



HAL
open science

Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables

Bernard Multon, Gaël Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed

► **To cite this version:**

Bernard Multon, Gaël Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed. Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables. La Revue 3E.I, 2004, pp.20-33. hal-00676124

HAL Id: hal-00676124

<https://hal.science/hal-00676124>

Submitted on 3 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SITUATION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE À L'AUBE DU 3^{ème} MILLÉNAIRE. PERSPECTIVES OFFERTES PAR LES RESSOURCES RENOUVELABLES.

Bernard MULTON, Gael ROBIN, Marie RUELLAN, Hamid BEN AHMED

Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan – SATIE (UMR CNRS 8029) - Campus de Ker Lann - 35170 BRUZ

I- Impact des activités énergétiques

Le 20^{ème} siècle aura, sans doute, été celui de la prise de conscience planétaire, notamment des limites des capacités de la Terre. Ainsi, l'humanité, du moins la part qui en a les moyens, a « inventé » la notion de développement durable. En 1987, le rapport Brundtland (Commission sur l'environnement et le développement de l'ONU) [Brund_97] l'a définie de la façon suivante : « Satisfaire les besoins actuels, sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs ». Il s'agit de répondre aux besoins fondamentaux des humains : alimentation, santé, eau, énergie... Les sommets de Rio (1992), de Kyoto (1997) puis de Johannesburg (2002) [Joha_02] ont tenté d'œuvrer pour élaborer des règles afin de renverser une tendance dangereuse pour l'environnement, pour nous, pour notre économie et, bien entendu, pour nos enfants...

Un progrès a été franchi avec la quantification, sans doute critiquable, de l'impact des activités humaines sur l'écosystème. Le WWF (World Wide Fund For Nature) a proposé la notion d'*Empreinte Ecologique Mondiale* (en anglais : World Ecological Footprint) [WWF_02]. Il s'agit de la surface exploitée ou « consommée » pour les différentes activités humaines. Sur les 45 milliards d'ha (Gha) de la surface du globe, les auteurs du rapport estiment que seulement 11,4 Gha sont biologiquement productifs. La figure 1 décrit l'évolution de l'empreinte écologique depuis 1960. Il apparaît que depuis les années 1980, nous vivons au-dessus des moyens de notre planète, en 2002, nous l'épuisons avec une intensité de « 1,37 Terres ».

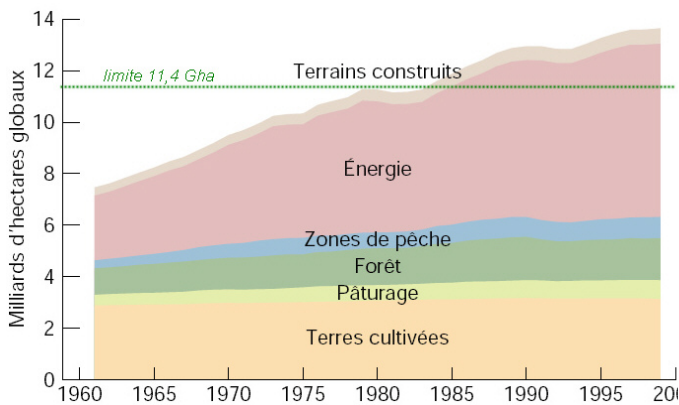


Figure 1 : Empreinte Ecologique Mondiale d'après le rapport du WWF [WWF_02].

On peut constater que l'énergie représente plus de 50% de l'empreinte totale. La figure 2 montre l'empreinte par habitant, on peut y constater que les pays riches et industrialisés sont les plus grands dilapidateurs, la moyenne acceptable étant de 1,9 ha par habitant.

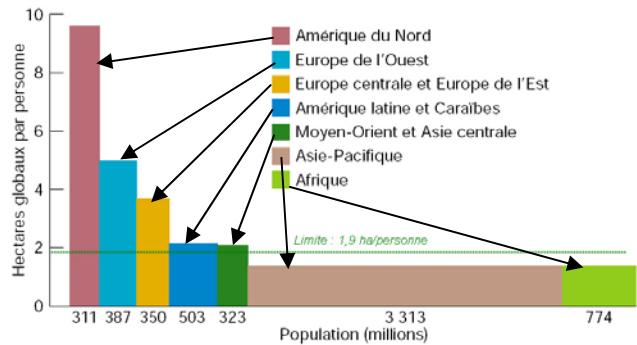


Figure 2 : Empreinte Ecologique Mondiale par habitant selon les régions, d'après le rapport du WWF [WWF_02].

Les manipulations énergétiques des Hommes conduisent à l'épuisement de précieuses ressources naturelles ainsi qu'à de violentes pollutions dont les rejets de gaz à effet de serre. Il ne subsiste aujourd'hui plus beaucoup de doute sur le fait que la combustion massive de combustibles fossiles est responsable d'une très sensible augmentation de l'effet de serre naturel, c'est-à-dire d'un accroissement de la température moyenne à la surface du globe. Une extraordinaire corrélation entre cette consommation de carburants fossiles et la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a été montrée (figure 3) et constitue l'une des « preuves » les plus tangibles de l'impact des activités humaines.

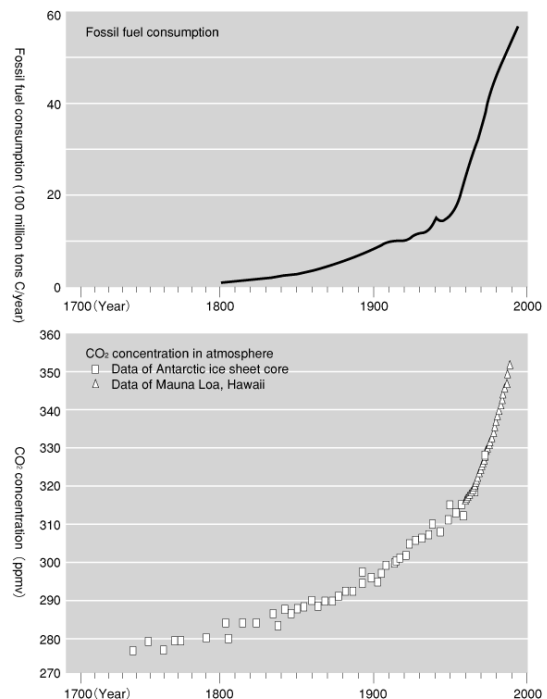


Figure 3 : corrélation consommation de carburants fossiles et concentration de CO₂ [Matsumo_87].

Une tonne de carbone brûlée génère environ 3,7 tonnes de CO₂. Les rejets de gaz à effet de serre sont tantôt mesurés en tonnes équivalent CO₂ (par exemple, à masse égale, le méthane est 14 fois plus « efficace » que le CO₂) tantôt en tonnes de carbone. Le CO₂ est responsable d'environ 50% de l'accroissement global de l'effet de serre. En 2002, nous avons renvoyé, dans l'atmosphère, 24 milliards de tonnes de CO₂, soit 6,5 milliards de tonnes de carbone sur un cycle naturel d'environ 1000 milliards de tonnes. En à peine plus de deux siècles, nous aurons renvoyé dans l'atmosphère une quantité de carbone colossale qui avait mis des centaines de millions d'années pour être piégée par les organismes vivants (végétaux et animaux). A la lumière des connaissances actuelles, il nous semblerait maintenant étonnant que cela puisse être sans conséquences !

La métaphore énoncée par Peter CREOLA (Pdt du Long Term Space Policy Committee à l'ESA, European Space Agency) est explicite [Cre_96]. Si l'on trace la courbe temporelle de la puissance correspondant à la combustion des ressources fossiles à l'échelle de l'existence de l'humanité, on obtient le tracé de la figure 4. Alors, cette courbe fait penser à « *l'allumette que les humains ont craquée dans les ténèbres de l'éternité* ». Cette allumette va s'éteindre et nous devons très vite prendre des mesures pour préparer un avenir durable.

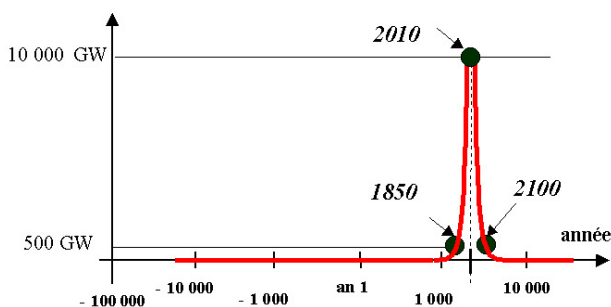


Figure 4 : Courbe de la puissance mondiale de combustion des carburants fossiles.

Il n'est plus à démontrer à quel point nous avons besoin d'énergie pour assurer notre existence. Mais nous devons nous poser plusieurs questions fondamentales :

- pouvons nous maintenir notre niveau actuel de consommation énergétique (pays riches) tout en préservant notre écosystème ?
- est-il nécessaire de consommer autant d'énergie pour bien vivre ? Peut-on consommer mieux ?
- tous les humains de la Terre peuvent-ils accéder à notre niveau de confort ?
- n'est-il pas déjà trop tard quant à des conséquences écologiques irréversibles ? Ne faut-il pas prendre des mesures permettant de faire plus que réduire simplement nos rejets de CO₂ ?
- s'il s'avère nécessaire de changer de civilisation énergétique, comment réaliser les transitions ?
- comment réduire la vulnérabilité de nos systèmes énergétiques centralisés ?

Bien sûr, nous ne donnerons pas de réponses dans ce modeste papier ! La complexité des problèmes nous dépasse largement. Leur traitement fait appel à la sociologie, l'économie, la politique, la physique, la technologie...

Pour un développement réellement durable, l'économie, qui a longtemps négligé les aspects environnementaux et l'aspect borné de notre planète, va devoir intégrer réellement les contraintes écologistes et sociétales [Jacq_95] [Brow_01]. Dans ce contexte, le secteur de l'énergie revêt une très grande importance.

Faut-il enfin rappeler toutes les guerres qui trouvent, en grande partie, leurs germes dans la recherche d'une domination énergétique.

Nous proposons, dans cet article, d'effectuer un état des ressources énergétiques de la planète et d'analyser nos consommations. Nous montrerons notamment à quel point les ressources renouvelables ont la capacité de nous assurer un haut niveau de confort et avec le maximum de durabilité. Dans un précédent article publié dans la revue 3EI [Mul_98], nous avons effectué un premier bilan d'électricien. Il ne s'agit pas de répéter ce qui a déjà été écrit, mais de présenter une analyse plus synthétique et plus mûre avec des chiffres actualisés.

Dans ce domaine stratégique de l'énergie, les chiffres globaux de consommation, de ressources... sont souvent entachés d'erreurs importantes (volontaires ou non), pour de nombreuses raisons. Il est donc très important de les considérer comme des ordres de grandeurs. La publication [Lah_00] est très intéressante à ce sujet en ce qui concerne les chiffres traitant des carburants fossiles, elle permet de développer un bon esprit critique. On recommandera également l'article de l'association DARLY [Darl_03] pour bien comprendre la terminologie et savoir décoder ses ambiguïtés.

II- Ressources énergétiques de la planète

L'énergie primaire représente l'énergie directement transformable en chaleur. L'électricité issue des centrales thermiques via des cycles thermo-mécaniques (rendements de 30 à 60%) est qualifiée d'énergie finale.

Les Ressources Energétiques Renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continuellement (avec des cycles réguliers) par la nature, elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans.

Les Ressources Energétiques Non Renouvelables, comme leur nom l'indique, sont épuisables à notre échelle. Les carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) eux-mêmes issus de l'action du rayonnement solaire sur le carbone et la vie (photosynthèse) pendant des centaines de millions d'années, en font partie. Ils constituent en quelque sorte de l'énergie solaire fossilisée. L'uranium utilisé pour la fission nucléaire ne peut également être considéré comme renouvelable car ses réserves sont limitées.

Quant à l'énergie de la fusion, si nous la maîtrisons un jour, elle peut être qualifiée d'inépuisable à notre échelle. C'est peut-être l'un de ses dangers : une dissipation énergétique démesurée à la surface de la terre pourrait engendrer des bouleversements imprévisibles. Mais si on arrive un jour à en faire une source sans déchets et sûre, elle pourrait participer utilement à l'indispensable diversité de nos ressources énergétiques.

Pour référence, l'humanité consomme, aujourd'hui annuellement, environ 12 Gtep ou 140.10^{12} kWh (en 2002) (biomasse non commerciale comprise, mais hors énergie alimentaire), soit une quantité correspondant à $1/8000^{\text{ème}}$ de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre (voir Fig. 8).

Les ressources énergétiques renouvelables [CHAB_97]

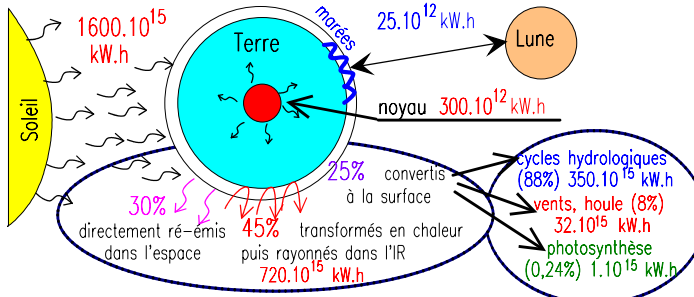


Figure 5 : Sources et répartition quantitative annuelle des énergies renouvelables [Mul_99].

Le rayonnement solaire

Rayonnement solaire au sol : l'énergie reçue à la surface de la terre (au total 720.10^{15} kWh) varie, par m^2 , entre 1100 kWh et 2300 kWh/an, soit une puissance moyenne (répartie sur l'année en tenant compte des alternances jour-nuit et des périodes nuageuses) de 120 à 260 W par m^2 et une puissance crête de plus de 1 kW/ m^2 . Une grande partie frappe les océans et donne ce que l'on nomme communément l'énergie thermique des mers soit environ 80.10^{12} kWh (dans les zones tropicales, l'écart de température entre les eaux de surface et celles à 1000 m de profondeur atteint 20°C).

L'ensemble des cycles hydrologiques convertit environ 360.10^{15} kWh. L'évaporation de l'eau (principalement des océans) conduit à des précipitations canalisées ensuite par les rivières et les fleuves. Les vents et la houle résultent également de ces cycles et constituent également une source d'énergie exploitable.

L'énergie hydraulique récupérable atteint 40.10^{12} kWh et la valeur techniquement exploitable vaut, selon les estimations, entre 15 et 20.10^{12} kWh (8 déjà estimés économiquement rentables) [Obser_Dec00].

L'énergie éolienne, également exploitée depuis longtemps (propulsion à voile, moulins à vent, pompes à eau), représente une ressource énorme, 32.10^{15} kWh, dont la part terrestre exploitable est estimée à 50.10^{12} kWh/an. Une grande partie se trouve « off-shore », en effet les vents soufflent beaucoup plus fort au large et, surtout, plus régulièrement. La puissance récupérable par les aérogénérateurs modernes est de l'ordre de 500 W par m^2 balayés pour des vents de 15 m/s avec des productivités annuelles (dans des sites assez ventés) de 900 kWh/ m^2 par an.

L'énergie de la houle (due à l'action du vent sur la surface des mers et des océans) disponible est évaluée à 8.10^{12} kWh dont 90.10^9 kWh/an techniquement utilisables (la puissance par mètre de front de vague vaut environ 50 kW).

Biomasse : il s'agit du produit de la photosynthèse. La part renouvelable annuellement (environ 20%) de la biomasse représente une énergie d'environ 800 à 900.10^{12} kWh. On estime que la part aisément exploitable (en assurant notamment un renouvellement) atteint 60.10^{12} kWh. Il est difficile de connaître la quantité de biomasse réellement utilisée car elle échappe en majeure partie aux circuits commerciaux. Il est couramment admis l'ordre de grandeur de 1,5 à 2 Gtep annuelles (environ 20.10^{12} kWh) pour la biomasse « non commerciale ». Les besoins énergétiques alimentaires des 6 milliards d'humains sont d'environ 700 Mtep par an [Comb_01], la consommation de viandes accroît le prélèvement énergétique global sur la biomasse à environ 1 Gtep.

La géothermie

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie annuelle d'environ 300.10^{12} kWh (flux géothermique variant de 0,05 à 1 W/ m^2 , ce qui est très faible par rapport au rayonnement solaire). Les réserves exploitables sont d'environ 40.10^9 kWh en haute énergie (150 à 350°C , utilisée pour la production d'électricité) et 300.10^9 kWh en basse énergie (50 à 90°C pour le chauffage).

Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil

Les marées sont le produit de ces interactions. L'énergie annuelle des courants marins représente environ 25.10^{12} kWh. La partie exploitable est assez difficile à déterminer, dans les zones à forte marée présentant un étranglement, on l'estime entre 270 et 500.10^9 kWh (l'usine de la Rance produit annuellement : $0,54.10^9$ kWh). Mais on imagine aujourd'hui placer des turbines sous-marines sans canalisation des courants, comme des éoliennes.

| Ressources annuelles | Solaire | bio-masse | Cycles hydrologiques | | | Géo-thermie | Marées |
|----------------------|---------------|---------------|----------------------|--------------|-----------|---------------|--------------|
| estim. Glob. kWh | 700.10^{15} | $4,5.10^{15}$ | 360.10^{15} | | | 300.10^{12} | 25.10^{12} |
| part exploitable | --- | 60.10^{12} | hydro | éolien | houle | HTemp | estuaires |
| | 10.10^{12} | | 20.10^{12} | 50.10^{12} | 90.10^9 | 40.10^9 | 500.10^9 |

Tableau 1 : Estimation des ressources d'énergie renouvelables et de leur part exploitable en kWh annuels

Notons que ce ne sont pas forcément les sources les plus importantes en quantité qui sont les plus rentables ou les plus avantageuses. Les meilleures sources renouvelables dépendent de nombreux paramètres, notamment du site. Ainsi, toutes les sources évoquées trouvent des applications. Précisons enfin que leur exploitation massive peut aussi être source de perturbation de l'environnement et subir le refus de la population.

Les ressources énergétiques non renouvelables

[Web_IFP] [Web_EIA] [CEA_02]

Il s'agit des carburants fossiles : pétrole, charbon et gaz naturel, pour les plus connus et des combustibles nucléaires pour la fission, soit l'uranium. Depuis 1970, nous avons doublé notre consommation de pétrole. Le pétrole représentait alors 45% de l'énergie primaire alors que cette proportion est tombée à 34%. Ces ressources présentent l'avantage d'un « faible » coût mais

l'inconvénient d'être polluantes. Il est cependant possible de réduire les rejets (filtrage dans les cheminées, pots catalytiques...) mais cela nuit à leur compétitivité.

| Ressources non renouvelables | Pétrole | charbon | gaz naturel | schistes bitumineux Sables asphaltiques | Hydrates méthane | Uranium 80 à 130 \$/kg |
|---|----------------------|----------------------------|----------------------|--|-------------------------|------------------------------|
| Réserves exploitables kWh | 1,7 10 ¹⁵ | 5,1 à 7,5.10 ¹⁵ | 1,6.10 ¹⁵ | ? | ? | 0,36 à 0,46.10 ¹⁵ |
| réserves totales estimées kWh | 4.10 ¹⁵ | ? | ? | qq 10 ¹⁵ | 2 à 10.10 ¹⁵ | 1,9. 10 ¹⁵ |
| Durée au rythme année 2003 | 36 ans | 170 à 260 ans | 56 ans | --- | --- | 40 à 50ans |
| Durée ramenée à la totalité de la conso. primaire | 12 ans | 36 à 53 ans | 11 ans | qq 10 ans | 15 à 70 ans | 2 à 3 ans |

Tableau 2 : Estimation (2001) des ressources non renouvelables et des durées d'exploitation sur la base de la consommation actuelle ou (dernière ligne) rapportées à la totalité des besoins actuels.

Le tableau 2 donne un ordre d'idée des réserves connues mais attention, les durées indiquées sont très hypothétiques et fondées sur les réserves connues exploitables ainsi que sur le rythme actuel de la consommation. La ligne réserves totales estimées correspond à des évaluations géologiques hypothétiques et à des coûts d'extractions prohibitifs.

Pétrole

Pendant longtemps, la prospection pétrolière intensive a, en moyenne, révélé, chaque année, l'équivalent de ce qui avait été consommé l'année passée. Mais, durant ces deux dernières années, les réserves prouvées ont commencé à diminuer [Laher_03]. La figure 6 montre que nous arrivons vers le sommet de la courbe de production de combustibles liquides.

Quant au gaz naturel, l'accélération de sa consommation (+ 2,5% par an) va réduire rapidement son « espérance de vie ».

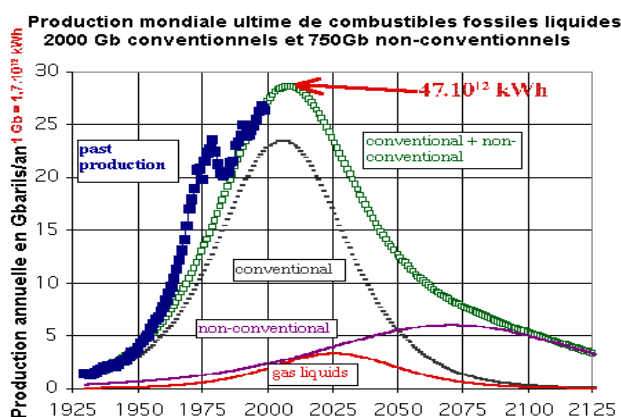


Figure 6 : Evolution de la production annuelle de combustibles fossiles liquides [Laher_00]

Les schistes bitumineux commencent à être exploités de façon économiquement rentable et accroissent les réserves de pétrole brut, bien que le bilan environnemental soit parfois catastrophique (très grande consommation d'énergie notamment). Malgré tout, nous disposons d'une durée très limitée d'exploitation des

carburants fossiles qu'il est difficile d'évaluer objectivement. Il est ainsi très probable que nous aurons épuisé le gaz naturel et le pétrole durant le XXI^{ème} siècle.

Les carburants fossiles représentent un enjeu politico-économique majeur et sont ainsi l'objet de convoitises permanentes, surtout le pétrole qui est aujourd'hui l'incontournable ressource dans le domaine des transports. Comme plus de 65% des réserves sont concentrées au Moyen-Orient, on comprend aisément les raisons des conflits à répétition qui s'y déroulent.

Les fluctuations du cours du pétrole sont de grande amplitude et perturbent les économies des états qui en dépendent. En France et en Europe, grâce à une forte taxation, les prix à la consommation sont assez bien lissés, mais le coût supporté par la collectivité reste très élevé lorsque le cours monte.

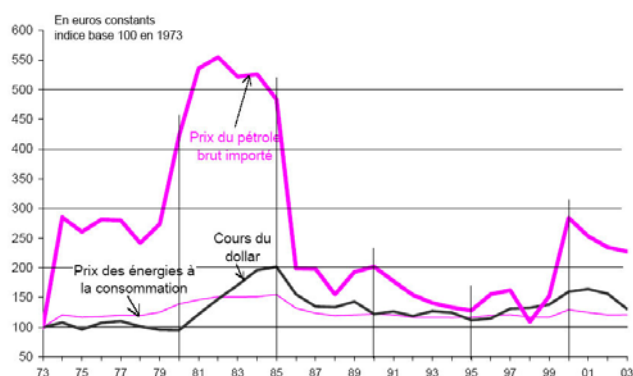


Figure 7 : Evolution du prix du pétrole en France (source : bulletin Prix des Energies, janvier 2004 de la DGEMP)

Charbon

Les réserves de charbon sont encore très importantes (surtout en Amérique du Nord, en Inde et en Chine) et leur exploitation va connaître probablement une forte croissance au cours du siècle prochain. Il sera alors nécessaire de sérieusement dépolluer sa combustion, des solutions industrielles de piégeage du CO₂ commencent d'ailleurs à émerger et pourraient créer une révolution dans le secteur énergétique... si les surcoûts restent compatibles avec le marché.

Si les mesures proposées dans le protocole de Kyoto étaient appliquées, la tonne de carbone rejetée coûterait au pollueur environ 100 €(ou encore 27 €par tonne de CO₂) ce qui aurait pour effet d'augmenter le prix de revient des carburants fossiles de façon dissuasive [Bir_01].

En parallèle, il est de plus en plus sérieusement envisagé de réduire les rejets de gaz à effet de serre, notamment par piégeage du CO₂ [EnPlus_02]. Le coût envisagé en 2002, pour ce piégeage, est de 70 €par tonne de CO₂ [EnPlus_02] ce qui représenterait une sévère augmentation du coût de production de l'énergie électrique.

Nucléaire [Web_CEA] [AGUET_87] [CEA_02]

L'uranium 235 utilisé dans les réactions de fission nucléaire est issu de l'uranium naturel lui-même épuisable, mais il est contenu en très faibles proportions (0,7%) dans l'uranium naturel. Sur la base d'une fission de l'U235, les réserves totales d'uranium naturel sont estimées à 1900.10¹² kWh dont seulement 360 pour un

prix d'extraction inférieur à 80\$/kg, jugé actuellement acceptable (ou 460 pour un prix inférieur à 130\$/kg [CEA_02]). Au prix du marché actuel (26\$/kg), le coût de l'uranium, dans le coût global de production d'électricité nucléaire, ne représente qu'une faible part (moins de 5%). Ceci est considéré comme un avantage de moindre sensibilité aux fluctuations de cours.

L'uranium 238, très abondant dans l'uranium naturel (99%), est transformable en matière fissile dans les surgénérateurs. Il offrirait, si les surgénérateurs fonctionnaient à l'échelle industrielle, une réserve de 80.10^{15} kWh, soit 10 fois les réserves connues de charbon.

Inconvénient majeur de la fission, les déchets qui coûtent cher à retraiter et, après retraitement, conservent, pour une part d'entre eux, une radioactivité élevée à longue durée de vie. Leur stockage pose le problème de la pérennité et de la mémoire des sites.

La fusion devrait nous libérer du problème des déchets car elle est sensée être propre. Le deutérium et tritium sont en abondance suffisante : un litre d'eau de mer contient, en deutérium, de quoi fournir 1 MWh. Le tritium doit être fabriqué, par exemple à partir du lithium dont les ressources terrestres offriraient 200.10^{15} kWh et celles des océans 10^{21} kWh (des millions d'années au rythme actuel). Mais le fonctionnement industriel de la fusion DT est aussi lointain qu'incertain.

III- Consommation primaire d'énergie

III-1- Analyse au niveau mondial

La plupart des chiffres donnés pour l'année 2003 sont issus du rapport International Energy Outlook 2003 [Web_EIA]. Il s'agit des valeurs de l'année 2001 extrapolées vers 2003 avec les taux de croissance actuel.

On peut ainsi donner un ordre de grandeur de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2003 d'environ **140.10^{12} kWh** (12 Gtep) dont très approximativement 20.10^{12} kWh de biomasse non commerciale, pour une **consommation finale** estimée à 7,1 Gtep. En effet, entre la consommation primaire et la consommation finale, il y a les rendements de conversion électriques, les pertes de transports (électricité, carburants), l'autoconsommation (extraction, raffineries, enrichissement d'uranium...).

Mais tous ces chiffres sont peu sûrs, car il existe souvent une confusion importante entre ces deux chiffres de consommation. D'ailleurs, la notion même de consommation finale serait à revoir, car ce qui compte au fond, c'est le service réellement rendu qui dépend du rendement du process final (s'éclairer, se chauffer, se déplacer...). Il serait donc grandement utile de définir les réels besoins énergétiques.

On aurait alors 3 niveaux d'énergie : **primaire**, **finale** (définition actuelle : en fait celle qui arrive chez le consommateur et qui lui est facturée) et **utile**.

Mais avant d'analyser un peu plus dans les détails les chiffres et sans empiéter sur le sujet abordé dans l'article « La demande mondiale d'énergie sur le long terme » [Lau_04] paru dans ce numéro de la revue 3EI,

nous voudrions donner quelques chiffres de l'évolution humaine et de son activité énergétique au cours de l'histoire de l'humanité, en la faisant débiter il y a 100 000 ans. La population humaine a suivi la courbe d'évolution de la figure 8. On y remarque une accélération à partir de l'an mille. Nous sommes maintenant environ 6 milliards mais il est extrêmement difficile de prévoir combien nous serons au milieu du siècle prochain et notamment si la population va continuer à croître, stagner ou décroître...

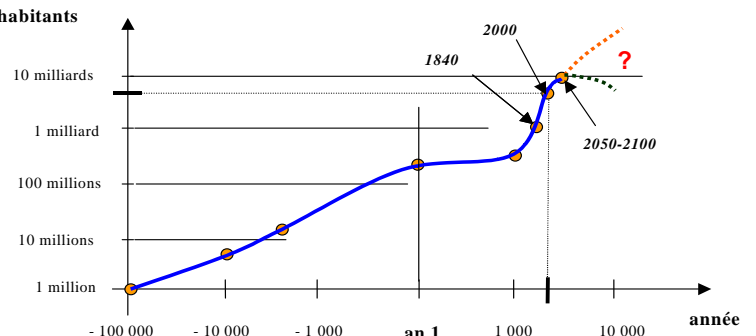


Figure 8 : Evolution de la population humaine sur la terre.

La figure 9 permet de prendre conscience du niveau d'activité énergétique de l'humanité et surtout de son décollage à l'ère industrielle (la puissance moyenne est effectuée en divisant la quantité d'énergie manipulée annuellement par la durée d'un an). Elle atteint aujourd'hui **1/8000^{ème} de la puissance moyenne solaire** qui entre dans l'atmosphère et qui nous est accessible. En imaginant que les 10 milliards d'êtres humains qui pourraient vivre prochainement sur la terre consomment autant d'énergie que chaque Américain aujourd'hui, l'humanité « manipulerait » l'équivalent de 1/1000^{ème} de l'énergie solaire interceptée par la terre.

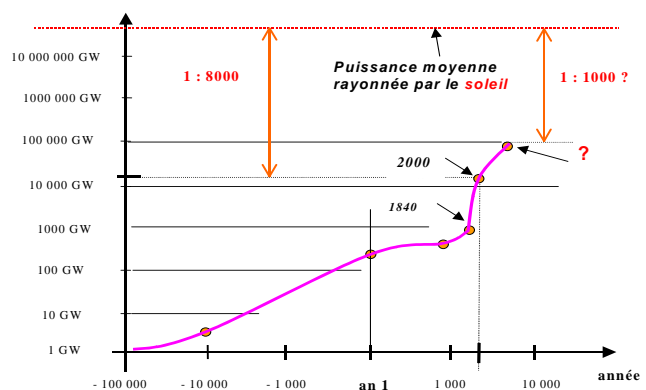


Figure 9 : Evolution de la puissance moyenne des activités énergétiques humaines.

Sur ces 12 Gtep, plus de 80% sont d'origine non renouvelable (figure 9). Le taux de croissance est actuellement de 1,8% par an.

La part non commerciale de l'énergie (biomasse) est rarement prise en compte dans les documents officiels. Elle représente très approximativement 12% de l'énergie primaire au niveau mondial, mais sa part atteint 40 à 90% dans les pays en voie de développement. La figure 10 montre la répartition des ressources énergétiques primaires.

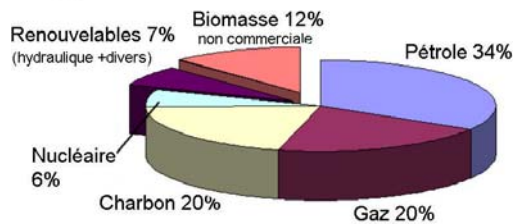


Figure 10 : Répartition par sources des 140.10¹² kWh de la consommation mondiale d'énergie primaire.

Le tableau 3 montre les quantités d'énergie consommées par habitant et par jour estimées en 2003.

| pays consommation par habitant par jour | USA | France | Monde |
|--|------|--------|-------|
| % de la consommation primaire mondiale | 28% | 2,3% | 100% |
| kWh primaires | 280 | 145 | 63 |
| kWh électriques globaux | 35 | 21 | 6,8 |
| kWh électriques domestiques | 11,5 | 4,6 | ? |

Tableau 3

La figure 11 donne la répartition de la consommation mondiale par secteurs d'activité. Cette répartition cache de fortes disparités entre pays industrialisés et en voie de développement. Les transports exploitent à 96% le pétrole, l'industrie utilise à parts sensiblement égales pétrole, charbon, gaz naturel, électricité et énergies renouvelables [MUL_3EI98].

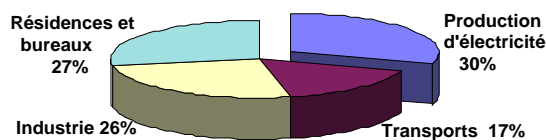


Figure 11 : Répartition par mode de la consommation mondiale d'énergie primaire

L'optimisation énergétique des transports terrestre va très probablement exploiter l'électricité en tant que vecteur produit par un combustible primaire qui pourra, dans un futur plus ou moins lointain être l'hydrogène.

L'énergie massique des combustibles est telle qu'elle représente actuellement la seule solution capable de répondre raisonnablement à nos exigences d'autonomie et de vitesse. Il est donc urgent de trouver des carburants de substitution au pétrole, voire au gaz naturel. Les biocarburants peuvent, dans ce contexte, jouer un rôle significatif mais ils ne peuvent à eux seuls résoudre le problème énergétique général des transports. Une production propre d'hydrogène serait alors une solution très attractive. Mais nous sommes encore loin de disposer des moyens économiques et propres nécessaires. L'électrolyse de l'eau par une électricité d'origine renouvelable peut constituer l'une des voies. Avec une électricité éolienne offshore à 5c€/kWh, on pourrait obtenir de l'hydrogène à 9c€/kWh et, compte tenu du « coût » de la compression, du stockage et de la distribution, un carburant à 12 c€/kWh_{th} [Tri_03]. Cela reste néanmoins coûteux, pour comparaison, un coût de 1 €/litre TTC pour de l'essence correspond à 8,3 c€/kWh_{th} et à seulement 2 c€/kWh_{th} hors taxes.

III-2- Consommation d'énergie primaire en France [ObsEn_FR02] [DGEMP_03] [Web_IFP]

En 2002, la France a consommé environ 3,2.10¹² kWh primaires (275 Mtep). La répartition par sources est fournie à la figure 12, on y remarque la part significative du pétrole (95 Mtep) et de l'électricité primaire (114 Mtep) (hydraulique et nucléaire intégrant un rendement d'environ 33%), sachant qu'une part de l'électricité est produite avec du gaz, du charbon et du pétrole, au total plus de 30 TWh_e. Les 144 Mtep d'électricité primaire correspondent en fait à une production de 64 TWh hydrauliques et de 415 TWh nucléaires. Les évolutions consécutives au choc pétrolier de 1973 y apparaissent de façon flagrante. Mais la dépendance du pétrole reste un point délicat. La facture énergétique annuelle globale en 2002 était d'environ 25 G€ dont environ 20 dus au seul pétrole.

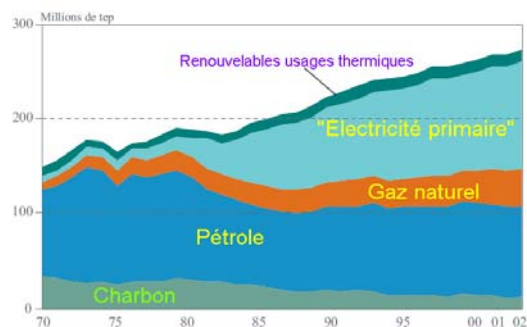


Figure 12 : Répartition par sources de la consommation française d'énergie primaire [DGEMP_03]

La figure 13 montre cette fois la consommation finale d'énergie par secteurs. Les secteurs résidentiel et tertiaire apparaissent en un unique poste, ils se répartissent en réalité respectivement 70 et 30% des 70Mtep en 2002.

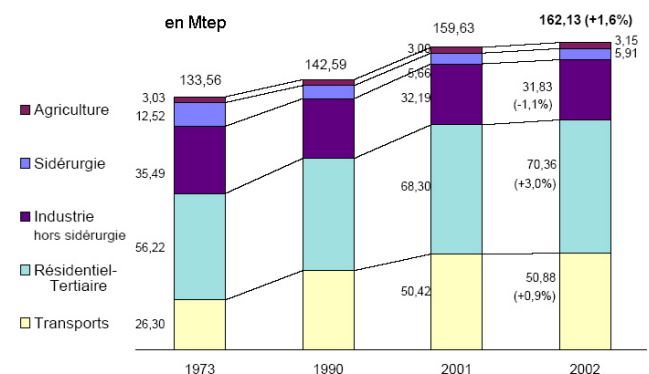


Figure 13 : Evolution et Répartition par secteur de la consommation française finale d'énergie primaire (DGEMP)

La figure 14 montre l'évolution et la répartition par secteur des rejets de CO₂. On peut constater une relative diminution de nos rejets jusque dans les années 80, puis une nouvelle augmentation ensuite... La production d'électricité nucléaire a permis de placer les français parmi les moins pollueurs des pays industrialisés... si l'on oublie nos déchets radioactifs. Les transports représentent le seul secteur qui dérape et tout particulièrement celui exploitant la route (voir figure 15) avec quasiment 80% de la consommation totale et le taux de croissance le plus élevé.

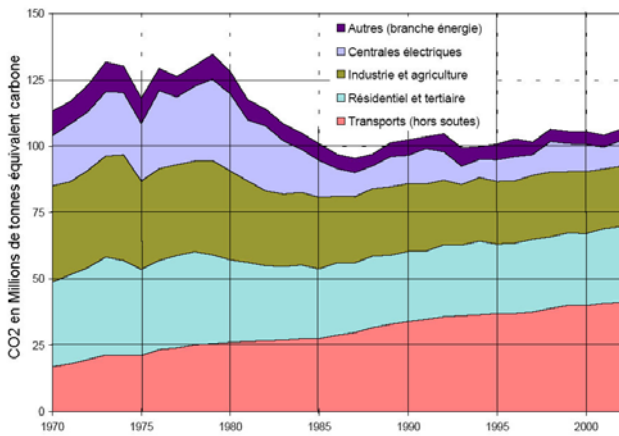


Figure 14 : Evolution des rejets de CO2 en tonnes équivalent carbone [DGEMP_03]

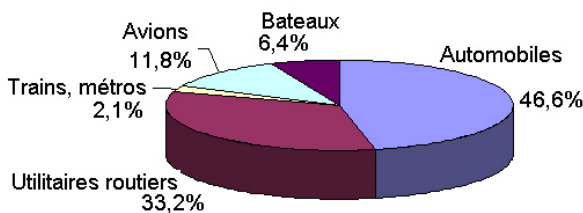


Figure 15 : Répartition de la consommation d'énergie des transports (DGEMP)

III-3- Prévisions

Nous avons maintenant conscience qu'un raisonnement à l'échelle planétaire est indispensable bien que ce soit souvent à l'échelle des nations que peuvent se prendre les décisions politiques et à l'échelle des citoyens que les pratiques peuvent influencer nos modes de consommation.

Nous avons vu précédemment que la consommation planétaire annuelle d'énergie primaire, aux alentours de l'an 2000, était de 140.10^{12} kWh. Bien que les scénari mondiaux soient nombreux (Agence Internationale de l'Energie, Conseil Mondial de l'Energie, Département Américain de l'Energie...), ils s'accordent tous pour prévoir une croissance de la consommation mondiale, principalement « à cause » du développement des pays comme la Chine, l'Inde etc...

La figure 16 montre les évolutions passées et prévues (différents scénari) de la consommation d'énergie primaire au niveau mondial.

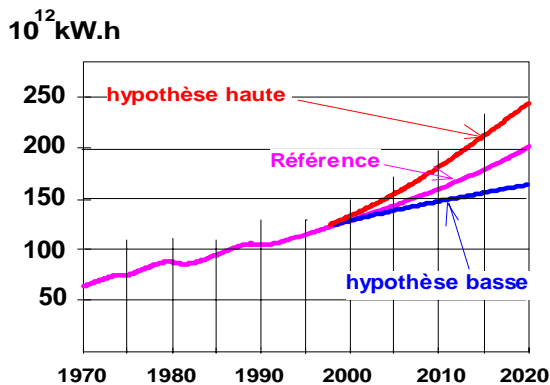


Figure 16 : Hypothèses de croissance de la consommation d'énergie primaire [Web_EIA]

Cependant ces dernières années, les prévisions de croissance énergétique ont été revues à la baisse, ce qui pourrait refléter un début de prise de conscience. On commence notamment à comprendre que les diverses pollutions vont coûter très chers et que les changements énergétiques (modes de production et consommation) peuvent être générateurs de nouvelles richesses et d'emplois [Brow_01]... La figure 17 donne les prévisions d'évolution mondiale, selon les ressources, du DOE (Department Of Energy des USA). On peut constater ou déplorer que peu de changement dans les ressources soient envisagés à l'horizon 2025... La courbe de croissance est en contradiction avec celle de la figure 6 dont les chiffres proviennent d'un auteur pessimiste. L'avenir nous dira qui avait raison...

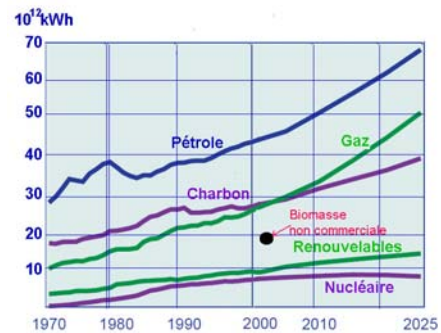


Figure 17 : Prévisions de croissance des ressources primaires jusqu'en 2020 [Web_EIA]

La part des ressources renouvelables augmentera probablement par nécessité mais il semble, d'après les prévisionnistes que cela vienne beaucoup plus tard. Le pétrolier Shell, dans l'un de ses scénari n'envisage les changements radicaux dans le bouquet énergétique planétaire qu'au-delà de 2020 comme le montre la figure 18.

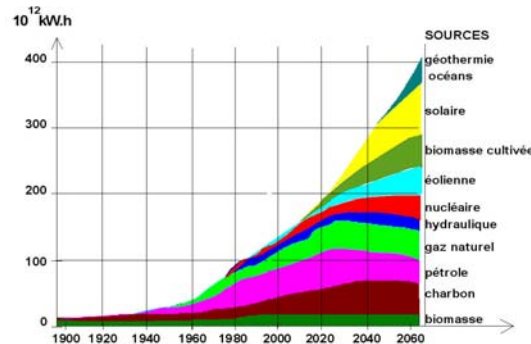


Figure 18 : Prévision d'évolution des sources d'énergie [Web_Shell]

IV- L'énergie électrique

Note : $1 \text{ TWh} = 10^9 \text{ kWh}$

IV-1- Production

La production d'électricité consomme environ le tiers de l'énergie primaire mondiale alors qu'elle représente une part finale bien plus faible. En effet, elle est, à plus de 80% (figure 21), d'origine thermique non renouvelable (fossiles et nucléaire) et son rendement de conversion est faible, de l'ordre de 30% à 60% dans le meilleur des cas, c'est-à-dire celui des turbines à cycles

combinés. De plus en plus souvent, la chaleur résiduelle est récupérée dans des cogénérateurs, mais cela ne concerne malheureusement pas le gros du parc actuel. Notons que la cogénération centralisée se heurte à deux problèmes. Le premier est lié aux médiocres possibilités du transport de chaleur à longue distance qui limitent beaucoup ses applications. Le second concerne l'application des directives. En France, pays excédentaire en électricité, on construit des usines de cogénération à la place de chaufferies pour des raisons d'attractivité économique (incitation à la cogénération), ce qui conduit à brûler plus de combustible que nécessaire pour produire, en plus du chauffage, une électricité qui n'était pas indispensable et qui rejette du CO₂...

Le taux de croissance mondial de la production d'électricité est de 2,4%/an. Mais ce chiffre cache des disparités importantes : 3,5%/an dans les pays en développement dont 4,3% en Chine et 1,7%/an dans les pays industrialisés [Web_EIA].

Aux niveaux mondial et français, nous sommes passés respectivement d'une production d'électricité de 120 et 3 TWh en 1920 à plus de 15 000 (facteur 125) et 547 TWh (facteur 180) en 2003. Certains pays exportent de l'électricité (la France : 1^{er} exportateur au monde) tandis que d'autres en importent, il ne faut donc pas confondre consommation intérieure et production.

En France en 2003 [RTE_03], sur les 547,7 TWh produits, 10,4 ont été autoconsommés par les producteurs, 31,7 ont été « perdus » sur les réseaux de transports, de distribution et de répartition (ce qui est perdu dans les postes de conversion des clients, qui achètent leur électricité en HTB, n'est pas comptabilisé) et 73,1 TWh ont été exportés.

Pour mieux adapter la production à la consommation, on exploite des centrales de pompage-turbinage (puissance installée de 6,3 GW sur un total national de 116,4 GW). La « production » de ces centrales particulières, qui peuvent également turbiner de l'eau issue des cycles hydrologiques naturels, est comptabilisée dans l'ensemble de la production hydroélectrique. La comptabilité, effectuée en 2002, montre que le pompage a consommé 7,4 TWh et produit 6,5 TWh (en fait l'énergie produite correspond, au rendement près, à celle pompée augmentée des apports naturels).

Les figures 19 et 20 montrent respectivement la courbe de croissance de la production mondiale d'électricité avec une prévision jusqu'en 2020 [Web_EIA] et l'évolution de la production française depuis 1970.

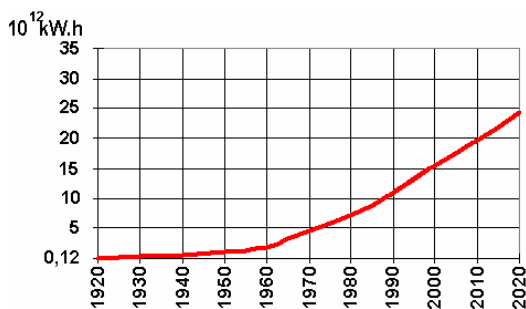


Figure 19 : Evolution et prévision de la production mondiale d'énergie électrique (10^{12} kWh = 1000 TWh)

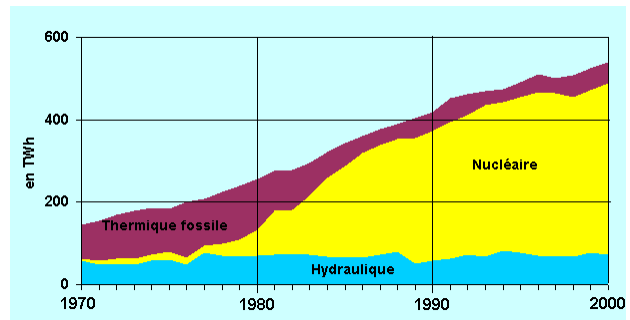


Figure 20 : Evolution production d'énergie électrique française (DGEMP)

La capacité de production au niveau mondial était d'environ **3400 GW** en 2000. La figure 21 montre la répartition par sources, au niveau mondial, en puissance installée et en énergie produite [IEA] :

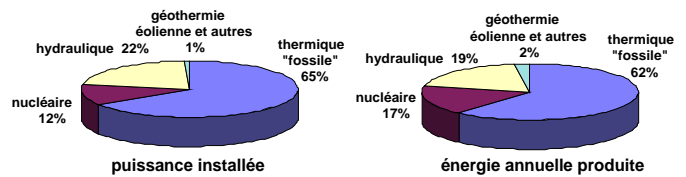


Figure 21 : Répartition de la production électrique en puissance installée (3400 GW) et en énergie produite (15.10^{12} kWh)

En ramenant les 15 000 TWh produits aux 3400 GW installés, tout se passe comme si l'ensemble du système de production fonctionnait en moyenne 4400 heures par an soit environ la moitié du temps (respectivement : 4000h, 6280h, 3800h et 7640h par an pour le thermique classique, le nucléaire, l'hydraulique et les autres).

IV-2- Consommation d'électricité

Nous avons constaté que la production d'électricité contribuait beaucoup à l'épuisement des ressources et à la pollution de la planète. Il est maintenant utile d'analyser ses usages, ceux dits spécifiques, pour lesquels on considère que l'électricité est la source la mieux adaptée : éclairage, force motrice, traitement de l'information... et ceux, non nommés, qui constituent une solution de facilité mais qui coûtent souvent cher à l'environnement, par exemple le chauffage des locaux et de l'eau sanitaire.

Les « usages spécifiques » ont sans doute une définition ambiguë qu'il conviendrait de bien redéfinir afin d'adopter les choix les plus rationnels possibles.

Cependant, l'électricité fait partie d'un « bouquet » énergétique global, et c'est son insertion harmonieuse dans l'ensemble qui doit être considérée. Si les ressources renouvelables sont abondantes (cas de la Norvège avec près de 100% d'hydroélectricité), le chauffage électrique est intéressant. La situation française est, de ce point de vue, particulière puisque une part non négligeable de l'électricité est exploitée pour près de 50% de la production d'eau chaude sanitaire, mais, associée à la tarification heures creuses, elle permet un important stockage d'énergie (entre 50 et 80 GWh par jour, pour comparaison, le barrage de Grand'Maison représente environ 400 GWh) qui contribue à la régulation d'un système fondé sur une production nucléaire peu modulable.

La répartition des usages de l'électricité varie beaucoup d'un pays à l'autre et nous avons choisi de ne considérer brièvement que le cas français. La figure 22 donne l'évolution depuis 1970.

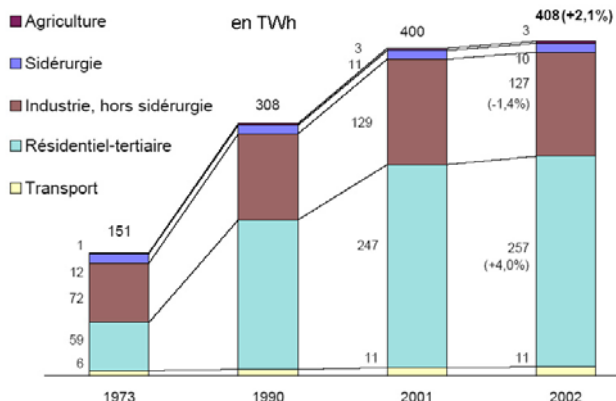


Figure 22 : Evolution de la consommation finale d'énergie électrique française par secteurs d'usage (DGEMP)

La consommation intérieure totale en 2003 a été d'environ 467 10⁹kWh en progression exceptionnelle de 3,9% par rapport à 2002. Cette augmentation trouve une explication dans des conditions climatiques extrêmes en hiver et en été et dans une incitation poussée à la consommation, notamment dans le domaine du chauffage électrique qui continue à progresser. Précédemment, la moyenne annuelle étant d'environ +2%/an. Il serait pourtant aisé de consommer beaucoup moins, mais l'ouverture des marchés ne va sans doute pas aider...

V- Contribution des ressources renouvelables

V-1- Énergie primaire

Nous avons vu, au chapitre III, que les ressources renouvelables contribuent faiblement au bilan mondial de la consommation d'énergie primaire (moins de 20%). Les pays industrialisés sont les plus « énergivores » mais avec le plus faible taux de renouvelables. Les prises de conscience environnementales mais également les inquiétudes économiques les ont conduits à accroître leur indépendance énergétique en faisant appel aux abondantes ressources renouvelables. En somme, nous n'y avons pas eu recours plus tôt sans doute pour des raisons liées à la facilité et à une centralisation justifiée par les contraintes d'une époque. Aujourd'hui, les technologies disponibles permet de décentraliser beaucoup plus aisément et de mieux exploiter des ressources par nature souvent diffuses.

L'Union Européenne (UE) a pris l'engagement, consécutivement aux accords de Kyoto, de faire passer à 11,5% la proportion des renouvelables dans son approvisionnement énergétique global. En 2002, nous n'en étions qu'à 5,08% soit 81 Mtep et il est hautement probable que nous repoussons l'échéance de l'objectif à 2020... La figure 23, issue du baromètre Observ'ER 2003, montre la répartition des ressources contribuant à la fourniture de ces 81 Mtep, le bois et l'électricité hydraulique y représentent 87%.

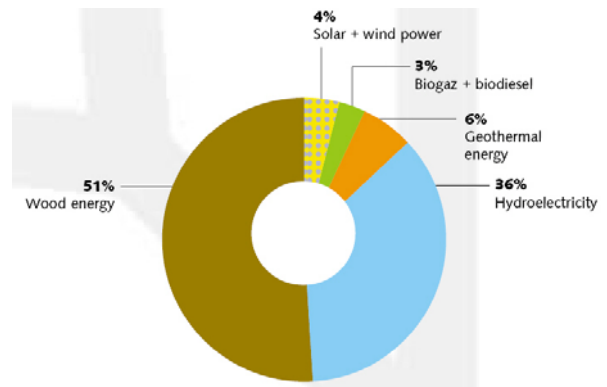


Figure 23 : Répartition des 81 Mtep primaires d'origine renouvelable en 2002 dans l'UE [BaroEuro_03]

La figure 24 met en évidence la production d'énergie renouvelable en France, hydroélectricité comprise. Grâce à l'hydroélectricité et à la biomasse (bois surtout), la France est le premier pays producteur d'énergies renouvelables en Europe devant la Suède. Dans la catégorie « autres », on trouve notamment la chaleur géothermique (0,14 Mtep), celle produite par les pompes à chaleur, les chauffages solaires, l'électricité éolienne, la cogénération à partir de déchets urbains (1,8 Mtep), du biogaz... En fait, la France est très avantagée et son potentiel est très loin d'être totalement exploité.

Production totale d'énergies renouvelables

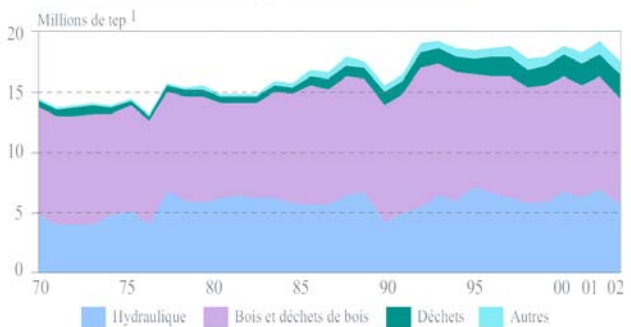


Figure 24 : Evolution de la production française d'énergie d'origine renouvelable [DGEMP_03]

Les ressources qui sont sans doute les plus à développer concernent la production de chaleur basse température dans les secteurs résidentiels et tertiaires qui représentent une grande part de notre action perturbatrice. Le potentiel du chauffage solaire (eau sanitaire et locaux) et de la géothermie (basse ou très basse énergie avec pompes à chaleur) est en effet énorme. Alors, l'électricité utilisée pour alimenter pompes, compresseurs, systèmes de régulation... constitue un usage particulièrement pertinent.

Les transports, complètement dépendants des carburants, peuvent avantageusement brûler des biocarburants. Dans l'UE, ceux-ci entrent actuellement à hauteur de moins de 1% dans l'ensemble des carburants mais leur croissance est très rapide. Les objectifs de 5,75% en 2010 ne seront pas atteints mais on espère près de 4% [BaroEuro_03]. Un jour, ils pourraient consommer de l'hydrogène d'origine renouvelable, mais il faudra encore attendre quelques décennies.

V-2- Pénétration de l'électricité d'origine renouvelable

Au niveau mondial, la production d'électricité consomme environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et à peine plus de 20% de la production est d'origine renouvelable (3000 TWh environ).

Dans l'UE, sur les 2560 TWh électriques produits en 2000, 368 TWh étaient d'origine renouvelable (soit 14,4%), leur répartition selon les sources est donnée à la figure 25 [BaroEuro_02].

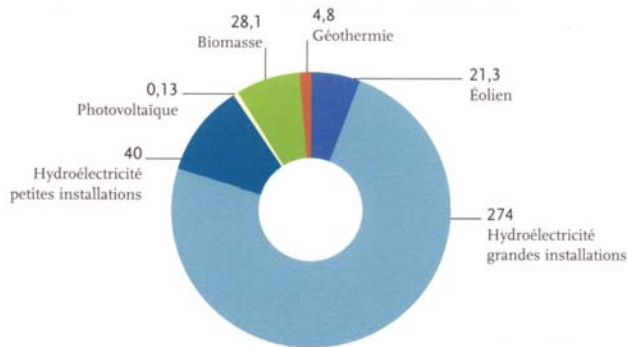


Figure 25 : UE en 2000 : parts des ressources pour la production d'électricité d'origine renouvelable [BaroEuro_02]

Le livre blanc communautaire [CEE_LivreBlanc] en matière d'énergie a émis le souhait d'un passage à 655 TWh renouvelables en 2010 sur un total envisagé de 2850 TWh soit une part de 23%. Sur ces 655 TWh, l'éolien devrait contribuer à hauteur de 80 TWh avec une puissance installée de 40 GW.

La figure 26 montre le taux de production d'électricité renouvelable des pays de l'UE en 2002 et leurs engagements pour 2010.

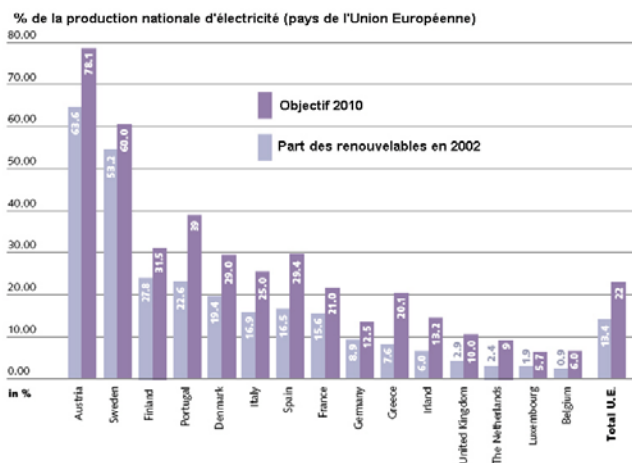


Figure 26 : Part de la production d'électricité renouvelable dans les pays de l'UE en 2002 et objectifs 2010 [BaroEuro_02]

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne (figure 27) subit de très loin le plus fort taux de croissance depuis plus de 10 ans et cela devrait continuer pendant les 20 prochaines années. Ainsi l'aérogénération devrait constituer la plus grande contribution à la réduction de l'effet de serre durant les prochaines décennies.

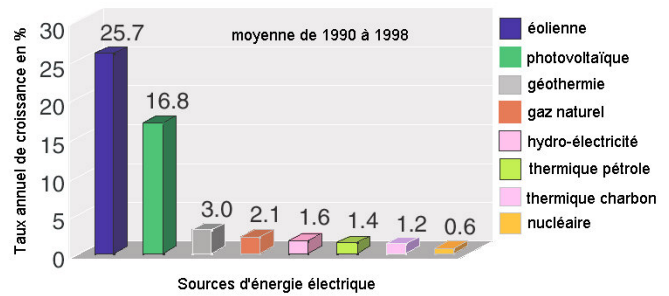


Figure 27 : Taux de croissance des différentes sources d'énergie électrique, moyenne entre 1990 et 1998 (IEEE Power & Energy Mag. 2003 [Rah_03])

Quant aux coûts de production de ces « nouveaux » moyens, comme le montre la figure 28, ils ont considérablement baissé et continueront de le faire jusqu'à ce que les technologies se stabilisent. Si l'on sait un jour prendre en compte tous les coûts environnementaux, il est fort probable que les ressources renouvelables seront les plus compétitives.

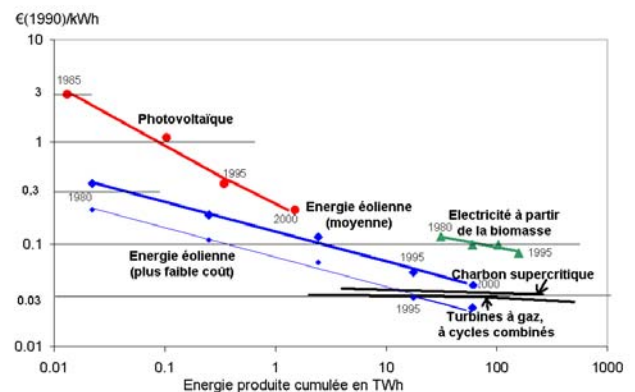


Figure 28 : Courbe de baisse des coûts de production en fonction de l'énergie produite cumulée (données Agence Internationale de l'Énergie)

V-3- Les différentes filières [Mul_03a]

V.3a- Hydraulique

C'est aujourd'hui, et de très loin, la première source renouvelable d'électricité. La puissance installée dans le monde dépasse 750 GW (2001) pour une production annuelle de plus de $2,7 \cdot 10^{12}$ kWh. C'est une solution extrêmement attractive qui est exploitée au maximum de son potentiel dans les pays industrialisés. En France, environ 90% des ressources sont utilisées. Au niveau mondial, l'énergie hydraulique pourrait permettre de produire 40 000 TWh.

Dans certains cas géologiquement favorables, des bassins haut et bas permettent d'effectuer un stockage d'énergie en pompant de l'eau puis de la restituer en la turbinant. Ces dispositifs de « stockage hydraulique gravitaire » jouent un rôle essentiel dans la stabilité du réseau. En France, ils ont été construits en complément du dispositif électronucléaire dont la souplesse de réglage est insuffisante pour permettre d'adapter à chaque instant la production à la consommation. D'une façon générale, la présence de barrages hydroélectriques constitue une solution très intéressante pour accumuler l'énergie hydraulique. C'est l'un des meilleurs atouts de cette filière.

V.3b- Solaire thermodynamique

On peut exploiter directement la chaleur rayonnée par le soleil pour chauffer de l'eau et actionner des turbines comme dans les centrales thermiques.

Pour la production à grande échelle, on trouve principalement deux grandes familles de systèmes solaires thermodynamiques. La première exploite des capteurs cylindrico-paraboliques (auges) au fond desquels se trouve un tube parcouru par un fluide caloporteur. Leur axe de rotation nord-sud permet le suivi du soleil d'est en ouest. En Californie, de 1984 à 1991, neuf usines de 13,8 à 80 MW ont été construites et totalisent une puissance de 354 MW. La seconde famille met en œuvre une tour contenant une chaudière vers laquelle est concentré le rayonnement capté par un champ d'héliostats. En France, la centrale Thémis dans les Pyrénées a permis de tester ce principe durant les années 1980 [Bond_89].

Ces centrales peuvent être avantageusement couplées avec un autre mode de chauffage, par exemple au gaz. Le coût de production du kWh peut ainsi devenir plus facilement compétitif et de très nombreux projets sont en préparation dans le monde. On peut considérer que la filière technologique à auges a atteint une bonne maturité industrielle.

Outre ces usines à turbines à vapeur, des dispositifs à effet de cheminée ont été testés (Espagne) et sont envisagés pour une production à grande échelle. Ils sont fondés sur le chauffage, via un capteur thermique situé au niveau du sol, de l'air ambiant qui se trouve ensuite naturellement aspiré dans une cheminée très haute. Des aérogénérateurs sont interposés dans le courant d'air et produisent de l'électricité (projet australien d'immenses usines de 200 MW_e).

Enfin, il a également été envisagé d'exploiter l'énergie thermique solaire accumulée dans les mers tropicales (projets OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion) [Avery_02]. De nombreux projets d'extraction de cette « énergie thermique des mers » ont été menés en mettant en œuvre des machines thermodynamiques fonctionnant sur la faible différence de température (10 à 20°C) existant entre surface et profondeur (environ 1000 m).

V.3c- Solaire photovoltaïque

La conversion photovoltaïque (PV) présente l'immense avantage d'être complètement statique et par conséquent d'une excellente fiabilité et d'une faible maintenance. Les cellules au silicium cristallin dominent actuellement le marché, mais d'autres technologies notamment en couches minces vont probablement émerger. Mais le coût des générateurs PV est encore très élevé, sachant que la durée d'ensoleillement équivalente à pleine puissance (1 kW/m²) est comprise entre 1000 et 2000h, le prix de revient du kWh PV est parmi les plus élevés. Il devrait cependant baisser suffisamment pour qu'à l'horizon 2030/50, cette technologie contribue significativement à la production d'électricité. Les différents programmes (Japon, Allemagne, USA...) de toits solaires ont ainsi permis d'accélérer la courbe d'apprentissage et la baisse des coûts, alors qu'avant la fin des années 90, l'essentiel du marché se trouvait dans les applications non raccordées au réseau.

Il y a peu d'installations à grande échelle. En Italie, une usine de 3,3 MW produit 4,6 GWh annuels sur le site

de Serre et fin 2002, c'est en Bavière que 2 centrales (1,7 et 4 MW) ont été mises en service pour un coût d'investissement d'environ 4,4 €/W, au lieu de 6 dans les installations de toits solaires. A ce niveau de puissance, on a pu bénéficier des effets d'échelle sur le prix des convertisseurs raccordés au réseau.

Fin 2002, la puissance photovoltaïque installée (systèmes connectés ou non au réseau) dans le monde atteignait environ 2 GW.

V.3d- Aérogénération (éoliennes) [Obser_Jan04]

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses. A un coût d'environ 1 €/W en zone terrestre, la production à grande échelle (actuellement turbines de 400 kW à 4 MW) devient rentable dans les zones suffisamment ventées. Le taux de croissance actuel est de 25% par an.

Fin 2003, plus de 39 GW éoliens étaient installés dans le monde. L'Allemagne reste leader avec 14,6 GW, quant à la France, malgré des programmes incitatifs et l'un des meilleurs potentiels, la filière peine à décoller (253 MW). La durée équivalente de production à pleine puissance est comprise entre 2000 et 4000 heures annuelles selon les sites (terrestres convenablement ventés à offshore).

Le potentiel offshore européen est estimé à plus de 3 10¹² kWh/an, soit presque le double de la consommation européenne d'électricité. C'est d'ailleurs dans ce domaine que les installations vont maintenant s'étendre. Les premières expériences de fermes offshore datent de 1990, fin 2003, ce sont 540 MW qui étaient en service, dont 400 MW au Danemark, leader industriel. Le Royaume Uni prévoit entre 5 et 7 GW en 2010.

V.3e- Houlo-générateurs

La houle représente un immense gisement d'énergie, cependant le milieu marin est relativement hostile (tempêtes, corrosion). Les puissances disponibles s'expriment par unité de longueur de front de vague et atteignent quelques 10 kW/m. La puissance moyenne annuelle sur les côtes de la façade Atlantique est comprise entre 15 et 80 kW/m [Clé_02]. Des recherches sur des générateurs électromécaniques utilisant le mouvement ondulatoire de l'eau ont été menées, de nombreuses expériences existent et plusieurs prototypes ont été testés à des niveaux de puissance allant jusqu'au MW.

V.3f- Electricité géothermique

La géothermie haute énergie (150 à 350°C) permet de produire de l'électricité en transformant de l'eau en vapeur ou en utilisant directement la vapeur sous pression. La puissance mondiale installée était, en 2000 d'un peu plus de 8 GW électriques pour une production totale d'environ 50 10⁹ kWh.

En Guadeloupe, l'usine de Bouillante, mise en service en 1985, possède une capacité de 4,2 MW qui doit croître à 20 MW prochainement (production annuelle attendue de 0,16 10⁹ kWh).

L'Italie dispose d'une capacité de production de 790 MW pour 4,7 10⁹ kWh annuels (1,6% de sa production totale d'électricité) dont une centrale de

grande puissance (Valle Secolo, 1991) comprenant 2 groupes de 60 MW.

La technologie des « roches chaudes sèches » fait l'objet de travaux de recherche en Europe (en Alsace à Soultz sous Forêts) avec un puits à 3600 m. Elle est fondée sur l'injection d'eau dans des zones profondes de roches fracturées et permettrait d'utiliser de nombreux sites jusqu'à maintenant inexploitable par les techniques classiques.

V.3g- Exploitation des courants marins

La technique la plus connue est celle des usines marémotrices qui nécessitent la construction d'un barrage. Celle de la Rance [Ban_97] (24 groupes de 10 MW) produit annuellement 540.10⁶kWh soit environ 91% de l'énergie électrique marémotrice mondiale. Elle reste en effet l'une des seules usines marémotrices au monde de taille industrielle. D'autres projets ont fait l'objet d'étude (Canada : Fundy Bay 5300 MW, UK : Severn 8640 MW), mais ils ne verront sans doute pas le jour pour des raisons d'acceptabilité.

Actuellement, on considère qu'il est préférable d'implanter des turbines sous marines et d'exploiter directement les courants marins comme on le ferait avec des éoliennes. Le potentiel, difficilement estimable, est évalué à plusieurs centaines de TWh annuels pour les seules côtes européennes. Pour exemple, l'entreprise norvégienne Hammerfest Strøm AS envisage un parc de 15 000 éoliennes sous-marines entraînées par les courants à proximité des côtes de Norvège avec un potentiel de production de 450 TWh (60 sites sélectionnés le long du littoral norvégien).

V.3- Cogénération à partir de la biomasse ou de déchets

La cogénération consiste à valoriser la chaleur habituellement perdue lors de la conversion mécanique dans une machine thermodynamique destinée à fabriquer de l'électricité. On peut ainsi brûler des produits issus de la photosynthèse (bois, bagasse...) ou en extraire un combustible de meilleure qualité (biogaz : méthane, méthanol) dans des usines spécialisées. Aux USA, plus de 350 usines totalisent une production supérieure à 7000 MWe. A grande échelle, on peut utiliser des turbines à vapeur et, à petite échelle, des moteurs à combustion interne.

Les ordures ménagères représentent également une source d'énergie intéressante. Dans les pays industrialisés, l'incinération d'une tonne d'ordures ménagères permet de produire 300 à 500 kWh. Le gaz de décharge représente également un gisement très intéressant.

Les cogénérateurs de petite puissance pourraient devenir les chaudières de demain en produisant électricité et chaleur pour l'habitat.

V.4- Indispensable stockage de l'énergie

Hormis les carburants issus de la biomasse et la chaleur géothermique qui diffuse régulièrement, les autres ressources renouvelables présentent un inconvénient majeur : leur fluctuation indépendamment de la demande.

Que ce soit pour exploiter la chaleur rayonnée par le soleil, l'électricité PV ou éolienne, un stockage d'énergie se révèle indispensable.

Comme cela a été le cas, en d'autres temps, pour la mise en place du système électronucléaire, qui est peu modulable, il est nécessaire aujourd'hui de songer à investir dans des moyens de stockage. Mais alors de nombreuses questions se posent, notamment dans le nouveau contexte d'ouverture des marchés. L'une d'elles est « où faut-il stocker ? ». Les solutions d'accumulateur ne manquent pas, mais elles sont toutes coûteuses, dissipent de l'énergie lors des opérations d'échange et s'usent au cours des cycles de charge/décharge. C'est en tout cas l'un des points cruciaux du développement des systèmes de production électrique du futur. La figure 29 montre schématiquement comment pourraient être constitués, dans un futur proche, les réseaux électriques. Ils intègreraient les anciennes usines centralisées et tous les nouveaux acteurs décentralisés ou dispersés munis de moyens de stockage, par conséquent également décentralisés. Un tel système permettrait une réelle pénétration des ressources renouvelables sans mettre en danger la stabilité du réseau et en offrant la possibilité d'ilotage des producteurs décentralisés équipés d'accumulateurs, conférant ainsi au système une quasi invulnérabilité.

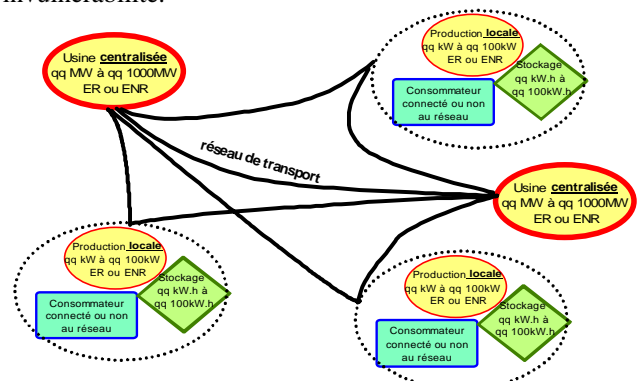


Figure 29 : Système de productions centralisée et décentralisée en réseau. (ER = Energies renouvel., ENR = Energies Non Renouv.).

VI- Conclusion, propositions.

Les menaces du changement climatique et d'épuisement de nos ressources (non renouvelables) de carburants fossiles et d'uranium pèsent de plus en plus sur l'économie, la stabilité politique de nos pays et sur le comportement des citoyens.

Parallèlement, la nature nous offre suffisamment d'énergie pour satisfaire la totalité de nos besoins mais de façon diffuse et souvent fluctuante, alors que nous avons pris l'habitude de centraliser une partie de notre production d'énergie : tout particulièrement celle d'électricité. Comme la chaleur se transporte mal, il n'y a pas de réseaux de chaleur sur de longues distances et la chaleur a conservé des modes de production décentralisés sur le lieu de consommation. Enfin, il faut dire et redire que le stockage est indispensable pour accompagner la bonne utilisation des ressources renouvelables, que ce soit pour la chaleur, le froid ou l'électricité. Bien sûr, il a un coût...

Il est temps de repenser complètement nos modes de production et de consommation d'énergie. En terme de consommation, le temps de retour sur investissement d'un système plus économe est souvent très court et on peut

affirmer qu'économiser 1 kWh coûte moins cher que de le produire !

On reproche parfois le faible rendement de conversion de certains systèmes de production à partir des ressources renouvelables (cas de la génération photovoltaïque par exemple). En fait, le problème n'est pas là. Lorsqu'on exploite des ressources abondantes et renouvelables. Les questions qui doivent être posées sont :

- l'énergie qui doit être dépensée pour fabriquer puis recycler ce système sera-t-elle largement compensée par la production durant sa vie ?

- le faible rendement ne se traduit-il pas par un surcoût d'investissement inacceptable ?

- etc...

Dans tous les cas évoqués précédemment, génération PV comprise, le bilan énergétique global est largement positif et les recherches sont orientées vers son amélioration. Un faible rendement peut parfois être gage d'un moindre impact sur l'environnement !

On ne pourrait clore le sujet sans évoquer l'hydrogène, carburant propre par excellence, à condition qu'il soit produit proprement, il pourrait constituer un vecteur d'énergie idéalement complémentaire de l'électricité, notamment dans les transports. Mais l'hydrogène est encore loin d'être un simple carburant commercial, des développements importants doivent également être menés pour améliorer son stockage et son transport.

Le développement durable, tel que nous pouvons l'entendre aussi bien du point de vue sociétal qu'environnemental, passera sans aucun doute par l'utilisation massive des ressources renouvelables. Même si elles ne sont pas exemptes de perturbations environnementales (rien n'est gratuit, lorsque l'on manipule l'énergie), elles sont certainement les seules à être exploitables pour très longtemps avec des moyens actuellement disponibles et opérationnels. Alors pourquoi attendre ?

Les transitions, pour qu'elles soient acceptées et réalisables, doivent être « douces ». Il faut donc élaborer des scénari d'évolution sur de longues durées (au moins 50 ans). Abandonner brutalement l'électricité nucléaire serait d'ailleurs sans doute très risqué. Notre sécurité réside en effet dans la diversité et il est indispensable de multiplier les ressources. Enfin, n'oublions pas qu'être totalement dépendants de la nature peut être dangereux, particulièrement en cas de catastrophes climatiques graves. Il n'est donc pas inutile de chercher également en direction de la fusion nucléaire.

VII- Bibliographie

[Avery_02] W. H. AVERY, "Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)", Encyclopedia of Physical Science and Technology, Vol 11, 2002, pp. 123-160.

[Ban_97] M. BANAL, « L'énergie marémotrice », REE n°8, sept.97, pp.6-7.

[BaroEuro_02] Eurobserv'ER, « Le baromètre européen des énergies renouvelables », bilan octobre 2000/février 2002. Editions Systèmes Solaires.

[BaroEuro_03] Eurobserv'ER, « Le baromètre Européen 2003 des énergies renouvelables », chiffres 2002, 3^{ème} bilan, Editions Systèmes Solaires. Téléchargeable sur : www.energies-renouvelables.org

[Bon_89] B. BONDUELLE, B. IVOIRE, A. FERRIERE, « La centrale expérimentale Thémis : bilan et perspectives », Revue de Phys. Appl., avril 1989, pp.453-461.

[Brow_01] L.R. BROWN, « Éco-Économie. Une autre croissance est possible, écologique et durable », Seuil 2003 (Ed. orig. « Eco-Economy. Building an Economy for the Earth », W.W. Norton & Comp. Ltd. N.Y. 2001). Entièrement téléchargeable sur : www.earth-policy.org

[Brund_97] G.H. BRUNDTLAND, « Our Common Future. », Report for the World Commission on Environment and Development (ONU) Oxford University Press 1987.

[CEA_01] CEA, « Uranium : l'abondance au rendez-vous », Les défis du CEA n°94, dec-janv. 2002, pp.4-5.

[CEE_LivreBlanc] Commission Européenne « Énergie pour l'avenir : les sources d'énergie renouvelables. Livre blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires ».

[Chab_97] B. CHABOT, « Énergies renouvelables » Encyclopaedia Universalis 1997.

[Clé_02] A. CLÉMENT et al. « Wave energy in Europe : current status and perspectives », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pergamon, 6 (2002), pp.405-431.

[Comb_01] M. COMBARNOUS, « Les biomasses végétales et animales », Ecole d'été de physique IN2P3, Caen, août 2001.

[Cre_96] P. CREOLA, « Space and the Fate of Humanity », Symp. Space of service to Humanity, 5-7 feb. 96, Strasbourg., pp.3-14.

[Darl_03] DARLY (association) et FNAUT « Etude ressources énergétiques et transports », sept. 2003.

[DGEMP_03] DGEMP, « L'Énergie en France-Repères », Edition 2003, Chiffres clés, Ministère de l'Économie des Finances et de l'Industrie.

[EnPlus_02] Énergie Plus, « Comment capter et stocker le gaz carbonique », supplément n°284 15 avril 2002, pp.34-37.

[IEA_03a] Intern. Energy Agency, « Renewables Information », IEA Statistics, 2003, 200p.

[IEA_03b] Intern. Energy Agency, « Key World Energy Statistics », 2003, 78p. <http://www.iea.org>

[Joha_02] Rapport du Sommet mondial pour le développement durable, ONU, Johannesburg (Afrique du Sud), 26 août-4 septembre 2002. (Téléchargeable).

[Jacq_95] A. JACQUARD, « J'accuse l'économie triomphante », Calmann-Lévy 1995 (aussi édité au Livre de Poche)

[Lah_00a] J. LAHERRÈRE, « Quelles énergies en 2020 et quelles incertitudes ? », Revue Géologues n°124, 03-2000. Téléchargeable sur <http://www.cifeg.org/>

[Laher_00b] J. LAHERRÈRE, « Vers un Déclin de la Production Pétrolière », colloque Energie et développement durable, 11 octobre 2000.

[Laher_03] J. LAHERRÈRE, « How to estimate future oil supply and oil demand ? », Internat. Conf. on Oil Demand, Production and Costs - Prospects for the Future. Copenhagen, 2003 December 10.
<http://www.oilcrisis.com/laherrere/>

[Lau_04] M.H. LAURENT et G. SALAÛN, « La demande mondiale d'énergie sur le long terme », Revue 3EI, n°36, mars 2004.

[Mul_98] B. MULTON, « L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. », Revue 3E.I n°13, septembre 98, pp.29-38.

[Mul_99] B. MULTON « L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production. », Journées électrotech. du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris, 8 p.

[Mul_03a] B. MULTON, « Production d'électricité par des sources renouvelables », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D4005/6, mai 2003.

[Mul_03b] B. MULTON, O. GERGAUD, G. ROBIN, H. BEN AHMED, « Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie », Techniques de l'Ingénieur, D3900, novembre 2003.

[Mul03c] B. MULTON, J. RUER, « Stocker l'électricité : oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment ? », Publication ECRIN en contribution au débat national sur l'énergie, avril 2003, téléchargeable : <http://www.ecrin.asso.fr/energies/>

[ObsEn_FR02] Observatoire de l'Energie, « Chiffres clés ; L'énergie », DGEMP, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, document 2002.
www.minefi.gouv.fr

[Obser_Jan04] EurObserv'ER, Le baromètre éolien : 39 294 MW dans le monde début 2004, revue Systèmes Solaires n°140, janvier 2004, pp.55-68.

[Rah_03] S. RAHMAN, « Green power. What is it and where can we find it? », IEEE Power & Energy Magazine, Jan/Feb. 2003, pp.30-37.

[RTE_03] RTE, « Energie électrique en France en 2003, valeurs provisoires », publication du Gestionnaire du réseau de transport d'électricité, 31 déc. 2003.

[Tri_03] J. C. TRICHET, « Le vent pourrait éteindre la soif énergétique de l'humanité », Energie Plus sup. au n°300, 15 fev03, pp.13-18.

[Web_EDF] site internet d'électricité de France, <http://www.edf.fr/>

[Web_CEA] serveur internet du Commissariat à l'Energie Atomique, <http://paprika.saclay.cea.fr>.

[Web_EIA] site internet de l'Energy Information Administration du gouvernement US, notamment les rapports annuels « International Energy Outlook »
<http://www.eia.doe.gov/>

[Web_IFP] site de l'Institut Français du Pétrole, <http://www.ifp.fr>

[WWF_02] WWF, M. JENKINS et. al. « Living Planet Report 2002 » ou « Rapport 2002 planète vivante », June 2002. Téléchargeable sur internet.

Voir aussi documents (pédagogiques, recherche et vulgarisation) en téléchargement (stockage, éolien...) : www.bretagne.ens-cachan.fr rubriques recherche et département de mécatronique.

Organismes d'information sur l'Energie :

Conseil Mondial de l'Energie (World Energy Council) : <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>

Agence Internationale de l'Energie (International Energy Agency) : <http://www.iea.org>

Energy Information Administration :

<http://www.eia.doe.gov/>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) : <http://www.ademe.fr>

Electricité de France (EDF) : <http://www.edf.fr/>

Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) :

<http://www.cea.fr/>

Comité de liaison Energies Renouvelables (CLER) :

<http://www.cler.org>

Institut Français du Pétrole (IFP) : <http://www.ifp.fr>

Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières (DGEMP, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie) : <http://www.industrie.gouv.fr>

Institut de l'Energie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) : <http://www.iepf.org/>

Observateur des Energies Renouvelables (Observ'ER), revues Systèmes Solaires et Renewable Energy Journal : <http://energies-renouvelables.org>

ENERGIE PLUS : <http://www.energie-plus.com/>

CIELE : Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement : <http://www.ciele.org/>

VIII- Equivalences énergétiques

Equivalences entre les unités les plus courantes :

| |
|--|
| 1 Wh = 3600 J (1 10 ⁹ kWh = 10 ¹² Wh, 1 EJ = 10 ¹⁸ J) |
| 1 t.e.p. ≅ 11 600 kWh (tonne équivalent pétrole) |
| 1 baril (159 l ou 136 kg) ≅ 1700 kWh |
| 1 BTU (British Thermal Unit) ≅ 252 cal ≅ 1050 J |
| 1 quad BTU : 10 ¹⁵ BTU = 290.10 ⁹ kWh |

Les valeurs énergétiques PCI (pouvoir calorifique inférieur ou chaleur dégagée par fission dans le cas de l'uranium) moyennes des principaux combustibles sont données ci-dessous :

| hydrogène | gaz naturel | GPL | charbon |
|-----------|----------------------------|-----------|------------|
| 34 kWh/kg | 17 kWh/kg | 13 kWh/kg | 7,2 kWh/kg |
| | 11 à 12 kWh/m ³ | | |

| fuel | essence | bois | uranium naturel |
|-------------|-----------|--------------|----------------------------|
| 11,6 kWh/kg | 12 kWh/kg | 2 à 4 kWh/kg | 120.10 ³ kWh/kg |