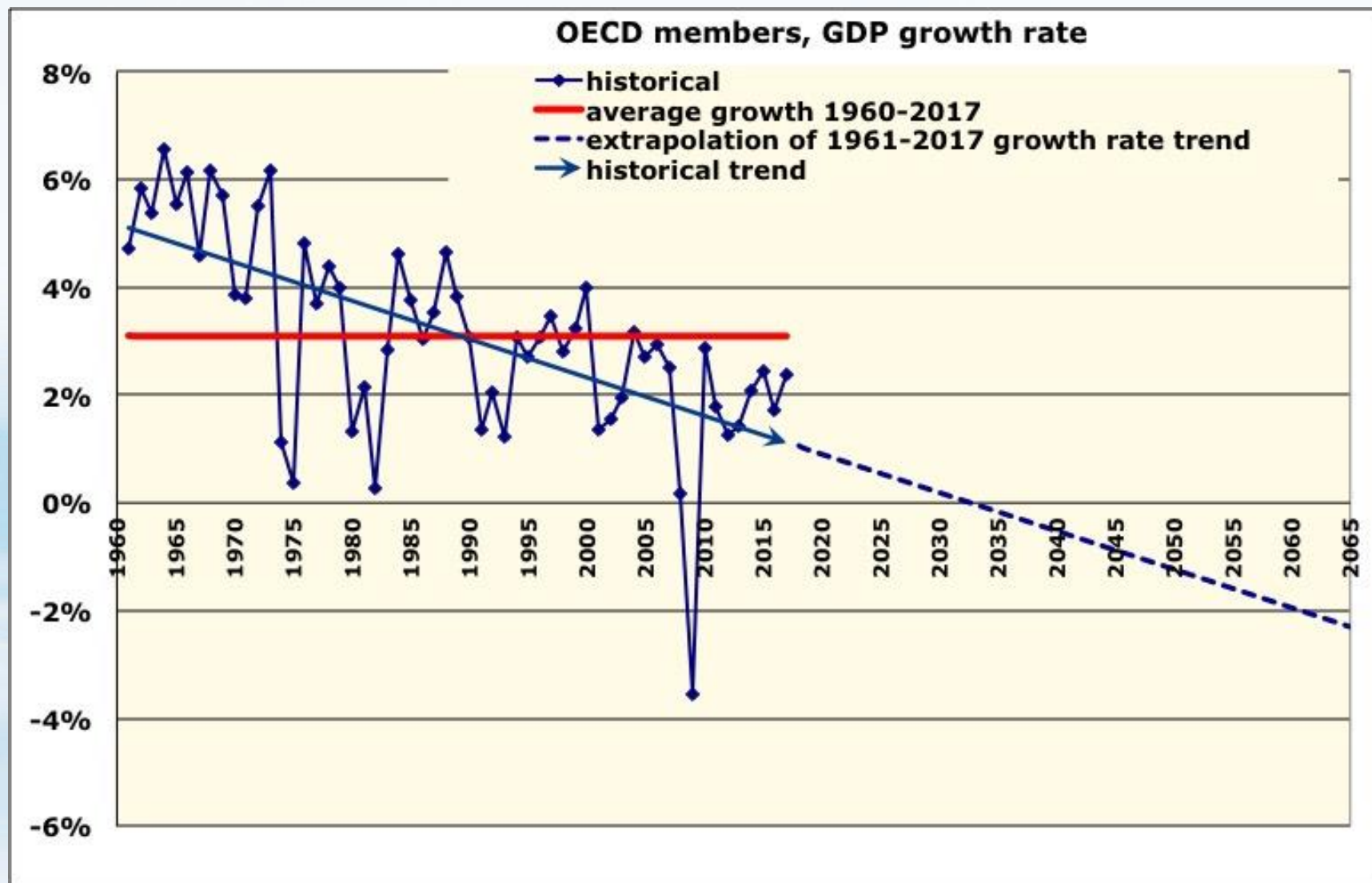


# Tous les pays « riches » ralentissent



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

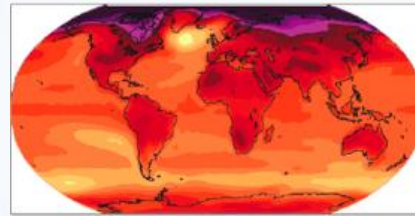
**...et une partie de votre carrière se fera « dans l'autre sens »**



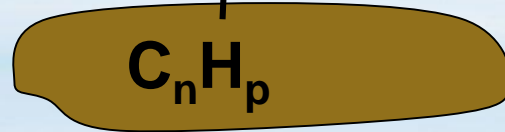
**Taux de croissance du PIB de la zone OCDE sur la période 1960-2017 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank**

## Boum ?

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



O<sub>2</sub>



Gratuit !!

= PIB



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

## Crac ?

