

# ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

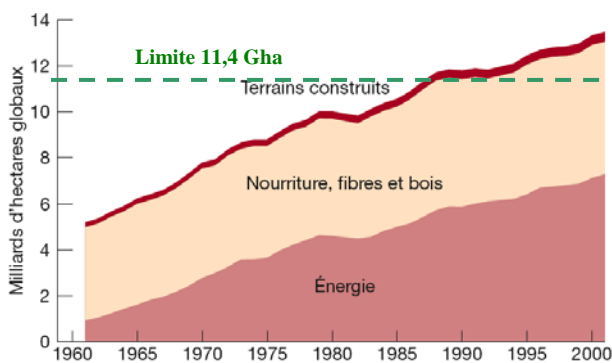
**Bernard MULTON, Julien SEIGNEURBIEUX, Marie RUELLAN, Hamid BEN AHMED**

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

## I- Activités énergétiques humaines : les deux nécessités d'un changement

Le 20<sup>ème</sup> 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) 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... Du sommet de Rio (1992) à celui de Montréal (2005), les nations participantes ont tenté d'élaborer des règles afin de réduire l'impact des activités humaines tout particulièrement en ce qui concerne le changement climatique.

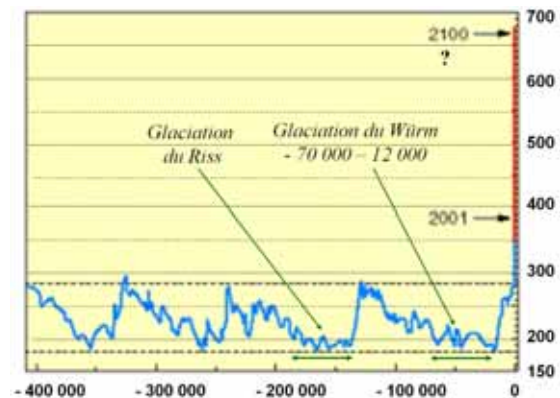
La notion d'*Empreinte Ecologique Mondiale*, proposée par le WWF (World Wide Fund For Nature), permet de quantifier, de façon encore imparfaite, l'impact des activités humaines sur l'écosystème. Il s'agit de la surface terrestre exploitée ou « consommée » pour les différentes activités humaines. Sur les 45 milliards d'ha (Gha) de la surface du globe, seuls 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 et en 2001, nous l'épuisons déjà avec une intensité de « 1,4 Terres ».



**Fig. 1 :** Empreinte Ecologique Mondiale d'après le rapport du WWF [WWF\_04].

On peut constater que l'énergie représente plus de 50% de l'empreinte totale. Les manipulations énergétiques des humains 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 les activités humaines, dont la combustion massive de combustibles fossiles, sont responsables 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 CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a été démontrée et constitue l'une des preuves les plus tangibles de l'impact des activités humaines. Certes dans le passé de la planète, la teneur en CO<sub>2</sub> et la température moyenne à la surface du globe ont oscillé simultanément au rythme de variations climatiques et l'on peut même dire que la nature a façonné l'atmosphère et, d'une façon générale, qu'elle a fortement interagi avec l'environnement. Certains impacts météoritiques ont sans doute également joué un rôle majeur. Si l'on observe l'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère terrestre durant l'histoire géologique, on constate une longue décroissance de plusieurs milliers de ppm vers 200 ppm durant le carbonifère puis le permien à la fin duquel elle remonte brusquement à plus de 1500 ppm (- 250 Mannées), remontée associée à l'une des extinctions de masse des espèces vivantes les plus remarquables. Puis, après encore divers soubresauts, la concentration de CO<sub>2</sub> oscille, depuis plus d'un million d'années entre 180 et 280 ppm. La pseudo-période d'oscillation nous laissait entrevoir une glaciation prochaine car la température moyenne est corrélée à la concentration de CO<sub>2</sub>, mais les activités humaines prolongent la croissance de la courbe de concentration de CO<sub>2</sub> au-delà de ce que la planète a connu durant le dernier million d'année. En 2001, nous avons déjà atteint 380 ppm. Selon les scénarios de comportement de l'humanité, nous pourrions atteindre entre 500 et 900 ppm à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (rapport IPCC 2001).



**Fig. 2 :** Evolution de la concentration de CO<sub>2</sub> en ppm (parties par million) durant les derniers 400 000 ans (données IPCC)

Une tonne de carbone brûlée génère environ 3,7 tonnes de CO<sub>2</sub>. Les rejets de gaz à effet de serre sont tantôt mesurés en tonnes équivalent CO<sub>2</sub> (par exemple, à masse égale, le méthane est 14 fois plus « efficace » que le CO<sub>2</sub>) tantôt en tonnes de carbone. Le CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 !

Second volet de la problématique, l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables qui ont servi au développement de la civilisation industrielle actuelle. Les combustibles fossiles et l'uranium sont en effet en quantités limitées dans notre environnement et, de façon complètement déconnectée des pollutions qu'ils génèrent, l'échéance de leur épuisement approche à grands pas. La flambée des coûts, déjà amorcée et qui va sans doute s'amplifier, conduira à changer de ressources pour se tourner vers des solutions moins coûteuses : celles d'origine renouvelable !

La métaphore énoncée en 1996 par Peter CREOLA (Pdt du Long Term Space Policy Committee à l'ESA, European Space Agency) est explicite. 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 3. Alors, cette courbe fait penser à « *l'allumette que les humains ont craquée dans les ténèbres de l'éternité pour préparer leur avenir* ». Cette allumette va s'éteindre et nous devons très vite nous préparer un avenir durable.

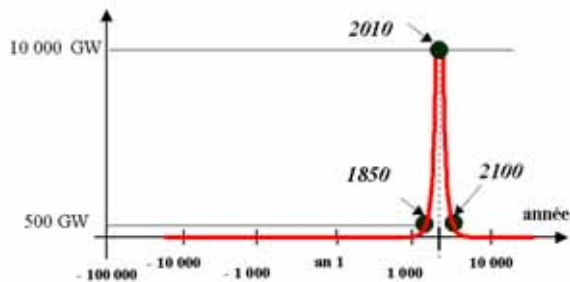


Fig. 3 : Courbe de la puissance mondiale de combustion des carburants fossiles.

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 :

- Est-il nécessaire de consommer autant d'énergie pour bien vivre ? Peut-on consommer plus efficacement tout en assurant les besoins élémentaires de toute l'humanité ?
- Comment opérer le nécessaire régime transitoire de changement de civilisation sans attendre un déclin violent de la civilisation actuelle ?
- Et maintenant que nous savons qu'il y aura un changement climatique, comment réduire notre vulnérabilité énergétique ?

Bien sûr, nous ne donnerons pas de réponses dans ce modeste article ! La complexité des problèmes nous dépasse largement. Leur traitement fait appel à la sociologie, l'économie, la politique et, dans une moindre mesure, à la physique et à la technologie dont il faut cesser de croire qu'elles représentent les solutions à tous nos problèmes...

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 écologiques et sociétales [Jacq\_95] [Brow\_01]. Dans ce contexte, le secteur de l'énergie revêt une très grande importance.

Faut-il enfin rappeler tous les conflits qui trouvent, en grande partie, leurs germes dans la recherche de la maîtrise de l'approvisionnement en matières premières (non renouvelables) énergétiques.

Nous proposons, dans cet article, d'effectuer un bref état des ressources énergétiques accessibles sur notre planète et d'analyser, encore plus brièvement, nos consommations. La production d'électricité à partir des ressources renouvelables fera l'objet d'un chapitre synthétique spécifique. Nous montrerons à quel point les ressources renouvelables ont la capacité de satisfaire les besoins de tous et sur le long terme.

Les chiffres fournis, notamment ceux des ressources, doivent être considérés comme des ordres de grandeurs.

## II- Bilan des ressources énergétiques

L'énergie primaire représente l'énergie directement transformable en chaleur par combustion, ou par fission dans le cas des centrales nucléaires. L'électricité issue des centrales thermiques via des cycles thermo-mécaniques (avec des rendements de 30 à 60%) est qualifiée d'énergie finale, il en est de même de l'essence distribuée à la pompe des stations services alors que le pétrole brut est considéré comme ressource primaire. La comptabilité énergétique est soumise à des règles parfois contestables qu'il est nécessaire de connaître pour effectuer des analyses critiques, notamment environnementales. Ce que l'on appelle énergie finale reste souvent encore très éloigné du service énergétique final (éclairage, transport, etc...) et la notion de besoin énergétique reste très difficile à quantifier. Enfin, on distingue deux catégories de ressources énergétiques primaires selon qu'elles sont renouvelables ou non.

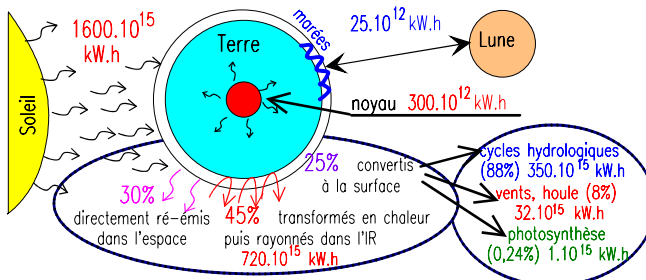
Les Ressources Énergétiques Renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continuellement (avec des cycles réguliers) par la nature. Sur la terre, elles ont pour origine, par ordre d'importance quantitative, le rayonnement solaire, la chaleur du noyau terrestre qui migre vers la surface terrestre et les interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans.

Les Ressources Énergétiques Non Renouvelables, comme leur nom l'indique, sont épuisables à notre échelle. Les carburants fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) sont eux-mêmes issus de l'action du rayonnement solaire sur le carbone et la vie (photosynthèse) pendant des centaines de millions d'années. Il s'agit ainsi en quelque sorte d'énergie solaire fossilisée. Quant à l'uranium utilisé pour la fission nucléaire, une fois les isotopes fissiles fissionnés, il n'est plus exploitable pour le même type de réaction. Ses réserves étant également limitées, et même très faibles comparativement aux ressources fossiles, il fait partie des ressources non renouvelables. Les réacteurs à neutrons rapides (surgénérateurs) qui permettraient de fissionner l'isotope 238 (beaucoup plus abondant) de l'uranium ne feraient que reculer l'échéance d'épuisement de cette ressource.

L'énergie de la fusion, si nous la maîtrisons un jour, pourra être qualifiée d'inépuisable à notre échelle, à condition qu'elle exploite des matières premières suffisamment abondante, ce qui n'est pas certain.

Pour référence, l'humanité consomme annuellement, en ce début de troisième millénaire, très approximativement 12 Gtep<sup>1</sup> d'énergie primaire ou 140.10<sup>12</sup> kWh (biomasse non commerciale comprise), soit une quantité correspondant à 1/8000<sup>ème</sup> de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre (voir Fig. 4).

**Ressources énergétiques renouvelables [CHAB\_97] [Observ'ER]**



**Fig. 4 : Sources et répartition quantitative annuelle des énergies renouvelables [Mul\_03b].**

**Le rayonnement solaire**

Rayonnement solaire au sol : l'énergie reçue à la surface de la terre (au total 720.10<sup>15</sup> kWh) varie, par m<sup>2</sup> et par an, entre 900 kWh et 2300 kWh. Une grande partie est captée par les océans et peut être exploitée sous forme d'énergie thermique des mers soit environ 80.10<sup>12</sup> kWh, essentiellement dans les zones tropicales.

L'ensemble des cycles hydrologiques traite environ 360.10<sup>15</sup> kWh annuels. 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<sup>12</sup> kWh et la valeur techniquement exploitable vaut, selon les estimations, entre 15 et 20.10<sup>12</sup> kWh (8 déjà estimés économiquement rentables).

L'énergie éolienne, également exploitée depuis longtemps (propulsion à voile, moulins à vent, pompes à eau), représente une ressource énorme, 32.10<sup>15</sup> kWh, dont la part terrestre exploitable est estimée à 50.10<sup>12</sup> kWh/an. Une grande partie se trouve « off-shore » (100.10<sup>12</sup> kWh/an accessibles), en effet les vents soufflent beaucoup plus fort au large et, surtout, plus régulièrement.

L'énergie de la houle (due à l'action du vent sur la surface des mers et des océans) accessible est évaluée à 1.10<sup>12</sup> kWh/an. La puissance moyenne par mètre de front

de vague possède des valeurs comprises entre 10 et 100 kW selon les sites.

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<sup>12</sup> kWh. On estime que la part aisément exploitable atteint 60.10<sup>12</sup> kWh.

**La géothermie**

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie annuelle d'environ 300.10<sup>12</sup> kWh (flux géothermique variant de 0,05 à 1 W/m<sup>2</sup>, ce qui est très faible par rapport au rayonnement solaire : plus de 10 000 fois plus). Les réserves exploitables avec les technologies actuelles sont d'environ 40.10<sup>9</sup> kWh en haute énergie (150 à 350°C, utilisée pour la production d'électricité) et 300.10<sup>9</sup> kWh en basse énergie (50 à 90°C pour le chauffage).

**Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil**

Les marées résultent des interactions terre lune soleil. L'énergie annuelle dissipée dans les courants de marée représente environ 25.10<sup>12</sup> 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<sup>9</sup> kWh (l'usine de la Rance produit annuellement : 0,54.10<sup>9</sup> kWh). Mais on imagine aujourd'hui placer des turbines sous-marines à la façon des éoliennes qui permettent d'accroître le potentiel tout en réduisant les contraintes environnementales.

Ressources annuelles	Solaire	bio-masse	Cycles hydrologiques			Géo-thermie	Marées
estim. Glob. kWh	700.10 <sup>15</sup>	4.5.10 <sup>15</sup>	360.10 <sup>15</sup>			300.10 <sup>12</sup>	25.10 <sup>12</sup>
part exploitable	qq. 10.10 <sup>12</sup>	60.10 <sup>12</sup>	hydro	éolien	houle	B/HTemp 340.10 <sup>9</sup>	estuaires 500.10 <sup>9</sup>
			20.10 <sup>12</sup>	150.10 <sup>12</sup>	1.10 <sup>12</sup>		

*Tab. 1 : Estimation des ressources énergétiques 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 des particularités du site. Ainsi, toutes les sources évoquées trouvent des débouchés. Précisons enfin que leur exploitation massive peut aussi être source de perturbation de l'environnement et/ou subir le refus de la population. **L'énergie la moins coûteuse, notamment pour l'environnement restera toujours celle que l'on ne consomme pas !**

Un trop faible rendement de conversion est parfois opposé aux systèmes de conversion des ressources renouvelables. Cette critique est généralement sans fondement ; en effet, lorsque l'on exploite des ressources renouvelables, un faible rendement est souvent gage d'une moindre perturbation.

**Ressources énergétiques non renouvelables**

Il s'agit d'une part des carburants fossiles : pétrole, charbon et gaz naturel, pour les plus connus et d'autre part des combustibles nucléaires pour la fission, aujourd'hui l'uranium. La biomasse mal exploitée et non

<sup>1</sup> La valeur énergétique d'1 tonne équivalent pétrole (tep) est égale à 11 600 kWh. Il est important de bien distinguer énergie et puissance. L'énergie correspond à un travail au sens large, elle revêt des formes variées : mécanique, chaleur, lumière... L'unité du système international est le joule (J), mais on trouve de nombreuses autres unités comme la calorie (4,18 J), le kilowattheure (3,6 millions de joules), la tonne équivalent pétrole. La puissance représente, quant à elle, le débit d'énergie. La formule la plus élémentaire qui lie puissance et énergie est : P = W/t. La puissance d'un convertisseur d'énergie est la grandeur généralement la plus dimensionnante. L'unité de puissance est le watt.

renouvelée peut parfois s'inscrire également dans cette catégorie.

La figure 5 montre graphiquement les ressources non renouvelables. Le rapport R/P correspond au rapport des ressources prouvées (ou « raisonnablement assurées et spéculatives » dans le cas de l'uranium) sur la consommation annuelle actuelle de chacune d'elles. Bien entendu, si cette consommation annuelle augmente, la durée d'exploitation sera d'autant raccourcie. On remarquera l'ampleur des ressources en charbon et la faiblesse de celles en uranium.

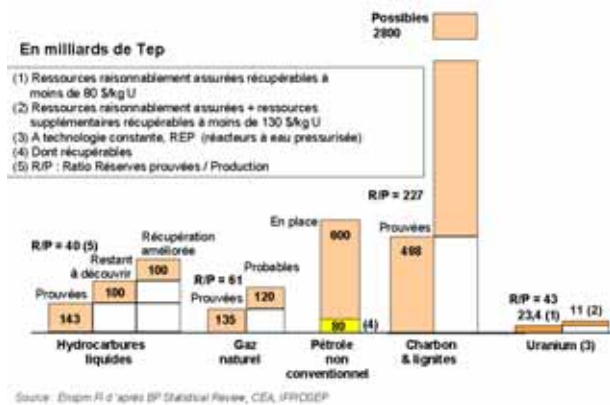


Fig. 5 : Ressources énergétiques fossiles et fissiles en Gtep (source ENSMP d'après BP Statistical review, CEA et IFP)

### Pétrole

Pendant longtemps, la prospection pétrolière intensive a révélé, en moyenne chaque année, l'équivalent de ce qui avait été consommé l'année précédente. Depuis 1970, la part du pétrole, dans le bouquet énergétique global, est passée de 45% de l'énergie primaire à environ 30% aujourd'hui, mais en valeur absolue sa consommation a doublé ! Depuis plus de 20 ans, nous consommons plus de pétrole que nous n'en découvrons. L'échéance d'exploitation, qui a reculé durant des décennies, approche désormais rapidement. Il en est de même pour le gaz et l'uranium. Toutes ces ressources ont constitué une solution de facilité (extraction, stockage...) et ont eu l'avantage d'un « faible » coût économique.

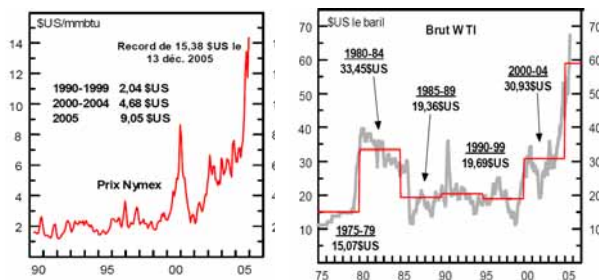


Fig. 6 : Evolution du prix du gaz et du pétrole en \$ courants (source : banque Scotia)

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'indispensable 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. La figure 6 montre l'évolution des cours mondiaux du prix du gaz (bourse Nymex New York Mercantile Exchange)

et du pétrole (WTI West Texas Intermediate) et leur flambée actuelle. Rappelons qu'en 2003, on envisageait un pétrole à 50\$ le baril pour 2050... L'augmentation des prix agit comme une contre réaction et permettra sans doute de ralentir la consommation, mais quoi qu'il en soit, les ressources iront en s'amenuisant et les prix poursuivront inexorablement leur croissance chaotique.

### 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 de ce siècle. Mais cela ne sera possible qu'à condition 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 du moment. Car toutes les augmentations des coûts de production à partir des combustibles fossiles vont rendre plus compétitives les solutions à base de ressources renouvelables.

Une taxation environnementale à 100 € la tonne de carbone (ou 27 € par tonne de CO2), valeur envisagée, aurait pour effet d'augmenter sévèrement le prix de revient des carburants fossiles (quasi-doublant du prix actuel de l'électricité dans le cas du charbon). Le piégeage et le stockage du CO2, envisagés dans les cas d'exploitation à grande échelle (par exemple en production d'électricité), pourraient coûter encore plus cher, de l'ordre de 70 € par tonne, ce qui serait encore pire économiquement.

### Nucléaire [Web\_CEA] [AGUET\_87] [CEA\_02]

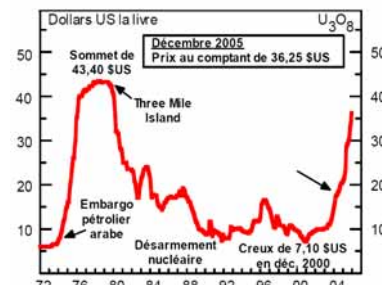


Fig. 7 : Evolution du prix (en \$ courants) de l'uranium naturel conditionné en U3O8 (source : banque Scotia)

L'uranium 235 utilisé dans les réactions de fission nucléaire est issu de l'uranium naturel lui-même épuisable, mais il y est contenu en très faibles proportions (0,7%). Même en considérant la valeur ultime de 6 millions de tonnes (actuellement acceptée), la valeur énergétique des ressources en uranium (en fissionnant l'isotope 235, réacteurs EPR) ne pourra jamais satisfaire qu'une faible part des besoins mondiaux. En effet, la fission nucléaire ne représente aujourd'hui qu'une part d'environ 7% de la consommation primaire mondiale. Si l'on devait actuellement doubler la production mondiale d'électricité d'origine nucléaire, les ressources ultimes seraient épuisées en moins de 40 ans...

D'après la banque Scotia, les prix devraient dépasser 40 \$US la livre d'ici la fin de 2006, approchant ou

dépassant le pic historique de 43,4 \$US atteint en mai 1978. Quant à l'uranium 238, très abondant dans l'uranium naturel (99%), il est transformable en matière fissile dans les réacteurs à neutrons rapides (surgénérateurs). Il offrirait, si les surgénérateurs fonctionnaient à l'échelle industrielle, une réserve de  $80.10^{15}$  kWh (7000 Gtep). Mais il faudrait d'abord que cette technologie soit réellement sûre et économique, ce qui est encore loin d'être le cas. En outre, elle continuerait à produire des déchets dangereux.

La fusion est censée nous libérer à la fois des problèmes de ressources et de déchets. Mais les ressources ne sont de toute façon pas illimitées et les déchets risquent fort d'être au rendez-vous car les matériaux très fortement irradiés du réacteur nécessiteront des remplacements fréquents et constitueront à leur tour des déchets. Enfin, il n'est en tout cas pas évident que cette filière atteindra un jour la maturité industrielle car les problèmes fondamentaux et technologiques sont très loin d'être résolus. Le projet ITER n'est là que pour franchir une étape parmi d'autres. Il est donc fondamental de ne pas compter aveuglément sur la fusion pour résoudre les problèmes que nous allons rencontrer durant ce siècle.

### III- Consommation primaire d'énergie

#### III-1- Consommation mondiale

On peut donner un ordre de grandeur de la consommation mondiale d'énergie **primaire** en 2003 :  **$140.10^{12}$  kWh** (12 Gtep) pour une **consommation finale** estimée à  **$60.10^{12}$  kWh** (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...).

Il est intéressant de mettre les valeurs d'énergie consommée en relation avec l'évolution de la population humaine. La population humaine a suivi la courbe d'évolution de la figure 8. Nous sommes maintenant plus de 6 milliards d'individus 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...

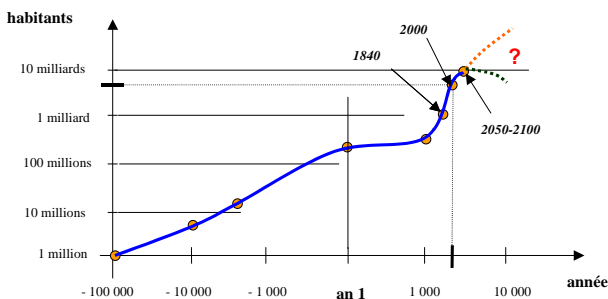


Fig. 8 : Evolution de la population humaine sur la terre.

La figure 9 permet de prendre conscience du niveau d'activité énergétique de l'humanité et surtout de son décollage durant l'ère industrielle. La puissance moyenne est obtenue en divisant la quantité d'énergie manipulée annuellement par la durée d'un an (8760 h). Elle atteint aujourd'hui  **$1/8000^{\text{ème}}$  de la puissance solaire moyenne** qui pénètre l'atmosphère et qui nous est accessible. En

imaginant que les 10 milliards d'êtres humains, qui pourraient peupler prochainement la terre, consomment autant d'énergie que chaque Américain aujourd'hui, l'humanité « manipulerait » l'équivalent de  $1/1000^{\text{ème}}$  de l'énergie solaire interceptée par la terre. C'est à la fois peu et énorme...

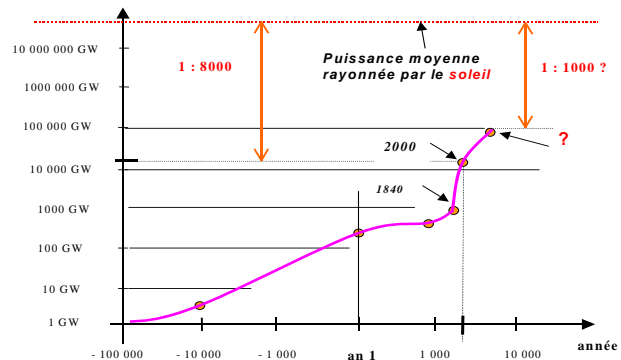


Fig. 9 : Evolution de la puissance moyenne des activités énergétiques humaines.

Sur les 12 Gtep consommés, plus de 80% sont d'origine non renouvelable (figure 10). La part non commerciale de l'énergie (biomasse), rarement prise en compte dans les documents officiels, est considérée ici. 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. Le taux de croissance global est actuellement de 1,8% par an.

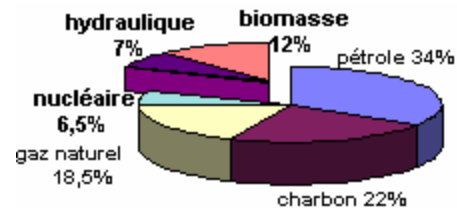


Fig. 10 : Origine des ressources primaires satisfaisant les besoins énergétiques actuels.

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

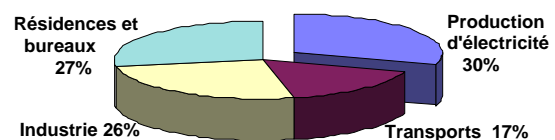


Fig. 11 : Répartition par mode de la consommation mondiale d'énergie primaire

L'optimisation énergétique des transports terrestre exploitera très probablement un jour l'électricité, mais 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 la plupart de nos

exigences d'autonomie et de vitesse. Il est donc urgent de trouver des carburants de substitution au pétrole et 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 de solutions économiques et ou écologiques. L'électrolyse de l'eau par une électricité d'origine renouvelable peut constituer l'une des voies. En considérant une électricité éolienne offshore à 5c€/kWh, on pourrait obtenir de l'hydrogène à 9c€/kWh et, compte tenu des coûts de compression, de stockage et de distribution, un carburant à 12 c€/kWh<sub>th</sub>. Cela reste néanmoins coûteux, pour comparaison, un coût de 1 €litre TTC pour de l'essence correspond à 8,3 c€/kWh<sub>th</sub> et à seulement 2 c€/kWh<sub>th</sub> hors taxes. Mais il faudra bien payer un jour le juste prix de l'énergie...

### III-2- 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 scénarios mondiaux soient nombreux (Agence Internationale de l'Energie, Conseil Mondial de l'Energie...), ils s'accordent tous pour prévoir une croissance de la consommation mondiale, croissance qui sera plus ou moins forte selon les options prises : plus environnementales ou plus économes.

La figure 12 montre les évolutions passées et prévues de la consommation mondiale d'énergie primaire

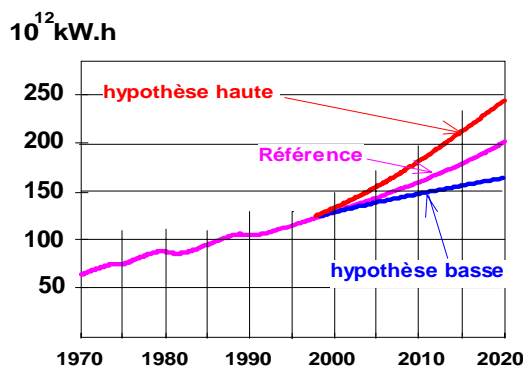


Fig. 12 : Hypothèses de croissance de la consommation d'énergie primaire

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 cher et que les changements énergétiques (modes de production et consommation) peuvent être générateurs de nouvelles richesses et d'emplois.

La part des ressources renouvelables augmentera par nécessité mais il semble, d'après les prévisionnistes que

cela vienne beaucoup plus tard. Le pétrolier Shell, dans l'un de ses scénarios à la fin des années 90, n'envisageait les changements radicaux dans le bouquet énergétique planétaire qu'au-delà de 2020 comme le montre la figure 13.

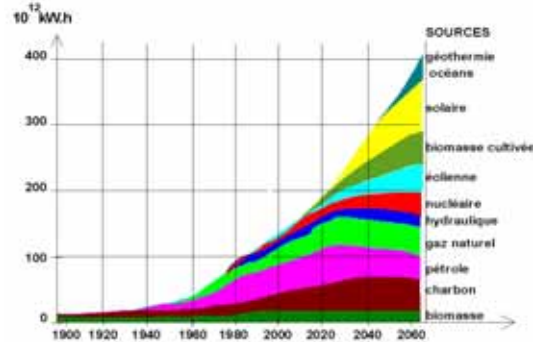


Fig. 13 : Prévision d'évolution des sources primaires d'énergie (source Shell)

### IV- L'énergie électrique

Note : 1 TWh =  $10^9$  kWh

#### IV-1- Production

La capacité de production au niveau mondial était d'environ 3900 GW en 2004, pour une production d'environ 17 300 TWh.

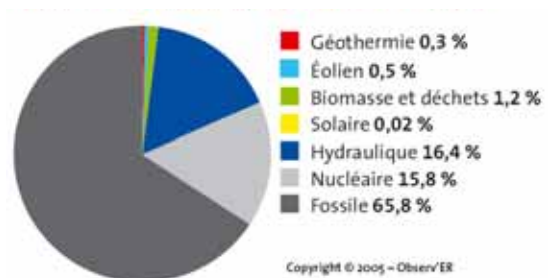


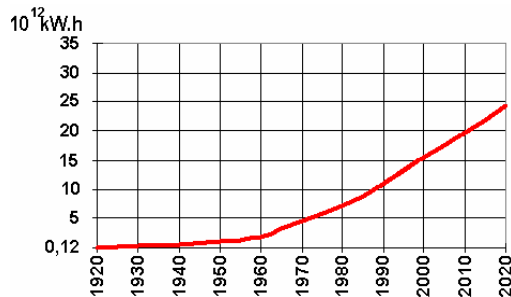
Fig. 14 : Origine de l'électricité mondiale en 2004 par sources primaires (source Observ'ER)

La production d'électricité consomme environ le tiers de l'énergie primaire mondiale alors qu'elle ne représente qu'une part finale bien plus faible. En effet (fig. 14), elle est, à plus de 80% 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 (centrales à cycles combinés). La production fossile se répartit en : 60% charbon, 30% gaz et 10% fuel. Les centrales de cogénération permettent de récupérer et d'exploiter la chaleur habituellement perdue (rejetée dans l'atmosphère ou les cours d'eau), mais cela ne concerne malheureusement pas le gros du parc en service. Notons que la cogénération centralisée se heurte aux médiocres possibilités du transport de chaleur à longue distance qui limitent beaucoup ses applications. Les prochaines centrales nucléaires (EPR) ne sont toujours pas prévues pour faire de la cogénération malgré un rendement électrique qui reste faible (environ 35%).

Par rapport au graphique, entre 2002 et 2005, la part de l'éolien a plus que doublé, et on peut estimer que l'éolien fournit en 2006 0,7% de l'électricité mondiale.

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. La figure 15 montre la croissance de la production mondiale d'électricité avec une prévision jusqu'en 2020.



**Fig. 15 :** Evolution et prévision de la production mondiale d'énergie électrique ( $10^{12}$  kWh = 1000 TWh)

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 est 1<sup>er</sup> exportateur au monde) tandis que d'autres en importent, il ne faut donc pas confondre consommation intérieure et production.

En France en 2004 (source RTE), sur les 546,6 TWh produits, 10 ont été autoconsommés par les producteurs, 32,1 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 62,1 TWh ont été exportés.

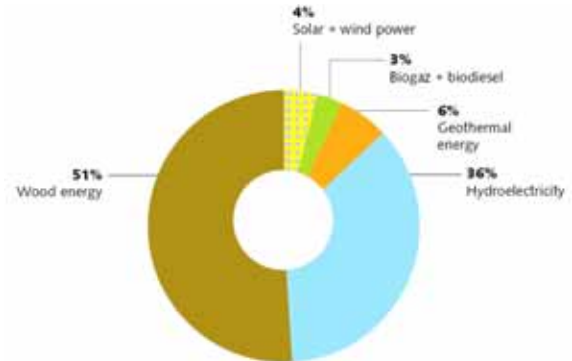
Pour mieux adapter la production à la consommation, on exploite des moyens de stockage, principalement des centrales de pompage turbinage. En France, sur une capacité totale de production de 116 GW, la puissance installée en stockage est de 6,3 GW auxquels on peut ajouter celle d'autres pays européens comme la Suisse et l'Italie qui achètent de l'énergie nucléaire française aux heures creuses et la revendent aux périodes de pointe.

## V- Contribution des ressources renouvelables

### V-1- Énergie primaire

Les ressources renouvelables contribuent encore modestement au bilan mondial de la consommation d'énergie primaire (moins de 20%). Mais les choix politiques, dictés par la recherche d'une moindre dépendance et par les considérations environnementales conduisent progressivement à accroître la part des abondantes ressources renouvelables. La ressource est généralement gratuite (soleil, vent, houle...), mais les convertisseurs d'énergie sont encore chers alors que la situation est inverse avec les solutions traditionnelles. Comme les coûts des convertisseurs d'énergies renouvelables diminuent et que ceux des matières premières énergétiques non renouvelables croissent, les énergies d'origine renouvelable deviennent compétitives. Les différents mécanismes de subvention mis en place ont pour rôle d'accélérer la transition.

Consécutivement aux accords de Kyoto, l'Union Européenne (UE) a pris l'engagement de faire passer à 11,5% la proportion des ressources renouvelables dans son approvisionnement énergétique global pour 2010. En 2002, nous n'en étions qu'à 5,08%, soit 81 Mtep. Pour comparaison, la consommation française d'énergie primaire en 2002 était de 276 Mtep. La figure 16, 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 cumulent, à elles deux, 87% de l'ensemble des renouvelables.



**Fig. 16 :** Répartition des 81 Mtep primaires d'origine renouvelable en 2002 dans l'UE (source Observ'ER)

Les ressources, qui sont sans doute les plus à développer à court terme, 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 et complètement sous-exploité. Alors, l'électricité utilisée pour alimenter pompes, compresseurs et systèmes de régulation constitue un usage particulièrement pertinent.

Les transports, complètement dépendants des carburants, peuvent avantageusement brûler des biocarburants (biodiesel et bioéthanol). Dans l'UE, ceux-ci entrent actuellement à près de 2% 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 plus de 4%. Un jour, les véhicules pourraient consommer de l'hydrogène d'origine renouvelable, mais il faudra encore attendre quelques décennies pour mettre en place des outils de production propres et économiques et développer les moyens de stockage adéquats. La pile à combustible n'est en effet qu'un maillon de la chaîne globale. Précisons, au passage, qu'un véhicule à pile à combustible qui consomme de l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles (ce qui est le cas aujourd'hui) présente quasiment le pire des écobilans.

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

Au niveau mondial, la production d'électricité consomme environ le tiers de l'énergie primaire et à peine plus de 18% de la production est d'origine renouvelable (3160 TWh environ). Leur répartition selon les sources est donnée à la figure 17. Dans l'UE, sur les 2560 TWh électriques produits en 2000, 368 TWh étaient d'origine renouvelable (soit 14,4%).

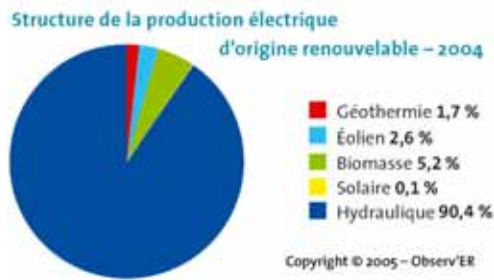


Fig. 17 : Origine de l'électricité mondiale d'origine renouvelable en 2004 par sources primaires (source Observ'ER)

Le livre blanc communautaire en matière d'énergie a émis le souhait d'un passage à 655 TWh d'électricité d'origine renouvelable 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.

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celles d'origines éolienne et photovoltaïque (figure 18) subissent un fort taux de croissance depuis plus de 10 ans et cela devrait continuer pendant les 20 prochaines années. L'aérogénération d'électricité devrait constituer la plus grande contribution à la réduction de l'effet de serre due à la production d'électricité durant les prochaines décennies.

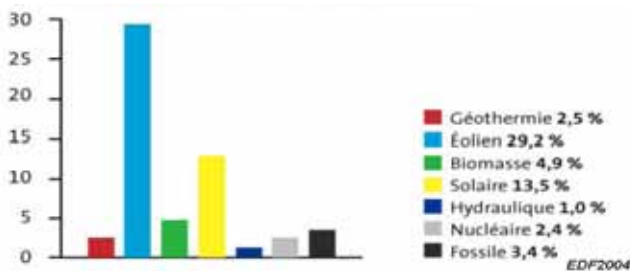


Fig. 18 : Taux de croissance mondiaux des différentes sources d'énergie électrique, moyenne entre 1993 et 2002 (source : EDF)

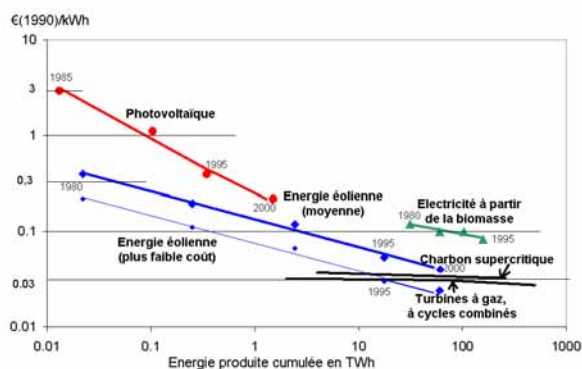


Fig. 19 : Baisse des coûts de production en fonction de l'énergie produite cumulée (données AIE)

Quant aux coûts de production de ces « nouveaux » moyens, comme le montrent les courbes d'apprentissage de la figure 19, 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 quasi certain que les ressources renouvelables seront les plus compétitives.

### V-3- Les différentes filières électriques renouvelables [Mul\_03a]

#### V.3.1- Hydraulique

C'est aujourd'hui, et de très loin, la première source renouvelable d'électricité. La puissance installée dans le monde dépasse 750 GW (2003) pour une production annuelle de plus de 2700 TWh. C'est une solution extrêmement attractive qui est exploitée au voisinage du maximum de son potentiel dans les pays industrialisés, mais dont le potentiel de développement reste élevé dans les autres. Au niveau mondial, l'énergie hydraulique pourrait permettre de produire 40 000 TWh.

Dans certains sites géologiquement favorables, des bassins haut et bas permettent d'effectuer un stockage réversible d'énergie en pompant de l'eau puis en la turbinant. Ces dispositifs de « stockage hydraulique gravitaire » jouent un rôle essentiel dans la stabilisation du réseau. En France, leur développement a accompagné celui 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.

Bien que ce soit une ressource renouvelable, le bilan environnemental de certains barrages n'est pas brillant. C'est tout particulièrement le cas des centrales hydroélectriques construites en zone de forêt primaire (équateur et tropiques) où les gaz à effet de serre dégagés par la décomposition organique peuvent être plus importants que ceux dus à la combustion de ressources fossiles pour produire la même énergie sur une vie de 100 ans. D'une façon générale, les grands barrages ont un impact non négligeable sur les écosystèmes.

#### V.3.2- Solaire thermodynamique

La chaleur rayonnée par le soleil peut être concentrée pour transformer de l'eau en vapeur et actionner des turbines comme dans les centrales thermiques classiques.

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. La seconde famille met en œuvre une tour contenant une chaudière vers laquelle est concentré le rayonnement capté par un champ d'héliostats pilotés. En France dans les Pyrénées, la centrale Thémis (1,8 MW) a permis de tester ce principe durant les années 1980.

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]. Plusieurs projets d'extraction de cette « énergie thermique des mers » ont mis 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.3.3- Solaire photovoltaïque

La conversion photovoltaïque (PV) présente l'immense avantage d'être complètement statique et par

conséquent d'une excellente fiabilité avec une très faible maintenance. Les cellules au silicium cristallin dominent actuellement le marché, mais d'autres technologies notamment en couches minces vont probablement émerger. Le coût des générateurs PV est encore très élevé. Sachant que la durée d'ensoleillement équivalente à pleine puissance (1 kW/m<sup>2</sup>) 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. Fin 2004, la puissance photovoltaïque installée (systèmes connectés ou non au réseau) dans le monde atteignait environ 3,8 GW. Le coût énergétique des cellules actuelles au silicium cristallin reste élevé et le temps de retour sur investissement énergétique est compris entre 3 et 6 ans selon l'ensoleillement du site. Les technologies du futur seront de ce point de vue beaucoup plus performantes.

#### **V.3.4- Aérogénération (éoliennes) [Obser\_Jan04]**

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistant aux conditions météorologiques très capricieuses. A un coût d'environ 1 €/W en zone terrestre, les fermes éoliennes (constituées actuellement de turbines de 800 kW à 5 MW) deviennent rentables dans les zones assez ventées (vitesse moyenne du vent supérieure à 6 m/s). Fin 2004, plus de 47 GW éoliens étaient installés dans le monde. La durée annuelle équivalente de production à pleine puissance est comprise entre 2000 et 4000 heures selon les sites (terrestres convenablement ventés à offshore).

Le potentiel offshore européen est estimé à plus de 3000 TWh/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 et plusieurs GW sont en construction ou en projet.

Le coût d'investissement va encore baisser pour atteindre son asymptote à 0,474 €/W vers 2030, ce qui conduira à un prix du kWh inférieur à celui du gaz aujourd'hui. La puissance mondiale installée pourrait atteindre un maximum de plus de 3000 GW vers 2040 pour une production annuelle de 8500 TWh.

#### **V.3.5- Houlo-générateurs**

La houle représente un immense gisement d'énergie mais le milieu marin est relativement hostile (tempêtes, corrosion) et les difficultés sont élevées. De nombreux principes de récupération existent et plusieurs systèmes expérimentaux, très proches de la commercialisation, sont déjà en service. Les niveaux de puissance unitaires atteignent le MW. Il reste encore cependant des efforts importants à fournir pour atteindre une maturité satisfaisante, mais les perspectives de compétitivité économique et environnementale sont très attractives.

#### **V.3.6- 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 2001 d'un peu plus de 8,4 GW électriques pour une production totale de plus de 50 TWh.

#### **V.3.7- 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 (24 groupes de 10 MW) produit annuellement 540.10<sup>6</sup>kWh 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 envisage plutôt 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. Des machines sont déjà en phase expérimentale et la technologie n'est pas très loin de la maturité industrielle.

#### **V.4- 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. La cogénération peut être appliquée à la combustion des produits de la photosynthèse (bois, bagasse...) ou de combustibles dérivés (biogaz, méthanol...). Les ordures ménagères représentent également une source d'énergie exploitable et exploitée. A grande échelle, on peut utiliser des turbines à vapeur et, à petite échelle, des moteurs à combustion interne ou externe (Stirling), ou encore des piles à combustible. Les cogénérateurs de petite puissance pourraient devenir les chaudières de demain en produisant électricité et chaleur pour l'habitat.

#### **V.5- Indispensable stockage de l'énergie**

Hormis la génération hydraulique, qui offre souvent la possibilité d'un stockage, les carburants issus de la biomasse, qui constituent également un excellent moyen de stockage, et la chaleur géothermique qui diffuse régulièrement, les autres ressources renouvelables présentent un inconvénient majeur : la variabilité et l'intermittence.

Pour tirer le meilleur parti de la chaleur rayonnée par le soleil, de l'électricité PV ou éolienne, un stockage d'énergie se révèle indispensable. Mais si les solutions de stockage de l'énergie sous diverses formes (chaleur, froid, électricité, hydrogène...) ne manquent pas, elles sont toutes coûteuses, encombrantes, etc... En outre, elles dissipent de l'énergie et s'usent au cours des cycles de charge décharge. C'est pourquoi le stockage d'énergie, notamment électrique, constitue l'un des points cruciaux du développement des systèmes de production électrique du futur. En situation autonome, le stockage est indispensable et déjà accepté. Quant aux réseaux futurs, ils pourraient accepter une multitude de nouveaux producteurs décentralisés ou dispersés, exploitant principalement des ressources renouvelables, équipés de moyens de stockage et de gestion intelligente. De tels réseaux permettraient une forte pénétration des énergies renouvelables sans mettre en danger la stabilité du réseau, en offrant en outre la possibilité d'ilotage des producteurs

décentralisés équipés d'accumulateurs, conférant ainsi une quasi invulnérabilité à un système aujourd'hui extrêmement fragile.

## VI- Conclusion, propositions.

Les menaces du changement climatique et d'épuisement des matières premières énergétiques non renouvelables (fossiles et uranium) pèsent de plus en plus sur l'économie et la stabilité politiques mondiales. Pourtant, la nature nous offre suffisamment d'énergie pour satisfaire la totalité de nos besoins mais de façon diffuse et souvent intermittente. Enfin, il faut dire et redire que le stockage (chaleur, froid, carburants, électricité) est indispensable pour accompagner la bonne utilisation des ressources renouvelables. En complément du stockage, une gestion intelligente de la consommation ainsi qu'une utilisation plus raisonnée de l'électricité, vecteur particulièrement coûteux, doivent permettre de minimiser les coûts financiers et environnementaux.

Il est donc temps de repenser complètement nos modes de production et de consommation d'énergie. Le temps de retour sur investissement d'un système de conversion plus sobre est souvent très court (bien inférieur à sa durée de vie) et on peut affirmer qu'économiser 1 kWh coûte généralement moins cher que de le produire ! Les économies d'énergie devraient donc constituer une priorité absolue car elles sont en outre gages d'une plus grande sécurité pour notre civilisation.

Pour bien réaliser la nécessaire transition vers une nouvelle organisation énergétique, nous devons évaluer systématiquement les impacts environnementaux. Les analyses sur cycle de vie ou écobilan offrent les outils les mieux adaptés pour cela. Par exemple, l'énergie dépensée pour fabriquer puis recycler les systèmes de production d'énergie exploitant des ressources renouvelables doit être suffisamment inférieure à celle qu'ils produiront durant leur vie. Bien entendu, les aspects économiques sont toujours importants, il est donc nécessaire de chercher à minimiser les coûts d'investissement économique, mais il est intéressant de constater que cela va souvent de pair avec la minimisation des coûts environnementaux et qu'il n'y a pas de dilemmes majeurs à ce niveau.

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 et très décentralisée 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 (des siècles ou des millénaires) avec des moyens souvent déjà disponibles et opérationnels, la plupart du temps ne nécessitant aucune révolution physique ou technologique. Alors pourquoi attendre ??

En ce qui concerne le changement climatique, devant les analyses, on peut être défaitiste, or il est encore possible de limiter les dégâts. Rappelons qu'avant le changement climatique, le taux de CO<sub>2</sub> était inférieur à 280 ppm (fig. 2). Le dernier rapport de l'IPCC (2001) donne pour 2100 une fourchette comprise entre 520 et 950 ppm (fig. 20). La différence entre la valeur finale est liée essentiellement au comportement de l'humanité dans

les prochaines décennies. Les scénarios sont fondés sur une population mondiale qui culminera au milieu du siècle puis déclinera. Les scénarios A1FI et A1T se distinguent par les priorités qui seront données aux ressources énergétiques : forte (A1FI) ou faible (A1T) utilisation de combustibles fossiles.

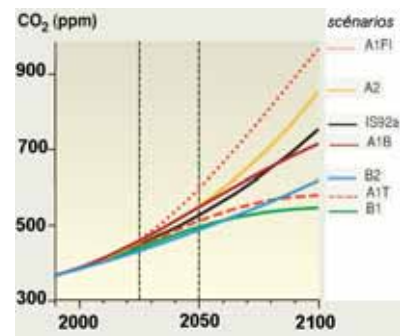


Fig. 20 : Scénarios d'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (détails des scénarios dans le rapport IPCC 2001)

Durant le 20<sup>ème</sup> siècle, le marché de l'énergie a été surtout un marché de matières premières. Si nous arrivons à mettre en place une civilisation énergétique fondée essentiellement sur les ressources renouvelables, ce marché sera beaucoup plus un marché de convertisseurs d'énergie. Il sera alors sans doute facteur d'une plus grande stabilité politique mondiale.

## VII- Bibliographie

- [**Brow\_01**] L.R. BROWN, « Éco-Économie. Une autre croissance est possible, écologique et durable », Seuil 2003.
- [**Chab\_97**] B. CHABOT, « Énergies renouvelables » Encyclopaedia Universalis 1997.
- [**Jacq\_95**] A. JACQUARD, « J'accuse l'économie triomphante », Calmann-Lévy 1995.
- [**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.
- [**WWF\_04**] WWF, M. JENKINS et al. « Living Planet Report 2004 » ou « Rapport 2004 planète vivante », June 2004. Téléchargeable sur internet.

**Sites web d'information sur l'Énergie et le climat :**  
**Conseil Mondial de l'Énergie** (World Energy Council) : <http://www.worldenergy.org/wec-geis/>  
**Agence Internationale de l'Énergie** (International Energy Agency) : <http://www.iea.org>  
**Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières** (DGEMP) : <http://www.industrie.gouv.fr>  
**Observateur des Énergies Renouvelables** (Observ'ER), <http://energies-renouvelables.org>  
**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** ou Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) : <http://www.ipcc.ch/>

Documents complémentaires en téléchargement sur le site web de l'antenne de Bretagne : [www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr](http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr)