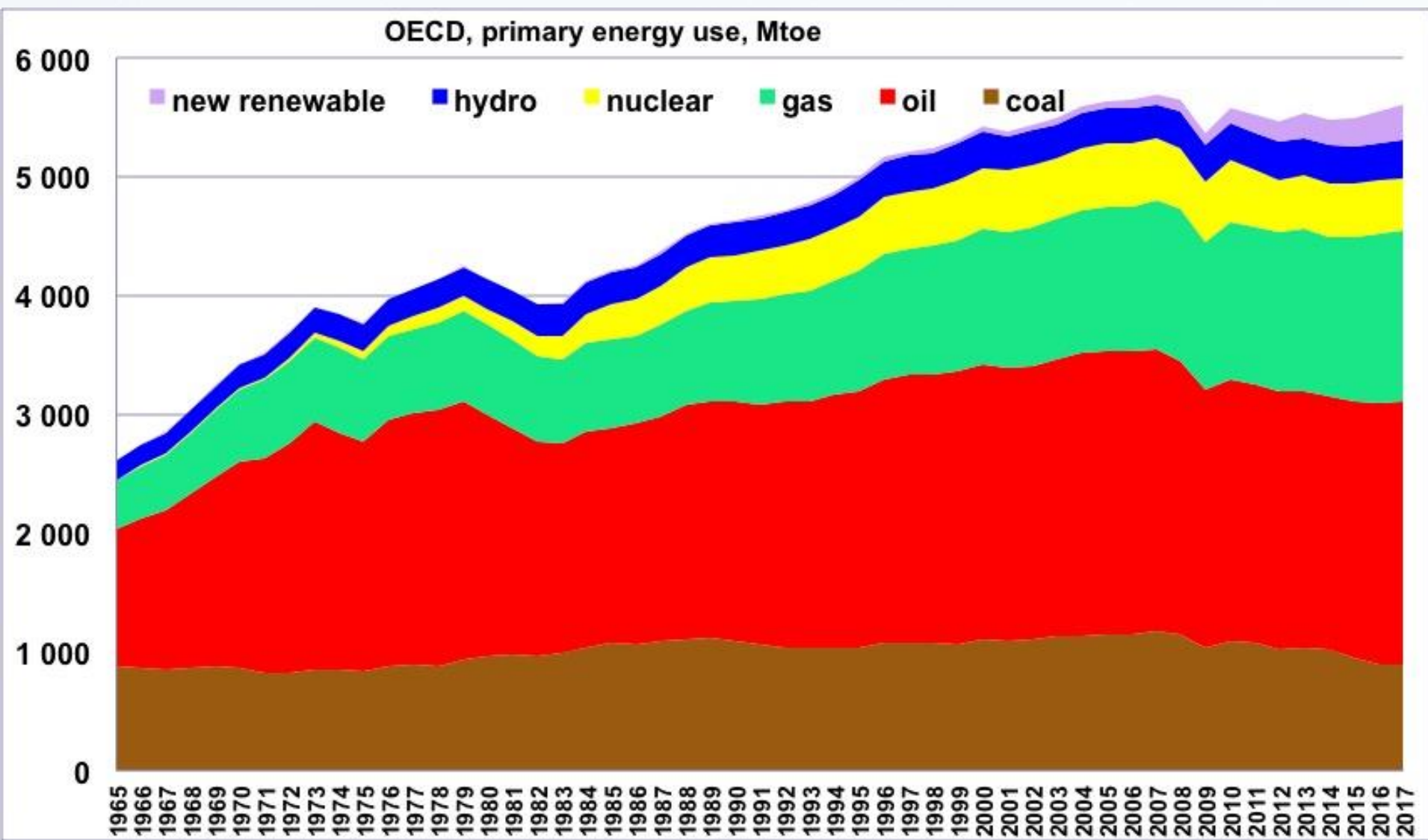


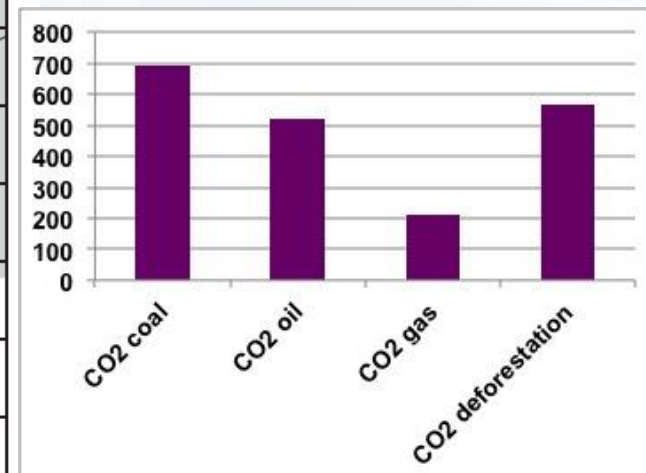
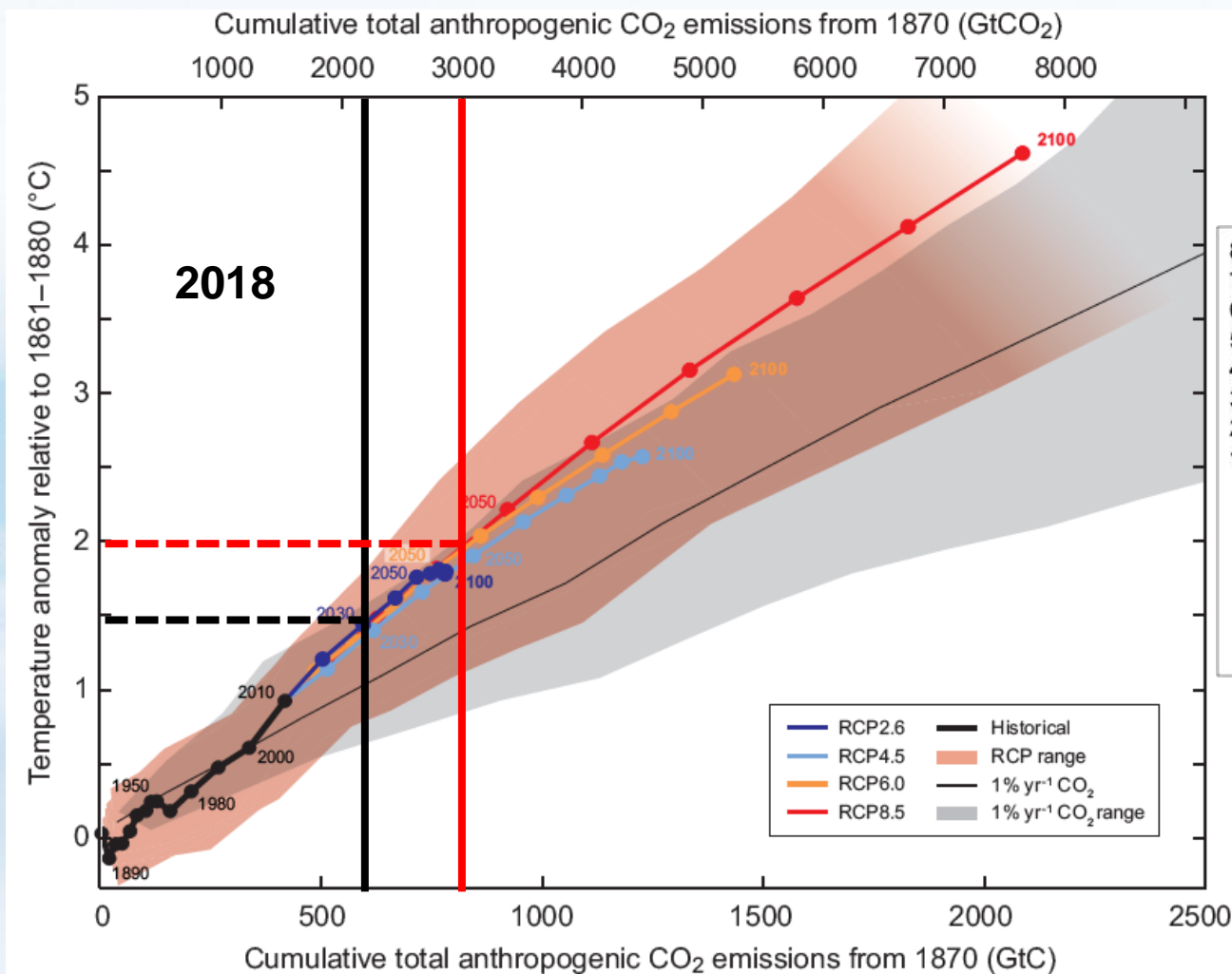
# Éléments de base sur l'énergie au 21<sup>è</sup> siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech 2019**  
**Partie 5 - économies, quelles économies ?**

# Une première raison de faire des économies

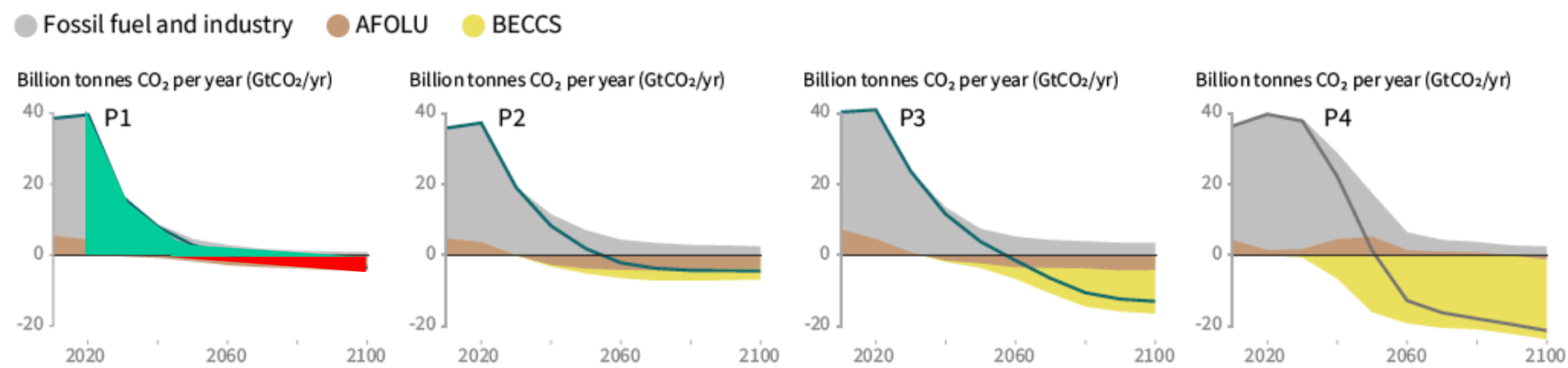




Emissions cumulées de CO<sub>2</sub> depuis 1870 en Gt

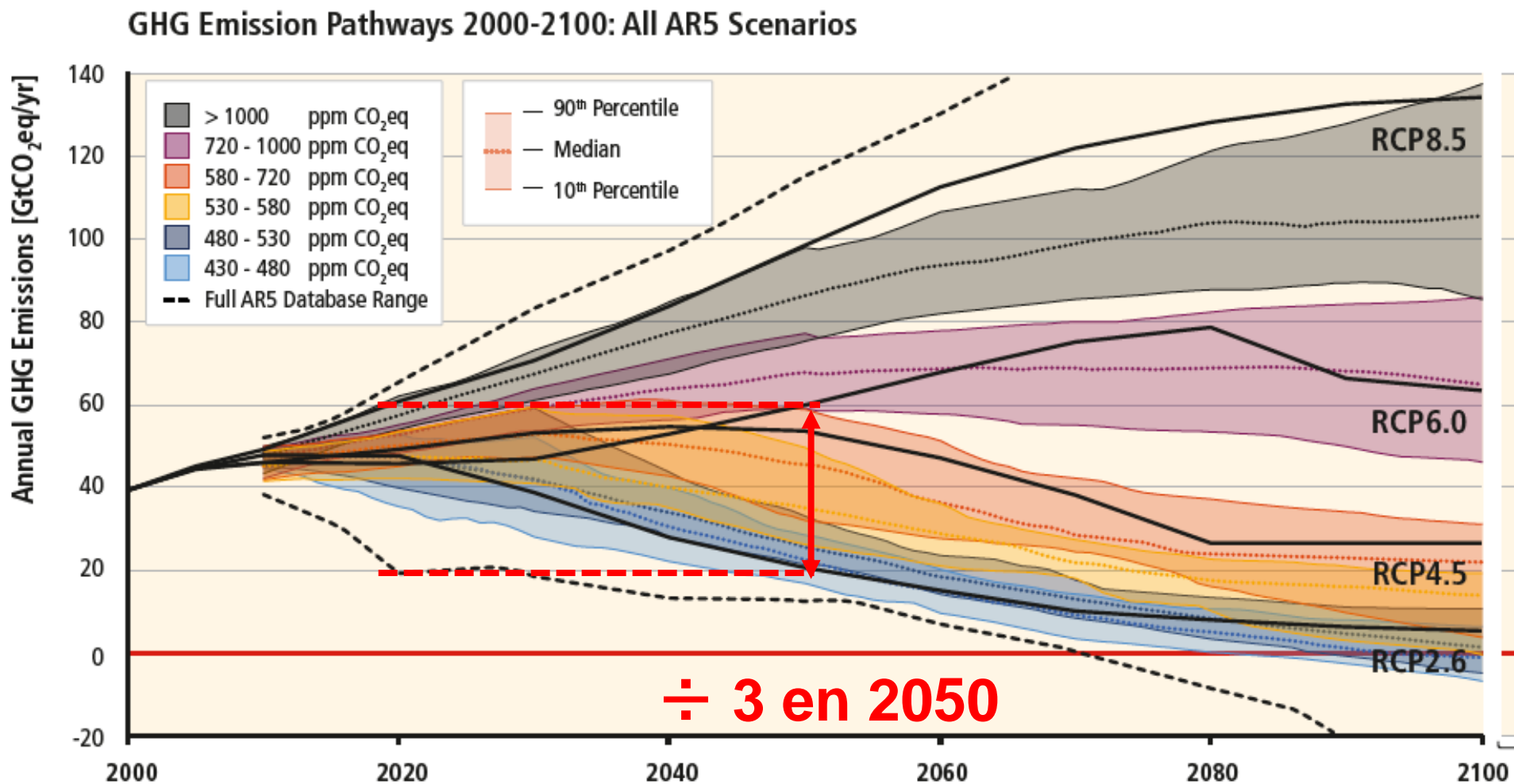
Élévation de température en 2100 en fonction du cumul émis depuis 1870. IPCC, 2015

# 1,5° C : si on émet encore, il faudra séquestrer



**Scénarios permettant de limiter la hausse à 1,5 ° C. IPCC, 2018**

# 2° C, fingers in the nose ?



Scénarios RCP. IPCC, 2018



# **Au restaurant « Le bon développement durable », plat unique**

**20 milliards de tonnes de CO2-eq pour 7 milliards d'individus, cela fait 3 par personne, pour 9 milliards, en gros 2**

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

**faire 15 000 km en avion (un A/R Paris-Chicago)**

**ou consommer de 4 000 kWh d'électricité en Allemagne, mais 20 000 kWh en France (consommation annuelle moyenne par Français : environ 8 000 kWh),**

**ou acheter 10 à 500 kg de produits manufacturés (en France  $\approx$  2 000 à 6 000 euros de produits industriels, 8 000 à 15 000 euros de services)**

**ou construire 4 à 5 m<sup>2</sup> de logement,**

**ou brûler 7 000 kWh de gaz naturel, en tenant compte des émissions amont (quelques mois de chauffage d'un logement).**

**ou parcourir  $\approx$  6000 à 8000 km en zone urbaine en voiture « moyenne » (2 fois moins en 4x4)**

Source : Jancovici, 2019

# Vous êtes plutôt final, ou plutôt utile ?

## Primaire

Charbon  
brut

Pétrole  
brut

Gaz  
brut

Noyaux  
fissiles

Bois, soleil,  
géothermie,  
vent...



## Final

Boulets,  
coke...

Carburants  
raffinés

Gaz  
purifié

Electricité

Vapeur, eau  
chaude...



## Utile (et \$ €)

Mouvement

Chaleur

Transformation

Travail !

+ pertes  
**5% à 75%**

+ pertes  
**Jusqu'à 80%**

# Prenons un exemple



**30% à 45%**



**92%**



**> 1**





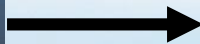
# Prenons un exemple (bis)



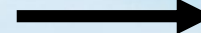
**95% à 65%**



**85%**



**20% à 40%**



**< 5%**

# Économies ? Quelles économies ?

**J'obtiens les mêmes services avec moins d'énergie -> Efficacité**

Je parcours la même distance, dans une voiture de même puissance et même capacité, mais elle consomme moins grâce à des améliorations techniques

J'ai le même espace habitable, mais la performance thermique de mon logement est meilleure

J'achète la même quantité de poulets, de chemises et de billets de cinema, mais ils ont été fabriqués avec des processus plus efficaces

**J'utilise délibérément moins de services, et du coup il faut moins d'énergie pour me les fournir -> Sobriété**

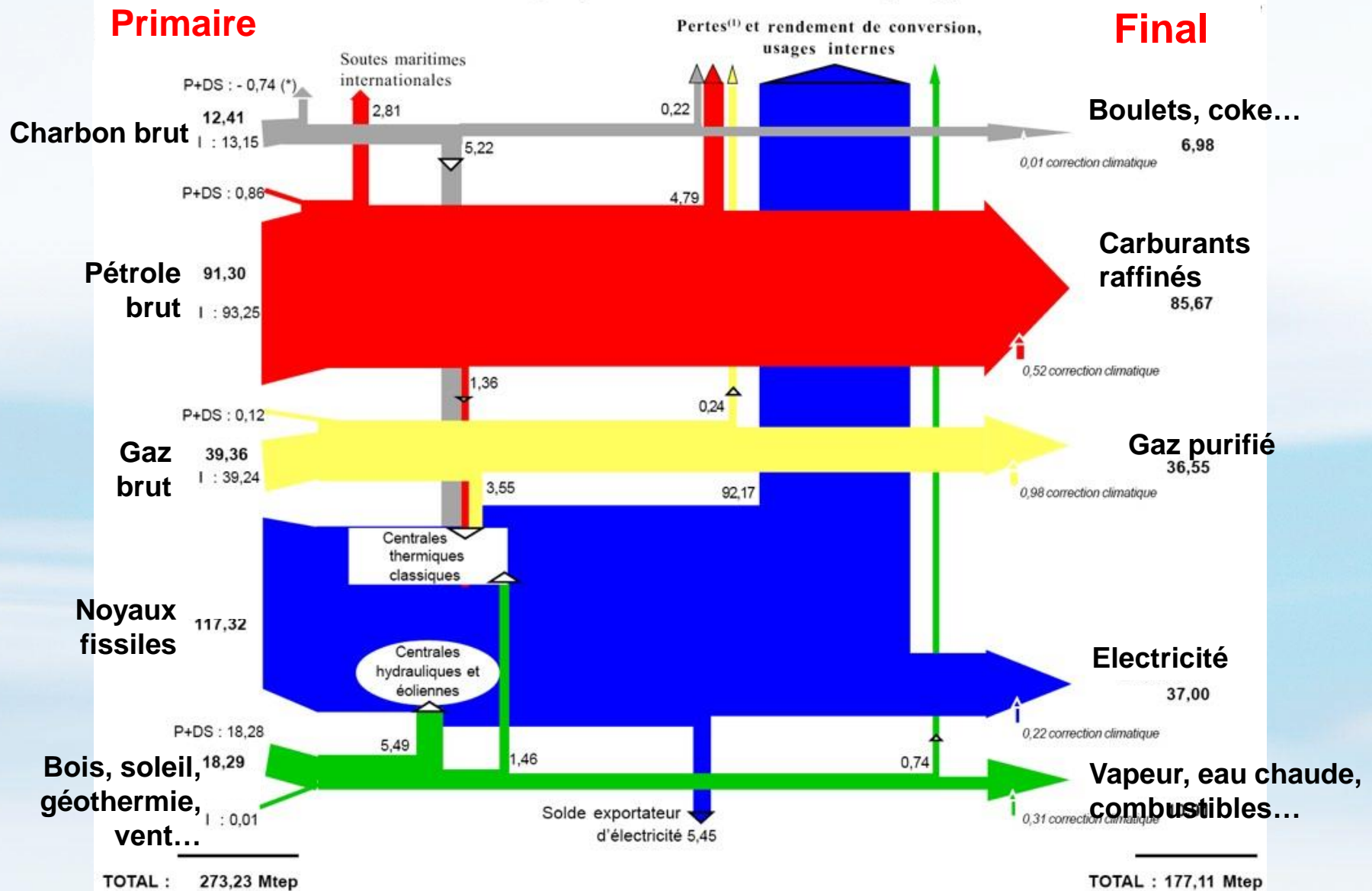
Je conduis moins, ou dans une plus petite voiture (moins puissante ou moins grande)

Je diminue mon espace habitable (co-location, appartement plus petit...)

J'achète moins de poulet, de crème de soins, mes enfants vont moins tard à l'école et j'accepte d'attendre à l'hôpital

**J'utilise moins de services, et du coup il faut moins d'énergie pour me les fournir... mais je le fais de manière subie -> Pauvreté**

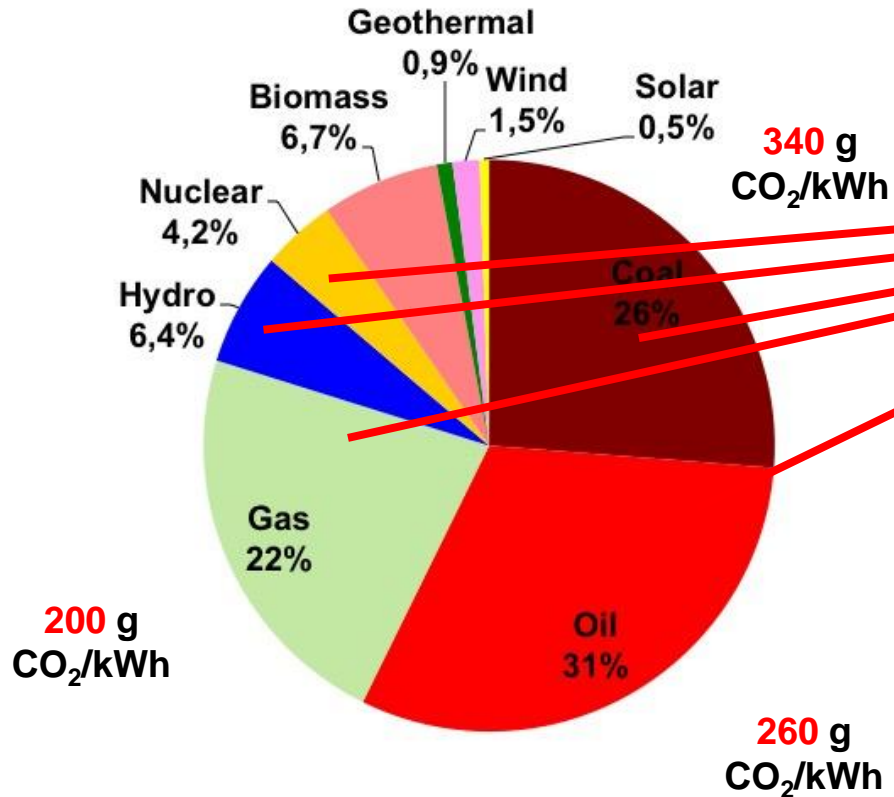
# Vous êtes plutôt primaire, ou plutôt final ?



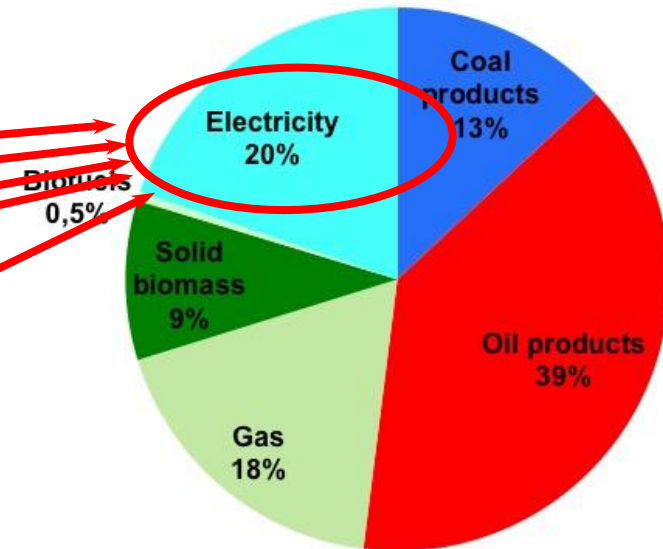
Et peut-être un jour H<sub>2</sub>, air comprimé...

# Energie primaire = carbone, ou presque

World primary energy consumption, 2016



Final energy by type, 2016

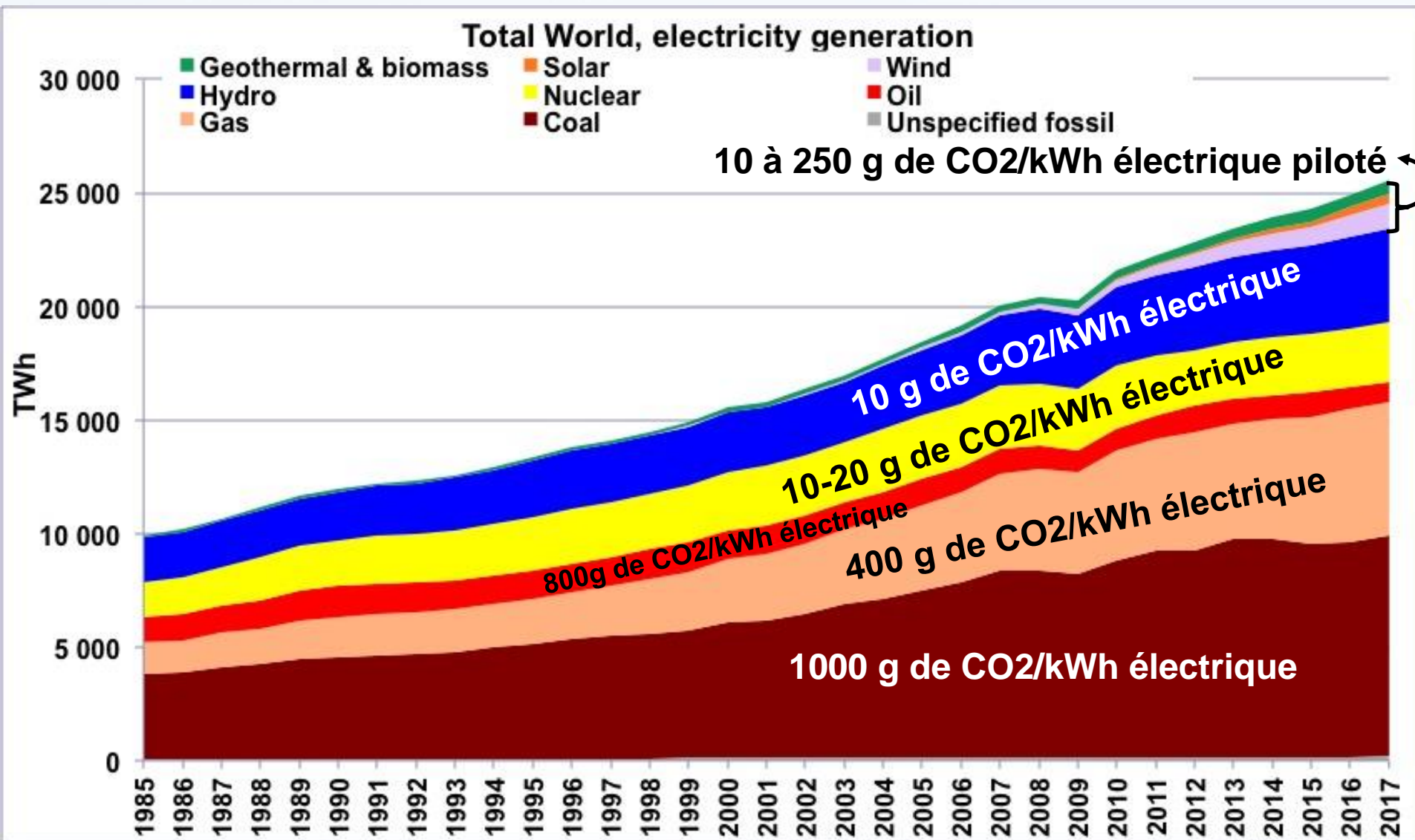


**14,2 Gtep** primaire → **9,5 Gtep** final

Bilan énergétique mondial en 2016 - Source : BP Stat 2017 + calculs de l'auteur



# L'électricité sent plus fort le carbone que le panneau



Évolution de la production électrique mondiale entre 1985 et 2017. Source BP Statistical Review

# Dans l'enfer de la règle de trois

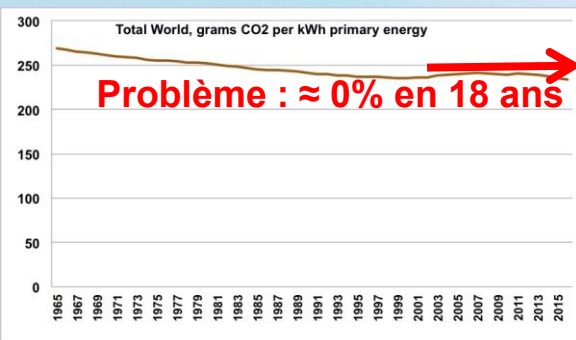
L'équation de Kaya :

**A diviser par > 3 d'ici 2050...**

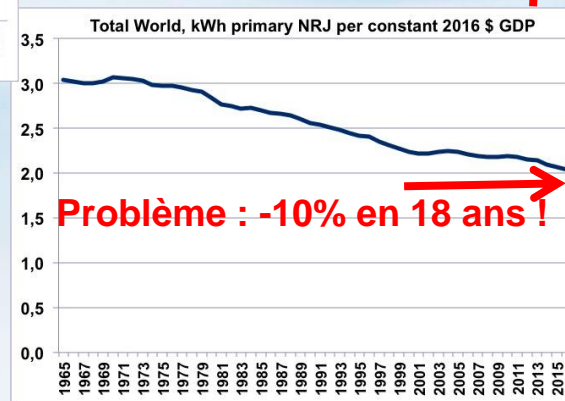
**et le sera !**

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

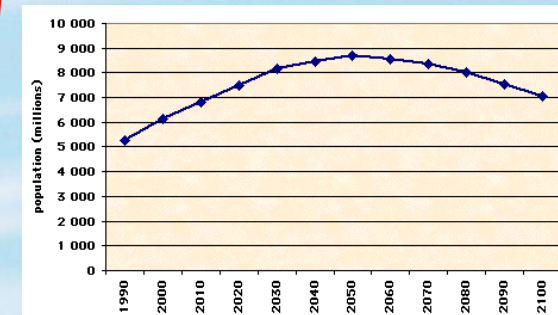
Emissions de gaz carbonique = Contenu en gaz carbonique de l'énergie \* Intensité énergétique de l'économie \* Production par personne \* Population



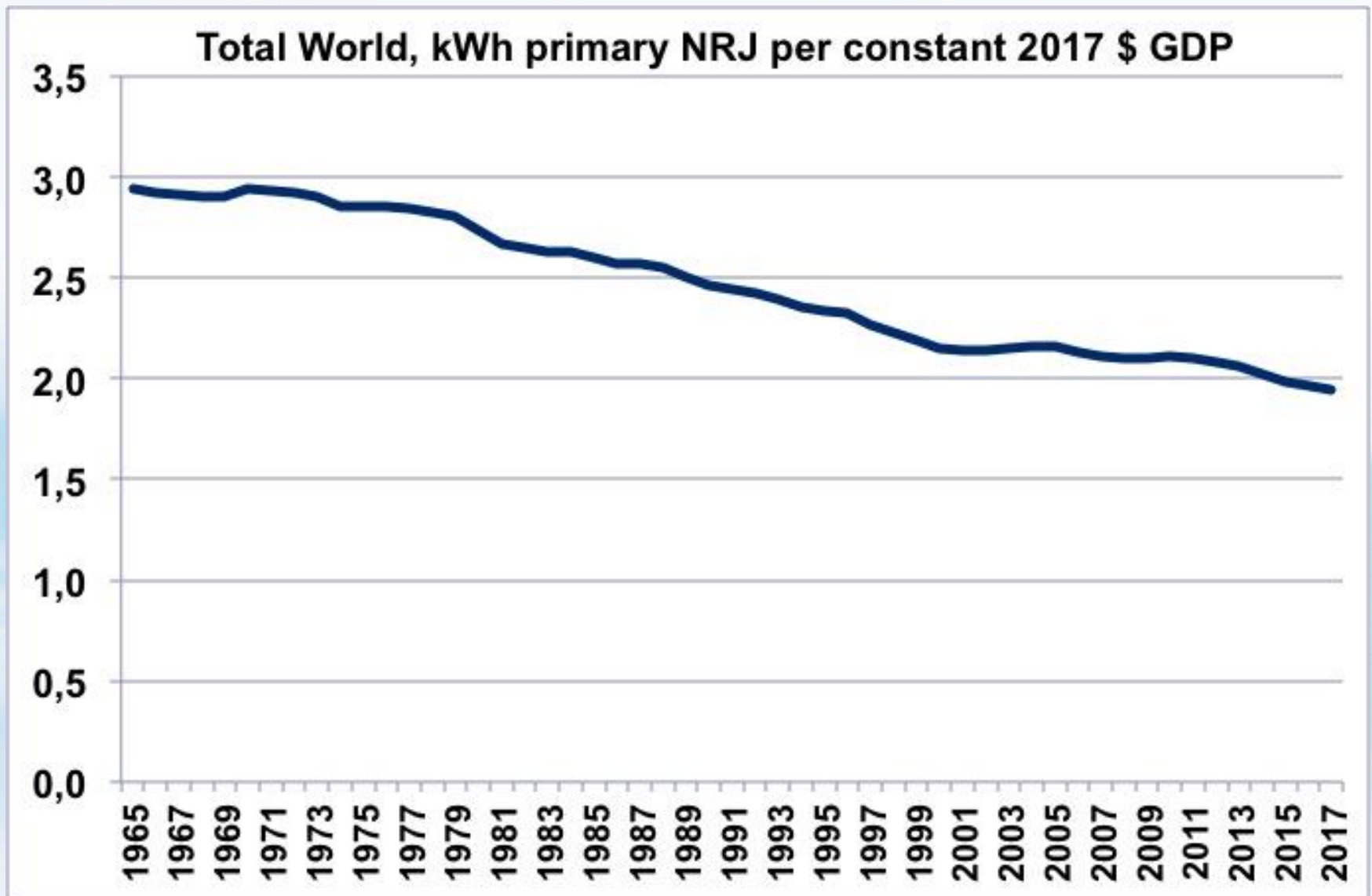
**Magic technique N° 2**  
: ↘ CO<sub>2</sub> par kWh =  
nuke, ENR, CCS &  
charbon vers gaz



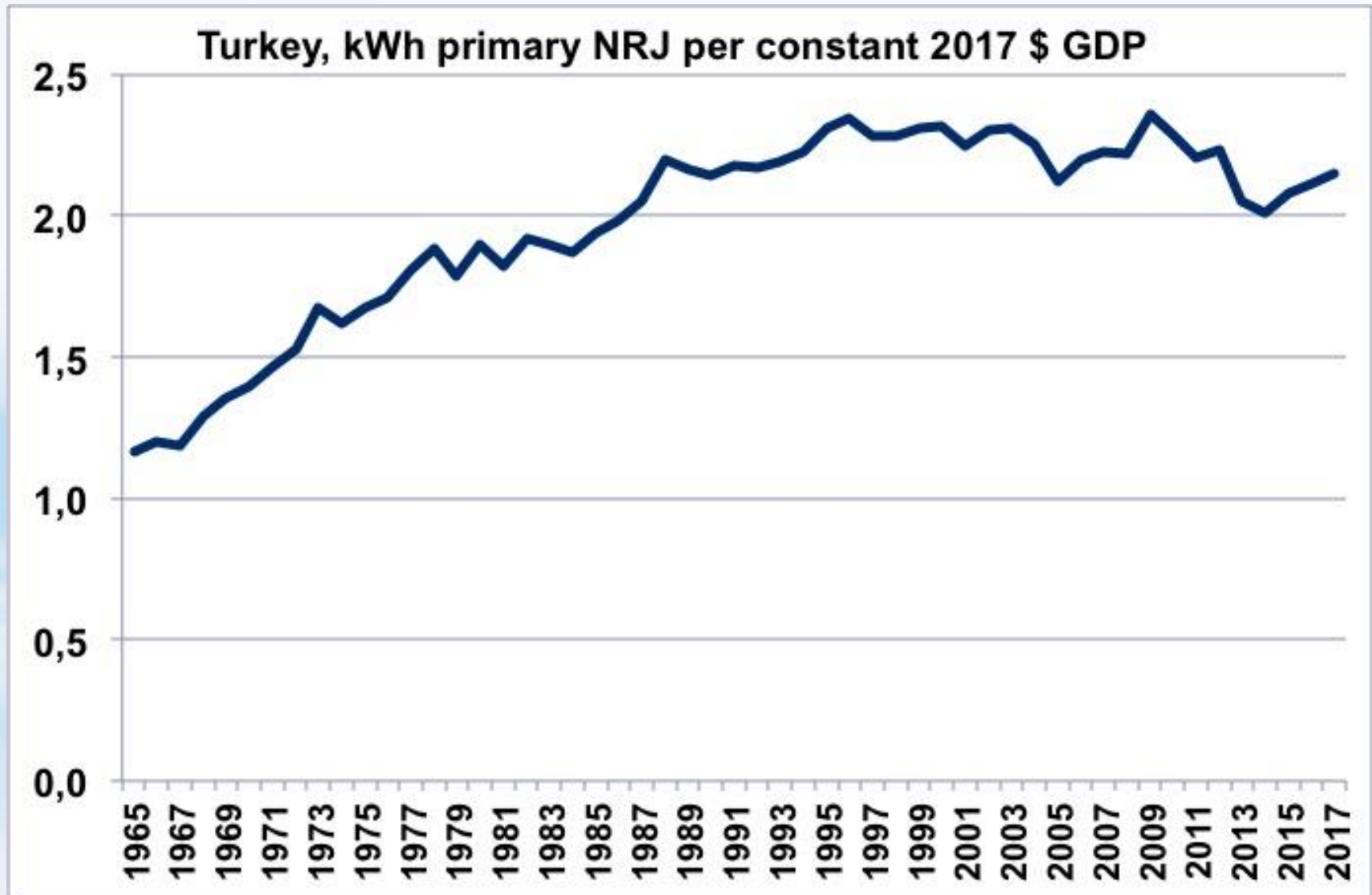
**Magic technique N° 1 :**  
↘ NRJ par \$ de PIB



+ 2% par an = x 1,9 en  
32 ans ; + 4% par an =  
x 3,5 en 32 ans !!!

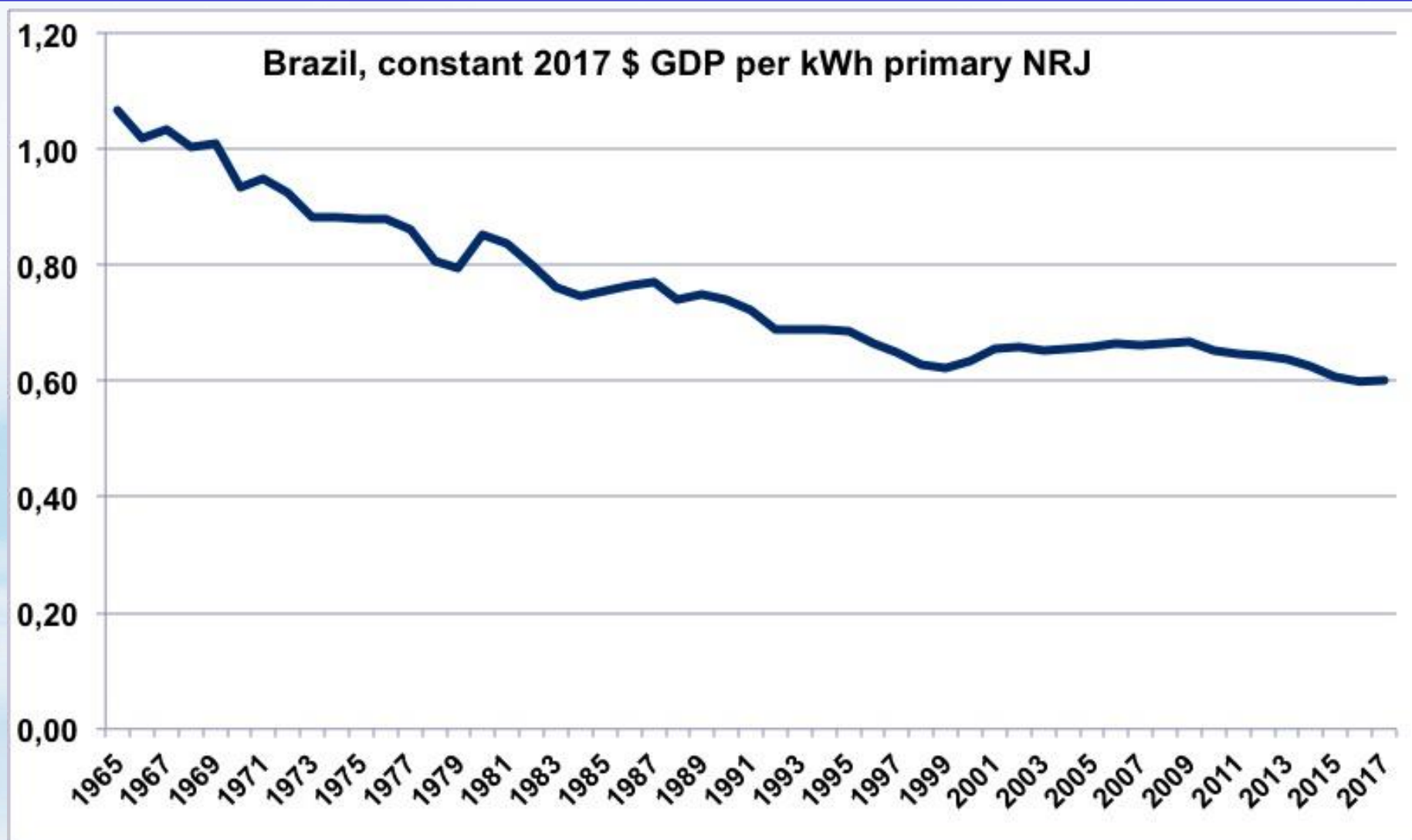


kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

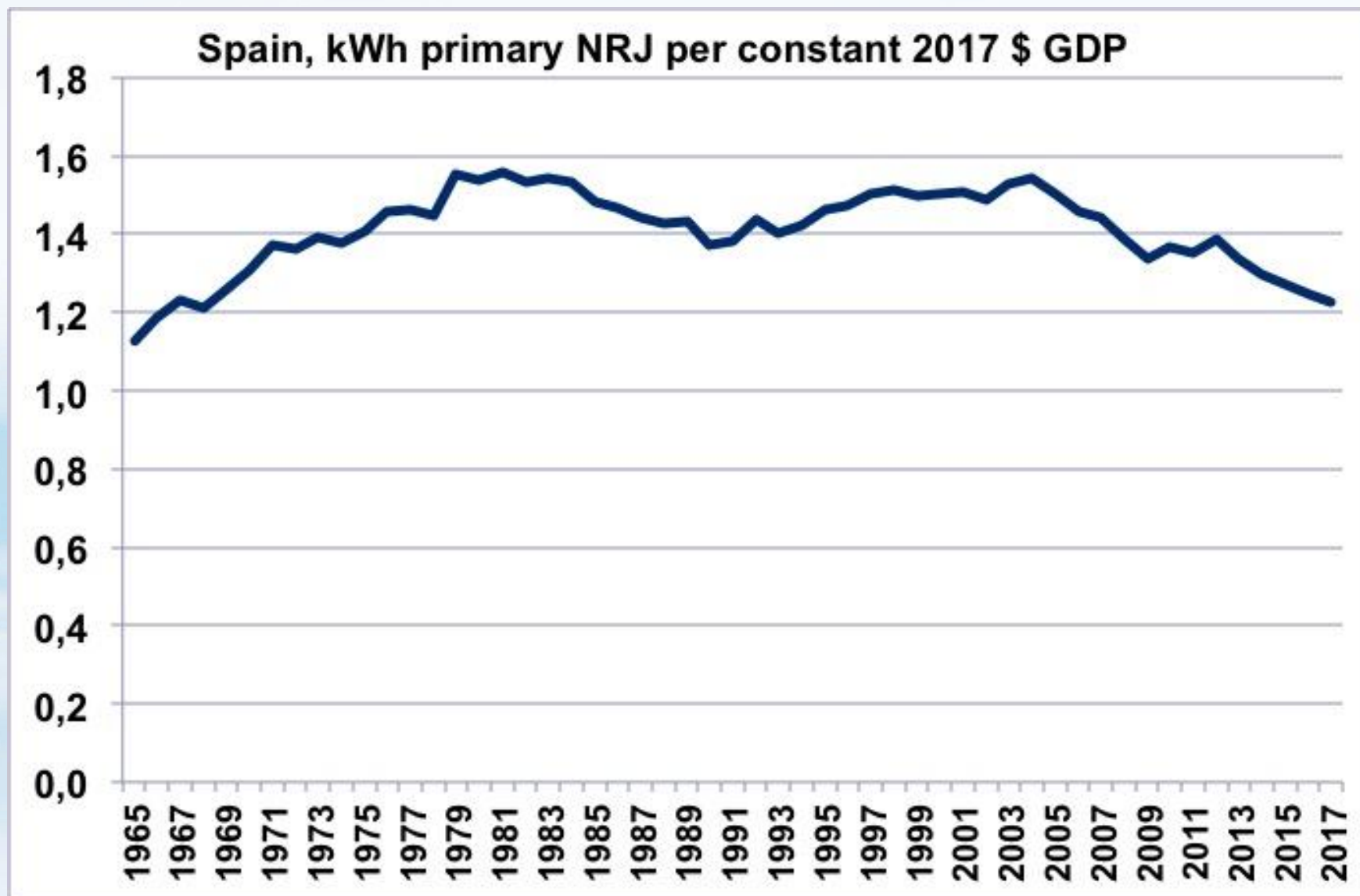


kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Turquie. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

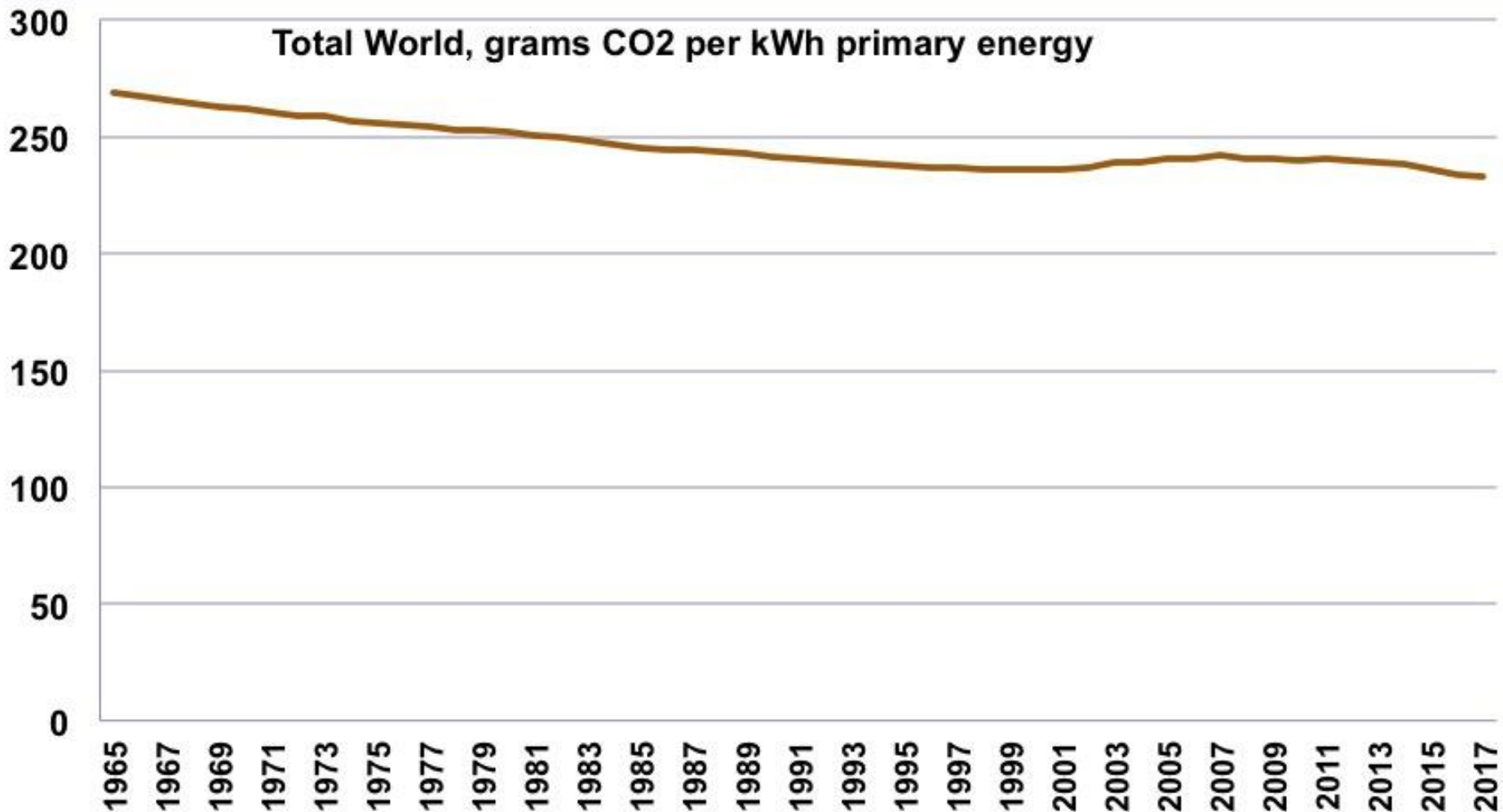




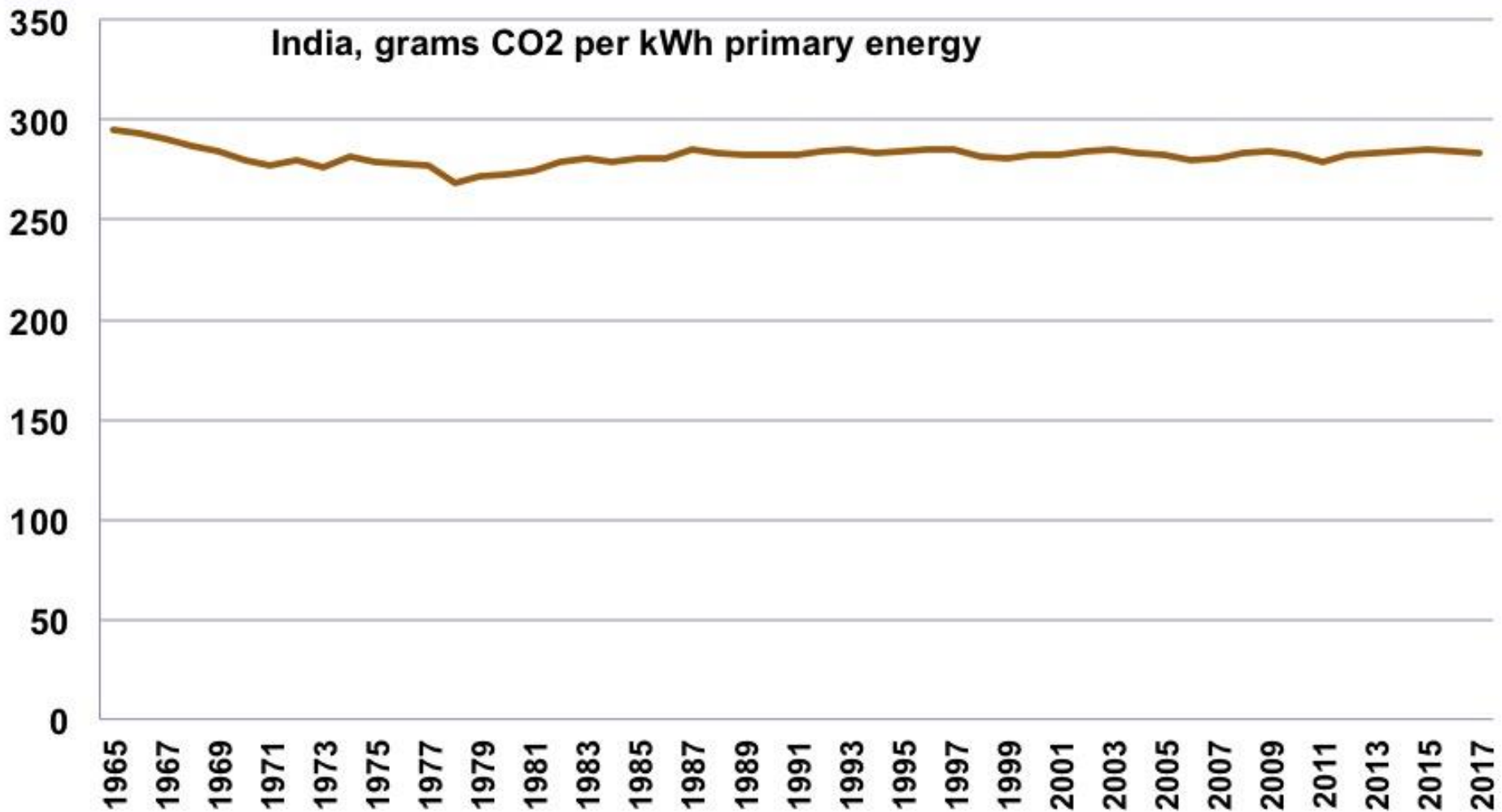
**kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Turquie. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.**



kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Espagne. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.



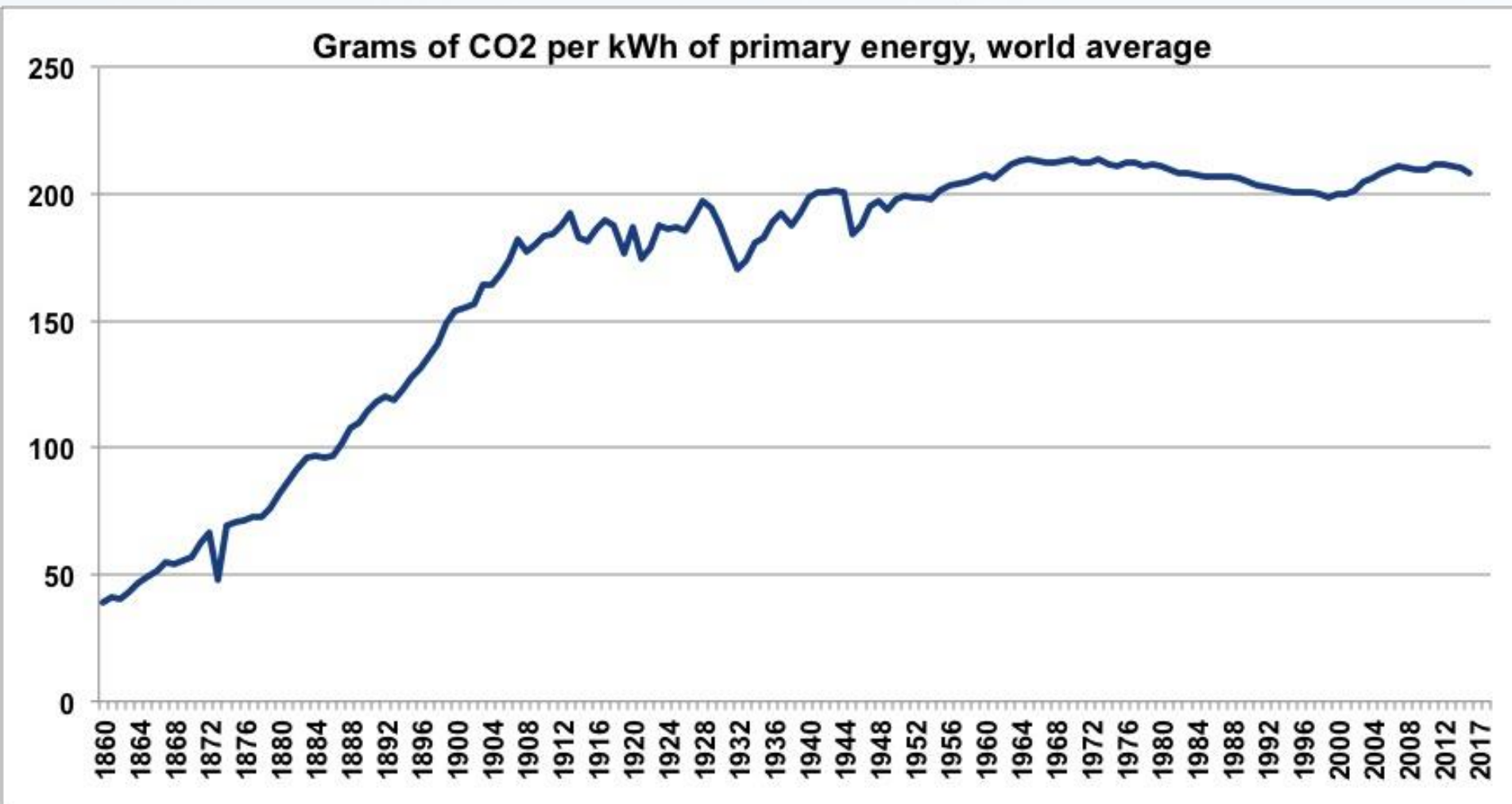
Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review.



Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire en Inde.  
Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review.

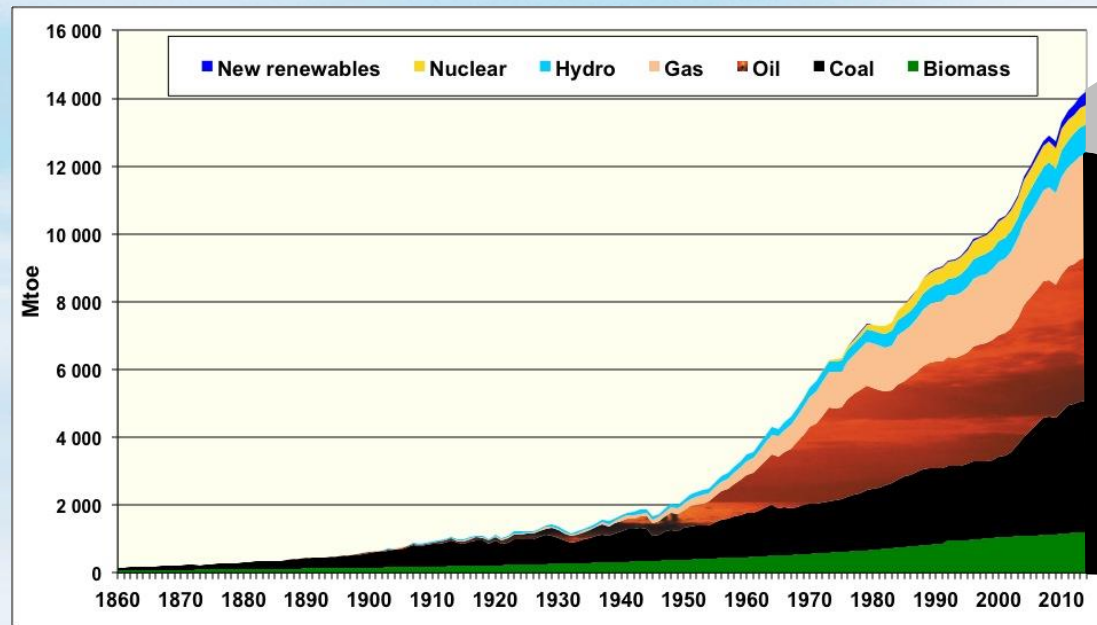


# Soyons... heu quoi au fait ?



**Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire dans le monde depuis un siècle et demi. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review & Shilling et al., 1977.**

# PIB++ et CO<sub>2</sub> --, cela devrait donner ceci



**+7% par an  
(incl. nucléaire)**

**-3,1% par an**

L'équation de Kaya :

**Est divisé par 3  
d'ici 2050**

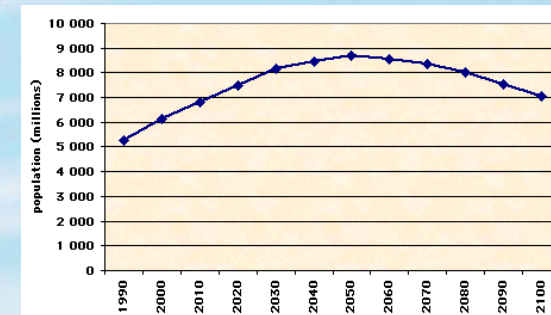
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

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

-2,5% par an

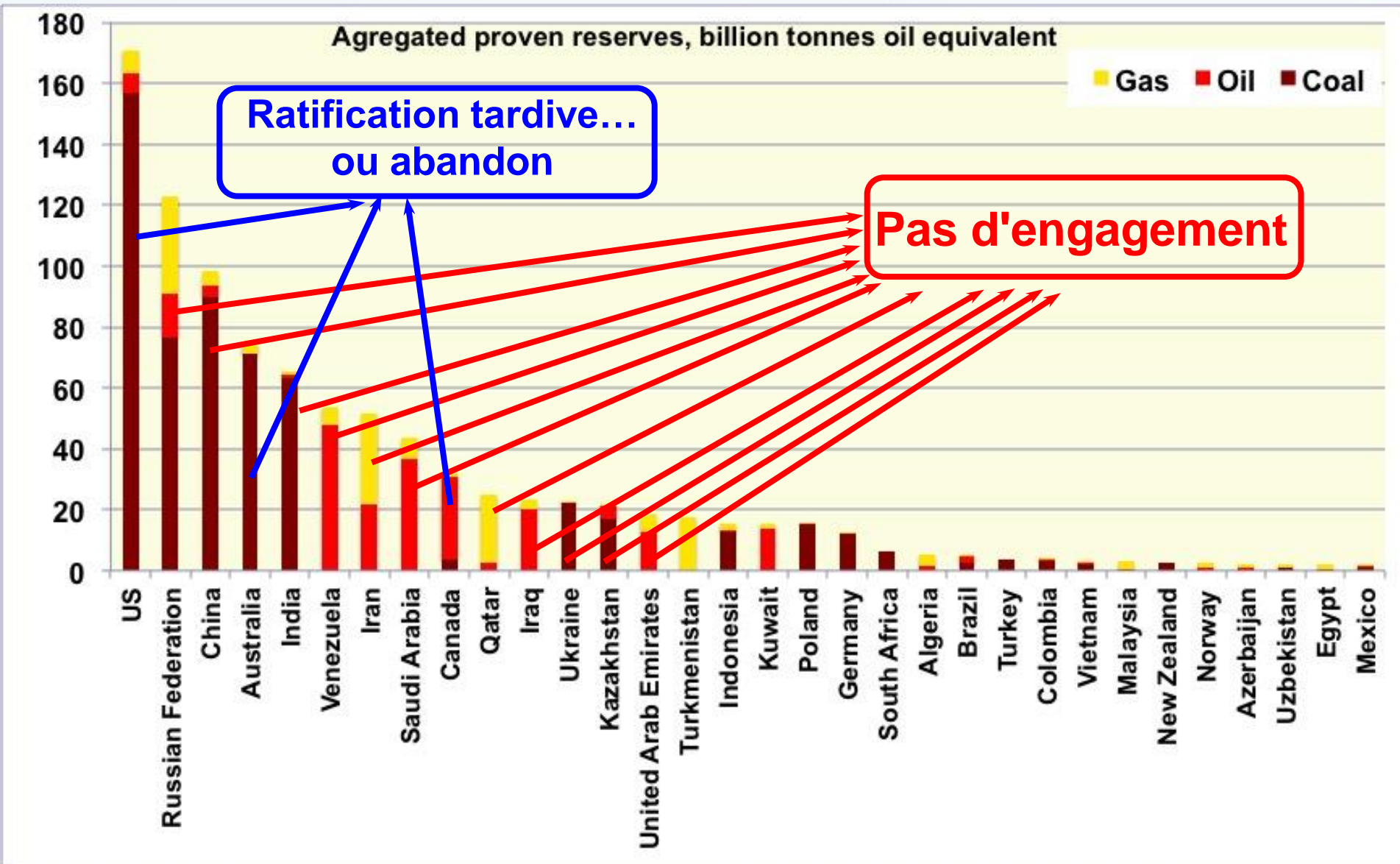
-1,3% par an

0% d'augmentation (et donc une division par 2 à 3 en France si égalité)



+ 20% d'ici 2050 ?

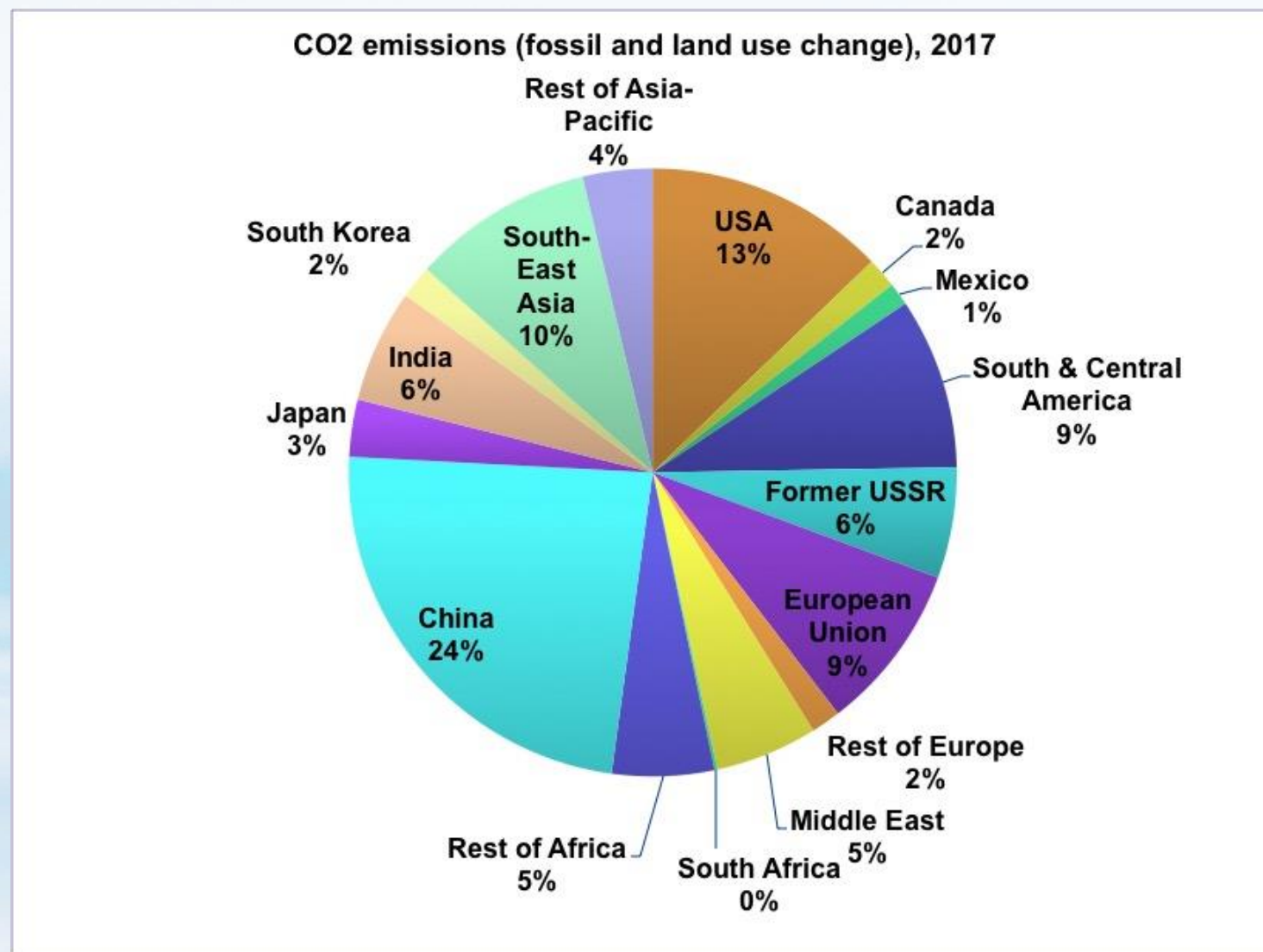
# Et qui arrive en tête des réserves de carbone?



Réserves prouvées gaz + pétrole + charbon en 2017. Source BP Stat, 2018



# Les cochons de pollueurs... sont des cochons qui votent



Répartition par pays des émissions de CO<sub>2</sub> en 2017, déforestation incluse. Calculs de l'auteur sur sources BP Statistical Review pour l'énergie, et Woods Hole Centre pour la déforestation

## L'idée qu'on se fait d'une organisation « normale »



## Le chef, en haut, commande

# Le salarié, en bas, exécute.



## La possibilité pour le salarié de refuser d'exécuter est limitée...

# Et donc pour un gouvernement, c'est pareil ?





# Une démocratie, ce n'est pas une entreprise



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



# **Il a dit quoi, Tocqueville, déjà ? (en 1840)**

**La démocratie rendra les gens individualistes, court-termistes, jouisseurs, rouspéteurs, consuméristes.**

**La démocratie poussera à la consommation de masse (de produits médiocres).**

**Accessoirement (?!) elle confèrera aux media un pouvoir central, permettra l'égalisation des droits des hommes et des femmes, verra l'avènement de la publicité...**

**« [en démocratie, on accordera un grand prix aux] conceptions superficielles de l'intelligence, [et peu à la réflexion] profonde et lente »**

**La démocratie sera donc myope, poussant structurellement les citoyens à peu se soucier des dangers de long terme**



# Les media sont (hélas ou heureusement ?) incontournables

Nature du moyen de communication	Population touchée
Conférence d'un spécialiste, 1 fois par semaine, à 100 personnes en moyenne, pendant 40 ans	40 (ans)*46 (semaines par an)*100 (personnes par conférence) = 180.000 personnes environ
Ecriture d'un livre sur le climat	Quelques milliers de lecteurs
Réalisation d'un site Internet sur le climat	Quelques centaines de milliers de visites par an ; mais quel nombre réel d'internautes ? Le dixième ?
Journal de 20h d'une grande chaîne nationale	5 à 10 millions de personnes tous les jours
Un exemplaire de quotidien	Quelques millions de personnes par jour : l'Equipe (2,5 millions de lecteurs quotidiens), Ouest France (2,2 millions), Le Monde (2,2 millions), Le Parisien (2 millions avec la diffusion de Aujourd'hui en France)...

**L'électeur est concerné quand le problème est > dans les media de masse**

**Par ailleurs, attention à bien examiner la « logique » des comportements avec ce que les autres savent, et non avec ce que l'on sait soi-même !**

**Matière première sur le climat : > 400.000 pages de littérature scientifique**



**Rapport du GIEC = 2000 pages de littérature scientifique (taux de compression = 200 environ, soit de 100 heures à... 30 minutes)**



**Le résumé pour décideur = 40 pages (taux de compression = 50 ; on passe de 30 minutes à... 36 secondes)**



**Un article dans le journal = 1/2 page (taux de compression = 20 ; on passe de 36 secondes à 1,8 seconde)**

**Le lecteur/auditeur/télespectateur ne saura jamais :**

**Pourquoi ce sujet et pas un autre**

**Pourquoi la presse est allée voir Dupont et pas Durand**

**Si les propos tenus ont été correctement interprétés**

**Si le/la journaliste avait un parti pris avant le tournage  
(nous en avons tous, tout le temps)**

**Pourquoi « on » a sélectionné ceci et pas cela dans les  
propos enregistrés ou notés**

**Si l'intéressé(e) a relu son interview le cas échéant...**

**Pour émettre moins de gaz à effet de serre, il y a deux moyens :**

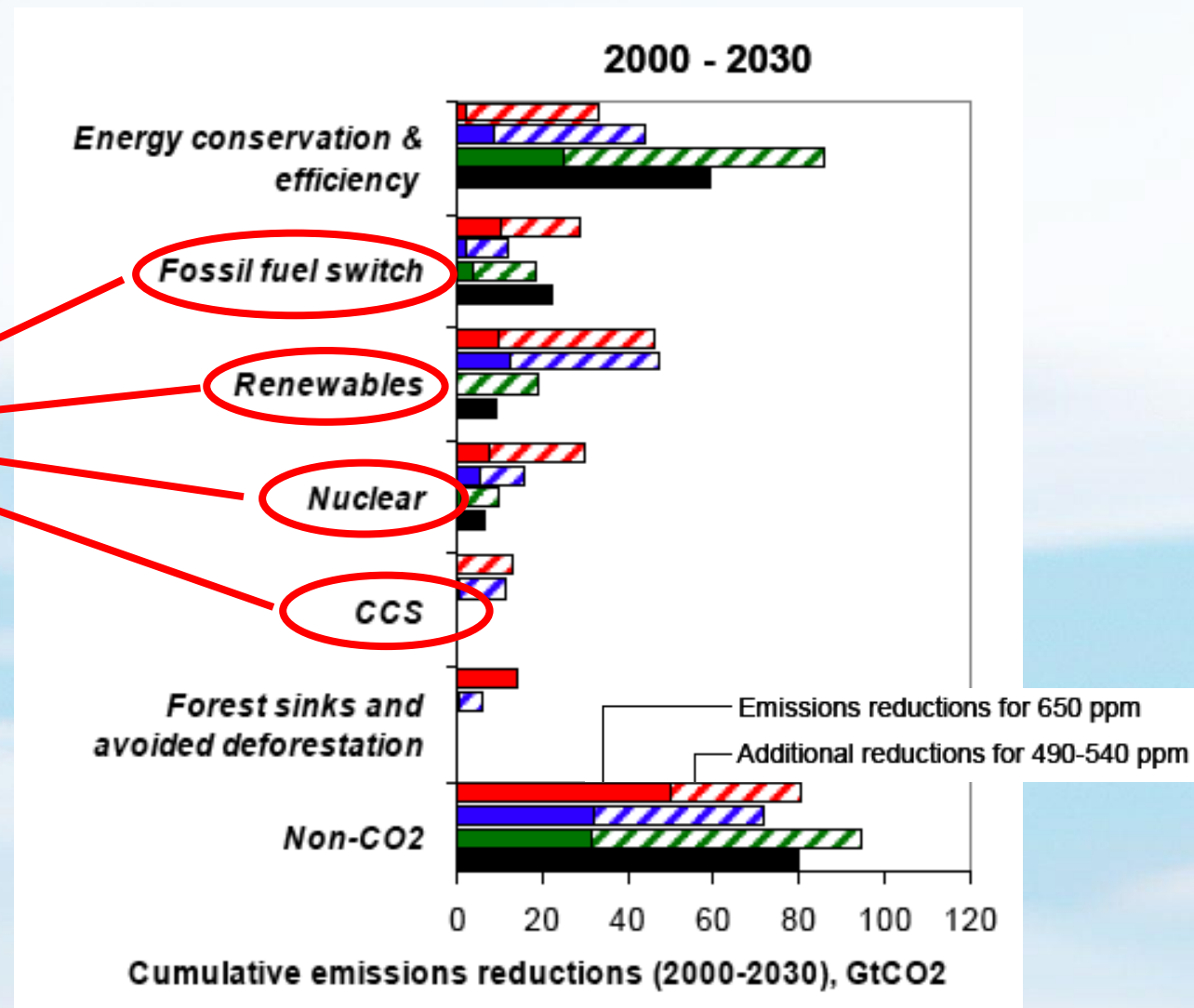
**Basculer, « toutes choses égales par ailleurs », sur des énergies émettant moins de CO<sub>2</sub> ou pas du tout  
-> transition charbon vers gaz, capture du CO<sub>2</sub>, renouvelables, et nucléaire(s)**

**Utiliser, à mix énergétique constant, moins d'énergie  
-> économies d'énergie**



# Moins de CO<sub>2</sub>, revenons à la théorie (simple !)

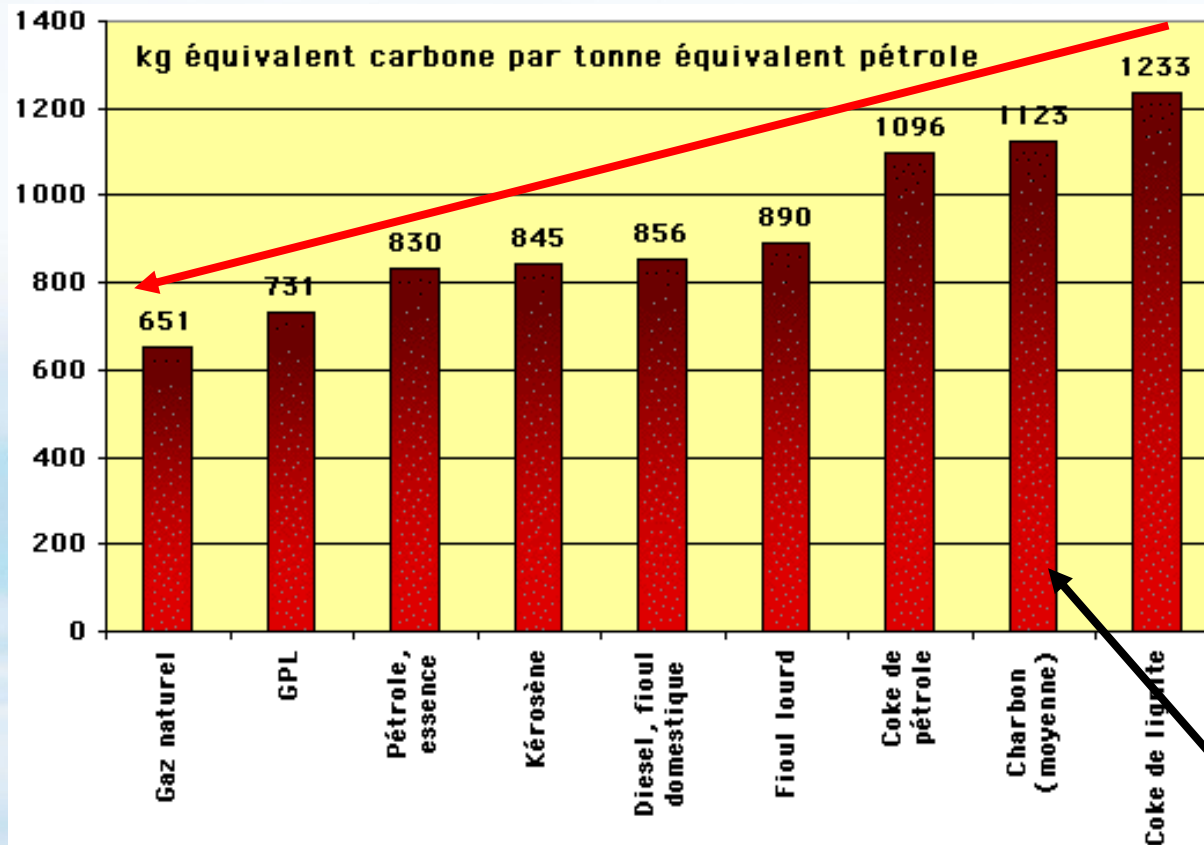
Modification à la production



Potentiels de réduction par technologie et répartition « à la louche » par grande famille de marges de manœuvre. Emissions cumulées de 2000 à 2030 ≈ 1000 GtC

Source GIEC, 2007

# Moins de CO<sub>2</sub>, on commence par le plus facile (ou presque)



**Pas de chance : les grosses réserves sont là !**

Source Bilan Carbone, Ademe

# On produit le CO<sub>2</sub>, mais on le met dans un trou

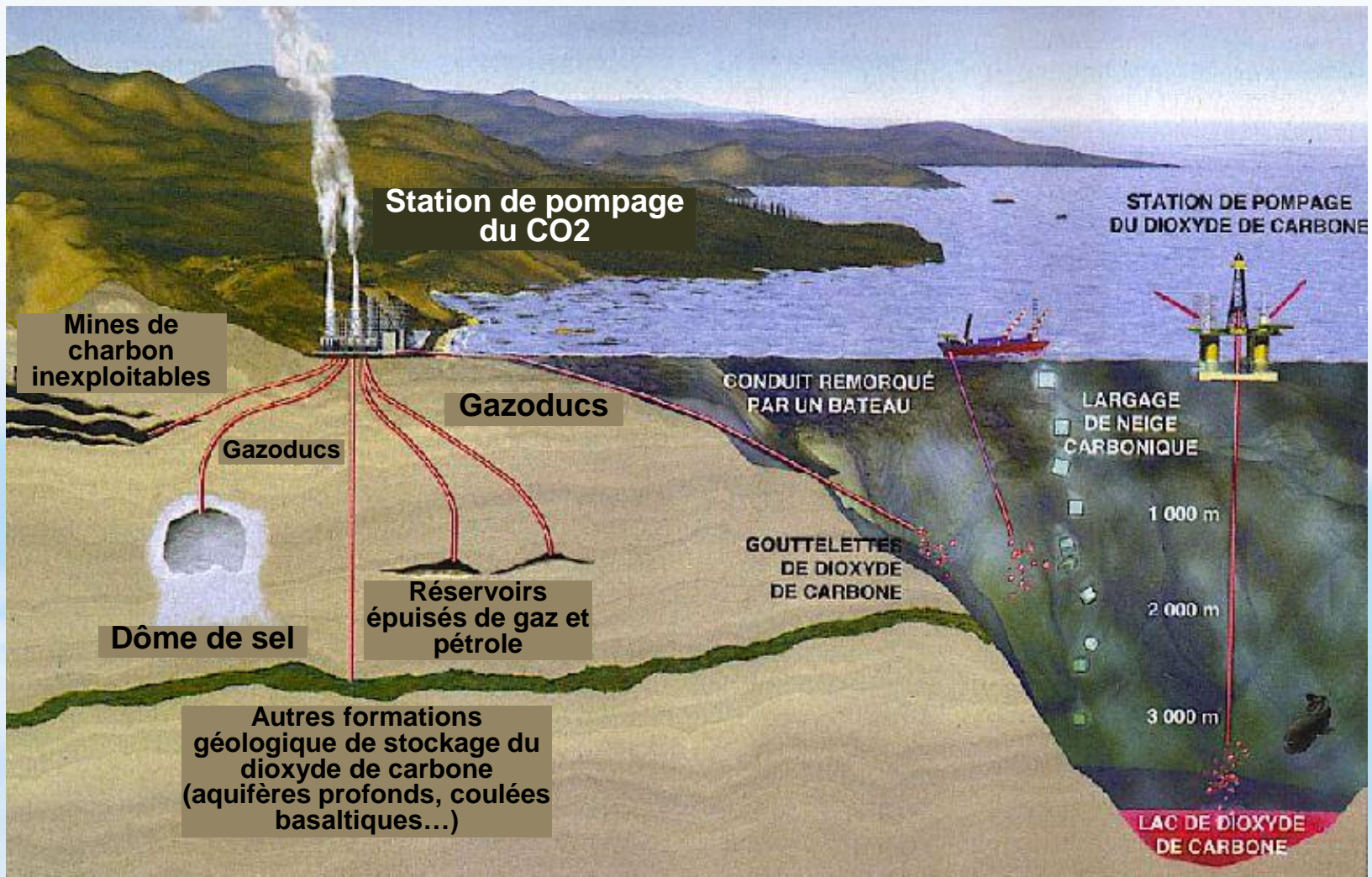
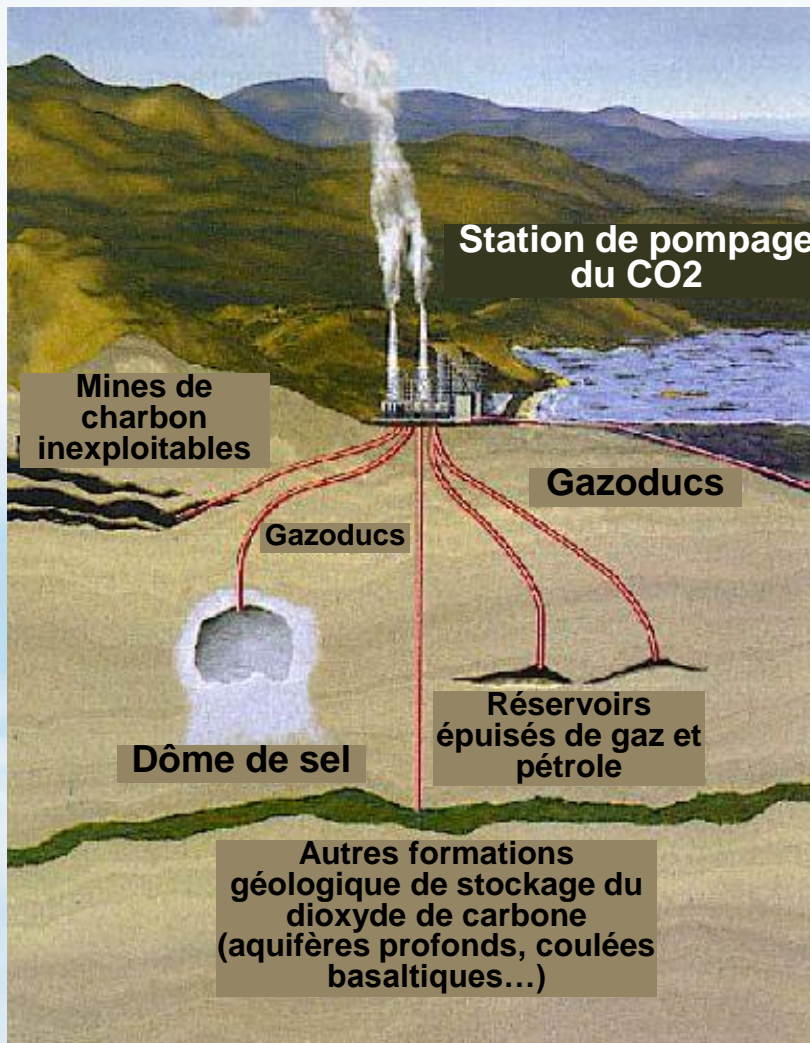


Schéma d'ensemble de la capture et séquestration.



# Attraper (rien que) le CO<sub>2</sub>, 1ère difficulté

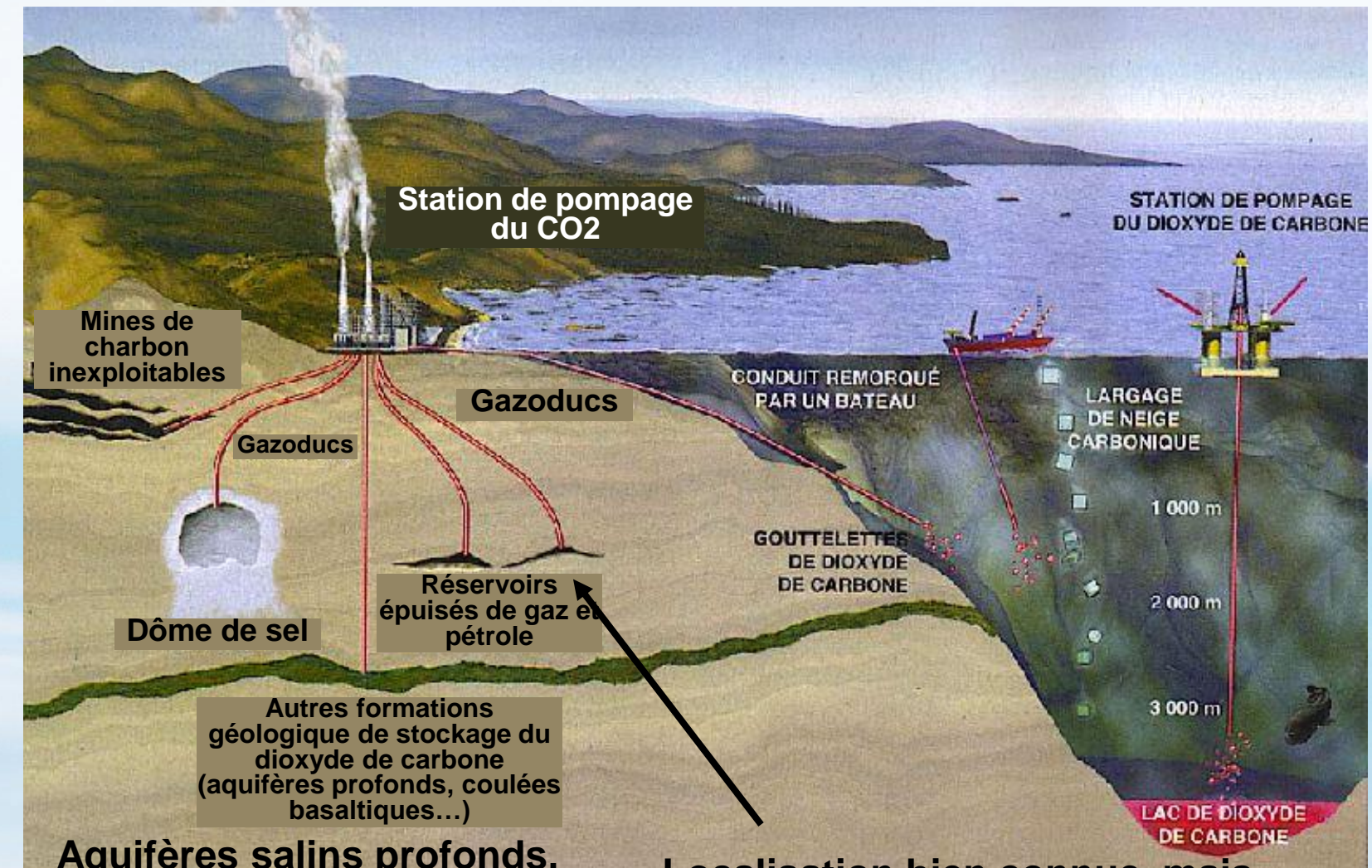


**Combustion à l'air = 80% d'azote en sortie, que l'on ne souhaite pas enterrer**

**Capture de 90% du CO<sub>2</sub>, reste 10%**

**La capture se fait là où sont les centrales = là où sont les mines ; la séquestration là où sont les formations géologiques -> transport**

# Trouver le trou (bien étanche), 2è difficulté



**Aquifères salins profonds,  
veines de charbon non  
exploitées, coulées basaltiques**

**Localisation bien connue, mais  
petite taille, et « trous » mal  
connus !**

**Schéma d'ensemble de la capture et séquestration.**



**Peu d'exploitations commerciales aujourd'hui  
(exemple le plus connu = Sleipner en Mer du Nord)**

**Le rendement électricité/chaleur primaire passe de  
45% à 35% (donc moins de PIB... ou plus de  
combustible !)**

**Pas de retrofit commode sur les centrales existantes**

**Pas d'applications sur les sources diffuses (résidentiel  
- tertiaire - transports)**

**Tout cela a donc un coût ( $> 60 \text{ \$}/\text{tCO}_2$  voire... ) et sans  
obligation économique les électriciens ne feront rien,  
ou pas grand chose**

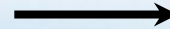
# Faire une maison « zéro énergie », on peut



**Exemple de maison passive (pas de chauffage, pas de climatisation)  
située en Suède**



# L'impossible définition des économies : le chauffage



**Le logement de 1950 : 250 kWh/m<sup>2</sup>  
quand il y a le chauffage central**

**Le logement de 2008 : 80 kWh  
(finaux) par m<sup>2</sup>**

**3 fois moins d'énergie par m<sup>2</sup> de logement**

**Economies !**

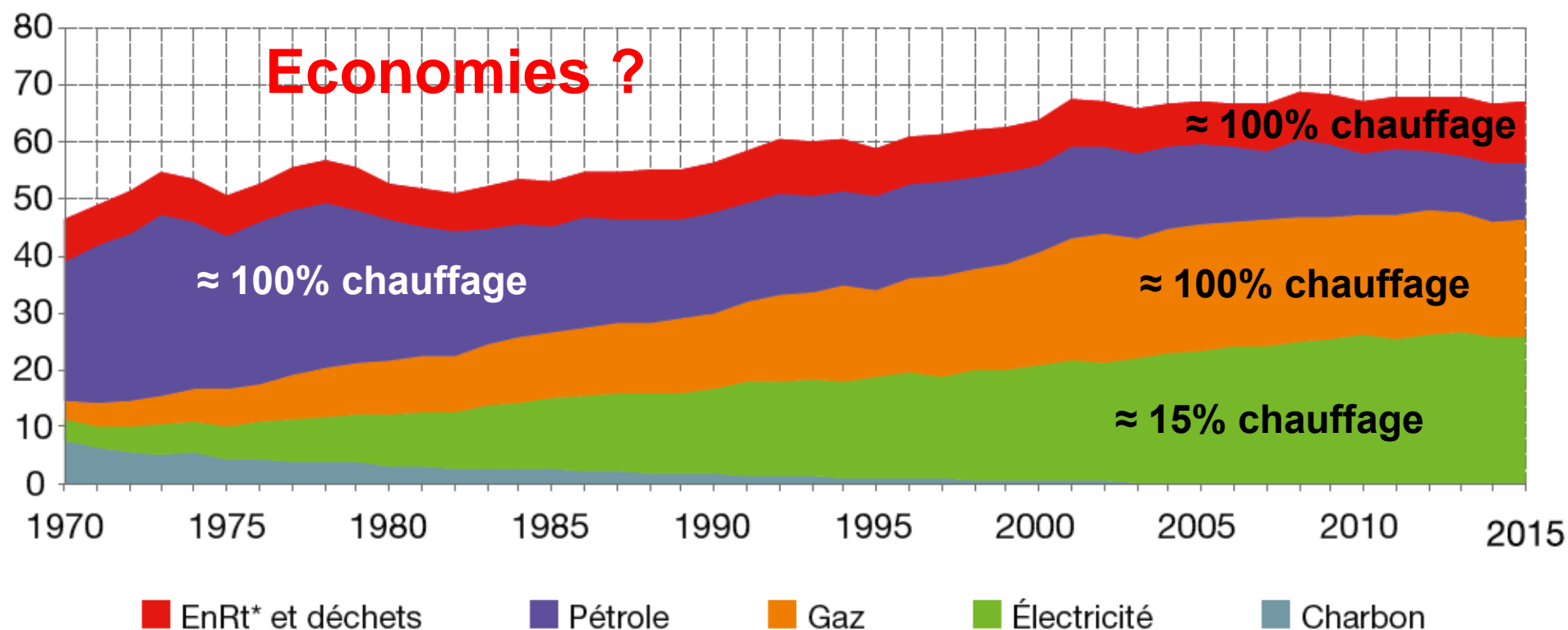
## De 1950 à 2008

Augmentation forte du taux d'équipement en chauffage central

Augmentation de la surface habitable par personne (< 25 m<sup>2</sup> en 1973, ~ 40 m<sup>2</sup> par personne aujourd'hui)

Augmentation du taux d'équipement en divers appareils

Et bien sûr augmentation du nombre de logements



**Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel tertiaire, en millions de tonnes équivalent pétrole**

# Laissez les ingénieurs faire des voitures économes !



La 2CV de 1950 : 375 cm<sup>3</sup> de cylindrée,  
9 CV de puissance, 60 km/h, 500 kg

La C3 de 2008 (diesel) : 1.400 cm<sup>3</sup> de  
cylindrée, 70 CV de puissance, 160  
km/h, 1.000 kg

**4 fois moins** de carburant consommé par cm<sup>3</sup> de cylindrée

**2,5 fois moins** de carburant consommé par km/h de vitesse maximale

**7 fois moins** de carburant consommé par CV de puissance nominale

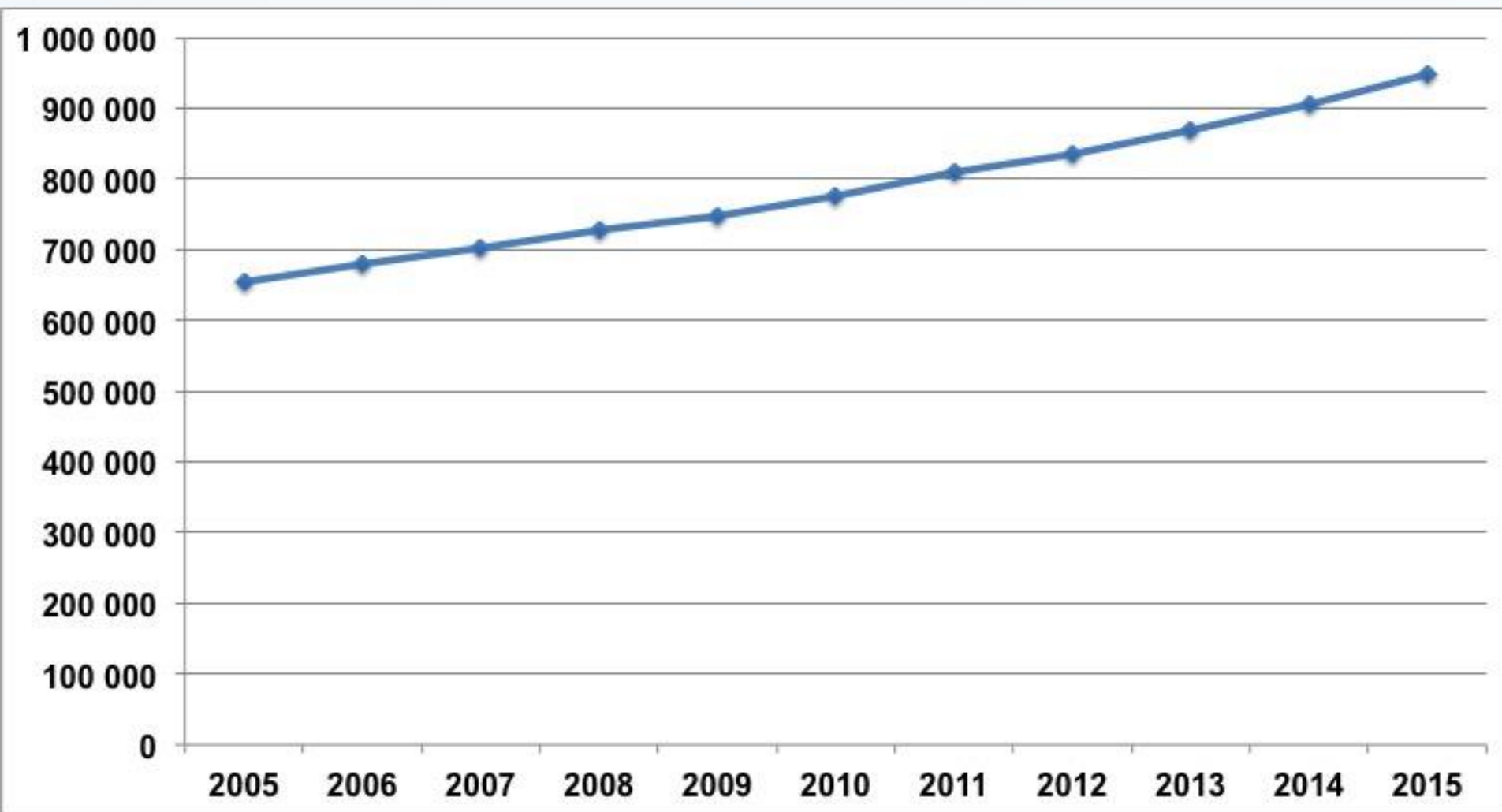
**2 fois moins** de carburant consommé par kg de masse

**4,5 litres aux 100**

**5 à 6 litres aux 100**

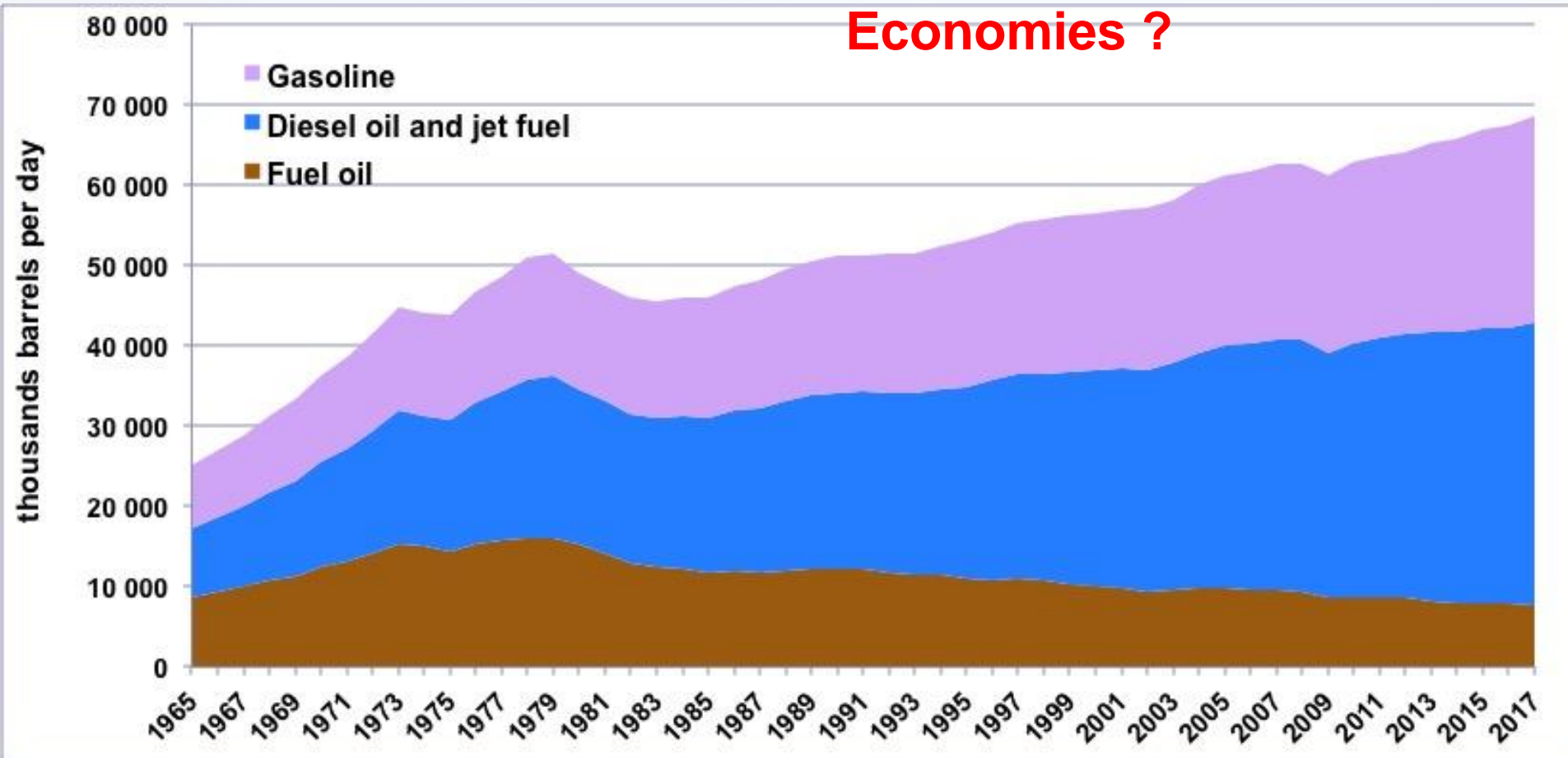
**Economies ?**





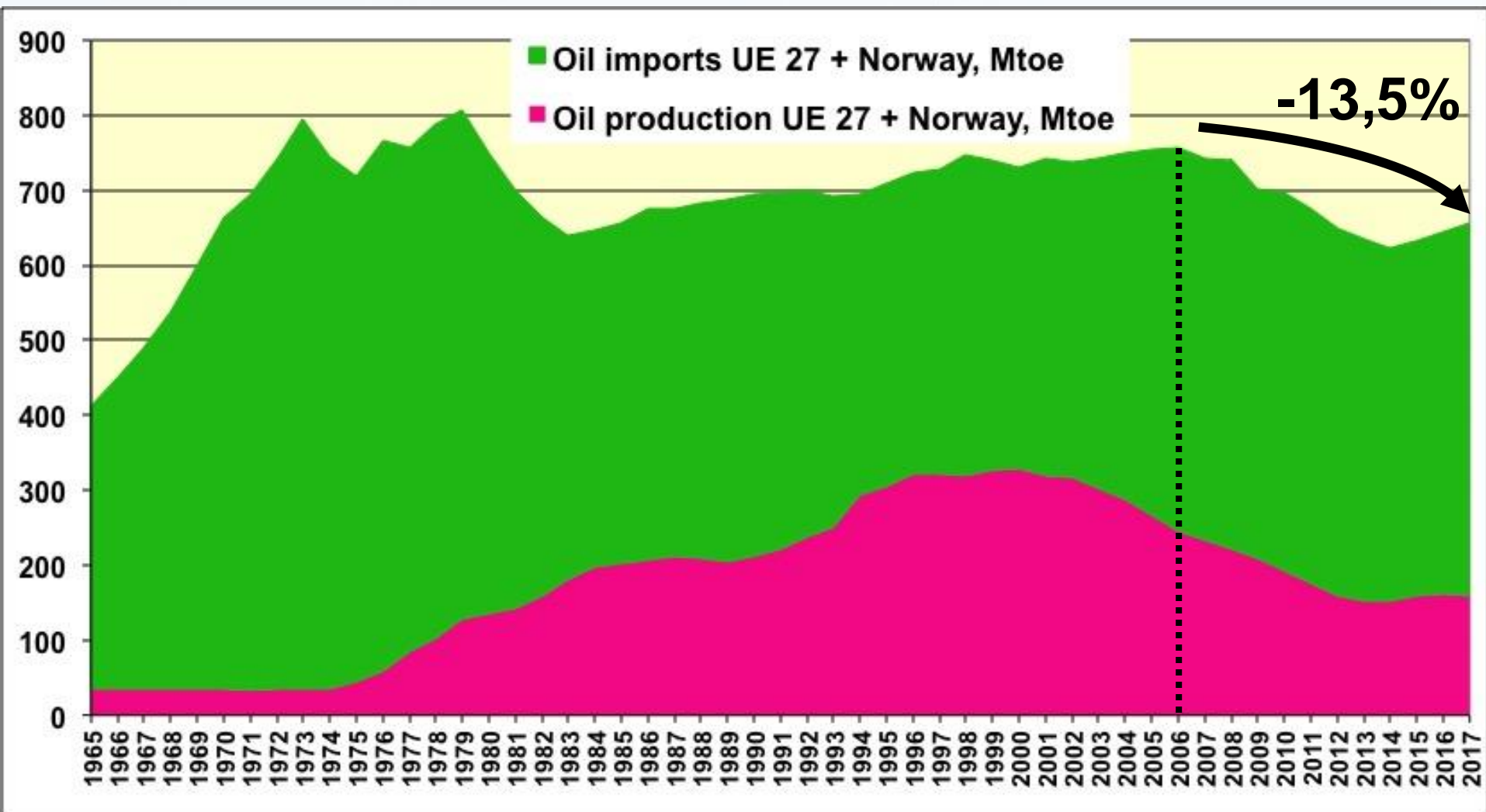
**Flotte mondiale de voitures particulières. Source International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, 2018**

## Economies ?



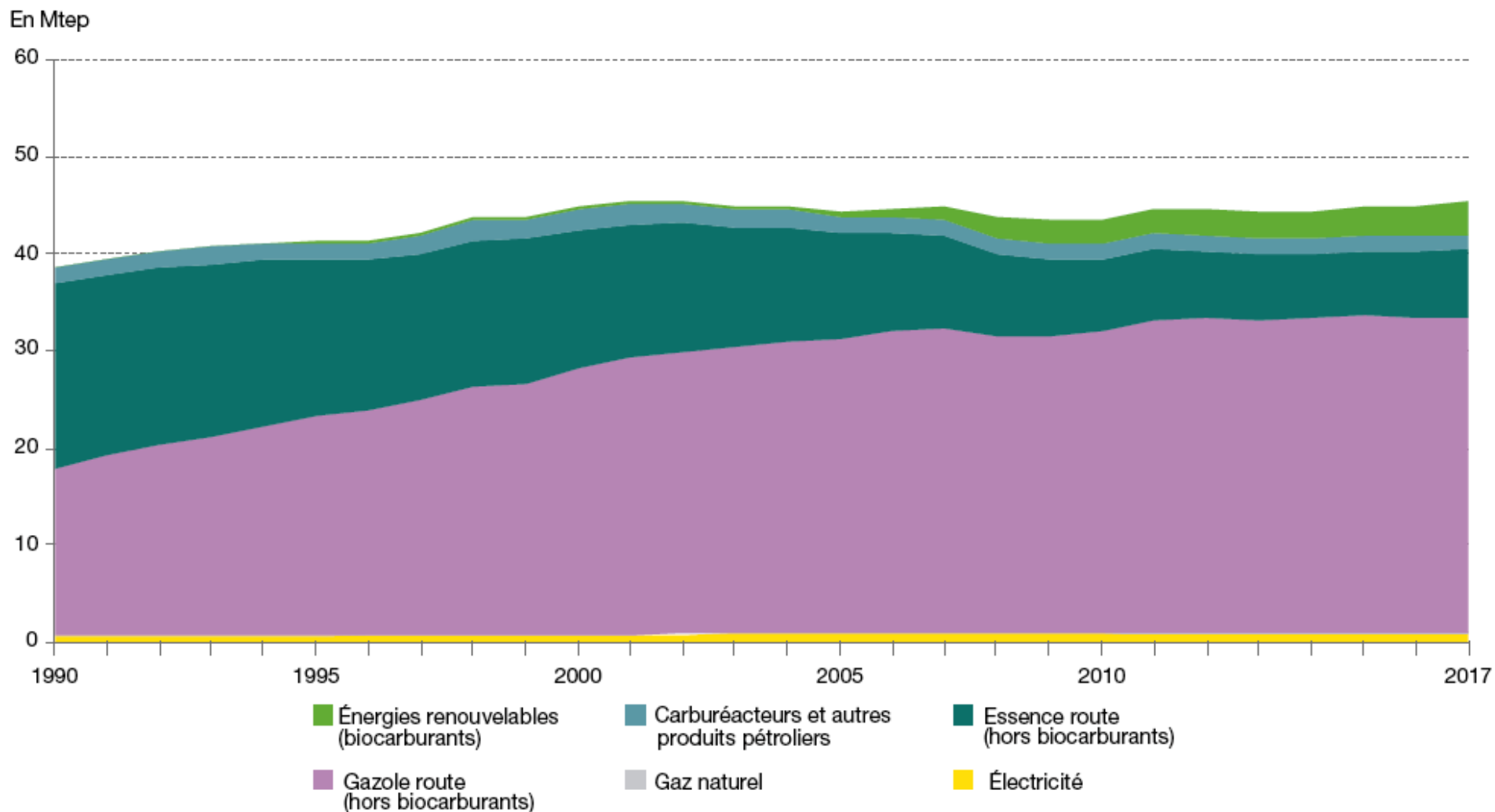
**Consommation mondiale de carburants depuis 1965 (pour le fuel oil, une partie va dans l'industrie). Données BP Statistical Review.**

# Mais l'Europe n'est pas le monde...



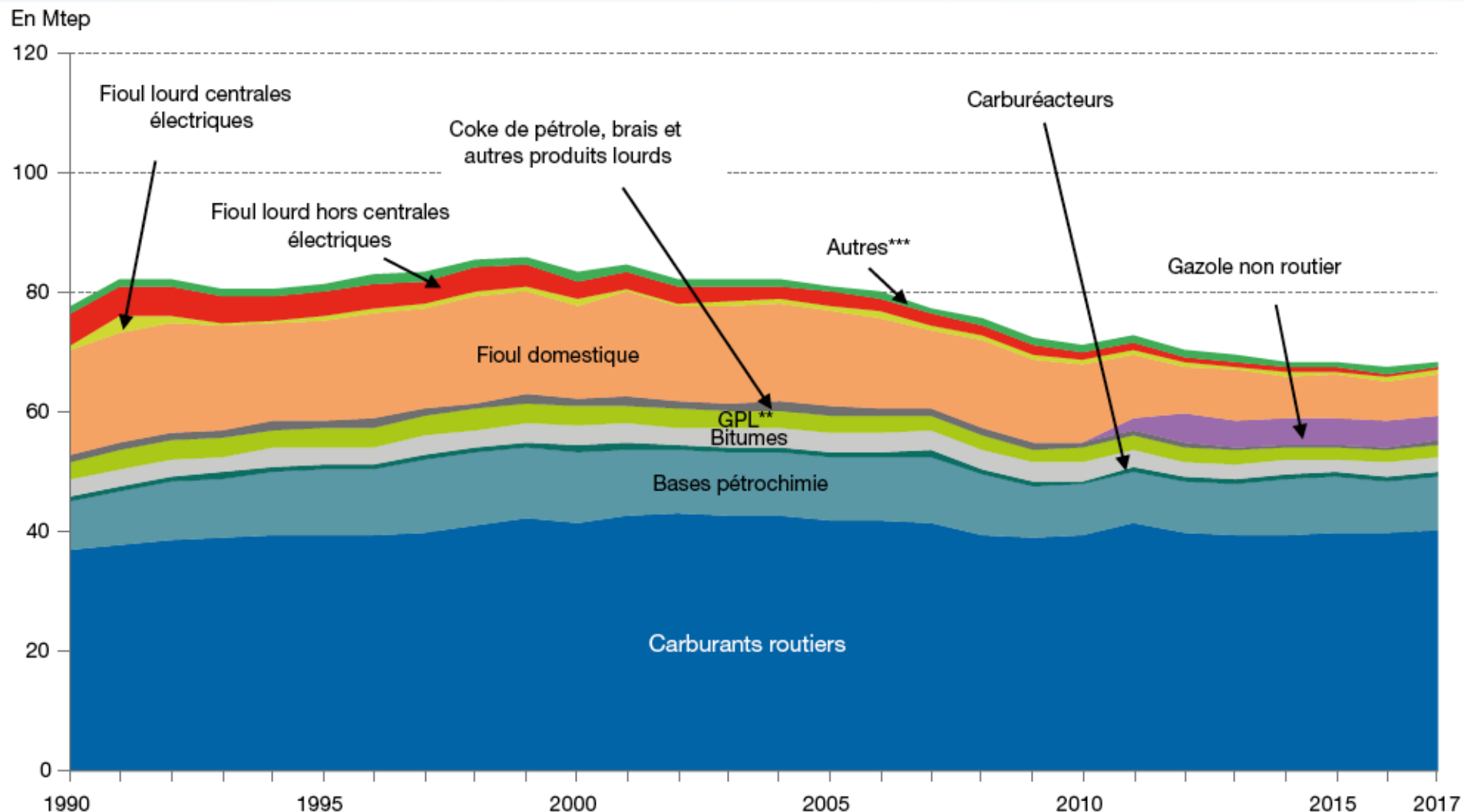
Approvisionnement pétrolier de l'Union+Norvège depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review, 2018

# Et nous autres gaulois sommes européens



**Consommation française de carburants depuis 1970. Données Service de l'Observation et des Statistiques, 2016.**

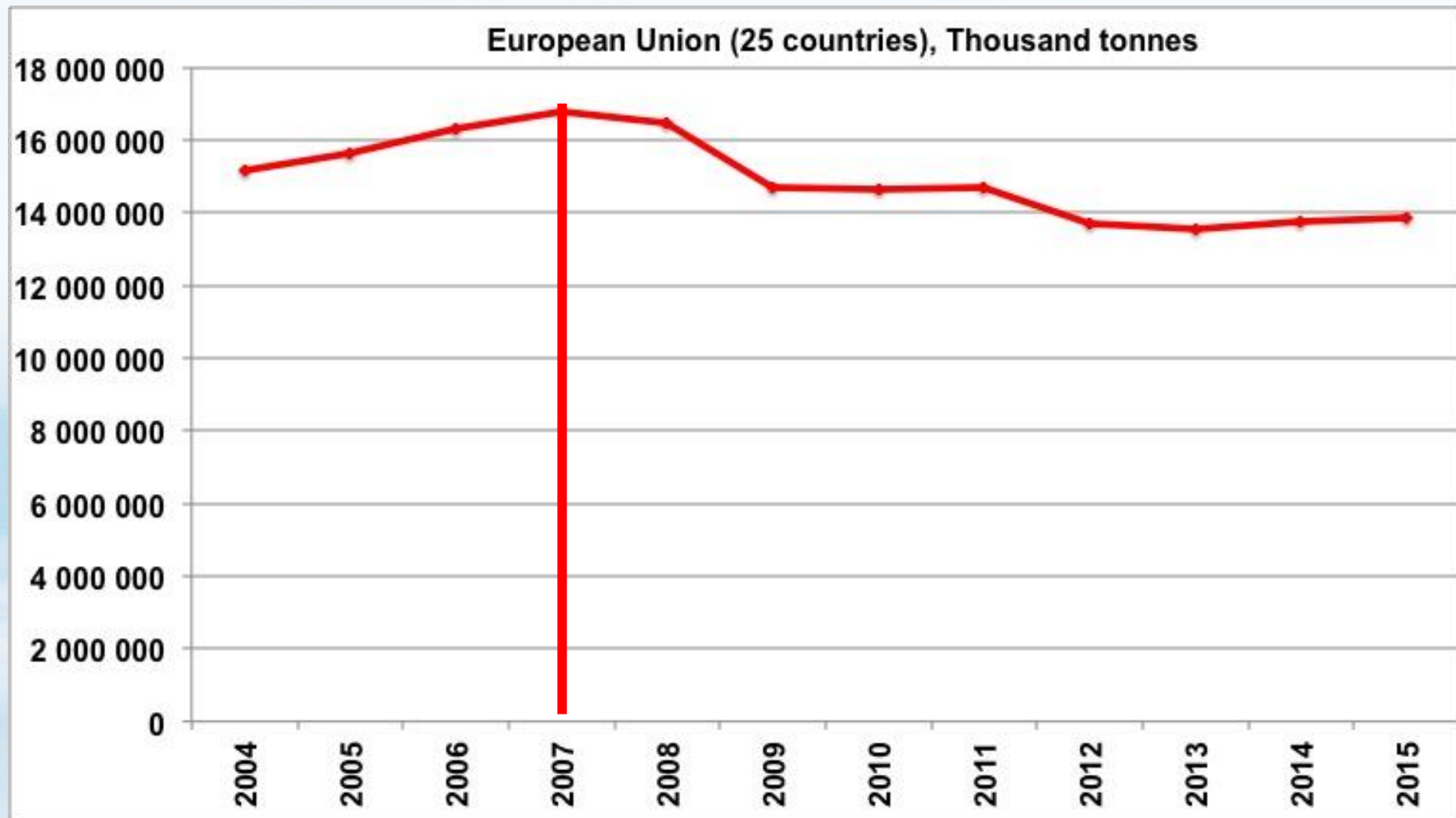
# « Economiser » est plus facile quand il y a une alternative



**Consommation française de produits pétroliers depuis 1990. Données CGDD, 2017**

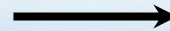


# Moins de pétrole, moins de camions



Tonnes chargées en Europe depuis 2004. Données Eurostat

# L'impossible définition des économies : l'électricité



**Le frigo de 1950 : ~100 litres, ~400 kWh/an**

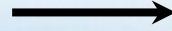
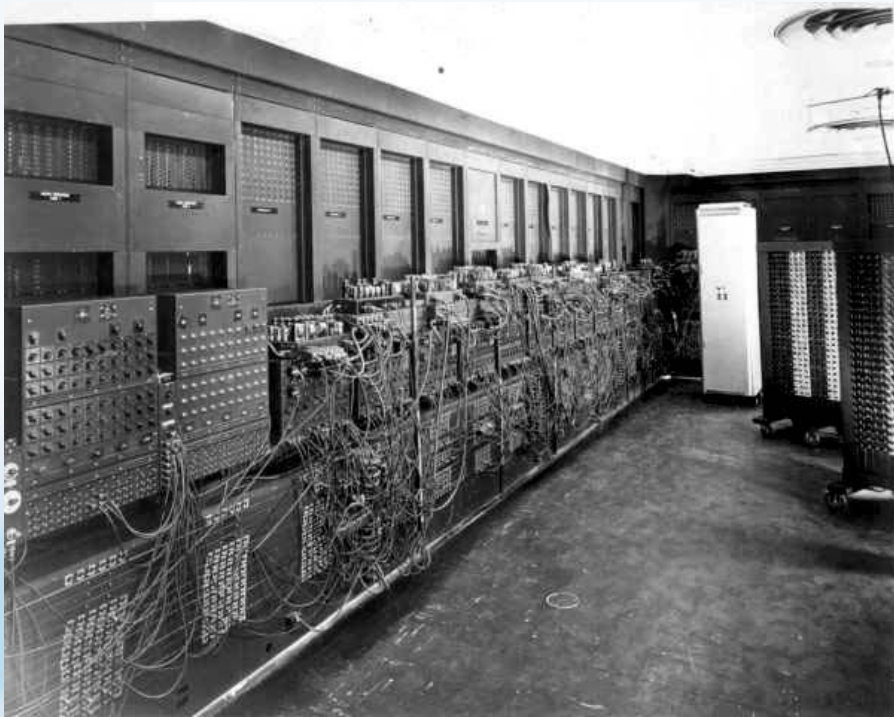
**Le frigo de 2010 : 280 litres, 30% en compartiment surgelés, 320 kWh/an**

**2 à 4 fois moins d'électricité par litre refroidi**

**Par rapport à 1970, 4 fois moins d'électricité consommée par réfrigérateur**

**Economies !**

# L'impossible définition des économies : l'électricité



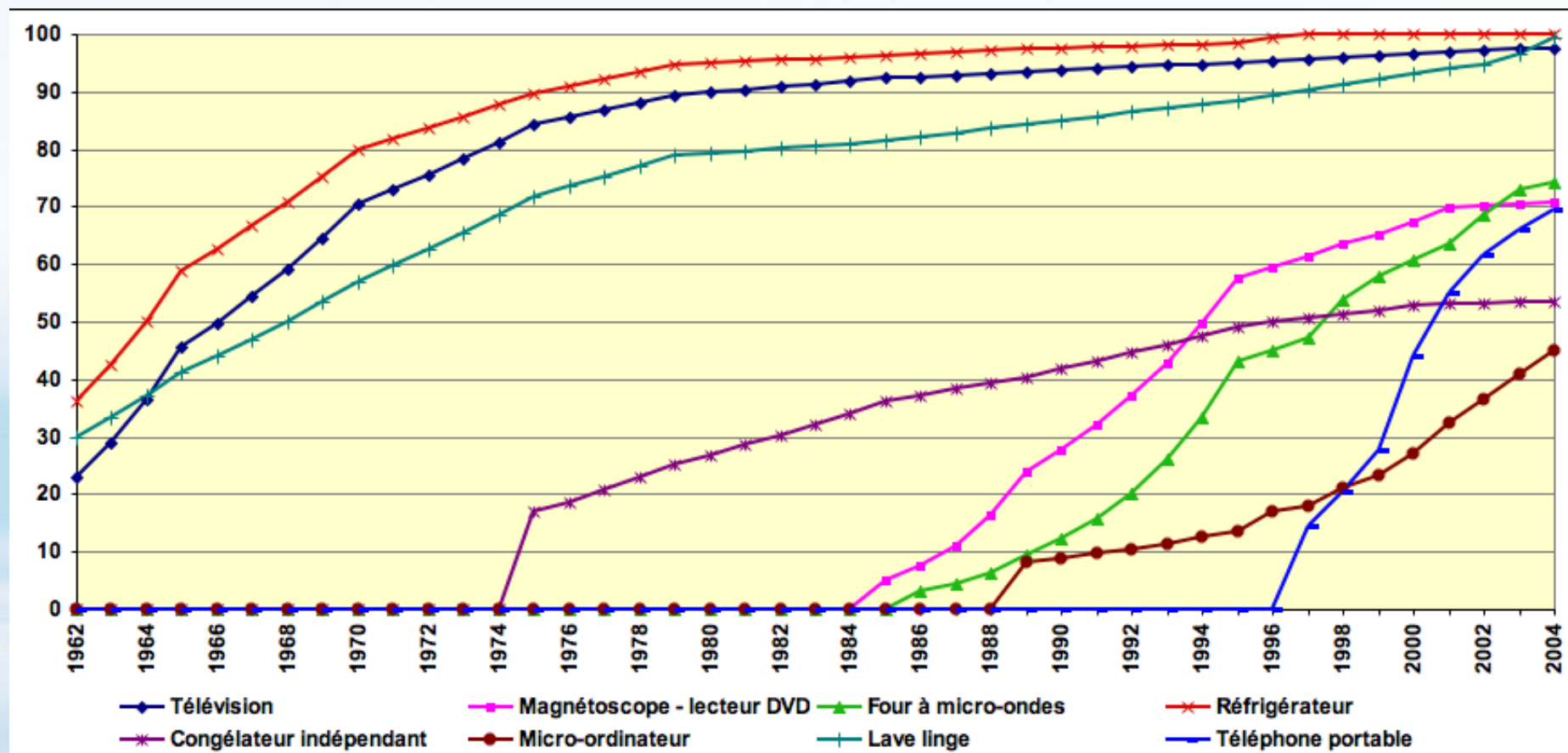
**L'ordinateur de 1950 (ENIAC) : 27 tonnes, 18.000 tubes à vide, 150 kW.**

**L'ordinateur de 2015 : 2 kg, 50 millions de transistors, 20 W**

**Un million de fois moins de puissance électrique consommée par transistor**

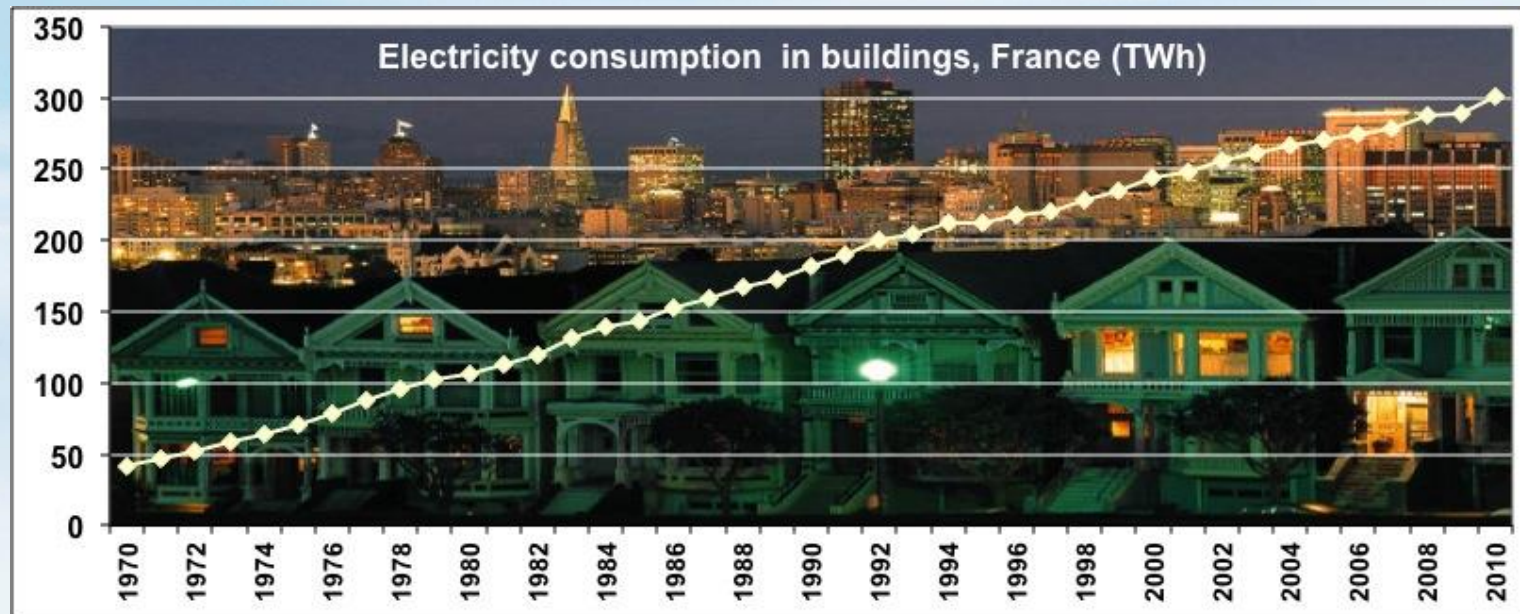
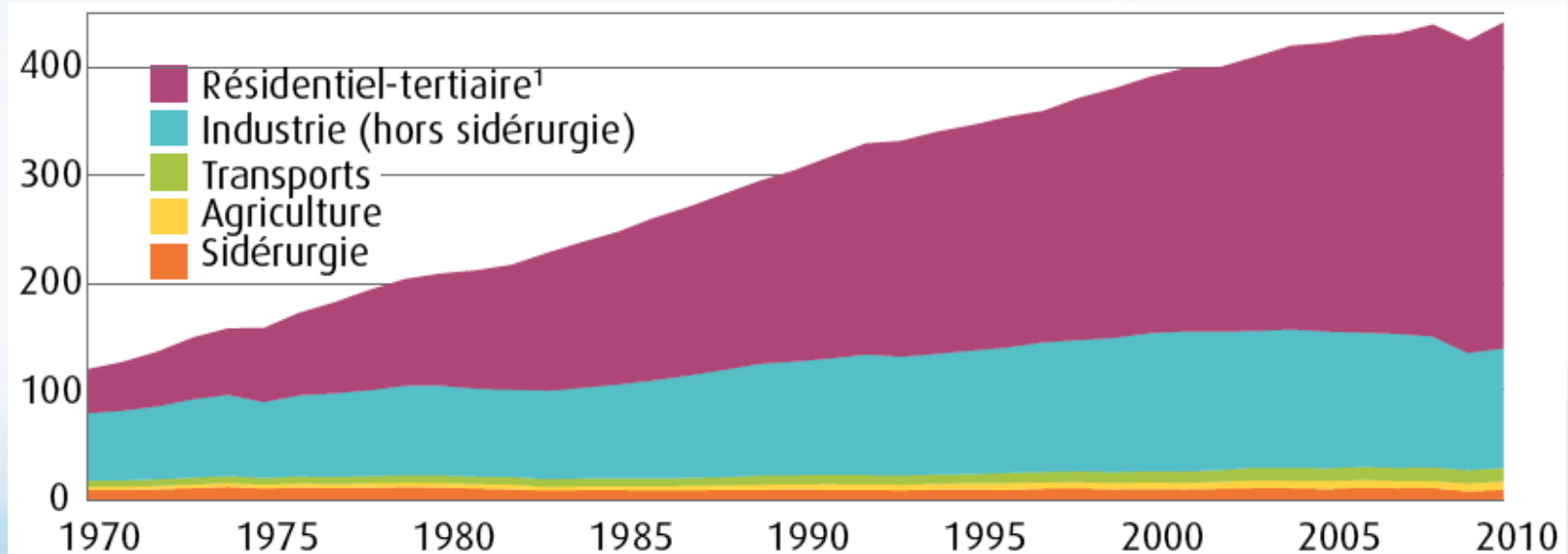
**Un million de fois moins de poids par transistor**

**Economies !**



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

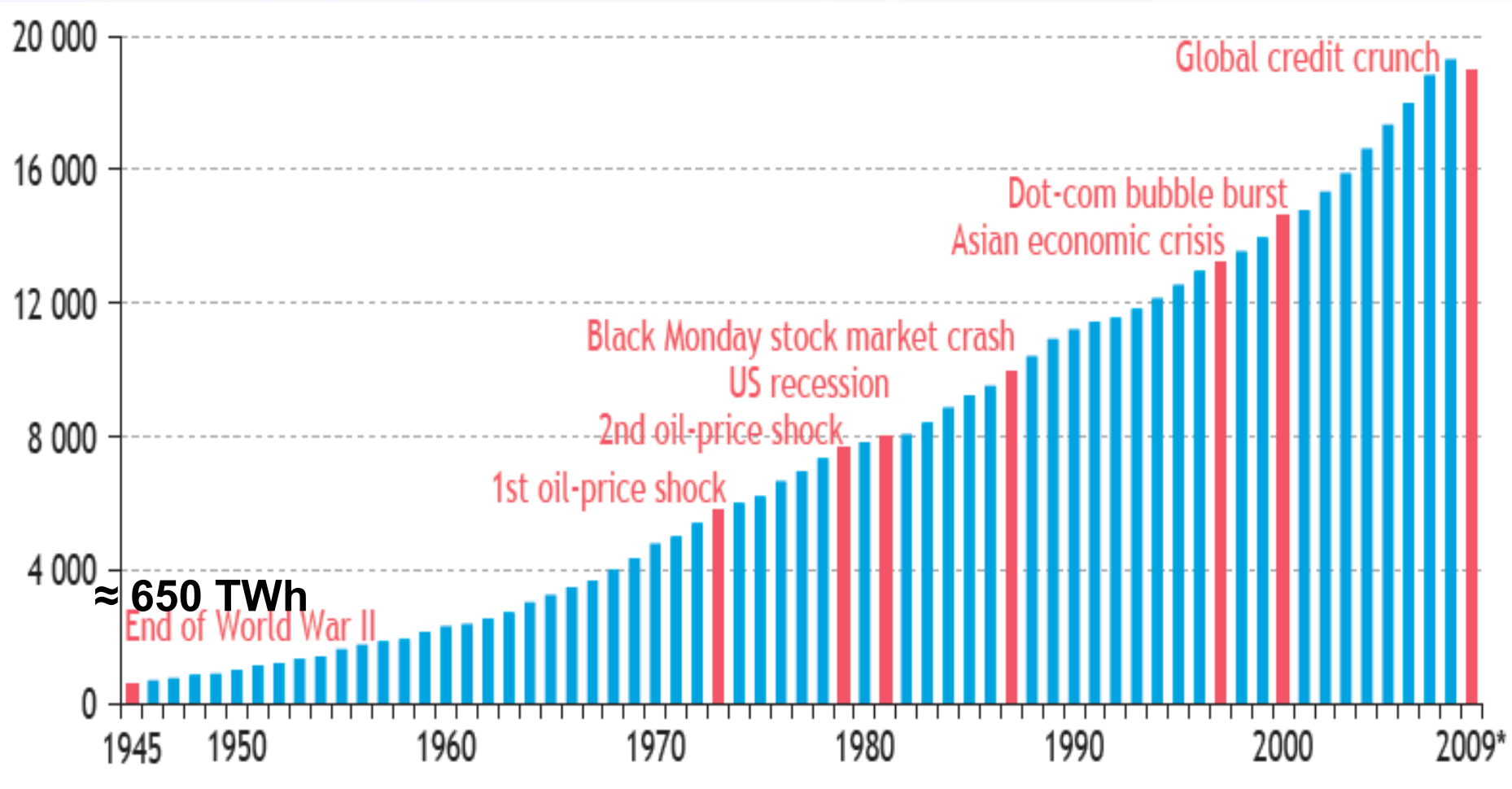




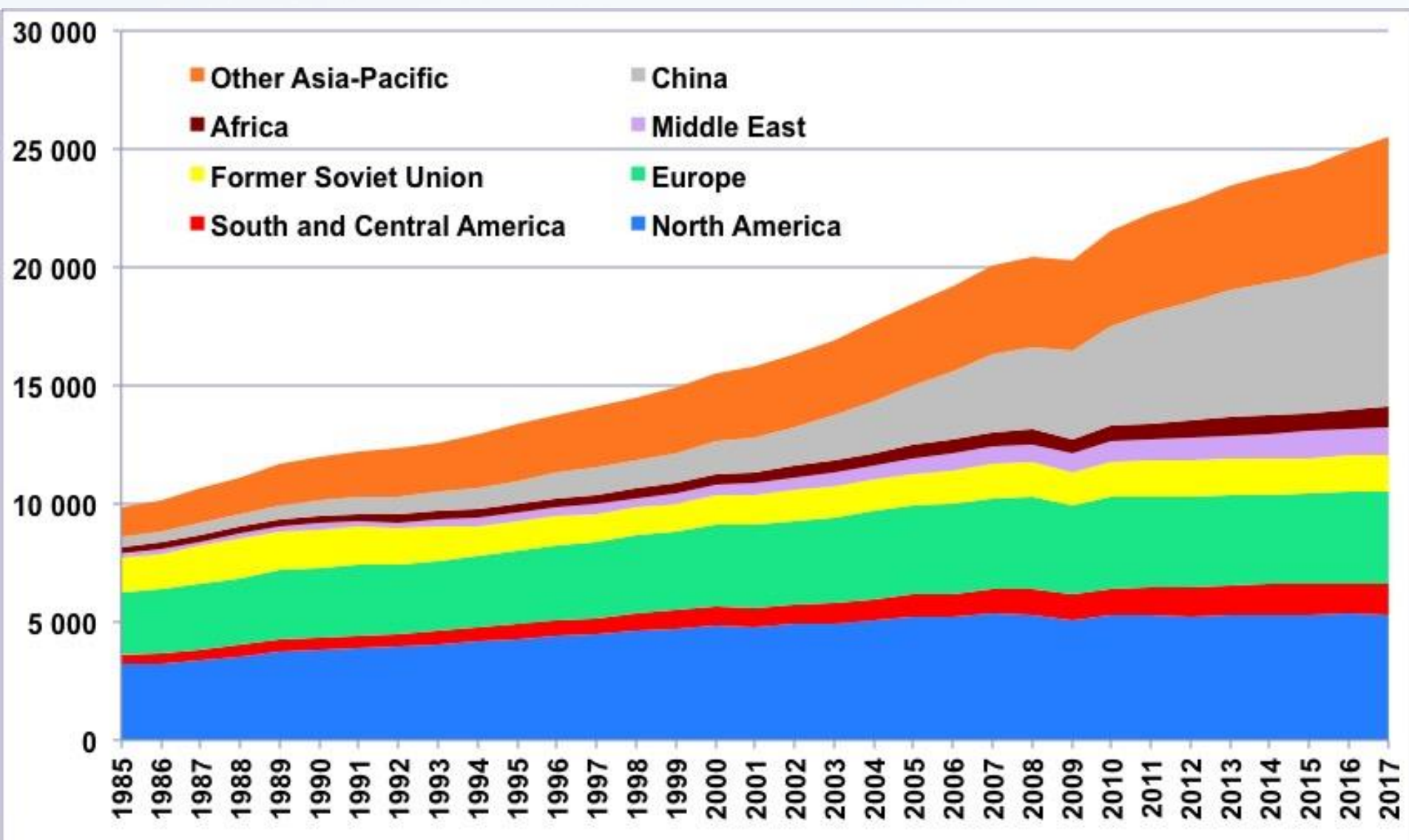
**Consommation d'électricité en France, 1970 - 2010. Source CGDD, 2011**

# Plus d'électrons pour tous

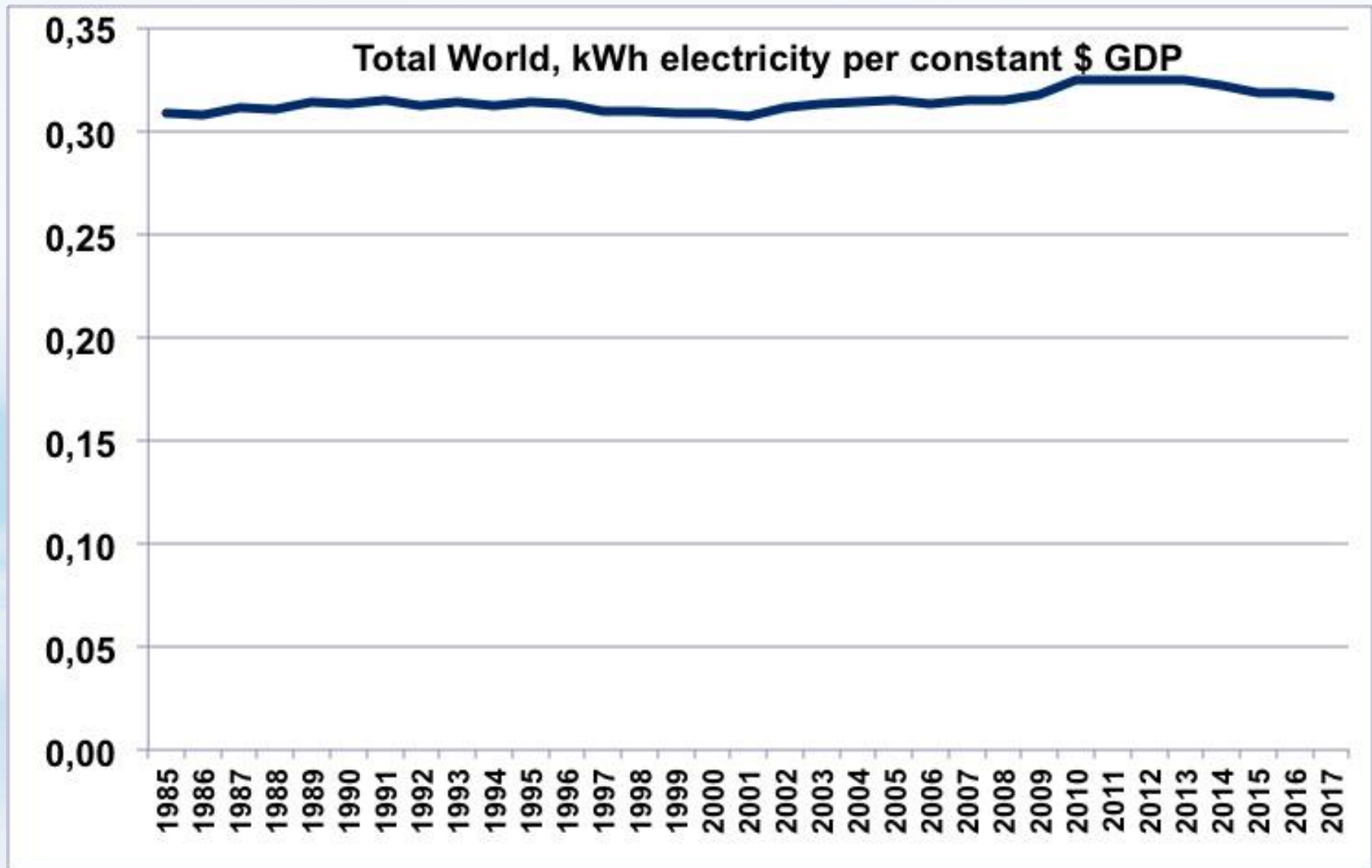
≈ 21.000 TWh



Evolution de la consommation mondiale d'électricité depuis 1945, en TWh  
Source : World Energy Outlook, AIE, 2009



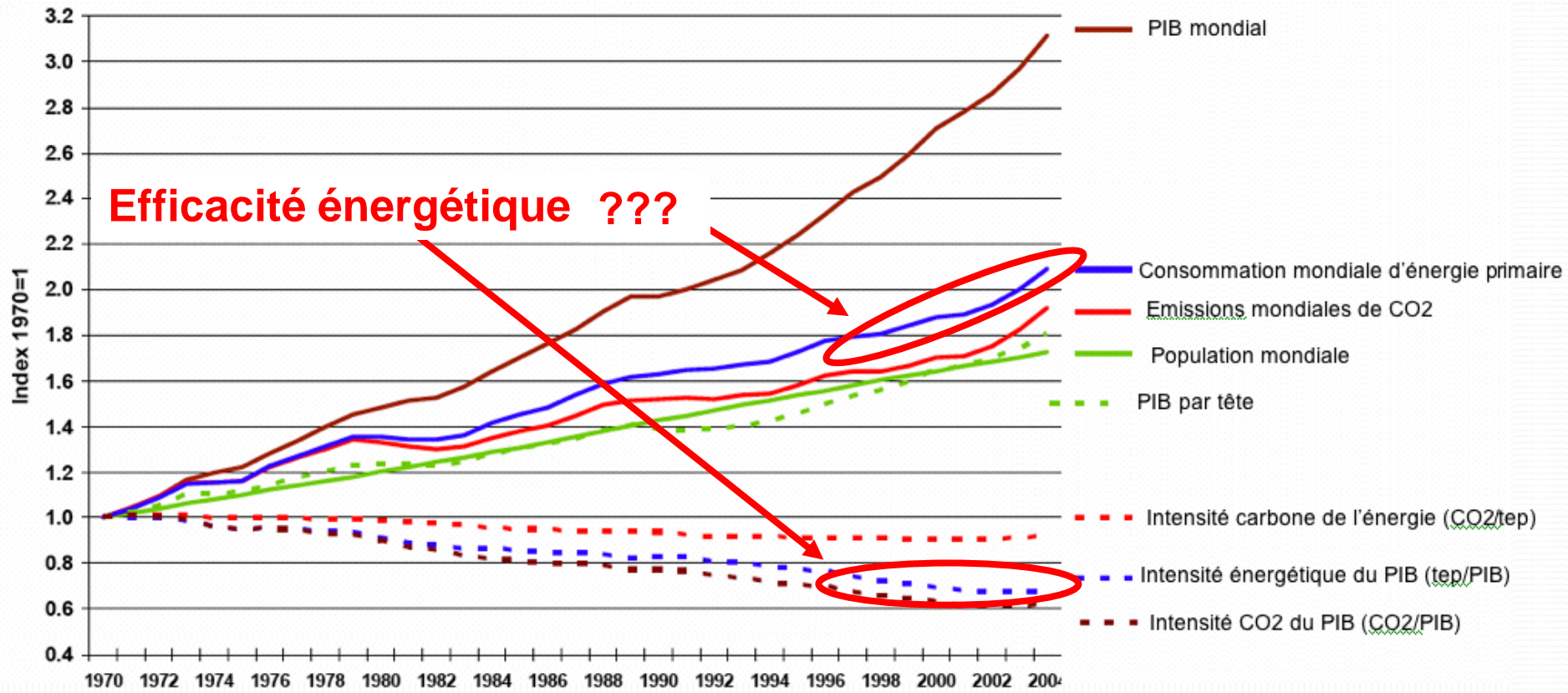
**Consommation mondiale d'électricité, 1980-2017.**  
**Source BP Statistical Review**



kWh d'électricité utilisés pour produire un dollar de PIB dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

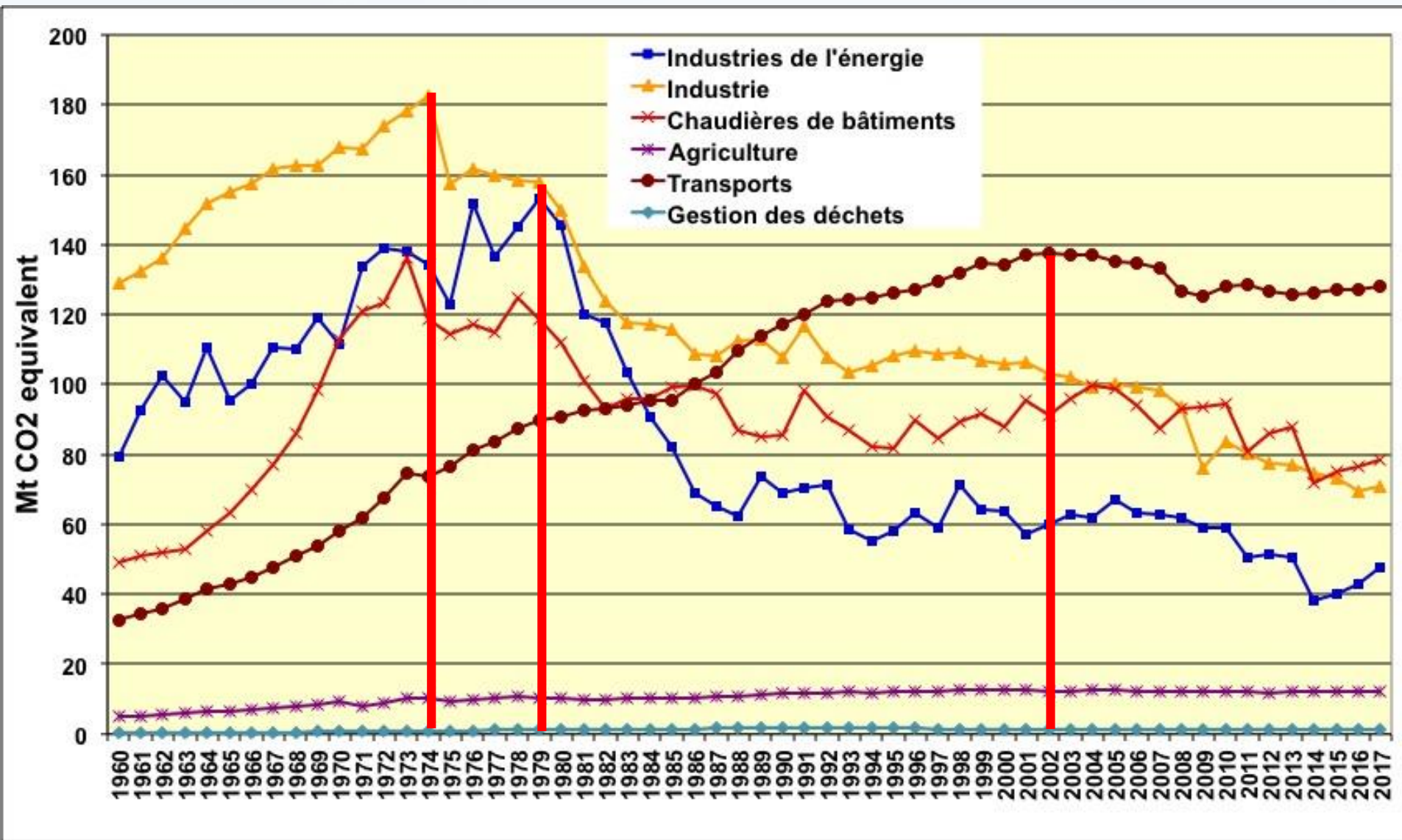


# Moins d'énergie, c'est quoi exactement ?



**Evolution comparée du PIB, de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Source GIEC, 2007**

# En fait la vérité est dans le prix



Emissions de CO2 par secteur entre 1960 et 2017 en France. Source CITEPA, format SECTEN, 2018

# La morale c'est bien, mais le prix c'est mieux



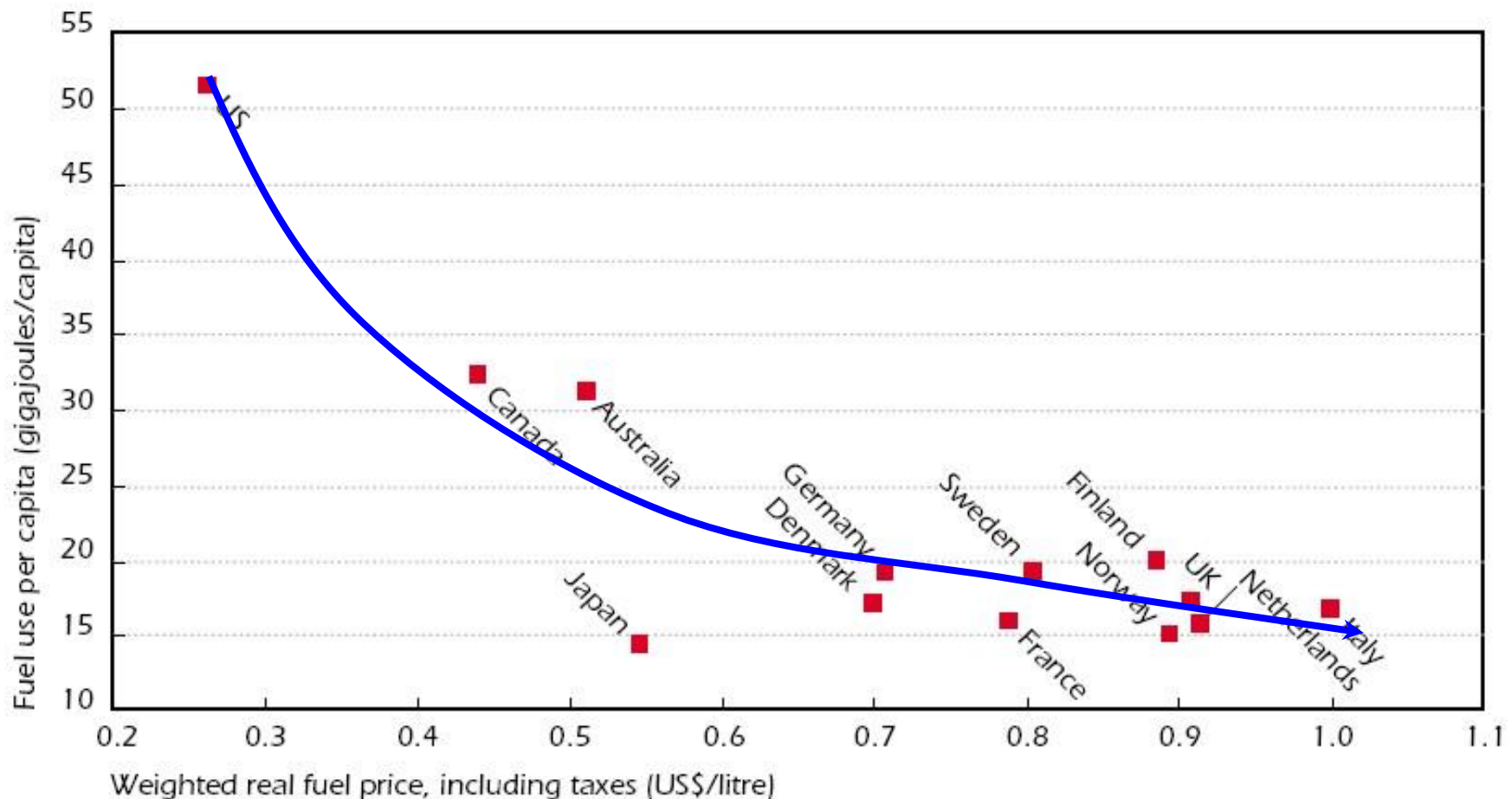
**Prix du pétrole en \$ constants (de 2004) depuis 1861. Source BP Statistical Review, juin 2005**

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

**Source GIEC**

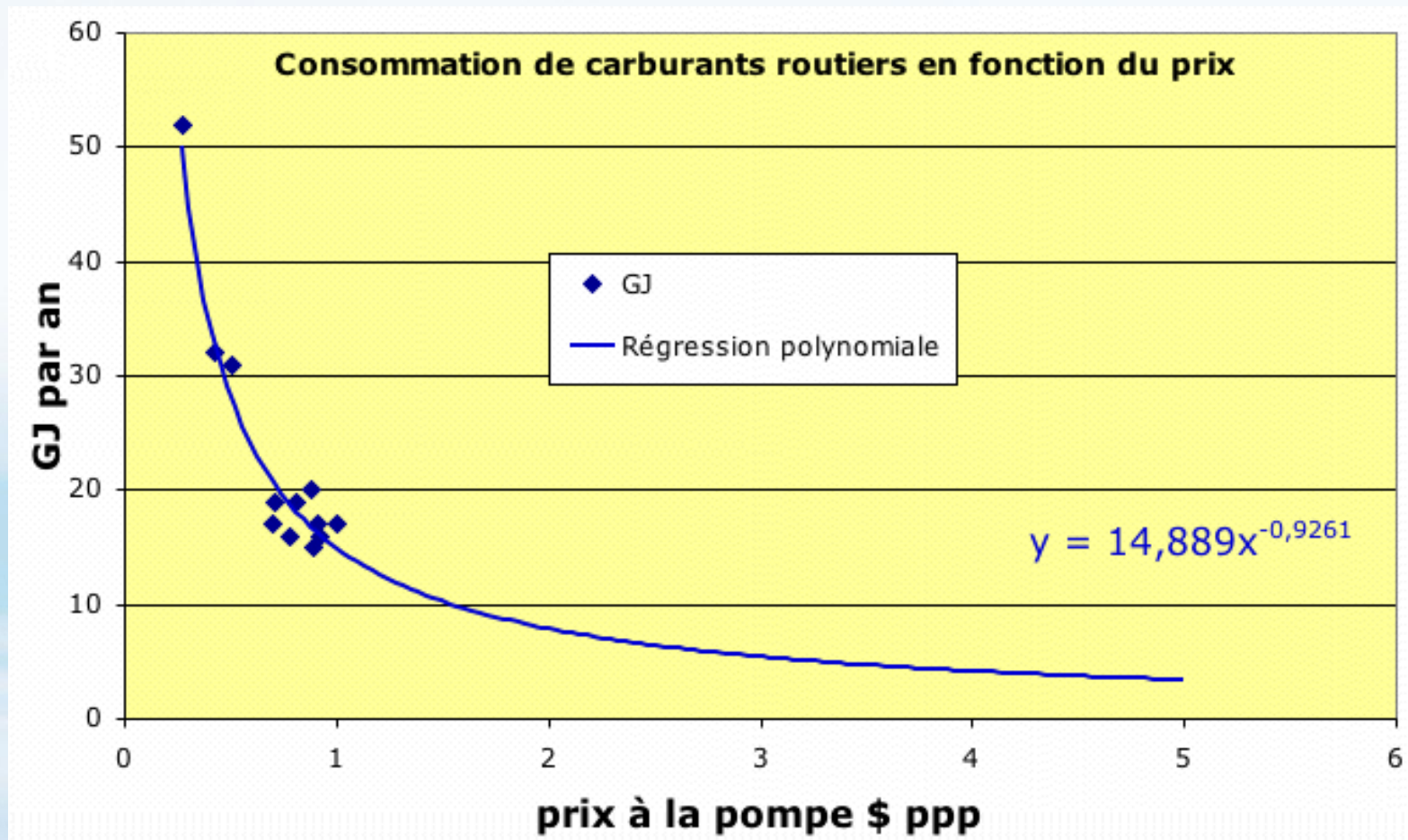


Car Fuel Use per Capita versus Average Fuel Price, 1998



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

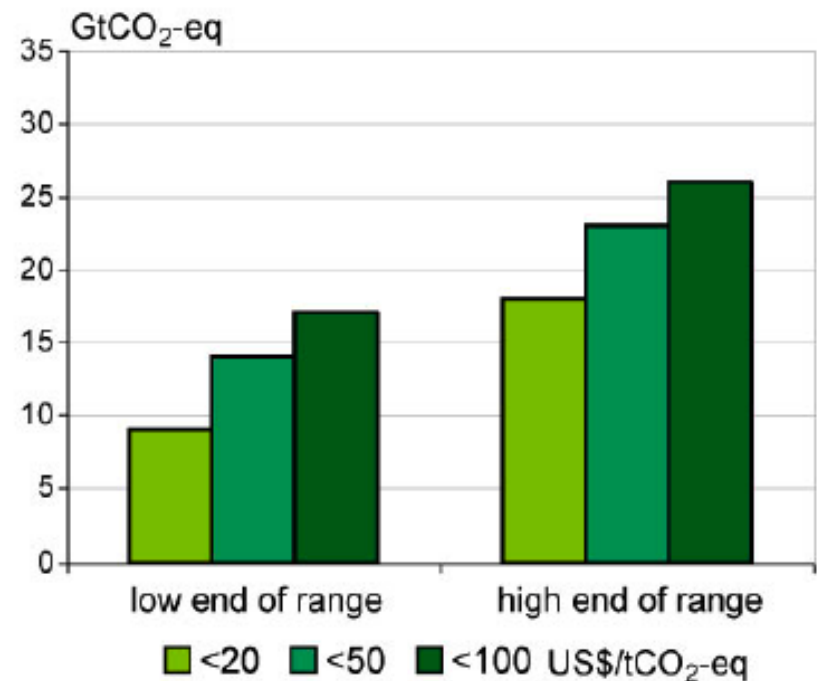
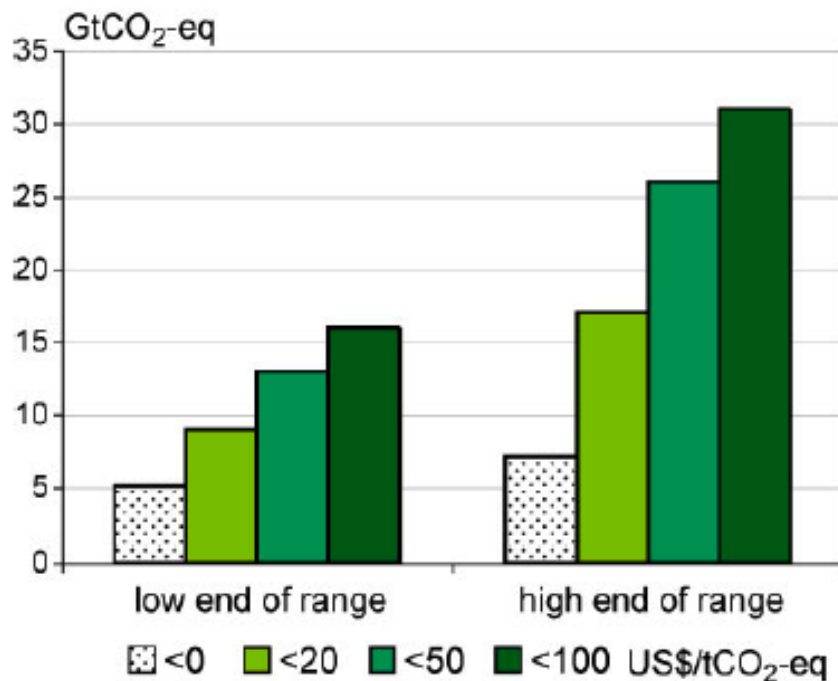




Même graphique que précédemment, avec prolongation tendancielle. Si celle-ci est valide, il faudrait que l'essence coûte (sur une période longue) environ 4 \$/litre (en prix constants) pour que la consommation soit divisée par 4 en France.

Extrapolation de l'auteur.

# La vertu a un prix, tout le monde le dit



**Ordre de grandeur des émissions évitées en fonction du prix de la tonne de CO<sub>2</sub> (taxe, ou dispositif équivalent) :**

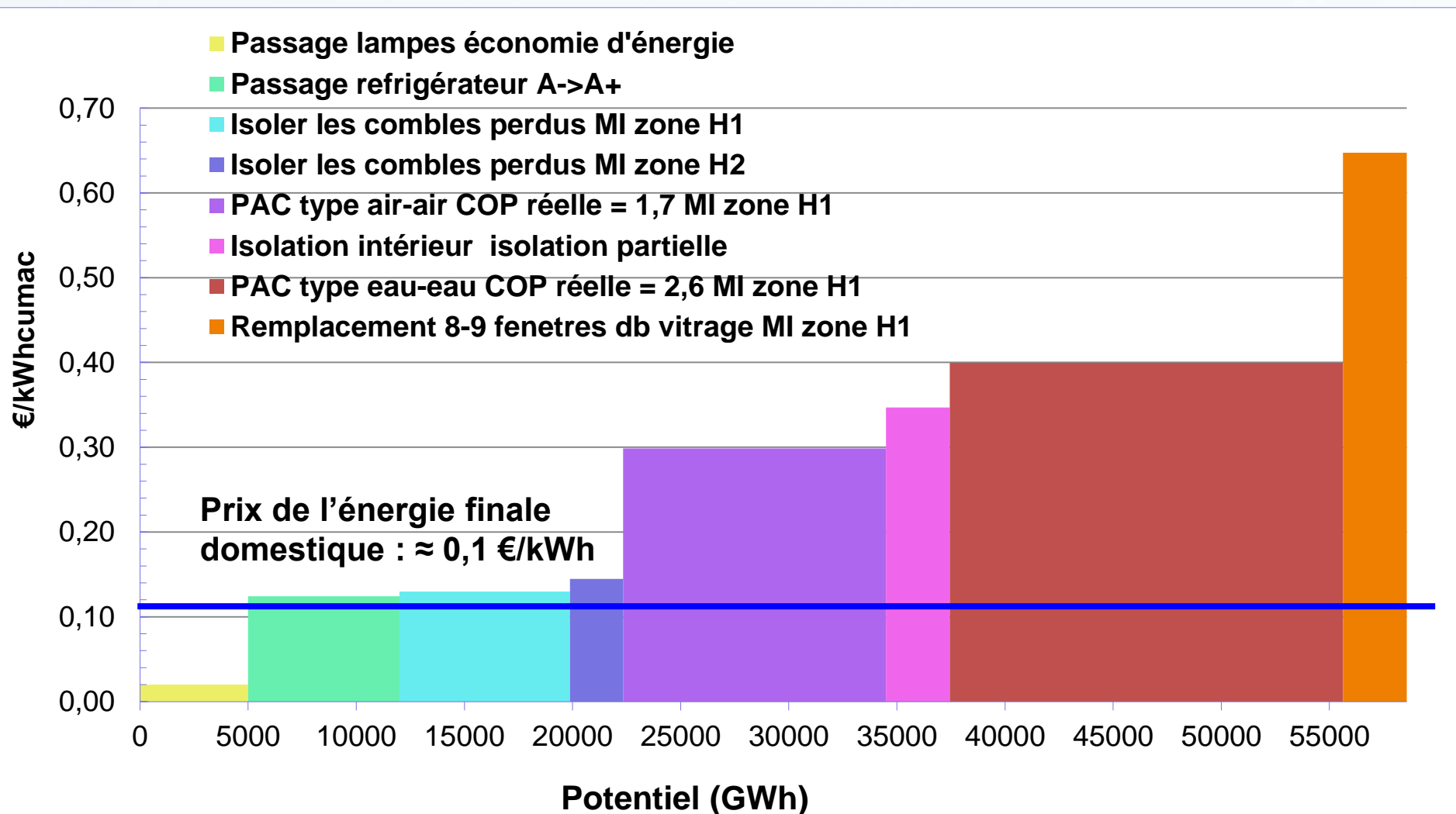
à gauche, addition d'études sectorielles

à droite, analyses macro.

**NB : les émissions tendanciennes en 2030 sont comprises entre 50 et 80 Gt CO<sub>2</sub>-eq.**

**Source : GIEC, 2007**

# La vertu a un prix, cela reste vrai même pour vous !



**Coût par kWh évité de diverses mesures permettant d'économiser de l'énergie de chauffage en France. Source Carbone 4, 2011**

**En pratique, le « prix du CO<sub>2</sub> » peut désigner :**

**L'achat d'un quota négociable sur le « marché du CO<sub>2</sub> »**

**L'achat d'un quota aux enchères à l'Etat**

**Le paiement d'une taxe ou d'un droit de douane à l'Etat**

**Un « coût d'ajustement » pour une nouvelle réglementation**

**Ou... l'achat de ce qui va permettre d'émettre du CO<sub>2</sub>**



# **L'argent ne va pas au même endroit...**

---

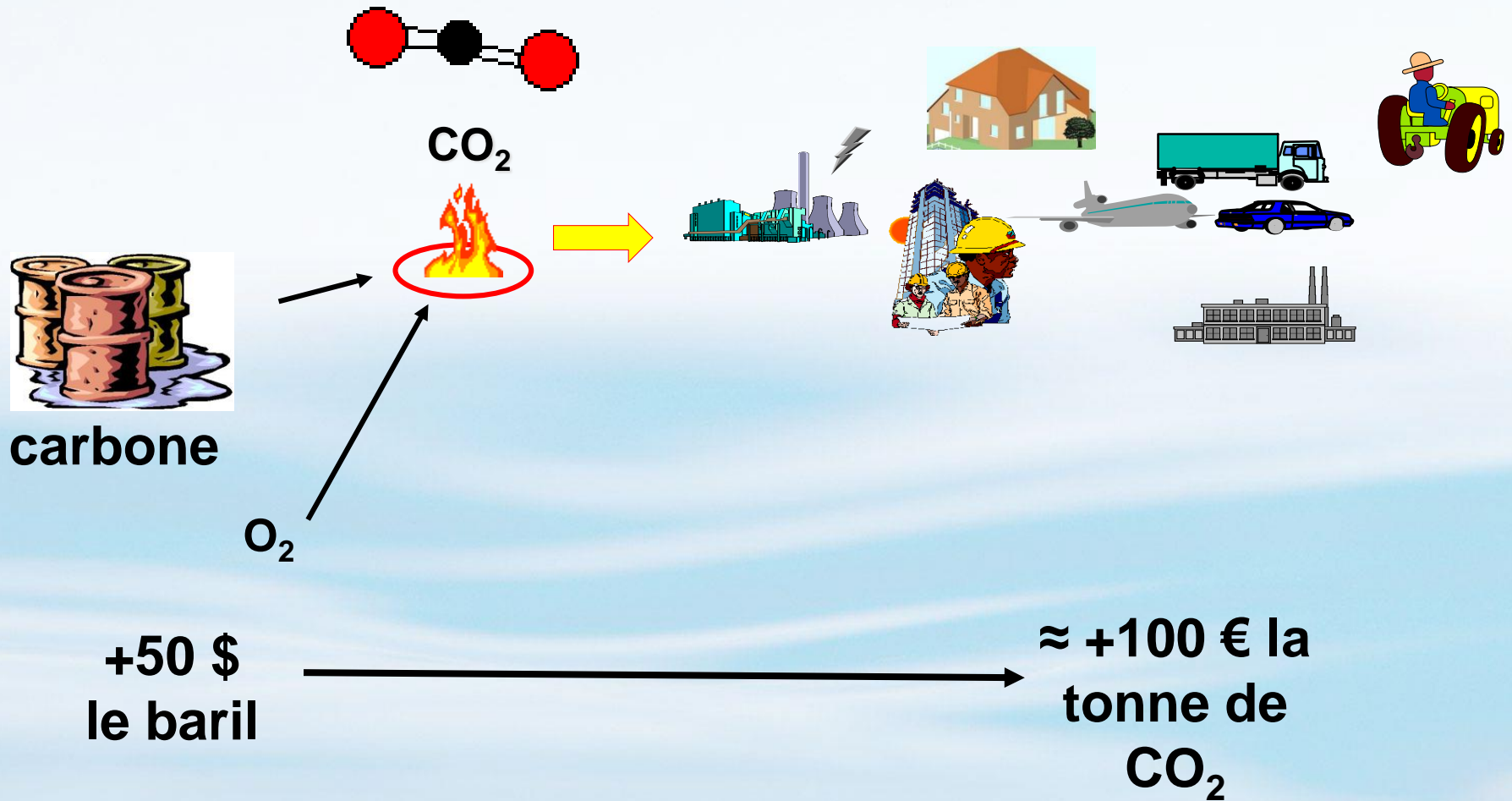
**Selon le système qui fait naître un « prix du CO<sub>2</sub> » l'argent ne va pas au même endroit :**

**Taxe ou quotas aux enchères : Etat**

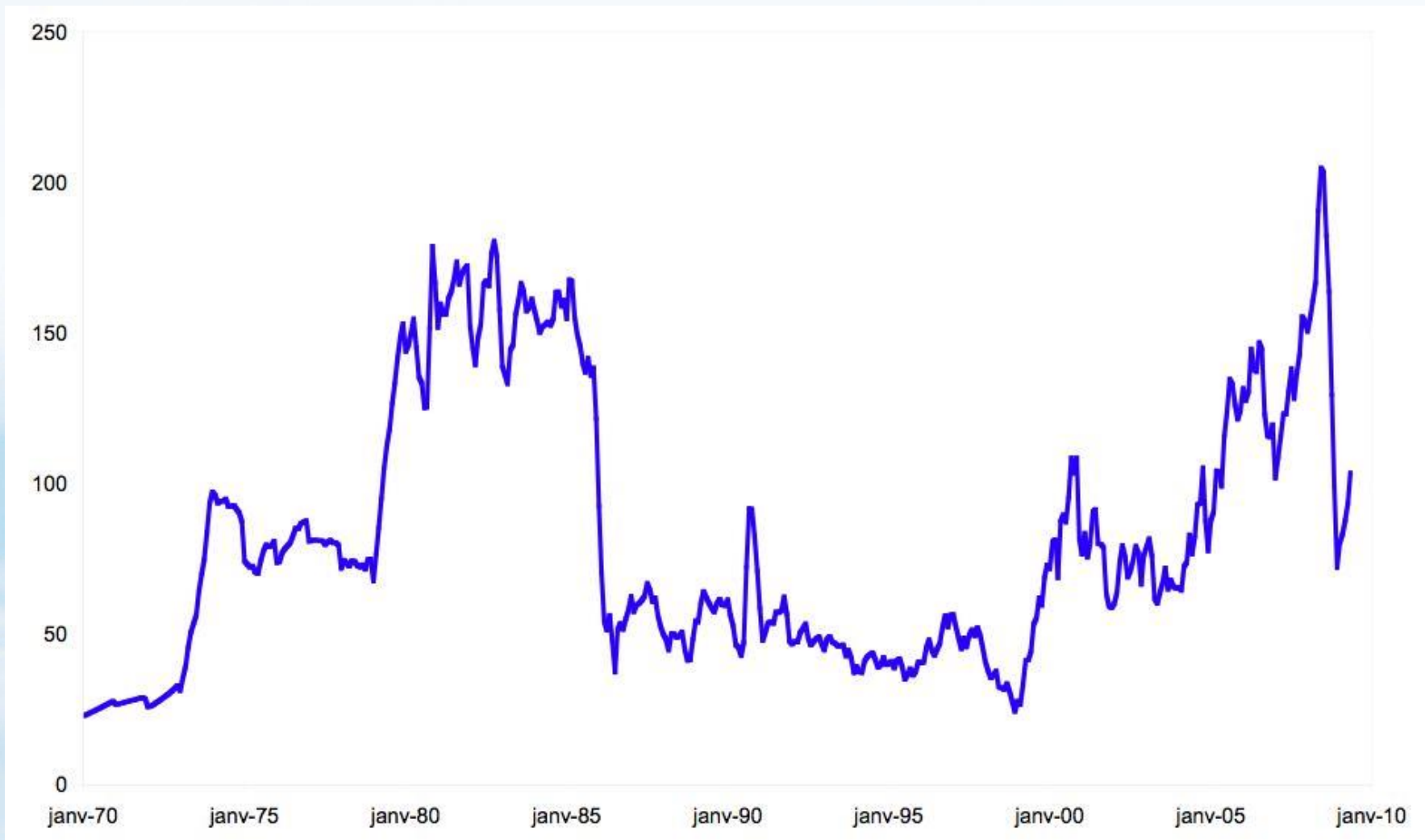
**Achat d'un quota négociable sur le « marché du CO<sub>2</sub> » : dans les poches d'un autre assujetti (rien pour l'état).**

**Hausse du prix de marché d'un hydrocarbure : dans les poches du pays producteur**

# Une autre manière de voir le prix du CO<sub>2</sub>

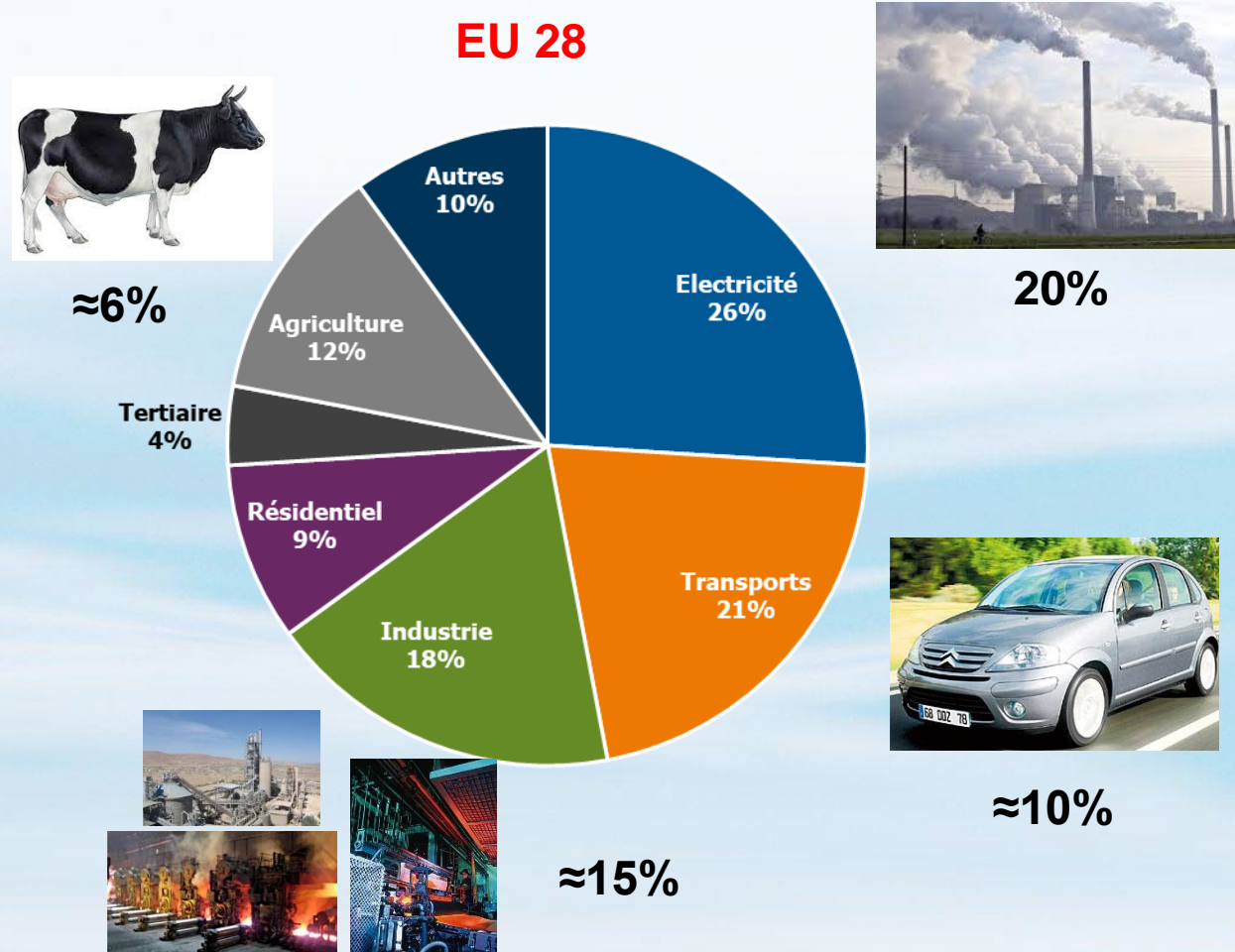


# En fait, nous aimons beaucoup payer le carbone !



**Prix moyen mensuel en € de 2008 d'une quantité de pétrole brut dont la combustion émet 1 t de CO<sub>2</sub>. Source Richard Lavergne (CGDD) et Yves Martin, juillet 2009**

# Carbone ? Vous avez dit carbone ?



Émissions de GES européen par secteur économique en 2014 : 4,5Gt CO<sub>2</sub>eq - Source: EEA greenhouse gas



## ÉLECTRICITÉ

Fermer

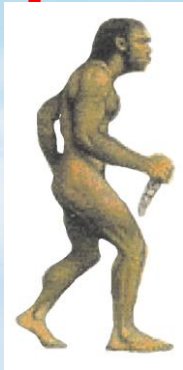
toutes les centrales à charbon  
(réglementation et prix)



# Du passé vers quel avenir ?

**Consommation  
en énergies  
fossiles**

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



**Période  
sans énergies fossiles**



**1850–2150  
Période  
avec énergies  
fossiles**

**Merci à Yves Mathieu ! (IFP)**

**Période  
sans énergies fossiles**

