

Ce texte reprend, sous une forme rédigée, les éléments de la conférence « 20 Questions sur l'énergie », donnée le 15 Octobre 2011 au château d'Etienville, pour l'association « Cultivons notre jardin ». (www. Etienville.com). J'ai cru bon de préciser divers éléments techniques et économiques, omis lors de la présentation orale, à la fois pour rester assez simple, et ne pas laisser l'auditoire. J'ai en outre approfondi le développement final sur les perspectives énergétiques.

L'énergie est au cœur du problème de l'existence, mais poursuivre une discussion en ce sens nous entrainerait dans un débat théologique. On se bornera donc ici à définir l'énergie comme ce qui permet aux humains de faire face à leur environnement. Manger, avoir chaud, se défendre contre des prédateurs, se reproduire, pouvoir se déplacer loin, ne se conçoivent pas sans disposer de ressources énergétiques, même si nos lointains ancêtres n'avaient pas une conscience claire des limitations de ressource. Ce qui intéresse tout un chacun, aujourd'hui, est fondamentalement la disponibilité et le coût de l'énergie consommée, éventuellement, les nuisances plus ou moins honnêtement médiatisées, et encore moins une pénurie essentielle.

Nous aborderons d'abord l'évolution de la notion d'énergie, pour bien situer quelques éléments techniques indispensables à la compréhension des problèmes que nous connaissons aujourd'hui. Ceux-ci : types d'énergie, ressources et réserves, nuisances, prix, sont ensuite abordés. Enfin, nous laissons une place au futur.

1. Une brève histoire de l'énergie.

1.1 Au commencement était le feu.

L'énergie est au cœur de l'histoire humaine, si l'on veut bien se rappeler que le logement est encore dénommé foyer, et que jadis, les recensements se faisaient en feux : c'est aussi rappeler que c'est le « feu » qui fut longtemps synonyme d'énergie, que sans le feu, le cuit n'aurait pas supplanté le cru, ni le chaud le froid, faisant de la recherche et la conservation du feu un motif permanent de l'histoire, notamment par le conflit entre la forêt, source de feu et du merveilleux matériaux qu'est le bois, le défrichage, source de nourriture, et la ville, source de sécurité et richesses. Le feu permit en outre le développement de deux « technologies » (en utilisant le langage moderne): la poterie, la métallurgie.

1.2 Les premières forces perçues comme telles (en écartant la pierre taillée/arme) furent celles du vent et de l'eau et celles des animaux et des humains. En langage moderne :

- moulin à air et à eau, voiles = couplage électro-magnétisme (sous forme de rayonnement solaire)/gravitation ;
- force animale= électromagnétisme.

Pendant plusieurs millénaires chaleur et force, constituèrent, en matière de « pensées », deux notions indépendantes. L'apparition des machines à vapeur (Newcomen 1712) (réalisation qui, en tant que technologie, impliquait une bonne maîtrise de la métallurgie et de l'usinage) fut le germe réel de la formidable découverte de l'équivalence chaleur/ force, notions unifiées dans la notion de cycle thermodynamique (qui, étymologiquement, contient à la fois force et chaleur), puis explicitées et complétées par les premiers et second principe de cette nouvelle science (Carnot, Clausius), et enfin dans la mesure de l'équivalent mécanique de la calorie (Joule).

1.3 Le 19^{ème} siècle fut celui de l'énergie du feu: emploi de sources de chaleur nouvelles (charbon, pétrole), entraînant les technologies associées, et permettant, en mettant à disposition des hommes des outils (force, chaleur), certes connus, mais avec une puissance sans commune mesure avec ce dont ils disposaient, ce qui permit le développement des transports, et, moins évidemment, celui de l'industrie chimique, dont la sidérurgie inclut une large part (hauts fourneaux).

On peut remarquer ici que si la physique de la force, à partir des travaux de Galilée et Newton donnât lieu à d'importants développements dès le 18^{ème} siècle, en liant énergie et mouvement (équivalence masse pesante et masse inerte, énergie cinétique, quantité de mouvement, moment d'inertie), la compréhension des phénomènes thermiques ne fut vraiment acquise qu'après que, d'une part, une théorie de la matière (atome pourvu d'un noyau et d'un cortège électronique) eut été élaborée, et que, d'autre part, fut introduite la notion d'ordre/désordre, qui a connu récemment des développements fascinants (cf. ordre par dissipation. Prigogine. Prix Nobel 1977).

1.4 Au 20^{ème} siècle apparurent d'autres possibilités énergétiques, liées à une meilleure compréhension de la structure de la matière : la théorie physique commençait à expliquer ce qui se passait dans les réactions chimiques, par l'introduction d'un modèle atomique. Elle allait même plus loin en prédisant de nouvelles sources d'énergie au cœur de la matière (énergie nucléaire) : il s'agit là d'une véritable mutation dans l'histoire de l'énergie, donc aussi dans l'histoire de l'espèce humaine, d'autant plus importante que cette mutation oblige à abandonner les concepts traditionnels de temps (relativité) et de localité (quanta), pour finalement rapprocher masse et énergie.

2. Concrètement, l'énergie.

2.1 Mesurer l'énergie.

Pour tenter de comprendre ce qui se passe, il faut, comme dans toute approche scientifique, mesurer ce dont on parle. Si les physiciens ont développé le concept d'énergie, la vie quotidienne ne connaît que des substances (bois, charbon, pétrole), ou des phénomènes physiques (vent, rayons solaires etc). Il a donc fallu inventer un langage unificateur. En pratique, et parce que cela correspond à la génération de « feu », on a choisi la capacité à chauffer.

Cette convention logique permet de présenter, en tonne d'équivalent pétrole (tep), calculées à partir des pouvoirs calorifiques, le bois, le charbon, le pétrole, le gaz naturel. L'apparition de la génération hydraulique de l'électricité obligeât à une sorte de contorsion intellectuelle, qui transforme l'énergie électrique en tep, en supposant que cette énergie électrique provient d'une centrale thermique censée brûler du pétrole avec un rendement égal au rendement moyen des centrales thermiques existantes, rendement connu, plus ou moins bien, à partir des déclarations des États membres de l'AIE (Agence internationale de l'énergie). On fait de même pour l'énergie nucléaire, pour la géothermie et les éoliennes.

Pour le solaire les contorsions intellectuelles sont encore plus vive, et la transformation des « watt/crêtes » des photopiles en tep, lorsque l'on ne place pas de compteurs, oblige à tenir compte de l'ensoleillement moyen du lieu d'utilisation, ensoleillement qui peut, selon l'emplacement, différer notablement du simple effet de latitude, et en écartant toutes les particularités de l'installation. A cet égard, les procédures de rachat mises en œuvre dans quelques pays ont au moins le mérite de compter ce qui est effectivement produit, mais cette pratique est très minoritaire dans l'océan des photopiles fabriquées, qui est connu : c'est pourquoi on applique aux fabrications des coefficients plus ou moins bien « calés » sur la réalité ! Au plan statistique, cela n'a pas d'importance, pour l'instant au moins, car ce type de sources énergétiques est à peine recensable. Ce qui est important est la quantité de photopiles fabriquées, qui semble croître de 30 à 40%/an: plus il en existera, plus cela sera visible, et plus les statistiques s'amélioreront.

En pratique, 1 tonne d'équivalent pétrole correspond à :

-1 million de kilocalories, 42 gigajoules, 40 millions de Btu, 1,5 tonne d'antracite, 3T de lignite, 12 mégawattheures. 1000 m³ de gaz naturel.

Ces chiffres sont des ordres de grandeur, et les services de statistiques des agences spécialisées tiennent compte des propriétés des substances minérales comme de l'efficacité des centrales électriques, pour établir des séries convenables, ce qui explique que les valeurs soient rectifiées, à partir des premières éditions, pendant plusieurs années. Ce phénomène n'est d'ailleurs pas propre à l'énergie.

2.2 Énergie et activité humaine.

Nous avons, en commençant cet exposé, placé l'énergie au cœur même de l'existence. Mais cette considération philosophique n'exclut pas de rapporter à l'espèce humaine l'emploi des énergies : on utilise bien les consommations par tête, et les consommations nécessaires au PNB (produit national brut), en sachant que cet agrégat est imparfait. Mais aujourd'hui, il n'existe pas de remplaçant utilisable.

Il est intéressant de donner quelques chiffres, pour quelques pays :

- consommations par habitant (en tep par habitant par an) :
USA : 7,3 / Chine : 1,8 / Inde : 0,45 / France : 3,8 / Allemagne : 3,9 / UK : 3,3 / Russie : 4,9.

Ces chiffres sont à rapprocher de la consommation d'énergie pour produire des richesses (en tep pour 1000\$ de PIB) :

USA : 0,16 / Chine : 0,42 / Inde : 0,36 / France : 0,10 / Allemagne : 0,10 / UK: 0,10 / Russie: 0,47.

Les situations sont très diverses, et il faut ici éviter l'erreur des prospectivistes des années 60, qui postulaient que les ratios exemplaires, ceux vers quoi l'humanité tendait, étaient ceux des USA. Chaque pays a son climat, sa densité humaine (qui gouverne les dépenses de transport), ses structures de consommation, sa politique de prix (parfois démagogique: énergie « cadeau ») On notera cependant qu'en règle générale, après le décollage économique, coûteux en énergie, la croissance du PIB est de moins en moins exigeante.

2.3 Le jeu des sources d'énergie.

C'est le domaine le plus débattu publiquement : discours sur les réserves, notion de renouvelable, nucléaire etc. L'examen des historiques des énergies (au sens des sources, ou encore, en termes plus nobles, des énergies primaires) permet diverses remarques, suivant une démarche passant des classiques courbes associant une quantité à une date (chroniques en langage statistique traditionnel) à une représentation différente .

2.3.1 Tendances, fluctuations .

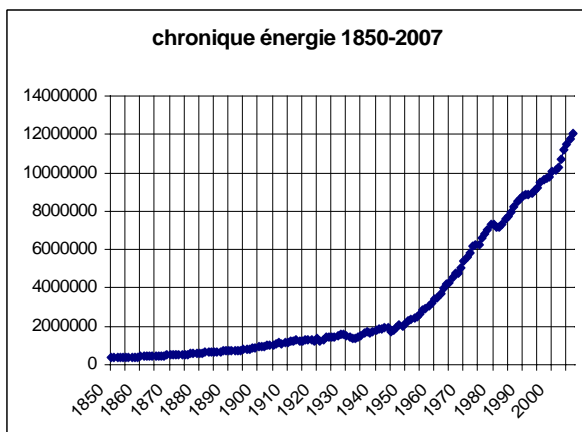


figure 1 : consommation mondiale

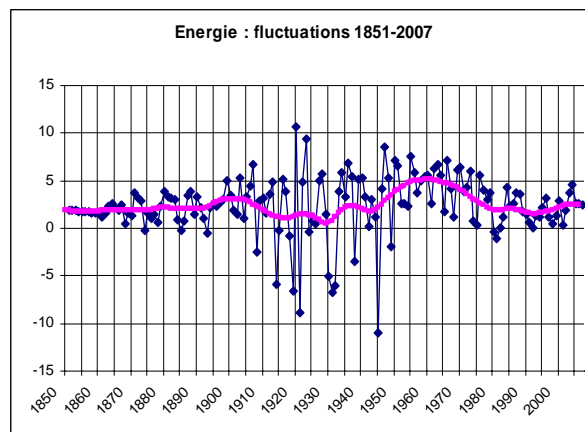


figure 2 : fluctuations de la consommation mondiale.

(Nota : fluctuation = (valeur année n - valeur année n-1) / valeur année n-1, en %. Le traitement statistique fait disparaître les fluctuations aléatoires, au sens gaussien, et fait apparaître la courbe rose)

L'examen de la chronique de la consommation mondiale d'énergie montre un phénomène apparemment monotone (figure 1). Mais si l'on passe aux fluctuations (figure 2) de cette consommation mondiale, on voit apparaître une période très troublée (1914/1952: les deux guerres et l'immédiat après guerre, Corée inclus). Un traitement statistique fait apparaître un paysage classique de grands cycles, séparé par des périodes troublées: on est aujourd'hui dans un tel cas, (cf. travaux de Kondratiev: 1892-1931, certes contestés, qu'il faut surtout regarder en historien).

2.3.2. Comment voir l'ensemble du paysage ?

La présentation de l'ensemble des chroniques (figure 3) montre le poids des énergies carbonées, suivies de la biomasse, du nucléaire et de l'hydraulique, et des « autres », à peine visibles, sauf, ce qui est le cas ici, à utiliser une échelle (logarithmique) qui les mets en évidence.

Il en est de même pour les parts de marché : il faut aussi utiliser le logarithme pour saisir le domaine actuel des renouvelables. (figure 4). Si on observe les parts de marché des différentes énergies, on fait rapidement quelques constats, pas évidents a priori : la biomasse décline de 1850 à 1973, et se stabilise autour de 10% ; le charbon passe par un maximum en 1914, perd des parts de marché jusqu'en 1973 et se stabilise depuis aux alentours de 23%. Quant au pétrole, sa part de marché baisse continuellement depuis 1974, traduisant un repli progressif de la substance vers ses

niches:les carburants, la pétrochimie, le bitume routier.

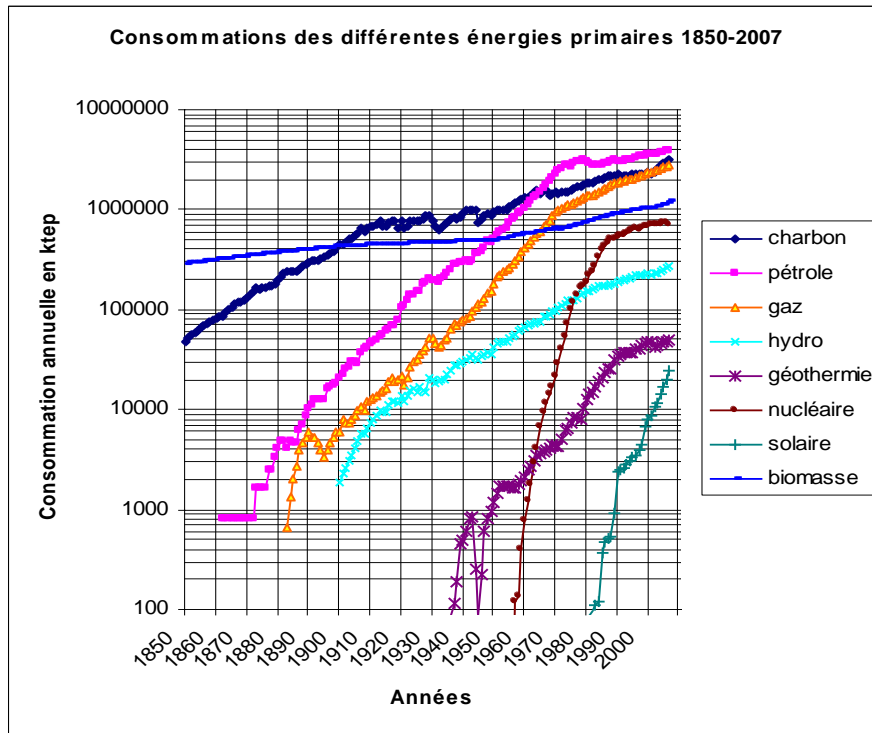


Figure 3 ; consommation des énergies primaires.

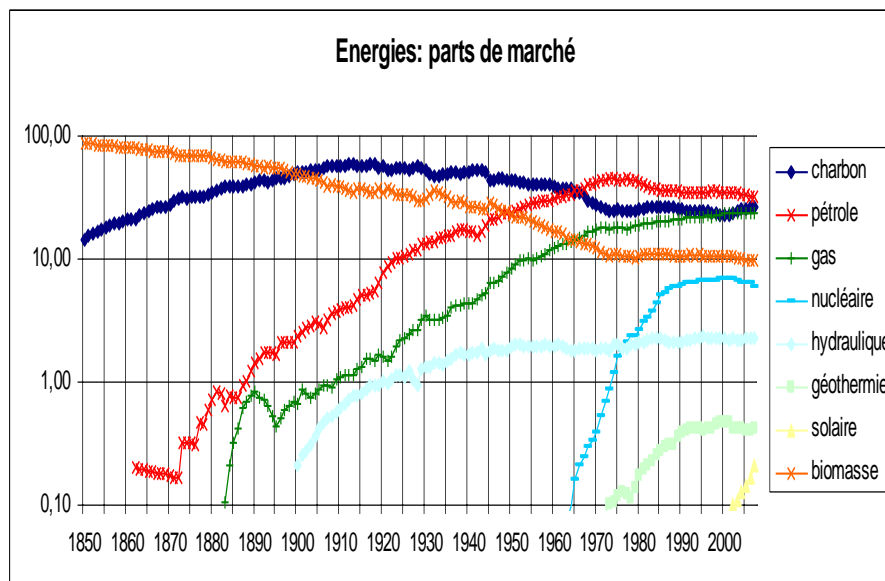


Figure 4 : évolution des parts de marché des énergies primaires.

On constate en outre que le nucléaire et la géothermie stagnent depuis plusieurs années, que l'hydraulique croît à peine. La fourniture est en fait assurée par charbon et gaz naturel.

- le tableau final. En fait le bon modèle consiste à croiser production et parts de marché (figure 5)

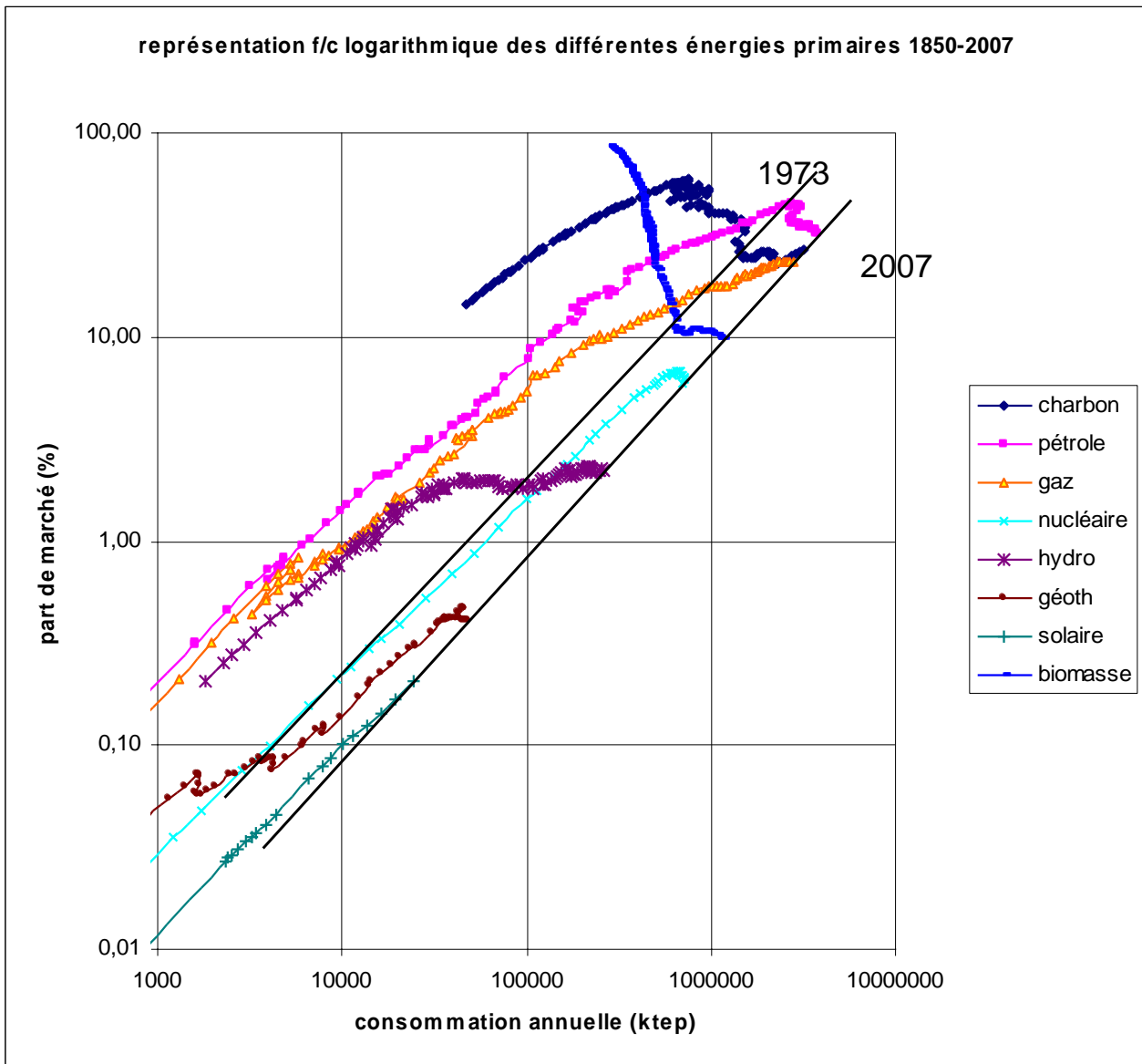


Figure 5 : croisement production (c) parts de marché (f). (Nota: le caractère parallèle des trajectoires, lors de l'apparition des chaque énergie est une conséquence de la représentation f/c : cela se démontre, et traduit le fait que les premières parts de marché sont faciles à gagner. Par ailleurs, à un instant donné, les points sont alignés: on indique les alignements 1973 et 2007).

On fait ainsi apparaître trois domaines: les énergies carbonées (>100000 tep, >10% marché), les énergies lourdes non carbonées (>10000, <100000 tep, >1%, <10% marché), les autres (géothermie, solaire). La biomasse sépare les énergies carbonées et les énergies lourdes non carbonées, ce qui est logique, la biomasse étant carbone-neutre.

Ces trois domaines mettent bien en évidence les difficultés du jeu énergétique: **pour passer d'un domaine à l'autre, il faut multiplier par 10 les productions et les parts de marché: cela demande du temps, des investissements rentables, une conjoncture favorable, c'est à dire une croissance pas trop forte (sinon l'énergie est gaspillée), et un environnement fiscal intelligemment incitatif.**

3. Utiliser l'énergie.

L'étude des sources d'énergie ne suffit pas à bien présenter le problème : si l'équivalent thermique est peu discutable pour présenter un tableau d'ensemble, une discussion mettant en évidence les technologies permettant de passer des énergies « brutes » à l'usage final est indispensable.

On distingue deux étapes: la mise à disposition de l'utilisateur d'une énergie utilisable (la distribution), et l'emploi final que fait l'utilisateur.

3.1 Distribution.

L'énergie utilisable prend diverses formes: électricité, vapeur, gaz, différents produits pétroliers, différents charbons, bois. On sera en présence :

- de réseaux pour le gaz, l'électricité et la vapeur, avec des différences notables : l'électricité se stocke très difficilement, gaz et vapeur étant relativement souples, du fait de leur nature physique . Ceci conduit à des systèmes de distribution très hiérarchisés, appelant des régulations centralisées.
- de capacités de nature diverses (cuves, tas) pour les produits pétroliers, le charbon et le bois. Les réseaux d'oléoducs ne font que relier des stockages, et les stockages roulants (citernes ou vrac sur camions, wagons, bateaux) jouent un rôle important. Le système est naturellement décentralisé, et peu hiérarchisé.

Cette dualité a des conséquences :

- réseaux : partout (presque: on connaît de très rares exceptions), les pouvoirs publics considèrent que plusieurs réseaux, pour une même énergie, ne sauraient coexister au même endroit. **Mais alors, le lien physique entre le fournisseur et le consommateur entraîne une quasi impossibilité de changer de fournisseur. Ce qui a conduit à estimer que le fournisseur ne pouvait être que la collectivité elle-même, ou un opérateur délégué par la collectivité : c'est l'origine de la notion de service public en France, qui conduit à des tarifications « nationales ».** Cette approche à la française est remise en cause au plan européen, ce qui conduit à différencier gestion du réseau et fourniture de substance, avec de difficiles discussions sur les prix « de gros » permettant à des distributeurs non producteurs d'entrer sur le marché. Il convient en outre de se rappeler que la théorie économique des réseaux, qui conduit à des résultats robustes, est politiquement difficile à appliquer, sans même évoquer les difficultés comptables, car elle conduit à facturer la livraison au coût marginal de raccordement, qui peut parfois être très élevé, et conduit en tous cas à des inégalités incompréhensibles par le consommateur (sans même évoquer, en France , la valeur constitutionnelle de l'égalité de facturation des services publics.
- cas particulier central de l'électricité. Par ses propriétés (éclairage, force, fréquence, apparente simplicité d'emploi) cette forme d'énergie finale joue un rôle central.

Jusqu'à présent, la fabrication de l'électricité par la voie thermique ou hydraulique obéit au schéma industriel classique, qui veut que le prix de revient diminue quand la taille augmente, ce qui conduit à des centrales (à gaz, charbon, fioul, nucléaire) ou des barrages de plus en plus gros. A ce

schéma se surimpose une caractéristique spécifique à l'électricité, qui fait que les déperditions d'énergies liées à son transport soient d'autant plus faibles que la tension (le voltage) est élevée : cela conduit à des réseaux très hiérarchisés, efficaces et assez bien acceptés aujourd'hui, alors qu'apparaît une difficulté liée aux sources aléatoires que sont les éoliennes et les photopiles. Cela conduira 1) à une évolution du réseau électrique vers plus d'intelligence, ou encore d'adaptabilité, qui ne peut être que lente et chère, eu égard aux capitaux investis et à investir, 2) à une nouvelle politique de centrales électriques, de toutes natures, car le problème base/pointe demeurera 3) et finalement par des prix plus élevés.

- capacités : ce mode de distribution laisse à l'évidence beaucoup plus de facilités quant au choix du fournisseur. Ainsi, par exemple, s'agissant des carburants, le consommateur fait pleinement usage de sa liberté. Mais le consommateur est aussi un stockeur (cuves domestiques, réservoirs de voiture) ce qui conduit à des immobilisations non négligeables, parfois d'ailleurs prises en compte par le fournisseur, notamment pour le chauffage.

3.2. Emplois.

L'utilisateur décide en final de consommer de l'énergie : éclairer, mettre en route un chauffage, démarrer une fabrication, « prendre sa voiture » etc. Mais ces décisions, alors qu'il s'agit objectivement d'un achat, ne sont pas vraiment accompagnées de termes clairs de quantité et de coût, à la différence des achats habituels :

- pour une énergie à réseau, il est pertinent, quoique pas évident, que l'on paie le fait de disposer d'un réseau, indépendamment du coût de l'énergie distribuée : cela conduit à une tarification « binôme », séparant un coût d'abonnement (la disponibilité du réseau) du service rendu (électricité, gas, vapeur). On doit insister ici sur le cas particulier de l'électricité, qui est totalement intégrée dans nos habitudes de consommations, et qui présente des caractéristiques singulières : sa propagation quasi instantanée, la très grande difficulté de son stockage (gas et vapeur se propagent lentement, et on peut jouer sur la pression du réseau pour stocker). Pour percevoir les quantités, il faut un compteur, pouvoir et savoir le lire, et, pour connaître le coût de la consommation, savoir convertir la facture quantité en facture monnaie ! La tendance actuelle, compréhensible du point de vue du distributeur, compte tenu des coûts de collecte d'information (lecture des compteurs) est au contraire de lisser les consommations par projection des moyennes antérieures, et de régulariser une fois par an, ce qui revient à prendre l'année comme base de temps de consommation.

En bref, le système actuel des énergies à réseau revient objectivement à masquer la consommation instantanée ! La mise en place de compteurs dits « intelligents » vise, entre autre, à abaisser les coûts de collecte de l'information, à mieux renseigner le consommateur (sous réserve d'une information clairement présentée) et à permettre des tarifications adaptées aux heures de consommation.

- pour les énergies à capacité, on perçoit bien les quantités et les coûts. (*Encore faut-il comprendre que dans le cas des carburants, principale énergie à capacité, si les quantités sont bien connues grâce aux compteurs du distributeur et à celui de la voiture, on paye, en acquittant sa facture, le péage du réseau routier universel, le deuxième réseau (les autoroutes) faisant l'objet d'un péage explicite, la tarification étant d'ailleurs, sans le dire, binôme (vignette+TIPP)*) ! Un problème apparaîtra si les voitures électriques prennent une part importante du marché, car elles emprunteront le réseau routier, et les dispenser d'une tarification adéquate à l'usage de ce réseau équivaldrait à une subvention permanente !

3.4 A quoi sert l'énergie ?

D'abord à se chauffer, à cuire les aliments, à transformer des matières, ensuite à transporter des personnes et des matières, et, très récemment, à communiquer massivement . (ce qui est très consommateur d'électricité : les « computers farms », au cœur du « web » sont avides de courant électrique).

3.4.1. Les catégories d'usage.

La dispersion des structures de consommations selon les pays fait que la répartition mondiale des emplois d'énergie est très variable, mais on peut retenir, **en ordre de grandeur** :

- consommations résidentielles :11%
- consommations industrielles : 24%
- activités commerciales:5%
- transports :10%
- **pertes 50% !**

Les pertes sont reliées aux mauvais rendements de la transformation travail/chaleur (incontournable), mais aussi aux pertes des réseaux de transports d'énergie, trop souvent de mauvaise qualité , aux gaspillages etc. Il s'agit là de moyennes mondiales, contenant quelques paradoxes, comme le fait qu'un pays qui ne comprendrait que des pêcheurs à la ligne se chauffant et cuisant leur aliment dans une grotte n'aurait, au sens statistique, aucune perte d'énergie: les meilleurs pays mondiaux sont ainsi l'Éthiopie et la Corée du Nord !!

Il ne faut donc pas gloser à tort et à travers:**la pénurie d'énergie est un faux problème.** Le réalisme imposerait de combattre d'abord les pertes, pas seulement par de pieuses intentions, mais en investissant dans la distribution d'énergie, et aussi en affrontant l'impopularité de tarifications dissuasives, ce qui n'implique pas les restrictions pour les besoins élémentaires. (cf. la tarification de l'eau). On se rappellera simplement que dans certains pays, il est difficile de faire payer l'électricité, même chez des consommateurs solvables.

3.4.2 Les nuisances.

Tous les combustibles, depuis toujours, conduisent à du gaz carbonique. La géologie étale d'ailleurs sous nos yeux, dans de belles falaises normandes ou alpines (pour ne parler que de la France), des milliards de tonnes de gaz carbonique, qui est bien venu de quelque part !Le nucléaire, dans sa technologie actuelle, produit des déchets qui inquiètent les opinions publiques. Hydraulique, éolien, géothermie, photovoltaïque, sont a priori « propres », mais leur mise en œuvre n'est pas neutre (béton, acier, plastiques, silicium fondu, surface au sol).

Il n'est pas si facile, comme, on va le montrer simplement, de réduire l'émission de gaz carbonique, considéré comme la principale nuisance par les climatologues :

- aujourd'hui, la part de marché des énergies combustibles (pétrole et condensats, gas, charbon) est de 80%, la biomasse (qui inclut les ordures ménagères, ce qui n'est pas écologiquement identique au bois) 10%, les autres 10% dont nucléaire et hydraulique 7% : cela laisse 3% aux divers solaires, à la géothermie, etc.

- la consommation mondiale d'énergie vaut, en ordre de grandeur, 10 Gtep, donc le % de part de marché égale 100 millions de tep.

- réduire de 20% l'émission de CO2 en 10 ans revient à faire passer les énergies carbonées de 8 Gtep à 6,4 Gtep. Il faut donc retrouver 1,6 Gtep dans les autres énergies, hors biomasse, censée être neutre.

- on fait évidemment appel à l'hydraulique, et, hypothèse, au nucléaire. *(Nota : ce sont des énergies à sites, qu'on ne peut installer n'importe où, et qui génèrent de la chaleur (eau chaude, vapeur) et/ou de l'électricité, toutes formes qui n'aiment pas voyager loin).* Donc trouver 1,6 Gtep: nucléaire et hydraulique donnent aujourd'hui 0,7Gtep. Leur taux de croissance est de 2%, ce qui nous fournit 0,15Gtep en 10 ans. Pour en trouver 1,6-0,7= 0,9 Gtep, il faut passer à plus de 10% de croissance : quasi impossible à tenir, compte tenu des recherches de site, des délais de construction, des coûts, et, s'agissant du nucléaire, d'une probable difficulté d'acceptation pendant quelque temps !

- admettons que le taux nucléaire plus hydraulique soit porté à 4% : on passe à environ 1,1 Gtep. Manquent 0,5Gtep : les énergies du futur (etc..) font aujourd'hui 0,03 Gtep. Passer à 0,5 Gtep revient à multiplier ces énergies par 16, soit un taux de croissance de 25 à 30%/an. Même en sollicitant beaucoup les incitations fiscales, on peut rêver ! En fin, si on élimine le nucléaire, le taux passe à plus de 50% !

- enfin, si la consommation croît de 2% l'an, il faut trouver 200 Millions de tep/an, en majorité dans les énergies non carbonées. C'est quasi impossible sans nucléaire, quoique l'on dise ici ou là, ou alors on laisse revenir les énergies carbonées !

Pour revenir à l'ensemble des nuisances, on retiendra qu'elles doivent être combattues par diverses voies complémentaires : réglementations, technologies, **en étant conscient qu'il n'existe aucune possibilité d'élimination totale du risque, et que la mise en œuvre doit respecter le temps, pour éviter des gaspillages inconsidérés de ressources. Attention au « trop vite, trop tôt », aussi dangereux que le « trop peu, trop tard » !**

3.6 L'énergie, à quel prix.

En théorie, suivant un résultat obtenu simplement par Stiglitz (prix Nobel d'économie) le prix optimum doit croître comme le gain de productivité moyen de l'économie, c'est à dire comme le taux de croissance long terme : un prix trop élevé altère la croissance, un prix trop bas conduit au gaspillage (exemple classique : essence vendue à très bas prix dans certains pays producteurs de pétrole).

Ce résultat, conforme au bon sens, n'est en rien mis en œuvre en réalité, du fait même de la complexité du problème, car si l'énergie est un concept physique indispensable, la réalité passe par des chaînes techniques et économiques compliquées, et par des décisions politiques pas toujours rationnelles: les prix sont ainsi contraints, par rapport à un libre marché, à supposer que cela existe !

- première contrainte : à la production, les substances énergétiques ont toutes un coût de mise sur le marché, qu'elle soient dites non renouvelables (charbon, pétrole, gas, uranium) ou renouvelables (géothermie, soleil (sous diverses formes : hydraulique, vent, biomasse, photopiles)). Les technologies associées à ces substances sont économiquement claires pour charbon, pétrole, gas, hydraulique, géothermie, et encore obscures pour l'atome, et le soleil dans ses formes variées.

–deuxième contrainte : les producteurs n'ont pas tous les mêmes coûts de production. Partout existent des producteurs marginaux, qui, selon les possibilités de leur marché, arrêtent de produire si le prix est trop bas. **Cette contrainte n'est pas spécifique aux substances énergétiques, mais pour celles-ci, le fait est qu'existe un groupe de substance dominant (énergies carbonées.cf.supra), dominé par le pétrole, lequel comprend trois groupes de producteurs, deux à bas prix de revient (regroupés dans l'OPEP : les riches, peu peuplés : Arabie Saoudite, Koweït, Abou Dahbi, et les pauvres , c'est à dire tous les autres), l'autre groupe (ceux qui ne sont pas dans l'OPEP) à prix de revient élevé.** (Les USA produisent 5 millions bl/jour avec 500000 puits, l'Arabie saoudite avec 3000 puits!). Au final, en simplifiant beaucoup, l'équilibre budgétaire de l'Arabie Saoudite et des pays voisins est un élément important du prix, lequel est par ailleurs instable, au sens de la théorie, et soumis en outre à de grands cycles liés aux grandes avancées technologiques. **La montée lente, mais en tendance solide, du prix du pétrole, est d'ailleurs la meilleure garantie de rentabilité, à terme, des autres énergies.** C'est ce que montrent les figures suivantes : la figure 6 montre la classique chronique des prix du pétrole, la figure 7 la chronique des fluctuations, avec les deux années « terribles » que furent 1974 et 1980, la figure 8, la tendance long terme, vue par le producteur de pétrole, qui fait bien apparaître la cassure liée aux chocs pétroliers, cassure dont les économies de nombreux pays ne sont pas encore remises : au sens de Stiglitz, l'augmentation du prix très au delà des gains de productivité ne pouvait qu'entraîner une violente récession que les Etats ont évité, jusqu'à présent, par l'endettement !

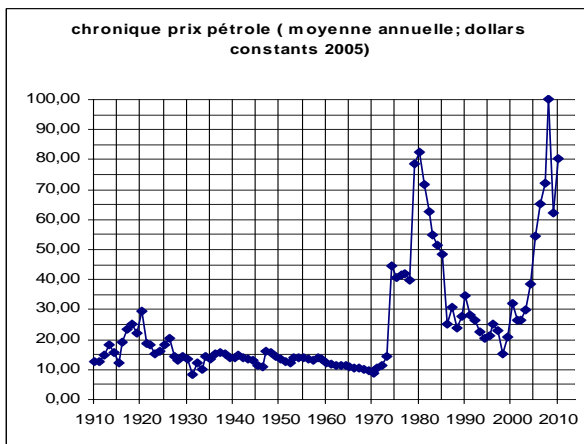


Figure 6

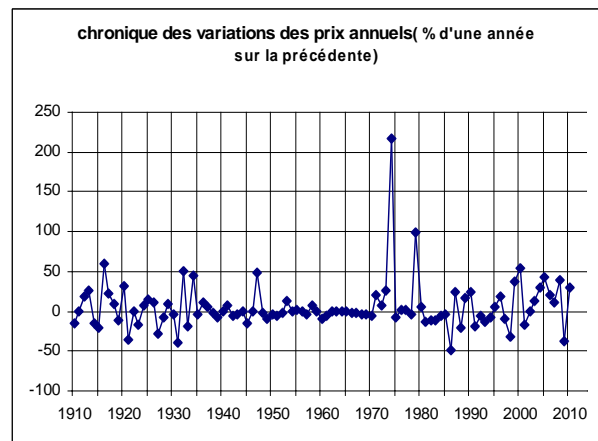


Figure 7

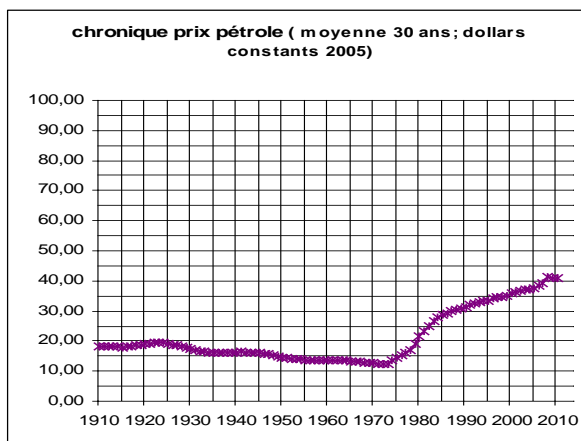


Figure 8 (nota: la moyenne 30 ans correspond à la demi-vie d'un gisement)

Le taux de croissance « long » du prix du pétrole ressort ainsi, en monnaie constante, entre 5 et 6%/an : bien supérieur au taux de croissance long de l'économie. **Les États n'ont évité la récession qu'en s'endettant, et maintenant ce système ne fonctionne plus !**

4. Quels futurs ?

4.1 Quelle demande ?

C'est évidemment la question fondamentale, à laquelle se surajoute une autre question : avec quelles nuisances énergétiques (gas à effets de serre, déchets nucléaires, occupation des cours d'eau, altération des paysages etc). En écartant la réponse des tenants de la croissance zéro (on voit ce qui se passe quand on y est : on ne veut surtout pas y rester!), on peut essayer de raisonner un peu :

- sans population, la demande d'énergie est nulle ;
- le taux de croissance de la population mondiale diminue régulièrement (figure 9), et pourrait s'annuler autour de 2050
- la demande d'énergie par habitant croît lentement (figure 10) (*qui montre la variation de la demande d'énergie en fonction de celle-ci : cette variation devint nulle lors des chocs pétroliers de 1974 et 1980, est remontée légèrement, et passe actuellement par un maximum : un calcul simple montre que la demande pourrait culminer entre 1,8 et 2 tep/an/habitant*)
- le paiement des dettes, au moins partiel, ne favorisera pas la croissance

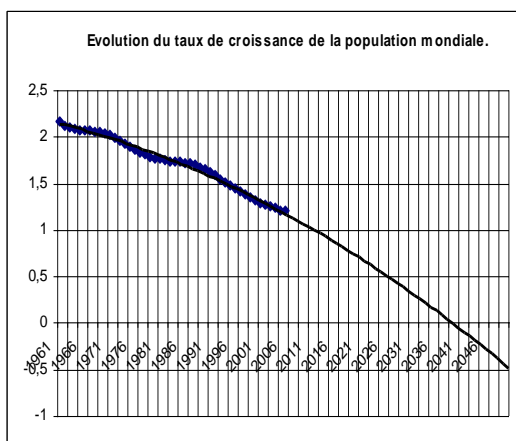


Figure 9

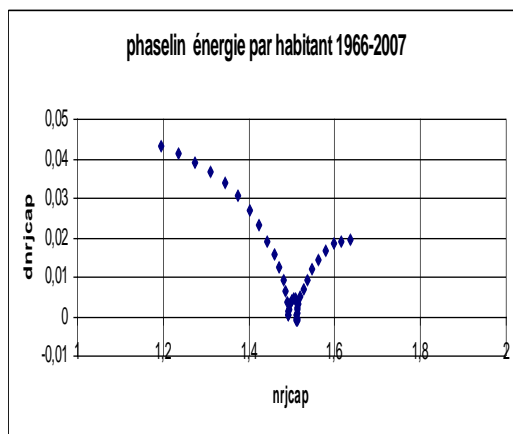


Figure 10

Donc, on peut évaluer l'ordre de grandeur de la demande future par un calcul reposant sur une extrapolation simple, qui aboutit à 18 à 20 Gtep en 2050 (9,5 Milliards d'habitant à 2 tep/habitant/an, soit un taux moyen de 1,5% : il s'agit certes là d'un taux moyen, susceptible, ainsi que le montre la figure 2, de fortes fluctuations.

La variable clé est la population : aujourd'hui les taux de fécondité s'abaissent dans tous les pays émergents ou émergés, conduisant d'ailleurs à des populations vieillissantes, et même en régression. En fait, même en chiffrant des hypothèses « hautes » (les hypothèses basses ne sont d'ailleurs pas, au fond, à considérer, du moins en ce qui concerne la satisfaction de la demande), les divergences n'apparaissent que lentement : ainsi sur 13 ans, à partir de 12 Gtep en 2007, un taux de 1,5% donne 15,5 Gtep en 2020 et 2,5%, 16,7 ! On est dans les marges d'erreur.

4.1 Les énergies fossiles ont des réserves, mais ces réserves ont un prix.

La présentation commune en années de réserves, (quotient des réserves par la production annuelle) est un indicateur inadéquat, puisqu'il suppose implicitement qu'après la dernière année, on ne consommerait brutalement plus de pétrole après 50 ans, de gas naturel après 80 ans, de charbon après 200 ans.

En fait la notion d'années de réserves mélange deux chiffres qui n'ont pas la même valeur: si la production annuelle est bien connue, les réserves sont évaluées de différentes façons, pas toujours comparables, et donnent lieu, notamment de la part des États qui produisent par l'intermédiaire de compagnies nationales, à de nombreuses manipulations statistiques. En outre, les réserves sont évidemment fonction des prix (ne pas confondre ici les réserves et les ressources, ces dernières représentant les accumulations : ce sont l'évolution des techniques et des prix qui régissent le passage des ressources aux réserves).

Un exemple simple : le pétrole en mer. Dans les années 70, on considérait la limite du plateau continental (250 mètres), comme infranchissable. Aujourd'hui, une profondeur de 2000 mètres conduit à des développements certes coûteux, mais pas excessifs, et techniquement au point : l'économiste dira que l'on est passé d'un prix de revient infini (puisque'on ne savait pas faire), à un prix marchand !

Autre exemple : l'apparition, brutale en ce qui concerne les médias, des gas naturels dits non conventionnels, fait tripler en quelques années les réserves de cette énergie, qui ira concurrencer le charbon, qui se repliera sagement en attendant de meilleures circonstances, comme il l'a déjà fait de 1964 à 1974. Le prix du gas se dissociera lentement du prix du pétrole, comme c'est déjà le cas aux USA

Enfin, revenant au pétrole, celui-ci continuera à perdre des parts de marché, pour se replier vers ses niches:le transport, la pétrochimie et le bitume. Son prix peut naturellement baisser, autour de sa hausse tendancielle, comme après les chocs de 1974 et 1980, conséquence de la crise économique, du progrès technique, avant de remonter en raison de l'aggravation inéluctable des coûts marginaux (cf. Article F. Lescaroux Revue de l'Energie. Septembre/octobre 2011)

4.2.Les réseaux électriques pourraient évoluer, et faire une place intelligente (smart grid) à l'éolien et au photovoltaïque. Cela est possible en introduisant des capacité de stockage que l'industrie automobile va mettre au point, et en favorisant les sources dispersées. **Aujourd'hui, les parcs éoliens et les fermes solaires tournent le dos à cette évolution, au nom de l'effet de taille.** En tous cas, ces technologies trouveront une place qui sera fonction de la date d'arrêt des subventions qui les font vivre (subventions qui n'ont rien de scandaleux au démarrage, mais qui doivent progressivement disparaître:c'est d'ailleurs le sens des dispositions récemment prises par le gouvernement français, mais en favorisant l'effet de taille!).

4.3. Peut être les biocarburants ? !Pas ceux dits de première génération (pour résumer transformation du sucre en éthanol, qui est en fait une absurdité agricole, puisque cette filière déplace de l'alimentation, besoin vital, pour du carburant), mais ceux de deuxième génération, qui utiliseraient la lignine, disponible en abondance dans le bois. C'est là une voie prometteuse, pas encore capable de justifier une filière industrielle, **probablement le meilleur pari.**

4.4. Et l'hydraulique ? Barrer un cours d'eau n'est pas si anodin pour certains courants écologiques ! Par ailleurs, dans les pays dits développés, les sites équipables sont presque tous

équipés. Il existe dans le monde des sites non équipés, mais l'électricité suppose une infrastructure sociale inexistante dans de nombreux pays. Pour l'hydraulique, l'avenir passe probablement par la réalisation de petits équipements, peu gourmands en capitaux et en hectares, et plus faciles à insérer dans le tissu social local.

4.5. Géothermie. C'est un peu le parent pauvre du mix énergétique. Cette énergie (qui utilise le flux thermique terrestre, lui-même engendré par la radioactivité naturelle du noyau), pourrait faire mieux, mais ne fait pas l'objet d'une promotion suffisante, en raison de la complexité de sa distribution, qui demande de réaliser des réseaux de chaleur en milieu urbain, ce qui n'est pas si facile, indépendamment des problèmes économiques habituels, en raison des intervenants, notamment municipaux, vrais maîtres du jeu.

4.5. Nucléaire. Est en train de remplacer les gas à effets de serre dans l'esprit des écologistes:cette source devient une sorte de mal absolu, du moins dans certains pays. La position allemande suscite cependant de nombreuses interrogations, quant à sa réelle motivation. A la limite du nucléaire et de la physique, on trouve le projet ITER, d'énergie par fusion nucléaire (et non fission)Pas avant 30 ans, au mieux ! En attendant, on retiendra, pour le nucléaire classique, un taux de croissance modéré au plan mondial:atteindre un rythme de 4 à 5%/an serait un véritable exploit. N'oublions pas les réacteurs à neutrons rapides, plus abordables qu'ITER (rappelons Creys-Malleville, fermée par idéologie, alors que ce prototype commençait à bien fonctionner), et qui « brûlent tout » (au sens nucléaire) et rendraient les réserves quasi illimitées !

4.6. La physique peut elle faire apparaître des sources nouvelles d'énergie ?. Les découvertes récentes en cosmologie montrent un univers bien plus compliqué qu'on ne le pensait dans le domaine de l'énergie ; ainsi le très grand fait aussi apparaître de nouvelles idées, alors que la théorie quantique, consacrée au très petit, est obligé, pour sa cohérence, de considérer le vide comme un réservoir d' énergie. Bien sur, il faudra beaucoup de temps pour parvenir à trouver des applications à cette physique nouvelle, mais rien ne s'opposerait à ces développements, conformes à l'histoire du développement humain, en ne donnant à ce mot aucune signification philosophique ou religieuse. Mais on ne doit rien attendre de cette éventualité pour nos problèmes des prochaines décennies.

Une brève conclusion. Dans l'immédiat, il faut raison garder, en se gardant d'extrémismes et d'idéologies, ce dont on ne prend pas le chemin ! On ne peut évidemment que gagner à réduire les consommations, à éviter au mieux les gas à effet de serre, en étant cependant conscient que le principal d'entre eux, la vapeur d'eau, n'est pas contrôlable, à améliorer les réacteurs nucléaires à fission, à promouvoir les biocarburants de 2ème génération, à améliorer les accumulateurs. Un bon moyen est d'affecter à l'énergie un prix tel que son usage ne conduise pas à un gaspillage, et permette le renouvellement des investissements : l'énergie du futur ne sera abondante et pérenne que si son économie est rationnelle. Espérons toujours....