

ENERGIES, CLIMAT et ORDRES de GRANDEUR

Jean MEGY

Professeur Honoraire Ecole des Mines de Paris

Union Régionale des Ingénieurs et Scientifiques Provence

Octobre 2004

ENERGIES, CLIMAT et ORDRES DE GRANDEUR .

Au cours du siècle dernier, les hommes ont progressivement pris conscience des conséquences que l'évolution des civilisations, avec l'accroissement de la population et les progrès des techniques, pouvait avoir sur l'ensemble de la planète elle-même :

- raréfaction des ressources,
- pollutions,
- influence à long terme sur le climat, etc...

parallèlement à tous les acquis bénéfiques.

D'où est née la notion de développement durable : **assurer un mode de développement qui répond aux besoins du présent tout en permettant aux générations futures de répondre aux leurs (définition de l'ONU).**

Cette notion implique notamment :

- équité sociale**, développement social, implication des hommes, choix partagés, éducation,
- respect de l'environnement**, préservation des ressources, de l'environnement, du climat,
- performance économique**, et, en particulier, pour poursuivre les objectifs précédents, **de l'énergie accessible à tous.**

Dans ce contexte, c'est sur ce dernier point que vont porter les réflexions qui suivent, en attirant dès maintenant l'attention sur l'importance fondamentale de la **maîtrise permanente des ordres de grandeur**. C'est, je pense, une évidence pour des enseignants en Physique, mais que d'idées fausses, d'opinions erronées, conséquences de raisonnements qui se limitent au qualitatif !

D'où la nécessité capitale de former les générations futures au raisonnement rigoureux pour éviter les approches approximatives et, j'oserais dire, souvent de type émotionnel ou incantatoire, auxquelles les média assurent trop souvent une large diffusion.

OOOOO

L'énergie est indispensable au développement économique et social.

Quelques rappels historiques pour la France :

Alors que la consommation énergétique avait très peu évolué au cours des époques précédentes, elle a été multipliée par 28 (croissance moyenne 1,75 %/an) au cours des deux derniers siècles.

L'espérance de vie, corrélativement, est passée de 27,5 ans (hommes) et 28,1 ans (femmes) en 1780 – 89 à 74 ans (hommes) et 82 ans (femmes).

Mais actuellement, une telle évolution n'a eu lieu que pour le groupe des pays dits industrialisés, c'est-à-dire une minorité de la population mondiale. Pour un effectif total de plus de 6 milliards d'individus, 2 milliards vivent encore sans électricité.....et 20% de la population consomme 60% de l'énergie produite : un afghan consomme 150 fois moins d'énergie qu'un européen.

La durée de vie apparaît étroitement dépendante de la consommation énergétique (Fig.1) pour les pays en développement qui ont évidemment le souhait de combler – au moins partiellement – leur retard et revendiquent le droit à l'énergie.

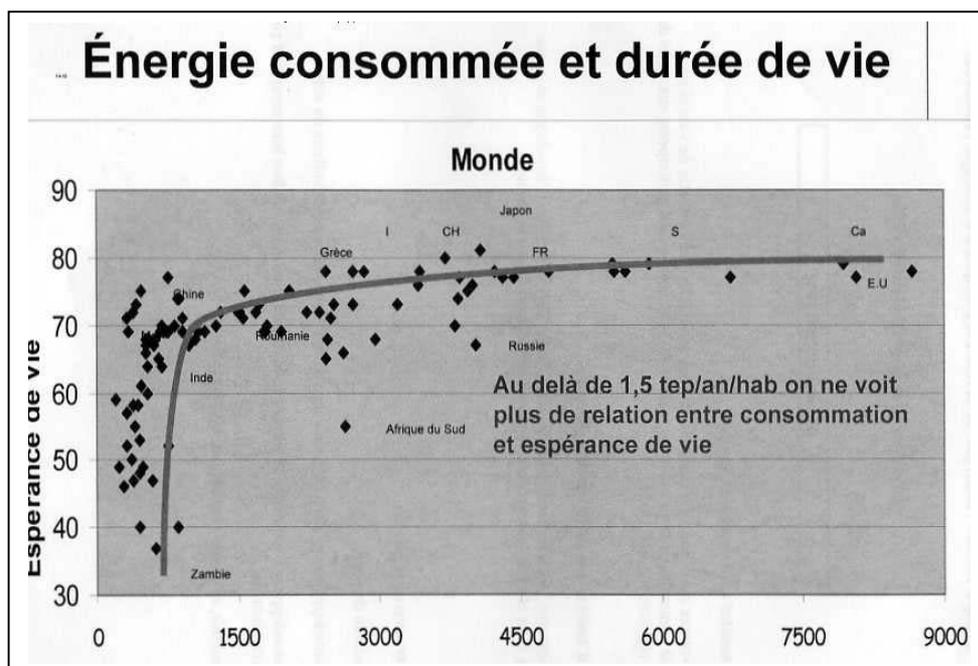


Fig. 1

Quelles prévisions peut-on faire aujourd'hui ?

En matière démographique, les différents scénarios font prévoir, sauf catastrophe imprévisible, une croissance de la population mondiale atteignant entre 8,5 et 12 milliards d'habitants en 2100 (Fig 2).

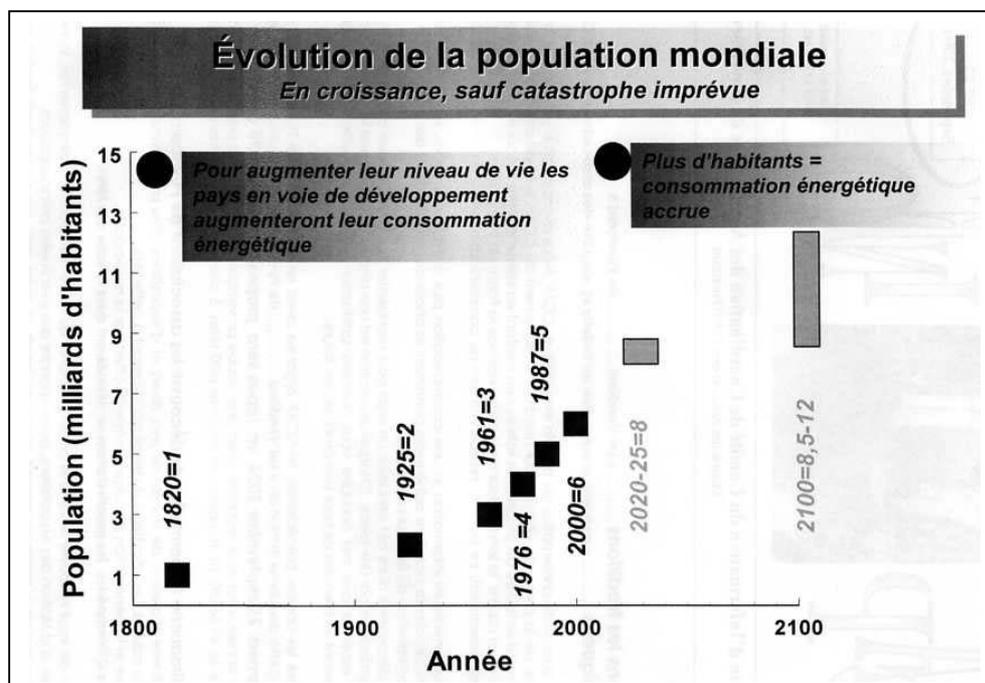
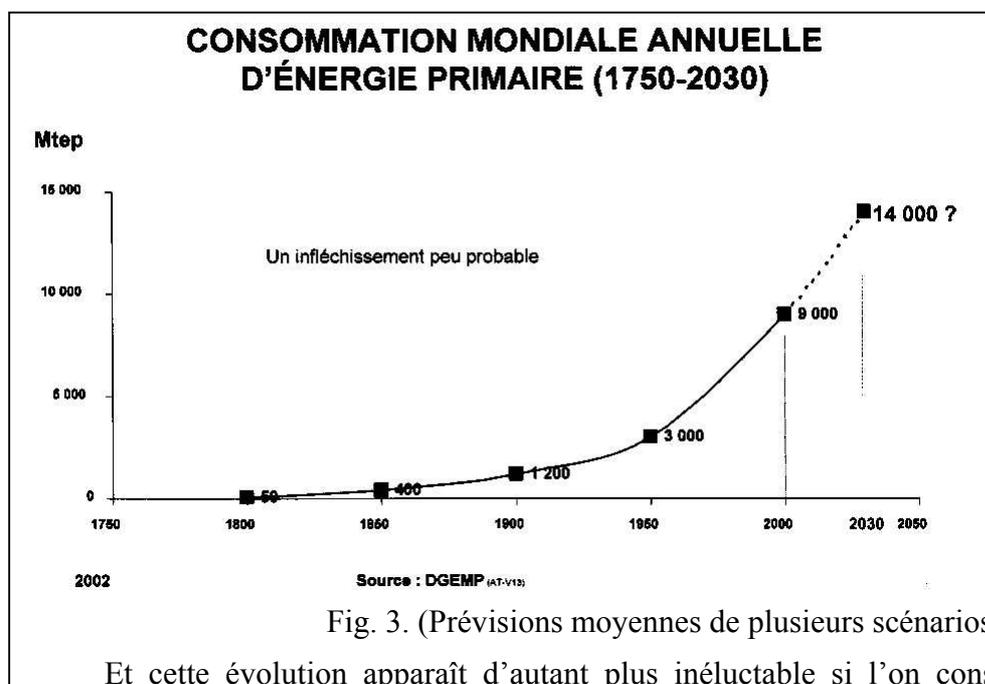


Fig. 2

D'où, une consommation d'énergie accrue ; peut-être cette courbe s'infléchira-t-elle à moyen terme, (taux de natalité plus faibles, politiques drastiques d'économie d'énergie au niveau mondial....) mais bien après 2030.....



Et cette évolution apparaît d'autant plus inéluctable si l'on considère la disparité actuelle énorme des consommations d'énergie par tête en différentes parties du monde.

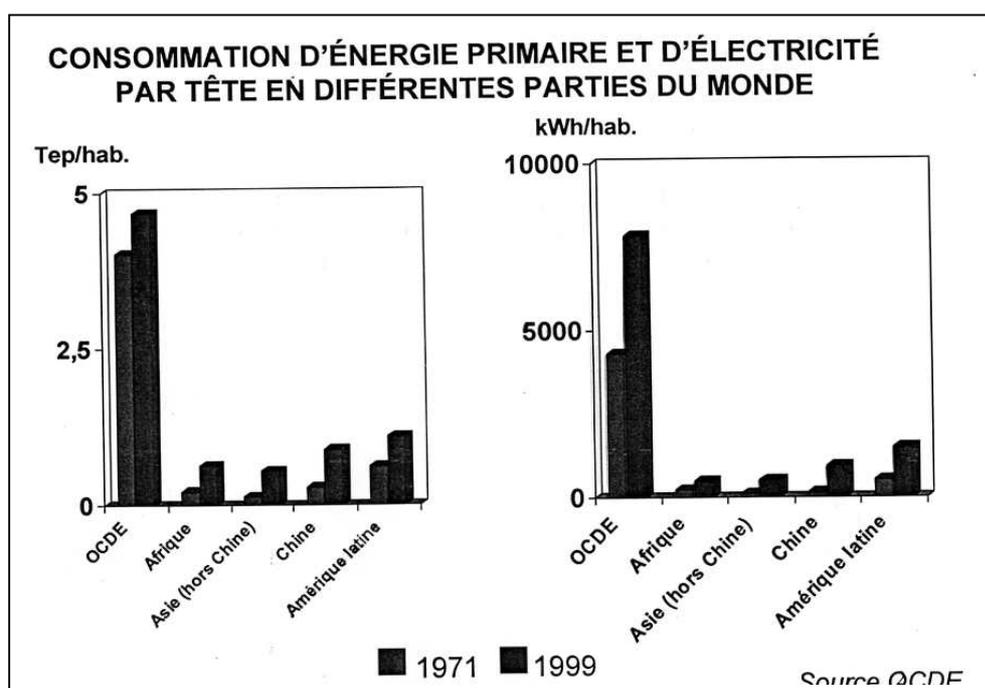


Fig. 4

La problématique.

Actuellement nous sommes dans une situation d'abondance énergétique, les ressources sont encore suffisantes, mais il se pose déjà un problème économique majeur pour les pays en voie de développement.

Et, dans le futur, la demande va croître de façon importante.

Deux questions sont particulièrement préoccupantes :

- l'accroissement de l'effet de serre et ses conséquences climatiques,
- les ressources en énergies fossiles : répartition inégale sur la planète, variabilité des prix perturbant l'économie, et, dans un futur prévisible, raréfaction des ressources.

Nous sommes dans un monde dominé par les combustibles fossiles, qui, à eux seuls, représentent actuellement plus de 86% de la consommation mondiale d'énergie primaire. L'homme a utilisé les énergies renouvelables pendant 500 000 ans, les combustibles fossiles pendant 200 ans, le nucléaire pendant 50 ans.

L'accroissement de l'effet de serre est essentiellement dû aux combustibles fossiles qui génèrent les rejets de CO₂, d'où la nécessité de réduire au mieux leur utilisation dans le futur, d'autant que les ressources sont limitées.

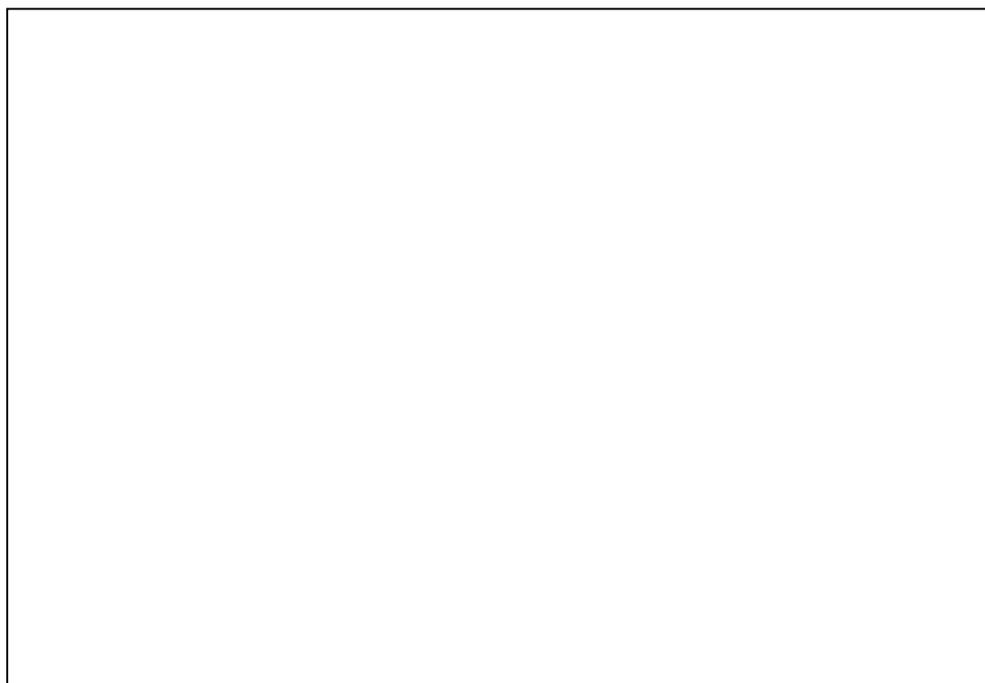


Fig. 5 .

Premier impératif : **économiser (maîtrise de l'énergie)** : c'est-à-dire utiliser juste ce qui est nécessaire, faire la chasse au gaspillage, améliorer le rendement des machines (plus généralement améliorer l'intensité énergétique). Mais si cela est possible et nécessaire dans nos pays évolués, il n'est pas pensable d'arrêter la croissance très rapide des grands pays « en retard » et, en tout état de cause, il faut une volonté politique forte pour atteindre ces objectifs.

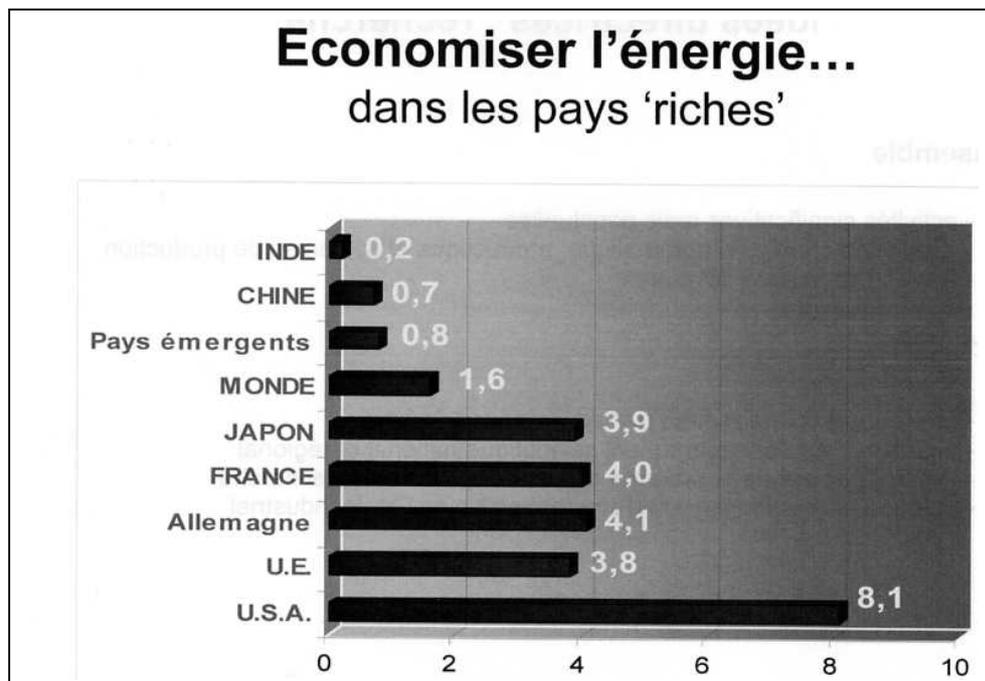


Fig. 6.

Deuxième impératif : **utiliser au mieux toutes** les sources d'énergie, en réduisant la consommation des combustibles fossiles et en développant les sources d'énergie ne produisant que peu ou pas de gaz à effet de serre.

Mais, là comme ailleurs, **les lois de la physique**, lois de la thermodynamique, principe de Carnot et entropie conditionnent les pertes et les rendements, les possibilités de stockage ; elles sont incontournables. Les **coûts** pèsent lourd dans les politiques de développement.

Les choix en matière d'énergie dans les années qui viennent auront une incidence capitale sur nos civilisations et, plus généralement, le devenir de notre environnement :

Combustibles fossiles : charbon, pétrole, gaz,

Energies renouvelables : Hydraulique, Solaire, Eolien, Biomasse, Géothermie

Nucléaire

Mais chaque source d'énergie a ses avantages, ses limitations et ses inconvénients...

L'effet de serre.

La température moyenne de la planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du Soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace. Sans effet de serre la température moyenne de la Terre serait à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elle est de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. La Terre utilise (en moyenne) 240 W/m^2 pour se réchauffer. Depuis le début de l'ère préindustrielle l'effet de serre a augmenté de $2,45\text{ W/m}^2$, soit 1%.

Créé en 1988 par l'O.N.U. le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (G.I.E.C.) confirme et précise dans son dernier rapport (2003) les connaissances sur les climats anciens (études paléoclimatiques) et les prévisions quant à l'évolution future.

En particulier, la corrélation étroite entre la température à la surface de la terre et la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre (G.E.S.) dont le principal est le CO_2 , a été mise en évidence grâce notamment aux analyses des carottes glaciaires de l'Antarctique qui ont permis d'élaborer et de qualifier les modélisations fournissant aujourd'hui les prévisions pour le siècle futur.

Du jamais vu depuis 400.000 ans, au moins, (en fait, 740 000 ans d'après les résultats les plus récents).....

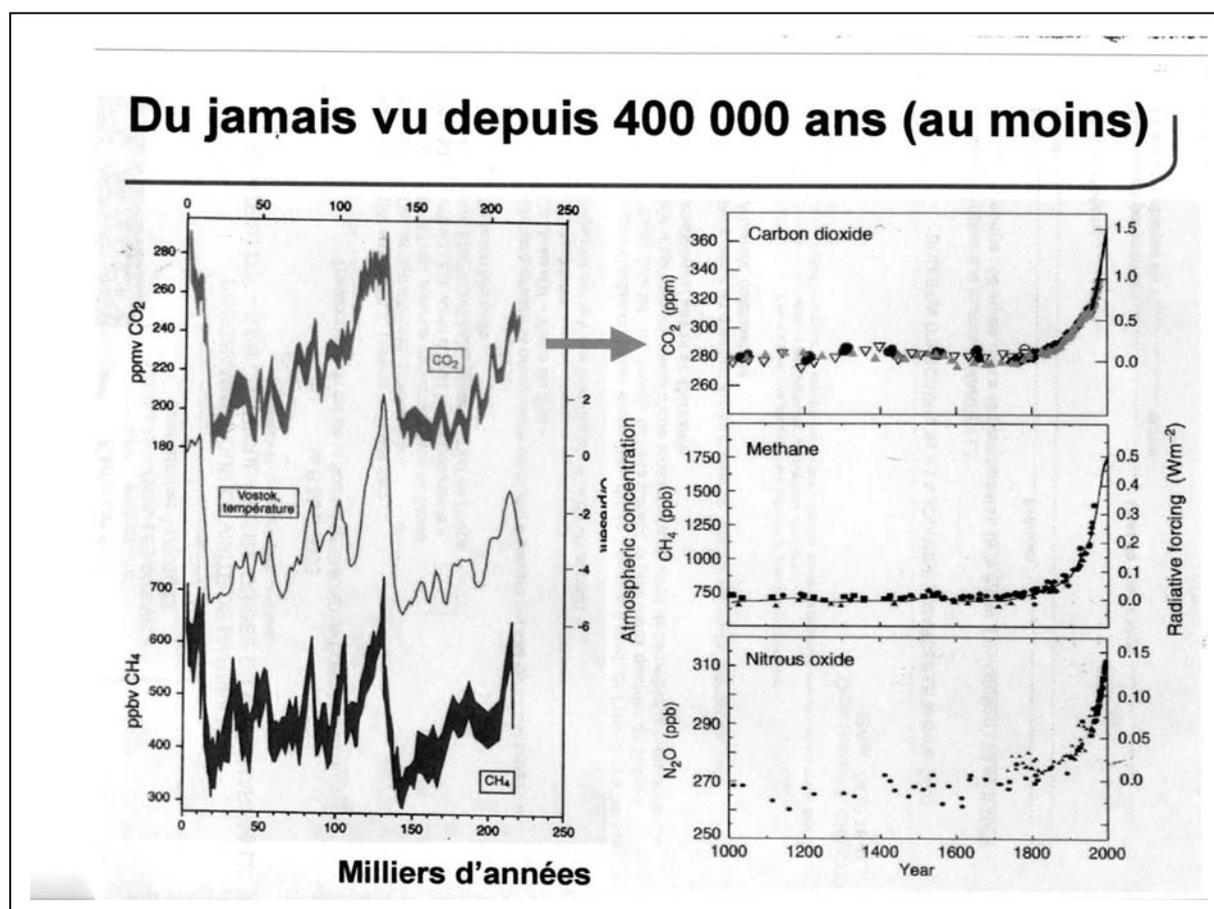


Fig. 7.

La température en surface dépend de la quantité de gaz à effet de serre (G.E.S.) présents dans l'atmosphère. Les G.E.S. dus aux activités humaines sont le CO_2 , le CH_4 , le N_2O , les CFC (chloro-fluoro-carbones), etc..., et la concentration en CO_2 , le principal G.E.S., a augmenté de 30% depuis le début de l'ère industrielle, les effets combinés de tous les G.E.S. dépassant 50 %.

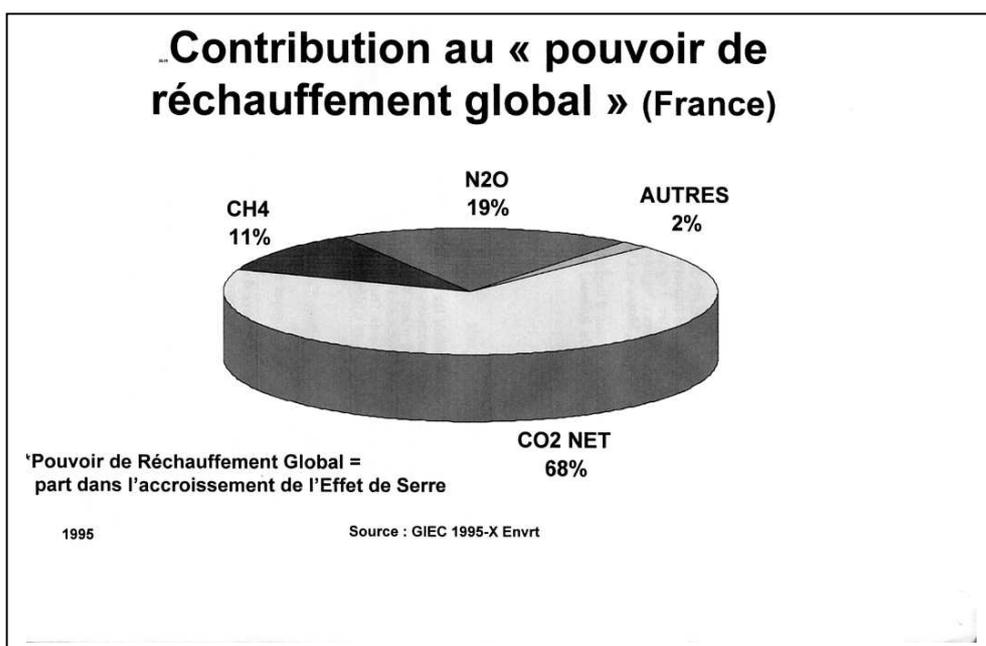


Fig. 8.

Depuis deux siècles, la température moyenne a évolué à une vitesse jamais enregistrée en 20 000 ans : plus de 0,5 °C en un siècle, et le phénomène s'est considérablement accéléré au cours des cinquante dernières années, principalement à cause de l'augmentation des rejets de CO² dus aux activités humaines. (1)

Il faut s'attendre à un accroissement de 1,4 à 5,8 °C en 2100, la moitié environ de l'écart étant dû aux politiques menées en matière d'énergie au cours des prochaines années, continuer le laisser aller actuel ou prendre des mesures pour limiter la production des G.E.S

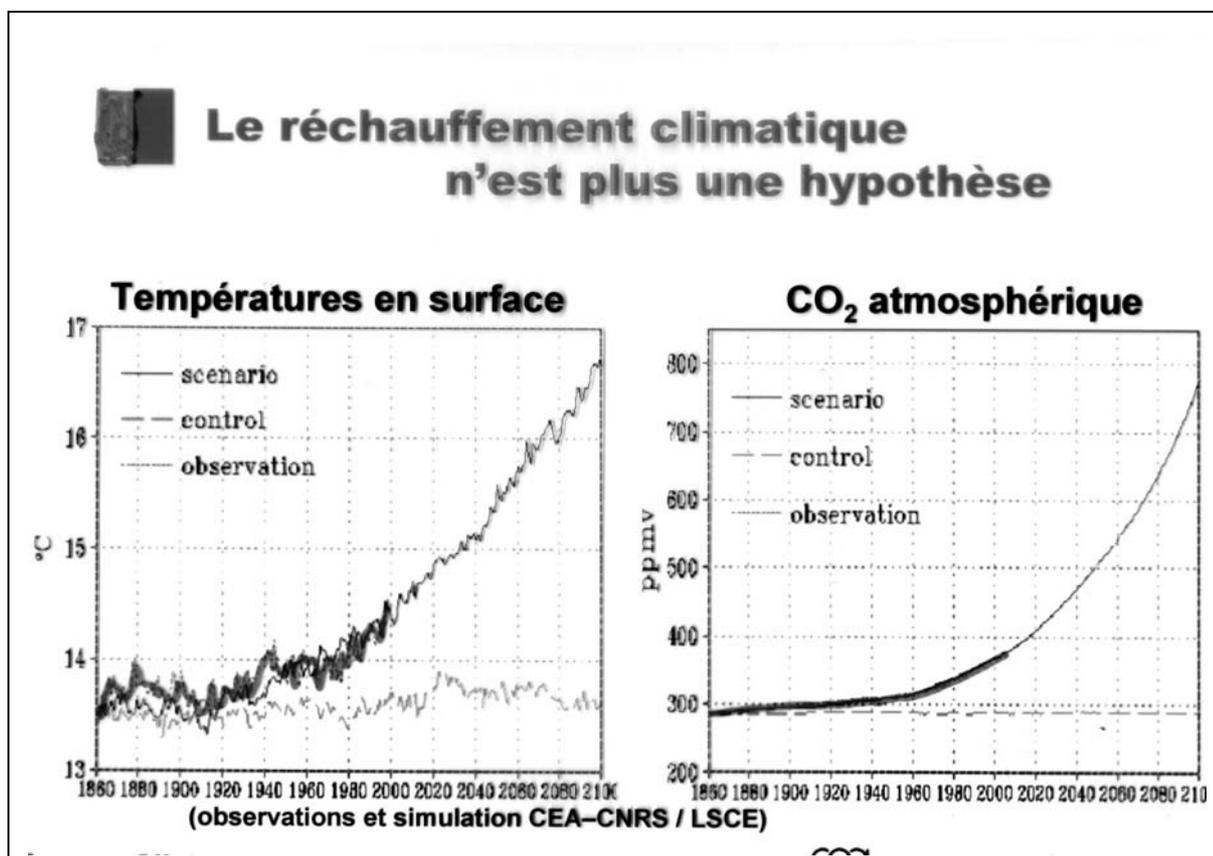


Fig. 9.

Cette vitesse d'évolution est cent fois plus élevée que les variations naturellement imprimées au climat de la Terre par ses paramètres astronomiques, qui ont donné les alternances entre ères glaciaires et interglaciaires (quelques degrés en 10 000 ans chaque fois).

Il en résultera (avec une probabilité de 90 à 99 %) une évolution climatique :

- vagues de chaleur de plus en plus longues et de plus en plus intenses,
- élévation particulière des minima nocturnes de température,
- précipitations de plus en plus intenses, et surtout de plus en plus variables d'une année sur l'autre, notamment aux latitudes moyennes,

Les effets observés ces dernières années confirment la pertinence des modélisations du G.I.E.C.. Ainsi, en France, le retrait constaté des glaciers, et l'été 2003 qui correspond bien aux simulations, en particulier la chaleur nocturne.

On estime qu'une réduction de moitié des émissions mondiales bien avant la fin du siècle (2050 ?) est indispensable si l'on veut limiter à 450 ppm la teneur en CO₂ de l'atmosphère, soit une élévation de 2°C. Au-delà, des dégâts importants dans nos pays industrialisés, encore pires dans nombre de pays du Sud, des modifications importantes de la circulation océanique, l'élévation du niveau des mers détruisant de larges zones très peuplées sont prévisibles...

Compte tenu de la capacité cumulée d'absorption océans-biosphère, entre le scénario où on ne fait rien, et le scénario où l'on revient à une concentration proche de l'actuelle, il y a un facteur 10.

Ainsi, aujourd'hui, les émissions mondiales annuelles sont de l'ordre de 7 GtC d'(soit environ 1 tonne de Carbone par habitant et par an).

Pour stabiliser l'effet de serre à un niveau proche de l'actuel (correspondant à une teneur en GES de l'atmosphère équivalente à 500 ppm de CO₂), compte tenu des temps de

réponse très grand de l'ensemble océans-biosphère, il faudrait réduire régulièrement le niveau des émissions, jusqu'à 2 à 3 GtC à la fin du siècle. C'est un défi phénoménal

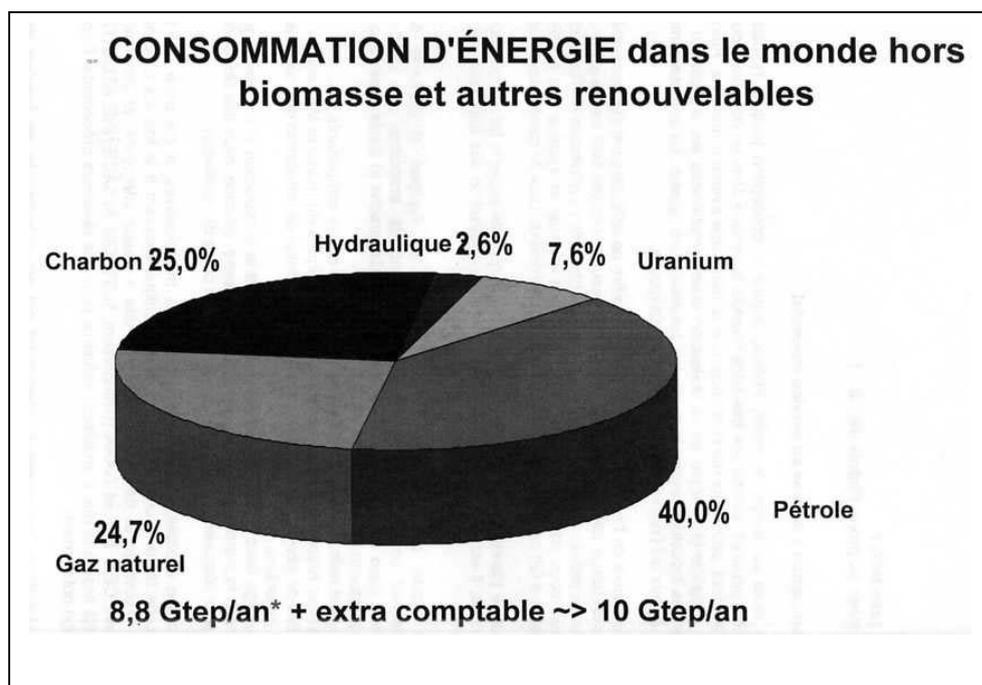
- (1) D'aucuns, raisonnant sans maîtriser les ordres de grandeur, craignent que la chaleur rejetée par les activités humaines et en particulier la production d'énergie accroissent l'effet de serre ! Un calcul très simple montre que ce facteur est de l'ordre du $1/10000^{\text{ème}}$ de l'effet de serre.

Réf. Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC)
Jean JOUZEL, Anne DEBROISE. Le Climat : Jeu dangereux. DUNOD 2004

Les sources d'énergie.

Les combustibles fossiles.

Assurent environ 87% de la consommation d'énergie mondiale. Mais produisent massivement les G.E.S.



Le Charbon.

Gisements abondants répartis sur la planète : Amérique du Nord, Europe, Asie, Afrique du Sud, ..Au rythme actuel, les réserves mondiales sont estimées à deux ou trois siècles.

Coûts d'extraction bas ; c'est une manne pour certains pays comme la Chine, qui l'utilise massivement.

Mais c'est le plus polluant des combustibles fossiles.

Une Centrale au Charbon de 1000 MW fonctionnant 6600 heures par an rejette :

- 1500 tonnes de poussières,
- 5 000 000 tonnes de CO₂
- 40 000 tonnes de SO₂
- 20 000 tonnes de NO_x (1)

Des progrès importants sont en cours pour la filtration des poussières, le piégeage du SO₂, etc ..(procédé à lit fluidisé par exemple) mais le problème du CO₂ demeure entier, vu les quantités en jeu.

(1)...et par suite des traces d'uranium et de ses descendants présentes dans le charbon, les fumées contiennent des éléments radioactifs naturels et les émissions radioactives d'une centrale à charbon sont de ce fait environ cent fois plus élevées que celles d'une centrale nucléaire de même puissance. Mais, les valeurs étant très basses, elles ne présentent aucun facteur de risque significatif.

Le pétrole.

C'est aujourd'hui la ressource la plus utilisée et la plus commode d'emploi. Actuellement irremplaçable pour les transports, son importance est telle pour l'économie des nations que les fluctuations de production et de coût perturbent fortement l'économie dans le monde.

Or, les gisements sont mal répartis sur la planète : les deux tiers des réserves dans le seul Moyen Orient, le reste au Vénézuéla, en ex-URSS, au Mexique, aux U.S.A.... L'accès aux gisements est source de conflits pour assurer la sécurité d'approvisionnement.

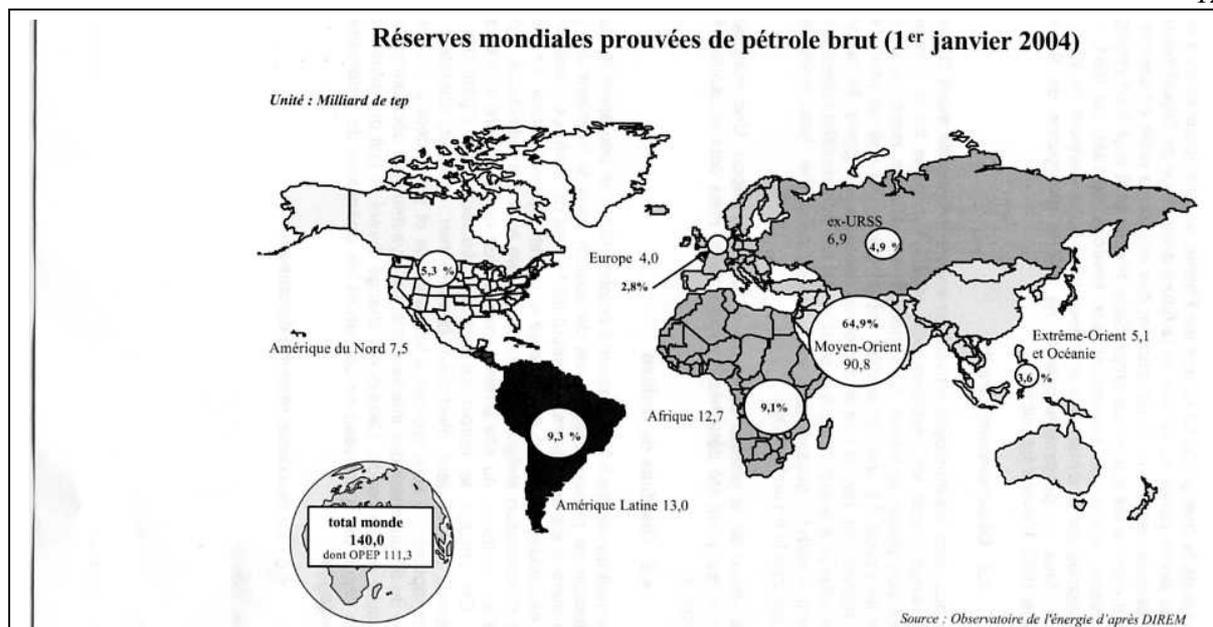


Fig. 11

Mais, ce qui est beaucoup plus grave, depuis les années 80, les quantités annuelles découvertes sont inférieures à la consommation, qui, elle, ne cesse d'augmenter. Les experts s'accordent sur la prévision d'une décroissance de la production vers 2030, avec vraisemblablement comme corollaire une forte croissance des prix, et la fin de l'exploitation pétrolière à des coûts supportables avant la fin du siècle .

Ceci impliquera des mutations profondes dans nos sociétés, notamment pour les transports, et de plus, il vaudrait mieux conserver autant que possible cette matière pour des usages plus nobles tels que la pétrochimie.

Le gaz naturel.

Son utilisation est actuellement en forte croissance. C'est le moins polluant des combustibles fossiles et pour la génération d'énergie électrique, les turbines à cycle combiné récentes ont d'excellents rendements.

Les réserves prouvées dans le monde sont un peu mieux réparties que pour le pétrole, mais néanmoins l'ex-URSS et l'Iran en détiennent plus de 70%.

Etant donné le problème du transport (gazoducs ou méthaniers), plus complexe que pour le pétrole, le gaz est en général consommé sur place actuellement dans les pays producteurs, l'Europe étant par contre un gros importateur, principalement de Russie et d'Algérie.

Les réserves mondiales estimées laissent prévoir la fin de l'exploitation gazière vers la fin de ce siècle.

Les Energies renouvelables.

Dans l'histoire de l'humanité, elles ont été jusqu'à l'ère de la vapeur et du charbon les seules ressources énergétiques. Mais moulins à vent, à eau, navires à voile ont cédé la place à la vapeur et au charbon, plus compétitifs, plus souples d'emploi et pratiquement indépendants des aléas de la Nature.

Mis à part l'hydraulique, les énergies renouvelables aujourd'hui représentent moins de 1% de la production mondiale. De gros efforts doivent être faits pour les développer, mais on se heurte à des freins et des défis technologiques liés à leur nature :

- la nature diluée de certaines d'entre-elles
- leur intermittence
- leur coût

L'Hydraulique.

Coûteuse en investissements, économique en fonctionnement, **la Grande Hydraulique** (puissances supérieures à la dizaine de MW) a joué et joue encore un rôle important.

En 1960, en France, elle assurait 56% de la production d'électricité, mais pratiquement tous les sites sont équipés. Il existe encore sur la planète de nombreux sites potentiels.

Les puissances installées peuvent être considérables : en Chine, celle du gigantesque barrage des Trois Gorges est de 18 000 MW. Mais les effets sur l'environnement sont importants ; ainsi, ce barrage des Trois Gorges a nécessité le déplacement de centaines de milliers d'habitants...

La **Petite Hydraulique** (équipement de petits cours d'eau, puissance inférieure à 10 MW) peut constituer un appoint (potentiel inférieur à 10 GW pour l'Europe) mais elle est

confrontée aux mesures de préservation des sites, ce qui limitera vraisemblablement son développement de façon drastique.

La maîtrise de l'**Energie des marées** a été réalisée, en particulier en France au cours des années 50 avec l'Usine marémotrice de la Rance (Saint-Malo) encore en exploitation. Mais les coûts de production sont élevés, l'énergie produite dépend strictement de la hauteur de la marée, et l'impact sur l'environnement très important. De plus, le nombre de sites propices dans le monde est très limité.

De même, la **captation de l'énergie des vagues, de l'énergie thermique des océans** (utilisation de la différence de température en surface et en profondeur) a donné lieu depuis plusieurs dizaines d'années à des expérimentations qui se sont révélées jusqu'à présent peu prometteuses d'un développement important par suite de la nature des phénomènes naturels eux-mêmes et des coûts.

L'Eolien.

Un programme volontariste de développement a été lancé au niveau européen, mais pour apprécier le potentiel de développement de l'Eolien il faut examiner ses caractéristiques physiques :

La puissance d'une génératrice éolienne est à peu près proportionnelle au cube de la vitesse du vent v et la puissance maximale (nominale) est atteinte pour $v = 15$ m/s (force 7 dans l'Echelle de Beaufort). Les sites choisis doivent donc bénéficier de vents réguliers et relativement forts ; l'installation « off shore » est de ce fait intéressante, le vent moyen y étant plus élevé. Il faut toutefois prendre en compte les coûts plus élevés de la maintenance en milieu marin.

Quelques données.

Durée de fonctionnement en moyenne :

A terre : 2600 h/an avec un vent moyen de 7,5 m/s

En mer 3500 h/an avec un vent moyen de 9,5 m/s

Emprise au sol : environ 8 MW /km²

Tarif d'achat par EdF : 8,38 c€

source : ADEME

Conséquence : sur un an, l'éolienne fournit 5 à 8 fois moins d'énergie que la centrale thermique ou nucléaire de même puissance nominale. Autrement dit, il faudrait au moins 3000 éoliennes de 2,5 MW (les plus puissante actuellement) pour assurer la production équivalente à celle d'une centrale actuelle de 1500MW.

De plus, cette énergie n'est pas disponible à la demande. Il faut donc avoir en permanence des sources de remplacement disponibles, type centrale à turbine à gaz (ce qui engendre des coûts supplémentaires) pour pallier le manque de vent. L'été 2003 a été révélateur en Allemagne où la canicule s'accompagnant de vents quasiment nuls, la production électrique prévue normalement par le parc éolien a du être assurée par les centrales thermiques génératrices de G.E.S.

D'autre part, l'emprise au sol est importante, d'où problèmes d'environnement dès que l'on envisage des parcs de puissance élevée.

Le coût de production actuel du kWh éolien en France est plus du double de celui du kWh fourni par les centrales classiques ou nucléaires et, de plus ce dernier est disponible à la demande.

Pour toutes ces raisons le potentiel de développement de l'éolien apparaît relativement limité dans nos pays à forte densité de population et à consommation élevée par habitant, tant qu'il sera pratiquement impossible de stocker l'énergie électrique en grande quantité.

Par contre l'éolien retrouve tout son intérêt pour les sites isolés à besoins énergétiques faibles (stockage par batteries pour assurer la continuité de fourniture), les pays à densité de population faible et à habitat dispersé où les coûts de transport pénalisent lourdement les productions centralisées. Il pourrait jouer un rôle important dans nombre de pays en voie de développement.

Le Solaire.

L'ensoleillement en France représente en moyenne une énergie au sol de 1500 kWh/m²/an, soit une puissance moyenne de 170 W/m².

Actuellement, on dispose de deux modes d'emploi de l'énergie solaire : la conversion directe en électricité au moyen de cellules photovoltaïques, (**le solaire photovoltaïque**) ou l'utilisation de la chaleur pour diverses applications (**le solaire thermique**).

Le solaire photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques actuelles ont un rendement relativement faible, 13 à 14% (cellules au Silicium cristallin) et sont chères. Les recherches doivent être poussées pour en réduire considérablement les coûts (Silicium amorphe ?).

Etant donné la puissance au sol de l'ensoleillement, la génération de puissances importantes demande de grandes surfaces : ainsi pour une puissance équivalente à celle d'une centrale conventionnelle de 1000 MW, la surface occupée par les capteurs serait d'environ 50 km².

L'énergie produite par ces capteurs solaires (sans stockage) revient à environ 0,45 €/kWh soit plus de 10 fois le prix du kWh conventionnel. Se connecter au réseau pour la production d'électricité présente peu d'intérêt.

Par contre, associées à des batteries de stockage qui assurent la continuité de fourniture, les installations autonomes de puissance quelques kW jusqu'à une vingtaine de kW s'avèrent rentables dans les sites isolés ou insulaires sans accès à un réseau de distribution, ce qui est un cas très répandu dans les pays en voie de développement. Pour de telles installations autonomes, le coût est plus élevé, environ 1,5 €/kWh par suite du coût du stockage d'énergie mais il faut alors le comparer par exemple au coût du kWh fourni par un groupe Diesel électrogène dont l'approvisionnement en combustible peut être très élevé par suite du transport du combustible.

La technologie actuelle demande beaucoup d'énergie pour la fabrication des cellules, environ 1 kWh pour 1 Watt-crête.

Le solaire Thermique.

Son utilisation directe peut se substituer à l'emploi d'autres énergies dans de larges domaines tels que l'habitat où le chauffage est un gros consommateur d'énergie.

- capteurs solaires pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire,
- dispositions architecturales utilisant mieux l'ensoleillement.

Son développement dans le futur peut apporter une contribution importante.

Par contre, pour la génération d'électricité, la nécessité de concentrer l'énergie solaire demeure un très lourd handicap par suite des surfaces au sol à équiper et à entretenir.

En France, la centrale prototype Thémis (2,5 MW) à Font Romeu en a bien mis en évidence les limites.

La Biomasse.

La plante permet de stocker l'énergie solaire tout en consommant du CO₂.

En France, aujourd'hui, la production de chaleur à base d'énergies renouvelables est dominée par la biomasse.

Le **bois** a été, pendant des millénaires, la principale source d'énergie pour l'homme et joue encore dans nombre de pays en développement un rôle important et irremplaçable, mais corrélativement, dans certaines zones (Afrique sahélienne par exemple) la conséquence en est une déforestation continue.

A poids égal, le bois est trois fois moins énergétique que le pétrole et, sur le plan de l'effet de serre, il ne peut être considéré comme sans action que si la reforestation est suffisante pour compenser le produit de la combustion.

Enfin, (encore les ordres de grandeur !), la production équivalente à celle d'une centrale de 1000 MWe demande plus de 2500 km² de forêts.

Pour les transports, les **biocarburants** peuvent constituer un appoint pour desserrer l'étau du pétrole, et on peut penser que l'utilisation massive des jachères pourrait donner une production significative. Mais le prix de revient est encore supérieur au double de celui des combustibles fossiles ; et, de plus, la production (engrais, machines agricoles,...) consomme environ 1 litre de carburant fossile pour 1,5 l de bioéthanol ou 2 l d'ester de colza, d'où encore une production nette de G.E.S. (quoique 2 fois moindre). Enfin, une large utilisation des terres agricoles pourrait, à terme, handicaper les cultures vivrières (rouler ou manger ?).

Les **déchets**, déchets d'élevage, boues de stations d'épuration, ordures ménagères après tri pour recyclage, résidus agricoles, farines animales sont autant de sources ponctuelles à ne pas négliger, suivant des procédés divers (production de gaz par méthanisation, incinération, compostage substitutif à des engrais classiques,...) en demeurant conscient qu'ils peuvent générer des G.E.S. et qu'il faut traiter les risques de pollution atmosphérique, en particulier pour l'incinération (dioxines).

Globalement, la biomasse est une filière énergétique qui a, en France, un bon potentiel de développement.

La Géothermie

Dans certains sites à volcanisme actif (Islande, Martinique, Italie,...) des forages permettent d'obtenir des débits importants d'eau à **haute température** (150 à 400°C) suffisants pour des centrales électriques de petite puissance (Bouillante en Martinique, Islande..) et pour du chauffage urbain (ville de Reykjavik).

Toutefois ces eaux thermales profondes étant très chargées en sels minéraux, les problèmes de corrosion des circuits à haute température se révèlent redoutables et, en Islande, par exemple, à la Centrale de Krafla (60 MWe) située dans le champ volcanique actif de Myvatn, il a fallu réduire par adjonction d'eau froide la température de 400 à 290°C pour les générateurs de vapeur, d'où une perte notable de rendement.

Ailleurs, dans le sol, la température s'élève en moyenne de 3,3°C par 100m de profondeur. Si les roches s'y prêtent, en injectant de l'eau froide par un forage profond et en la récupérant par un autre forage à quelque distance de là, on peut obtenir des débits d'eau chaude à **température moyenne** (90° à 150°C) utilisables pour du chauffage de bâtiments. Mais la puissance thermique extraite est vite limitée par la conductibilité thermique relativement basse des roches, sous peine de voir le massif se refroidir et la ressource se tarir (expérimentations de Fontainebleau).

La géothermie mérite d'être développée partout où les sites s'y prêtent, mais ne paraît pas pouvoir jouer un rôle majeur à l'échelle de la planète.

Globalement, aujourd'hui, la production d'énergie renouvelable est largement dominée par l'hydraulique pour la génération d'électricité et la biomasse pour la production de chaleur.

L'Énergie Nucléaire.

L'énergie nucléaire, de développement récent et faisant appel à la fission des noyaux d'atomes fissiles tels que l'Uranium 235, se démarque profondément des autres sources d'énergie par les ordres de grandeur relatifs à la quantité d'énergie produite par unité de masse de matière combustible ou fissile.

| Production spécifique (électricité) par source | | (kWh) |
|--|---------------------------|-----------|
| 1 kg | Bois | 2 |
| | Charbon | 4 |
| | Fuel | 6 |
| 1 m ³ | Gaz | 6 |
| 1 kg | Uranium naturel | |
| | Centrales actuelles (REP) | 50 000 |
| | Surgénérateurs (RNR) | 3 500 000 |

Le nucléaire actuel est essentiellement utilisé pour la production d'électricité. Il fournit de l'énergie peu chère et en grande quantité, sans gaz à effet de serre.

La quasi-totalité des réacteurs utilisent la fission par neutrons lents (neutrons thermiques) nécessitant l'emploi d'Uranium 238 enrichi en Uranium 235 fissile (0,72% de l'Uranium naturel, le reste étant de l'Uranium 238).

L'Uranium 235 est obtenu par séparation isotopique et l'Uranium 238 résiduel est aujourd'hui stocké.

Plusieurs technologies de réacteurs existent, mais environ 80% des réacteurs sont des **Réacteurs à Eau sous Pression (REP) ou à Eau Bouillante (REB)**, dits à neutrons thermiques. Avec ces réacteurs une faible partie seulement de l'Uranium naturel est consommée. Bien qu'assez largement répandues à la surface de la planète, les ressources ainsi utilisées représentent environ un siècle d'exploitation.

Quant à l'**Energie de Fusion**, la faisabilité d'une production continue d'énergie est encore loin d'être établie. Il faudra ensuite résoudre de nombreux problèmes technologiques avant d'arriver au stade d'une production compétitive massive. Il est donc difficile aujourd'hui de prévoir une échéance. Fin du siècle ?

Les déchets.

Les activités humaines génèrent des déchets : solides, liquides, gazeux. Dilués dans l'environnement, ils créent des pollutions et constituent des risques majeurs pour nous même et nos descendants.

Il faut donc d'abord réduire autant que faire se peut leur production.

Ensuite, quand on peut les localiser, les traiter et stocker de façon sûre les déchets ultimes, les risques sont considérablement réduits. C'est un enjeu considérable pour le devenir des générations futures.

En matière d'énergie, la production de déchets diffère considérablement suivant les sources.

Les Effluents. (Déchets liquides ou gazeux)

Les effluents liquides sont assez aisément collectés et traités, et les résidus obtenus, mis sous forme solide (cf infra).

Les effluents gazeux proviennent essentiellement des combustibles fossiles ou de la combustion des matières organiques. On peut distinguer deux grandes familles :

- les polluants atmosphériques : anhydride sulfurique (SO₂), oxydes d'azote (NOX), poussières,... dangereux dans la basse atmosphère et qui peuvent être réduits par certains dispositifs tels que la désulfuration des combustibles, le traitement des fumées, la filtration,... au prix d'un accroissement des coûts.
- les Gaz à Effet de Serre, G.E.S., dont principalement le CO₂.

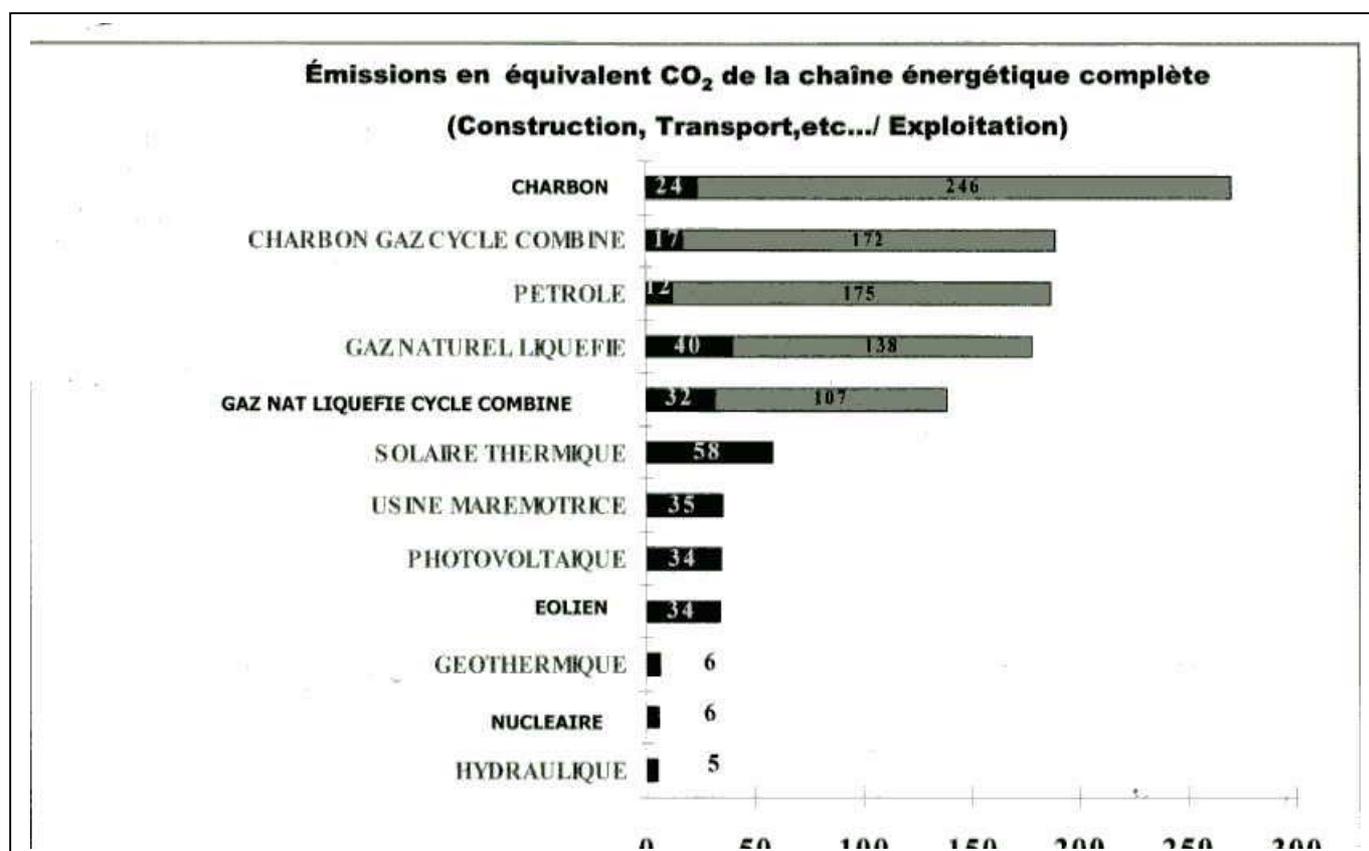


Fig.14

Il faut noter au passage, pour être exact, que les activités de construction et de transports consommant des combustibles fossiles, les énergies renouvelables et le nucléaire sont aussi à l'origine d'une faible production de CO₂.

Suivant les politiques choisies en matière d'énergies, les émissions de CO₂ sont très variables d'un pays à un autre.

| Emissions annuelles en CO₂ par habitant (tonnes de Carbone) | |
|---|------------|
| USA | 5,2 tonnes |
| RFA | 3,2 |
| Grande Bretagne | 3,0 |
| Japon | 2,1 |
| France | 1,8 |
| Monde | 1 |

En matière de production électrique, le tableau est encore plus contrasté.

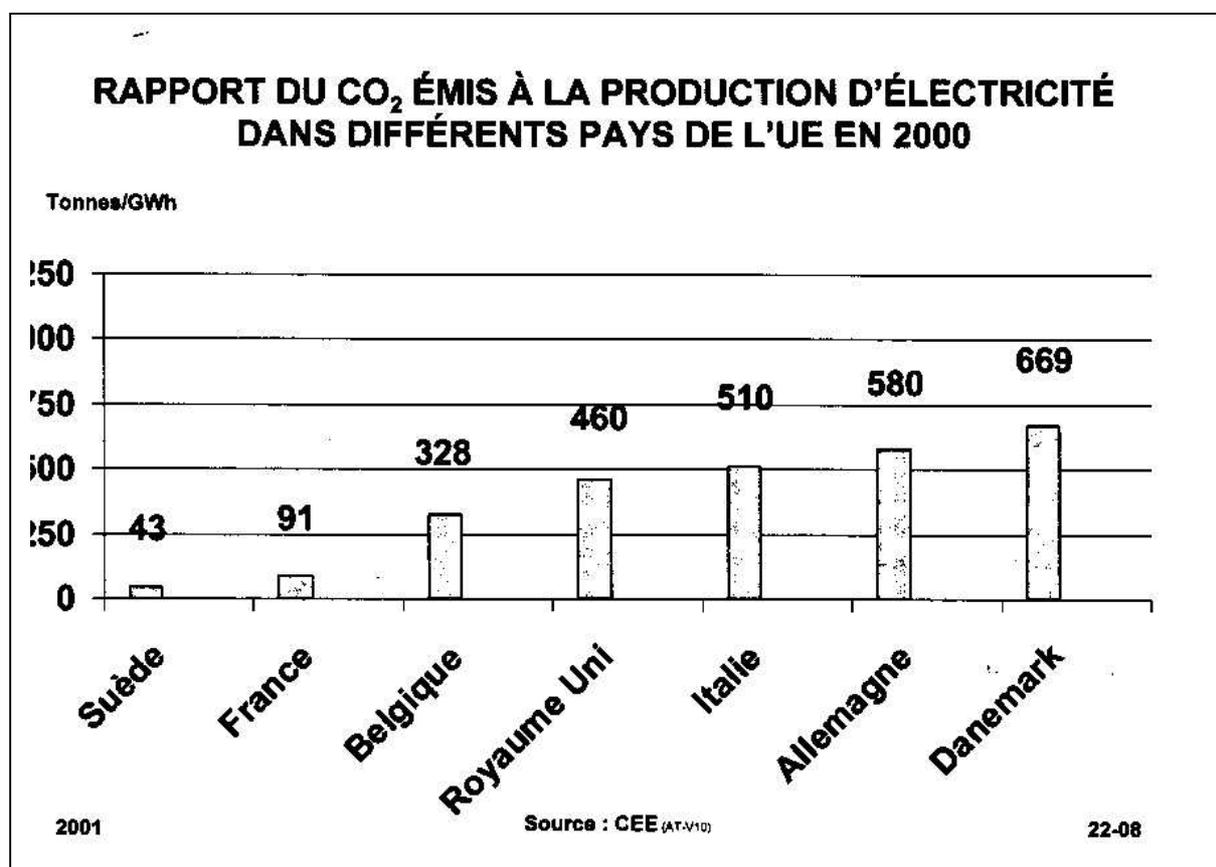


Fig.15

La France se situe favorablement, en particulier grâce au parc nucléaire, mais les émissions des transports, en croissance constituent un point inquiétant.

Etant donné l'énorme quantité relâchée de façon continue, l'idée de confiner le CO₂ directement à la source (séquestration) apparaît actuellement assez illusoire (encore un problème d'ordre de grandeur !).

Les déchets solides.

Mis à part le nucléaire, les déchets liés à l'énergie (cendres, résidus de traitement d'effluents) relèvent de la gestion plus générale des déchets industriels.

Aujourd'hui, en France, il est produit par personne et par an, environ 800 kg de déchets industriels, dont 100 kg de déchets fortement toxiques (Déchets Industriels Spéciaux), déchets ultimes, dangereux pour l'éternité, et dont le stockage définitif devrait relever d'une gestion similaire à celle des déchets nucléaires.

Nos activités nucléaires (dont 80% de notre électricité) produisent environ 1kg de déchets par personne et par an :

- 10 grammes (issus quasi-totalement du traitement des combustibles irradiés) sont des déchets de Très Haute Activité, à vie longue (périodes de plusieurs milliers d'années). Ils sont confinés dans la matrice de verres spéciaux, coulés dans des containers métalliques, ce qui assure une excellente résistance aux agressions externes pour de très longues durées. Ils sont actuellement entreposés dans des bâtiments spécialisés et sont destinés à être placés à terme dans un stockage définitif.

Plusieurs solutions de stockage existent. La loi votée en 1991 (Loi Bataille) a fixé un programme de Recherche et Développement et prévu une échéance en 2006 pour examen au Parlement et choix. Parmi les axes de recherche du programme de R et D figure en particulier la transmutation des déchets à vie longue en déchets à vie courte par irradiation dans des RNR, dont la faisabilité a été établie expérimentalement fin des années 80. Si ce procédé se révélait viable au niveau industriel, le volume des déchets de haute activité en serait encore considérablement réduit.

Il faut remarquer que déjà le faible volume produit par an permet des solutions sophistiquées et des coûts par m³ stocké élevés avec une incidence mineure sur le kWh.

- le reste, (produits de période quelques dizaines d'années au plus) après conditionnement, est stocké en surface dans des Centres spécialisés (Soulaines, en France), dans des structures adaptées qui les protègent des agressions externes.

Le problème des déchets nucléaires relève dès aujourd'hui beaucoup plus des décisions politiques et de l'acceptabilité par l'opinion que de la technique.

Paramètres économiques.

Les paramètres économiques ont évidemment une importance majeure dans l'élaboration d'une politique énergétique.

Un bon exemple est donné par l'analyse des coûts de production de l'électricité très différents suivant les sources :

- investissement
- exploitation
- combustible

dits coûts « internes » (car ne prenant pas en compte les coûts liés à l'environnement, la santé, etc,...conséquences de la production, dits coûts externes).

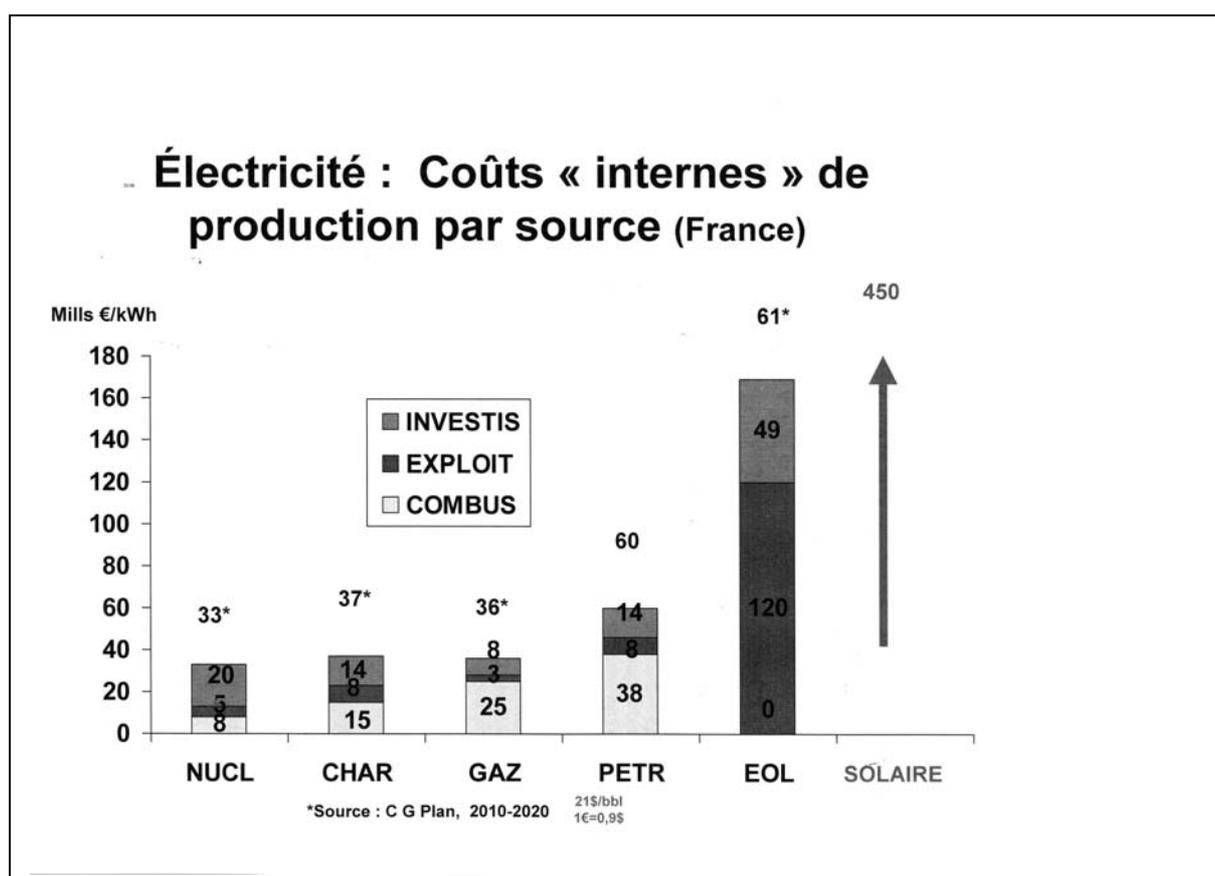


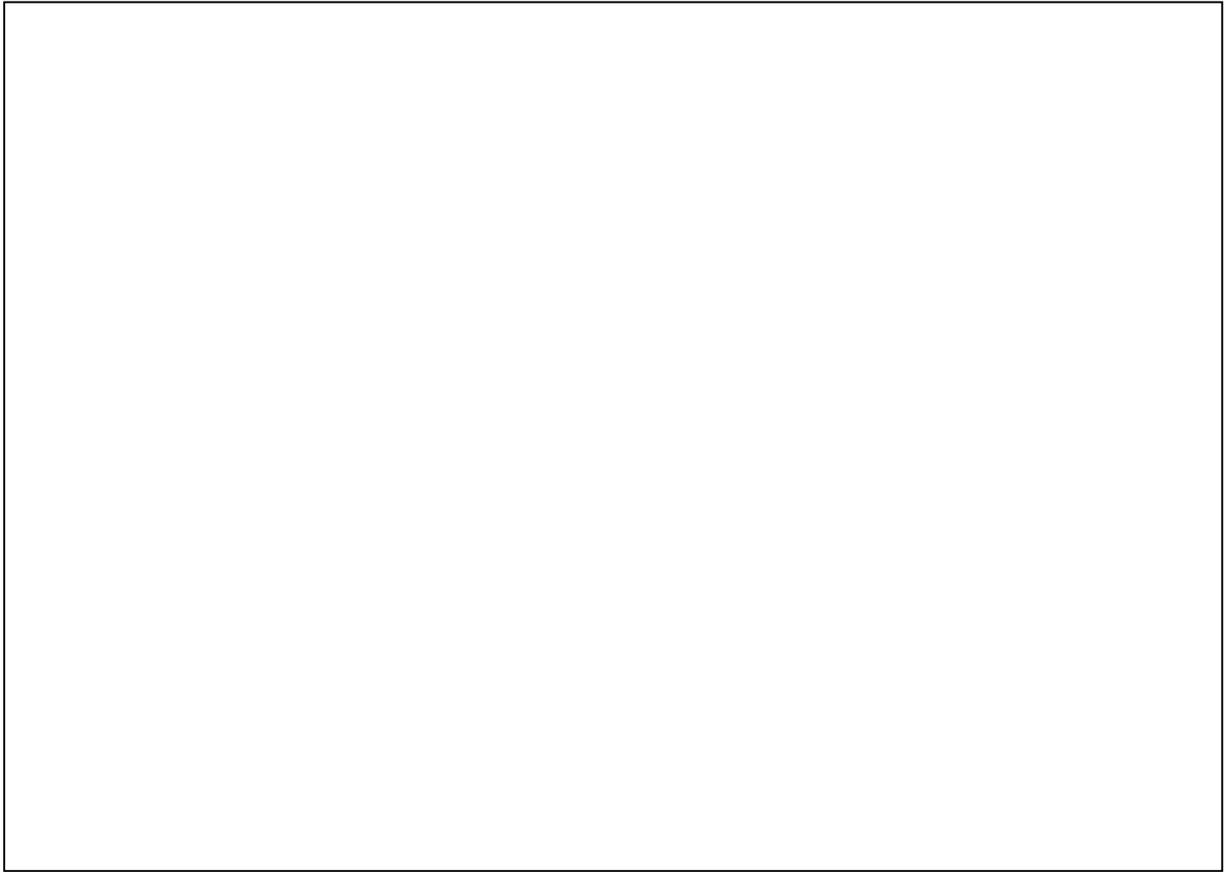
Fig.16

NB : Attention ! Cette étude du Commissariat général au Plan a été faite alors que les cours du pétrole et le taux €/€ étaient très différents des valeurs actuelles.

Ainsi, alors que pour les sources fossiles le coût des combustibles est prépondérant (d'où grande sensibilité à la variation des cours), pour le nucléaire et les énergies renouvelables ce sont les coûts d'investissements.

L'estimation des coûts externes est beaucoup plus difficile : il faut définir des valeurs pour le coût des rejets de G.E.S., l'incidence sur la santé des pollutions, etc... ?

Le Commissariat au Plan a effectué une étude prospective complétant la précédente qui, malgré les incertitudes, met bien en évidence leur importance pour les sources fossiles et l'intérêt des énergies renouvelables et du nucléaire.



Quel Futur ?

Avec l'évolution démographique, l'effet de serre et l'épuisement des ressources fossiles, l'humanité est confrontée – si elle décide d'éviter le pire – à des changements profonds de ses modes de production et de consommation. Pour cela, des mesures drastiques demandant un grand courage politique devront être prises au niveau planétaire. La ratification du protocole de Kyoto nous donne un avant goût des difficultés....

En janvier 2003, le Premier Ministre, en France, a lancé le défi de réduire de 75% les émissions françaises de G.E.S. d'ici 2050, ce qui s'inscrit dans la ligne tracée par les spécialistes du climat. C'est un objectif très ambitieux, vers une civilisation à « bas Carbone » ; toutefois, le plan d'actions à entreprendre pour l'atteindre n'est pas encore connu.

De toute évidence, il n'y a pas de solutions miracles et il faut agir simultanément dans plusieurs directions :

- économiser l'énergie, c'est-à-dire faire plus et mieux avec moins,
- utiliser toutes les sources d'énergie en cherchant les meilleurs compromis énergétiques compte tenu des contraintes et des caractéristiques particulières des différentes sources possibles, d'où une réduction progressive des sources fossiles et un appel croissant à l'énergie nucléaire et aux énergies renouvelables,
- mener des actions continues de Recherche et Développement pour faire sauter les verrous tels que le stockage de l'électricité : des progrès importants dans ce domaine permettraient une bien meilleure utilisation des énergies renouvelables et peut être une profonde évolution dans le domaine des transports qui constituent un des gros points noirs actuels.
- défricher de nouvelles voies : par exemple, l'emploi massif de l'hydrogène, vecteur énergétique, permettrait en particulier de s'affranchir de la pollution des transports. Mais encore faudrait-il produire l'hydrogène autrement qu'à partir de produits pétroliers, directement par électrolyse ou dissociation de l'eau à très haute température. Les réacteurs nucléaires à gaz à Très Haute Température paraissent pouvoir fournir une solution.

On peut toujours penser que des ruptures technologiques nous ouvriront dans le futur de nouvelles voies inimaginables aujourd'hui. Mais le temps nécessaire entre la découverte et son utilisation effective fait que ceci ne pourra jouer sans doute que pour le très long terme.

Mais pour pouvoir mener à bien de telles tâches, l'acceptation par le public est incontournable. Il apparaît plus que jamais indispensable de développer des actions d'information et de formation intenses et rigoureuses, pour s'affranchir des visions déformantes largement répandues par les médias. L'apprentissage du raisonnement rigoureux et objectif doit commencer à l'Ecole.

Et, dans le domaine de la Physique, les lois Physiques et les ordres de grandeur sont incontournables. Ainsi, le moineau et l'autruche sont tous deux des oiseaux. Mais leurs dimensions sont très différentes : d'où l'un vole, l'autre pas.

J'ai essayé dans cet article de montrer comment, en matière d'énergies, il en était de même.

Jean MEGY
 Professeur Honoraire Ecole des Mines de Paris
 Union Régionale des Ingénieurs et Scientifiques Provence

