

Quelles tendances pour les consommations d'énergie dans le monde : ressources, actions, long terme ?

Michel COMBARNOUS, Professeur Émérite

Professeur émérite à l'Université Bordeaux 1

Professeur associé à l'Université de Gabès

E-mail : michel.combarnous@laposte.net

Mots-clés : Biomasses, économies d'énergie, combustibles fossiles, principe d'économie, principe de précaution, consommation d'énergie primaire, énergies renouvelables.

Résumé

Ce texte développe quelques idées générales sur le contexte énergétique mondial dans une perspective résolument anthropique : quels sont les besoins en énergie pour la population mondiale à court, moyen et long termes ? Comment peuvent-ils être satisfaits à moyen terme alors que la population croît encore ? Quel équilibre promouvoir entre les diverses sources d'énergie ? Quels liens avec le futur proche d'un système « Surface Terrestre – Atmosphère » (STA) nécessairement limité ? Quelles recommandations définir pour la gestion de l'énergie aux différentes échelles, locales, régionales et mondiale ?

INTRODUCTION

A titre d'introduction, nous souhaitons développer quelques remarques et rappeler quelques données qui sont autant de jalons à avoir en tête lorsqu'on examine les problèmes énergétiques aux échelles auxquelles nous nous situons :

- Nous ne considérons pas ici les diverses formes d'énergie utilisées par l'espèce humaine, formes que l'on pourrait qualifier d'implicites, et qui correspondent à l'énergie solaire mobilisée pour la croissance des plantes, dans l'agriculture, pour le développement des forêts, pour l'élevage, ou même pour le séchage naturel des produits agricoles. Bien que ces aspects énergétiques soient très importants, en particulier quand on s'intéresse aux divers aspects de la production de nourriture et de l'alimentation mondiale (Bonnet et Combarnous, 1996 ; Bonnet et Combarnous, 2001), ils ne sont pas intégrés à cette présentation qui s'attache davantage aux formes « explicites » de l'énergie.
- Quand on manipule des données concernant l'énergie, il convient toujours, lorsqu'on agrège les données de faire clairement la distinction entre les sources d'énergie et les vecteurs énergétiques. Le cas le plus clair, en la matière, est celui de l'électricité qui est plus souvent un vecteur énergétique qu'une source d'énergie à proprement parler. Ainsi quand on intégrera toutes les productions d'électricité, il conviendra de prendre en compte les différents rendements de la conversion entre les sources originales et l'électricité : hydro-électricité, conversion nucléaire,

ou production à partir du charbon, du pétrole et du gaz, par combustion.

- Dans le domaine des consommations globales d'énergie, deux unités de puissance sont le plus fréquemment utilisées, le Watt et la tonne d'équivalent pétrole par an. Une équivalence simple entre ces deux unités peut être établie à partir du pouvoir de combustion supérieur moyen du pétrole. Elle conduit à considérer que la tep/an est sensiblement équivalente à 1400 W.
- En ce qui concerne les équivalences générales, on peut reprendre les indications internationales, pour les produits pétroliers (1 t = 1 tep), pour le charbon (1 t = 0,667 tep), pour le gaz (1000 m³ = 0,9 tep), et pour l'électricité (1 MWh = 0,083 tep, comme indiqué ci-dessus).

Ce texte reprend, parmi d'autres, un certain nombre d'éléments présentés dans le premier chapitre d'un ouvrage récent consacré aux politiques énergétiques et aux énergies renouvelables (Combarnous et Bonnet, 2008).

Nomenclature

baril	volume de pétrole = 159 litres
FAO	Food and Agricultural Organization of U.N.
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
G	Giga, préfixe pour milliard = 10 ⁹
Gt	gigatonne = milliard de tonnes
kWh	énergie = 1 kW de puissance, mis en œuvre pendant 1 heure. Ex : 1 GkWh = 10 ⁹ kWh
M	Mega, préfixe pour million = 10 ⁶
MMW	10 ¹² watts

MWe	puissance : MW sous forme électrique
MWth	puissance : MW sous forme thermique
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ppm	partie par million ; e.g. 370 ppm de CO ₂ correspond à 370 molécules pour 10 ⁶ en tout
STA	« Surface Terrestre – Atmosphère »
tep	tonne d'équivalent pétrole (≅ 7,3 barils)
tep/an	1 tonne d'équivalent pétrole sur une année
W	unité de puissance : 1 Joule par seconde
Wh	unité d'énergie : 1 W délivré pendant 1 heure

Évolution de la population mondiale

La croissance de la population mondiale est le premier élément à considérer dès lors que l'on s'intéresse aux consommations, actuelles et futures. Après une période récente, correspondant aux dernières décennies, que l'on a parfois qualifiée comme « exponentielle », sous-entendant ainsi l'impossibilité dans laquelle on était de maîtriser son évolution, il apparaît clairement que nous vivons ce que les démographes appellent une « transition démographique » (Léridon, 2003 ; Lutz et al., 2001).

La période actuelle correspondrait alors sensiblement au point d'inflexion d'une courbe « en S » décrivant l'évolution de la population mondiale (Figure 1). Nous sommes actuellement 6,5 milliards d'habitants et nous pourrions être, à moyen terme, 8 à 10 milliards aux horizons 2050-2100 (FAO, 2008).

Quand on regarde les évolutions de la population mondiale, plus encore que la croissance à venir, c'est la croissance durant les deux derniers siècles qui apparaît comme spectaculaire, plus encore peut-être que ce qui nous attend demain.

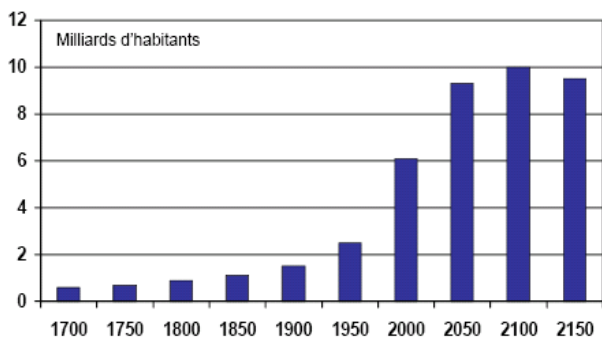


Figure 1 : Evolutions de la population mondiale, passée et future (avec l'hypothèse, après 2007, d'un taux de fécondité de 2,07, d'après FAO, 2008)

Consommation mondiale totale

Sont évoquées ici les sources (ou vecteurs) d'énergie « explicites ». Elles correspondent, d'une part, aux grands éléments que sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), le nucléaire et l'hydraulique et, d'autre part, les autres formes moins concentrées, souvent renouvelables d'ailleurs, telles que l'énergie éolienne, l'énergie des mers et des marées, l'énergie

solaire (thermique et photovoltaïque), l'énergie géothermique et les nombreux aspects de la biomasse (le bois bien sûr, d'autres produits de combustion, les biogaz et les biocarburants en général).

Quand on s'intéresse au recueil des données, les situations de ces deux groupes sont relativement différentes. En ce qui concerne le premier groupe des grands vecteurs énergétiques, les données sont collectées depuis longtemps et d'une manière relativement homogène (BP, 2006). En ce qui concerne le second groupe, plus hétérogène et correspondant à des sources très dispersées, les statistiques sont moins faciles à établir. On considère que ce second groupe correspond à environ 10 à 20 % des consommations explicites.

Les cinq grands vecteurs

A l'échelle globale, les principales sources d'énergie correspondent aux cinq éléments majeurs évoqués ci-dessus (auxquels il convient cependant d'ajouter le bois et le charbon de bois). L'ensemble est équivalent à près de 15000 « centrales virtuelles », chacune d'elles produisant en continu et sans aucun arrêt 1000 MW environ !

- Les combustibles fossiles, résultats d'un processus ancien et de longue durée de stockage d'énergie solaire, sont les principales sources, avec pour 2005 (10,5 Gtep), le pétrole (37 %), le charbon (28 %) et le gaz (23 %).
- En ce qui concerne les émissions de CO₂ lors de la combustion de ces produits, tout naturellement c'est, bien sûr, le charbon qui est le plus « polluant », suivi par le pétrole, puis le gaz naturel, dont le contenu en hydrogène est le plus fort.
- L'énergie nucléaire (6 %), dont seule est notée ici la production d'électricité, électricité qui est le vecteur à plus forte valeur « exergetique ».
- L'électricité produite par voie hydraulique (6 %) qui est une forme d'énergie solaire renouvelable.

Ces pourcentages correspondant à l'année 2005 prennent en compte une règle d'équivalence, pour les sources primaires d'électricité, un rendement d'équivalence de la conversion « chaleur versus électricité » de 38 % (BP, 2006).

Pour le futur, quelques remarques complémentaires peuvent être faites sur les combustibles fossiles :

- Parmi les combustibles fossiles, le charbon est, de loin, celui dont les réserves estimées sont les plus importantes. Elles sont souvent estimées, en incluant le lignite, comme équivalente à environ 800 Gtep, c'est-à-dire plusieurs siècles au même rythme qu'aujourd'hui (WEC, 1998).
- L'usage du gaz, dont les réserves sont estimées à 150 Gtep (environ 170 MMm³), soit plus d'un demi-siècle de production, pour un rythme de consommation analogue à celui des années 2000 (les réserves ultimes pourraient être 3 à 4 fois plus importantes) s'est développé très régulièrement ces dernières années (Figure 2), compte tenu de

la grande flexibilité de son usage d'une part et, d'autre part, d'une certaine « inertie » liée à la mise en place des réseaux de distributions locaux comme intercontinentaux.

- Le pétrole, dont les réserves récupérables (estimées à environ 250 Gtep) ont sensiblement la même ampleur que celles du gaz. En ce qui concerne le pétrole, il convient de noter que l'évolution des techniques de récupération assistée, très fortement liée aux évolutions du coût du pétrole, jouera un rôle important dans l'ampleur des quantités à produire effectivement, qui, par exemple, comprennent maintenant les huiles très lourdes (Lanier, 1998) et sont, chaque année, réévaluées à la hausse (Alazard et Montadert, 1993). Il en est également ainsi de l'appréciation de l'occurrence de ce que l'on nomme le « peak oil », qui correspond à la date du maximum de production annuelle du pétrole et dont les estimations restent toujours complexes.

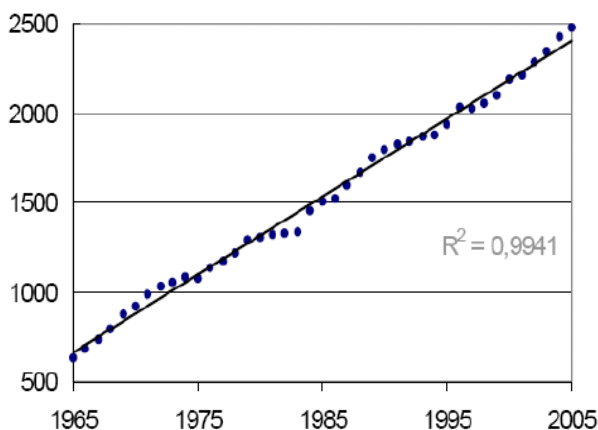


Figure 2 : L'évolution de la consommation du gaz dans le monde : une évolution remarquablement linéaire

- Les chiffres précédents ne font pas référence à d'autres sources d'hydrocarbures. Tout d'abord les sables bitumineux : environ 50 Gtep de réserves prouvées, en début d'exploitation déjà, et environ 300 Gtep de réserves « connues » (Alpern et Lemos de Sousa, 2002). Puis les schistes bitumineux dont les conditions d'exploitation sont moins nettes, et enfin, si ces informations ont un « avenir », les hydrates de méthane (près de 700 Gtep dans le permafrost et bien plus encore dans les océans (McDonald, 1990).

Enfin, toujours à propos des combustibles fossiles, trois points doivent être mis en lumière :

- Charbon, pétrole et gaz sont les sources principales de la production anthropique de gaz carbonique (Figure 3). Le bois et les autres produits de la biomasse contemporaine produisent également, lors de leur combustion, du CO₂, mais cette production fait intrinsèquement partie des différentes boucles d'échanges entre les principaux compartiments du système général « Surface Terrestre – Atmosphère » et ne peut donc pas être considérée comme une production nette.

- Le rôle important, de plus en plus important (Figure 4), des produits pétroliers comme source des carburants pour les transports, rôle lié à la facilité d'usage d'un carburant liquide et au fort contenu volumique énergétique du carburant.

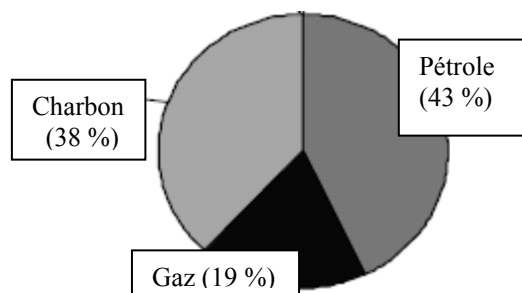


Figure 3 : Les sources de la production de 8 Gt de carbone, lors de la combustion des produits fossiles, ou en équivalent CO₂ : $(44/12) \times 8 \approx 30$ Gt/an

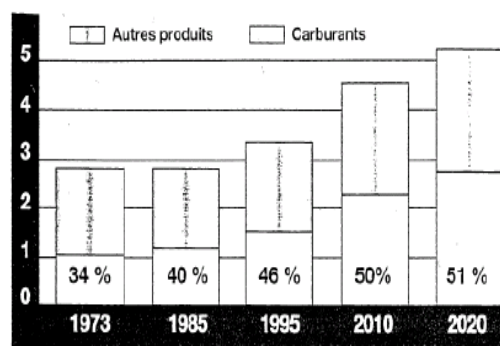


Figure 4 : Evolution du rôle du seul pétrole comme source de carburants pour les transports, comparé à l'usage d'autres produits pétroliers, en Gtep/an (cliché IFP)

- Il n'est donc alors pas surprenant d'observer l'importance des transports dans les émissions de gaz carbonique, dans les émissions diffuses de surcroît (Figure 5).

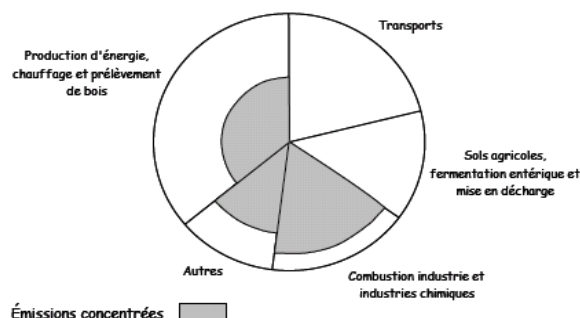


Figure 5 : Les sources d'émissions mondiales de CO₂, durant l'année 2002 (Combarous et Prieur, 2003)

Le bois et les autres biomasses

Les biomasses végétales ont été les premières sources d'énergie utilisées par l'espèce humaine. Au-delà du rôle du bois, de nombreuses autres composantes de la biomasse sont utilisées, d'usages très dispersés et donc souvent difficiles à estimer. La biomasse végétale terrestre constitue un important stock de carbone, à l'échelle de la planète : environ

500Gt de carbone, pour une masse totale de biomasse d'environ 2000 Gt (Batjes, 1999). D'importants flux de carbone sont échangés entre les biomasses végétales et l'atmosphère (environ 110 Gt C/an). Les flux échangés entre l'atmosphère et les océans sont d'une amplitude comparable (environ 90 Gt C/an). Comparés aux flux échangés entre ces trois grands compartiments, la source anthropique de CO₂ émis est bien inférieure, mais, à l'inverse des autres flux, elle n'est pas compensée par des flux opposés équivalents (Figure 6, année 2000 environ).

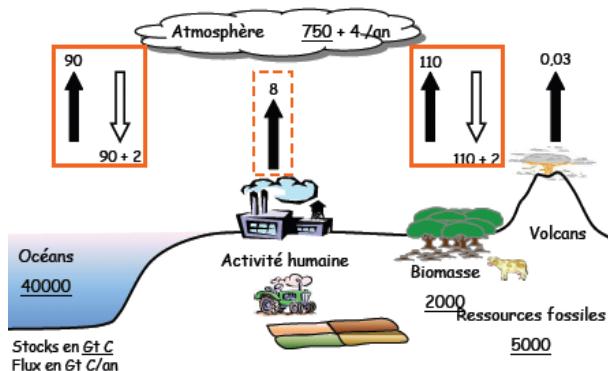


Figure 6 : Les flux globaux de carbone et les stocks entre les différents compartiments du système « STA »

Le bois, en tant que source d'énergie, a une importance significative dans l'approvisionnement mondial en énergie, sensiblement de la même ampleur, par exemple, que l'énergie nucléaire ou l'énergie hydraulique classique. Cette contribution ne peut pas être aussi facilement déterminée que celle des autres grands vecteurs énergétiques. Elle n'est donc pas toujours systématiquement intégrée dans tous les bilans locaux, régionaux ou globaux. Pour certains pays en développement, le bois peut contribuer jusqu'à 80% de l'énergie utilisée à des fins domestiques, et de 40 à 80 % (dans les cas extrêmes) dans les bilans nationaux sur les sources primaires (Prieur et al., 2004).

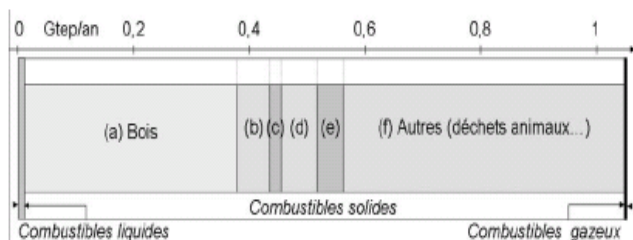


Figure 7 : La biomasse énergie, en 2000 : combustibles gazeux, liquides et solides : (a) bois, (b) charbon de bois, (c) résidus de bois, (d) liqueur noire, (e) bagasse et (f) autres déchets (Prieur et al., 2004)

Sur la figure 7, les différents types de biomasses et leurs poids relatifs sont grossièrement présentés, avec une mention spéciale pour les combustibles liquides (à gauche) et gazeux (à droite). Si, actuellement, ils ne représentent que des apports modestes aux bilans globaux, ils apparaissent néanmoins prometteurs dans certaines situations : (a) utilisation du biogaz pour des productions de chaleur et d'électricité et (b) production

de biocarburants à partir de programmes de développement agricoles, dans certaines régions.

Une grande variété pour les autres sources

Quelques autres formes de production d'énergie, certaines d'entre elles ayant un avenir prometteur, doivent également être mentionnées :

- L'énergie éolienne : en suivant l'usage du bois et d'autres produits végétaux comme source d'énergie, le vent a été très tôt utilisé comme source d'énergie, à travers le développement de nombreux moulins à vent dans les siècles derniers. Après un fort déclin, en particulier en Europe et en Amérique du Nord, lié au développement d'autres sources d'énergie, l'énergie éolienne revient au premier plan sous l'effet combiné des crises énergétiques et de progrès techniques significatifs, notamment dans le domaine des matériaux. D'où le développement important de cette forme de production d'énergie, à terre mais aussi en mer, à proximité des côtes (Figure 8).

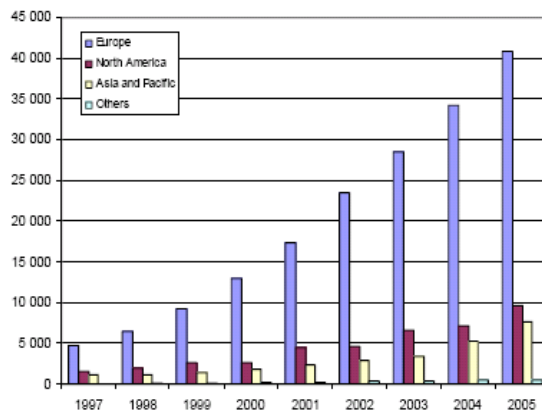


Figure 8 : Evolution des capacités de production éolienne, exprimées en MW

- L'énergie solaire directe : c'est un lieu commun de rappeler l'importance du flux de chaleur atteignant la Terre. Sa valeur, $1,7 \cdot 10^{17}$ W (170000 MMW), peut aisément être comparée à la consommation d'énergie anthropique, pour l'ensemble de nos besoins, qui était, pour l'année 2005, d'environ 10,5 Gtep pour les 5 grandes formes d'énergie primaire évoquées ci-dessus, soit près de 10000 fois moins ! On ne sera donc pas surpris de constater un usage direct, ancien et naturel du soleil, pour les cultures et l'élevage (une forme de consommations d'énergie implicites), comme pour le séchage de nombreux produits. Cette forme d'énergie peut-être exploitée soit sous sa forme « naturelle », relativement dispersée, soit avec l'aide de système de concentration.
- L'énergie solaire comme source directe de production d'électricité, par la voie photovoltaïque connaît actuellement un très fort développement, avec les effets combinés du renchérissement général de l'énergie et des progrès considérables faits dans le domaine des matériaux photovoltaïques en termes d'efficacité accrue et de baisse des coûts. Ceci sans oublier une autre

voie de production d'électricité à l'aide de boucles thermodynamiques performantes (moteurs Stirling, cycles thermo-chimiques, etc.).

- L'hydro-électricité représente la majeure partie, actuellement, de la contribution de l'eau à la production d'énergie, à travers l'exploitation de différences de potentiel gravitaire (i.e. des différences d'altitudes). Mais l'eau liquide offre d'autres possibilités qui sont maintenant revisitées, à des fins d'exploitation : exploitation des courants (les « hydroliennes »), de la houle et des vagues. En 1966, était inaugurée, en France, sur le site de La Rance, une usine marée-motrice qui, avec une puissance moyenne de 250 MW, a produit 16 GkWh pendant ses trente premières années d'exploitation.
- L'énergie géothermique : même si le flux de chaleur géothermique, venant des profondeurs, est très très faible en regard du flux reçu du soleil, un certain nombre de projets de récupération, le plus souvent à l'aide de l'eau utilisée comme fluide caloporteur, de l'énergie accumulée dans les couches superficielles de la croûte terrestre ont vu le jour. Selon les niveaux de température atteints par l'eau chaude produite en surface, on parlera de basse énergie, d'énergie moyenne ou de haute énergie. Lorsque la température est supérieure à 150°C (« haute énergie »), la production d'électricité est possible ; au début des années 1990, la production mondiale était d'environ 7000 MWe (avec dans l'ordre décroissant : Etats-Unis, Philippines, Mexique, Italie, Japon,...), tandis que 500 MWe étaient également produits à partir d'eau « moyenne énergie » (90°C-150°C). En ce qui concerne la géothermie « basse énergie », elle est principalement dédiée au chauffage des habitations et bâtiments, en Chine, aux Etats-Unis, en Islande, France, Japon,..., avec une puissance mobilisée supérieure à 10000 MWth. Les prédictions, à l'échelle mondiale, pour 2010, correspondent à environ 15000 MWe et 35000 MWth.

Il est à noter qu'à l'exception des marées et de la géothermie (le caractère renouvelable de cette dernière forme d'énergie peut parfois être discuté), toutes les énergies évoquées ci-dessus, comme l'énergie hydro-électrique, les biomasses,... trouvent leur origine dans l'impact du rayonnement solaire sur le système «S.T.A. ». Ces formes d'énergie renouvelable peuvent être considérées comme des expressions variées de l'énergie solaire.

Évolution à court et moyen termes

La consommation individuelle, un point clé

Considérons la consommation individuelle moyenne d'énergie par habitant, à l'échelle mondiale (Combarrous et Prieur, 2003). Durant les trente dernières années (Figure 9), elle est restée sensiblement constante, positionnée à environ 1,5 tep par habitant et par an (une autre donnée souvent citée,

plus exhaustive, est de 1,6). Cette observation, qui pourrait surprendre, est le résultat de deux effets qui se compensent :

- Les pays où la consommation individuelle est importante n'ont pas encore modifié fortement leur consommation mais leur poids relatif, en termes de populations se réduit avec le temps (1,1 milliard en 1975 et 1,4 milliard en 2005, à mettre en regard de 2,9 et 5,1 milliards pour les pays en développement).
- Dans les pays moins développés, dont les populations, nombreuses, croissent fortement, les consommations individuelles croissent également.

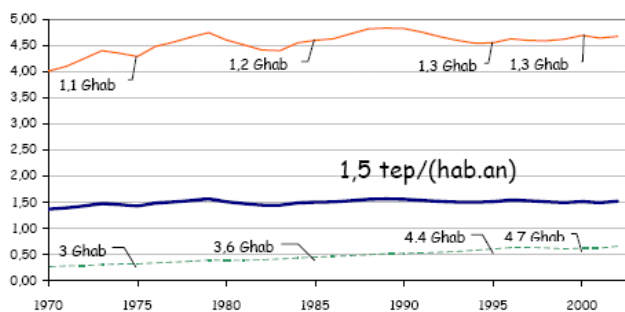


Figure 9 : Consommation individuelle d'énergie, à l'échelle de la planète, des pays développés (courbe d'en haut), des pays en développement (courbe du bas) et moyenne (courbe centrale) (BP, FAO)

Ces observations générales sur les deux groupes de consommateurs évoqués doivent être complétées par des observations plus précises sur l'hétérogénéité de chacun des groupes. On note ainsi (Figure 10) les très fortes valeurs de la consommation individuelle d'énergie en Amérique du Nord (plus de 5 fois plus que la moyenne mondiale) tandis que l'Inde et la Chine, tout particulièrement, ont des consommations individuelles encore faibles mais qui ont cru très fortement ces 40 dernières années.

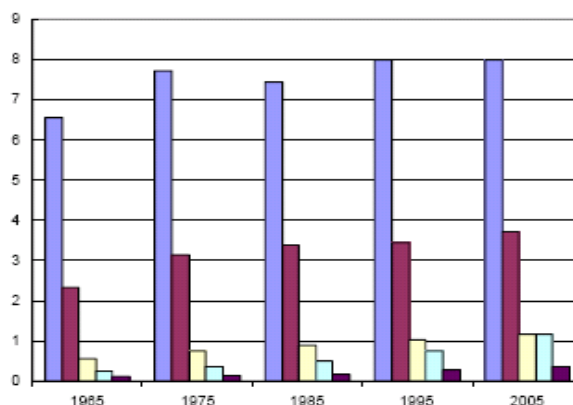


Figure 10 : Consommations individuelles d'énergie (de gauche à droite : USA/Canada, Europe, Amérique Latine, Chine, Inde)

L'observation d'une stabilité relative de la consommation individuelle moyenne peut être la base d'une estimation relativement robuste des besoins énergétiques, au moins à court terme. Comme la population mondiale croît à un rythme proche de 200000 habitants par jour (bilan des naissances et des décès), la consommation mondiale doit croître, chaque

jour, d'un incrément correspondant à 300000 tep/an. Ce qui correspond sensiblement à près de 500 MW d'accroissement de la production annuelle, chaque jour.

Cette indication est une bonne mesure de l'amplitude de la tâche à court et moyen termes. Quelques conclusions peuvent se déduire immédiatement de cette observation.

Les incontournables combustibles fossiles

De ce que nous venons de voir, plusieurs points peuvent être repris : (a) la nécessité d'un important accroissement chaque jour des capacités de production, (b) une très forte inertie dans les évolutions en fonction du temps des poids relatifs des différentes formes d'énergie utilisables, (c) le rôle encore très important des combustibles fossiles (environ 75 %) et (d) les réserves totales, sous toutes les formes possibles de combustibles fossiles qui sont encore importantes, à court et moyen termes.

Dans ce contexte, les combustibles fossiles carbonés joueront, comme maintenant un rôle important, durant les toutes prochaines décennies, même si, bien sûr, de fortes modifications dans la production et l'usage de ces produits devront être définies et mises en œuvre.

Conséquences : coût de l'énergie et effet de serre

Cette observation a des conséquences importantes et immédiates. Ce texte n'aborde pas dans le détail certains des aspects géopolitiques liés aux approvisionnements en énergie, mais plusieurs points sont à noter. En ce qui concerne le pétrole, le Moyen-Orient a, bien sûr, une position de leader, avec l'Amérique du Sud et l'Afrique. Pour le gaz, Russie et Moyen-Orient et quelques autres territoires jouent un rôle important, la répartition géographique des zones charbonnières étant plus équilibrée.

Il ne fait pas de doute que la méthode la plus aisée à mettre en œuvre, pour satisfaire la demande d'un fort accroissement de la demande, correspondant à l'accroissement de la population mondiale, est d'avoir davantage encore recours aux produits carbonés.

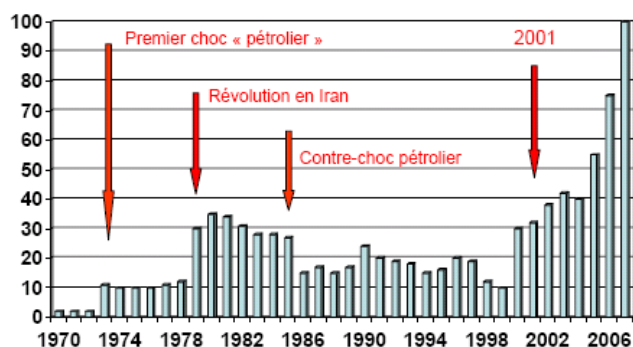


Figure 11 : Les grands traits de l'évolution du prix du pétrole, en dollars courants par baril (cette monnaie varie elle-aussi)

C'est bien cette donnée qui est, par exemple, la principale justification d'une forte montée du prix du

pétrole qui a cessé de subir tel ou tel effet lié à la conjoncture (premier choc pétrolier, révolution en Iran, contre-choc pétrolier,...) pour connaître, depuis 2000, une tendance à la hausse qui est maintenant structurelle (Figure 11).

En dépit des difficultés associées, pour certains pays, à cette évolution, il est clair qu'en matière de développement durable une telle tendance est favorable. En effet, les réserves, particulièrement en pétrole et gaz, étant limitées, on peut constater qu'en vertu d'un principe que l'on pourrait appeler « principe d'économie » l'augmentation du coût du pétrole et de l'énergie en général est un bon moyen de réduire la demande, tout en aidant également à la promotion de procédés et de techniques permettant des réductions de consommations, comme d'autres modes de production d'énergie.

Dans le même temps, à cause de la forte contribution des produits de l'activité humaine sur l'accroissement spectaculaire de l'effet de serre (production de CO₂, émissions de CH₄,...), personne ne peut nier l'influence de nos approvisionnements énergétiques sur notre environnement.

En suivant les observations des communautés scientifiques impliquées dans ces sujets (voir par exemple les rapports du GIEC), il faut bien noter que depuis le début du siècle dernier, concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère et température moyenne de la surface du système « S.T.A. » ont fortement augmenté.

Ainsi, depuis le début de l'ère industrielle, la température moyenne de la surface de la Terre s'est accrue d'environ 0,6°C, avec un accroissement attendu, dans les prochaines décennies, qui, suivant divers scénarios, se situerait entre 1,5 et 6°C. Dans les mêmes périodes, les concentrations en CO₂, principal contributeur, avec l'eau et le méthane, à l'effet de serre, se sont accrues de 280 ppm à 370 ppm (aux environs de l'année 2000), avec un accroissement possible, jusqu'en 2100, à des niveaux compris entre 550 ppm et 1000 ppm !

Les nécessaires préoccupations de développement durable impliquent alors : (a) une réduction aussi forte que possible de l'appel aux combustibles carbonés, ne serait-ce que parce que leurs réserves sont très limitées, au moins pour le pétrole et le gaz et (b) des recherches et travaux sur toutes les techniques permettant de réduire les émissions de carbone dans l'atmosphère, ou, à tout le moins, la mise en œuvre de techniques de capture et de séquestration du CO₂.

L'énergie pour tous, est-ce possible ?

Avant les crises pétrolières des années 1970, la consommation d'énergie mondiale croissait plus vite que la population elle-même. La consommation individuelle croissait, avec le temps, au fur et à mesure des développements techniques et de leur diffusion à travers le monde.

Les ajustements du prix du pétrole brut, et les évolutions corrélatives des prix des autres formes d'énergie, ont conduit à un « freinage » brutal de cette évolution. Ainsi, par exemple (Pharabod, 1989), entre 1973 et 1985 :

- Dans l'industrie, au Japon, le coût énergétique de la tonne d'acier a décliné de 0,43 tep à 0,34 – une réduction d'environ 20 %.
- Dans le domaine des transports terrestres, aux Etats-Unis, la consommation des voitures, exprimée en tep/an, a décliné de 2,25 à 1,69 – soit une réduction de 25 % due aux changements d'habitudes et à la réduction de la masse des véhicules.
- En France, dans le domaine de l'habitat, la consommation par famille a été réduite de 1,96 tep/an à 1,58 – soit une réduction de 20 %.

Depuis 1975, l'évolution de la consommation d'énergie est restée analogue à celle de la population, toutes deux se développant au même rythme (Figure 12).

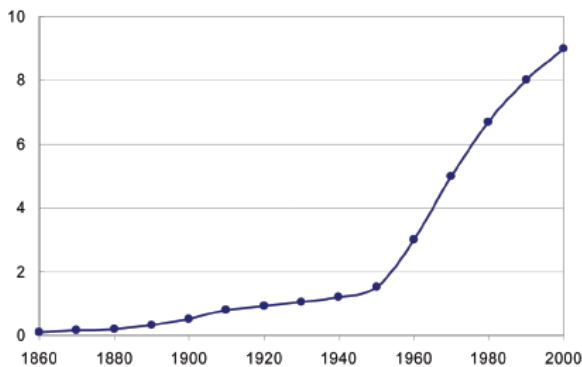


Figure 12 : Evolution de la consommation d'énergie primaire, en Gtep/an

Mais il existe (Figure 10) des disparités considérables entre les situations des différents pays, groupes ou autres communautés humaines. Une manière très simple d'apprécier les efforts à faire dans ces domaines, et de se convaincre des fortes modifications de comportement à adopter, consiste, à partir des figures 9 et 10, à noter que :

- La généralisation à tous les habitants de la planète d'un « mode de vie énergétique » analogue à l'actuel mode nord-américain conduirait à multiplier la consommation mondiale d'un facteur supérieur à 5. C'est-à-dire, en maintenant la part des combustibles carbonés au même niveau qu'actuellement, que les émissions des gaz à effet de serre seraient multipliées par 5, avec toutes les modifications induites du système « S.T.A. » (Figure 6), ceci pour ne pas évoquer l'épuisement rapide de certaines réserves.
- Avec l'objectif, pour tous, d'un standard « européen », l'accroissement correspondrait à un facteur multiplicatif d'environ 2,5 – qui n'est pas sans poser lui aussi de graves problèmes.
- Même l'objectif, moins impressionnant que les deux premiers, qu'aucun des citoyens du monde ne soit au-dessous de la moyenne mondiale actuelle d'environ 1,5 tep/(habitant.an), implique

un accroissement de la production d'énergie d'environ 30 %,

- Toutes ces observations étant faites sans prendre en compte l'évolution de la population mondiale, amenée à croître de 20 à 50 %.

Ce texte ne présente pas les très importants travaux menés sur le plan international pour stabiliser, voire réduire, la production anthropique de gaz à effet de serre, mais chacun sait bien que, en dépit de nombreuses difficultés, des protocoles internationaux et des mécanismes sont mis en œuvre pour tenter de réduire les consommations de combustibles fossiles et leurs conséquences sur l'effet de serre (permis d'émission de CO₂,... marché et échanges entre entreprises et pays,... – voir, par exemple, Dechamps et Pilavachi, 2004).

Dans ce contexte général, il y a urgence à contrôler de plus en plus nos consommations énergétiques. Le temps n'est plus de discuter des mérites comparés entre l'énergie solaire et les hydrocarbures, entre les hydrocarbures et l'énergie nucléaire, entre les combustibles fossiles et les énergies renouvelables. Nous devons maintenant utiliser toutes les possibilités, aux différentes échelles, qu'elles soient individuelles, locales, régionales, nationales et finalement globale.

Sans aucun doute, il est grand temps maintenant de « faire flèche de tout bois » - l'expression « faire feu de tout bois », également possible, marquerait peut-être un intérêt excessif de l'auteur de ce texte pour les biomasses forestières et n'est donc pas retenue en priorité, bien qu'ayant le même sens que la première.

Toutes les actions possibles peuvent être appréciées suivant trois directions principales qui devraient se combiner dans tout projet, toute réalisation ou toute décision : (a) économies d'énergie, (b) approches systémiques et politiques d'innovation et (c) progrès techniques (Martin, 1996).

Bien entendu, à aucun moment, il ne faut exclure la possibilité d'apparition de concepts complètement nouveaux, qui modifieraient sensiblement le contexte que nous décrivons, mais il ne faut pas oublier que, dans le domaine de l'énergie, l'ampleur des investissements, la masse des installations, confèrent à l'ensemble une très forte inertie, beaucoup plus importante que celle, plus modeste, que l'on a pu observer dans les développements et la diffusion des outils informatiques, grand public en particulier.

Nous présentons dans cette section les trois dimensions évoquées ci-dessus, avec quelques exemples, cette présentation étant complétée par quelques commentaires concernant la capture et la séquestration du gaz carbonique, avec, à titre d'exemple, le cas des zones forestières.

Economies d'énergie

Même s'il s'agit là d'un lieu commun, il convient d'indiquer que le premier point sur lequel doit porter

l'effort concerne les économies d'énergie. On dit souvent, dans les pays développés en particulier : « le premier gisement d'énergie ce sont les économies d'énergie ». Ce qui peut être considéré comme un propos naïf doit rester un point majeur de toute politique énergétique, et ce à tous les niveaux de décision et d'action.

Les recherches d'économie, qui sont souvent stimulées par les hausses de prix, peuvent être développées dans bien des domaines et à des échelles nombreuses : les entreprises, les familles, l'école à tous ses niveaux, mettant en jeu toutes les structures du système éducatif. En parallèle, toute entreprise d'explication, sur les deux registres des économies d'énergie et de la réduction de l'effet de serre, des principaux challenges doit être menée et ses résultats diffusés largement (Jankovici, 2002).

En ce qui concerne les recommandations pratiques, l'Agence Internationale de l'Energie (OCDE) a identifié (Philibert, 2003) de graves lacunes dans l'information des citoyens dans les domaines de l'habitat et des petites entreprises. En particulier, une attention modeste est portée aux coûts de l'électricité, et, lorsque cette attention est effective, les démarches les plus rationnelles pour économiser l'électricité ne sont pas assez connues.

Dans un secteur tout différent, l'accroissement des prix des carburants et les préoccupations concernant l'effet de serre vont sans aucun doute jouer un rôle encore plus important dans les évolutions des modes de transports, tant terrestres qu'aériens. Quand plusieurs possibilités existent, en Europe par exemple, des choix devront être renforcés : l'avion par rapport aux trains à grande vitesse (TGV), le ferro-routage par rapport aux camions, la place des autoroutes,...

Approches systémiques et innovations

Dès le début des années 1970, avec l'arrivée du premier choc pétrolier, beaucoup a été fait, non seulement sur les vecteurs et sources d'énergie principaux, mais aussi sur de nombreux systèmes et procédés :

- En Europe, un continent dont la dépendance par rapport à l'étranger dans le domaine de l'énergie est grande, de nombreux efforts ont été accomplis pour exploiter les sources de chaleur à bas niveau « exergétique » (la géothermie par exemple), avec l'idée, par exemple, dans le secteur de l'habitat, d'utiliser toutes les calories même à très basse température.
- Ceci a été accompli en combinant de multiples améliorations dans les techniques et les matériaux d'isolation, en particulier dans le domaine de l'habitat et des bâtiments du secteur tertiaire (on commence maintenant à parler de bâtiments « à énergie positive », idée associée à des isolations performantes et à la récupération de la chaleur dégagée par les occupants eux-mêmes).
- Dans les zones industrielles, comme dans certains

sites résidentiels de grande taille, des installations de cogénération de plusieurs formes d'énergie, de chaleur et de puissance électrique, ont été mises en place,

- Parmi les nombreux exemples de ce qu'on appelle souvent l'écologie industrielle (suivant en cela l'exemple de certains pays du Nord de l'Europe), on peut mentionner le cas d'une nouvelle implantation développée à Dunkerque (France) par Gaz de France et Arcelor. Cette réalisation, dénommée DK6, qui a commencé à produire de l'électricité en 2005, consiste en une installation de 790 MW, à haut rendement, qui combine deux turbines à gaz, chacune de 165 MWe, deux chaudières avec post-combustion et deux turbines à vapeur, chacune de 230 MWe. Cette installation consomme tout à la fois du gaz naturel et des gaz produits par l'aciérie d'Arcelor.

Bien que de nombreuses initiatives se développent, il faut cependant noter que, suivant les indications de l'Agence Internationale de l'Energie (Philibert, 2003), les niveaux d'investissements dans les domaines de la recherche et du développement dans le champ de l'énergie sont de loin insuffisants en regard de l'amplitude du changement climatique en cours. Pour les pays membres de l'AIE, ces investissements ont connu un maximum en 1980, puis ont décliné fortement (avec, pour la seule fission nucléaire, près de 50 % de l'ensemble). Ces années passées récentes, les dépenses dans les énergies renouvelables étaient plus basses que dans la période comprise entre 1977 et 1986. Il est maintenant nécessaire de consacrer des efforts plus importants et plus réguliers en matière de démonstrations technologiques, d'actions de recherche scientifiques en amont et de diffusion dans les marchés.

Avancées techniques

Parmi les différentes démarches qui se sont développées durant ces dernières décennies, beaucoup reposent sur de réelles et importantes avancées techniques. Certaines d'entre elles ont eu un impact fort dans des champs d'application importants. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut noter :

- Les progrès réalisés dans les matériaux utilisés dans les machines tournantes, déjà mentionnés lors de l'évocation des progrès dans les éoliennes. Ces progrès, principalement dans les caractéristiques mécaniques des matériaux, ont permis la réduction relative des masses en rotation des turbines à gaz, par exemple, et, corrélativement, un accroissement des vitesses de rotation. Dans les 15 dernières années, les améliorations des rendements de ces machines ont alors cru de plus de 15 %.
- Avec plus d'un véhicule pour 10 habitants, en moyenne, sur la planète, avec nettement plus de 1/5 des ressources pétrolières consacrées aux véhicules particuliers, on ne sera pas surpris de constater les efforts importants en matière de « down-sizing » des moteurs à combustion

(réduction de taille/masse et augmentation de rendement).

- De même, dans les mêmes perspectives, pour le démarrage, ces deux dernières années, de la commercialisation effective des véhicules hybrides, combinant un moteur thermique et un ou plusieurs moteurs électriques, dispositifs qui permettent, entre autre, la récupération d'énergie cinétique dans certaines situations (le freinage par exemple).

Capture et séquestration du gaz carbonique

Dans les très courts, voire même moyens termes, le poids relatif des combustibles fossiles carbonés dans la production mondiale d'énergie, compte tenu de la relativement faible élasticité de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables, restera fort.

A propos de ces dernières, si de nombreux efforts sont faits pour leur développement, si même leur poids global dans le « bouquet » énergétique mondial, aux environs de 20 % du tout, augmente quelque peu en valeur relative, cette augmentation reste faible, compte tenu du fait que, nous l'avons vu, le total continue de croître, sensiblement en proportion de la population mondiale.

Parmi les nombreuses techniques possibles de séquestration du gaz carbonique, qu'elle soit concentrée ou diffuse, la séquestration par les océans apparaît comme très hypothétique actuellement. Deux autres approches sont couramment examinées, voire mises en œuvre :

- La première concerne les sources concentrées de gaz carbonique et implique des stockages souterrains soit dans des gisements d'hydrocarbures déplétés, des aquifères salins, voire des gisements de pétrole actifs, à des fins d'amélioration de la récupération du pétrole. Cette approche fera souvent appel à des techniques d'oxycombustion, qui font l'économie de manipulations de quantités d'azote importantes, lors des combustions classiques.
- La seconde concerne (Figure 5) les sources diffuses d'émission de gaz à effet de serre. Le recours aux biomasses peut alors être envisagé.

Un exemple d'approche intégrée : les forêts

A titre d'exemple, dans cette section, nous présentons une approche intégrée d'un système susceptible de satisfaire partiellement plusieurs des objectifs que nous avons évoqués ci-dessus, la production d'énergie d'une part et, d'autre part, la capture et la séquestration du gaz carbonique (Cooper, 1983 ; Wigley et Schimel, 2000 ; Nandey, 2002).

Les écosystèmes forestiers sont amenés à jouer un rôle probablement plus important, pour (1) capturer et stocker le carbone diffus et (2) produire des combustibles à des fins énergétiques et des matériaux, ces deux aspects étant encore étudiés trop séparément.

Les biomasses végétales terrestres (principalement les forêts) constituent un important stock de carbone à l'échelle globale, d'environ 500 Gt C (Batjes, 1999), pour l'ensemble des biomasses terrestres (2000 Gt C environ). D'importants flux de carbone sont échangés entre la biomasse végétale et l'atmosphère (environ 110 Gt C/an, Figure 6), associés à une importante consommation implicite d'énergie solaire. Les flux annuels échangés entre les deux compartiments que sont l'atmosphère et les océans sont sensiblement de la même importance. En regard, les flux anthropiques de gaz carbonique, émis chaque année, sont plus modestes, mais ne sont compensés par aucun flux inverse.

De manière à bien mettre en évidence l'aptitude des forêts et de leurs nombreux produits à stocker des quantités importantes de carbone, plusieurs aspects peuvent être développés :

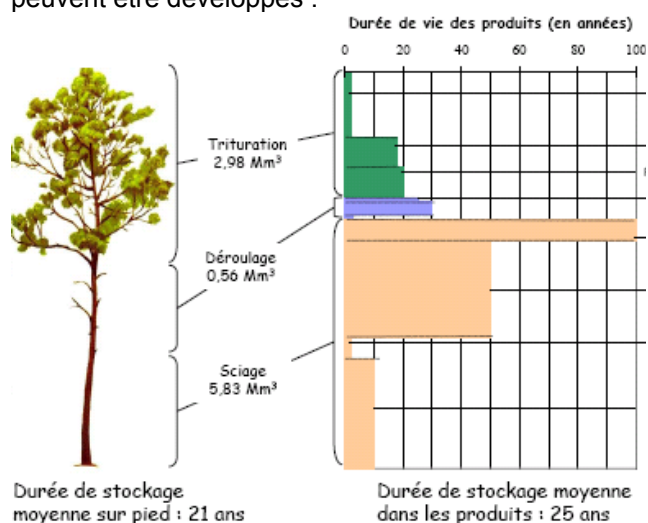


Figure 13 : Durée de rétention moyenne d'un atome de carbone, dans la forêt des Landes, en Aquitaine, France (pins maritimes, superficie : 13600 km², d'après Prieur, 2004). La durée du « stockage » total est égal à : 21 + 25 = 46 ans

- Le premier concerne l'étude, par l'analyse précise d'un cas réel (Prieur, 2004), de la durée de rétention, hors de l'atmosphère, d'atomes de carbone capturés par les forêts lors de leur croissance (en régime stabilisé, au *climax*, les forêts n'absorbent plus de carbone). Le cas étudié est celui de l'une des plus grandes forêts d'Europe, une forêt artificielle, plantée, de pins maritimes (*pinus pinaster*). Les arbres y sont coupés à l'âge moyen de 35 ans, ce qui correspond à une rétention moyenne, compte tenu de la forme des courbes de croissance des arbres, de 21 ans. Une moyenne pondérée de la durée d'usage des différents produits, de la pâte à papier aux meubles et charpentes, donne une valeur de 25 ans.
- Le second point consiste en une évaluation des possibilités des zones forestières à travers le monde (près de 1/3 des terres émergées sont couvertes par des forêts), en terme de capacité annuelle de capture de carbone, possibilités à mettre en regard de la production anthropique de gaz carbonique. Des performances significatives

pourraient être obtenues par des adaptations importantes dans la gestion des forêts et par l'accroissement des efforts de plantation de nouvelles forêts (Priour et al., 2004).

Le bois, comme n'importe quel autre produit de la forêt, a une double vocation : (1) capter du carbone, lors de sa croissance, comme les autres parties de l'arbre et (2), comme d'autres éléments des biomasses végétales, constituer parfois un substitut possible aux combustibles fossiles pour la production d'énergie (Priour et Rauch, 2003 ; Priour et Combarrous, 2003 ; Richardson et al., 2002). Il est clair qu'alors, d'une part, les écosystèmes forestiers sont particulièrement adaptés pour « capturer » et stocker, un certain temps, le carbone émis de manière diffuse dans l'atmosphère, sous la forme de CO₂, et que, d'autre part, le recours plus important au bois et autres produits des forêts peut contribuer à des réductions relatives du recours aux combustibles fossiles.

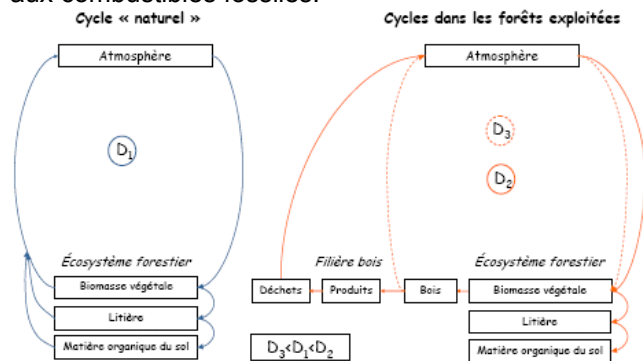


Figure 14 : Les cycles des produits forestiers : cycle naturel et cycles des forêts exploitées, plus ou moins longs

La figure 14 précise l'intérêt du recours aux systèmes forestiers pour tenter de maîtriser un peu mieux les cycles du carbone entre les divers compartiments du système « S.T.A. ». On y compare les temps de cycle dans trois situations : le cycle naturel, avec un temps de parcours D₁, et, pour les forêts exploitées, une plage de temps de parcours possibles, D₃, dans le cas d'un parcours rapide où les produits sont très vite brûlés et d'un parcours plus lent où, avant d'être brûlés - selon des technologies qui sont encore perfectibles (Bernard et al., 2006) - les produits ont une utilisation, plus ou moins longue, en tant que matériaux.

EN GUISE DE CONCLUSION...

Dans un premier temps, avant de formuler les points importants d'une conclusion possible, plusieurs remarques, complémentaires à ce qui a déjà été indiqué doivent être formulées :

- Dans la mesure où, à ce niveau d'analyse et de réflexion, on fait appel à des données qui sont nécessairement très diverses, et par nature et géographiquement, les risques de lacunes et d'incertitudes sont donc toujours grands. Tel est sans doute le cas de nombreuses des indications présentées ici.
- Quand on s'intéresse au domaine de l'énergie, il convient de ne jamais perdre de vue qu'il s'agit là

d'une activité humaine qui demande d'importants moyens en termes d'investissements, bien sûr, mais aussi en termes de masses des systèmes concernés. La lenteur des développements relativement lents de certaines techniques est une conséquence directe de cette réalité. Quand, de surcroît, des problèmes importants de sécurité doivent être traités, tout ceci conduit à des développements relativement lents, surtout quand on les compare à l'évolution de très importants besoins en énergie de par le monde. Tel est le cas aujourd'hui du développement de la production d'énergie électrique par voie de fission nucléaire (Figure 15). Tel sera le cas, demain, en cas de succès des recherches en cours, des développements des applications de la fusion nucléaire, s'il y en a.

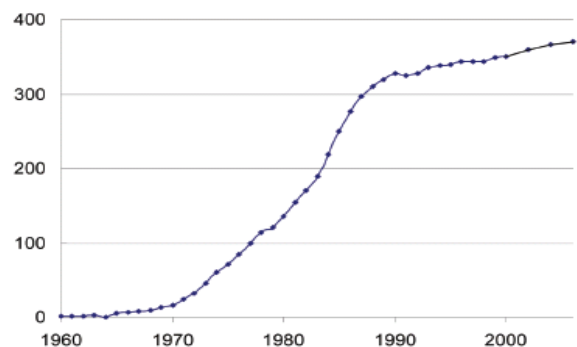


Figure 15 : Evolution, depuis son origine, des capacités mondiales de production d'électricité, par voie nucléaire, exprimée en GWe

- Dans cette présentation, certains aspects concernant les sources ou les vecteurs énergétiques n'ont pas été détaillés, ni même, parfois, évoqués. Le champ couvert est trop vaste pour qu'une description exhaustive soit possible. Cependant, les raisons pour lesquelles certains aspects n'ont pas été indiqués ne relèvent pas toute de cette contrainte, mais aussi parce qu'il s'agit de démarche qui n'ont pour l'instant pas abouti. Tel est le cas par exemple de l'énergie thermique des mers (comment utiliser les différences de températures existant entre les différentes couches des mers et des océans). Tel est le cas aussi de certaines techniques ou procédés déjà utilisés, mais dont l'impact à l'échelle du monde reste encore modeste : l'usage de l'hydrogène, déjà très utilisé dans l'industrie chimique, comme vecteur énergétique.
- Enfin, si l'énergie est l'un des éléments majeurs de l'activité humaine, il n'est pas le seul. D'ailleurs, très souvent, les approches énergétiques de telle ou telle situation sont très souvent connectées avec d'autres approches, tout aussi, voire même parfois plus, importantes. Tel est le cas, par exemple, des ressources en eau (Goossens, 2005), une classe de problèmes très liés également aux problématiques du type changement climatique. Tel est le cas aussi des problèmes liés aux traitements des déchets, aux analyses de cycles de vie des produits et des

procédés. Enfin, pour être exhaustif, mentionnons que nous n'avons pas étudié, dans le cadre de ce travail, sur un plan énergétique, environnemental,... les coûts des activités humaines telles que les conflits de toutes sortes et les guerres.

En second lieu, il nous semble important d'insister, dans un panorama mondial, sur deux aspects très fondamentaux, à ne jamais perdre de vue :

- Tout d'abord, puisque les réserves de combustibles fossiles sont, par nature, limitées, une démarche d'économie de ces produits, tout particulièrement du pétrole et du gaz, est nécessaire. Il s'agit en quelque sorte de promouvoir un « principe d'économie », pour préserver au mieux l'usage de produits qui ne constituent ou ne constitueront qu'une étape dans l'histoire de l'humanité (Figure 16).

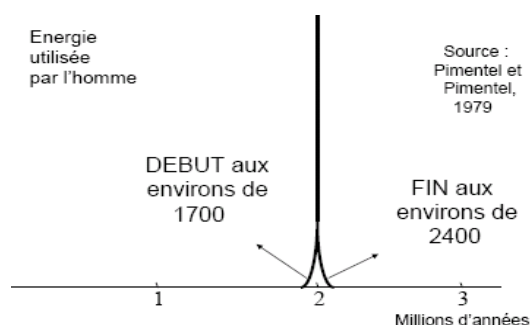


Figure 16 : La « courte » période, dans l'histoire de l'humanité, d'exploitation des combustibles carbonés fossiles

- D'un autre point de vue, les évolutions des émissions de gaz à effet de serre, tout particulièrement le gaz carbonique et le méthane, conduisent, indépendamment de la mise en oeuvre de techniques de capture et de séquestration du CO₂, à tenter de réduire autant que possible le recours à des démarches énergétiques produisant des gaz à effet de serre. Il s'agit là, un peu comme pour le premier, d'une sorte de « principe de précaution », ménageant nos chances d'avenir sur la planète.

Fort heureusement, ces deux aspects, loin d'être antagonistes, sont parfaitement complémentaires.

Comme une conclusion principale, nous pourrions retenir qu'en dépit, ou à cause même, des inerties considérables qui existent dans les évolutions des poids relatifs des sources et vecteurs énergétiques, quelques éléments simples peuvent être distingués pour guider toute politique énergétique :

- les économies d'énergie,
- le développement simultané, en co-concurrence, de tous les types possibles de production d'énergie,
- des démarches de capture et de stockage du gaz carbonique.

Ce dernier point apparaît très important quand on considère l'impact de tous nos dispositifs énergétiques

sur le comportement du système « Surface Terrestre – Atmosphère ». Certains n'hésitent-ils pas d'ailleurs à évoquer une nouvelle ère géologique, dans l'histoire de la Terre, correspondant à l'impact de l'homme sur terre, un impact qui ne pourrait plus être négligé, au moins dans le système « S.T.A. » ? On parle alors de cette nouvelle ère, sous le nom d'*anthropocène* (Crutzen et Stoermer, 2000).

Pour l'ensemble de ces points, ils devront s'intégrer, bien sûr et tout naturellement, dans une « vision plus large de monde », où la distribution des biens et des richesses entre tous devrait tendre vers une plus grande homogénéité.

Remerciements

Ce texte a été préparé dans le cadre d'activités qui se sont développées au sein de deux laboratoires :

- (a) le laboratoire TREFLE, à Bordeaux, ce laboratoire « Transferts Ecoulements FLuides Energétique » dépendant de plusieurs structures, l'Université Bordeaux 1, l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (Centre de Bordeaux-Talence), l'Ecole Nationale Supérieure de Physique et Chimie de Bordeaux et le CNRS (UMR 8508),
- (b) l'Unité de Recherche « Thermodynamique Appliquée » (99/UR/11-21), à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès.

Ce document doit beaucoup aux travaux de Jean-François BONNET, Maître de Conférences à l'Université Bordeaux 1, et d'Anne PRIEUR, Ingénieur à l'Institut Français du Pétrole (I.F.P.).

Références

- Alazard N. et Montadert L., Ressources pétrolières pour le XXI^{ème} siècle : quel avenir ? Revue de l'I.F.P., Vol. 48, pp 69-82 (1993)
- Alpern B. et Lemos de Sousa M.J., Documented international enquiry on solid sedimentary fossil fuels ; coals : definitions, classifications, reserves-resources, and energy potentiel. Coal Geology, Vol. 50, pp 3-41 (2002)
- Batjes N.H., Management potions for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report 410-200-031, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, Pays-Bas, 114 pages (1999)
- Bernard C., Rabot-Querci M.L., Rogaume Y., Rogaume C. et Zoulalian A., Optimiser la combustion pour un développement durable du bois-énergie. Oil & Gas Science and Technology – Revue IFP, Vol. 61, pp 203-211 (2006)
- Bonnet J.F., Combarous M., Du rayonnement solaire à la production de biomasse végétale terrestre : une vision schématique des flux d'énergie. Revue Générale de Thermique, Vol. 35, pp 527-542 (1996)
- Bonnet J.F., Combarous M., Conversion du rayonnement solaire dans la production de biomasse végétale et animale. Entropie, Vol. 233, pp 3-11 (2001)
- BP, BP Statistical Review of World Energy, Juin (2006)
- Combarous M. et Bonnet J.F., World thirst of energy: how to face the challenge. In "Sustainable Energies Technologies: options and prospect. Springer, pp 3-24 (2008)
- Combarous M. et Prieur A., Les consommations d'énergie dans le monde : une méthode robuste de prévision de leur évolution à moyen terme ; premières conséquences. C.R.

- Géoscience, Vol. 335, pp 943-950 (2003)
- Cooper C.F., Carbon storage in managed forests. Canadian Journal of Forest Research, Vol. 13, pp 155-166 (1983)
- Crutzen P.J. et Stoermer E.F., The "Anthropocene". Global Change Newsletter IGBP (International Geophysical and Biological Program), n°41, pp 17-18 (2000)
- Dechamps P. et Pilavachi P.A., Research and Development Actions to Reduce CO₂ Emissions within the European Union, Oil and Gas Science and Technology – Revue IFP, Vol. 59, pp 323-330 (2004)
- FAO, Web Site, <http://www.fao.org> (2008)
- Goossens X., La maîtrise de la demande en eau et en énergie en agriculture irriguée : de l'évaluation des enjeux à la proposition d'actions ciblées. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 249 pages (2005)
- Jankovici J.M., L'avenir climatique – Quel temps ferons-nous ?, Science Ouverte, Seuil, Paris, 284 pages (2002)
- Lanier D., Heavy oil – a major energy source for the 21st century. 7th Unitar Heavy crude & Tar Sands Int. Conf., paper 1998.039, Pékin, 27-30 octobre (1998)
- Léridon H., Certitudes et incertitudes de la prévision démographique, C.R. Geoscience, Vol. 335, pp 627-635 (2003)
- Lutz W., Sanderson W. et Scherbov S., The end of the world population growth. Nature, Vol. 412, pp 543-545 (2001)
- McDonald G.J., The future of methane as an energy source. Annual Review Energy, Vol. 15, pp 53-83 (1990)
- Martin J.M., Energy Technology: Systemic Aspects, Technological Trajectories and International Frameworks, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 53, pp 81-95 (1996)
- Nandey D.N., Carbon sequestration in agroforestry systems. Climate Policy, Vol. 2, pp 367-377 (2002)
- Pharabod F., Atlas mondial de l'énergie (abundance apparente mais déséquilibres profonds). CNRS et Centre de Prospective et d'Etudes (CPE), Editions ADITECH, 51 pages (1989)
- Philibert C., Technology, Innovation, Development and Diffusion. OECD and IEA Information Paper (2003)
- Pimentel D. et Pimentel M., Food, Energy and Society. Edward Arnold, Londres, 165 pages (1979)
- Prieur A., Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du CO₂. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 183 pages (2004)
- Prieur A., Bonnet J.F. et Combarneous M., Les surfaces boisées à l'échelle de la planète : usages conjoints pour la séquestration du carbone et la production d'énergie. C.R. Geoscience, Vol. 336, pp 1323-1335 (2004)
- Prieur A. et Combarneous M., Forêts et cycles de vie : aspects énergétiques, produits, carbone stocké. 12^{ème} Congrès forestier mondial, Montréal, 21-28 septembre (2003)
- Prieur A. et Rauch E., Carbon sequestration in forest ecosystems and gas industry : sustainable development and clean energy production from fossil fuel. 22nd World Gas Conference, Tokyo, 1-5 juin (2003)
- Richardson J., Bjorheden R., Hakkila P., Lowe A.T. and Smith C.T., Bioenergy from sustainable forestry: Guiding principles and practice, Kluwer Academic Publishers, 344 pages (2002)
- WEC, Survey of Energy Resources 1998, World Energy Council, Londres (1998)
- Wigley T.M.L. et Schimel D.S., The Carbon Cycle, Cambridge University Press, 292 pages (2000)