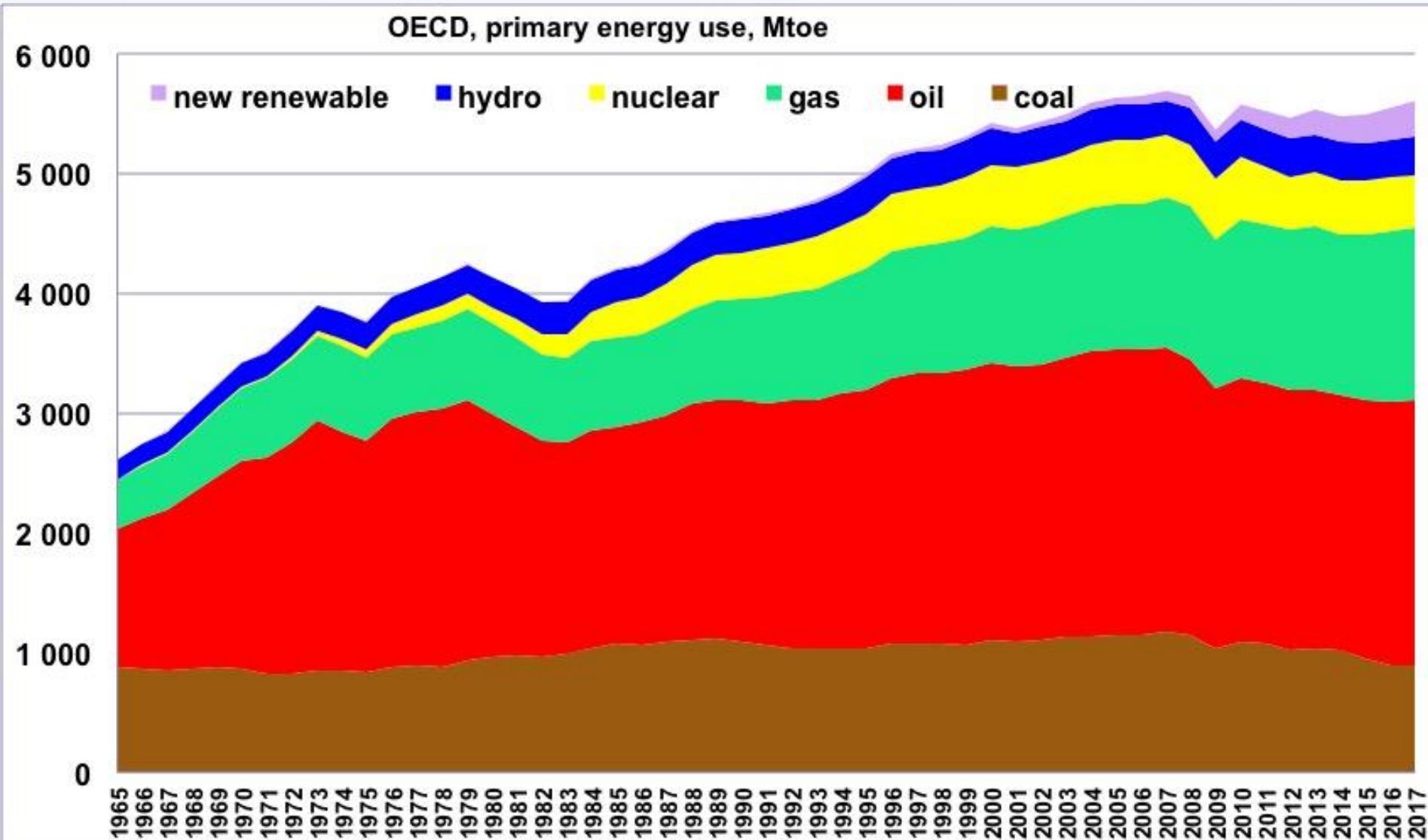


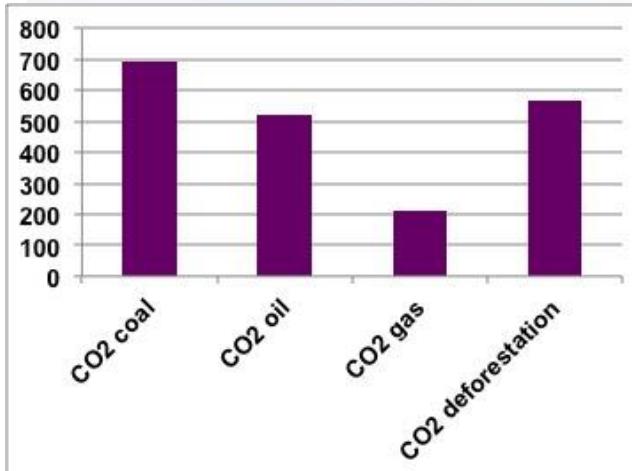
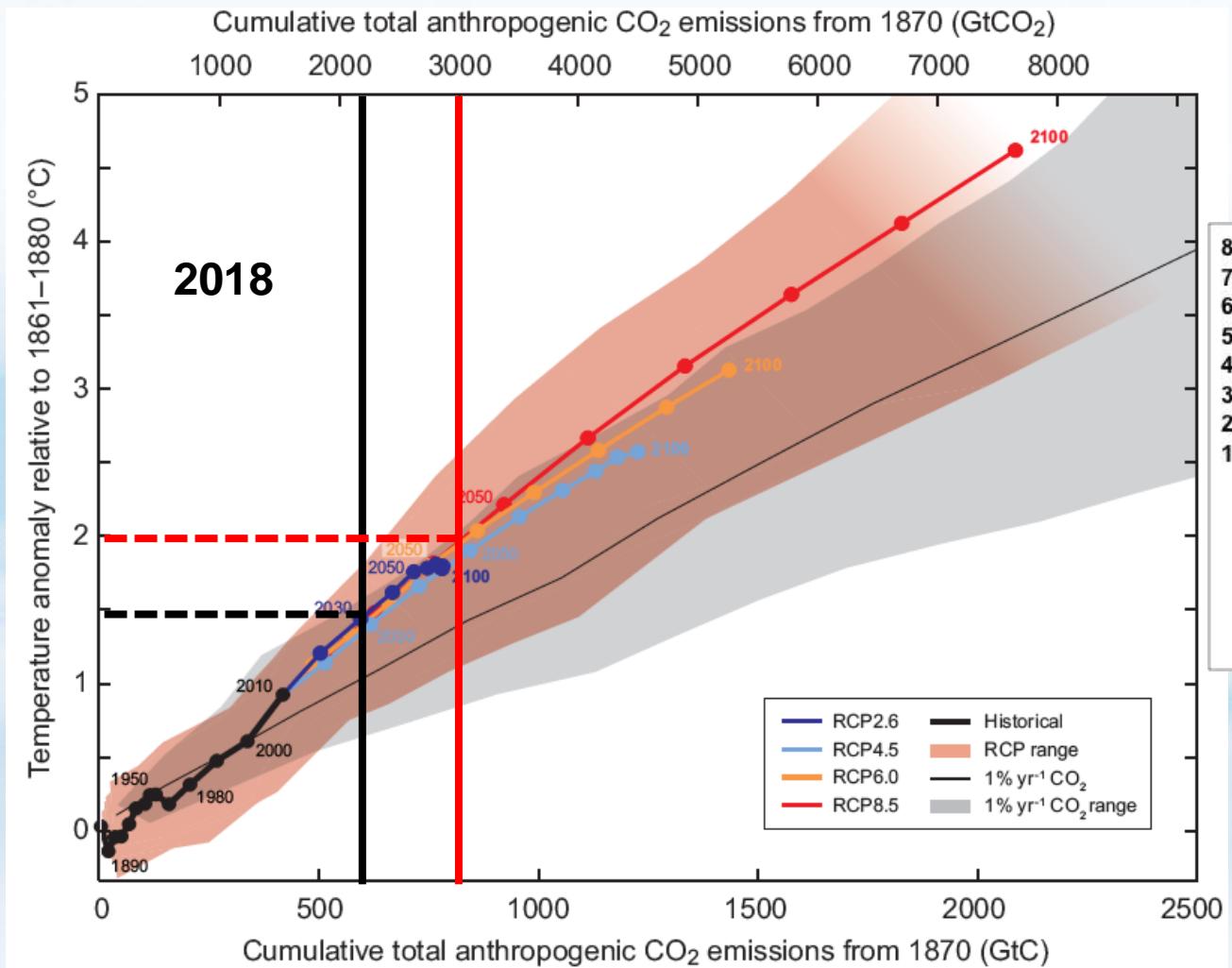
Eléments de base sur l'énergie au 21^e siècle



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

Une première raison de faire des économies

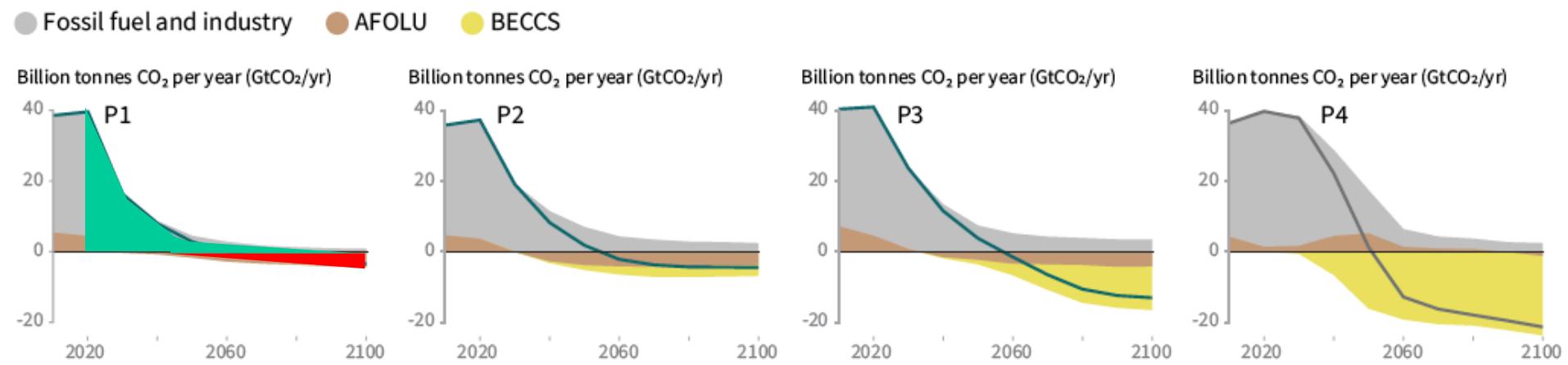




Emissions cumulées de CO₂ depuis 1870 en Gt

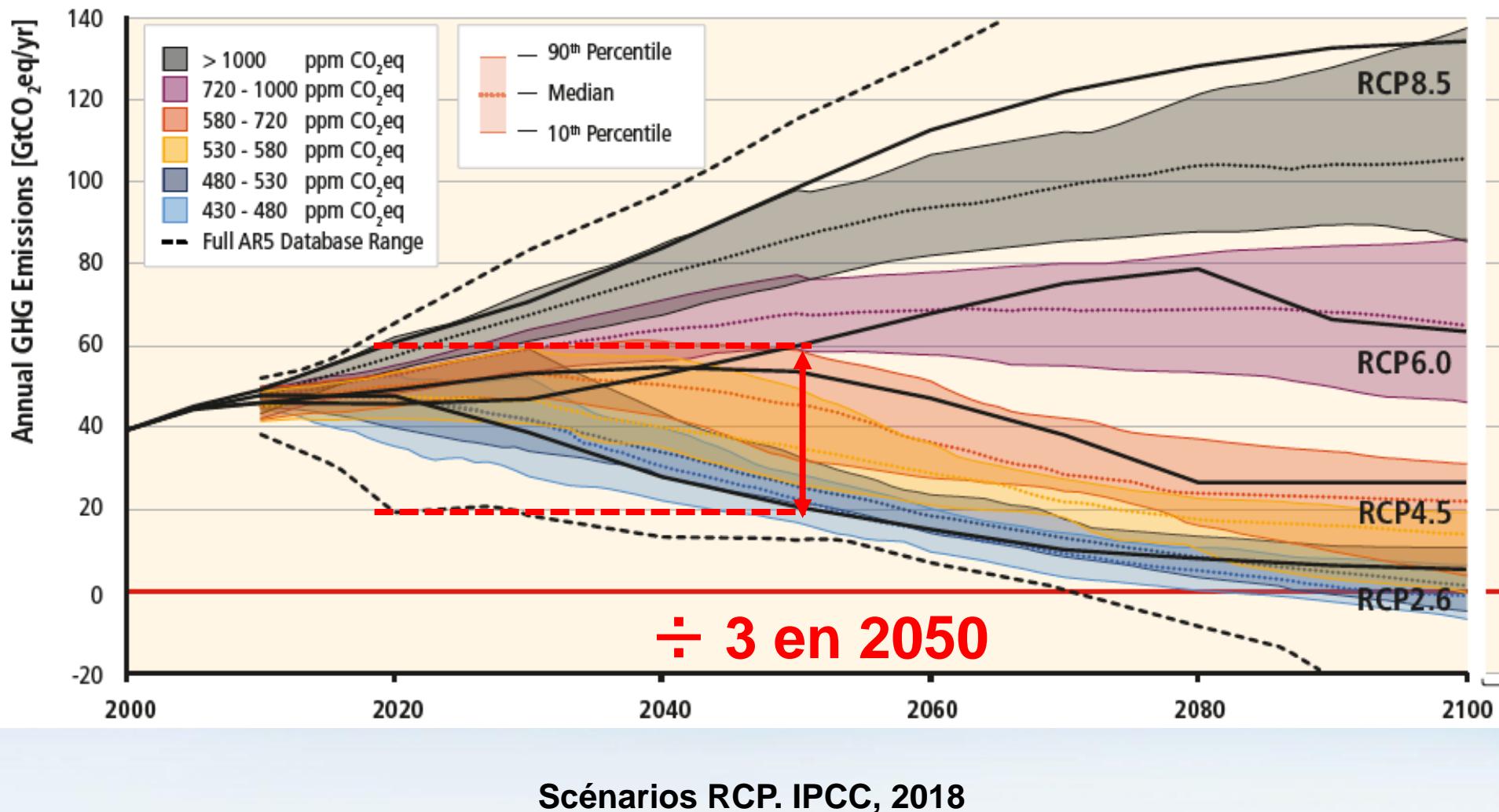
Élévation de température en 2100 en fonction du cumul émis depuis 1870. IPCC, 2015

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



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

GHG Emission Pathways 2000-2100: All AR5 Scenarios



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 m² 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

+ pertes
Jusqu'à 80%



Vapeur, eau
chaude...



Utile (et \$ €)

Mouvement

Chaleur

Transformation

Travail !

Prenons un exemple



30% à 45%



92%



> 1



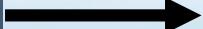
Prenons un exemple (bis)



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 cinéma, 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

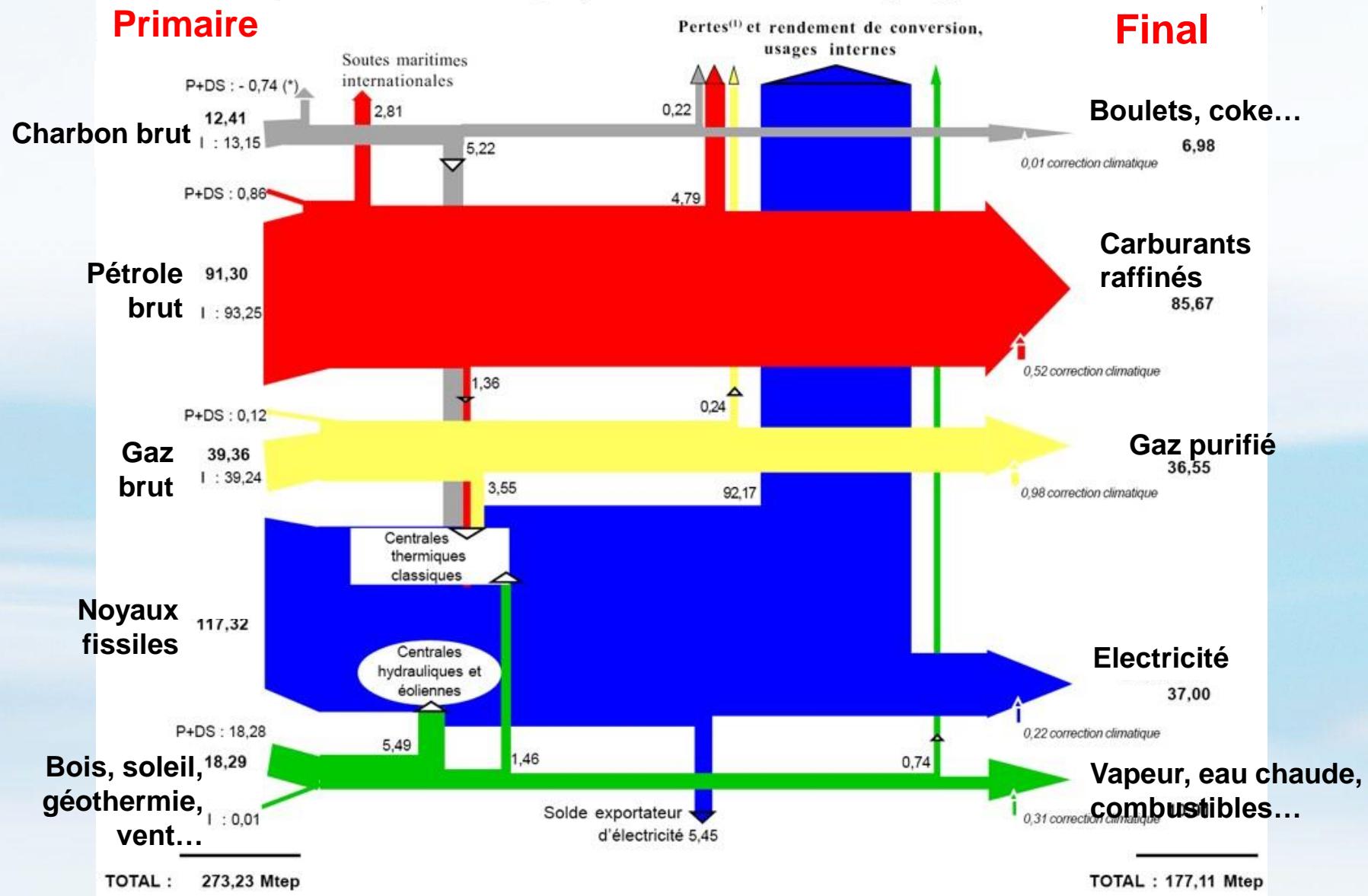
Je conduis moins, ou dans une plus petite voiture (moins puissante ou moins grande)

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

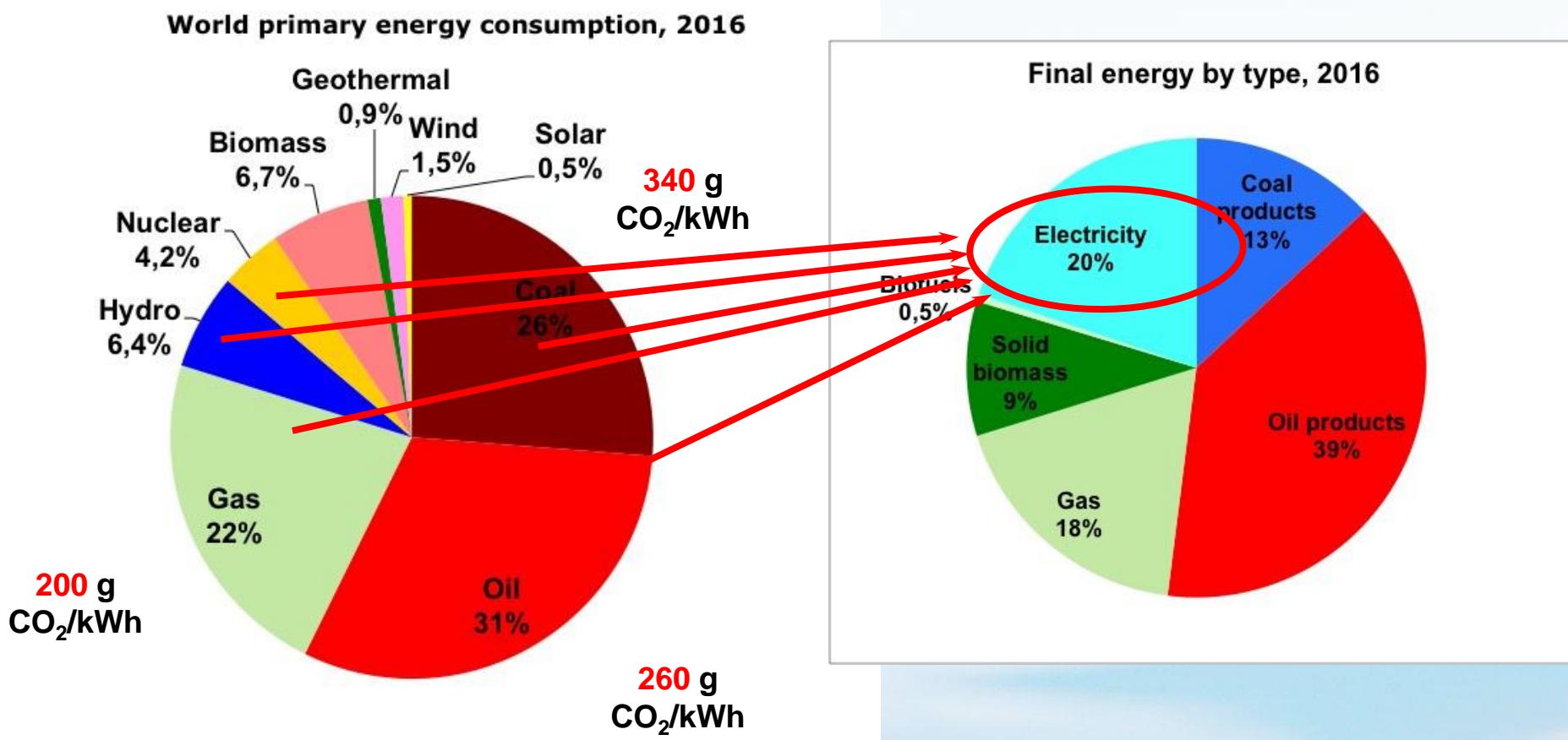
J'achète moins de poulet, de crème de soins, mes enfants vont moins tard à l'école et j'accepte d'attendre à l'hôpital

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 ?



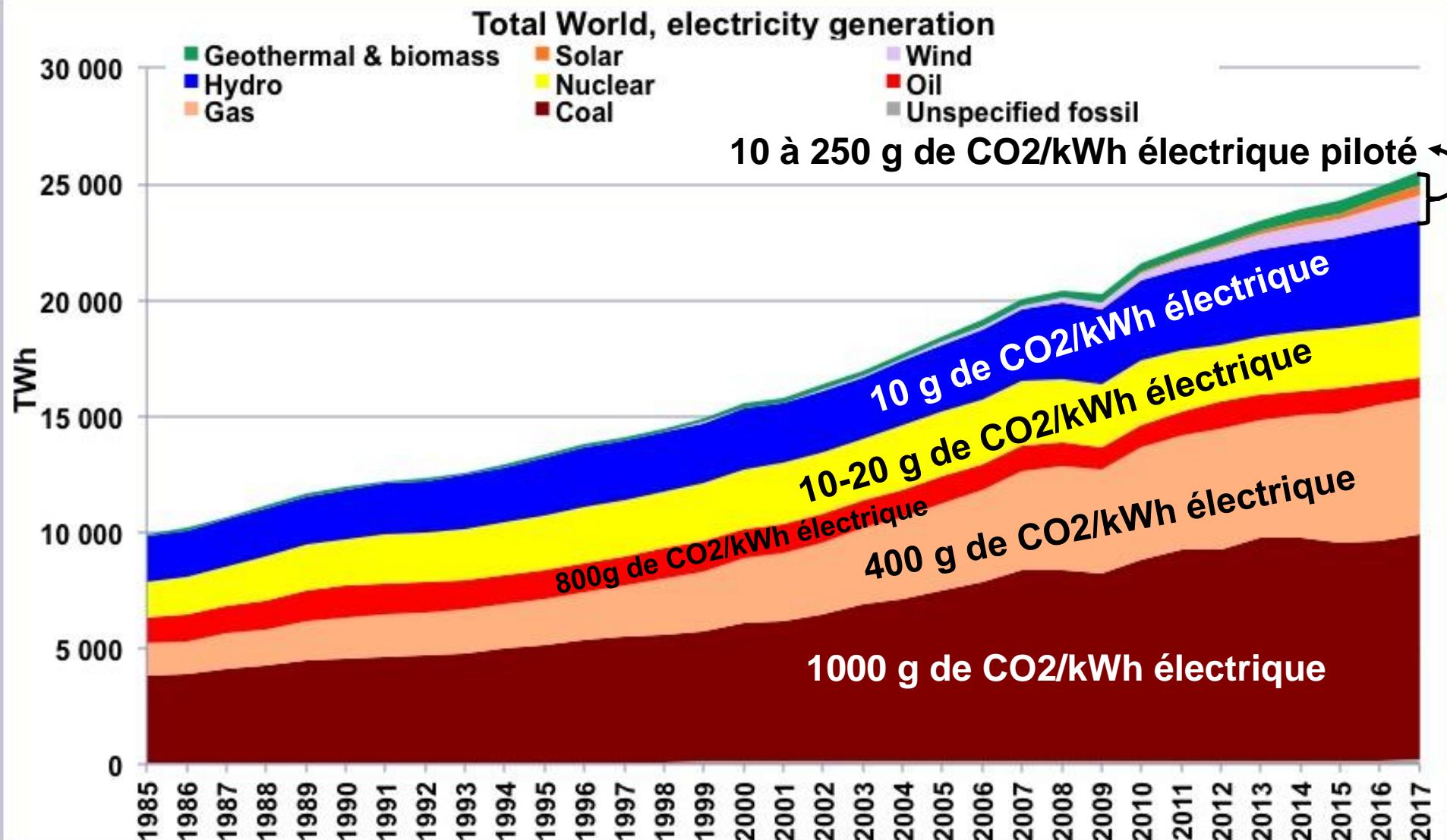
Energie primaire = carbone, ou presque



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

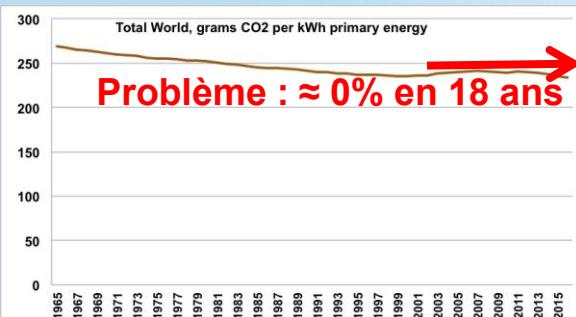


Évolution de la production électrique mondiale entre 1985 et 2017. Source BP Statistical Review

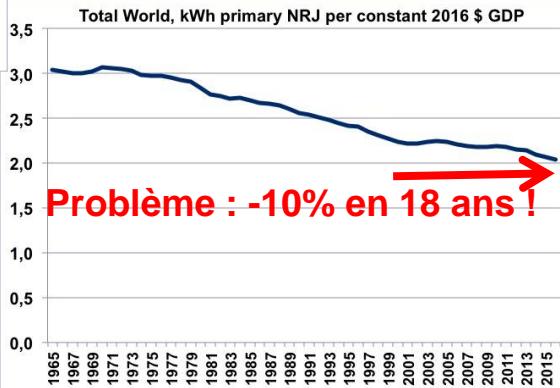
L'équation de Kaya :
 A diviser par > 3 d'ici 2050...
 et le sera !

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

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

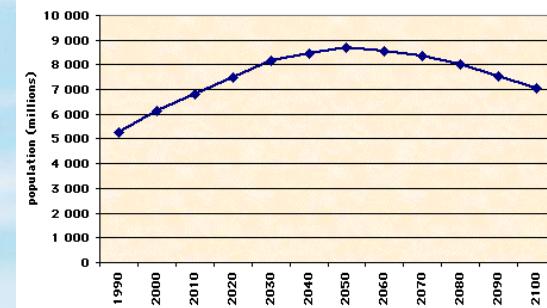


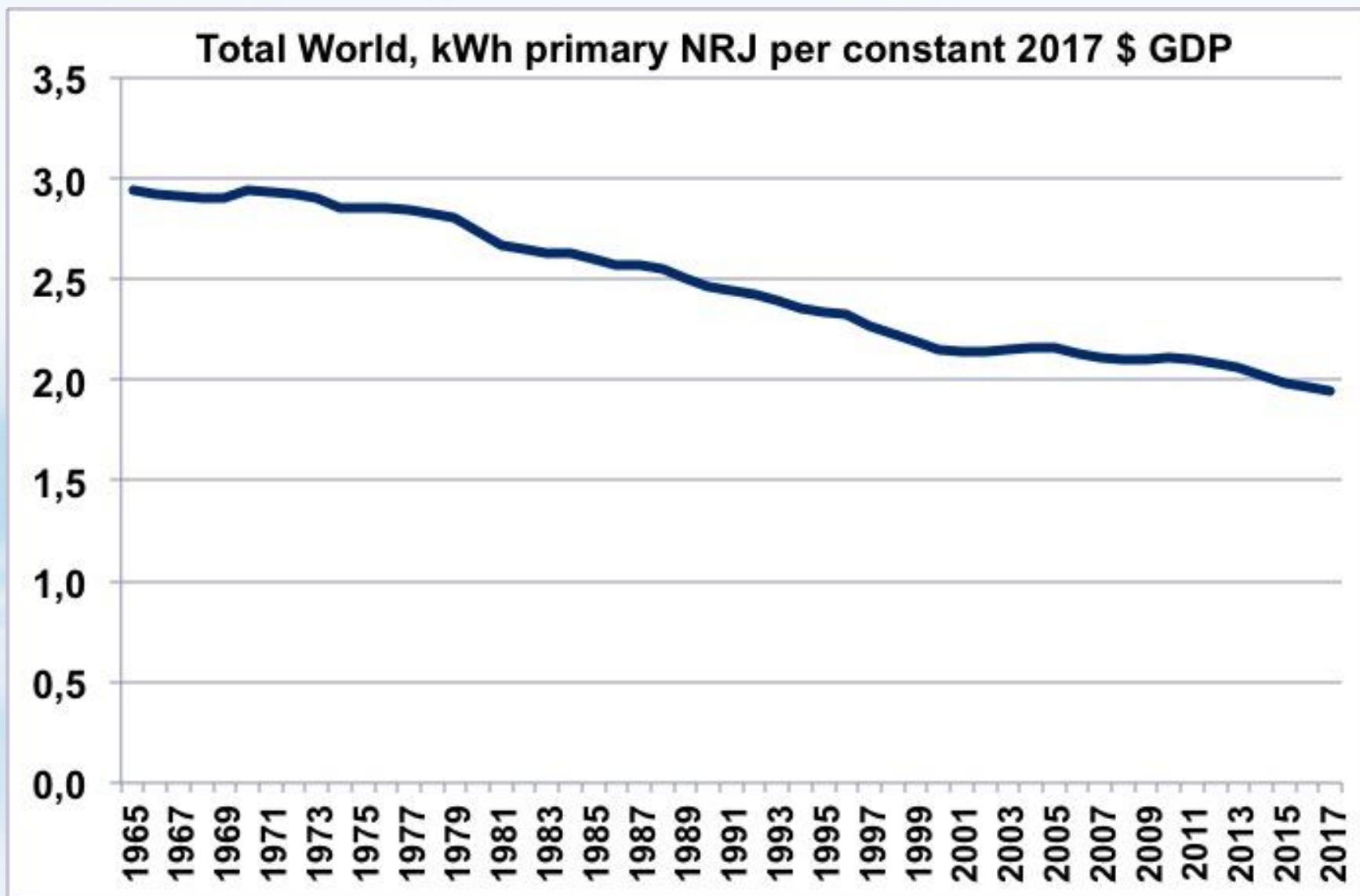
Magic technique N° 2 : $\downarrow CO_2 \text{ par kWh} =$
 nuke, ENR, CCS & charbon vers gaz



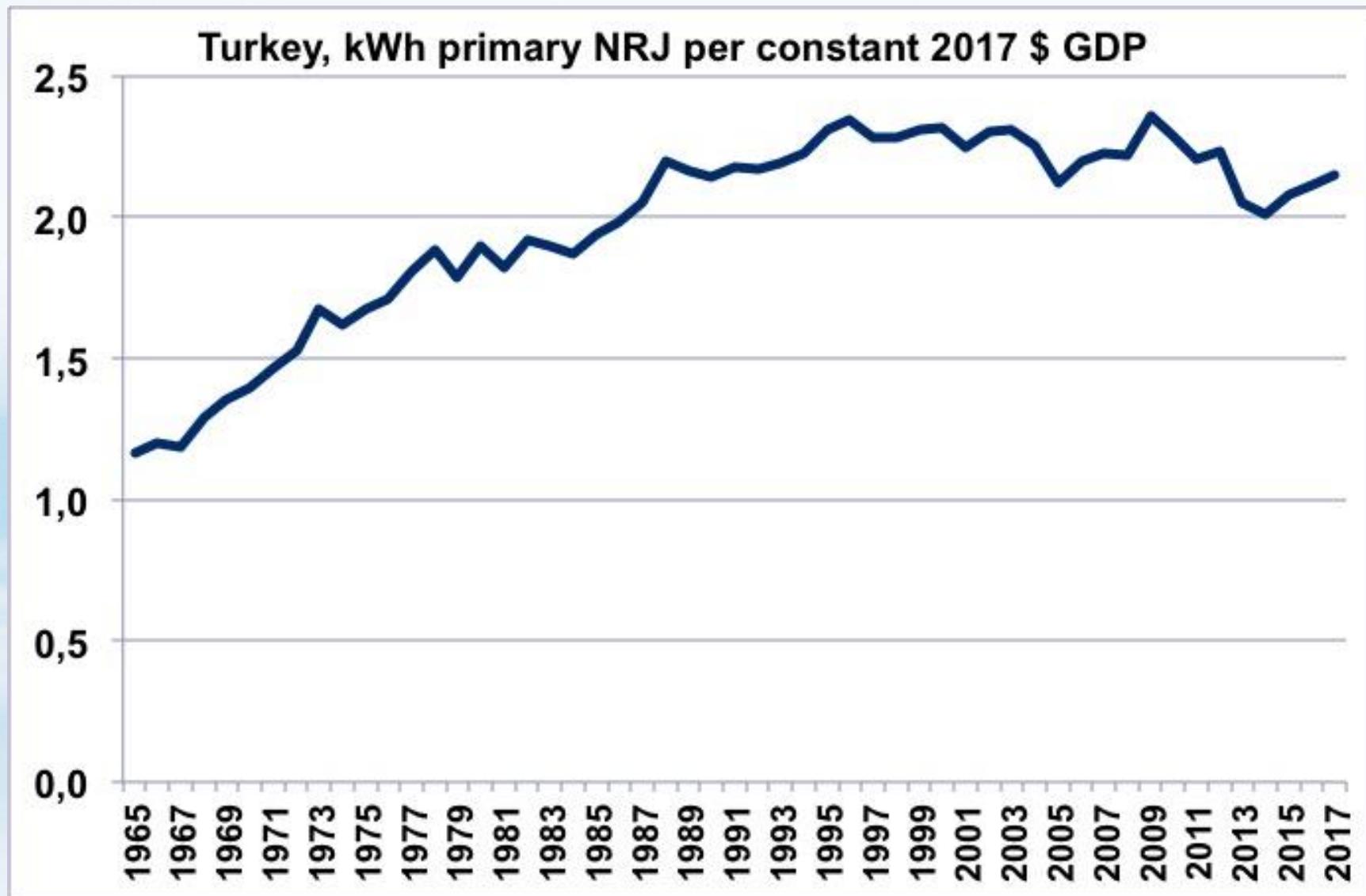
Magic technique N° 1 :
 \searrow NRJ par \$ de PIB

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

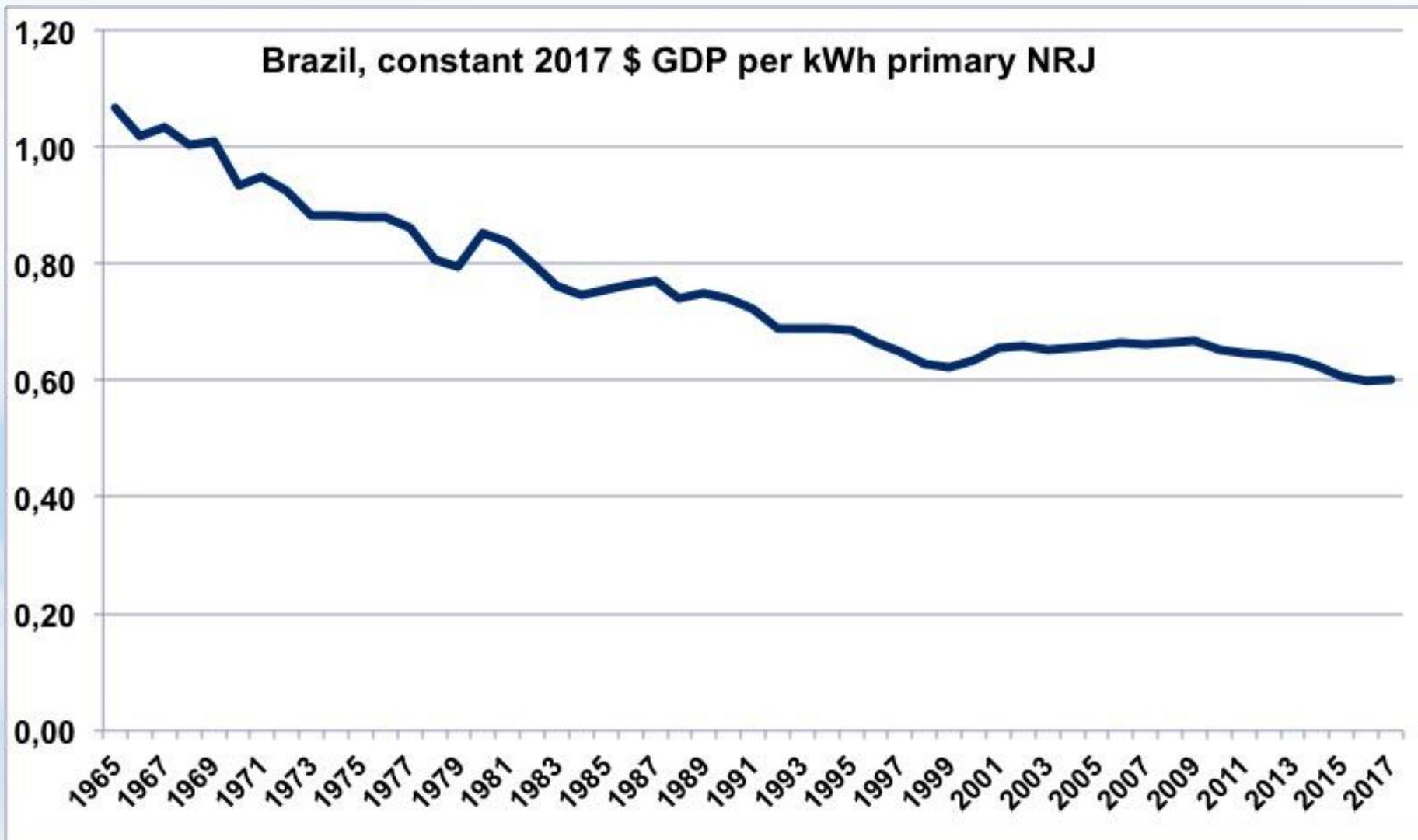




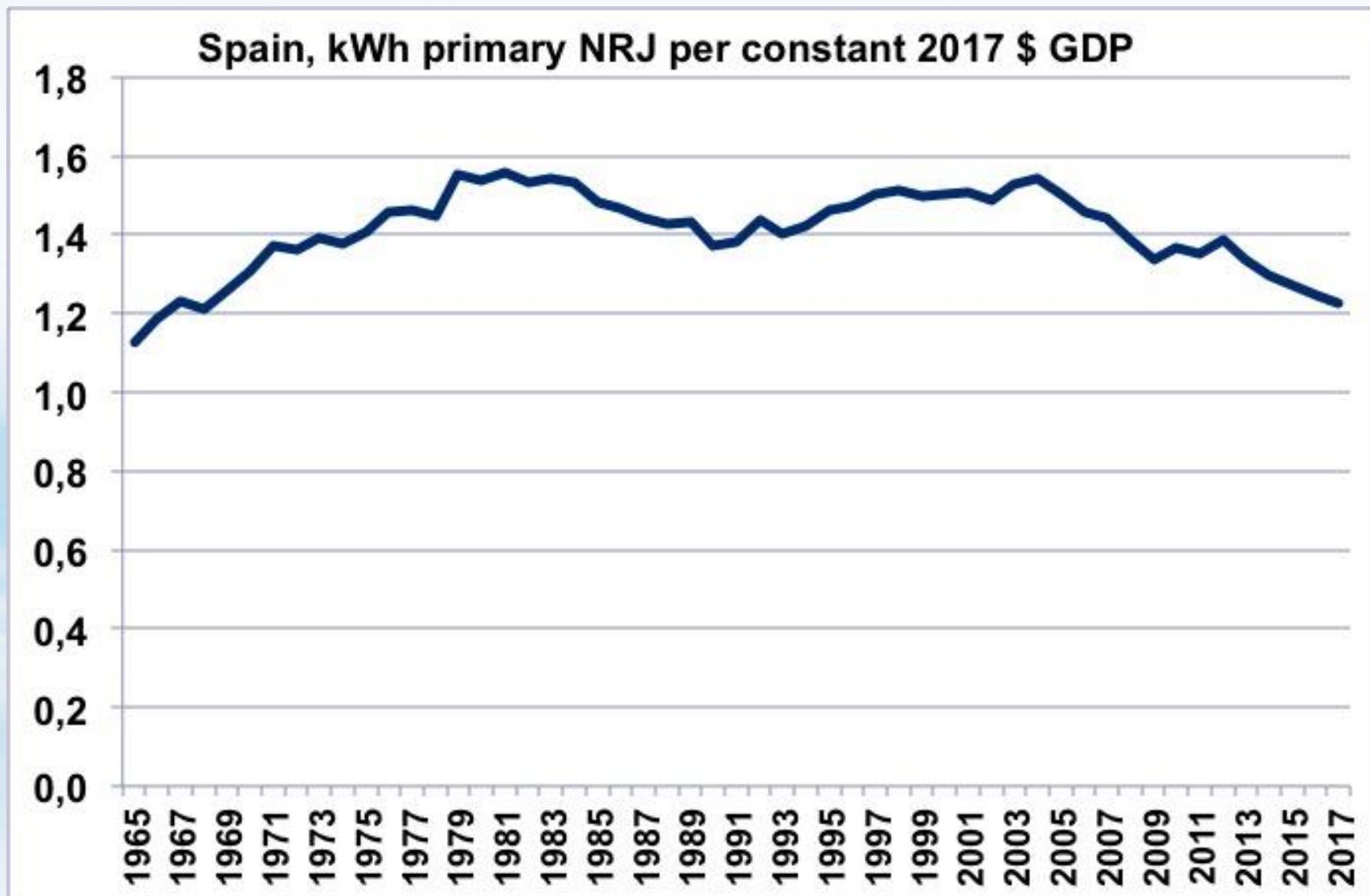
kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.



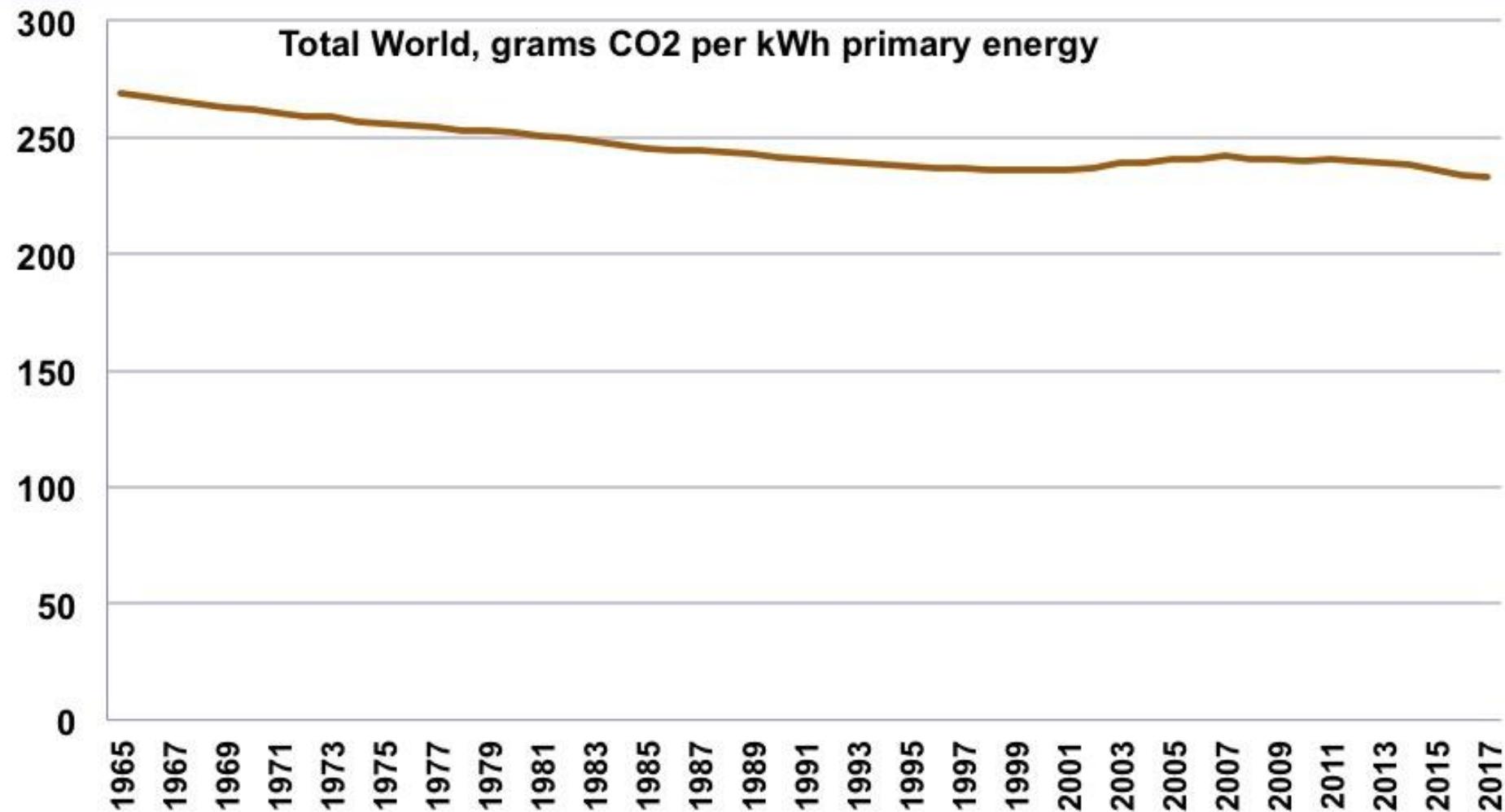
kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Turquie. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.



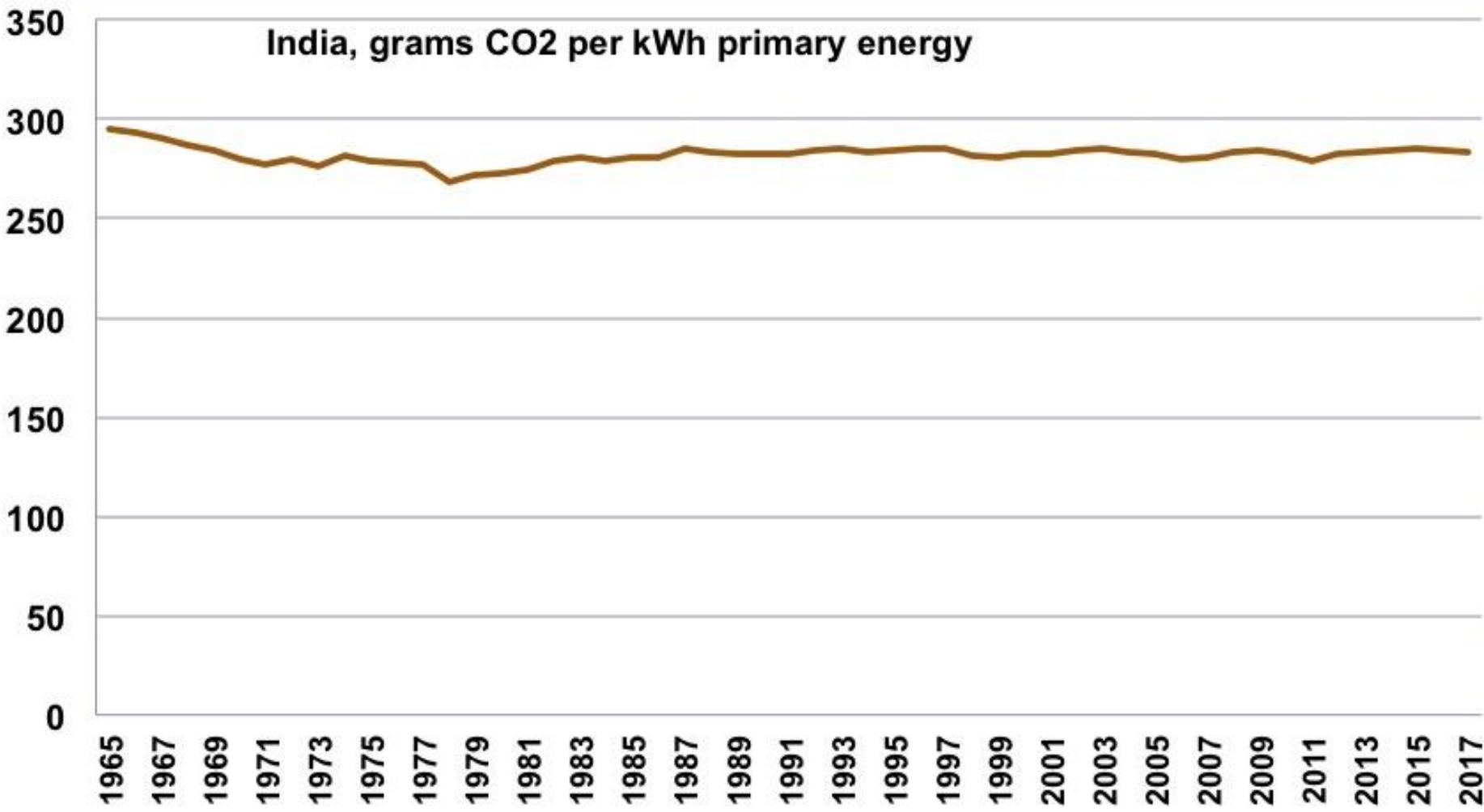
kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Turquie. Calculs Jancovici
; données primaires BP Statistical Review et World Bank.



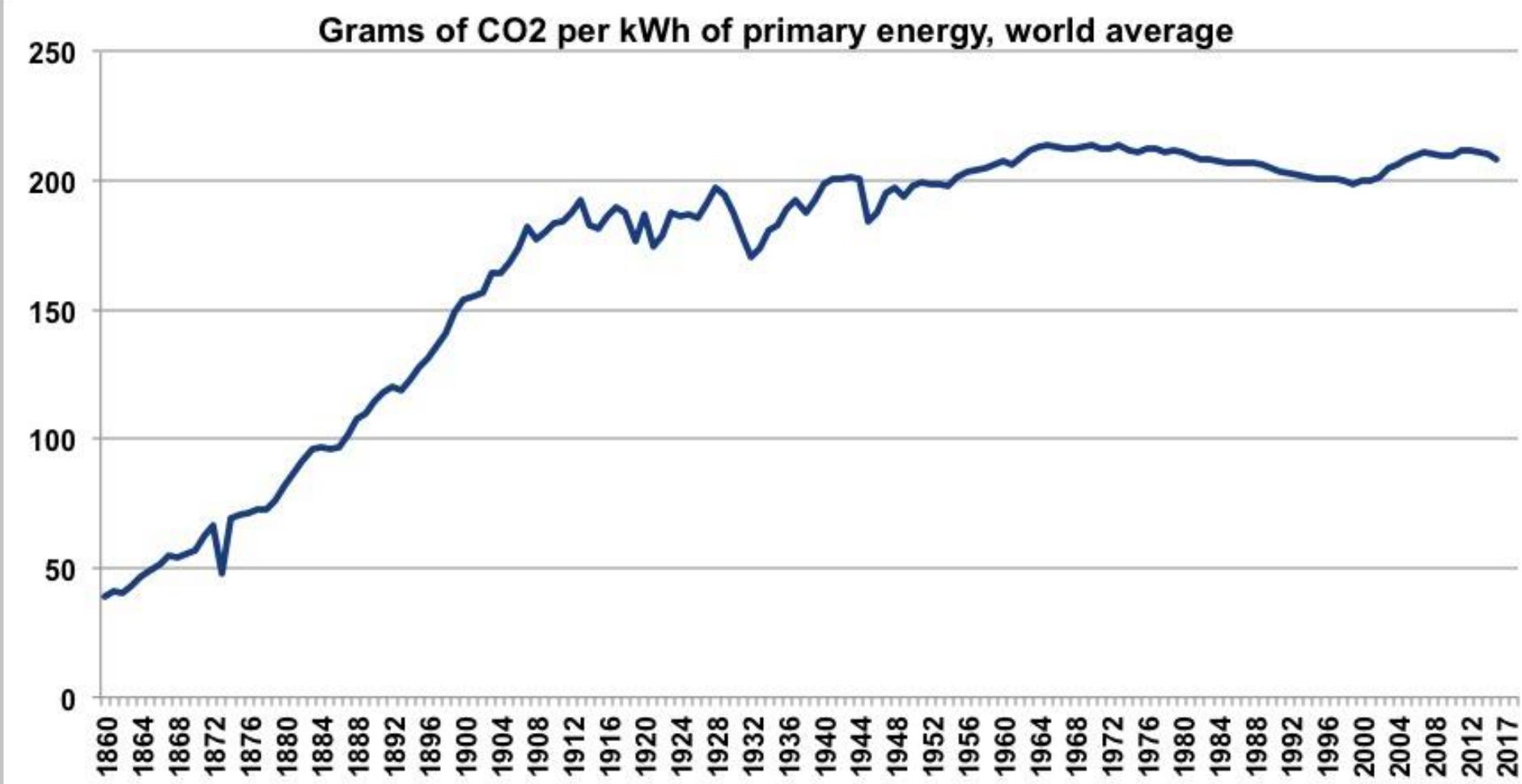
kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Espagne. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.



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

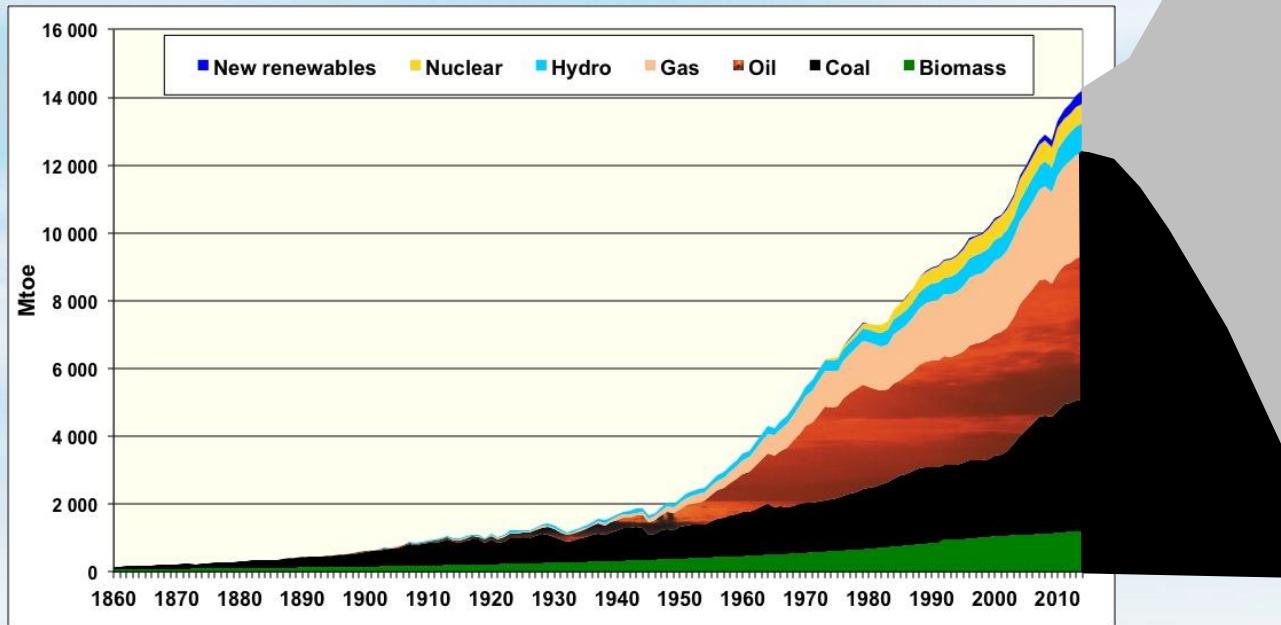


Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire en Inde.
Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review.



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 CO₂--, 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

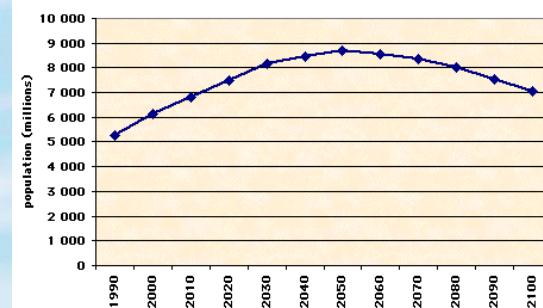


-1,3% par an



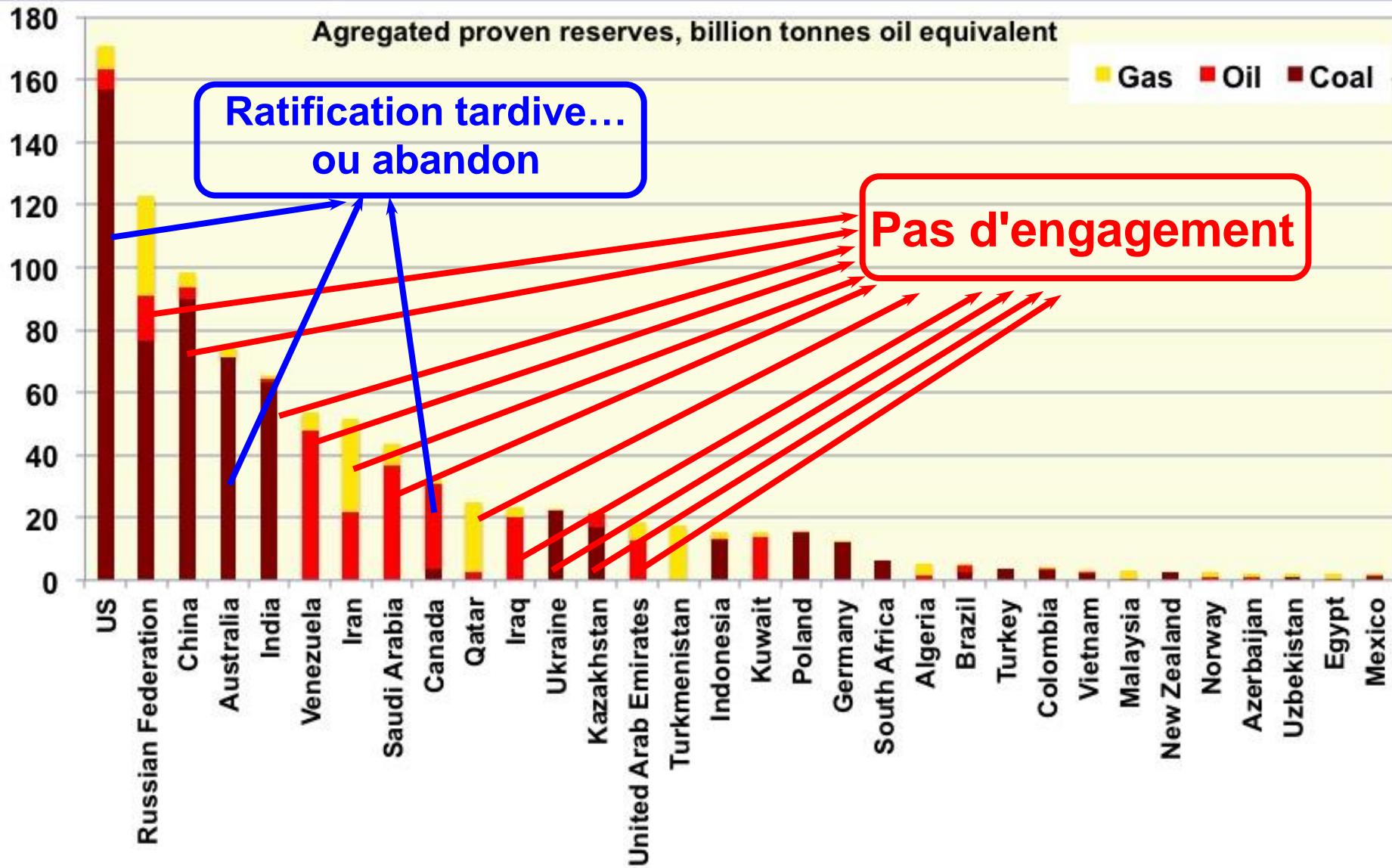
0% d'augmentation (et donc une division par 2 à 3 en France si égalité)

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



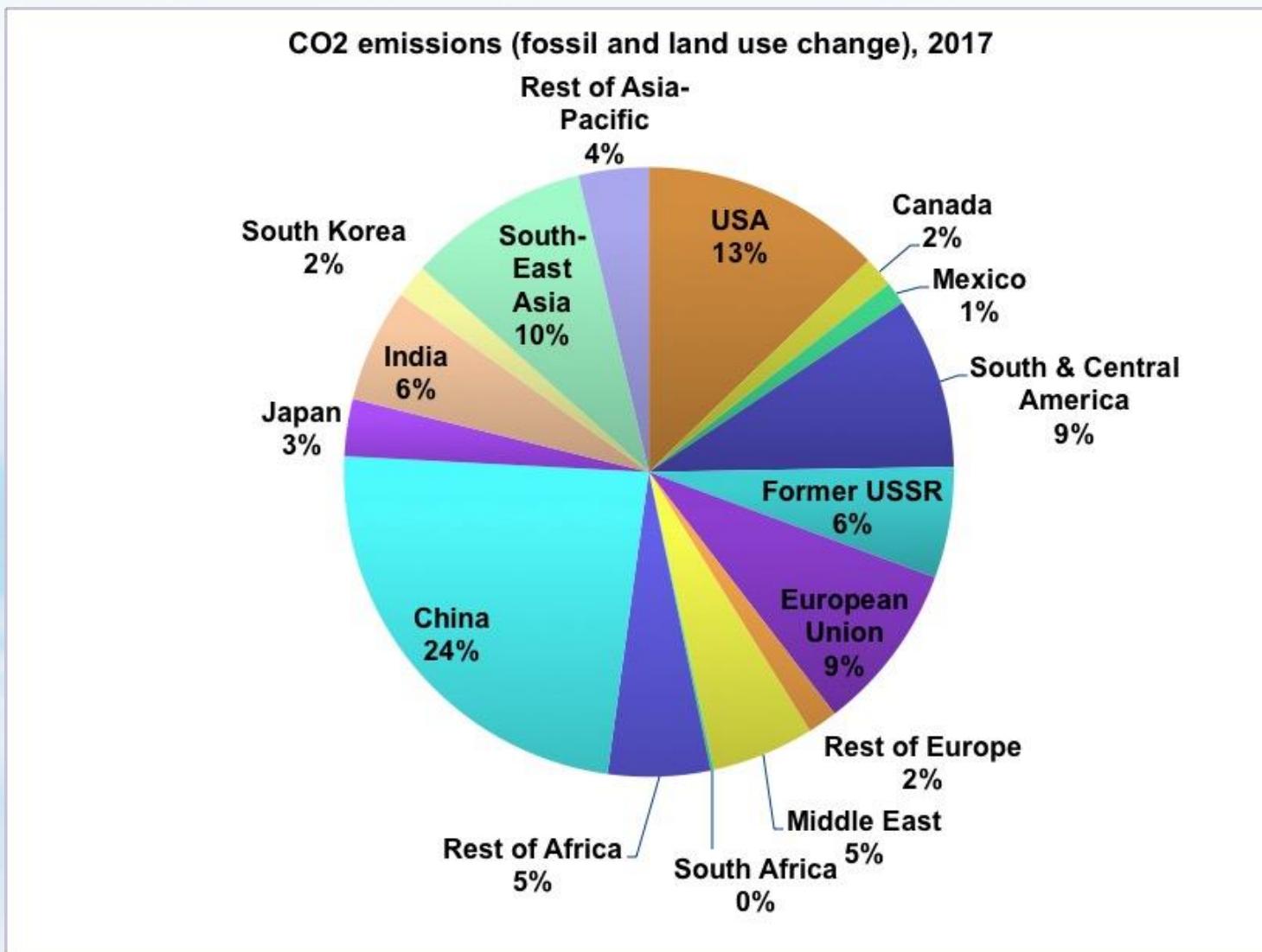
+ 20% d'ici 2050 ?

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 CO₂ 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)



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

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

Accessoirement (?) elle conférera 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/téléspectateur 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...

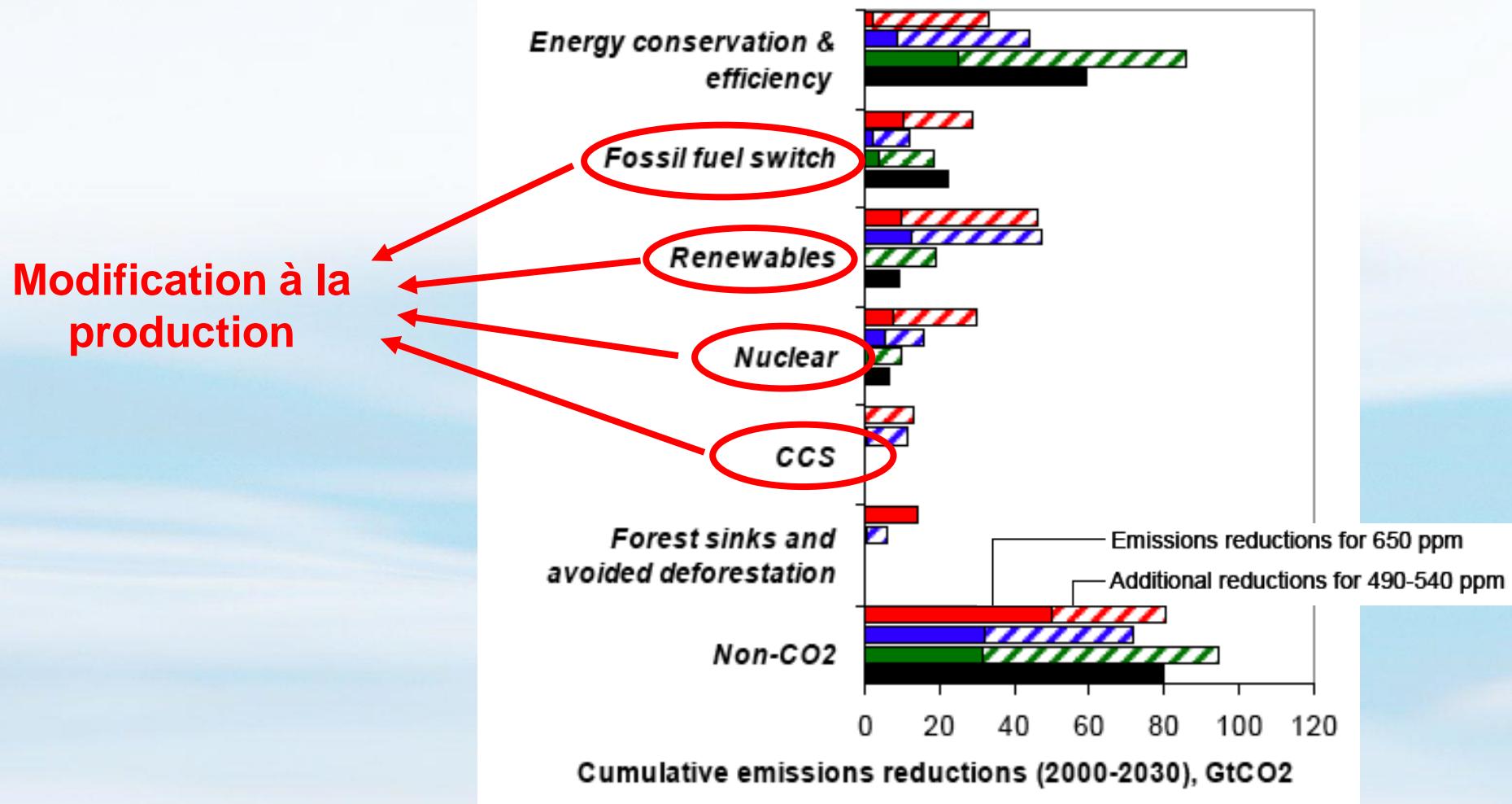
Pour émettre moins de gaz à effet de serre, il y a deux moyens :

Basculer, « toutes choses égales par ailleurs », sur des énergies émettant moins de CO₂ ou pas du tout
-> **transition charbon vers gaz, capture du CO₂, renouvelables, et nucléaire(s)**

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

Moins de CO₂, revenons à la théorie (simple !)

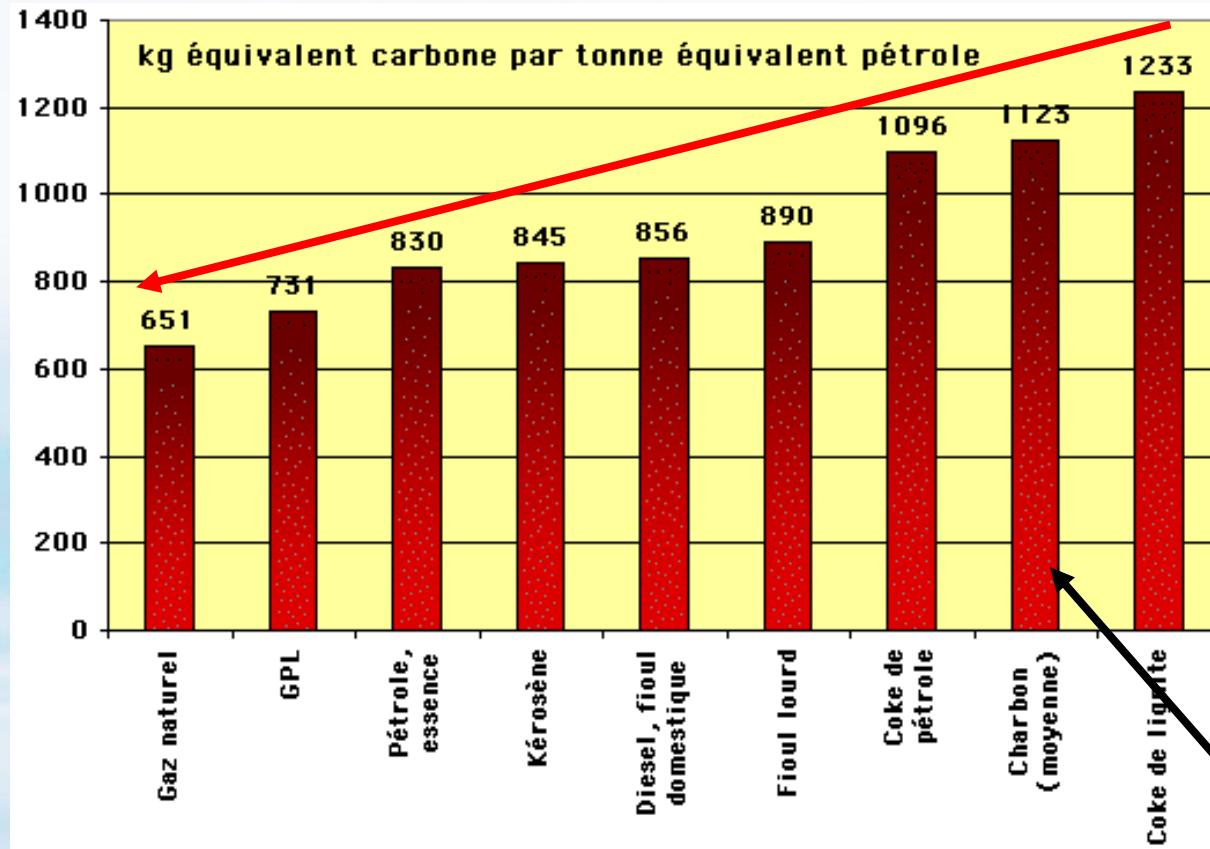
Modification à la production



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 CO₂, on commence par le plus facile (ou presque)



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

Source Bilan Carbone, Ademe

On produit le CO₂, mais on le met dans un trou

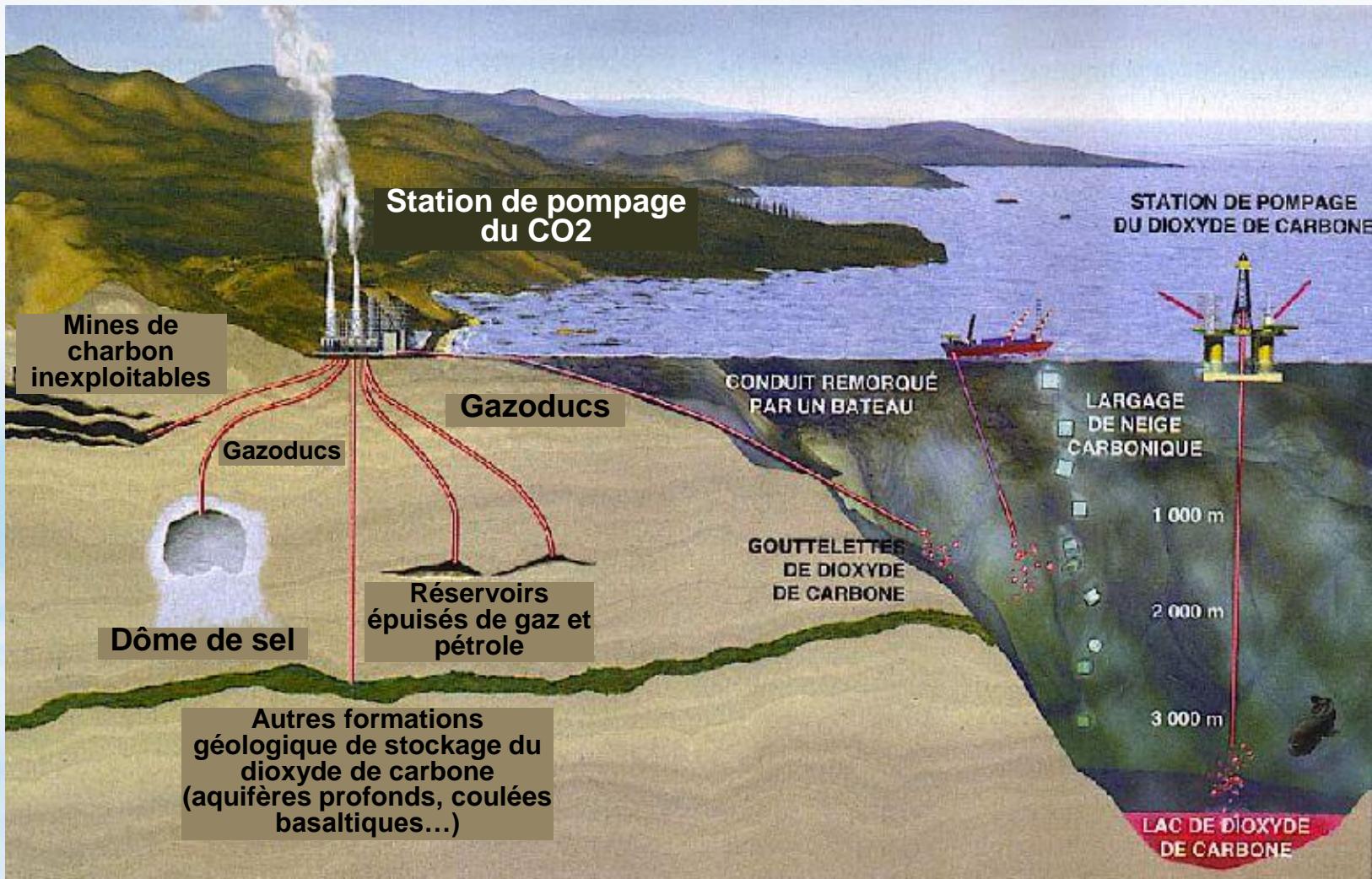
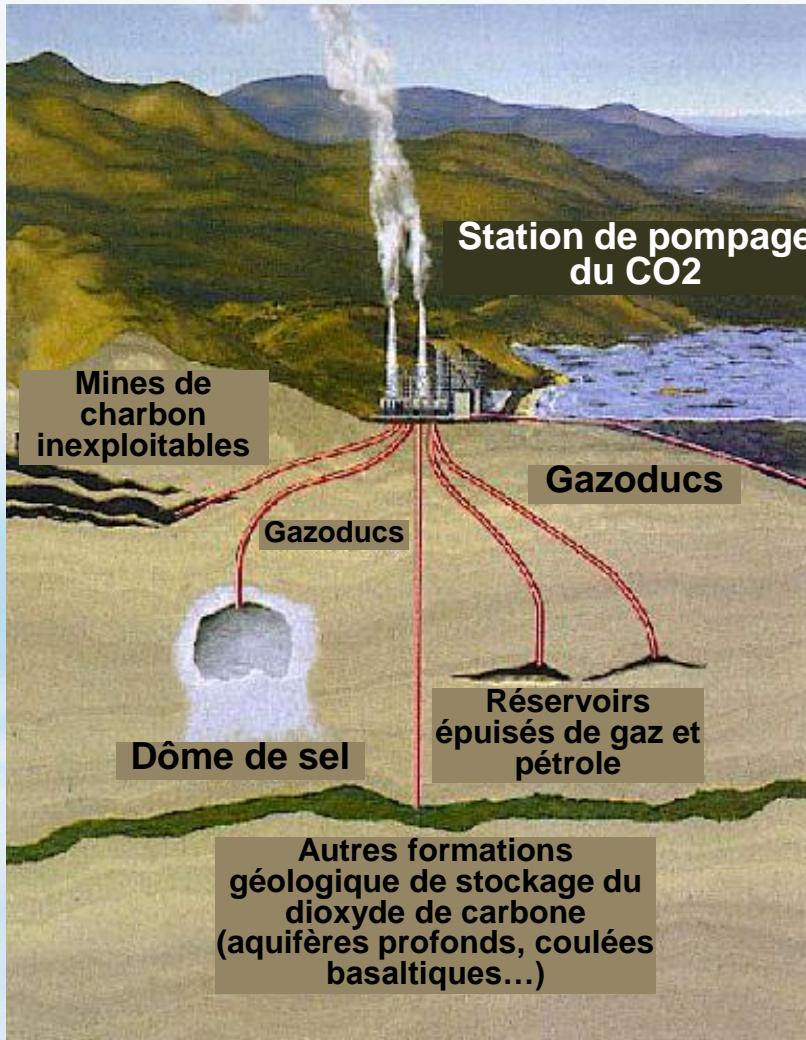


Schéma d'ensemble de la capture et séquestration.

Attraper (rien que) le CO₂, 1ère difficulté

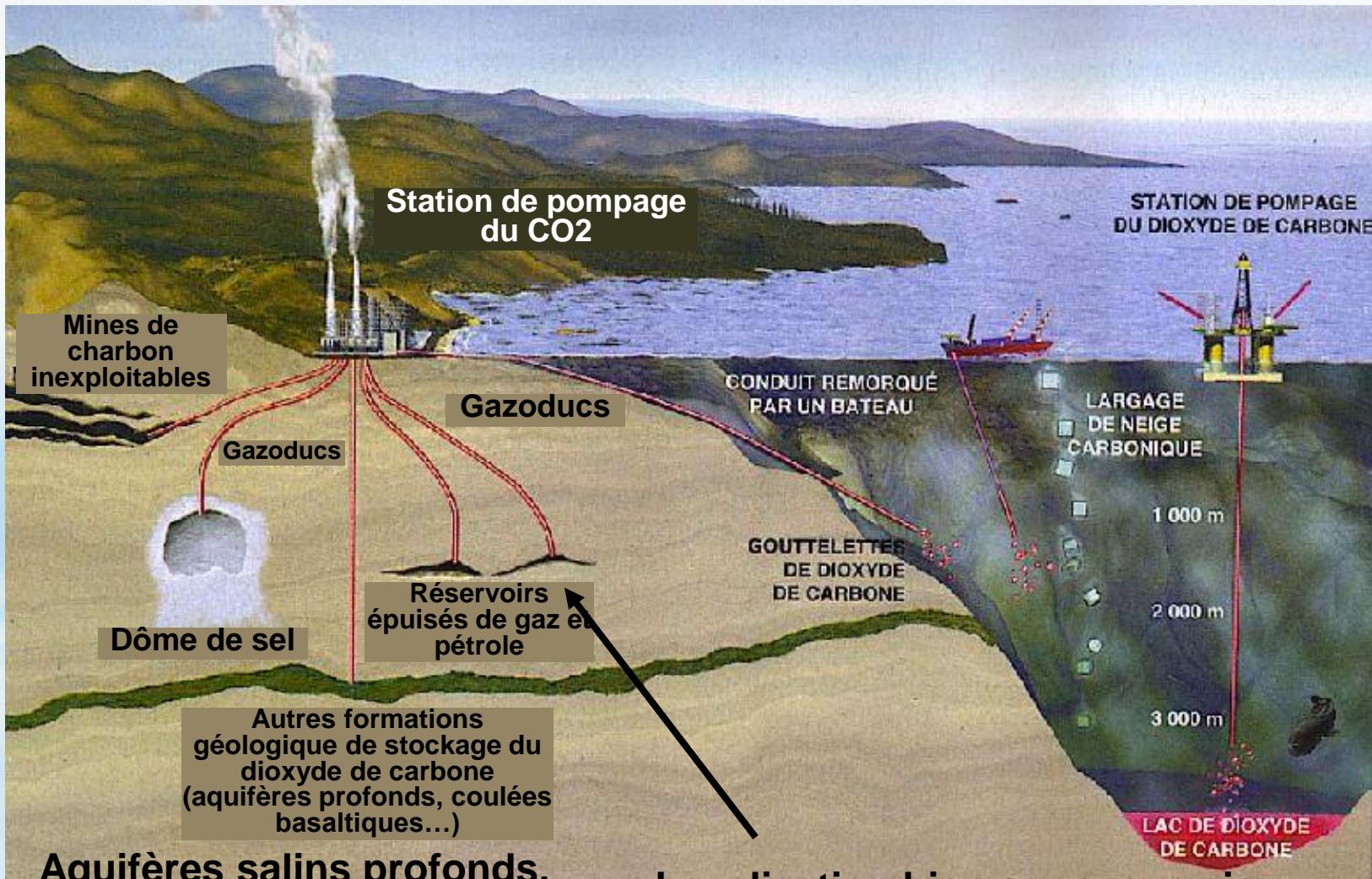


Combustion à l'air = 80% d'azote en sortie, que l'on ne souhaite pas enterrer

Capture de 90% du CO₂, 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 rétrofit commode sur les centrales existantes

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

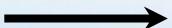
Tout cela a donc un coût (> 60 \$/tCO₂ voire...) et sans obligation économique les électriciens ne feront rien, ou pas grand chose

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/m²
quand il y a le chauffage central**

**Le logement de 2008 : 80 kWh
(finaux) par m²**

**3 fois moins d'énergie par m² de logement
Economies !**

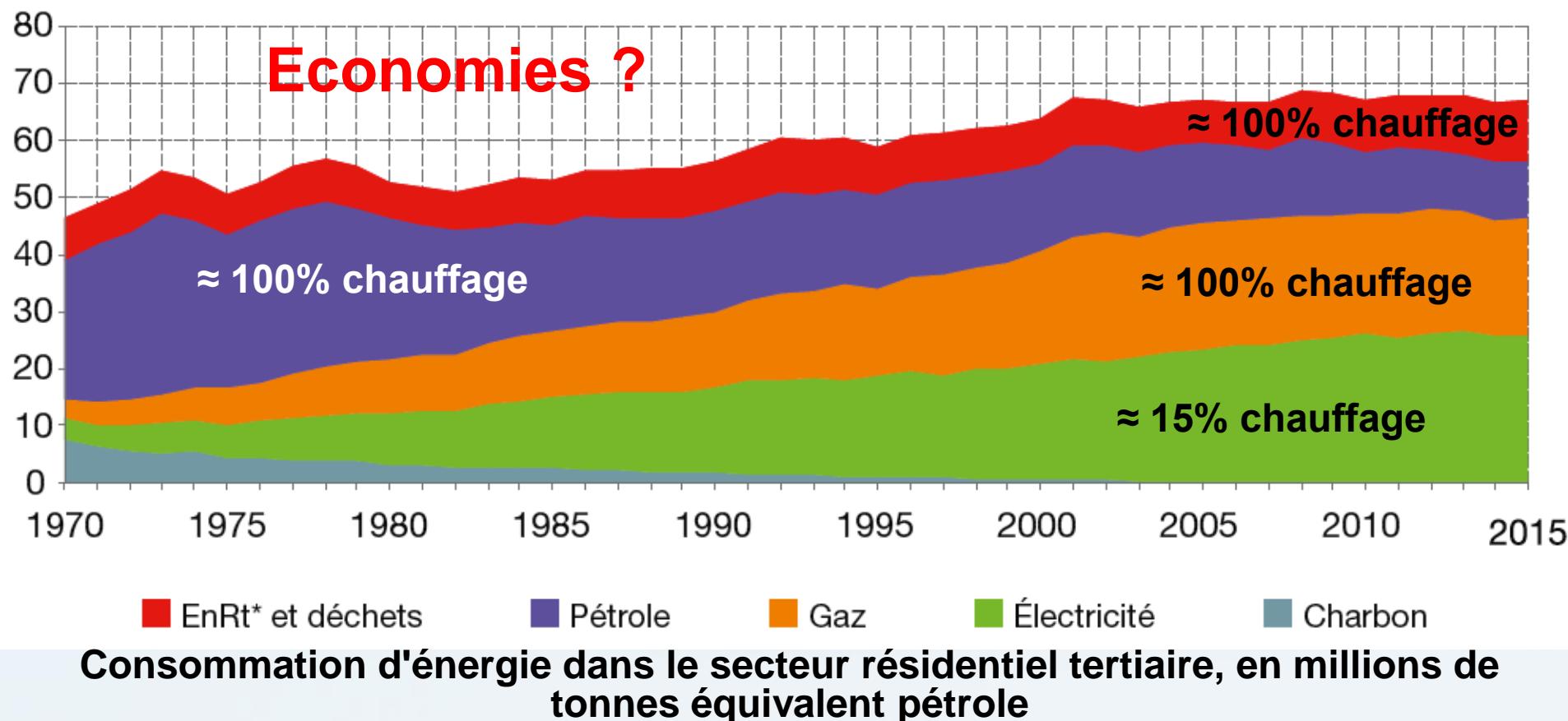
De 1950 à 2008

Augmentation forte du taux d'équipement en chauffage central

Augmentation de la surface habitable par personne (< 25 m² en 1973, ~ 40 m² par personne aujourd'hui)

Augmentation du taux d'équipement en divers appareils

Et bien sûr augmentation du nombre de logements



Laissez les ingénieurs faire des voitures économes !



La 2CV de 1950 : 375 cm³ de cylindrée,
9 CV de puissance, 60 km/h, 500 kg

La C3 de 2008 (diesel) : 1.400 cm³ de
cylindrée, 70 CV de puissance, 160
km/h, 1.000 kg

4 fois moins de carburant consommé par cm³ de cylindrée

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

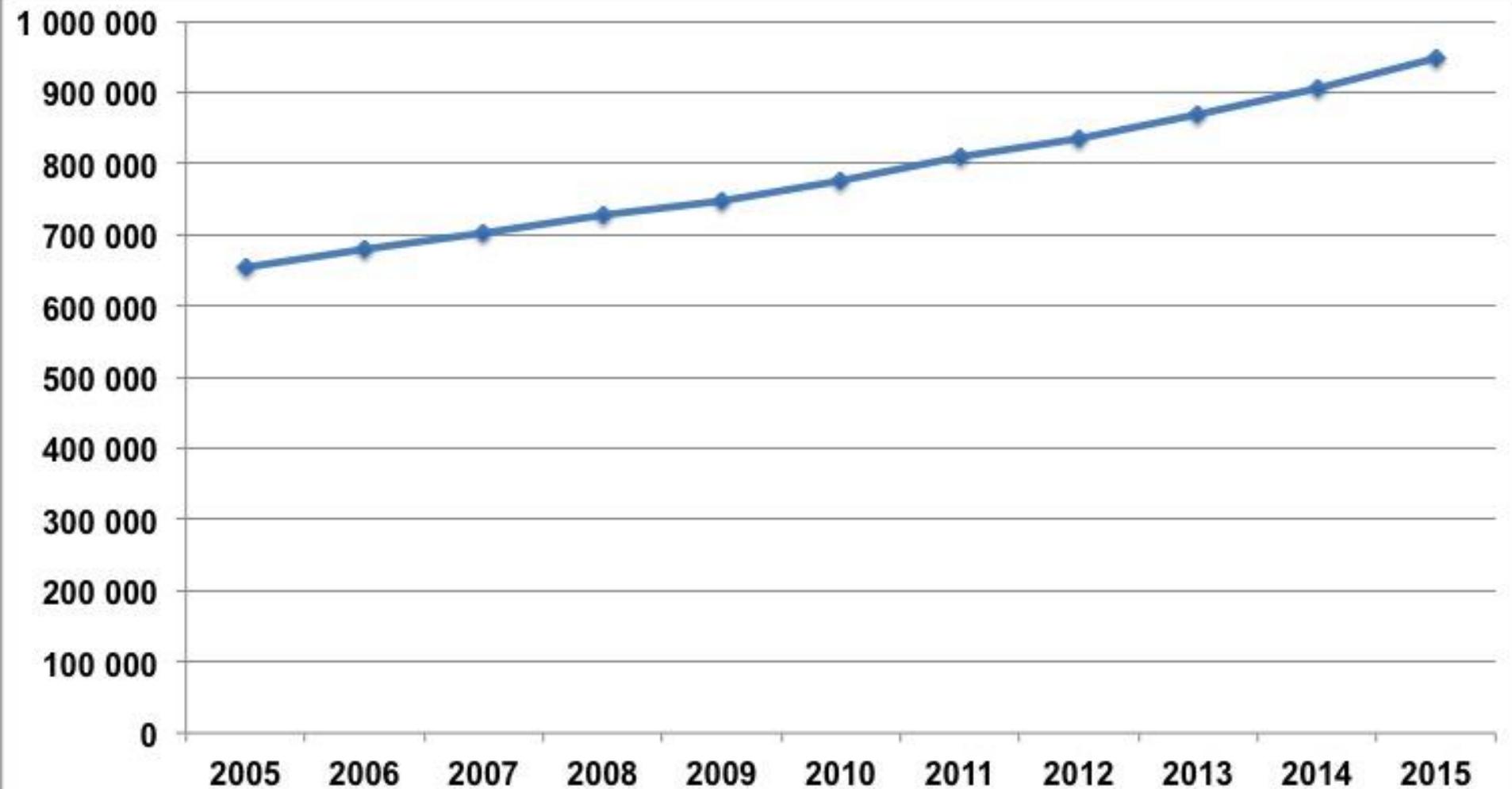
7 fois moins de carburant consommé par CV de puissance nominale

2 fois moins de carburant consommé par kg de masse

4,5 litres aux 100

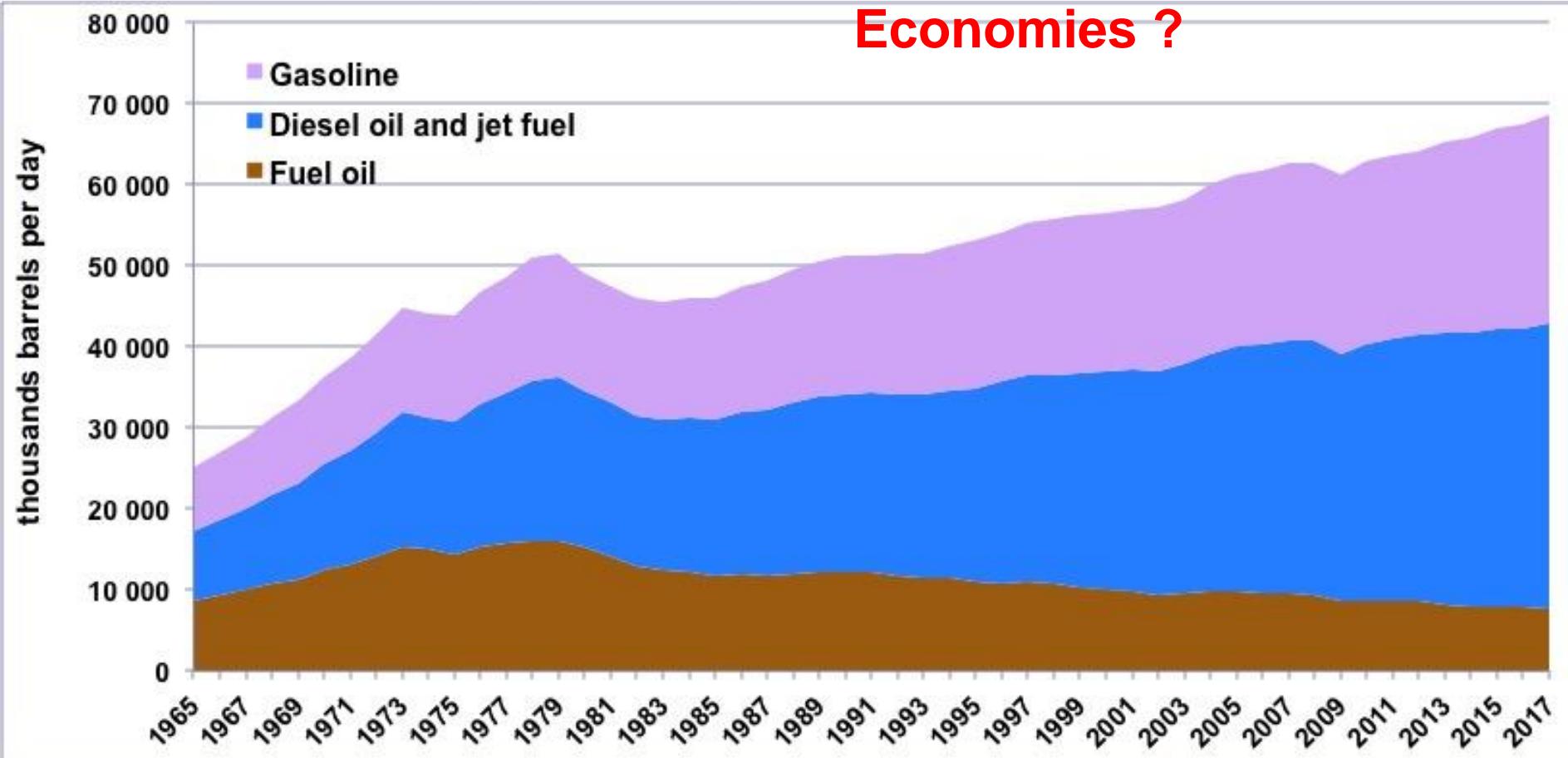
5 à 6 litres aux 100

Economies ?



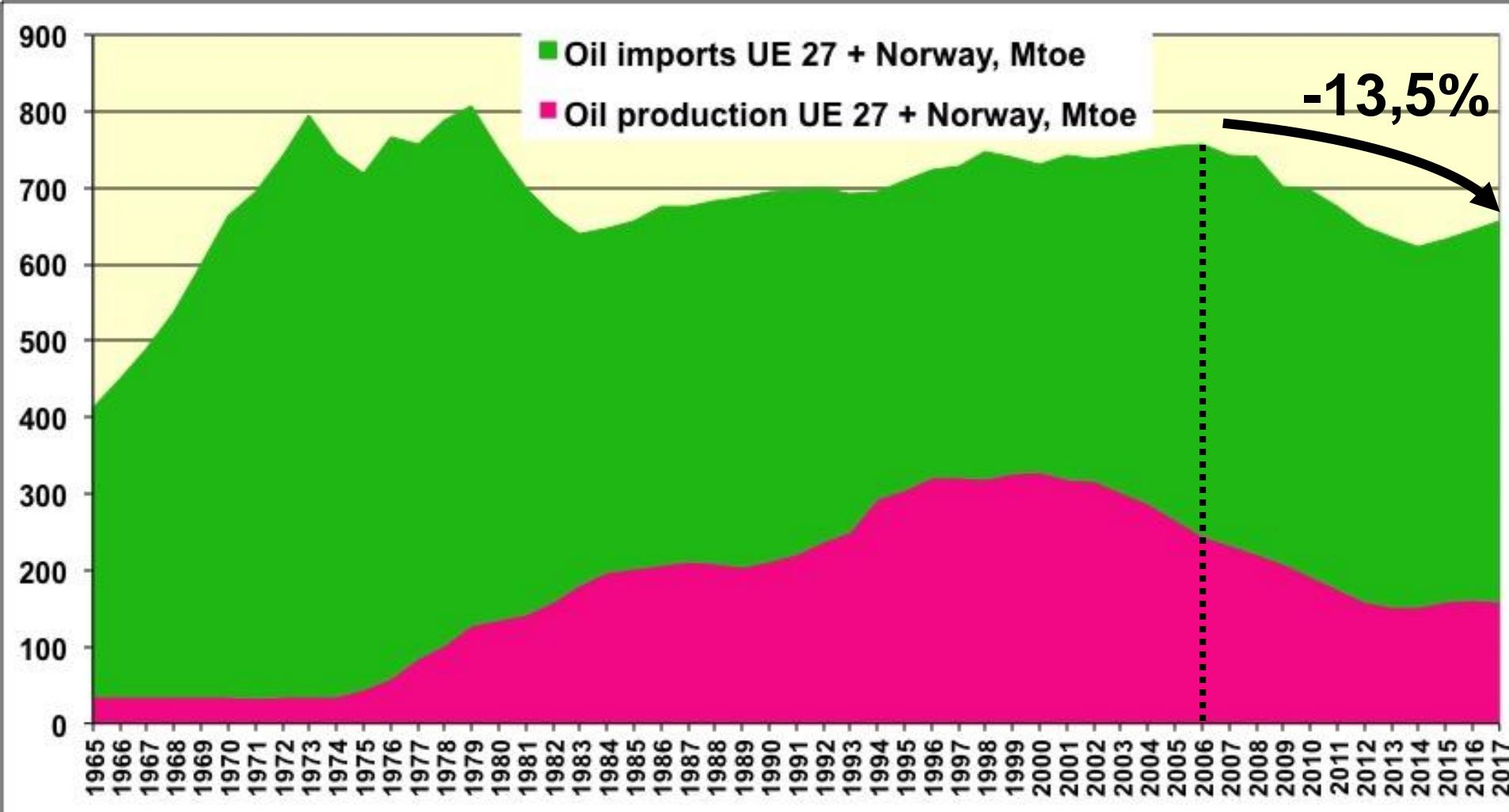
Flotte mondiale de voitures particulières. Source International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, 2018

Economies ?



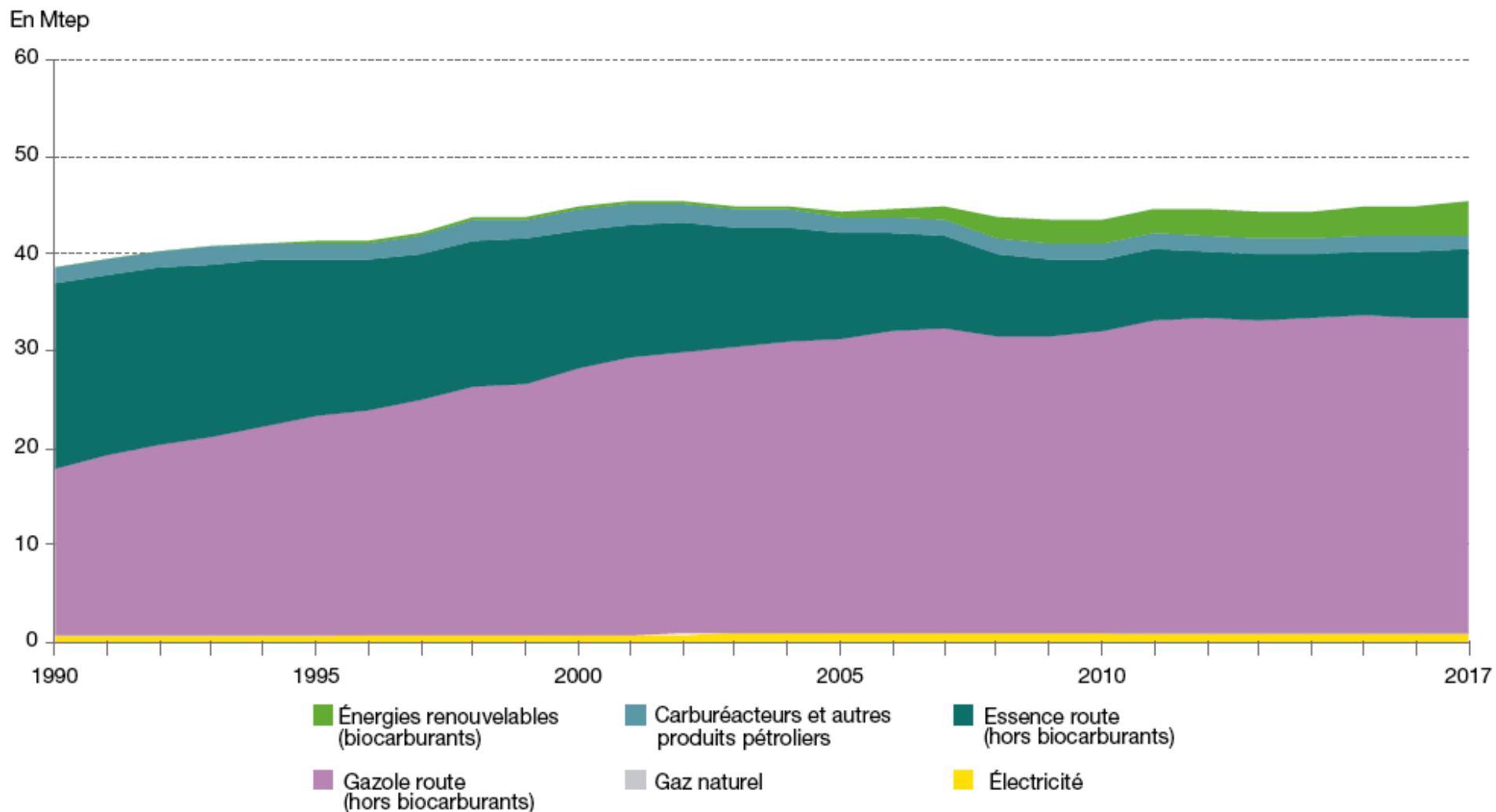
Consommation mondiale de carburants depuis 1965 (pour le fuel oil, une partie va dans l'industrie). Données BP Statistical Review.

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



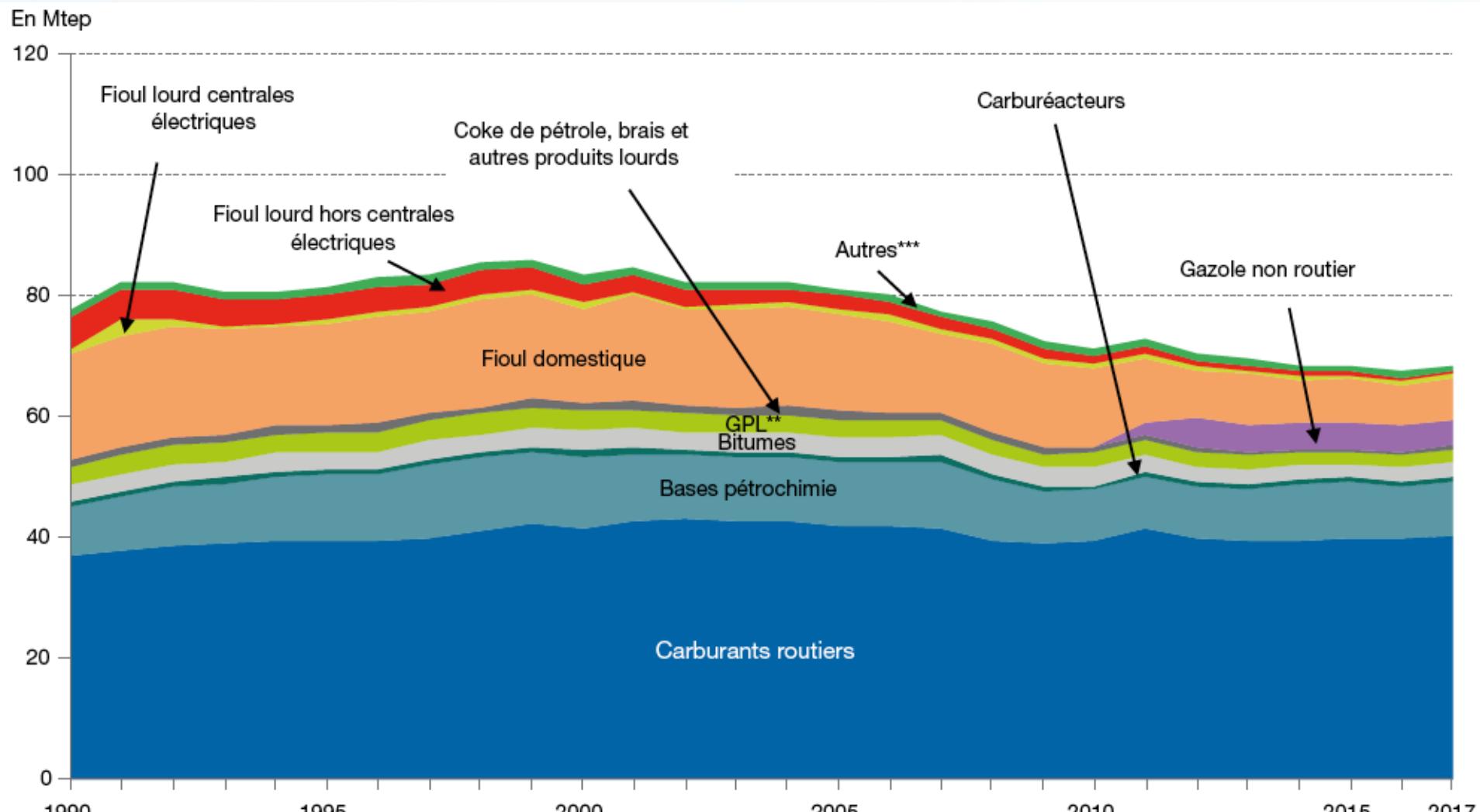
Approvisionnement pétrolier de l'Union+Norvège depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review, 2018

Et nous autres gaulois sommes européens



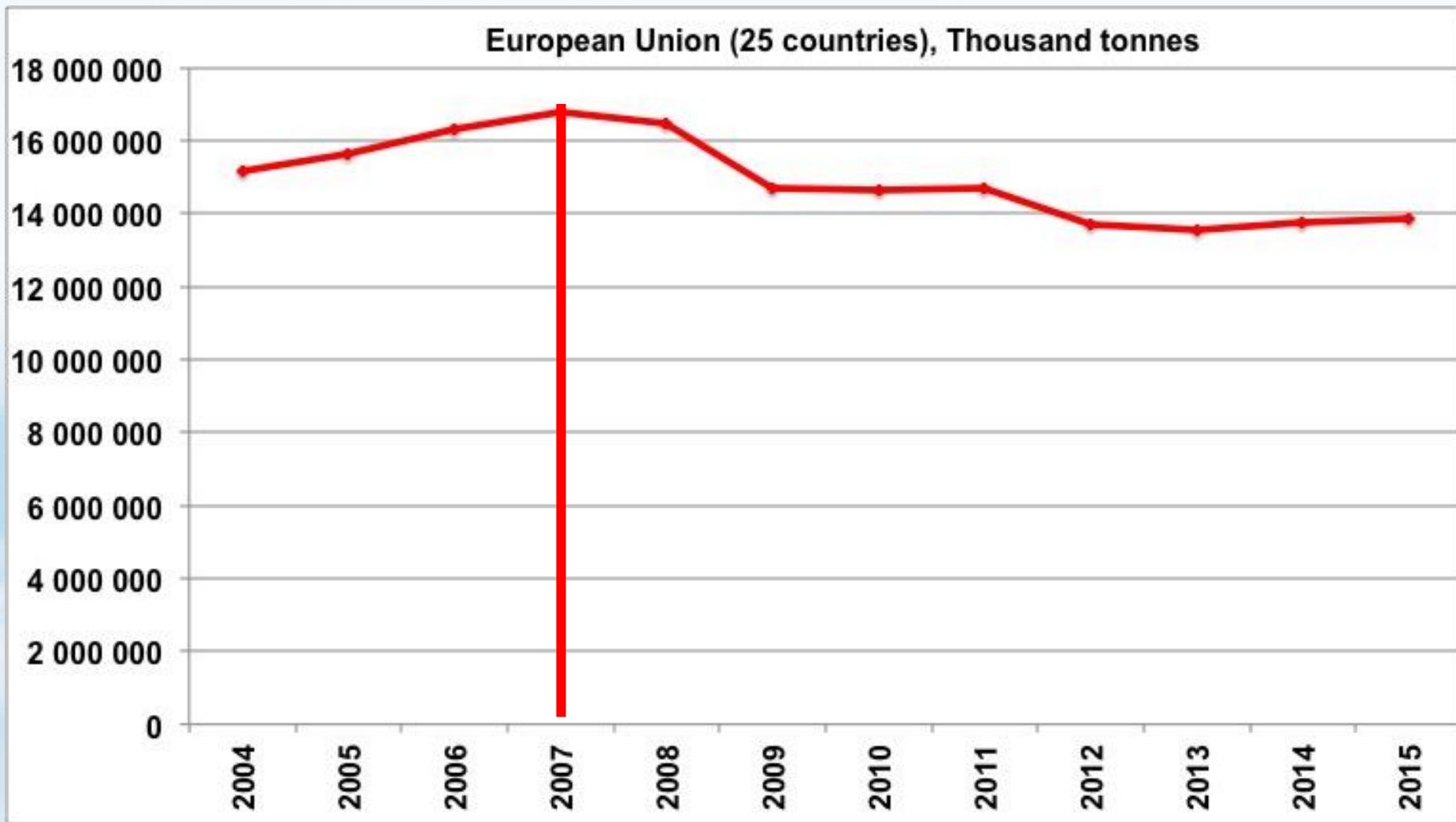
Consommation française de carburants depuis 1970. Données Service de l'Observation et des Statistiques, 2016.

« 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

2 à 4 fois moins d'électricité par litre refroidi

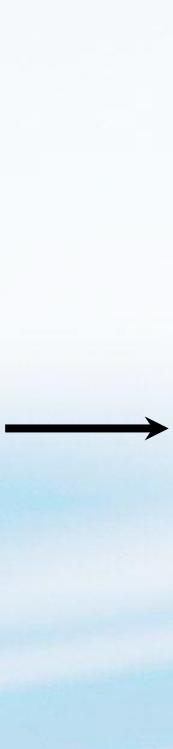
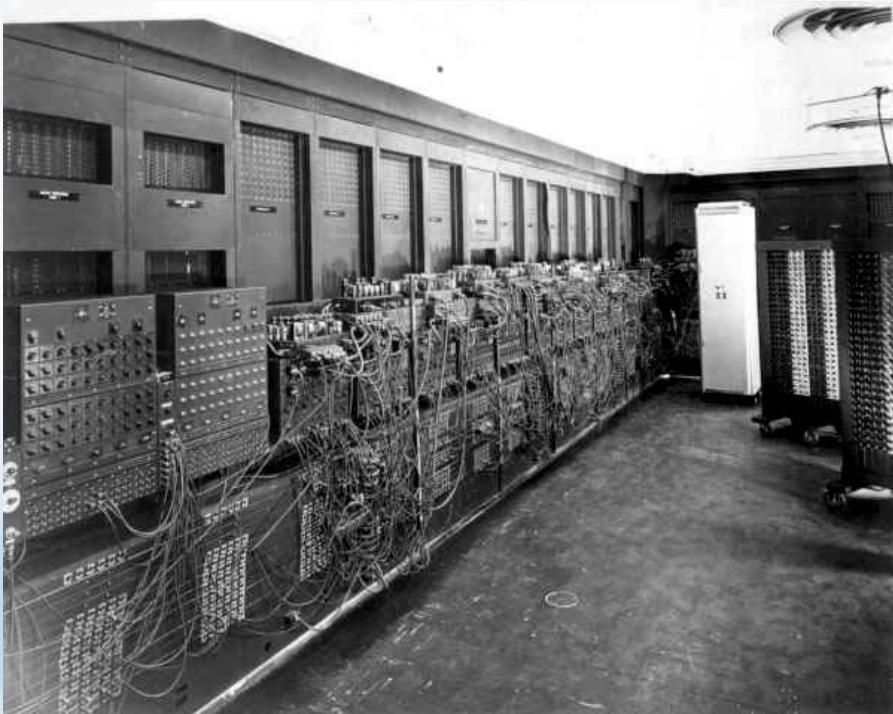
Par rapport à 1970, 4 fois moins d'électricité consommée par réfrigérateur



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

Economies !

L'impossible définition des économies : l'électricité



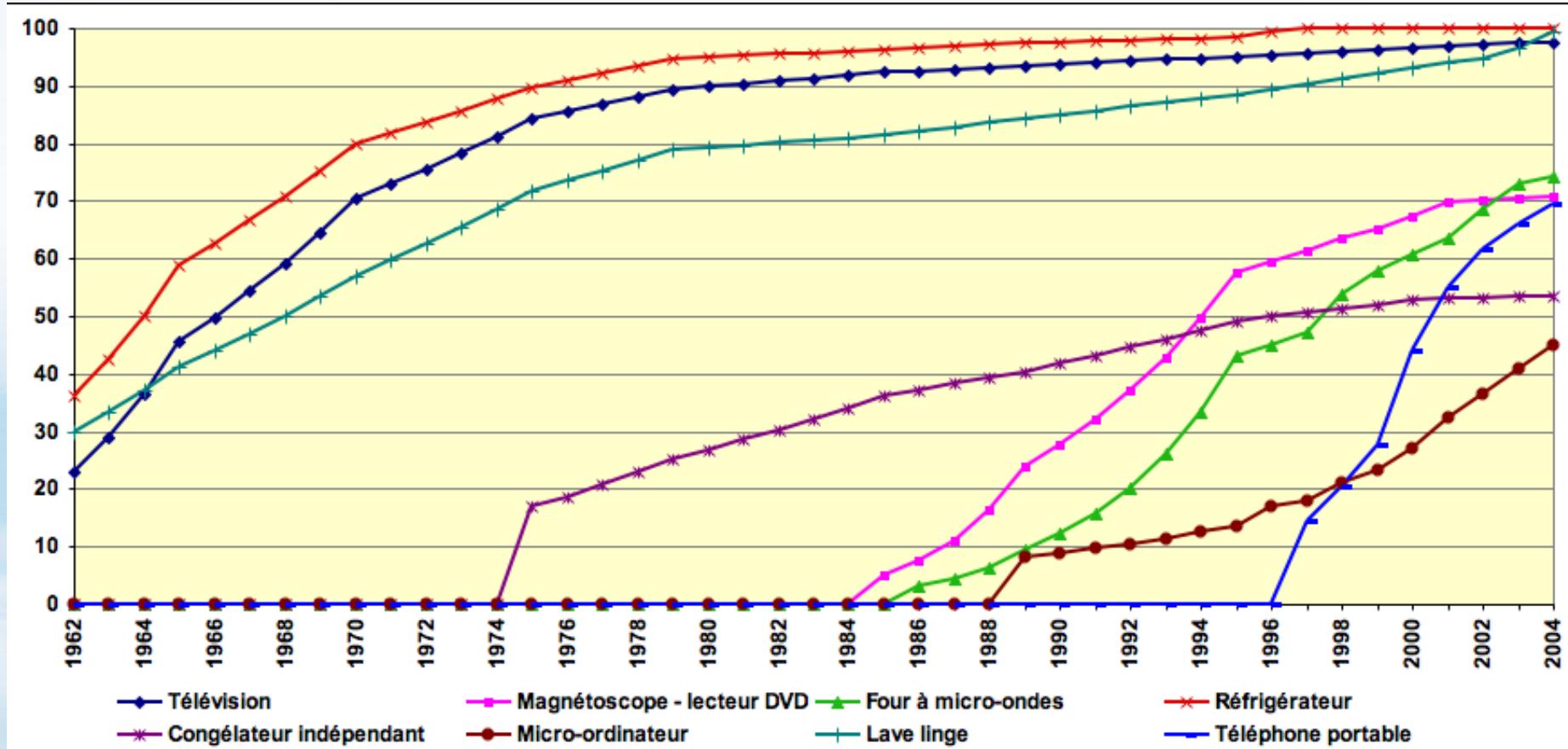
L'ordinateur de 1950 (ENIAC) : 27 tonnes, 18.000 tubes à vide, 150 kW.

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

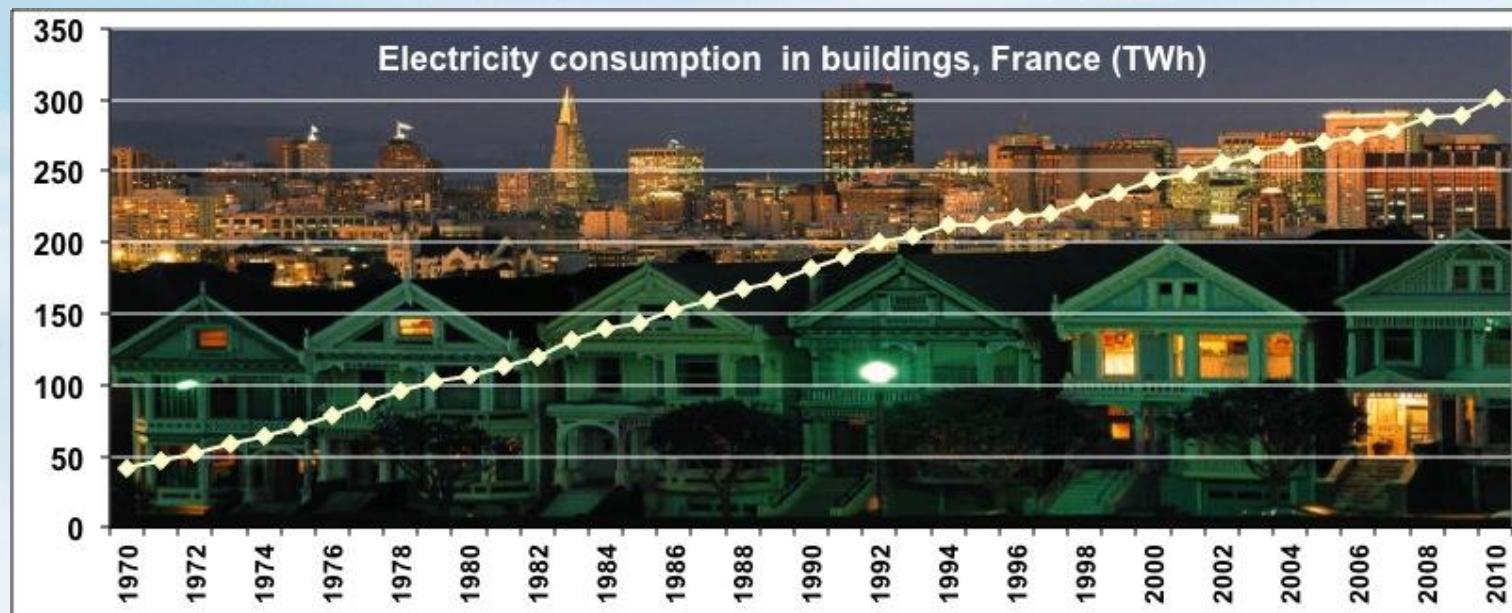
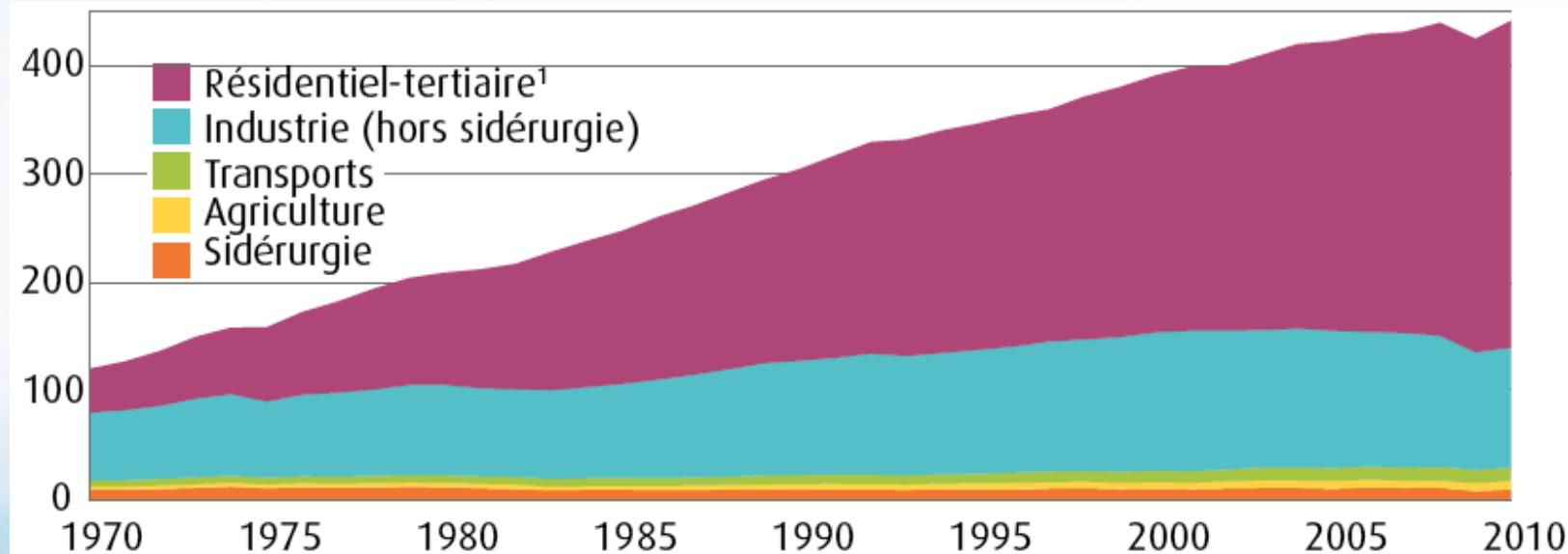
Un million de fois moins de puissance électrique consommée par transistor

Un million de fois moins de poids par transistor

Economies !



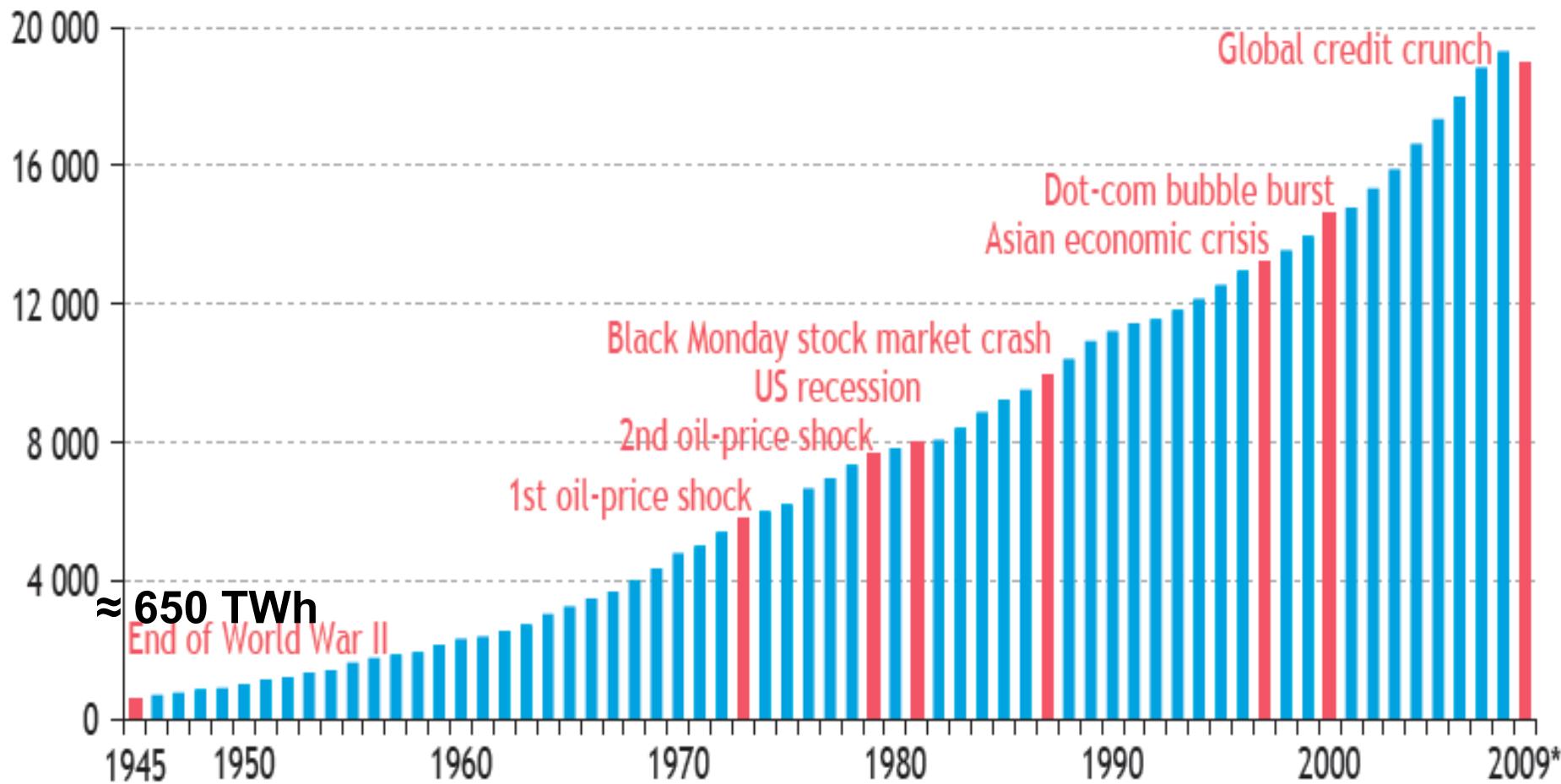
Evolution du taux d'équipement des ménages français de 1962 à 2004. Source : INSEE, 2010



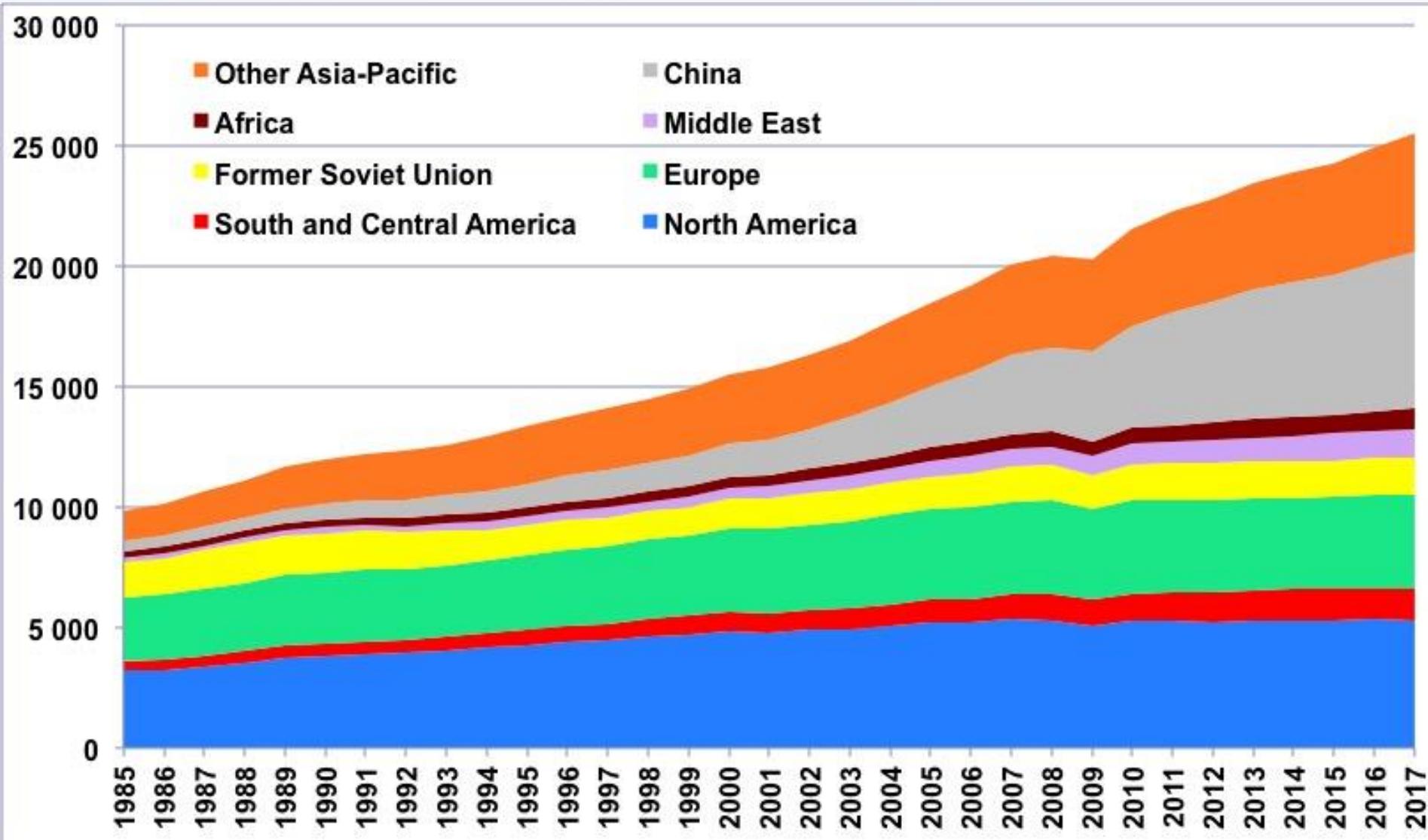
Consommation d'électricité en France, 1970 - 2010. Source CGDD, 2011

Plus d'électrons pour tous

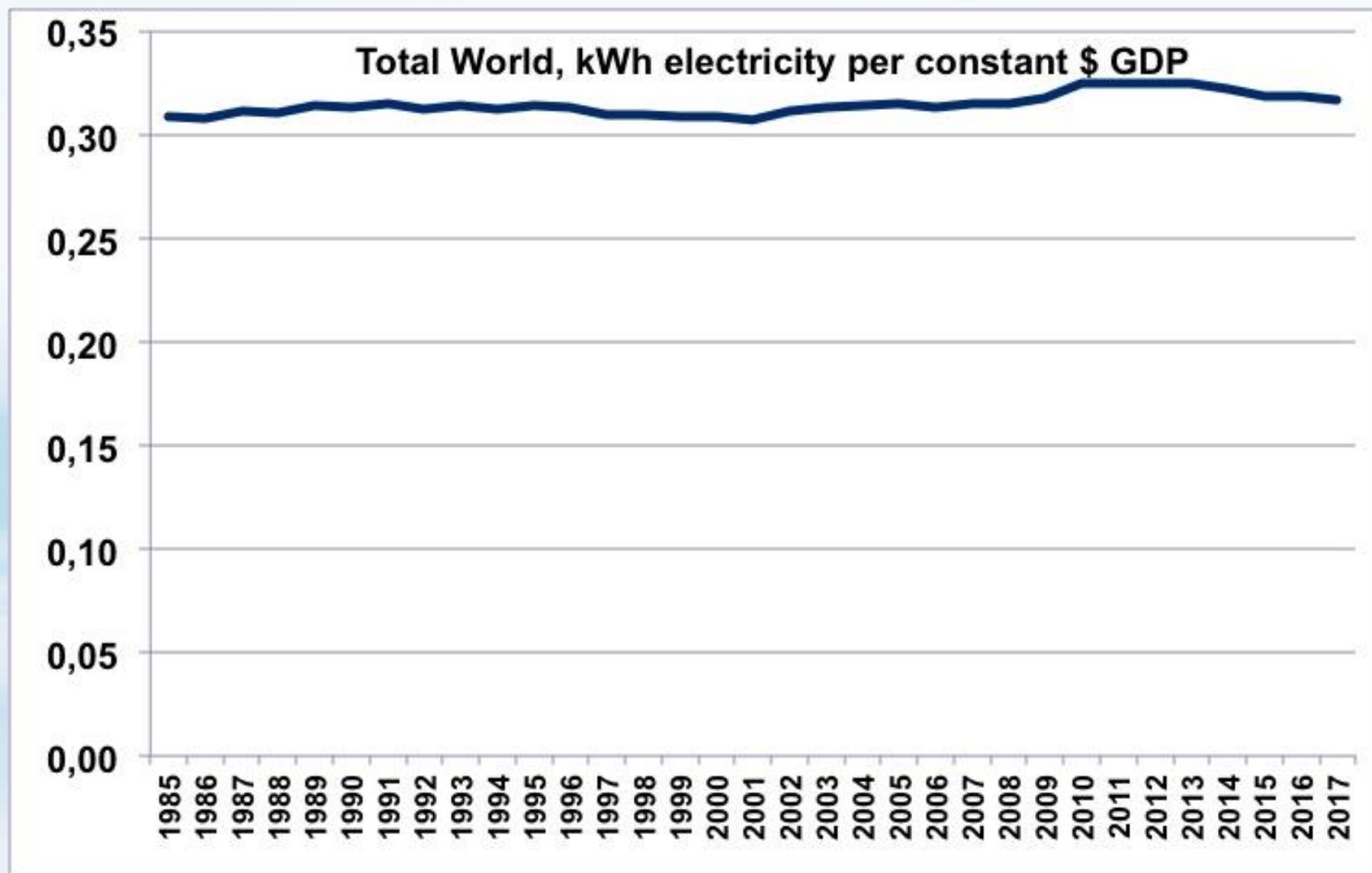
≈ 21.000 TWh



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

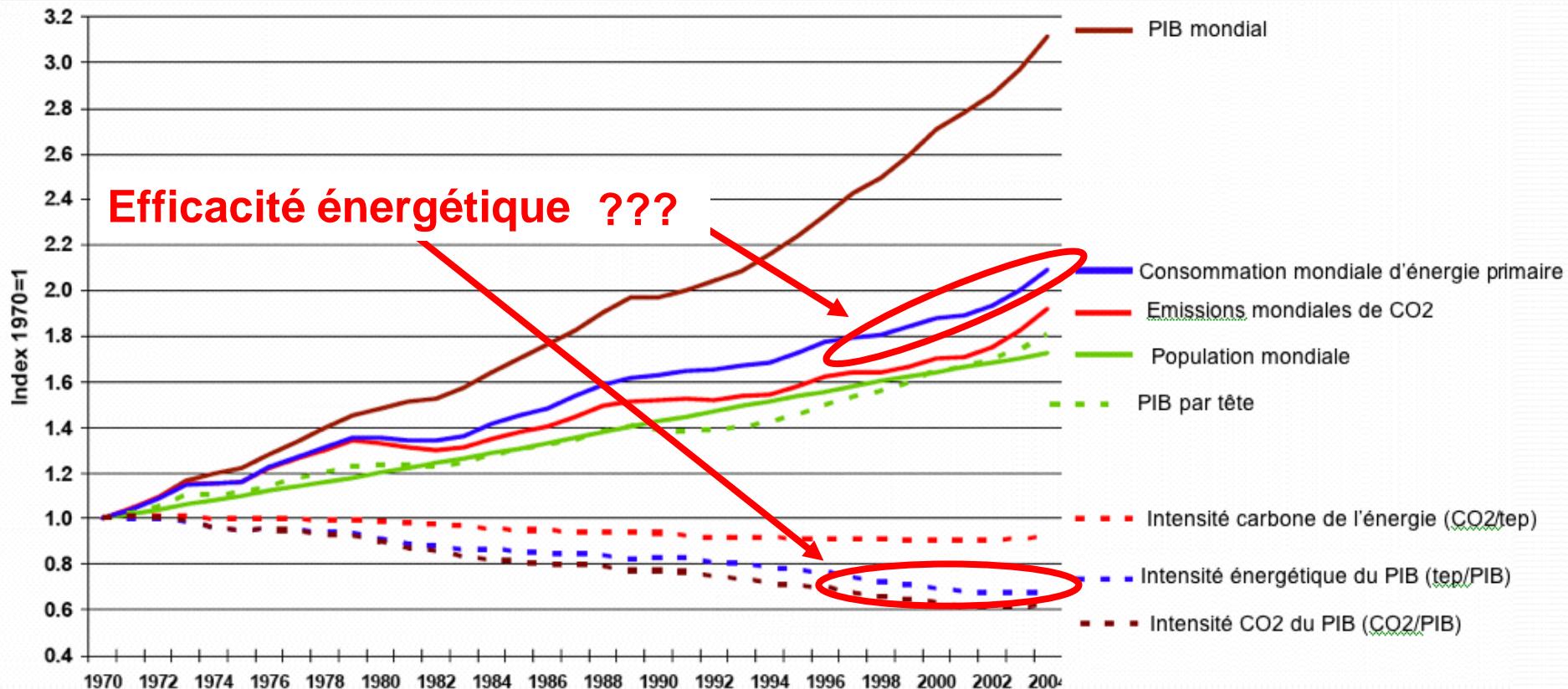


Consommation mondiale d'électricité, 1980-2017.
Source BP Statistical Review



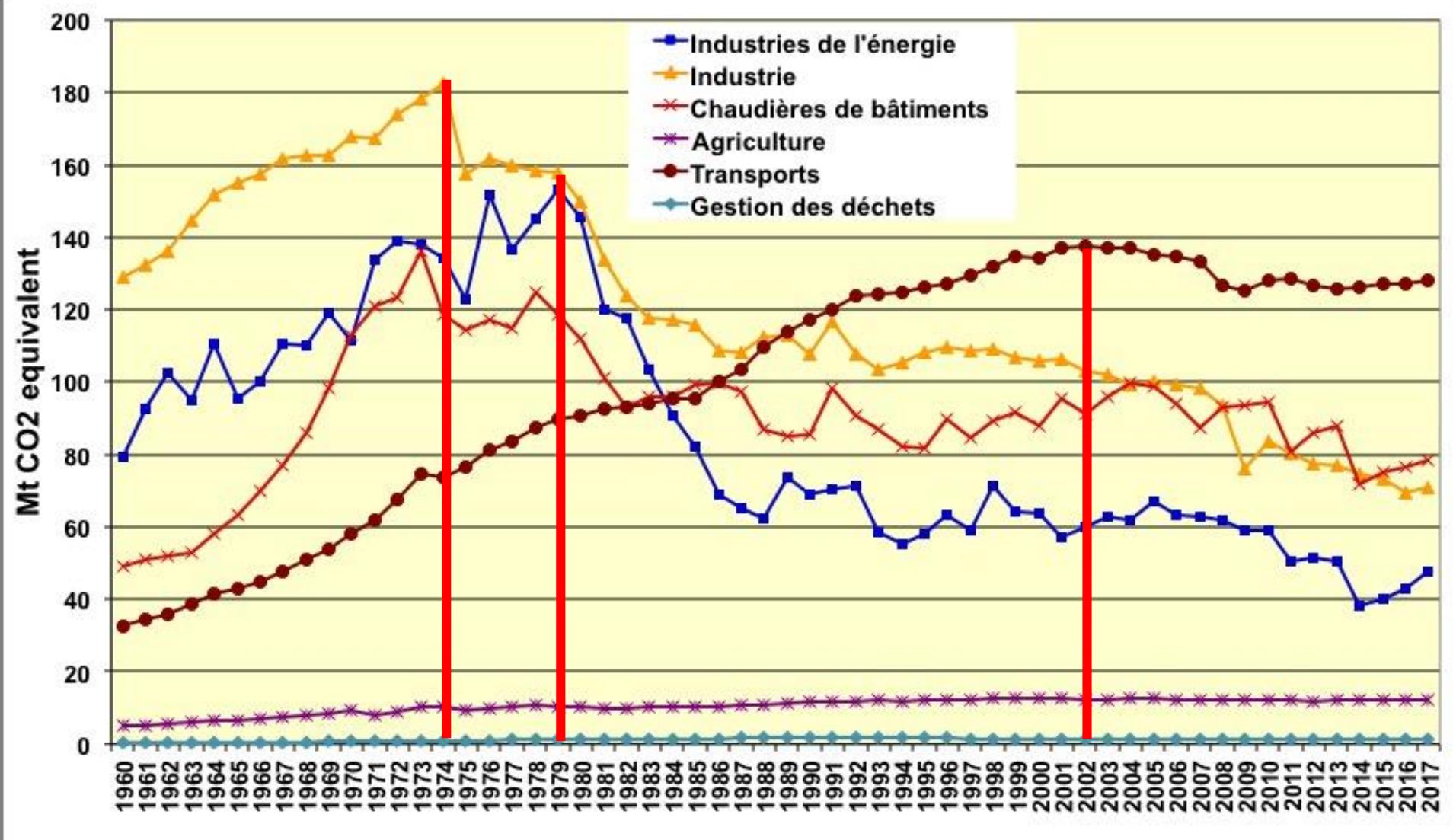
kWh d'électricité utilisés pour produire un dollar de PIB dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

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

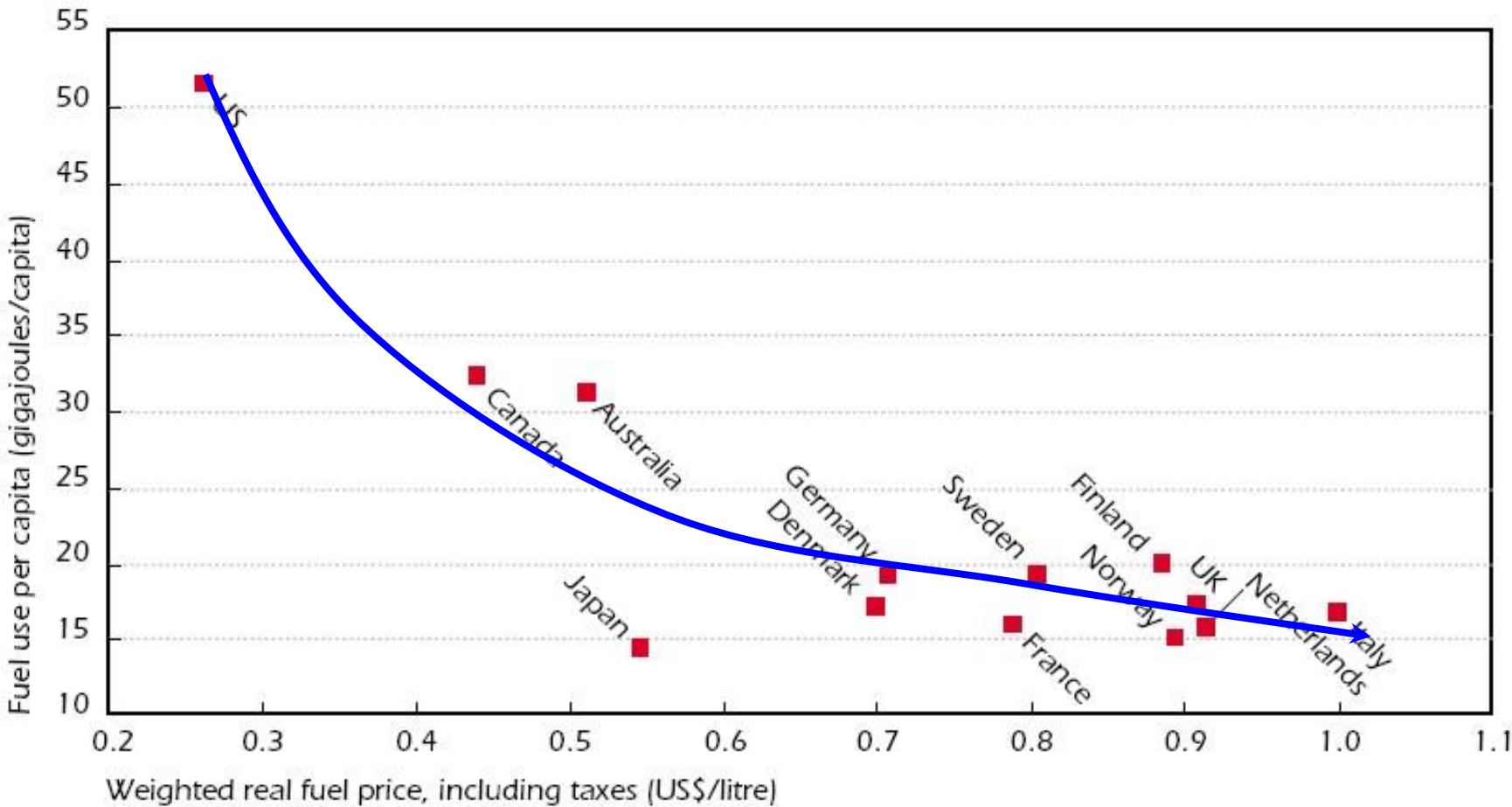


Consommation aux 100 km des voitures neuves vendues dans divers pays de l'OCDE.

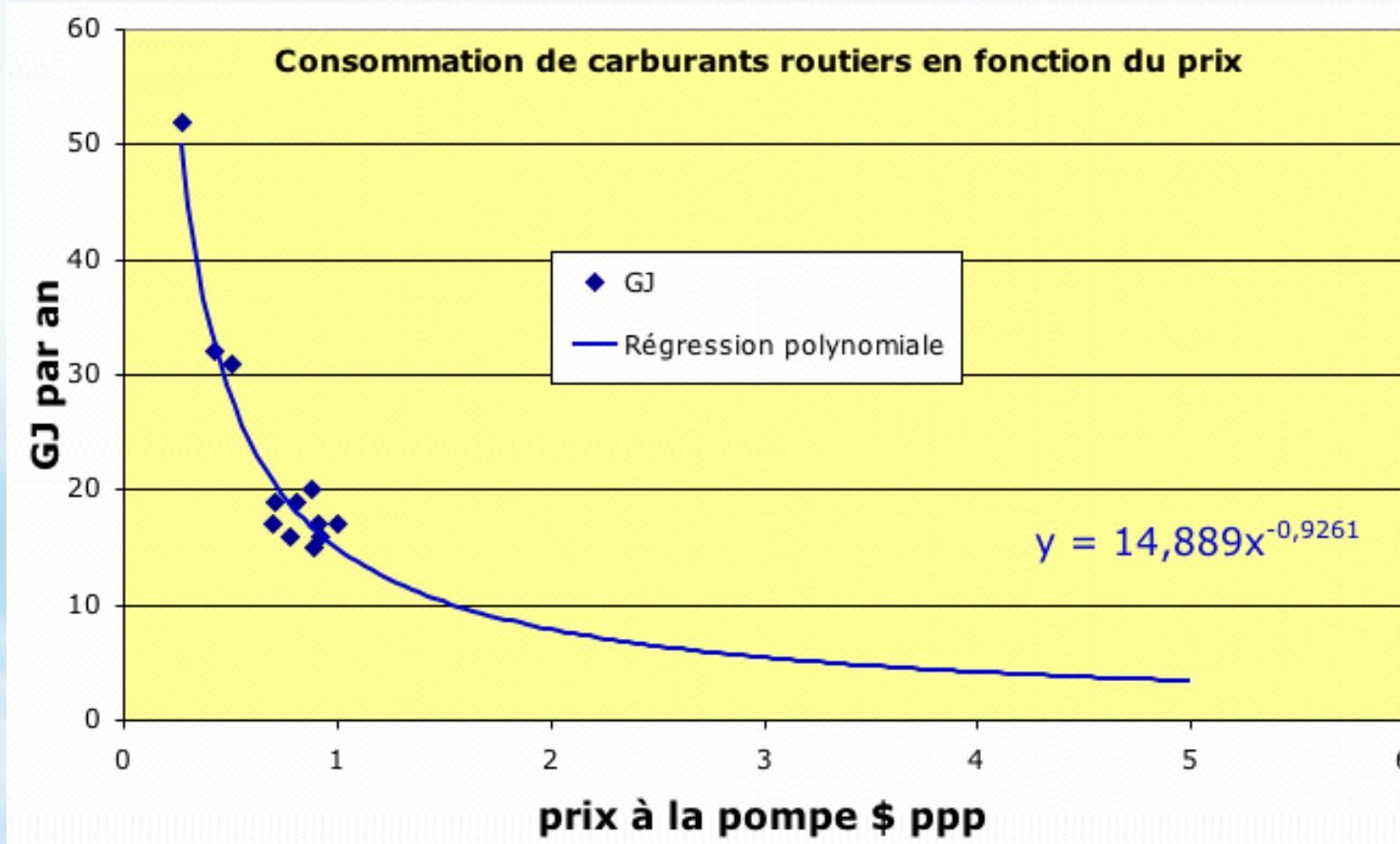
Source GIEC



Car Fuel Use per Capita versus Average Fuel Price, 1998



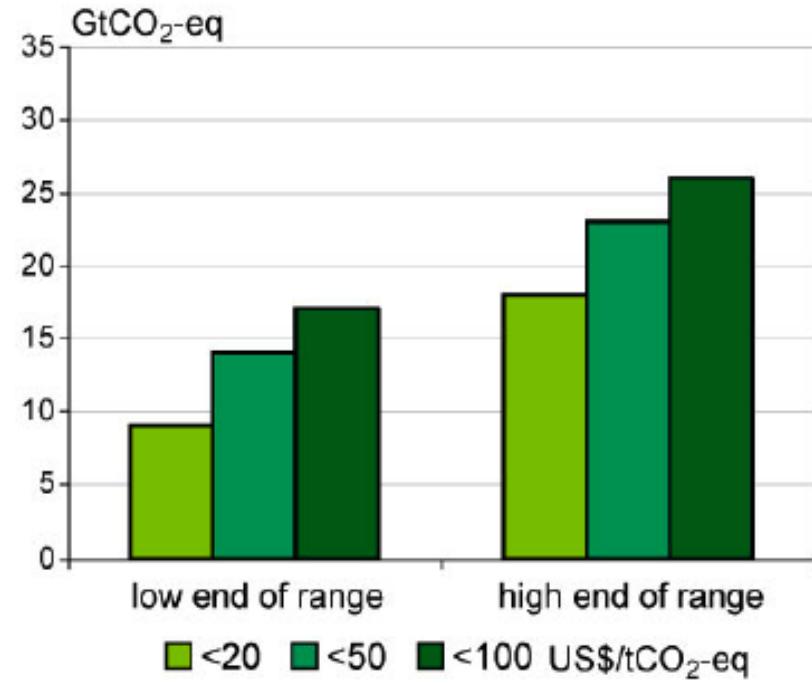
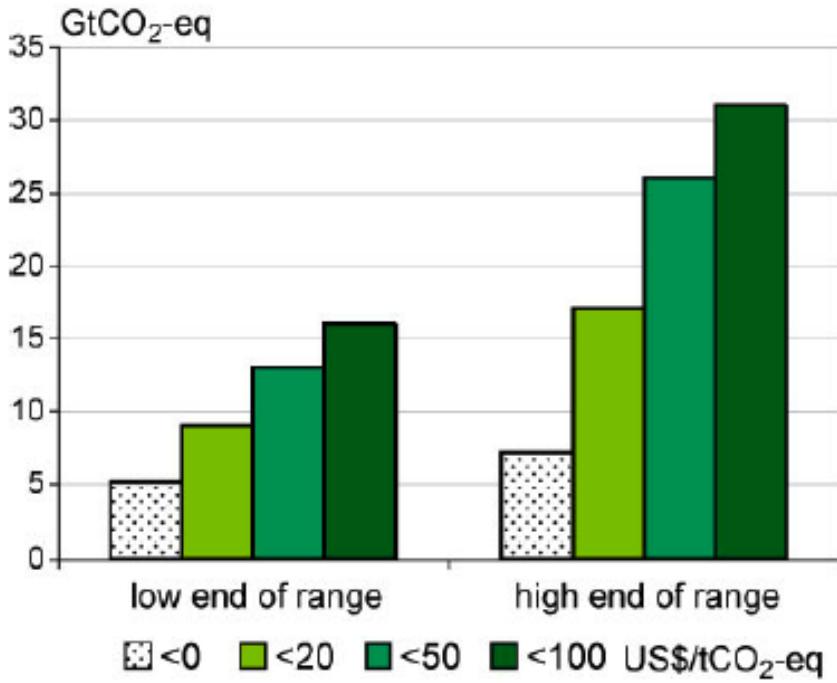
Consommations de carburants routiers par habitant en 1998 (axe vertical, en gigajoules ; une tonne de pétrole \approx 42 GJ) en fonction du prix de détail TTC des carburants en \$ par litre (axe horizontal). Source AIE, 2004



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 CO₂ (taxe, ou dispositif équivalent) :

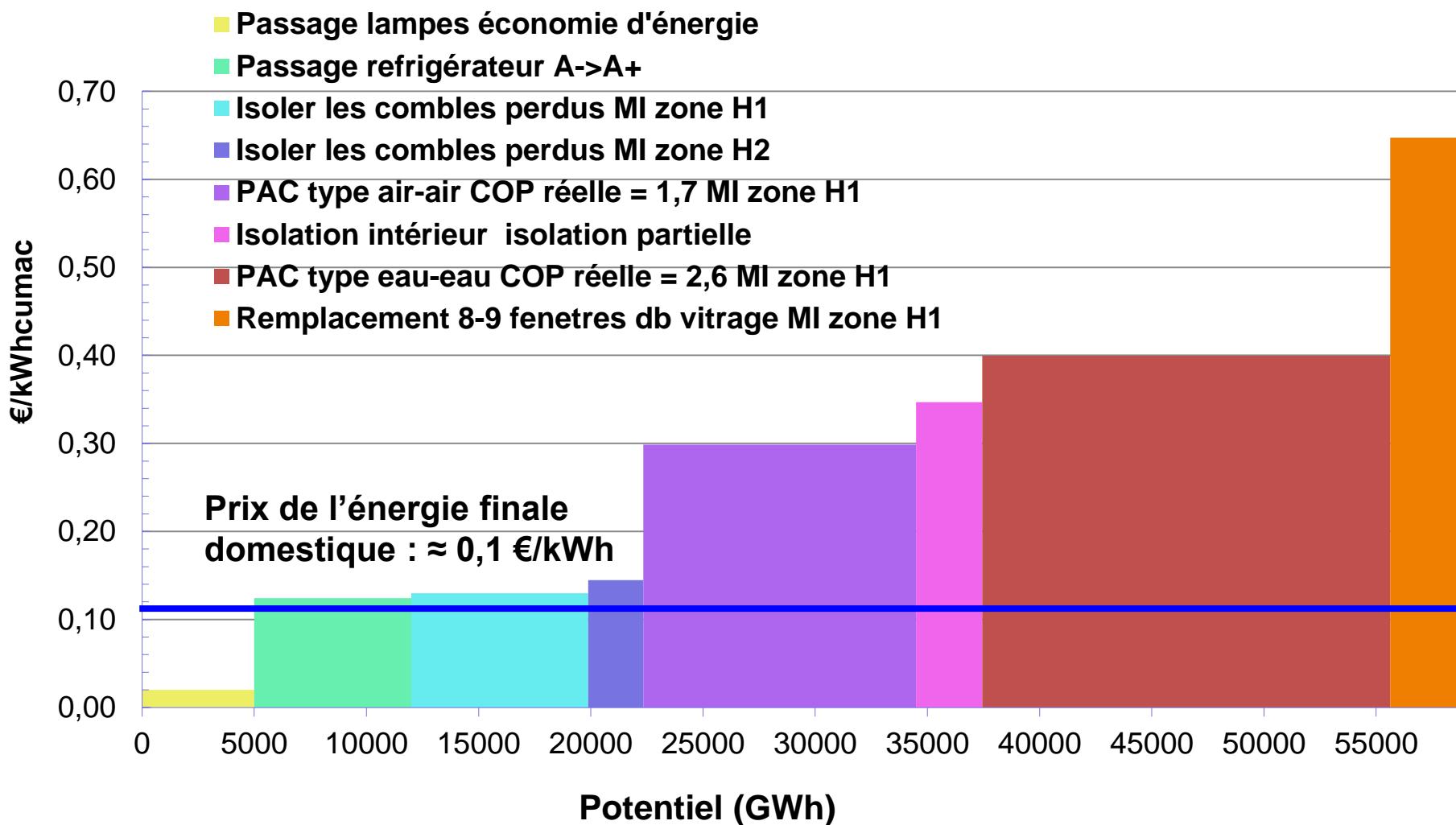
à gauche, addition d'études sectorielles

à droite, analyses macro.

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

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 CO₂ » peut désigner :

L'achat d'un quota négociable sur le « marché du CO₂ »

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 CO₂

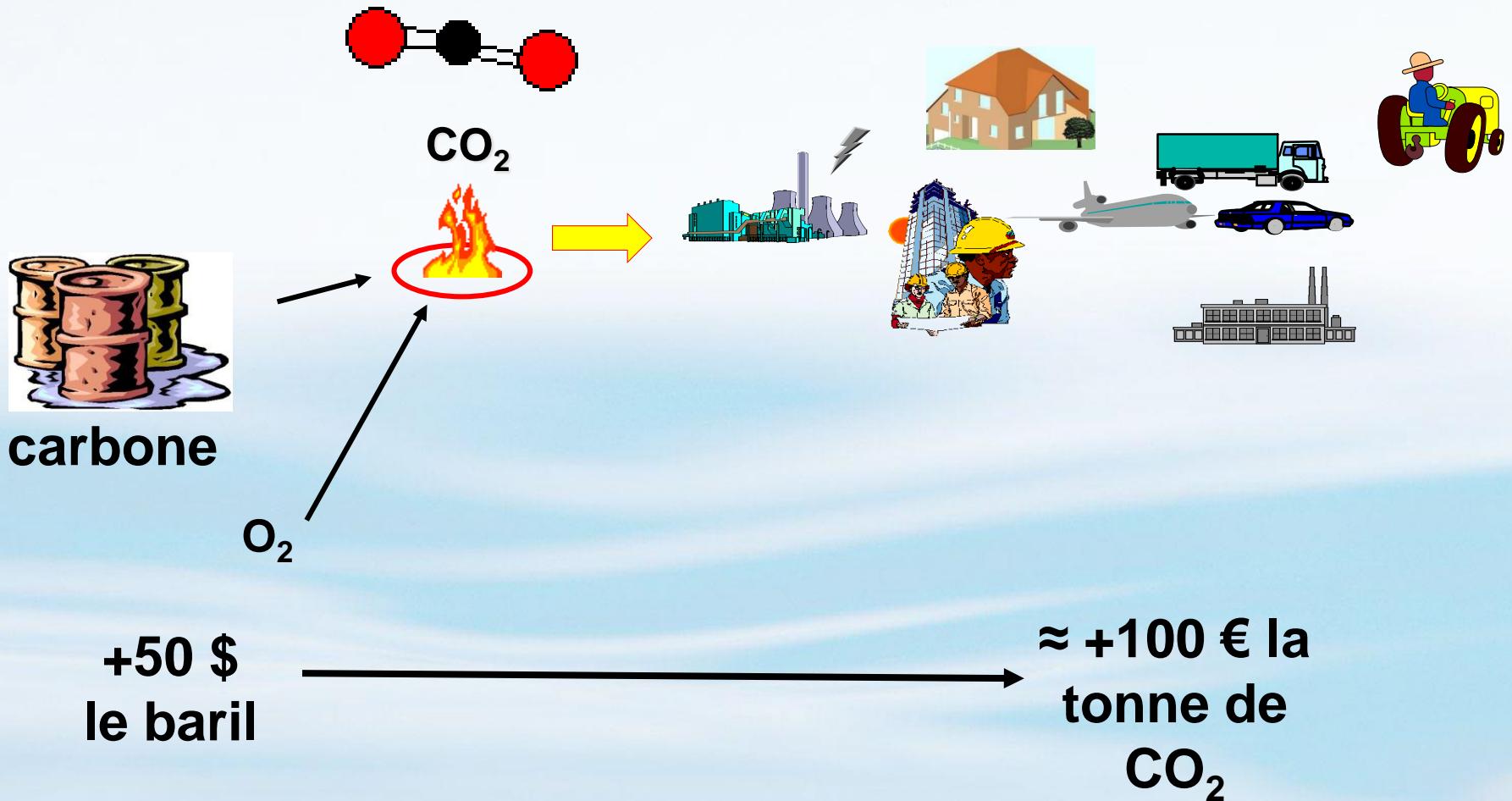
Selon le système qui fait naître un « prix du CO₂ » l'argent ne va pas au même endroit :

Taxe ou quotas aux enchères : Etat

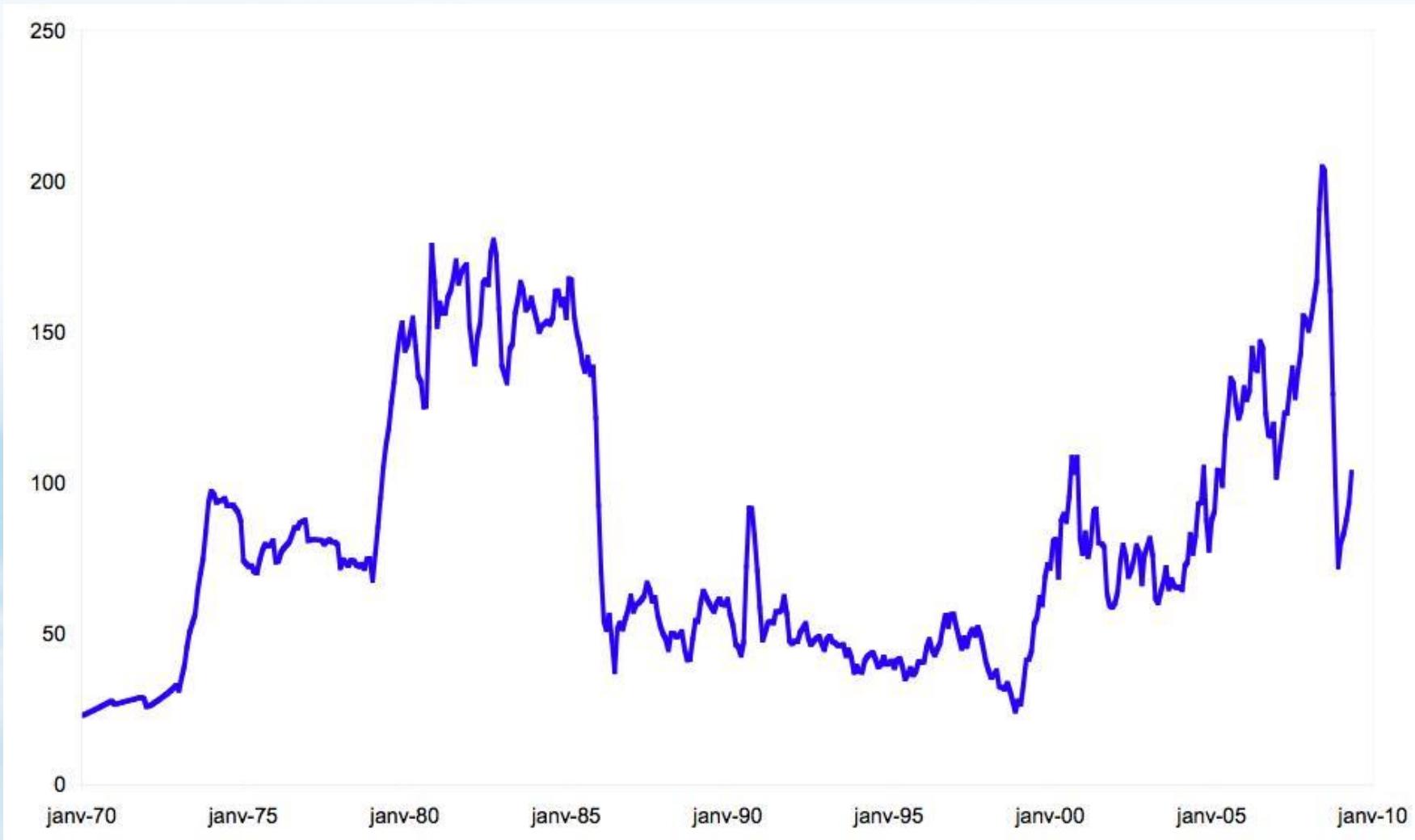
Achat d'un quota négociable sur le « marché du CO₂ » : dans les poches d'un autre assujetti (rien pour l'état).

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

Une autre manière de voir le prix du CO₂

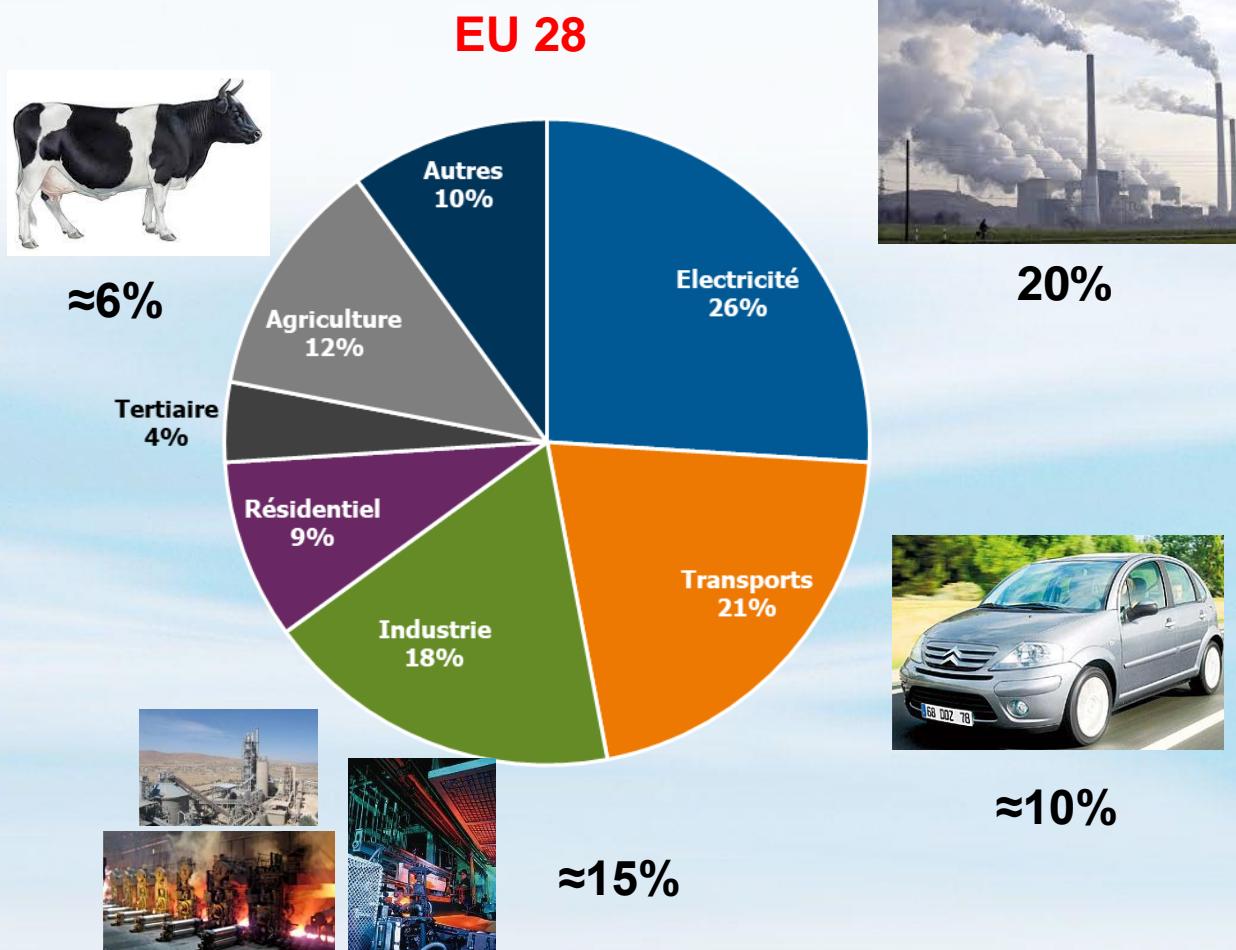


En fait, nous aimons beaucoup payer le carbone !



Prix moyen mensuel en € de 2008 d'une quantité de pétrole brut dont la combustion émet 1 t de CO₂. 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 CO2eq - Source: EEA
greenhouse gas

ÉLECTRICITÉ
Fermer
toutes les centrales à charbon
(réglementation et prix)



Consommation
en énergies
fossiles



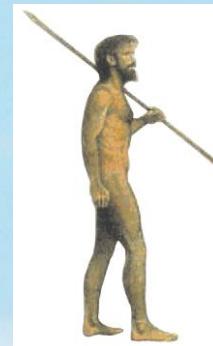
Période
sans énergies fossiles

Merci à Yves Mathieu ! (IFP)

100 esclaves / habitant
(J.M Jancovici 2005)



1850–2150
Période
avec énergies
fossiles



Période
sans énergies fossiles