

V - LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE



Chapitre 24 - Pourquoi faire des économies d'énergie ?

▶ <https://youtu.be/Ssnr3EDAIIQ>

Chapitre 25 - Optimiser la chaîne des énergies primaire, finale et utile

▶ https://youtu.be/7y8rnjhJ_7c

Chapitre 26 - L'équation de Kaya

▶ <https://youtu.be/Xss6si2tzZM>

Chapitre 27 - Considérations sur l'organisation des démocraties et le fonctionnement des médias

▶ https://youtu.be/E__D6nq8dzA

Chapitre 28 - La séquestration du CO2

▶ <https://youtu.be/1CHpwym6rbM>

Chapitre 29 - Faire des économies en fin de chaîne : réglementation et planification

▶ <https://youtu.be/TaTYDZAVftQ>

Chapitre 30 - La variable prix à l'épreuve du temps

▶ <https://youtu.be/1SKj9hlca-k>

Chapitre 31 - Cas pratique : décarbonation de l'UE

▶ <https://youtu.be/1DvJr872Lil>

Chapitre 24 - Pourquoi faire des économies d'énergie ?

La civilisation industrielle, basée sur l'accès à une énergie surabondante, se heurte à au moins deux limites physiques :

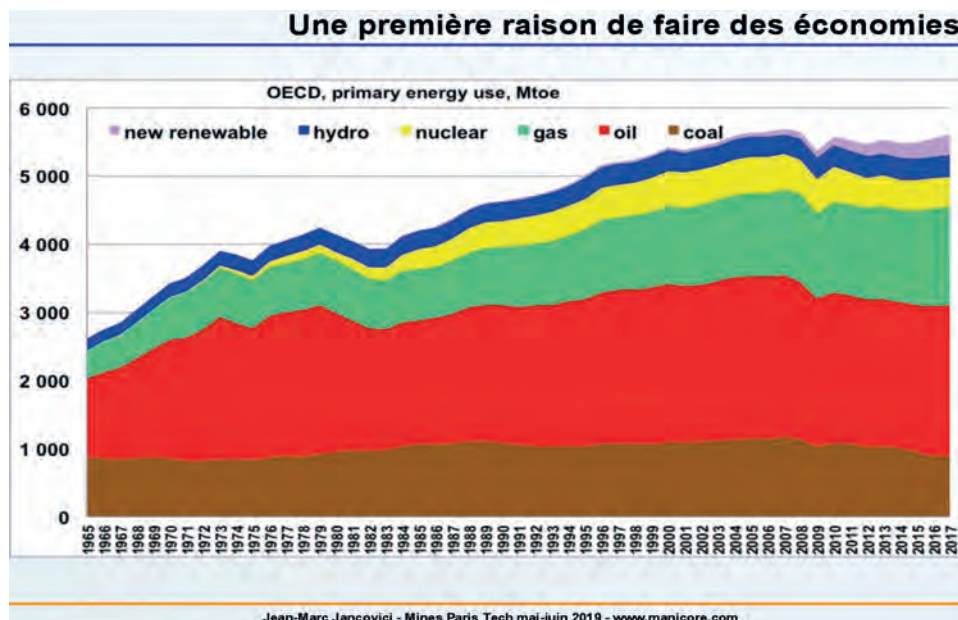
- l'approvisionnement en ressources fossiles n'est pas infini
- l'activité humaine émet des sous-produits indésirables divers et variés, dont des GES dans l'atmosphère, ce qui entraîne un dérèglement climatique tel qu'il remet en cause les modes de vie

Deux manières d'aborder cette situation :

- 1ère approche "économie d'énergie" : comment faire fonctionner un système socialement stable avec moins d'énergie (objet de cette Leçon V) ?
- 2e approche "décarbonation de l'énergie" : comment disposer d'énergie en émettant moins de GES (leçons V, VI et VII) ?

La discussion peut avoir un aspect un peu théorique mais dans la pratique ne pas perdre de vue :

- les différentes zones de la planète ne vont pas être concernées simultanément par les mêmes problématiques économies d'énergie et décarbonation. S'agissant des pays développés, l'Europe, après le Japon (qui n'a rien), est la région du monde la plus pauvre en ressources énergétiques (gaz et pétrole en Mer du nord et charbon en Pologne et Allemagne).
- les décennies à venir seront nécessairement agitées par ces questions d'économies d'énergie et de décarbonation de l'énergie, soit de manière planifiée soit de manière subie. Que l'on fasse ou non quelque chose, il y a "la voiture balai" puisque l'approvisionnement énergétique sera contraint.



Le phénomène est déjà enclenché dans les pays de l'OCDE (Europe de l'ouest, Australie, Japon, Corée du sud, Turquie, Etats-Unis et Canada) depuis 2008 :

- l'approvisionnement a atteint son maximum en 2007
- pour le cas particulier de l'Europe les approvisionnements de charbon, de pétrole et de gaz sont en déclin. 80% de l'approvisionnement est déjà en déclin.

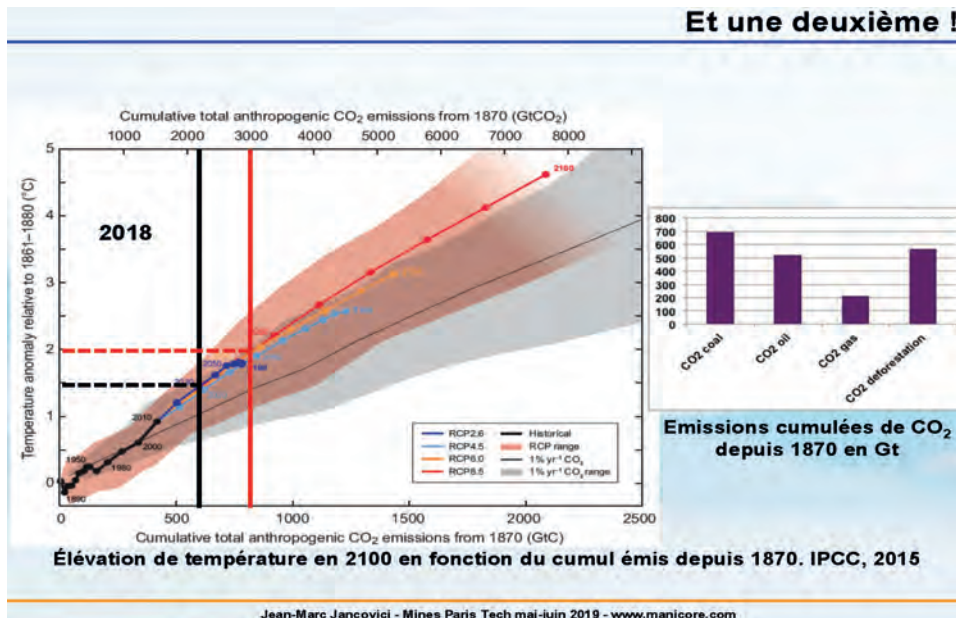
Le fait de faire fonctionner un système socialement stable avec moins d'énergie

- est déjà une équation posée depuis une dizaine d'années dans la zone OCDE
- est une situation qui a des effets concrets pour certaines tranches de la population les moins favorisées. Les économies forcées sont une réalité pour les populations situées dans les zones périphériques des villes (baisse du revenu, augmentation des inégalités, hausse du chômage, les working poor...)

En Europe donc faire des économies d'énergie pour anticiper la baisse de l'approvisionnement est déjà une raison caduque puisque c'est déjà la réalité.

Les économies d'énergies = moins de machines au travail = moins de PIB

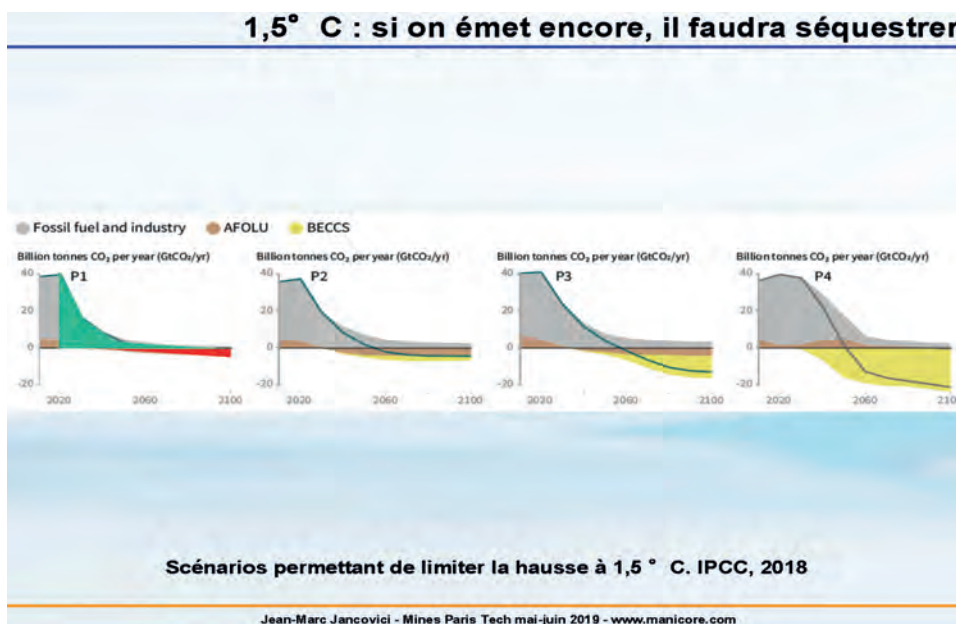
Et une deuxième !



La seconde raison de faire des économies d'énergie est le changement climatique.

- 2200 milliards de T de CO₂ déjà émis dans l'atmosphère depuis 1870 : le réchauffement embarqué est de +1,5°. Dit autrement, en arrêtant les émissions de GES immédiatement, le réchauffement global sera de 1,5° à la fin du XXI^e siècle
- pour limiter le réchauffement à +2° à la fin du XXI^e siècle, il faut limiter les émissions à 3000 milliards de Tonnes de CO₂. 2200 ont déjà été émises en 150 ans, il resterait 800 milliards de tonnes en 80 ans, c'est à dire le 1/3 de ce qui a été émis précédemment avec une population en moyenne 3 fois moins nombreuse. Dit autrement, le droit à émettre des êtres humains serait 1/9 de ce qui est consommé actuellement.

C'est dire l'absolue nécessité des économies d'énergie pour limiter le réchauffement global.



Plusieurs trajectoires d'émissions permettant de limiter le réchauffement global à 1,5° à la fin du XXI^e siècle sont envisageables mais toutes indiquent qu'il faut mettre en œuvre de la séquestration nette. Ce qui signifie :

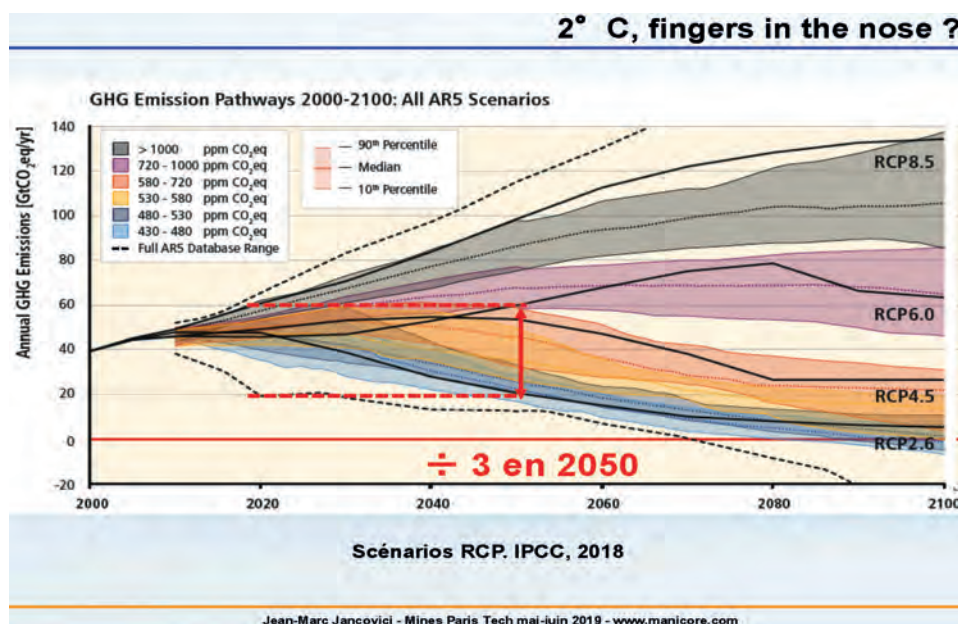
- possibilité de placer du CO₂ dans l'atmosphère pendant quelques décennies (mi-XXI^e)
- mais séquestration nette du CO₂ par la suite (très faibles émissions + retirer de l'atmosphère ce qui a été émis par le passé, bien au-delà du XXI^e)

Deux leviers :

- AFOLU : Aforestation & the Land use : changement d'usage des sols. Autrement dit transformer des sols qui ne captent pas de carbone pour qu'ils captent du carbone. Cela consiste soit à reforester des terres sans forêts (transfert du carbone de l'atmosphère vers le sol), soit à changer les pratiques agricoles (par exemple moins labourer remet du carbone dans le sol)
- BECCS : Biomass Energy and Carbone Capture : centrales électriques au bois (capture du CO₂ pour le remettre sous terre : la forêt capte du CO₂ de l'atmosphère, puis combustion du bois dans une centrale électrique, captation du CO₂ de la centrale

électrique et enfouissement sous terre). “Passer l’aspirateur à CO2 dans l’atmosphère”, faire en accéléré ce que les temps géologiques ont réalisés avec la fossilisation du pétrole et du charbon. Destiné à produire de l’électricité pour remplacer le charbon et le gaz, mais de nombreuses limites...

Autrement dit, pour limiter le réchauffement global à 1,5° en 2100, il faudrait arrêter d’émettre très rapidement.



Pour limiter le réchauffement global à 2° en 2100, l’arrêt des émissions doit être encore plus rapide et brutal.

- RCP 2.6 (scénario bas) : trajectoire d’émissions de CO2 qu’il faut respecter pour limiter le réchauffement global à 2° en 2100. Entendre par “limiter à 2° en 2100” la probabilité de limiter à 2°, il y a 1 chance sur 3 que ce soit supérieur
- actuellement, en additionnant tous les GES, les émissions se situent à 60 milliards de tonnes d’équivalent CO2 / an
- l’objectif serait 20 milliards de tonnes aux alentours de 2050, soit une division par 3 des émissions planétaires

Ordre de grandeur à mémoriser : si l’on veut avoir une chance de limiter le réchauffement global à 2° d’ici la fin du XXIe siècle, il faut diviser par 3 les émissions planétaires d’ici 2050.

Si on ne parvient pas à cette réduction, il y a une absolue certitude que le réchauffement sera supérieur à 2° à la fin du siècle.

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 ≈ 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 ≈ 6000 à 8000 km en zone urbaine en voiture « moyenne » (2 fois moins en 4x4)**

Source : Jancovici, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

20 milliards de tonnes de CO2
 = pour 7 milliards d’individus, cela fait 3 tonnes des CO2 par personne,
 = pour 9 milliards en 2050, environ 2 tonnes de CO2 par personne

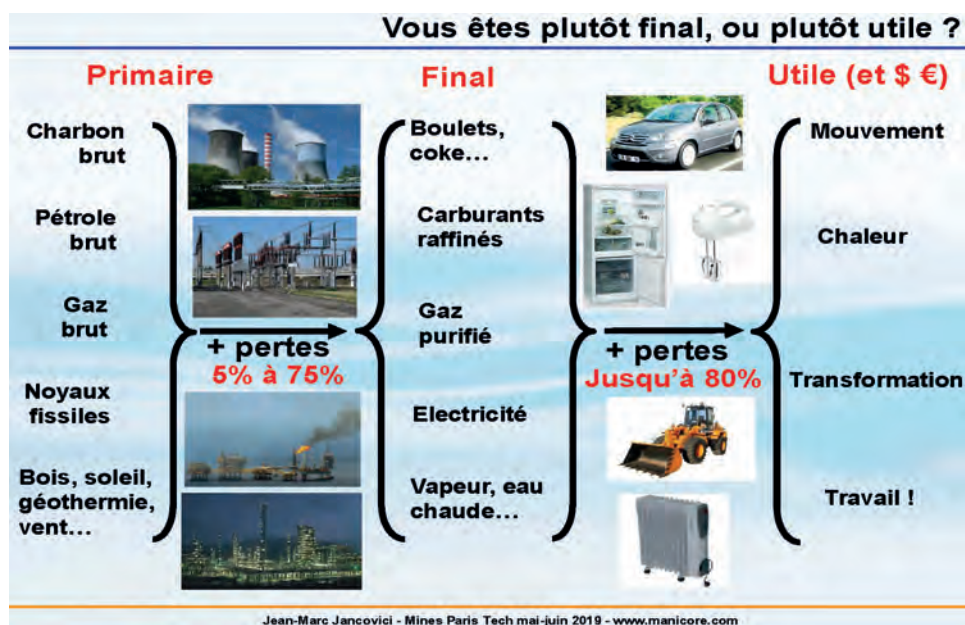
En l’état actuel des technologies, l’une des choses suivantes suffit à atteindre le « droit maximal à émettre

sur une année » :

- faire 15 000 km en avion (un A/R Paris Chicago). 1 km / passager en avion équivaut à 150 gr de CO₂ - km / passager en train en France se situe entre quelques grammes et quelques dizaines de grammes. En Allemagne où une part de l'électricité provient du charbon, il s'agit de quelques dizaines de grammes : le ferroviaire reste bien en-dessous des émissions de l'aviation.
- ou parcourir 6000 à 8000 km en zone urbaine en voiture « moyenne » 2 fois moins en 4 x 4
- 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 de 10 à 500 kg de produits manufacturés (en France 2 000 à 6 000 euros de produits industriels, par exemple : 4 ordinateurs, 4 écrans TV connectés, ...
- ou acheter de 8 000 à 15 000 euros de services. Par exemple : facture de téléphone, place de cinéma...
- ou construire 4 à 5 m² de logement (1m² en structure béton dans un immeuble équivaut à 300 à 400 kilo de CO₂, pour une maison classique de 90 m² un ménage émet 35 tonnes de CO₂ via les cimenteries, les aciéries, tuiles, fenêtres ...
- ou brûler 7 000 kWh de gaz naturel, en tenant compte des émissions amont (quelques mois de chauffage d'un logement)

Conclusion : les populations sont très loin des modes de consommation en ligne avec une limitation du réchauffement global de 2°

Chapitre 25 - Optimiser la chaîne des énergies primaire, finale et utile



Pour économiser de l'énergie, une des manières de procéder est d'améliorer l'efficacité du système énergétique, l'optimisation de la chaîne énergies primaire, finale et utile.

L'énergie primaire : correspond à l'énergie telle qu'on la trouve dans la Nature (ressources fossiles à brûler, bois, force des éléments, rayonnement électromagnétique avec le soleil, ...)

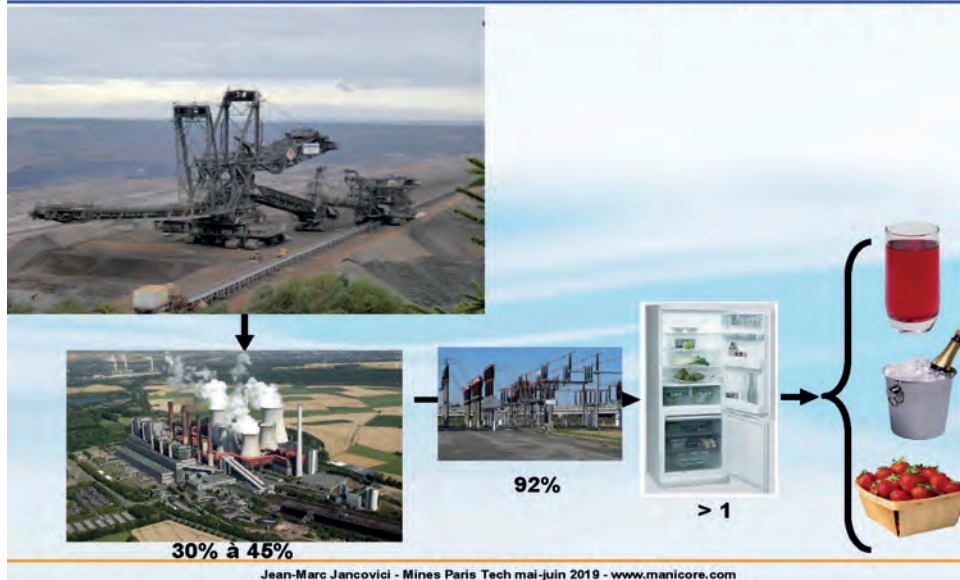
L'énergie primaire alimente le système énergétique / l'industrie de l'énergie dont le rôle est de transformer l'énergie primaire en énergie finale dans le but d'alimenter une machine hors du système énergétique (voitures, appareils électroménagers, ...). L'énergie finale est toujours inférieure à l'énergie primaire.

L'énergie utile est une notion parfois utilisée : il s'agit de l'énergie qui rend réellement un service. Exemple : le frigo, qui utilise une énergie finale (l'électricité) et qui extrait des calories de son contenu, a un rendement. L'énergie utile est l'énergie de refroidissement des aliments, il y a un rendement de conversion entre énergie finale et énergie utile.

Les pertes :

- entre énergies primaire et finale : de 5 à 75% (barrage ou de l'éolienne avec très peu de frottement pour les pertitions les plus faibles, aux machines de Carnot - faire de l'électricité avec de la chaleur - qui ont des pertitions au-dessus de 50%). Le rendement moyen d'une centrale à charbon est le même que celui d'une centrale nucléaire, 1/3 environ.
- entre énergies finale et utile : jusqu'à 80%, par exemple pour un moteur de voiture mis en dehors de sa plage de régime.

Prenons un exemple

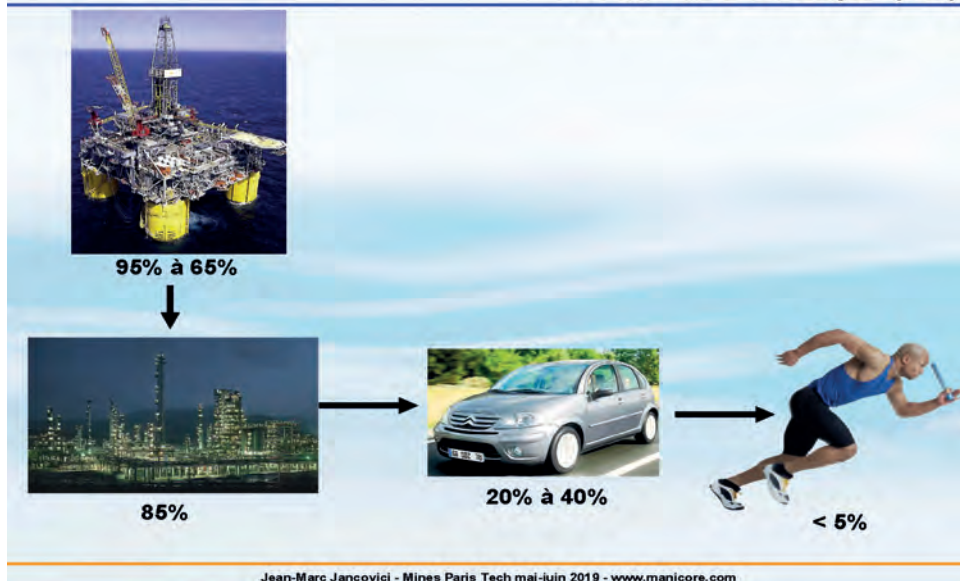


Exemple 01

Rendement proche de 1 pour aller du primaire vers l'utile

- L'excavatrice à lignite (charbon jeune riche en eau et en cendre) allemande Bagger 288 alimente une centrale à charbon.
- 30 à 45% de la lignite se retrouve sous forme d'énergie électrique
- 8% de pertes supplémentaires pendant le transport
- le rendement du frigo supérieur à 1 (jusque 3)

Prenons un exemple (bis)



Exemple 02

- Puits de forage (5 à 35% de perte car besoin d'énergie pour pomper le pétrole et l'extraire de terre, 1/3 pour les "mauvais" pétroles de schistes et les sables bitumineux du Canada)
- Raffinage du pétrole, avec une perte de 15% du au chauffage / à la distillation du pétrole initial
- Alimentation d'une machine externe, par exemple une voiture dont le rendement est de 20 à 40%
- L'énergie utile (le déplacement du conducteur à la vitesse du véhicule, par exemple 1 homme de 70kg à 80 km/h) est inférieure à 5%

Difficultés à optimiser cette chaîne et les rendements physiques :

- l'exploitation des nouveaux gisements de pétrole est de plus en plus gourmande en énergie
- les pertes dues à la distillation sont inévitables
- le moteur à explosion / machine de Carnot, pertes importantes inévitables également

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Efficacité énergétique : obtenir exactement les mêmes services avec moins d'énergie, améliorer les rendements de chaîne de bout en bout. Exemples :

- parcourir la même distance avec une voiture aux mêmes caractéristiques (formes et poids) mais en consommant moins de pétrole
- consommer moins d'électricité / d'énergie pour chauffer son habitat à la même température
- consommer des produits et services provenant d'industriels plus économes en énergie

Sobriété : utiliser délibérément moins de services afin d'économiser l'énergie. C'est la démarche inverse : pas d'exigence sur les rendements mais la consommation et la quantité d'énergie utilisée.

Une "variante" de la sobriété, ou la limitation est subie : la pauvreté. En commun

- la caractéristique physique (moins de consommation = moindre empreinte),
- économiquement récessif (moins de consommation = moins de production = décroissance de la base fiscale = politiquement / budgétairement compliqué)
- mais opposition sur le plan social : souhaité / subi. Cela ne se gère pas de la même manière du point de vue politique.

Entre efficacité et sobriété, la première voie est politiquement plus acceptable :

- contraindre des industriels par des normes et challenger des ingénieurs
- est moins difficile à présenter que soumettre une population entière à un "rationnement"

En raison de la baisse de l'approvisionnement en ressources fossiles :

- tout ce qui ne sera pas réalisé au titre de l'efficacité ou de la sobriété
- sera réalisé manière subie sous la forme de la pauvreté

Vous êtes plutôt primaire, ou plutôt final ?

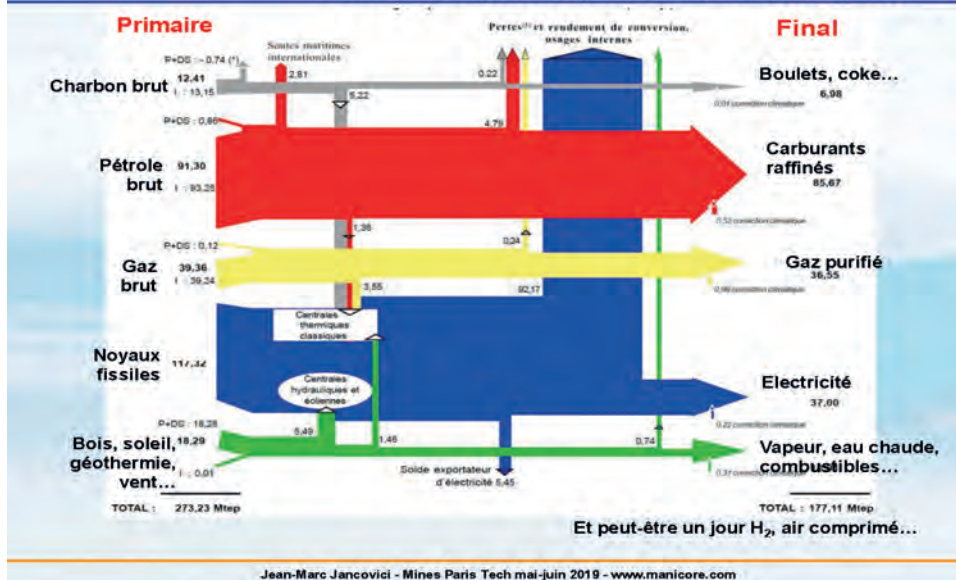
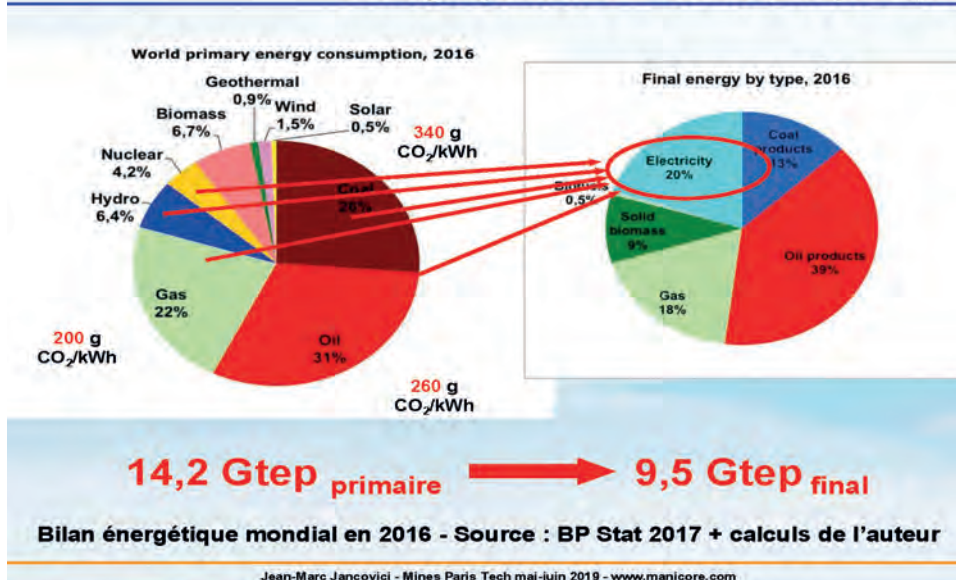


Diagramme Energies Primaire / Finale de la France :

- très peu de perte intermédiaire sur le pétrole
- énormément de perte sur l'électricité primaire (chaleur perdue)

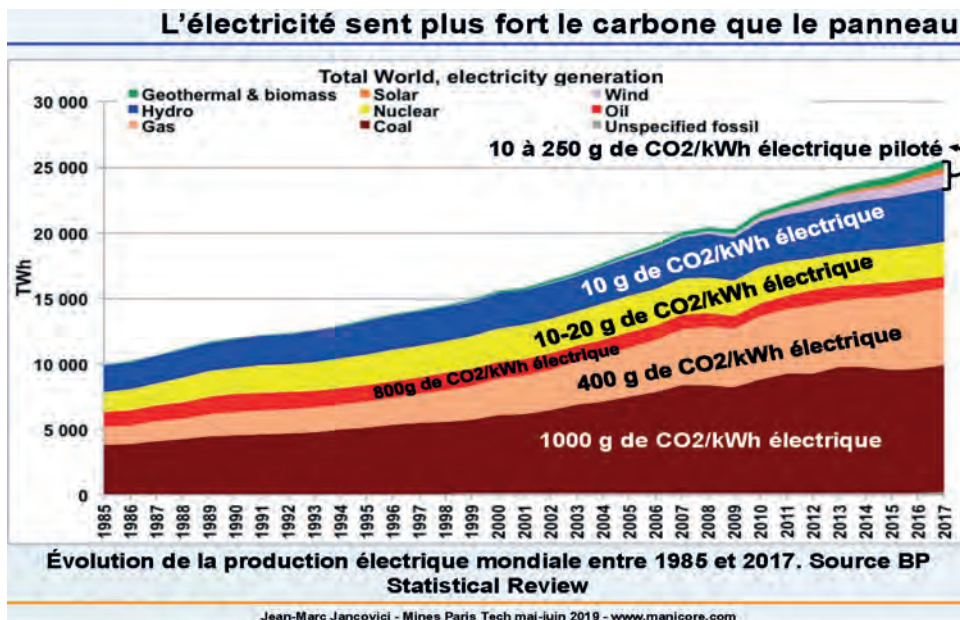
Energie primaire = carbone, ou presque



Dans le monde, la conversion primaire vers finale nous fait perdre environ 5 milliards de tonnes équivalent pétrole d'énergie, c'est-à-dire 40% de l'énergie primaire.

Cette déperdition

- est essentiellement due à la production électrique, qui est en grande partie faite avec des combustibles fossiles via une machine de Carnot
- et par conséquent elle est inévitable



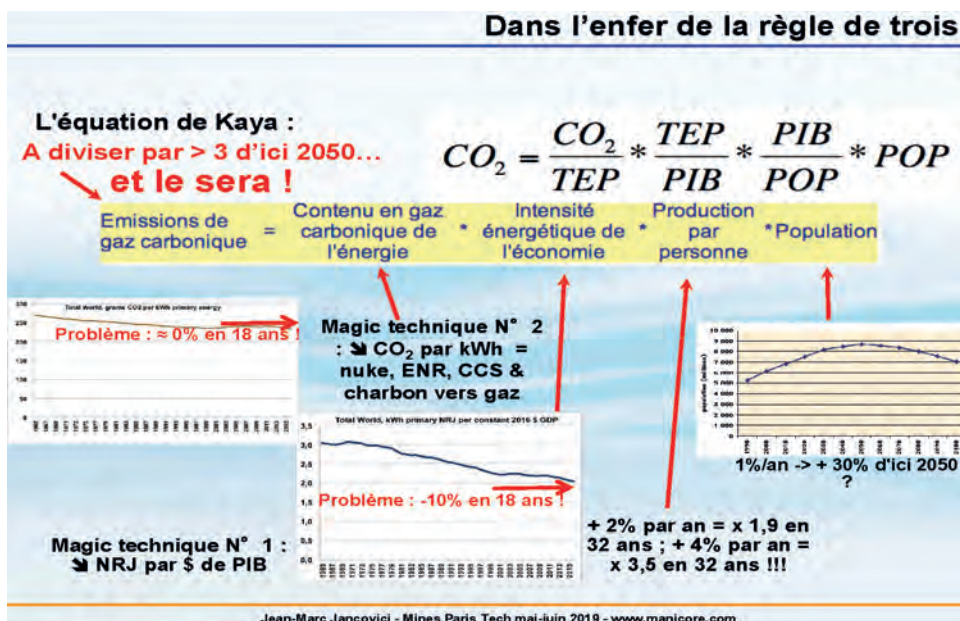
Décomposition de la production électrique dans le monde :

- la quantité d'électricité consommée dans le monde a considérablement augmenté en quelques décennies (x2.5 en 20 ans)
- l'essentiel est fossile (charbon + gaz + pétrole > 15 000 TW/h sur les 25 000 produits)
- les 2 grands modes décarbonés de production d'électricité sont l'hydroélectricité et le nucléaire
- très minoritaires, les nouvelles énergies renouvelables (éoliennes et géothermie dominants)

Pour produire 1 KW/h d'électricité

- au charbon, on émet 1 kilo de CO₂
- au gaz, 400 gr
- au pétrole, 800 gr
- au nucléaire, 10 à 20 gr
- avec l'hydroélectricité, 10 gr
- avec les nouvelles énergies renouvelables, entre 10 et 250 gr

Chapitre 26 - L'équation de Kaya



Grande plage de pollution des nouvelles énergies renouvelables s'explique :

- éolienne avec électricité non pilotable = 10 gr
- panneau solaire avec stockage sur batteries = 250 gr

Pour savoir à quel niveau il faut situer les économies d'énergie on peut recourir à une petite règle de trois connue sous le nom

d'équation de Kaya.

Equation de Kaya = équation de la baisse des émissions de CO2 sous forme d'une règle de trois. $CO_2 = CO_2$

CO_2 : quantité des émissions de CO2 dans le monde

$$CO_2 = CO_2/TEP * TEP$$

TEP : quantité d'énergie qu'on utilise dans le monde

> 1er terme : CO_2/TEP : la quantité de CO2 libérée dans l'atmosphère par unité d'énergie disponible par unité de machines en fonctionnement

$$CO_2 = CO_2/TEP * TEP/PIB * PIB$$

PIB : la production économique

> 2e terme : TEP / PIB : à quelle hauteur / niveau, exprimée en KW/h, j'ai eu besoin de transformer l'environnement (nrj = transformation de l'environnement) pour disposer d'1 dollars de valeur ajoutée

$$CO_2 = CO_2/TEP * TEP/PIB * PIB/POP * POP$$

POP : population mondiale

> 3e terme : PIB / POP : la quantité de services économiques par personne

Traduction : les émissions mondiales de CO2 / de GES sont le produit de 4 termes

- la quantité de CO2 par unité d'énergie, plus mon unité d'énergie est riche en CO2, plus toutes choses égales par ailleurs, j'émet de GES
- la quantité d'énergie utilisée par unité de production économique, plus j'utilise d'énergie par unité de production économique, plus toutes choses égales par ailleurs les émissions augmentent
- la production économique, plus on produit par personne, plus on transforme, plus on émet de GES

- la population, toutes choses égales par ailleurs, plus on est nombreux plus les émissions sont élevées

Le terme initial "Emissions de CO2" est mis sous contrainte puisque l'objectif d'ici 2050 est la division par trois des émissions de GES. Qu'est-ce qui dans l'équation est susceptible d'être réduit pour coïncider avec cette contrainte ?

Première option : diviser en 30 ans la population humaine par 3. C'est la solution ultime, qui adviendra si aucun des autres termes de l'équation n'est réduit. Les démographes misent sur l'inverse, sur une augmentation de la population de 30% (jusqu'à 9 ou 10 milliards d'humains). Donc

- si le terme Population *1.3
- pour équilibrer l'équation, la division à opérer n'est plus par 3 mais par 4

Diviser le PIB / personne par 4 dans les 30 ans à venir ? Les décideurs politiques n'œuvrent pas du tout pour la décroissance du PIB, dont ils espèrent une augmentation annuelle de 2%. Avec une telle évolution, sur les 30 prochaines années, cela multiplie par 2 le terme de l'équation. Donc

- si le terme PIB *2
- si le terme Population *1.3
- pour équilibrer l'équation, la division à opérer n'est plus par 3 mais par 7.5

Restent les deux termes :

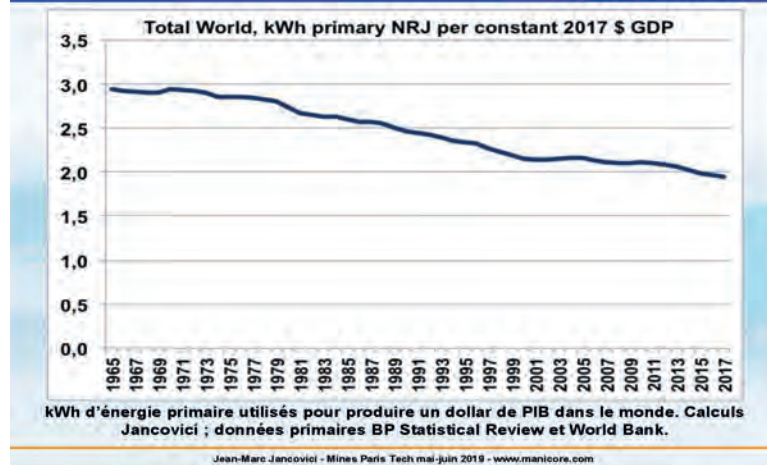
- efficacité énergétique de l'économie : déjà 50% gagné en 1/2 siècle, -10% sur les 20 dernières années. On gagne péniblement 1/2 point d'efficacité énergétique par an. Reste un facteur 5 à trouver sur le dernier terme.
- énergie plus décarbonée serait la meilleure solution. Mais la baisse des émissions de CO2 par KW/h est de 10%, gagnés durant les 50 dernières années. Depuis le "boom" des nouvelles énergies renouvelables des 15 dernières années, plus aucun gain (les ENR augmentent, mais également le charbon et le gaz)

Si rien n'est plus possible pour ces deux derniers termes :

- la prospérité sera entamée, sobriété et / ou pauvreté à prévoir
- voire atteinte de la démographie (maladies, faim, guerres, ...)

L'équation de Kaya nous apprend qu'il n'y a pas d'échappatoire. Le problème ne pourra pas être repoussé éternellement à plus tard.

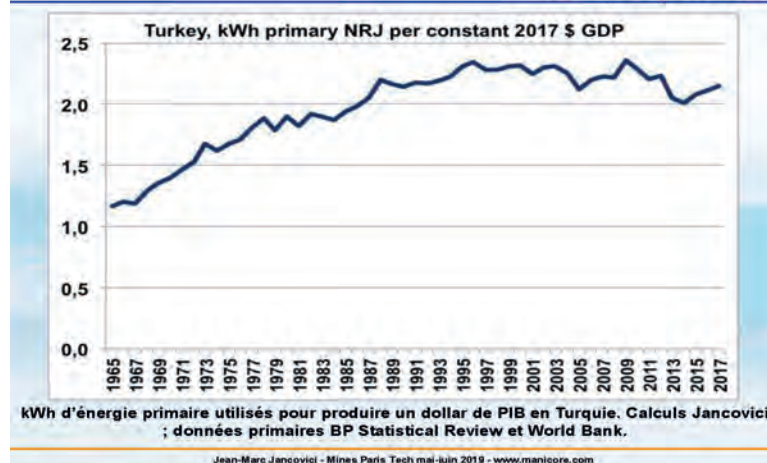
Soyons efficaces !



Zoom 1 sur la complexité de la situation : l'efficacité énergétique de l'économie mondiale.

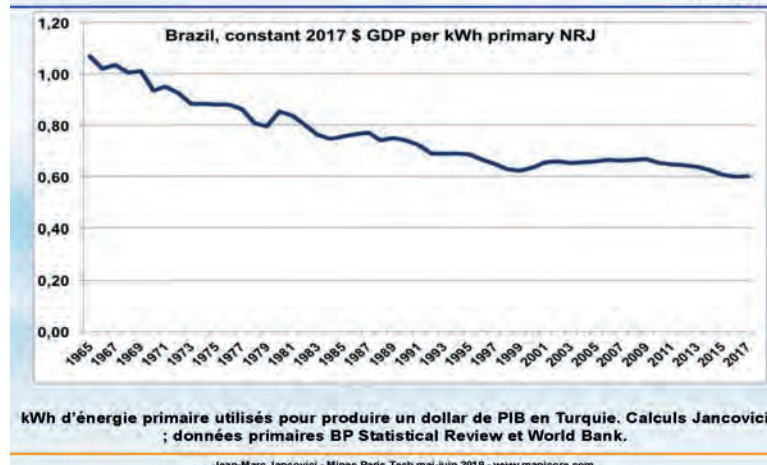
- Globalement plus d'efficacité.
- L'amélioration était plus soutenue avant les années 2000

Mais pas partout...



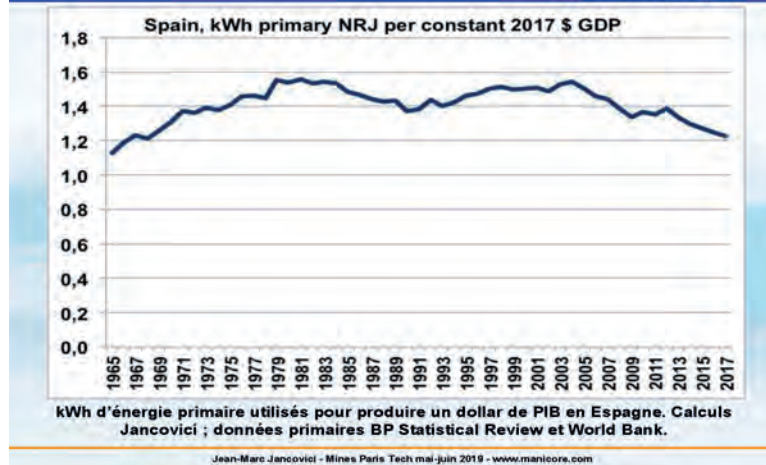
Zoom 2 : l'efficacité énergétique de l'économie se dégrade dans certains pays, exemple la Turquie. Aujourd'hui il faut plus d'énergie pour faire 1 \$ de valeur ajoutée qu'il n'en fallait il y a 50 ans.

Ni là...



Zoom 3 : l'efficacité énergétique du Brésil est de moins en moins efficace (ordonnée KW/h)

Et pas là non plus !

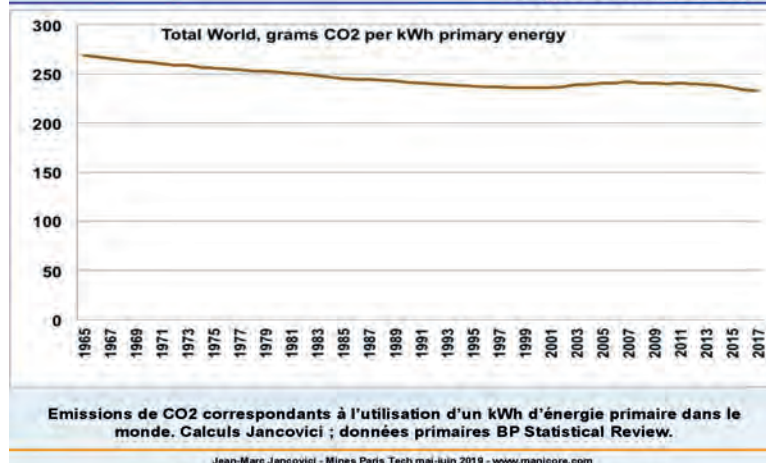


Zoom 4 : Espagne. Efficacité énergétique équivalente à celle de 1965, en baisse depuis 20 ans.

Conclusion : les gains d'efficacité énergétique ne sont pas linéaires

- amélioration globale mais moins soutenue depuis le début des années 2000
- et au cas par cas, certains pays ont une efficacité énergétique en baisse

Soyons décarbonés !

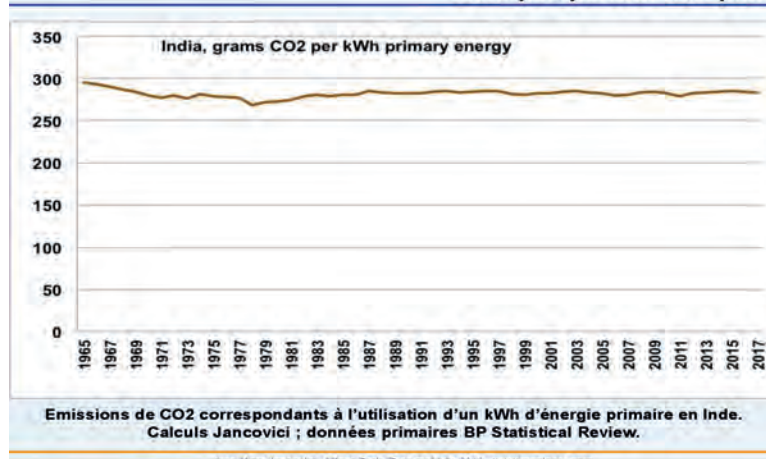


Efficacité carbone de l'énergie : combien de gr de CO2 il faut mettre dans l'atmosphère quand on utilise 1 kWh d'énergie primaire (et non d'électricité) ?

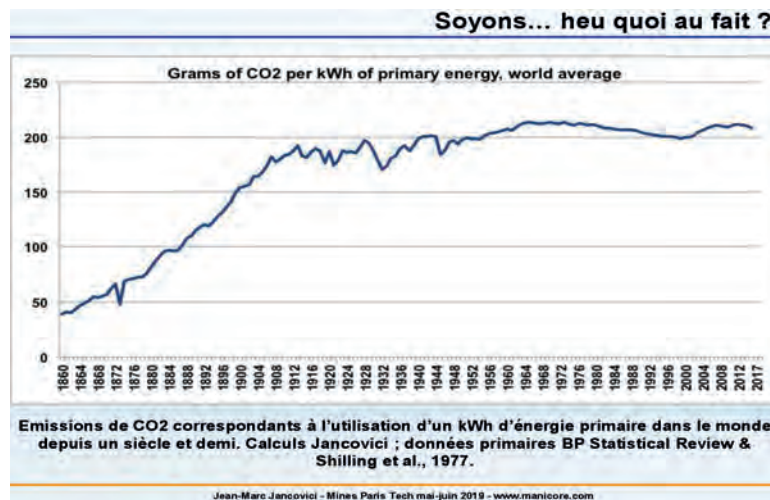
- Amélioration lente pendant 50 ans jusqu'au début des années 2000 (montée de puissance du gaz, la moins carbonée des énergies fossiles + développement de l'hydroélectricité puis du nucléaire)
- Niveau constant depuis (retour du charbon compensé + ou - par le développement des nouvelles énergies renouvelables)

Courbe très contre-intuitive par rapport au discours ambiant qui annonce que le développement des nouvelles énergies renouvelable permet de décarboner l'énergie. C'est faux.

Mais pas partout non plus



Zoom Inde : très stable depuis 50 ans. Donc des évolutions à regarder de près selon les pays / régions.

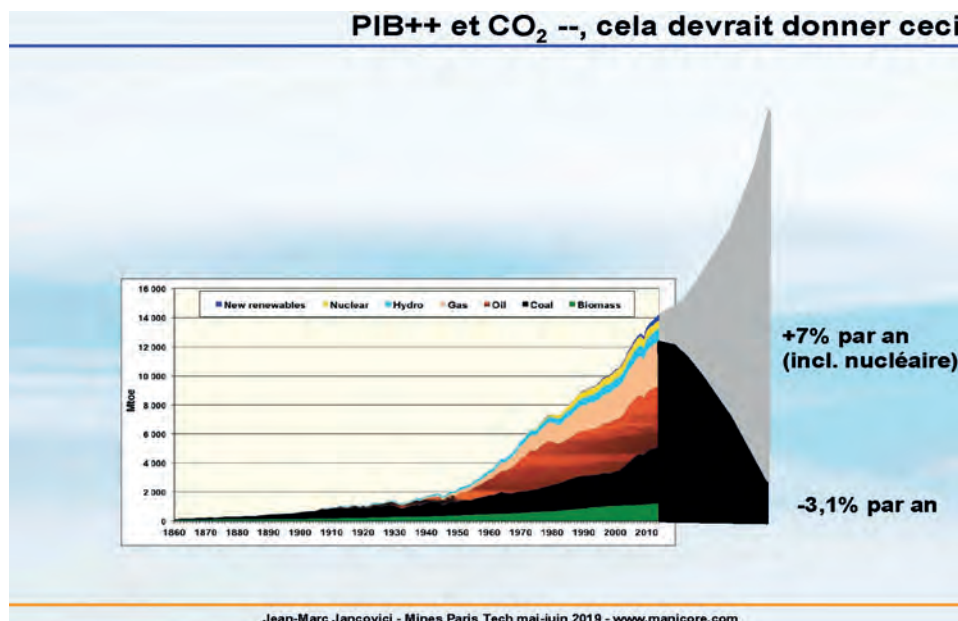


Efficacité énergétique sur une série portant sur 150 ans : comment a évolué le contenu carbone de l'énergie utilisée depuis 1860.

Note : la biomasse non comptabilisée alors qu'une partie de la biomasse a été de la déforestation, donc impacte en fait la teneur en CO2 de l'efficacité énergétique

Constats :

- la Révolution industrielle a précisément consisté à carboner l'énergie, à utiliser plus de combustibles fossiles
- depuis le début du XXe siècle, la teneur en CO2 de l'énergie est grosso modo restée constante.
- les chocs pétroliers, une oscillation parmi d'autres, de même les nouvelles énergies renouvelables Il semble très difficile de pouvoir sortir des énergies fossiles.



Discours politiques / médiatiques irréels mêlant :

- la décarbonation de l'économie, la quantité d'énergie fossile doit décroître
- la croissance du PIB, l'économie doit continuer à croître

Signifierait :

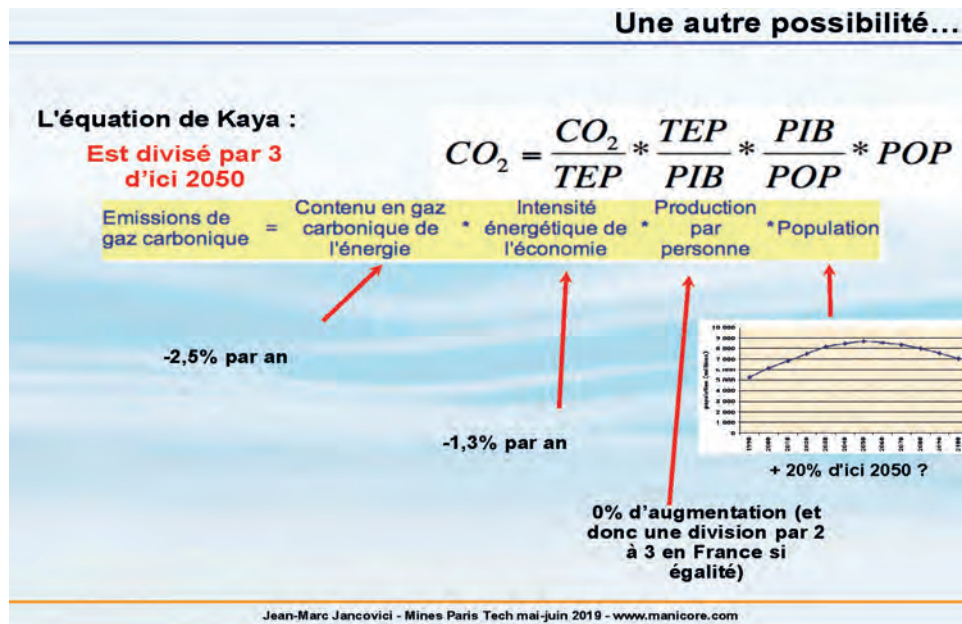
- croissance du PIB (= une transformation) = besoin de plus d'énergie
- avec moins d'énergies fossiles

Concrètement seule solution, d'ici 2050 :

- décroissance des énergies fossiles de 3 à 4 % par an
- croissance de l'énergie non fossile (incluant le nucléaire) de 7% par an

Pose la question de la faisabilité physique d'une croissance aussi rapide des énergies décarbonées, sachant que ce développe-

ment demeure dépendant des énergies fossiles pour leur mise en place, construction, etc.



A quelles conditions serait-il possible de tenir la division par 3 des émissions de CO₂ d'ici 2050 ?

Pas de baisse de la démographie, mais par rapport aux 30% d'augmentation prévue d'ici 2050, mise en place de mesures pour une croissance réduite à 20%. Cela nécessite

- une réelle aide au développement des pays en développement (et non pas une aide aux firmes occidentales)
- d'orienter l'aide au développement vers les trois mesures éprouvées pour faire baisser la natalité, à savoir l'éducation des femmes, le planning familial et le système des retraites

Sobriété, ne pas faire croître le PIB mondial. On se contente de l'actuel niveau de développement. Toutefois, pour que les populations du Sud rattrapent le développement du Nord, cela consiste à diviser par 2 ou 3 le PIB des pays riches.

Développement des économies d'énergie avec attention portée à l'efficacité énergétique. Soit une réduction de 1,3% / an

Efforts intenses sur la décarbonation de l'énergie :

- constructions massives de barrages, de centrales nucléaires, d'éoliennes et de panneaux solaires.
- capture et séquestration du CO₂ à large échelle Soit une réduction de 2,5% par an

=> cette organisation de l'équation est la seule permettant de résoudre le problème du climat et de la pauvreté. Elle consiste à appauvrir les riches.

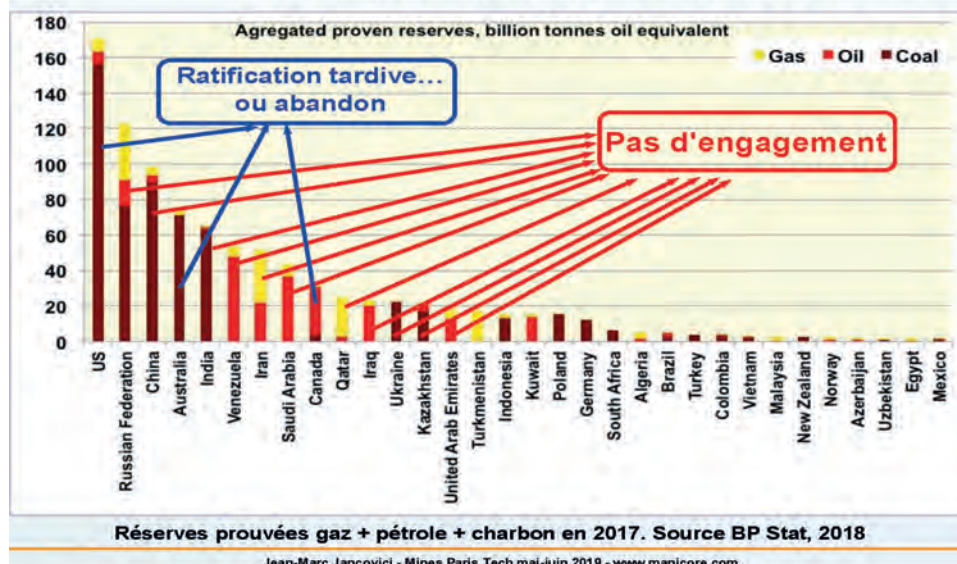
2 manières de supprimer la pauvreté :

- Appauvrir les riches. Faire un Dirac, faire en sorte que tout le monde gagne la même chose, et du coup personne ne se situe à moins de 50% du revenu médian.
- Enrichir les pauvres. Augmenter la production, donc augmenter les émissions de CO₂.

D'un point de vue arithmétique, seule la première solution est compatible avec les objectifs du développement durable.

Chapitre 27 - Considérations sur l'organisation des démocraties et le fonctionnement des médias.

Et qui arrive en tête des réserves de carbone?



Hiérarchie des réserves en combustibles fossiles par pays.

Utiliser moins de combustibles fossiles ? Cela consiste à exiger des pays détenteurs des réserves de ressources fossiles à ne pas les extraire du sol.

Le prérequis à laisser sous terre les réserves dont les pays disposent se trouve dans l'engagement à limiter leurs émissions lors de l'accord de Paris (COP21).

4 pays ont ratifié tardivement ou ont abandonné l'engagement à limiter leurs émissions de CO₂:

- Canada (abandon)
- Australie
- Etats-Unis (accord mais jamais de ratification)
- Russie (ratification extrêmement tardive)

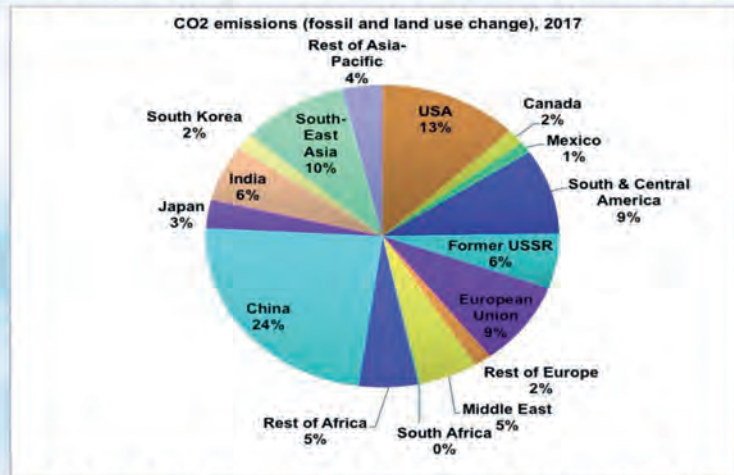
L'ensemble des autres pays gros détenteurs de réserves fossiles n'ont jamais pris d'engagement à limiter leurs émissions de CO₂.

- Chine
- Inde
- Venezuela
- Iran
- Arabie Saoudite
- Qatar
- Irak
- Ukraine
- Kazakhstan
- Emirats Arabes Unis

Faible enthousiasme de la part des détenteurs de ressources fossiles à limiter l'extractivisme. Les pays qui s'engagent à agir contre le dérèglement climatique sont essentiellement ceux qui n'ont pas de réserves fossiles dans leur sous-sol.

Le charbon qui représente l'essentiel des ressources extractibles restantes, est une énergie essentiellement domestique. Par conséquent tant que les pays sont souverains sur cette question, les Etats font ce qu'ils veulent de leurs ressources. Cela ne dépend que de leur politique intérieure de décider de produire de l'électricité au charbon.

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

A prendre en compte avant d'en venir aux mesures techniques : l'essentiel des pays émetteurs ont actuellement un régime dit démocratique. Exceptions : Chine & Moyen-Orient.

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



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Le système démocratique n'est pas familier aux individus dans leur vie quotidienne / dans leur vie de salarié : verticalité du pouvoir et système de contrôle du respect des règles.

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)

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

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Dans les démocraties le fonctionnement est tout à fait différent, cf De la démocratie en Amérique de Tocqueville. Le dirigeant est chargé d'arbitrer entre différentes forces, qui votent, c'est-à-dire décident du futur dirigeant.

Le chef n'est pas un vrai chef qui impose sa volonté aux populations, il est élu et se trouve placé dans un rapport de séduction permanent avec l'électorat. Ce qui explique que ses orientations sont dictées par "l'air du temps" et fluctuantes.

Exemple de la taxe carbone. Passées successivement en 1 semaine avec l'irruption des gilets jaunes :

- "nous serons inflexibles sur la taxe carbone"
- "on va remettre plus tard"
- "on abandonne"

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

La démocratie considère une égalité fondamentale des individus, s'il existe des inégalités c'est qu'il y a une injustice. Encouragement à l'individualisme et aux intérêts particuliers.

Dans une monarchie, les individus sont fatalistes, se contentent de ce qu'ils ont et acceptent un système politique immuable, "naturel".

La démocratie favorise la consommation de masse. Par conséquent quel effet sur la démocratie d'une nécessaire réduction de la consommation de masse ? Comment réduire le droit à consommer ?

Prédominance des médias en démocratie, sans contre-pouvoir et avec une prime donnée au superficiel.

Conclusion : la démocratie recèle en elle-même sa propre fragilité, son incapacité à régler correctement les dangers de long

terme. Prendre des décisions restrictives / supprimer des droits / prendre rapidement des mesures contraignantes : les systèmes démocratiques ne sont pas prévus pour.

Par conséquent si la démocratie est incapable de gérer la question du dérèglement climatique, c'est-à-dire

- faire des économies d'énergie,
- réduire la production / le PIB
- agir sur la démographie

... la solution qui adviendra finalement (de force, du fait du contexte) se passera de démocratie.

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 !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Dernière considération s'agissant de la logique de fonctionnement du système démocratique : l'expression du vote n'est pas dépendant des connaissances préalables de l'électeur. Pas de tests de connaissance sur le programme des candidats par exemple.

Les médias constituent la pièce centrale de la démocratie.

Ordres de grandeur :

- 1 conférencier à la fac touche 180 000 personne dans sa vie
- 1 présentateur du JT : plusieurs millions de personnes par jour

L'enjeu est de faire relayer par le speaker l'information du spécialiste, ce qui est important et non pas ce qui est nouveau.

Ce qui figure en Une

- n'est pas représentatif de ce qui est important dans le monde (les faits)
- et pourtant c'est à partir de cette source que se forment les opinions des électeurs

Dur métier que celui de journaliste

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)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Rapport du GIEC : 2000 pages

Résumé pour décideurs : 40 pages (presque jamais lu par le personnel politique)

1 article dans le journal : 2 pages, division par 2000, forcément une information incomplète

Parlez moi de transparence !

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...

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Comprendre la logique de fonctionnement typique des médias : la nouveauté / le scoop, les faits divers, logique marchande / audimat, formation des journalistes / filtres inconscients, éventuels partis-pris / filtres conscients...

Un journal n'est pas une source opposable (pas fiable scientifiquement), il délivre une première information fabriquée qu'il faut nécessairement vérifier. Remonter à la source d'une information journalistique est le minimum : un journal c'est la fin d'un téléphone arabe dont on ne connaît ni le nombre de maillons intermédiaires ni la qualité de transmission entre chaque maillons.

Chapitre 28 - La séquestration du CO2

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

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)**

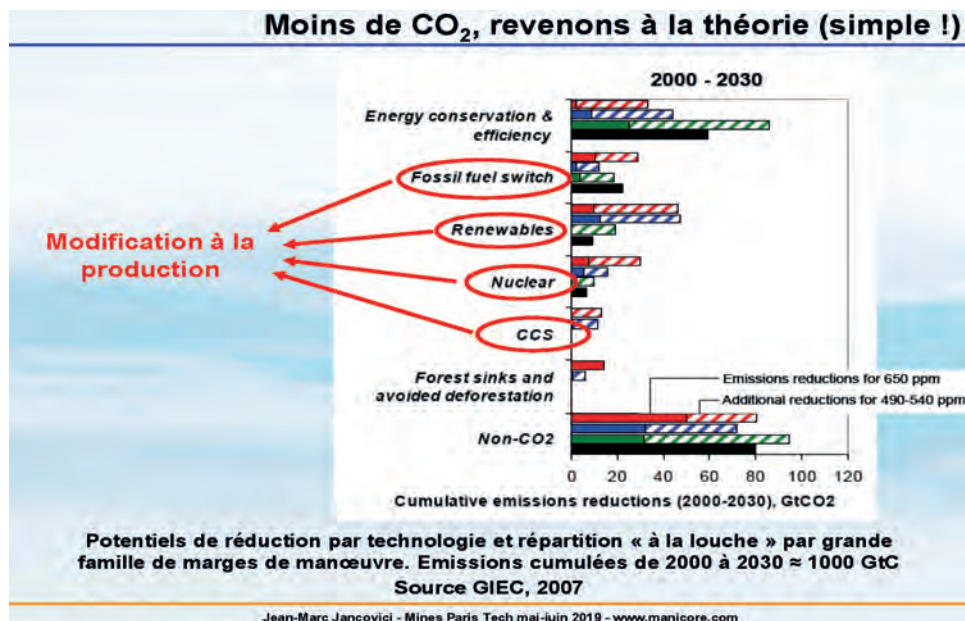
Utiliser, à mix énergétique constant, moins d'énergie
-> **économies d'énergie**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Retour à la technique après l'organisation des démocraties et le fonctionnement des médias.

Avant de parler des économies d'énergie, retour à la technique avec la capture et séquestration du CO₂, qui est 1 des 2 façons de réaliser des économies de CO₂.

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

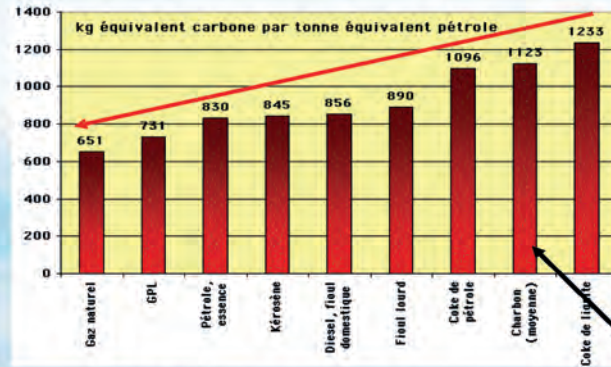


Potentiel de réduction des émissions de CO₂ par technologie.

Pour tenir les 2° de réchauffement global à la fin du XXI^e siècle, c'est :

- 30% : économies d'énergie via les gains d'efficacité énergétique
- 70% : économies d'énergie via le passage aux nouvelles énergies renouvelables, nucléaires et CCS (Séquestration géologique du CO₂)

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



Pas de chance : les grosses réserves sont là !

Source Bilan Carbone, Ademe

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Les émissions en équivalent carbone des différentes ressources fossiles.

Une première manière de réduire les émissions de GES consiste à conserver les énergies fossiles mais de remplacer le charbon par le gaz. En passant du gaz au charbon, on divise par 2 les émissions :

- 400 gr par kWh électrique pour le gaz
- 1 k de CO₂ par kWh électrique pour le charbon

Les Etats-Unis ont très fortement baissé la consommation de charbon dans la production électrique durant les 10 dernières années, remplacé pour l'essentiel par du gaz. L'explication se trouve dans l'essor du gaz de schiste qui a fait s'effondrer le prix du gaz aux Etats-Unis et rendu le gaz plus rentable.

En Europe, les fournisseurs de gaz - c'est à dire les majors pétrolières - sont très favorables à l'instauration d'un prix du CO₂ car ils en seraient les grands bénéficiaires (renchérissement de l'électricité produite avec du charbon).

Passer de la production électrique au charbon vers le gaz est un moyen de diviser les émissions de la production électrique par 3.

Sauf que les réserves de charbon sont bien plus importantes que les réserves de gaz. Il s'agit donc d'une marge de manœuvre pour décarboner la production électrique mais transitoire.

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

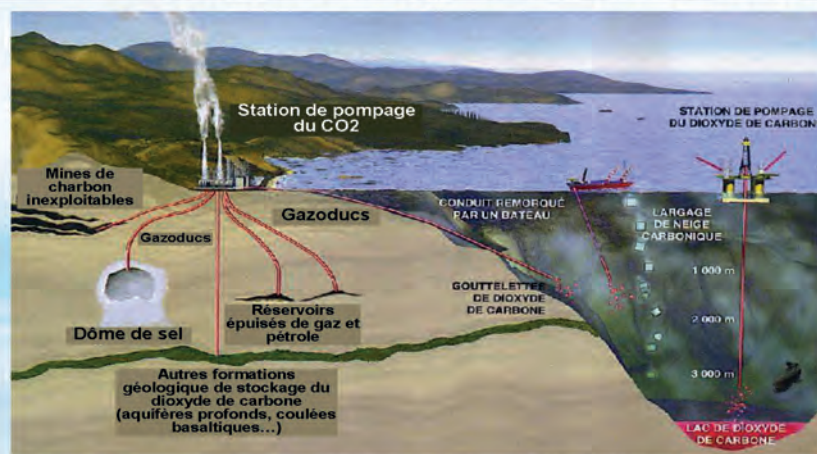


Schéma d'ensemble de la capture et séquestration.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

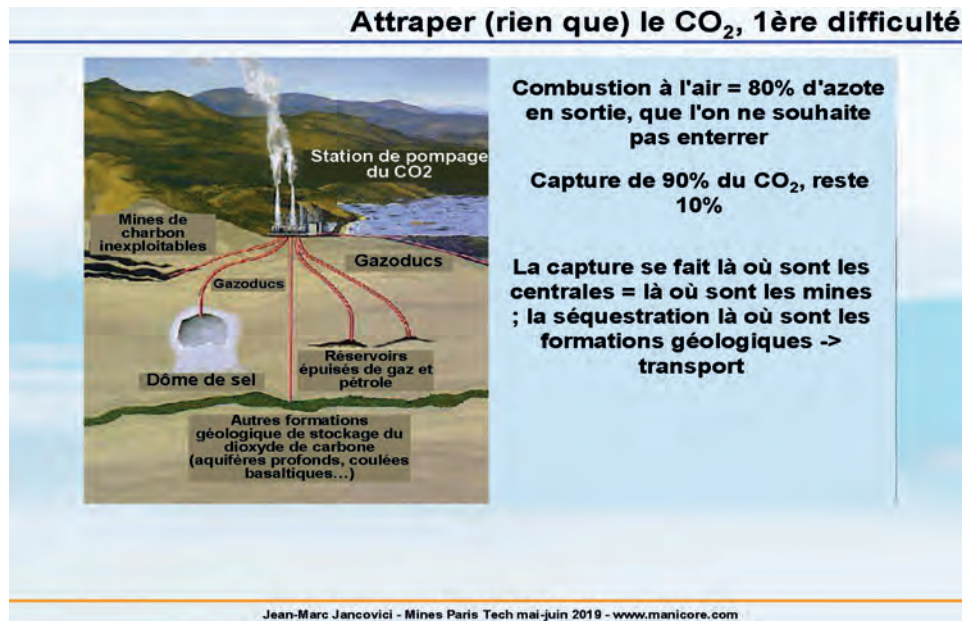
Une deuxième manière de réduire les émissions de GES consiste à séquestrer le CO₂ produit.

- capturer le CO₂ là où il est émis
- puis le stocker à un endroit d'où il ne sortira plus, sous terre et sous l'océan (idée techniquement compliquée donc abandon-

née)

Sous terre :

- des réservoirs d'hydrocarbures épuisés (les roches poreuses qui contenaient le pétrole et le gaz). Avantage de cette solution pour les pétroliers : placer du CO₂ dans ces cavités permet de lessiver le pétrole restant. Cette pratique existe déjà aux Etats-Unis : les pétroliers achètent du CO₂ pour nettoyer / vider complètement les puits de pétrole
- les aquifères salins profonds, typiquement du sable imprégné d'eau, les coulées basaltiques.

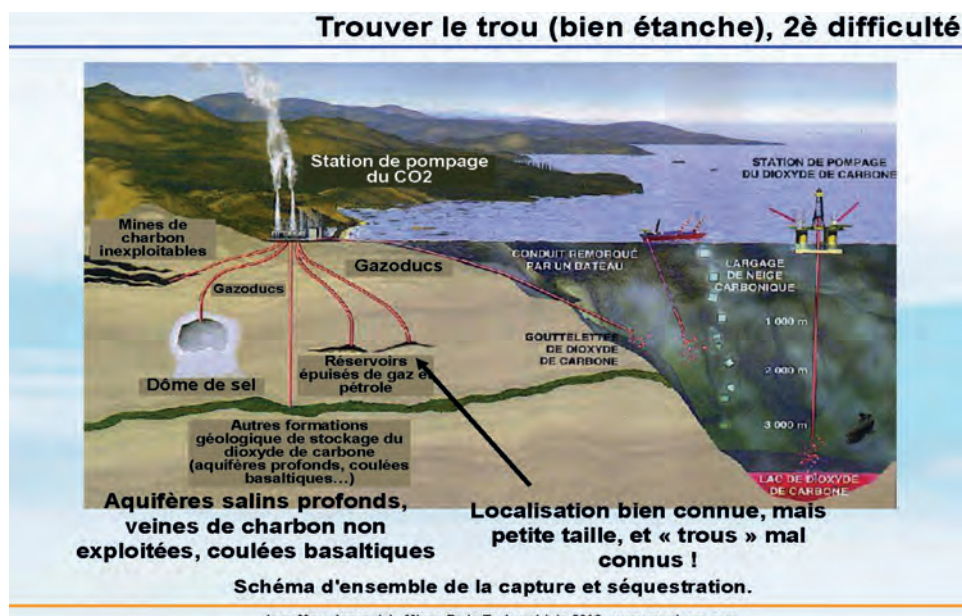


La consommation d'énergie se situe surtout au niveau du traitement du CO₂

- capture (environ 20% à 30% de l'énergie du processus)
- épuration des fumées pour supprimer toutes traces (par exemple de suie)
- la fumée passe alors sur un lit d'amines / dans un bain d'amines (molécules qui vont absorber le CO₂ de manière sélective puisque l'azote est écarté)
- chauffage du bain d'amines pour dessorber le CO₂, ne récupérer que du CO₂ pur (c'est la grosse part de la consommation d'énergie du processus)
- le CO₂ est comprimé, acheminé jusqu'au point d'injection (les lieux de capture et les lieux d'injection ne coïncident pas nécessairement, il faut prévoir des infrastructures de transport pour l'acheminement du CO₂)
- le CO₂ est injecté sous forme supercritique (état de la matière soumise à une forte pression et à une forte température).

Sous forme supercritique (état intermédiaire entre gaz et liquide, le CO₂ mis à haute pression prend cette forme supercritique),

- le CO₂ devient dense comme un fluide, bien plus pratique à injecter que sous forme gazeuse
- le poids du CO₂ est quasiment suffisant pour l'injection dans la réserve. Pas besoin d'une grande quantité d'énergie pour l'enfouissement (quelques % de la consommation d'énergie du processus)



La séquestration c'est bien, sauf que

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

Le rendement électricité/chaaleur 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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Limites de la technique de la séquestration du CO₂

La difficulté majeure se situe dans la question du rendement. La séquestration du CO₂ est très gourmande en énergie. Environ 30% de l'énergie produite par une centrale électrique à charbon ou gaz devrait être reversé à la séquestration.

Comment mettre en place cette "économie forcée" de production électrique, c'est à dire jusqu'à -30% d'activité économique ? Augmenter la puissance des centrales de 30 % ? Cela pose de gros problèmes logistiques, notamment pour les centrales à charbon (tout doit être redimensionné convoyeurs, brûleurs, évacuation des cendres, ...), insolubles à bref délais. Pas de rétrofit commode sur les centrales existantes.

Donc le problème n°1 :

- non pas le prix de la séquestration
 - mais une perte physique de production électrique qu'on ne sait pas compenser, problème de la pénalité énergétique
- Explique qu'il n'y ait qu'une exploitation commerciale aujourd'hui en activité (Mer du Nord). Autres difficultés :
- Pour injecter de grandes quantités de CO₂ dans le sol, il faut multiplier les puits d'injection car le débit par unité ne peut pas être très élevé.
 - Pour capturer le CO₂, le dispositif ne peut être installé que sur des sources d'émissions concentrées : les centrales à charbon (20% des émissions mondiales), centrales à gaz et à pétrole (7%), les cimenteries (6%), ... soit environ 40% des émissions de CO₂ qui pourraient être séquestrées.
 - Du fait des coûts, les électriciens ne feront rien pour la séquestration / la CCS sans une obligation légale

Chapitre 29 - Faire des économies en fin de chaîne : réglementation et planification

Faire une maison « zéro énergie », on peut



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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Autre solution, l'efficacité en fin de chaîne plutôt qu'en début. Plusieurs solutions.

Performance énergétique des bâtiments neufs avec la création de logements passifs (pas de système de chauffage)

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 !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

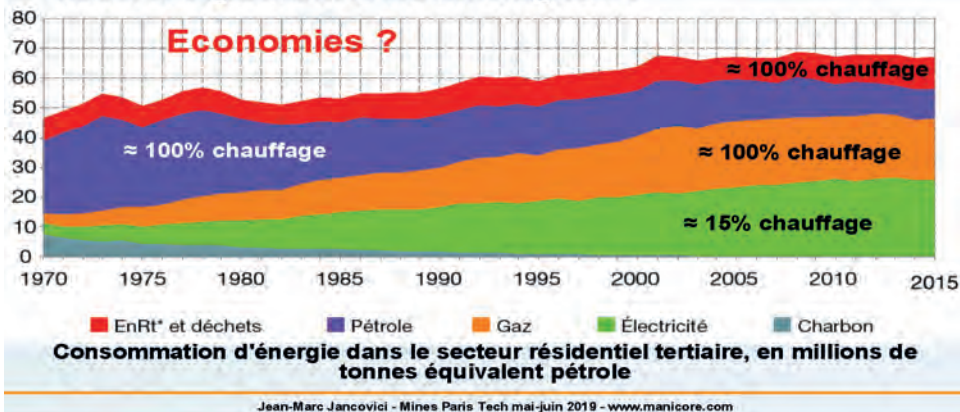
L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments n'est pas une nouveauté, et en France le mouvement a été encouragé par les chocs pétroliers et l'urbanisation (avec nécessairement plus de logements collectifs, intrinsèquement plus efficaces).

Comparaison :

- 1950 un bâtiment au chauffage central consomme 250 kWh/m²
- 2008 : 80 kWh/m²
- soit une division par 3 en 60 ans

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



Gains d'efficacité synonymes d'économies d'énergie et donc de réduction des émissions ? Non pour plusieurs raisons :

- les bâtiments non chauffés de plus en plus rares, l'équipement en chauffage central en forte augmentation
- la surface habitable par personne a augmenté (40 m² aujourd'hui contre 25 m² au début des années 70, avant les chocs pétroliers)
- l'augmentation du taux d'équipement des logements (équipement électro-ménager pléthorique qui n'existait pas ou peu dans les décennies passées) accroît la consommation d'énergie
- l'augmentation du nombre de logements

La quantité

- d'énergie totale consommée dans le secteur résidentiel tertiaire est demeurée à peu près constante depuis 50 ans (60 millions de TEP)
- d'énergie fossile utilisée n'a pas sensiblement diminué (elle a changé de nature, disparition du charbon, diminution du fioul et remplacement par le gaz)

Taux de renouvellement du parc résidentiel :

- le neuf ne remplace pas l'ancien, parc existant en France de 30 millions de résidences principales qui s'incrémente chaque année de quelques centaines de milliers de logements supplémentaires, + 1% chaque année qui correspond à l'accroissement naturel de la population et aux divorces)
- le taux de renouvellement n'est donc pas de 1% mais plutôt 1 pour 1000, par conséquent impossible de tabler sur la rotation du parc pour faire des économies d'énergie via l'efficacité énergétique des constructions neuves

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 ?

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Le parc automobile rencontre le même phénomène paradoxal

Comparaison de 2 voitures faiblement consommatrices d'essence à 60 ans d'intervalle :

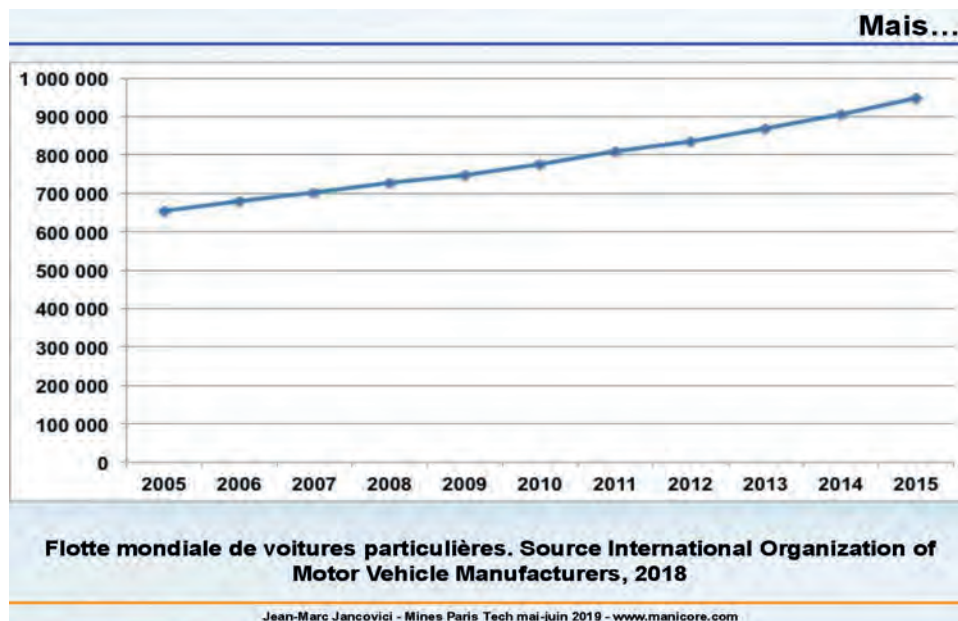
- plus grande efficacité énergétique obtenue par l'innovation technologique (moins de carburant consommé, par exemple 2 fois moins de carburant consommé par kg de masse du véhicule)
- pourtant la consommation des véhicules d'hier et d'aujourd'hui n'a pas varié : 5 litres aux 100 km

On a augmenté la performance de la voiture à consommation constante. On ne s'est pas soucié de la baisse réelle de la consommation d'énergie (possibilité technique aujourd'hui de construire des voitures consommant 2 litres / 100km : 500 kg, vitesse plafonnée à 90km/h ... soit la 2cv d'hier qui aurait bénéficié des innovations technologiques avec l'optique de réduction de consommation)

Même phénomène que pour les bâtiments :

- approximativement la même quantité d'énergie consommée à 60 ans d'écart
- mais augmentation de l'espace habitable et de l'équipement / confort
- qui annule le gain potentiel d'économie d'énergie fourni par l'innovation technologique

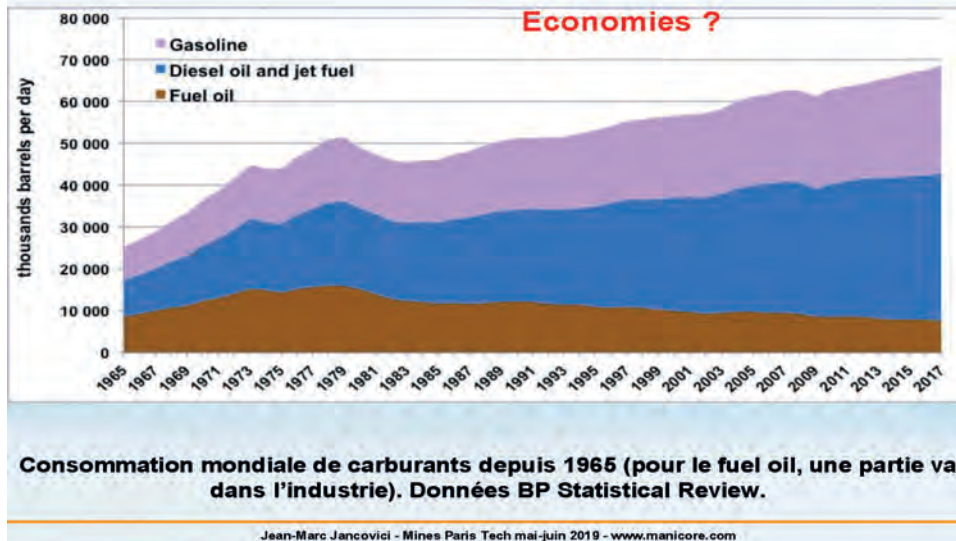
Si elle n'est pas "fléchée" vers une réduction effective de la consommation d'énergie, les innovations technologiques débouchent sur un accroissement des performances avec une consommation constante voire croissante.



Augmentation du parc de voitures particulières dans le monde :

- 2005 : 650 millions de voitures
- 2015 : 950 millions de voitures
- presque 50% de hausse en 10 ans

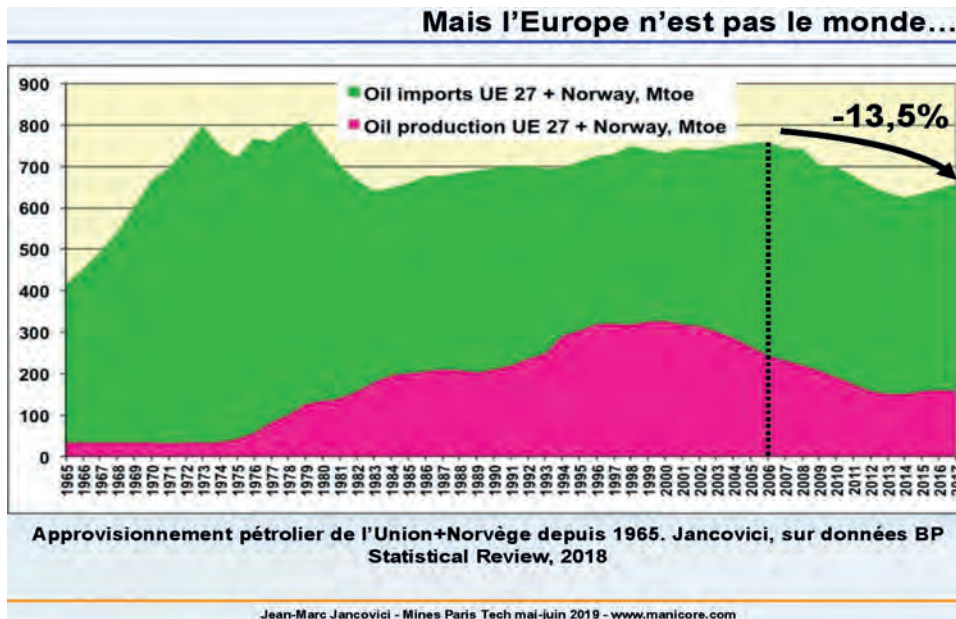
En voiture, tout le monde !



Consommation de carburant dans le monde augmente (pour le moment) :

- 1965 : 25 000 barils / jour
- 2017 : 70 000 barils / jour
- multiplié par 3

Aucune économie constatée au niveau mondial.



Pas d'économie ... sauf en Europe où l'approvisionnement en pétrole est sous contrainte (impossibilité d'importer davantage ou de produire plus) et les économies de carburant y sont forcées.

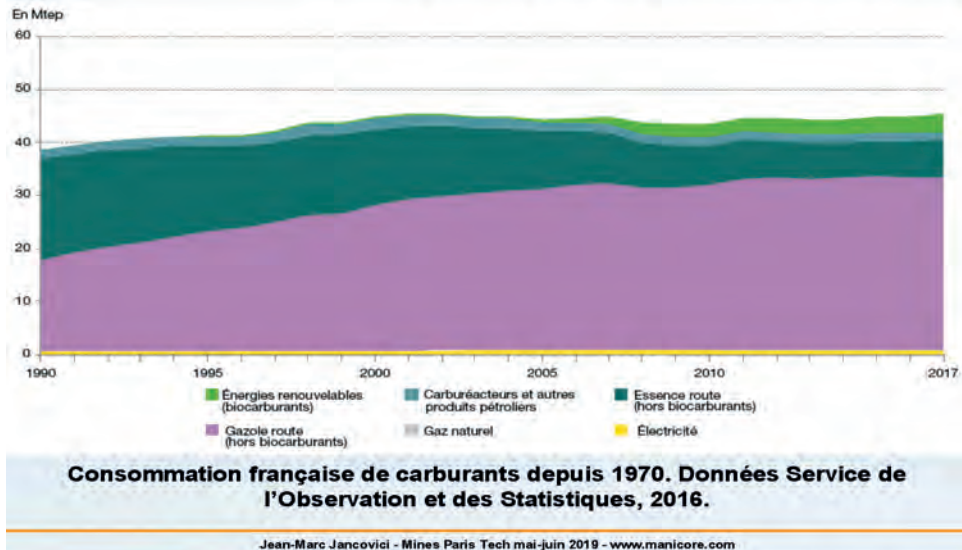
Les Européens sont déjà des "pauvres" du pétrole :

- baisse à partir de 2006 de la consommation de carburant
- 2006 à 2017, baisse de 13,5% de la consommation

Effet d'optique de la remontée depuis 2014, concomitance de deux évolutions :

- mise en œuvre de projets en Mer du Nord pour mieux extraire le fond des puits
- approvisionnement en pétrole de schiste (alors rentable du fait d'une augmentation du prix élevé du bar- il) fait augmenter l'approvisionnement mondial

Et nous autres gaulois sommes européens

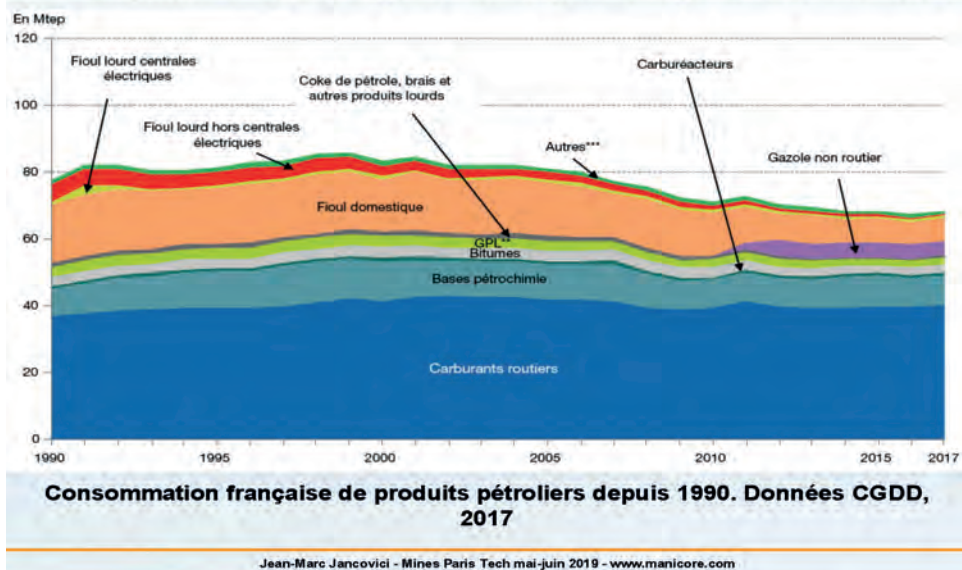


Evolution sur 27 ans de la consommation de carburants en France.

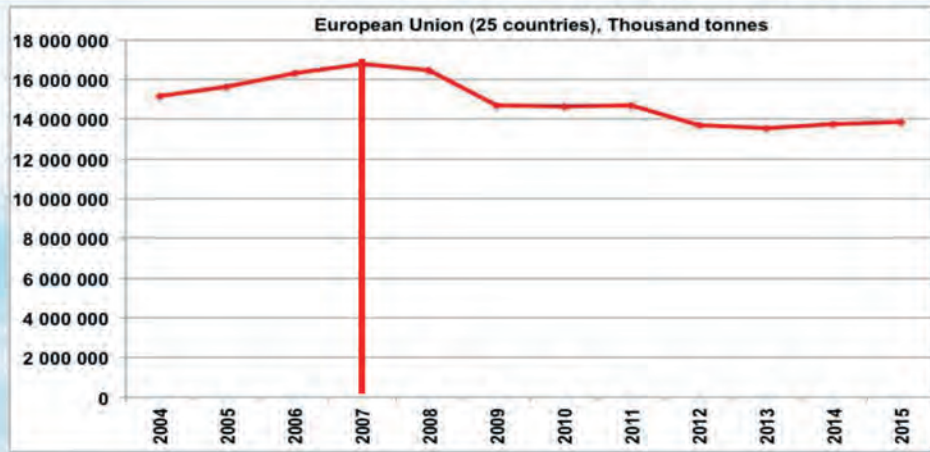
- un maximum atteint au début des années 2000
- depuis la consommation est stable

La consommation "se tasse" sous la contrainte : ce n'est ni du fait d'une plus grande efficacité ni du fait d'une sobriété souhaitée. C'est un problème d'approvisionnement.

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



Moins de pétrole, moins de camions



Tonnes chargées en Europe depuis 2004. Données Eurostat

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Moins de pétrole a pour conséquence moins de trafic marchandise via les camions.

- maximum atteint en 2007, 17 millions de tonnes
- aujourd'hui autour de 14 millions de tonnes

Autres maximums atteints en 2007 :

- la production industrielle européenne
- la construction

En Europe des économies obligées sont constatées depuis 2007 en observant les flux physiques de la production.

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

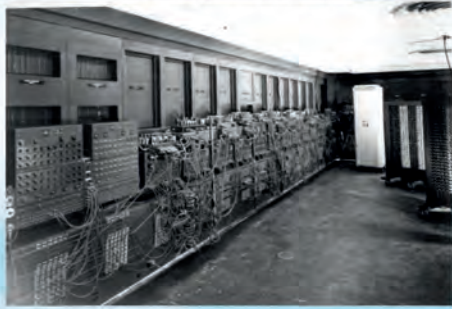
Economies !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Exemple de l'électroménager.

- 1950 : volume 100 litres / consommation 400 kWh/an
- 2010 : capacité triplée dont 1/3 en compartiment surgelé / consommation 320 kWh / an
- 2 à 4 fois moins d'électricité nécessaire pour refroidir 1 litre.
- par rapport à 1970, cela signifie 4 fois moins d'électricité consommée par réfrigérateur, une réelle économie

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

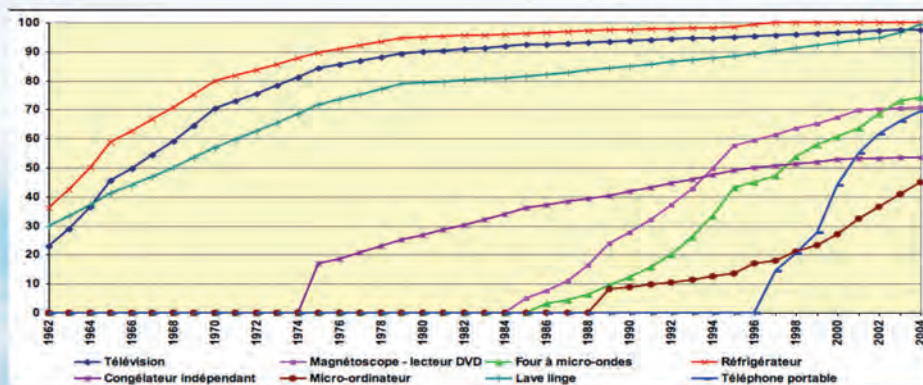
Economies !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

L'efficacité énergétique des ordinateurs est phénoménale.

Les ordinateurs portables d'aujourd'hui sont plus puissants que les supercalculateurs de la mission Apollo.

Mais...

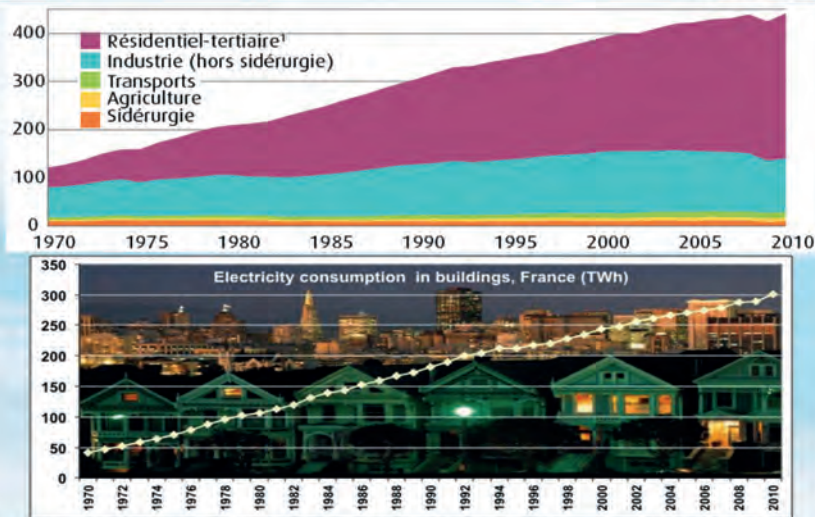


Evolution du taux d'équipement des ménages français de 1962 à 2004. Source : INSEE, 2010

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Mais pas d'économie d'énergie véritable du fait de l'explosion du taux d'équipement des ménages en électroménager (réfrigérateurs, lave-linge, télévision, four à micro-ondes, magnétoscopes / lecteurs DVD, téléphones portables, congélateurs, micro-ordinateurs, ...)

Economies ?



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

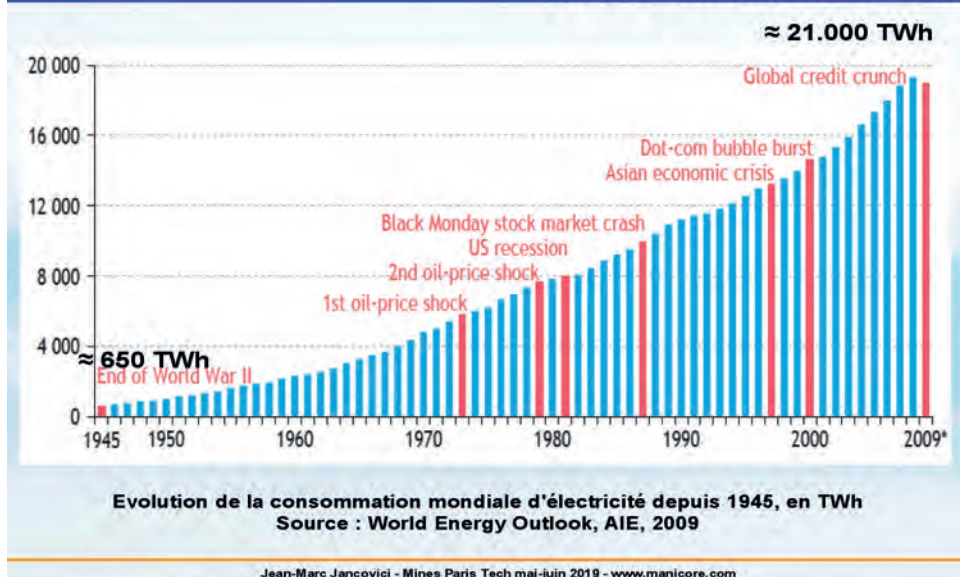
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Cet équipement des ménages en électroménagers divers se constate sur l'évolution de la consommation d'électricité utilisée dans les bâtiments.

En France, le résidentiel-tertiaire en quarante ans est responsable de l'augmentation de la consommation d'électricité (et ce n'est pas le chauffage mais tous les appareils électriques qui équipent les logements).

Même si tous ces équipements sont bien plus efficaces sur le plan énergétique qu'il y a 50 ans (quand ils existaient), leur diffusion massive dans la population aboutit en valeur absolue à une augmentation sensible de la consommation d'électricité.

Plus d'électrons pour tous



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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

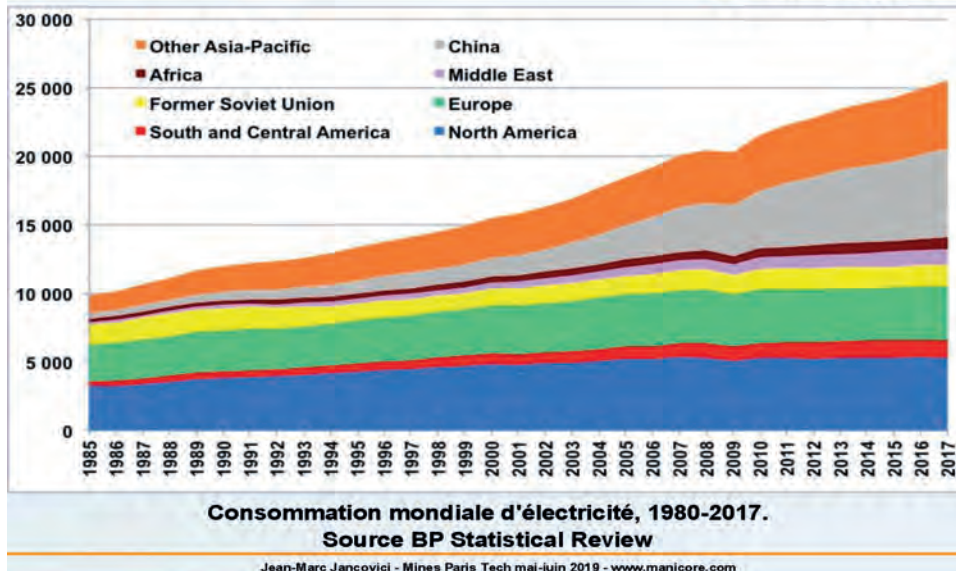
Evolution de la consommation d'électricité dans le monde depuis 1945

- de 650 tWh en 1945 à 21000 tWh en 2009 (à titre de comparaison la production électrique de la France

aujourd'hui est de 550 tWh, la terre entière en 1945 consommait à peine plus d'électricité que la France aujourd'hui)

- l'électricité pour tous est l'évolution majeure de la seconde moitié du XXe siècle

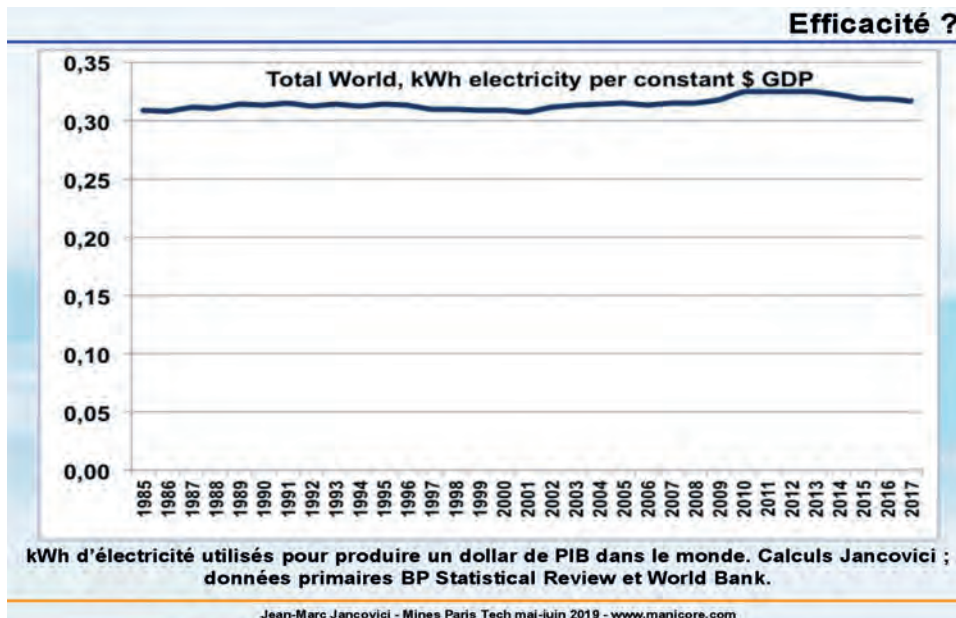
Et encore plus !



Zoom sur la période 1980 / 2017

- essor de la Chine
- et de la zone Asie Pacifique

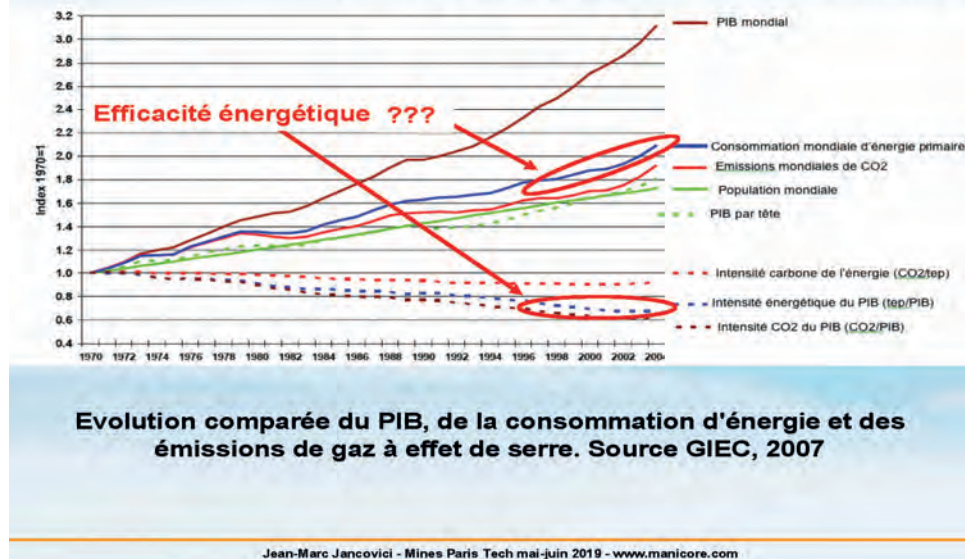
Efficacité ?



L'électricité est une énergie finale qui est particulièrement difficile à faire baisser par unité de PIB.

La quantité d'électricité qui est utilisée dans le monde (moyenne mondiale) par \$ de valeur ajoutée / de PIB La valeur est quasi-constante : aucun gain d'efficacité électrique par \$ de PIB sur les 30 dernières années.

Moins d'énergie, c'est quoi exactement ?



A propos des innovations technologiques.

Il convient de faire très attention lorsqu'il s'agit d'économies d'énergie à ne pas confondre :

- l'efficacité unitaire (intensité énergétique du PIB, intensité CO₂ du PIB), c'est à dire combien d'efficacité est gagnée par appareil ou par usage
- l'efficacité globale, la capacité à faire baisser globalement la consommation d'énergie à partir du gain d'efficacité unitaire

En permanence, depuis que l'on réalise des statistiques :

- l'efficacité unitaire s'améliore (doucement sur les 50 dernières années)
- en même temps qu'une quantité globale utilisée augmente

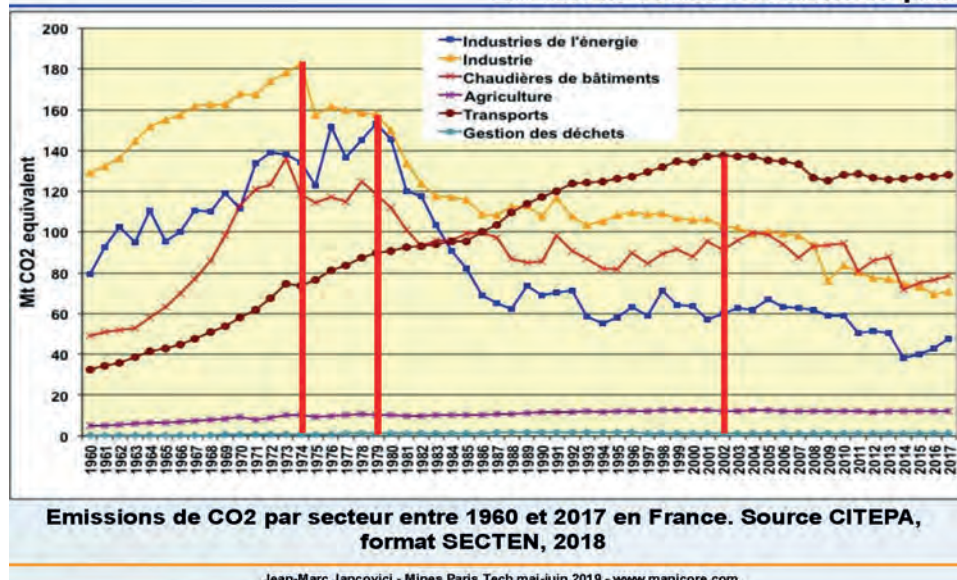
Si on se place soit du point de vue de l'atmosphère, soit des stocks de combustibles fossiles, ce qui compte n'est pas l'efficacité par appareil mais les émissions et les extractions. Ce qui doit être baissé ce sont les émissions totales / la consommation totale des combustibles fossiles.

Jusqu'à présent, et à quelques exceptions près, tout ce qui a été gagné en efficacité unitaire a toujours été plus que compensé par une multiplication / une extension des usages.

Compter sur les gains d'efficacité sans réglementer les usages ne fonctionnera jamais.

Chapitre 30 - La variable prix à l'épreuve du temps

En fait la vérité est dans le prix



La contrainte est la seule manière efficace de faire baisser les émissions de CO2.

Les émissions de CO2 de la France découpées en 6 secteurs :

- tous les secteurs augmentent jusqu'aux chocs pétroliers (forte croissance de l'économie du fait de la manne d'énergie elle-même croissante)
- brusque contrainte prix en 1973 sur le pétrole.

2 secteurs réagissent très rapidement :

- les émissions de l'industrie chutent immédiatement (rationalité économique / exigence de faire des économies d'énergie bien plus élevée dans le monde économique que dans les ménages) et le 2nd choc accélère encore le processus
- les émissions de l'industrie de l'énergie (raffineries et centrales électriques) réagissent très fortement après le second choc pétrolier. Les raffineries ont moins à raffiner donc émettent moins et parallèlement se met en route le programme nucléaire français.

1 secteur réagit également à la baisse (de manière moins brusque) : les chaudières de bâtiment. Avant les chocs pétroliers, la norme était l'installation de chaudières à fioul : après 1973 on passe aux radiateurs électriques et aux chaudières à gaz partout.

1 secteur paraît insensible aux 2 chocs pétroliers, continuant à émettre de plus en plus : les transports. L'explication essentielle est les transports concernent essentiellement des individus au volant de leur voiture et dépourvus d'une rationalité économique suffisante pour limiter leur consommation proportionnellement à l'augmentation du prix. D'autant que

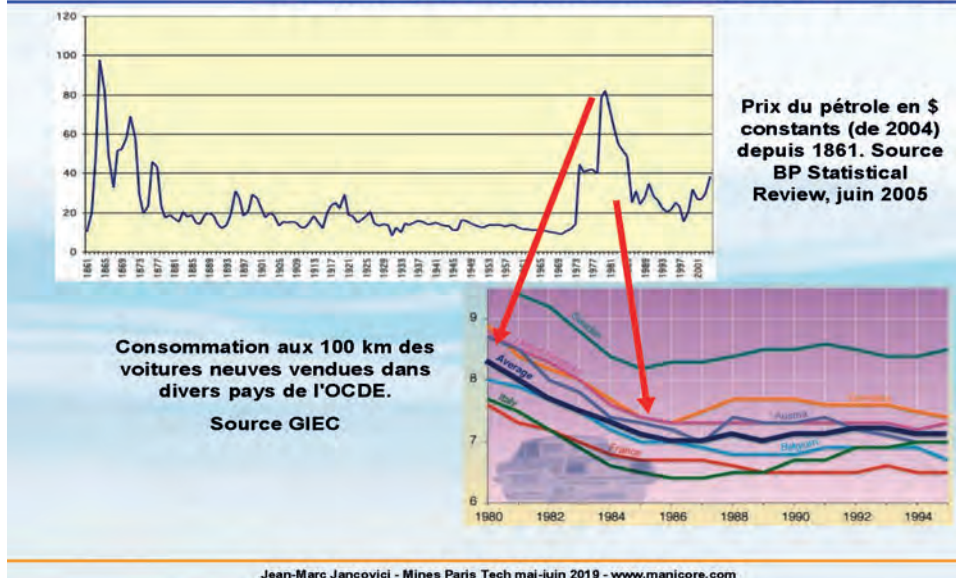
- cette augmentation de prix a été transitoire
- que les modes de vie ont changé (croissance du mode de vie urbain et des couronnes péri-urbaines)

S'agissant des transport, la contrainte prix n'ayant pas suffi, il faudra attendre la contrainte physique sur l'approvisionnement en pétrole en Europe, au début des années 2000, pour que les émissions de CO2 des voitures et camions baissent.

La contrainte a fonctionné durant les 40 dernières années :

- le prix (chocs pétroliers)
- la réglementation thermique associée pour faire des économies d'énergie
- un approvisionnement limité en pétrole, contrainte physique

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



Zoom sur les transports

Le secteur des transports n'a pas été totalement insensible à la contrainte prix consécutive aux chocs pétroliers. En regardant en détail, on s'aperçoit que cette contrainte a agit mais qu'elle a été de trop courte durée pour entraîner de véritables effets visibles sur les émissions de CO₂.

La mise en parallèle

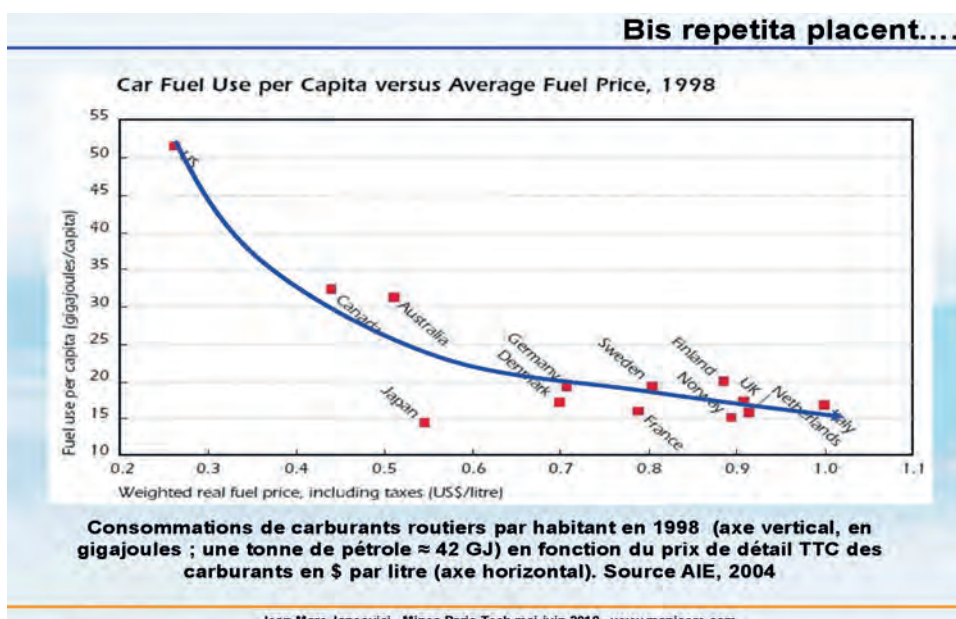
- de la courbe des prix du pétrole
- et de la consommation aux 100km des véhicules neufs vendus dans l'année

La baisse de la consommation s'observe au début des années 80 :

- de 1979 à 1985, alors que le prix du carburant est très élevé, dans tous les pays de l'OCDE, les consommateurs achètent des véhicules moins consommateurs d'essence
- après 1985, lorsque se produit le contre-choc pétrolier et que les prix se stabilisent, les achats "vertueux" des consommateurs de l'OCDE prennent fin. Les véhicules achetés sont aussi polluant que ceux des années précédentes.

Evolution du parc automobile lié à l'évolution des villes :

- En 1974, le parc automobile est la moitié de ce qu'il est aujourd'hui. Il y a alors beaucoup moins de personnes habitant dans les couronnes péri-urbaines et qui sont tributaires de la voiture pour se rendre au travail.
- Forte dépendance à la voiture qui explique le mouvement des gilets jaunes, qui n'était pas advenu lors des chocs pétroliers.



Quantité de carburant consommé dans différents pays

- par personne et par an

- en fonction du prix du carburant à la pompe
- en 1998, c'est-à-dire à un moment où les prix du pétrole sont relativement bas (donc pilotés par la politique fiscale du pays)

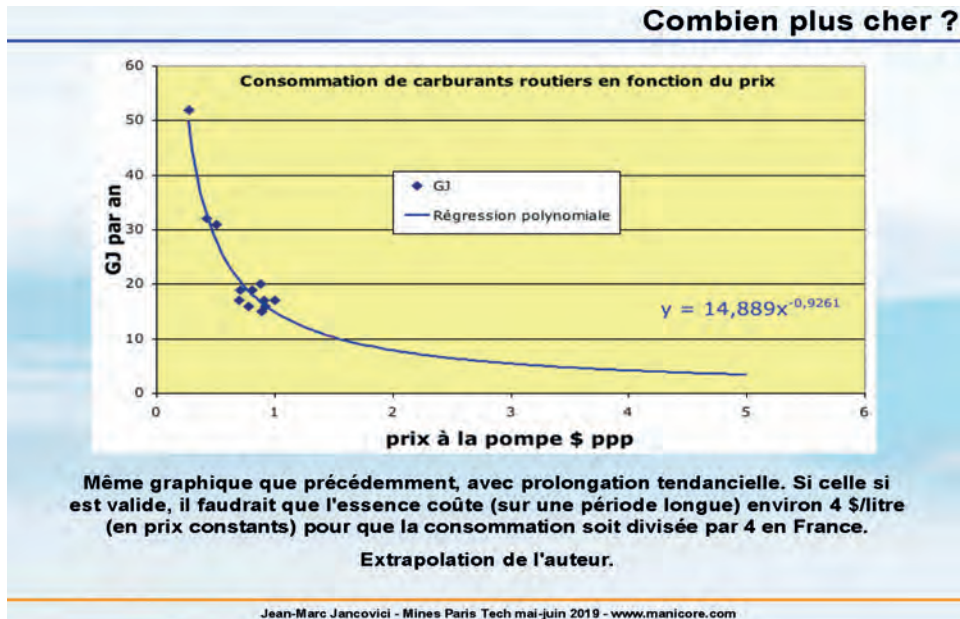
On observe que :

- plus la politique fiscale a consisté à taxer les carburants
- et moins forte est la consommation de carburant

Le système s'adapte sur le moyen terme :

- si pendant une longue période le prix des carburants sont élevés,
- alors les constructeurs mettent au point de petites voitures économes (dès le départ en Europe, continent importateur les constructeurs ont construits des modèles de dimensions plus réduite que leurs homologues américains)

Pour qu'un tel système vertueux se mette en place il faut laisser le temps à la population de s'ajuster / de renouveler sa voiture (marché des occasions).



- Pour que le prix agisse réellement sur la consommation (= taxe carbone), par exemple diviser la quantité de carburant par 4 (GJ),
- il faudrait multiplier le prix du carburant par 4
 - passer donc à 6 € le litre

Mettre en oeuvre une telle augmentation n'est pas possible à bref délais. Sachant qu'il existe une autre manière de parvenir à faire baisser la consommation de carburant et de manière beaucoup plus rapide : réglementer.

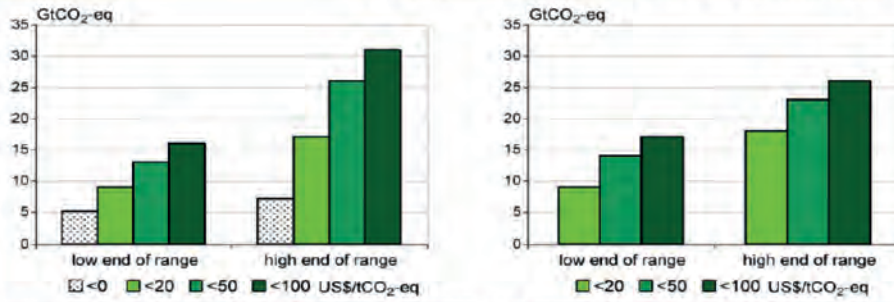
Exemple

- interdire dans 5 ans aux constructeurs de construire des voitures consommant plus de 2 litres pour 100 km
- dans ce cas le parc français voit sa consommation de carburant diminuer par 3

Des mesures d'ajustements à mettre en place :

- il y aura une dépréciation inévitable et très forte des voitures d'occasion,
- des primes à la casse à prévoir pour sortir du parc automobile ces véhicules qui consomment plus de 2 litres

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.

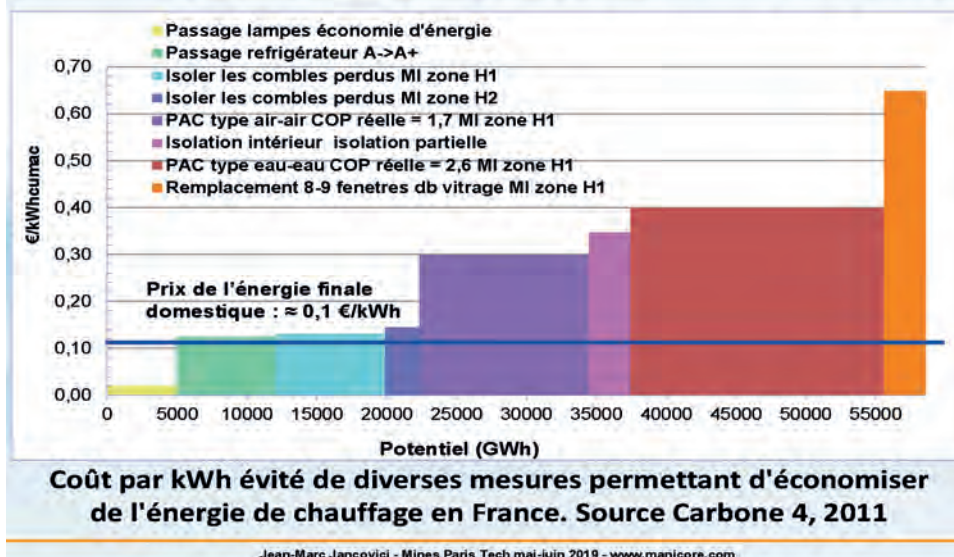
NB : les émissions tendanciellees en 2030 sont comprises entre 50 et 80 Gt CO₂-equ.

Source : GIEC, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Non traité

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Economies d'énergie de chauffage en France

Le prix peut inciter les individus à moins consommer d'énergie. Dans le domaine du chauffage / de l'isolation des bâtiments, cela s'avère insuffisant.

Coût au kWh évité de diverses actions pour économiser de l'énergie :

- lampes à économie d'énergie : coût = 0,010 € / kWh pour un gisement de 5000 gWh
- passage du réfrigérateur A à A+ = 0,11 € / kWh pour un gisement de 7000 gWh
- isolation des combles perdus MI zone H1 = 0,12 € / kWh pour un gisement de 8000 gWh
- isolation des combles perdus MI zone H2 = 0,13 € / kWh pour un gisement de 2000 gWh

...

L'énergie finale facturée aux ménages aujourd'hui : 0,1 €/kWh

Pour que le signal prix soit efficace il faudrait que l'énergie finale facturée aux ménages soit multipliée par 4. La solution de la multiplication des prix peut être mixée avec une réglementation contraignante. Cela revient à imposer des actions aux propriétaires (sous peine d'un bien invendable, sous peine d'augmentation des impôts fonciers, ...)

Le signal prix est une option mais pas la seule.

Un prix suppose quelqu'un qui paye...

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Plusieurs réalités derrière la notion de "prix du CO₂"

Dans le système européen, le prix du CO₂ peut désigner une des grandeurs suivantes :

- l'achat d'un quota aux enchères à l'Etat
- ou le paiement d'une taxe ou d'un droit de douane à l'Etat.

Quota : une autorisation administrative d'émettre qui peut être achetée aux enchères. Exemple d'une cimenterie qui

- a le droit d'émettre 1 million de tonnes de CO₂ l'année 1, 950 000 l'année 2, 900 000 l'année 3 ...
- elle achète ces droits d'émissions aux enchères à l'Etat ou bien elle les achète de gré à gré sur un marché à une autre entreprise

Exemple la taxe carbone en France représente le paiement d'une taxe, un prix fiscal du CO₂ :

- dans 1 litre de carburant acheté il y a 3 kg de CO₂
- avec un prix du CO₂ fixé à 30 € / t, il faut payer 9 cts de taxe

La réglementation peut en outre imposer la diminution d'émission de CO₂. Dans ce cas, le coût du CO₂ est un coût d'ajustement, exemple :

- obligation de remplacer les chaudières à fioul lorsqu'elles ne fonctionnent plus (ni achat neuf ni réparation autorisée)
- le coût de l'achat d'une pompe à chaleur = le prix du CO₂

L'argent ne va pas au même endroit...

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

Taxe ou quotas aux enchères : Etat

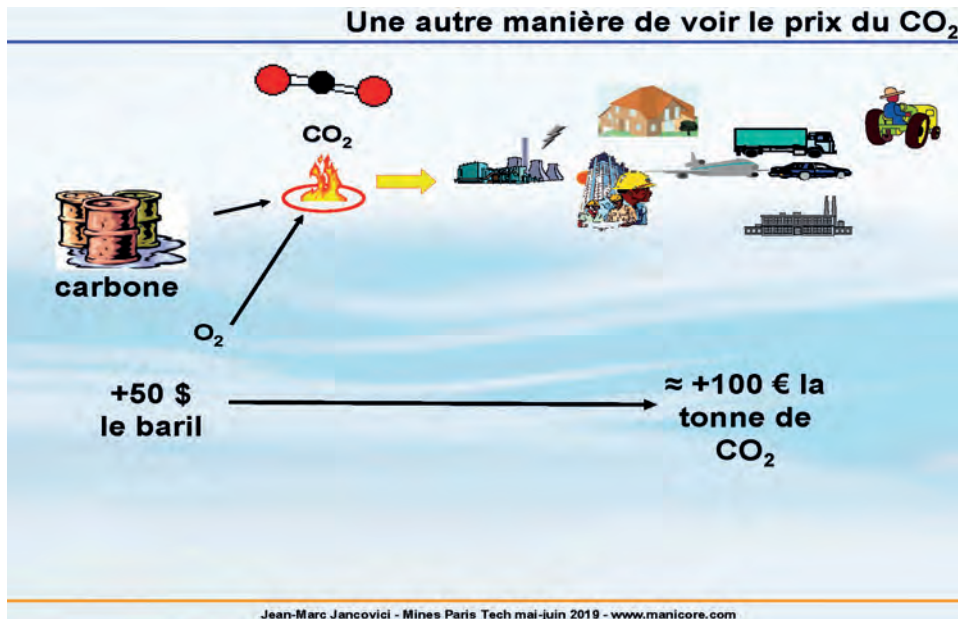
Achat d'un quota négociable sur le « marché du CO₂ » : dans les poches d'un autre assujetti (rien pour l'état).

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

La notion de prix du CO₂ recouvre plusieurs réalités, avec des récipiendaires différents. Les transactions se font avec des acteurs très différents :

- l'Etat qui perçoit l'argent de la taxe carbone,
- l'Etat qui perçoit l'argent d'une enchère de quota d'émission de CO₂,
- l'entreprise qui vend une part de son droit d'émission de CO₂ sur le marché,
- l'artisan qui installe la pompe à chaleur (cas d'un coût d'ajustement imposé par la réglementation)
- le pays de l'Opep qui a augmenté le prix du baril,
- ...



Ordre de grandeur prix du pétrole / taxe carbone

Une augmentation du prix du baril de 50\$ revient à créer une taxe carbone à 100 € / tonne.

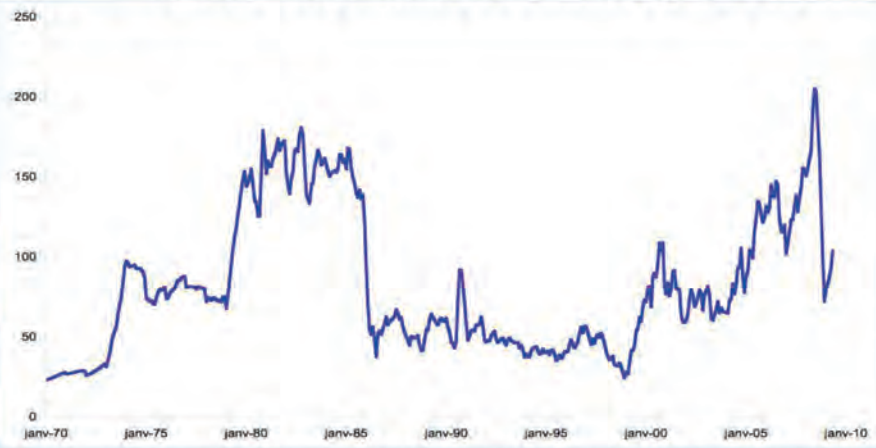
Sachant que le pétrole se raréfie, sur le long terme l'augmentation du prix est inévitable (même si le lien prix / quantité n'est pas direct, pas "d'élasticité de long terme"). Au moment où le prix augmente, cela revient à faire payer à l'automobiliste français une taxe carbone mais au lieu de le payer à l'Etat français, il le paye au pays fournisseur.

Au motif de ne pas vouloir / pouvoir payer une taxe nationale qui diminuerait notre consommation actuelle, on accepte de payer plus tard - lorsque le prix du baril augmente - une taxe aux pays étrangers.

La vraie question est d'aider les individus qui n'ont pas les moyens de payer la taxe carbone nationale à s'organiser autrement :

- augmenter la taxe carbone sans se soucier de la question des transports collectifs c'est évidemment source d'un mécontentement légitime.
- et à l'inverse ne pas augmenter le prix des carburants c'est du court termisme, se condamner à chaque augmentation du baril à financer les pays producteurs de pétrole, de plus en plus cher sur le long terme (déficit de la balance commerciale, baisse du PIB, augmentation du chômage...)

En fait, nous aimons beaucoup payer le carbone !



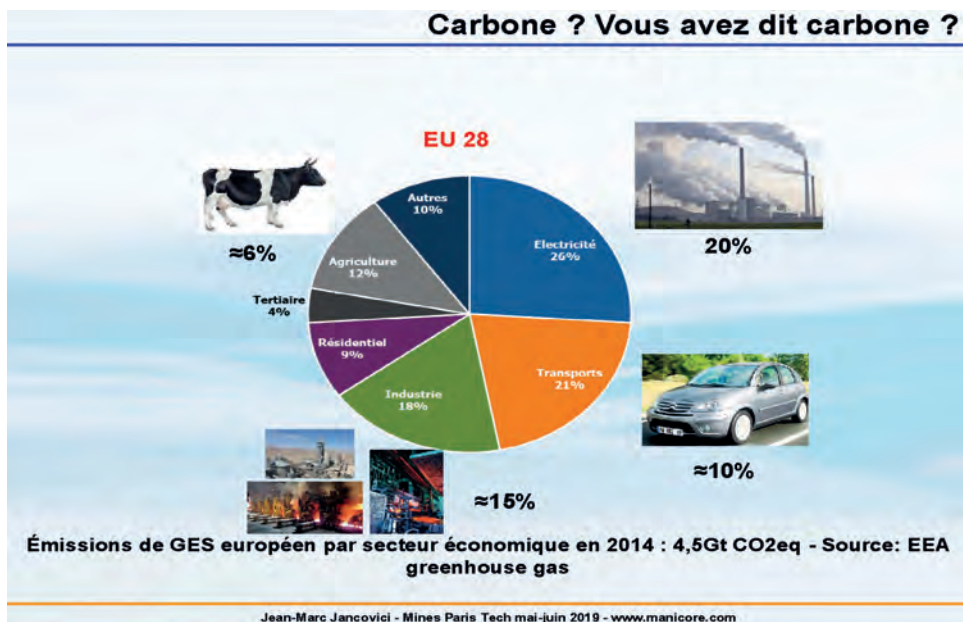
Prix moyen mensuel en € de 2008 d'une quantité de pétrole brut dont la combustion émet 1 t de CO₂. Source Richard Lavergne (CGDD) et Yves Martin, juillet 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Non traité

Chapitre 31 - Cas pratique : décarbonisation de l'UE

Carbone ? Vous avez dit carbone ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com










Décomposition des émissions des GES de l'Union européenne + RU par grands secteurs.

Types d'instruments de régulation qu'il serait possible de mettre en place pour faire des économies d'énergie réduire les émissions de GES. Il en ressort que la taxe carbone est juste un instrument parmi d'autres.

- Secteur de l'industrie de l'électricité : 26%. Les centrales à charbon représentent 20% du total des émissions (même taux dans l'UE que dans le monde)
- Secteur des transports : 21%. Les automobiles représentent 10% des émissions totales
- Secteur industriel : 15%
- Secteur de l'alimentation : 12%. 6 à 8% des émissions totales imputables au cheptel bovin.

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

ÉLECTRICITÉ Fermer toutes les centrales à charbon (réglementation et prix) 	TRANSPORTS Abaisser la consommation maximale des voitures neuves à moins de 2L/100km en 2030 (réglementation + fiscalité) 	TRANSPORTS Remplacer l'autosolisme par bus, covoiturage, vélo, marche, train (réglementation, fiscalité, investissements publics) 
TRANSPORTS Remplacer l'avion par des trains à grande vitesse ou de nuit (réglementation, investissements publics) 	INDUSTRIE Baisser les flux de matériaux primaires produits (réglementation, fiscalité, investissements publics) 	LOGEMENT Décarboner le confort énergétique (réglementation++, fiscalité) 
TERTIAIRE PUBLIC Lancer un grand chantier de rénovation « carbonique » de tous les bâtiments publics 	FILIERE BOIS Développer l'économie de la forêt « durable » : produits en bois, « biosourcés », énergie (réglementation ++, fiscalité) 	ALIMENTATION Diviser par 2 le cheptel, AOC, qualité, haies, baisse des intrants (réglementation, encadrement des prix) 

Mesures “obligatoires” pour réduire les émissions par 3 et qui consistent à s’attaquer aux premiers postes de chaque secteur.

Electricité : fermer toutes les centrales à charbon par une incitation prix (taxe sur l’électricité au charbon, comme au Royaume-Uni) et la réglementation, pour les remplacer par de la fabrication d’électricité décarbonée (nucléaire, éolienne, ...)

Une quasi-taxe sur l’électricité au charbon est déjà en place au Royaume-Uni et fonctionne :

- augmentation du prix des quotas
- fixation d’un prix plancher (impossible de les acquérir sous un certain prix, qui augmente avec le temps)

La voie réglementaire consiste par exemple, comme aux Etats-Unis sous Obama, à interdire la construction de centrale dont les émissions sont supérieures à 1 livre par kWh (or le charbon émet 2 livres, soit 1 kg).

Cela interdit le remplacement du parc des anciennes centrales à charbon.

Encore plus “violent” du point de vue réglementaire :

- sans se poser la question de savoir si les centrales nucléaires allemandes étaient compétitives, elles sont en voie de fermeture.
- il serait donc envisageable de fermer réglementairement les centrales à charbon

Transport :

- mesure réglementaire visant à interdire à la vente tous les véhicules qui consomment plus de x litres au 100 km.
- mesure prix : monter le prix des carburants et attendre que les constructeurs et consommateurs s’adaptent
- mesure fiscale : impôt à la détention, la vignette qui est en réalité un malus annuel. Appliquer la logique de l’impôt foncier appliqué à la voiture : plus le véhicule consomme, plus le propriétaire paye et d’année en année le plancher est relevé. Une manière efficace de faire disparaître du parc les véhicules qui consomment plus de x litres aux 100 km. Des mesures d’aide à l’achat de véhicules économes à prévoir pour que les populations à faible revenu puissent s’adapter à ce type de mesure fiscale.
- mesures réglementaires diverses : rendre difficile / coûteux le parking, ...

Ces mesures, pas exclusivement prix, doivent s'accompagner d'alternatives qui nécessitent de la planification

- mutualisation des moyens de transport, covoiturage, train
- vélo
- marche

La planification est d'ordre réglementaire, elle consiste à donner des règles du jeu aux personnes chargées d'organiser les transports (et non pas directement aux consommateurs finaux) :

- élus locaux
- constructeurs et exploitants d'infrastructures
- ...

Exemple : remplacer les avions par les trains à grande vitesse partout où c'est possible. Exemple de proposition réglementaire (François Ruffin), consistant à interdire les vols en avion nationaux lorsque le train permet d'arriver à destination en moins de 5 heures.

Seule la voie réglementaire est capable d'initier les investissements pour de nouvelles infrastructures ferroviaires. Le prix ne sera jamais incitatif.

Industrie lourde :

- gagner de l'efficacité énergétique dans ce secteur est devenu très très difficile
- la solution consiste donc logiquement à limiter la production de matériaux de base (faire 3 fois moins de ciment, de plastique, d'acier, ...)

Encore une fois, ce ne sont pas les prix qui permettront de baisser la production. Des contraintes réglementaires devront être mises en place.

Logement / bâtiments / Tertiaire public :

- ne pas attendre l'augmentation du prix du fioul pour réduire les émissions
- l'obligation réglementaire est indispensable, il faut obliger les propriétaires à agir / remplacer leurs chaudières par des pompes à chaleur
- typiquement comme au Royaume-Uni, interdiction du remplacement d'une chaudière au fioul d'ici 2022. Au Danemark l'interdiction est plus drastique : interdiction de détenir une chaudière au fioul depuis 2016.

Filière bois : développer des puits de carbone, séquestration des émissions

Sachant qu'il faut de 60 et 100 ans entre le moment où un arbre est planté et le moment où il est coupé, il paraît évident que le prix n'est absolument pas pertinent pour développer les forêts durables. C'est le domaine de la réglementation et de la fiscalité.

Exemple : plus aucune parcelle agricole sans une haie de 2m d'épaisseur avec des arbres de hautes tiges

Alimentation :

- la moitié de l'empreinte carbone d'un Français provient du cheptel bovin
- il faut donc réduire le cheptel bovin pour réduire les émissions

Passer par les prix de marché (par exemple taxer le méthane) augmentera le prix du boeuf pour le consommateur mais le producteur ne gagnera pas plus, au contraire perte de chiffre d'affaire. Résultat : désertification des campagnes.

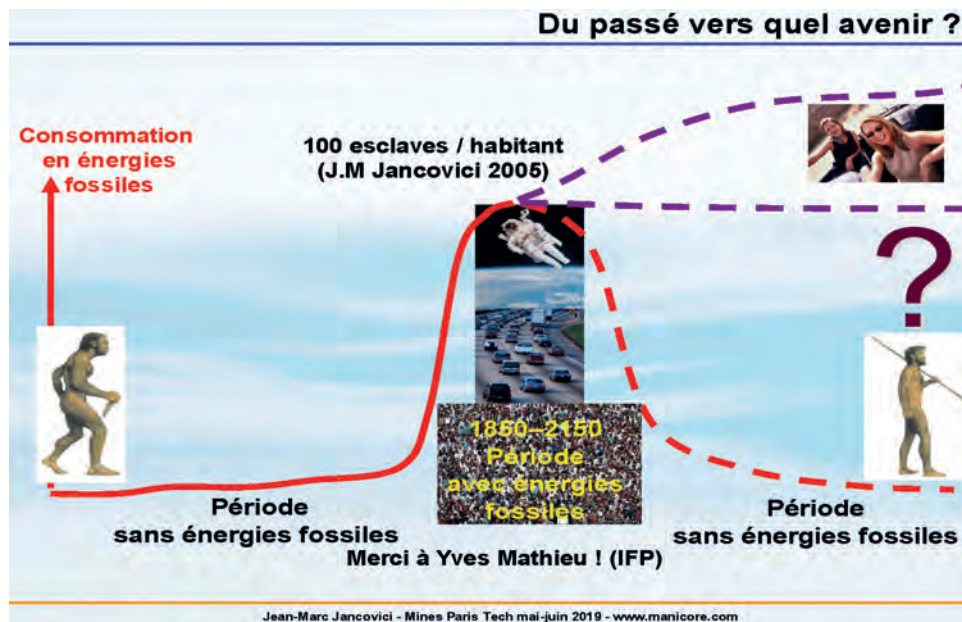
La seule voie est réglementaire :

- encadrement des prix en sortie de ferme
- c'est-à-dire garantir au producteur l'achat du kilo de boeuf 3x plus cher en contrepartie d'une augmentation qualité (AOC, baisse des intrants, haies, ...)
- baisse des ventes en quantité compensé par prix d'achat élevé et garanti

Cas des AOC : typiquement une voie réglementaire, protection de type réglementaire d'une production qui permet de faire monter les prix

Dans un secteur où le changement des pratiques culturelles changent au mieux à chaque génération, il ne faut pas compter sur un signal prix (consistant à taxer la nuisance) pour réduire rapidement les émissions.

En conclusion si on regarde attentivement chaque secteur, le signal prix ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction des émissions à la bonne vitesse (ou alors violentes secousses à anticiper).



Des économies d'énergie drastique à réaliser.

A quoi ressemblera la civilisation dans quelques décennies ? La question reste ouverte toutefois :

- la division de la consommation d'énergie dans le monde par 2 ou 3
- avec le maintien du PIB actuel
- est très peu plausible

Les économies d'énergie vont de toutes manières advenir pour des raisons physiques (fin des stocks d'hydrocarbures notamment). Comment gérer cette contrainte physique ?