

Énergie : des solutions réalistes pour un développement durable ?

par Jean SALENÇON

MOTS-CLÉS

Énergie - Population - Développement durable - Équité - Acceptation sociale
- Mix énergétique - Intermittence.

RÉSUMÉ

L'augmentation de la demande en énergie de la population mondiale au cours des prochaines décennies, due à l'accroissement démographique et à l'augmentation de la demande moyenne par habitant, impose d'exploiter toute la palette des ressources énergétiques disponibles, dans le respect des contraintes environnementales et éthiques, chaque jour plus pressantes, et avec l'objectif du développement durable. Seule l'innovation, appuyée sur la recherche scientifique de base pour conduire à des ruptures technologiques, permet d'espérer parvenir à la satisfaction de ces besoins dans les délais imposés, qui sont sans commune mesure avec ceux rencontrés jusqu'alors par l'humanité. C'est le concept de Mix énergétique qui fait appel aux énergies fossiles, à l'énergie nucléaire et aux énergies renouvelables. Les innovations et les ruptures technologiques attendues concernent tant la production que l'utilisation et la gestion de l'énergie. Elles doivent notamment apporter des réponses aux problèmes d'acceptation sociale que posent ces différents types de ressources et au défi technique que constitue l'intermittence des énergies renouvelables actuellement en développement. L'ampleur des enjeux et des moyens à mettre en œuvre, leurs conséquences économiques et sociétales, appellent des engagements internationaux dans les domaines de la recherche fondamentale et de la formation.

L'approvisionnement en énergie de la population mondiale a pris en 2009 une importance médiatique nouvelle en raison du changement survenu dans l'administration étatsunienne après l'élection de novembre 2008. On peut rappeler le discours inaugural du Président Obama qui, rompant avec la politique de son prédécesseur, promettait : *"We will harness the sun and the winds and the soil to fuel our cars and run our factories"* [1]. Quelques mois plus tard, le 27 avril, le président s'exprimait devant la *National Academy of Science*, la *National Academy of Engineering* et la *National Health Institute* et confirmait *Son engagement sans précédent de développer une économie du XXI^e siècle fondée sur le concept d'énergie propre* [2]. Dans la réunion des chefs d'États du G8 en juillet 2009 à l'Aquila, une déclaration volontariste très détaillée fut adoptée, avec des objectifs chiffrés concernant l'amplitude du réchauffement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet

de serre à l'horizon 2050 [3]. La déclaration du G8 élargi qui suivit fut, quant à elle, plus concise : prenant en compte les points de vue des pays à croissance forte tels que l'Inde et la Chine, elle faisait référence au développement des technologies dites "à bas-carbone", pour réduire les émissions de dioxyde de carbone et accroître l'efficacité énergétique tant à la production qu'à la consommation ; elle posait aussi le principe des responsabilités différenciées – implicitement selon le degré de développement des pays concernés – à mettre en place dans un accord à intervenir lors de la réunion de Copenhague en décembre 2009.

Cette réunion de Copenhague n'a pas maintenu l'objectif annoncé pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre en 2020 par les pays développés et les pays en développement mais elle a conservé la contrainte d'un réchauffement climatique inférieur à 2°C en 2050 [4]. La controverse sur les conclusions du GIEC (IPCC) qui allait s'amplifiant à l'époque doit certainement être comptée parmi les raisons de ce recul relatif mais, comme l'ont fait remarquer Jean-Hervé Lorenzi et Alain Villemeur [5], il faut aussi retenir l'insuffisance de l'offre de technologies propres, tant pour la production que pour l'utilisation de l'énergie, dans des conditions abordables pour les pays en développement.

En décembre 2010 la conférence de Cancún, dans un texte de compromis, a réaffirmé l'évidence du changement climatique et la très forte probabilité du rôle prépondérant des gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'augmentation observée de la température moyenne du globe au cours des dernières décennies.

Enfin, en 2011, l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon, à la suite du tsunami provoqué par le séisme du 11 mars d'une magnitude estimée de 9 - 9.1, a brutalement modifié la perception de l'énergie nucléaire par l'opinion publique dans de nombreux pays et provoqué l'accélération de certaines prises de position gouvernementales⁽¹⁾.

Éléments de la problématique : les besoins

Parmi les raisons des nouveaux enjeux dans le domaine de l'énergie on doit retenir en premier lieu l'accroissement inévitable de la demande mondiale en énergie au cours des prochaines décennies qui résultera de la combinaison de deux facteurs : l'accroissement de la population mondiale et l'accroissement de la demande énergétique par habitant, en moyenne pour l'ensemble de la population du globe.

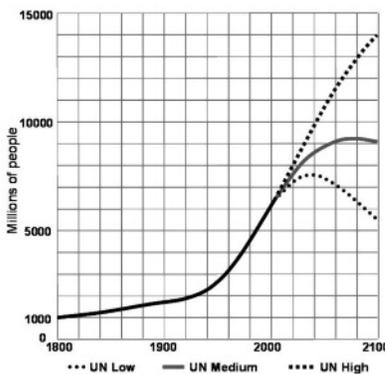


Figure 1 – Évolution de la population mondiale de 1800 à 2100 : projections 2004 des Nations Unies

Les chiffres sont trop fréquemment rappelés pour être maintenant ignorés : alors que la population mondiale était voisine de 6 milliards d'individus en 2000, elle est actuellement de l'ordre de 7 milliards et les projections moyennes envisagent, sous réserve du maintien de la tendance actuelle à la diminution de la fécondité, un palier autour de 9 milliards atteint en 2050. Il est à noter que la projection "haute" aboutit à quelque 14 milliards d'habitants en 2100 [6] (Figure 1)(2). De plus, à cette échéance, on estime que 70 % de la population du globe vivra dans des villes, notamment des mégapoles, dont beaucoup seront situées en zones côtières.

En ce qui concerne la demande en énergie par habitant, la situation actuelle de pauvreté énergétique rencontrée dans de nombreux pays, notamment en Afrique, ne pourra perdurer. Même si les pays développés devront, pour leur part, à tout le moins maîtriser la croissance de leur propre demande, au total la demande moyenne par habitant à l'échelle mondiale sera inéluctablement en croissance. De cela il résulte que des projections actuelles chiffrent à 60 % la croissance de la demande mondiale en énergie d'ici 2030 : ainsi, on estime que d'ici à 2035, 93 % de la demande supplémentaire en énergie proviendra des pays émergents(3). Un regard sur la politique présente de la Chine vient conforter ces considérations : en matière d'énergie électrique, la puissance installée de la Chine devrait atteindre 1 400 GW en 2015 et 1 700 GW en 2020 alors qu'elle est actuellement de 960 GW.

Face à ces besoins futurs estimés on doit évidemment s'intéresser aux ressources disponibles.

Éléments de la problématique : les ressources

La raréfaction voire l'épuisement des ressources énergétiques actuellement prédominantes, telles que les énergies fossiles, n'est pas un thème nouveau et est difficilement contestable dans l'absolu. On rappellera le concept de "Pic" pour le charbon et le pétrole (Figure 2) introduit en 1956 par Marion King Hubbert(4).

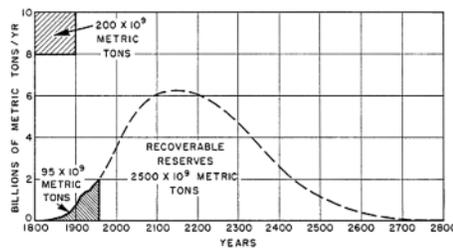


Figure 18 – Ultimate world coal production. The shape of the curve is variable but subject to the condition that the area under the curve cannot exceed thirteen squares.

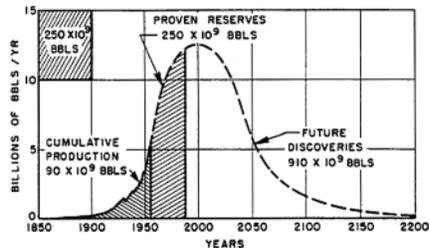


Figure 20 – Ultimate world crude-oil production based upon initial reserves of 1250 billion barrels.

Figure 2 – Peak coal et Peak oil d'après Marion King Hubbert [8]

Cet article [8] situait alors le pic pour le pétrole aux alentours des années 2010. Nous sommes maintenant parvenus à cette date et, outre un éventuel décalage dans le temps, il a été proposé de substituer au concept de "Pic" celui de "Plateau" pour mieux prendre en compte ce que l'on pourrait qualifier d'accroissement des

ressources avec l'augmentation de la demande. En effet, au fur et à mesure de l'accroissement de la demande et de l'exploitation des ressources actives, certaines ressources existantes mais négligées jusqu'alors deviennent économiquement rentables compte tenu du prix croissant que l'on est désormais prêt à payer pour en disposer. L'argumentaire est classique mais on doit néanmoins insister sur le fait que, dans le prix que l'on est prêt à payer, intervient désormais l'impact social et environnemental qui ne peut se réduire à une évaluation financière et conduit au concept d'acceptation sociale. Une attention toute particulière doit notamment être portée à l'impact sur la qualité et la quantité des ressources en eau.

Ainsi, on évalue à 15 milliards de barils la réserve de pétrole disponible au large des côtes du Brésil à 7 000 m de profondeur et 300 km ; dans le golfe du Mexique, on parle de 70 milliards de barils. Pour les ressources non conventionnelles, on mentionnera les schistes bitumineux, les hydrates de gaz naturel (clathrates), les *shale gas* (gaz de schiste), dont l'exploitation fait actuellement débat dans notre pays [9], les hydrates de méthane incorporés dans des sédiments, dans les pergélisols, etc. La Chine a récemment annoncé la découverte de nouvelles ressources continentales et *offshore* de gaz, de pétrole, de charbon, d'hydrates de méthane, d'uranium et de lithium ; la compagnie d'exploration pétrolière Ratio a annoncé la découverte d'un gisement de 450 milliards de m³ de gaz naturel dans le champ Léviathan, à 130 km au large des côtes israéliennes.

Pour prendre l'exemple des gaz de schiste ou, plus exactement, de rochemère, on assiste actuellement aux États-Unis à l'équivalent d'une "ruée vers l'or" dans des États comme la Pennsylvanie, où 1368 puits ont été forés en 2010 (à comparer à 196 en 2008) aussi bien par de grandes compagnies que par de simples exploitants "*mom & pop operators*". La projection actuelle est le forage de 5 000 puits par an sur les 30 prochaines années ! L'exploitation de cette ressource se heurte au problème de l'acceptation sociale en raison des dommages dont font état les riverains des forages, notamment en ce qui concerne la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

On doit maintenant remarquer que le concept pertinent du point de vue prospectif n'est pas, à proprement parler, l'évaluation des ressources disponibles et écologiquement compatibles mais la possibilité pour celles-ci de couvrir la demande mondiale. Ceci implique évidemment, de faire intervenir des scénarios concernant les technologies adoptées pour la production et la consommation d'énergie et explique que les estimations peuvent varier de façon importante selon les auteurs. Ainsi, pour le pétrole, la fourchette habituellement avancée est de 40 à 60 ans avec une limite extrême à un siècle ; pour le gaz, de 60 à 120 ans avec une limite à un siècle et demi, qui évolue rapidement ; pour le charbon, on évoquait 150 ans en 2005, voire plusieurs siècles, en insistant sur l'importance du scénario qui serait retenu pour la production d'énergie par les pays "émergents".

Parmi les ressources dont il faut évaluer la disponibilité future, on ne doit pas oublier l'uranium utilisé comme combustible par les centrales nucléaires actuelles, dont les réserves identifiées et non encore découvertes sont évaluées à environ 270 ans au rythme actuel de consommation [10], mais seulement à 100 ans, si les pays émergents utilisent cette énergie dans la même proportion que les pays développés, voire à 50 ans en cas de croissance forte de la demande d'électricité nucléaire. On évoque alors la "filière Thorium".

Éléments de la problématique : l'environnement

On vient, incidemment, d'évoquer les préoccupations environnementales à propos de l'exploitation des réserves énergétiques, notamment l'impact sur la qualité et la quantité des ressources en eau. On doit maintenant revenir sur ce sujet pour s'intéresser plus particulièrement aux effets, désormais largement médiatisés, de l'utilisation de ces énergies. Il s'agit évidemment de l'impact de l'augmentation de la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone, (gaz carbonique, CO₂) produit, notamment, par l'utilisation des énergies fossiles.

L'acidification des océans semble un fait bien établi et est l'objet d'un très large consensus scientifique tel que rappelé par une déclaration de l'*InterAcademy Panel* en 2009 [11] et par diverses académies des sciences (*Royal Society*, Académie des sciences) au cours de l'année 2010. Ces institutions insistent sur l'importance et sur la durée des conséquences à survenir si les émissions de gaz carbonique sont maintenues au niveau actuel : dommages graves concernant les récifs coralliens et les écosystèmes polaires, impact sur la chaîne alimentaire marine et ses conséquences pour l'humanité elle-même.

Le changement climatique, a fait l'objet de controverses au plan international, largement médiatisées, à la fois quant son existence, à ses cause éventuelles, voire à ses conséquences. Ces controverses ont souvent dépassé le cadre purement scientifique, étant notamment provoquées par les bouleversements économiques et sociétaux qui pourraient résulter des mesures proposées pour tenter de maîtriser le changement climatique et par les intérêts mis en jeu.

Au cours de l'année 2010, l'expertise des procédures du GIEC, réalisée à la demande du Secrétaire général des Nations unies, Monsieur Ban Kimoon, n'a pas révélé de failles de nature à mettre en cause le sérieux et la qualité des modes de travail de cet organisme, même s'il lui était recommandé de réformer fondamentalement ses modes de gestion et de renforcer ses procédures... Au plan scientifique, plusieurs académies dont la *Royal Society* à Londres [12], l'Académie des sciences à Paris [13], ont produit de courts rapports destinés à faire, de façon dépassionnée, le point sur l'état des connaissances et les directions de recherche à suivre.

L'opinion très majoritairement acceptée conclut à l'observation d'une augmentation du réchauffement climatique pendant trois décennies jusqu'en 2003, qui est révélé par un faisceau convergent d'indicateurs :

- l'augmentation de la température de surface moyenne sur la Terre évaluée à 0,8°C depuis 1870 (cette augmentation n'est pas uniforme dans le temps – il y a eu des périodes de plus forte augmentation et des périodes de stagnation – et elle est notablement différente pour les deux hémisphères) ;
- l'augmentation de la température des océans en moyenne globale, notamment depuis 1980 ;
- la réduction du volume des calottes polaires et le recul des glaciers continentaux ;
- l'élévation du niveau moyen des océans, en moyenne sur la surface du globe, qui a été évaluée à environ 0,7 mm par an de 1870 à 1930, à 1,7 mm par an après 1930 avec une accélération à 3,4 mm par an au cours des deux dernières décennies. Cette élévation du niveau moyen n'est évidemment pas répartie de façon uniforme sur tous les océans et il s'y superpose des oscillations pluriannuelles. Elle résulte de l'addition, à parts égales, de trois contributions : la dilatation thermique des eaux, la fonte des glaciers continentaux et la fonte des calottes polaires ;

- les déplacements de populations animales terrestres ou marines, l'évolution des habitats des espèces végétales, le suivi des dates des activités agricoles, sont des indicateurs biologiques du changement climatique qui, quoique moins quantifiables, s'intègrent dans le faisceau convergent évoqué plus haut.

Concernant le lien entre le réchauffement climatique reconnu et les activités humaines, à travers l'accroissement de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre autres que la vapeur d'eau (qui se recycle rapidement et en permanence), c'est-à-dire le gaz carbonique, le méthane et le protoxyde d'azote, le débat porte sur l'importance des rôles respectifs des gaz à effet de serre d'une part et de l'activité solaire d'autre part dans le réchauffement constaté. Dans des formulations différentes, les académies concluent que le rôle dominant revient à l'augmentation de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre, principalement au gaz carbonique, celui-ci étant le résultat de l'utilisation des énergies fossiles.

Il est essentiel de comprendre que de telles conclusions ne sont pas énoncées sur la seule constatation de corrélations entre les effets et les causes supposées mais qu'elles s'appuient sur des analyses théoriques qui impliquent le recours à des modèles qui comportent encore des incertitudes. Il en résulte qu'il faut en permanence améliorer et valider ces modèles "climatiques" [14] afin de conforter les décisions à prendre pour passer du stade de la précaution à celui de la prévention accompagné de son impact économique et sociétal.

Des enjeux réalistes

Jusqu'aux récents événements dramatiques survenus au Japon, l'aspect "Environnement" tel qu'il vient d'être évoqué était le moteur principal du regard nouveau sur le thème de l'approvisionnement en énergie. Par rapport à la simple considération prospective de l'offre et de la demande, la préoccupation climatique vient, en quelque sorte, contracter l'échelle des temps [15, 16]. En fixant des objectifs et un calendrier volontaristes pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre (50 % d'ici 2050) afin de limiter le réchauffement (à 1,5 ou 2°C), les déclarations telles que celles du G8 en 2009, de Copenhague en 2009, de Cancún en 2010, fixent des orientations et des priorités, que l'accident majeur de Fukushima Daiichi interpelle brutalement et qui doivent aussi respecter des contraintes évidentes :

- contraintes économiques et financières telles que l'inertie des systèmes économiques et la nécessité de trouver et de rentabiliser les investissements financiers ;
- contraintes géographiques et politiques propres à chaque pays ;
- contraintes éthiques : l'équité impose de fournir aux pays en développement les meilleures technologies à des coûts qui leur soient abordables.

"...In no area will innovation be more important than in the development of new technologies to produce, use, and save energy ..." (Barack Obama [2]).

Ressources énergétiques

Le concept actuellement retenu est celui de *Mix énergétique* qui permet d'assurer la sécurité, la durabilité et la flexibilité des approvisionnements en énergie, en réduisant aussi la dépendance vis-à-vis des défaillances technologiques.

La nécessité du *Mix énergétique* apparaît également lorsque l'on analyse les diverses formes de la **demande en énergie**. En ne considérant que les besoins en électricité, la demande s'établit sur plusieurs niveaux qui correspondent à des marchés différents. La demande de base, qui fait l'objet de contrats à long terme, est actuellement assurée par des centrales thermiques, des centrales nucléaires, des centrales hydroélectriques au fil de l'eau et, dans certains pays, des grands barrages hydroélectriques. Le deuxième niveau de demande correspond aux variations par rapport à la demande de base, qui appellent la mise en réseau de capacités de production supplémentaires. Pour celles-ci, les gestionnaires de réseaux procèdent à deux types de contrats : d'une part des contrats qui correspondent à des options "call" sur la disponibilité d'une puissance convenue si elle se révèle nécessaire (cette puissance est, elle-aussi, apportée par des centrales thermiques et des barrages), d'autre part, des contrats au jour le jour dont les prix sont élevés.

L'évolution du *Mix énergétique* mondial au cours de la décennie 1998-2008 permet de dégager les tendances suivantes (source : *BP Statistical Review of World Energy*) : la contribution du pétrole à la production mondiale d'énergie est passée de 39 % à 34 %, celle du charbon de 25 % à 29 %, du gaz naturel de 25 % à 24 %, tandis que l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique restaient stables à environ 5 et 6 %. Dans le même temps la production avait augmenté de 27 % et l'on assistait à l'émergence de la production éolienne pour 1 % de la production totale tandis que le photovoltaïque, malgré un taux de croissance vertigineux, ne représentait encore que 0,04 %. L'utilisation des ressources fossiles est ainsi, de très loin, prépondérante.

La composition de ce *Mix* varie selon les pays en fonction de leurs propres ressources en énergies fossiles et en énergies renouvelables, ainsi que de leurs choix stratégiques. Pour l'Afrique du Sud, par exemple, il comprend l'énergie solaire, les biocarburants, l'énergie nucléaire et le charbon avec, notamment, la liquéfaction du charbon, *Coal to Liquid*, domaine dans lequel ce pays possède un savoir-faire particulier acquis à l'époque de l'embargo. Une projection à l'horizon 2030 [17] voit les trois ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) converger vers un même pourcentage de 26-27 % des ressources primaires, tandis que les énergies nucléaire, hydraulique et renouvelables (autre que l'hydraulique mais incluant les biocarburants) compteraient chacune pour 7 %. La Chine, pour 2050, prévoit : 20 à 25 % d'énergie nucléaire et hydraulique, 25 à 30 % d'énergies renouvelables – hors hydraulique – les 50 % restants étant assurés par les énergies fossiles.

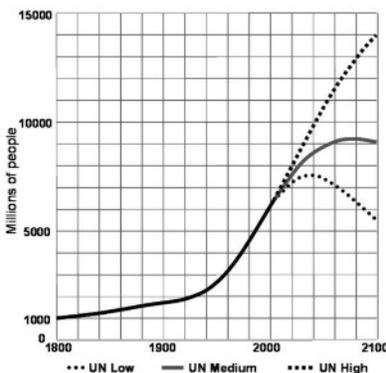


Figure 3 – Historique et prospective du Mix énergétique mondial selon Bob Dudley [17]

Énergies fossiles

La déclaration commune du G8 en 2009 prenait acte du caractère incontournable du recours aux énergies fossiles, au moins à moyen terme. Il suffit, pour s'en convaincre, de consulter quelques chiffres :

- les deux tiers de la production mondiale d'électricité pour l'année 2006 étaient issus des énergies fossiles (charbon : 41 % ; gaz : 20 % ; pétrole : 6 %) ;
- en termes d'énergie primaire, les combustibles fossiles fournissent plus de 80 % des besoins mondiaux ;
- enfin, 97 % de l'énergie utilisée pour les transports provient du pétrole et 60 % de la production mondiale de pétrole est utilisée par les transports [18].

On peut ajouter que les décisions récentes de certains gouvernements quant à leur "sortie du nucléaire" risquent de provoquer un recours accru aux énergies fossiles dans l'attente que le relais soit pris par les énergies renouvelables, ce qui supposerait notamment que soit résolu le problème de l'intermittence de ces énergies sur lequel on reviendra dans la suite.

La durabilité de l'utilisation de ces énergies primaires (qui ne sont autre que de l'énergie solaire stockée, à l'échelle des temps géologiques, sous forme de charbon, de pétrole et de gaz) considérée du point de vue environnemental, impose que l'on affronte le problème des émissions de dioxyde de carbone. C'est le sens de la déclaration du G8 qui recommandait donc le développement et la généralisation de technologies innovantes pour la Capture et le Stockage du Carbone (CCS), aussi appelé séquestration du gaz carbonique. "*A way of making dirty energy cleaner*" [19].

Les variantes techniques sont multiples, qui s'appliquent à des centrales thermiques, des cimenteries ou des aciéries. La capture du gaz carbonique résulte d'une succession de réactions chimiques qui ne posent pas de difficultés de principe mais sont consommatrices d'énergie d'autant plus que, pour la rentabilité économique du procédé compte tenu du coût du transport et surtout du stockage, il est nécessaire d'extraire du gaz carbonique pur.

Pour le stockage, on doit trouver des emplacements aptes à constituer des réservoirs géologiques étanches sur de très grandes échelles de temps. Les meilleurs candidats actuels sont des gisements de pétrole ou de gaz désormais abandonnés parce que épuisés (il ne faut pas sous-estimer à ce propos l'intérêt financier de rentabiliser ainsi ces réservoirs), ou encore des réservoirs en fin d'exploitation dont la production se trouve alors améliorée, stimulée, par l'injection de gaz carbonique sous pression. On effectue aussi les stockages dans des aquifères salins profonds hors de toute autre utilisation. Selon certains géologues, les capacités de stockage devraient pouvoir couvrir des dizaines voire des centaines d'années de production de dioxyde de carbone, en harmonie avec les réserves estimées d'énergies primaires [20].

On doit aussi mentionner la mise à profit des réactions chimiques de carbonatation qui sont le principe même du stockage envisagé dans des roches basiques comme les basaltes [21] et, aussi, des projets de conversion du dioxyde de carbone en matériaux de construction tels que ceux annoncés récemment en Chine :

"Peabody recently signed two deals with Chinese companies to develop coal mines and coal-powered electric plants. The first was with the China Huaneng Group to develop a clean coal electricity generation project with carbon capture in the Inner Mongolia autonomous region. The project will include a large surface coal mine and technology to convert carbon dioxide into cement-like building materials,

“As more power is needed, increasingly more carbon dioxide will be produced,” he said. “On the other hand, building materials also have the greatest demand. So this is a win-win situation to generate more power and convert that to more building materials.” (China Daily, 27 mars 2011).

La mise en œuvre à l'échelle industrielle et mondiale de la capture et du stockage du dioxyde de carbone doit encore être étayée par des recherches approfondies : concernant l'utilisation des réservoirs, il est essentiel d'étudier et de modéliser le comportement à long terme du sous-sol profond soumis à ce type de sollicitations ; pour les aquifères, l'éruption naturelle du lac Nyos au Cameroun le 21 août 1986, qui a libéré 1 km³ de dioxyde de carbone faisant 1 700 morts, a montré les dangers du processus d'ex-solution lorsque la limite de saturation du gaz carbonique dans l'eau est dépassée. De la réponse scientifiquement argumentée à ces questions dépend l'acceptation sociale du CCS. C'est le sens de la déclaration de Cancún qui recommande d'assurer la sécurité environnementale, l'absence de toute fuite et d'éviter tout effet “pervers”.

La faisabilité industrielle du concept reste encore à prouver sur la base de réelles installations “à l'échelle 1” telles que celles de Sleipner en Norvège, de Vattenfall en Allemagne, de Lacq en France ; de vastes projets de stockage en aquifère sont à l'étude. L'Europe a apporté un soutien de 1 milliard d'euros à divers projets. La Chine, qui construit chaque semaine une nouvelle tranche thermique (1 à 1,5 GW) sans CCS, développe le projet *GreenGen*.

Du point de vue économique, le coût du procédé comporte, outre le coût de la capture proprement dite, en y incluant la baisse de rendement final de l'installation évaluée à 10 points par exemple sur une centrale thermique, le coût de l'installation et de sa maintenance et le coût du lieu de stockage. Le CCS, Capture et Stockage du Carbone, ne se développera que lorsque son coût sera compétitif avec le prix de l'émission de dioxyde de carbone : cette échéance est actuellement envisagée vers 2030 [19], ce qui montre toute l'importance d'une politique incitative au plan international une fois établie l'efficacité du procédé.

Énergie nucléaire

Pour de nombreux pays, l'énergie nucléaire apparaît comme une composante obligée du *Mix énergétique*. Après une période de doute et de réticence, on a assisté à un regain d'intérêt dû, pour les pays qui y font appel, à la perception que cette filière permet de satisfaire à la demande de base en diversifiant les sources d'énergie, notamment en allégeant le recours aux ressources fossiles, avec la conséquence supplémentaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

On peut remarquer la variabilité de la perception de l'énergie nucléaire par la société, telle qu'elle est révélée par les enquêtes d'opinion, même si l'on doit être attentif à la façon dont les questions sont posées et à la différence entre l'opinion publique et l'opinion publiée. Ainsi, en Europe, on rapportait 37 % d'opinions favorables à l'énergie nucléaire en 2005 et 44 % en 2008, sans doute en raison de la sensibilisation au changement climatique. L'accident majeur survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a évidemment modifié brutalement la perception du problème par le public et par les gouvernants. Ainsi, au début du mois de juin 2011, 62 % des Français souhaitaient une “sortie du nucléaire” dans les prochaines décennies, tandis que l'Italie votait contre la relance de cette industrie ; certains

gouvernements sont revenus sur leur décision de reprise de la construction de centrales nucléaires, d'autres ont ralenti leur programme de construction (Chine), d'autres enfin ont annoncé leur "sortie du nucléaire" à une échéance fixée.⁽⁵⁾

Quelques chiffres permettent de juger de la situation présente et d'évaluer le réalisme des divers scénarios :

- les données relatives à l'année 2006, déjà citées, évaluaient à 15 % la part de l'énergie électrique d'origine nucléaire dans la production mondiale ; rapportée à la consommation énergétique globale, l'énergie nucléaire compte pour environ 6 %⁽⁶⁾.
- le nombre de réacteurs nucléaires actuellement en fonctionnement dans le monde s'élève à environ 440 ;
- il y a 65 réacteurs nucléaires en construction pour une puissance de 62 GW, dont 25 en Chine pour 27,73 GW (dans 11 centrales) ; ce pays vient de porter à 86 GW son objectif de production d'électricité nucléaire pour 2020, soit 5 % de sa production totale ;
- le magazine *Time*, dans sa livraison du 17 août 2009, chiffrait à 180 le nombre de centrales nucléaires qui allaient être construites durant la présente décennie, à comparer à 39 construites durant la décennie précédente. À noter que le gouvernement chinois avait décidé, avant l'accident de Fukushima Daiichi, la construction de 34 nouveaux réacteurs (36,92 GW) et devait approuver 10 nouveaux projets nucléaires durant le plan quinquennal 2011-2015.

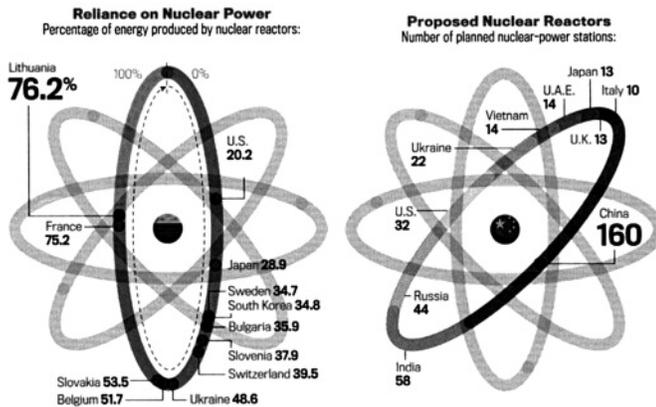


Figure 4 – L'énergie nucléaire dans le monde⁽⁶⁾

Il est important, à ce propos, d'avoir en tête les échelles de temps caractéristiques des programmes nucléaires, par ailleurs hautement capitalistiques : environ 10 ans séparent, dans nos pays, la prise de décision et la mise en production ; cette dernière étant elle-même appelée à durer 40 ans et plus.⁽⁷⁾

La déclaration commune du G8 en 2009 réaffirmait les prérequis de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire sous la forme d'un engagement international sur la **non-prolifération**, la **sûreté** et la **sécurité**. Ce sont là les conditions minimales de l'acceptation sociale. Elles incluent en particulier la résolution du problème des déchets radioactifs [22] à propos desquels Edgar Morin, dans un article récent, écrivait : "ils constituent un danger pendant des millénaires, les enfouir ne suffit pas à garantir leur innocuité."

En l'état actuel des technologies utilisées, l'énergie nucléaire ne peut authentiquement être considérée comme une énergie durable. On a déjà mentionné le problème de l'approvisionnement en combustible en cas de forte demande d'électricité nucléaire, mais c'est essentiellement le point de vue environnemental qui interpelle, en raison de la gestion des déchets radioactifs et des politiques de démantèlement.

La rupture technologique apportée par les réacteurs à neutrons rapides, réacteurs dits de la quatrième génération, est présentée comme devant contribuer à la résolution du problème posé par les déchets. Elle ne semble pas pouvoir être disponible industriellement avant quelques décennies car elle requiert un important effort international de recherche scientifique et technique dans le domaine de la physique macroscopique, de la mécanique et de la métallurgie au sens large [22], pour déboucher sur la mise au point des matériaux nécessaires à sa mise en œuvre.

On doit aussi remarquer l'intérêt naissant pour les réacteurs de faible puissance tels que le réacteur 4S (Super-Safe, Small and Simple) de Toshiba-Westinghouse d'une puissance de 10 MW dont la construction devrait débuter en 2014 aux États-Unis, et l'annonce récente d'études pour le développement de réacteurs de type TWR (Travelling-Wave Reactors), de petite taille, utilisant de l'uranium appauvri, par Toshiba, TerraPower et Areva. Il est clair que la multiplication de tels réacteurs doit être compatible avec le respect des impératifs de non-prolifération et de sécurité posés plus haut.

En ce qui concerne la **fusion**, "l'effort scientifique et technologique à accomplir est considérable" selon les termes de Jean Robieux [24], et ne permet pas de l'envisager comme une perspective réaliste de production d'énergie au niveau industriel à l'horizon des prochaines décennies. En revanche, sous réserve que l'effort de recherche nécessaire soit engagé, l'horizon 2080 est retenu par divers spécialistes [25].

Allons-nous vers une énergie nucléaire durable ?

"This year is the 100th anniversary of the discovery of the atomic nucleus, and a little over 70 years since nuclear fission was first demonstrated. In historical terms, that puts the field of nuclear engineering today roughly where electrical engineering was in 1900..."

"Likewise, no one today can foresee the future of nuclear energy technology at the end of the 21st century. All that can be said with confidence now is that the nuclear power plants of the year 2100 will have about as much resemblance to today's workhorse light-water reactors as a modern automobile has to a 1911 Model T..."

"This is not the time for the nuclear industry to circle the wagons: The need for intellectual vitality, flexibility and creativity has never been greater. An already safe technology must be made demonstrably safer—and less expensive, more secure against the threats of nuclear proliferation and terrorism, and more compatible with the capabilities of electric power systems and the utilities that run them." (Richard K. Lester, [26].

Les énergies renouvelables

"We will harness the sun and the winds and the soil to fuel our cars and run our factories". Cette déclaration du Président Obama, que nous avons déjà citée, fait, en quelque sorte, l'inventaire de l'ensemble des énergies renouvelables actuellement exploitées et en cours de développement : géothermie, biomasse, énergie hydraulique, énergie éolienne, énergie solaire. Nous n'en retiendrons que quelques aspects.

La biomasse

Le mot clé est ici, évidemment, Photosynthèse. Sans entrer dans les détails de ce processus complexe et diversifié, on peut définir la photosynthèse comme l'ensemble des réactions biochimiques qui permettent aux plantes et à certaines bactéries de synthétiser de la matière organique à partir du gaz carbonique et de l'eau. Sous forme de biomasse, cette matière organique constitue une réserve d'énergie que l'homme a utilisée à travers les combustibles fossiles et le bois de chauffe. La photosynthèse apparaît ainsi comme un processus de stockage de l'énergie solaire.

Les applications actuelles concernent de façon primordiale la production de carburants de substitution, biocarburants destinés essentiellement aux transports et aux engins : le choix s'est porté sur le bioéthanol et sur le biodiesel et les études actuelles montrent que la meilleure production d'éthanol est obtenue à partir de la canne à sucre, tandis que pour le biodiesel on se tourne vers l'huile de palme. Il convient désormais de faire le bilan en considérant les points de vue énergétique, écologique et humain et en tenant compte des spécificités géographiques. Parmi les risques majeurs :

- du point de vue écologique, la culture intensive de biomasse destinée à la production de biocarburants peut porter atteinte à la biodiversité végétale et animale (déforestation, monoculture...);
- du point de vue humain, c'est la compétition entre la culture de cette biomasse et la production de ressources alimentaires qui est en cause, en même temps que l'utilisation des ressources en eau. On peut même redouter de voir apparaître, à cette occasion, de nouvelles formes de colonialisme;
- la 1^{re} génération de biocarburants, en concurrence directe avec les cultures vivrières, présente un bilan énergétique discutable et a eu un impact important sur le marché international des produits alimentaires : Heal [19], citant Hahn & Cecot [27], notait que l'expérience américaine en matière de biocarburants a été malheureuse, l'éthanol produit à partir du maïs étant plus une excuse pour des subventions agricoles qu'une source d'énergie et on peut rappeler qu'au Mexique le prix de la tortilla a subi une augmentation considérable en 2007 en raison du détournement de la production de maïs aux États-Unis vers la production d'éthanol alors qu'auparavant, depuis la mise en place de l'ALENA, les États-Unis étaient exportateurs de maïs vers le Mexique. On développe l'utilisation de la biomasse issue des déchets industriels ou agricoles (2^e génération), les biocarburants produits par des micro-algues et des micro-organismes (phytoplancton) – on parle de fermes d'algues – tels le bio-kérosène. C'est, en France, le projet *Shamash* qui intègre des spécialistes de la culture, de la physiologie et de l'utilisation de micro-algues, des spécialistes de l'optimisation des procédés biotechnologiques ainsi que des spécialistes des biocarburants et de l'extraction et de la purification de lipides [28].

Il faut aussi mentionner les recherches fondamentales menées pour améliorer le rendement du processus photosynthétique en explorant les moyens d'utiliser les premières étapes photo-physiques du processus dont le rendement est de l'ordre de 20 % alors que le rendement total s'établit autour de 2 %. Par ailleurs, on s'intéresse aussi à développer une photosynthèse artificielle avec de nouveaux matériaux ; des annonces spectaculaires ont été faites en 2007 qui ont fait l'objet d'une demande de brevet en 2010 pour des nanomatériaux à base de dioxyde de manganèse.

Une autre voie de recherche est la production d'hydrogène par des algues (*Chlamidomonas reinhardtii* et *moeweesi*) carencées en soufre qui est l'inhibiteur de l'hydrogénase.

L'énergie hydraulique

L'utilisation de l'énergie hydraulique est ancienne et nous est familière. Faisant suite aux moulins à eau, les centrales au fil de l'eau produisent de l'énergie électrique qui est habituellement utilisée pour répondre à la demande de base, mais ce sont les barrages qui apportent aujourd'hui la majeure contribution à ce type d'énergie renouvelable. Au total, toujours selon les données de 2006, l'électricité d'origine hydraulique représente environ 15 % de la production totale au niveau mondial (donc à parité avec l'électricité nucléaire).

Il est généralement admis qu'un tiers des sites potentiels sont actuellement équipés. De très grands équipements ont été mis en service au cours des récentes décennies tels que le barrage binational d'Itaipu (Brésil – Paraguay, 1984) dont la puissance est de 14 GW et le barrage des Trois-Gorges (2003) en Chine d'une puissance de 18,2 GW. D'autres sont en construction ou en projet : en Chine, la centrale de Xiluodu, dont la construction a commencé en 2005, sera achevée en 2013 avec une puissance installée de 13,8 GW ; avec les centrales de Xiangjaba, en cours de construction, d'une puissance de 6,4 GW et les centrales de Wudongde et Baihetan (encore à l'état de projet) une puissance installée totale de 43 GW devrait être atteinte.

Ces constructions ont mis en évidence les dommages collatéraux écologiques et sociaux : ainsi, le barrage des Trois Gorges a nécessité le déplacement de 1,2 million d'habitants. Il en résulte des controverses, parfois vives, quant à l'opportunité de certains projets : projet de barrage de Belo Monte au Brésil, d'une puissance de 11,2 GW, sur la rivière Xingu, affluent de l'Amazone, même s'il est présenté comme le premier grand "barrage vert" ; projet HidroAisen de 5 barrages en Patagonie au Chili, d'une puissance de 2,75 GW.

Du point de vue de la production d'électricité, il est essentiel de prendre conscience des ordres de grandeur. Typiquement, la puissance d'une "tranche nucléaire" ou d'une centrale thermique est de l'ordre de 1 à 1,3 GW ; le barrage d'Estreito, en construction au Brésil, aura une puissance de 1,09 GW. Les très grands barrages évoqués ci-dessus représentent donc des capacités de production qui se placent entre une dizaine et une quinzaine de tels équipements. Ces capacités sont modulables et utilisées pour répondre à la demande de base et assurer les pointes de consommation.

Dans ce que l'on peut appeler le portefeuille des énergies renouvelables, les mouvements de la mer – marées, courants, vagues – peuvent aussi être mis à profit pour la production d'énergie. Cette utilisation n'est pas nouvelle : des moulins à marée ont longtemps existé, par exemple le long de la Rance, avant que n'y soit inaugurée en 1966 la première usine marémotrice au monde, qui faisait suite à un premier projet datant de 1921, engagé en 1925 et abandonné en 1930 faute de financement. Sa puissance, produite par 24 groupes bulbes à axe horizontal à double effet, qui peuvent fonctionner au flot et au jusant, en turbinage ou en pompage, est de 240 MW avec un facteur de disponibilité de l'ordre de 25 %. Ce type d'équipement n'est pas non plus sans impact écologique ; ainsi l'implantation de l'usine a entraîné

une modification de l'écosystème de la Rance, notamment de la faune aquatique ; le rythme et l'amplitude du marnage régi par le barrage a provoqué une modification des fonds marins, ainsi que des marnages et des courants de l'estuaire.

L'énergie des vagues et de la houle a fait l'objet de nombreux projets depuis des décennies. L'article fondateur de Stephen Salter [29] et le *Salter's Duck*, chaîne articulée d'une vingtaine de flotteurs permettant la conversion de 90 % de l'énergie des vagues, sont à l'origine des réalisations industrielles récentes telles que la *Pelamis Wave Farm* à Aguçadoura (Portugal), projet d'une puissance de 2,25 MW, destinée à être portée à 20 MW, qui est actuellement en *stand by*.⁽⁹⁾

Un dispositif alternatif, fondé sur le principe de panneaux oscillants, est actuellement en cours d'étude et de développement par la compagnie *Aquamarine Power* avec *University College Dublin* : la puissance actuelle de ce dispositif (*Oyster*) est de l'ordre de 1 MW et devrait pouvoir être portée à 10 MW dans les prochaines années pour constituer des "fermes" de 200 MW.

Une autre forme d'exploitation de l'énergie marine est l'utilisation directe des courants produits, notamment par les phénomènes de marées, dans des chenaux étroits. Les génératrices correspondantes sont couramment appelées hydroliennes et se présentent, par exemple, comme un couple d'hélices bipales d'une quinzaine de mètres de diamètre, immergées et fixées à un mat ancré au fond du chenal, qui peuvent être orientées pour être actives au flot et au jusant (*SeaGen*). Elles ont maintenant atteint le stade commercial avec une puissance 1,2 MW à combiner avec le facteur de disponibilité. Il est clair que l'impact écologique de ces installations doit aussi être évalué.

L'énergie éolienne

Comme l'énergie hydraulique prend la suite des moulins à eau et des moulins à marée, l'énergie éolienne s'inspire des moulins à vent et des pompes éoliennes d'autrefois pour extraire et transformer en électricité une partie de l'énergie cinétique du courant fluide qui traverse le rotor de la machine utilisée, c'est-à-dire de l'éolienne.

Au plan théorique, la formule mathématique qui exprime la puissance cinétique d'un jet fluide est la même pour les hydroliennes dont nous avons parlé et pour les éoliennes. En particulier, elle montre que cette puissance est proportionnelle à la surface du jet, à la densité du fluide et au cube de sa vitesse. Il est évidemment impossible d'extraire l'intégralité de cette puissance et la limite théorique de la puissance obtenue est donnée par une formule appelée Loi de Betz. La puissance nominale de la machine dépend ensuite de contraintes technologiques et du rendement de la chaîne de production entre le rotor et la sortie de l'alternateur.

En 20 ans, la puissance nominale des éoliennes est passée de 50 kW pour un diamètre de 15 m à 5 MW pour un diamètre de l'ordre de 150 m. Des projets évoquent même des diamètres de 250 à 300 m pour atteindre des puissances de 17 MW. Les problèmes mécaniques posés par cet accroissement des dimensions concernent le matériau constitutif des pales dans le but de limiter l'accroissement corrélatif de leur poids et de l'inertie de rotation, leur conception de façon à optimiser le rendement aux divers régimes de vent, leur dimensionnement pour résister aux sollicitations de service, aux sollicitations exceptionnelles et à la fatigue provoquée par les échappements tourbillonnaires.

De fait, de nombreux modèles d'éoliennes sont disponibles sur le marché et permettent d'effectuer le choix de l'équipement en fonction des caractéristiques des vents, de la rugosité du terrain, etc. En particulier, la localisation des "fermes d'éoliennes" ou des "parcs éoliens" est gouvernée par la recherche de l'élément essentiel, le vent. On assiste au développement de parcs éoliens *offshore*, dont l'installation est évidemment plus coûteuse que sur la terre ferme en raison des contraintes particulières dues aux problèmes de génie civil, de génie mécanique et de génie des matériaux (fondations, ancrages, résistance de la structure à la fatigue et à la corrosion), et de génie électrique pour le raccordement au réseau. En revanche, c'est dans ces "parcs éoliens" que l'implantation des éoliennes de grande puissance se révèle optimale en raison des vents puissants et réguliers qui sont disponibles et de la moindre gêne pour les populations.

Hormis l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne est l'énergie renouvelable la plus exploitée actuellement. Le principal handicap de cette énergie, souvent souligné, est son intermittence due soit à l'insuffisance de vent, soit à des vents trop violents qui obligent à mettre les machines hors service. On estime ainsi couramment que le facteur de disponibilité d'une éolienne est de 25 %.

Il est nécessaire de pallier cette intermittence si l'on souhaite faire appel à une part importante d'énergie éolienne pour satisfaire la demande énergétique. En effet, la gestion du réseau électrique impose qu'à chaque instant l'équilibre entre la production et la demande soit assuré et met pour cela en œuvre des mécanismes dont les temps de réaction sont extrêmement courts pour déclencher des sources qui doivent être disponibles⁽¹⁰⁾.

Trois types de solutions peuvent être envisagés pour répondre à ce besoin. La plus évidente est de disposer de capacités de production supplémentaires pour prendre le relais de la production éolienne défaillante : ce peut être de la production hydroélectrique (barrages) ou des centrales thermiques. Ceci explique que certaines études (*Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, RWTH, Aachen, 2009*, cité par Jacques TREINER [30]) indiquent que la capacité de substitution de l'énergie éolienne diminue avec la puissance installée et aussi que l'Allemagne et le Danemark, où l'énergie éolienne vient en substitution de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles sont, en Europe, les pays où les émissions de gaz carbonique par habitant sont les plus élevées. La seconde solution consiste à tirer profit de la non-simultanéité des intermittences de production éolienne dans les différentes régions liée aux régimes des vents⁽¹¹⁾. La troisième, qui n'est pas sans lien avec la première, consiste à stocker l'énergie électrique produite, par exemple dans des retenues de barrages pour l'utiliser le moment venu. On remarque que ces trois solutions reposent fondamentalement sur l'existence et le développement de protocoles de gestion et de réseaux de distribution, qu'il est convenu désormais d'appeler "intelligents" – appelés aussi *Smart Grids* – dont la stabilité doit être assurée et qui doivent être également résilients.

Mise à part l'épineuse question de l'intermittence, on peut s'interroger sur l'importance de la ressource en énergie éolienne elle-même. À titre d'exemple, la puissance actuellement installée aux États-Unis est de 40,8 GW ; en Chine elle est de 41,8 GW (raccordée au réseau ?) en augmentation de 62 % par rapport à l'année précédente. L'Allemagne dispose d'un parc éolien de 18 GW et a un programme de développement de 20 GW supplémentaires. Pour la France l'installation de 25 GW est prévue d'ici 2030 : l'appel d'offres pour la construction de 500 à 600 éoliennes

offshore a été lancé en juillet 2011 pour une puissance installée de 3 GW. Au niveau mondial, la puissance installée croît de 25 % par an depuis 2005 et était de 121 GW en 2008 ; les projections pour 2050 en terme d'énergie primaire consommée évaluent à 5 % la part de l'éolien.

Mais on ne peut passer sous silence la question de l'acceptation sociale, notamment en raison du grand nombre de machines nécessaires à une production d'électricité significative par rapport à la demande : un minimum de 200 à 300 éoliennes est nécessaire pour 1 GW. Les principales nuisances évoquées sont esthétiques⁽¹²⁾, et écologiques. On cite notamment les nuisances sonores et les effets sur la faune dus à la rotation des hélices, régulée entre 10 et 15 tours par minute, ce qui correspond à l'extrémité d'une pale de 60 m à une vitesse de 225 à 340 km/h.

Énergie solaire

L'utilisation de l'énergie solaire se présente essentiellement sous deux formes : l'utilisation du rayonnement solaire pour la production d'électricité photovoltaïque d'une part et le "solaire thermique" ou "solaire concentré" d'autre part.

Le "**solaire photovoltaïque**" est médiatiquement très populaire en raison du modèle économique adopté, qui a provoqué un fort démarchage commercial appuyé par les mesures incitatives gouvernementales prises indépendamment de l'évolution des technologies et de la baisse des coûts de production des équipements.

Avec les technologies actuellement courantes, dites de génération 1, dont les cellules sont à base de silicium cristallin, la puissance de crête d'un panneau photovoltaïque (puissance dans les conditions d'ensoleillement maximal) est de 1 kWc pour une surface de 8 à 10 m². La technologie est mature : les rendements des panneaux se situent entre 10 et 15 % (rendements en laboratoire pouvant atteindre 25 %) et leur durée de vie est d'ordre de 40 ans.

La nouvelle génération de cellules photovoltaïques, dite génération 2, est fondée sur la technologie des couches minces : la cellule comporte alors plusieurs couches (typiquement 3) de façon à être sensible à une plusieurs bandes complémentaires du spectre. Les rendements en laboratoire de ces cellules se situent entre 15 et 20 % et les rendements des panneaux sont encore autour de 10 %, mais elles peuvent être associées à des concentrateurs de lumière, qui permettent de multiplier le flux lumineux solaire par un facteur de 500 à 1000 et de réduire la taille des cellules : des rendements dépassant 40 % ont été atteints [31].

Une troisième génération est à l'étude, notamment avec des cellules utilisant des matériaux organiques et polymériques nanostructurés pour lesquelles on peut ajuster les longueurs d'onde d'absorption et d'émission en contrôlant la taille des nanoparticules.

Le développement de la production d'électricité photovoltaïque s'est fait sur la base technologique de la génération 1. Il est vraisemblable que les technologies de la génération 2 vont peu à peu s'imposer car elles rejoignent d'autres technologies industrielles désormais bien maîtrisées dans le domaine du verre avec, entre autres avantages, le fait que le retour sur investissement énergétique (*energetic payback*), c'est-à-dire la compensation de l'énergie dispensée pour la fabrication, se révèle plus rapide.

Le format du développement se partage entre le modèle "dispersé" – installations particulières, de faible puissance, reliées au réseau – et le modèle "concentré" – avec des centrales photovoltaïques telles que celle d'Olmedilla de Alarcón en Espagne, d'une superficie de 1,3 km² et d'une puissance de 60 MWc

pour 162 000 panneaux solaires installés (investissement : 530 M\$) ou celle, récemment raccordée en Italie (novembre 2010), d'une puissance de 70 MWc et d'une superficie de 0,85 km² avec 280 000 panneaux (investissement : 276 M€) qui fut réalisée en 9 mois. Ces deux modèles présentent évidemment une grande différence du point de vue financier puisque, dans le premier cas l'investissement est à la charge des particuliers qui en touchent ensuite la rente, tandis que, dans le second cas, il est à la charge des compagnies productrices. On ne doit pas oublier un troisième modèle, pratiqué notamment pour les toits solaires installés sur les bâtiments de centres commerciaux ou de sites industriels, où l'électricité photovoltaïque est d'abord utilisée sur place, seul le surplus étant envoyé sur le réseau.

Le **“solaire thermique”** sous la forme d'énergie solaire concentrée (*CSP, Concentrated Solar Power*) apparaît comme disposant d'un fort potentiel pour des applications à grande échelle. Le principe est de concentrer le rayonnement solaire au moyen de miroirs sur un fluide caloporteur qui, après passage dans un échangeur, permet d'alimenter une installation de production de vapeur afin, à travers une turbine, d'entraîner un alternateur. Pour pallier l'intermittence journalière de telles installations, il est également proposé de stocker pendant quelques heures l'énergie thermique par transformation de phase (fusion de chlorure de sodium) pour l'utiliser au moment de la demande. Sur ce principe, l'usine CSP de Solana, d'une puissance de 280 MW devrait être opérationnelle en 2012 et des projets sont en cours dans le Nevada et près de Sacramento (Californie, USA).

De gigantesques projets ont récemment été présentés, qui imaginent la construction d'installations solaires concentrées (CSP) au Sahara, l'électricité étant ensuite vendue et acheminée au même titre qu'actuellement les vecteurs d'énergie que sont le pétrole et le gaz. Il est clair que des problèmes techniques et financiers passionnants se posent pour la réalisation pratique d'un tel projet ; ils concernent non seulement les centrales mais aussi les réseaux de transport tels que le projet de transmission d'énergie MEDGRID.

Stocker l'énergie

On vient de voir, à plusieurs reprises, que les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire présentent le grave inconvénient de l'intermittence. Outre la réduction de la puissance moyenne réellement fournie par rapport à la puissance installée, que traduit la notion de facteur de capacité – par exemple de l'ordre de 25 % – cette intermittence a surtout des conséquences très dommageables sur la disponibilité de ces ressources énergétiques au moment opportun. En d'autres termes, il est difficile de s'appuyer de façon fiable sur ces énergies pour assurer la demande de base ou bien pour couvrir les pointes de consommation. Parmi les solutions évoquées pour surmonter ces difficultés figure le stockage de l'énergie.

Stockage de l'électricité

Dans leur utilisation première, les barrages bénéficient du stockage gravitaire de l'énergie solaire réalisé naturellement par le cycle météorologique de l'eau. Ce stockage permet de produire de l'électricité par turbinage, notamment pour couvrir les pointes de consommation. Ils fournissent aussi un moyen de stockage gravitaire de l'énergie électrique par pompage d'eau vers l'amont lorsque l'électricité est peu coûteuse, cette eau étant ensuite turbinée pour répondre aux pics de demande et

assurer la stabilité du réseau. Le rendement de ce type de stockage est estimé 70 %, ce qui en fixe le seuil de rentabilité. Ce mode de stockage est évidemment limité par les capacités disponibles dans les retenues des barrages et l'on a vu récemment de nombreux projets (*cf.* [32]) parmi lesquels des atolls artificiels pour le stockage de l'électricité éolienne produite offshore.

Du point de vue énergétique, le stockage hydraulique, dont il vient d'être question, consiste à accumuler de l'énergie potentielle de gravité. Dans un esprit mécanique voisin, on a recours au stockage pneumatique sous la forme d'énergie potentielle élastique. Le projet le plus performant est le stockage d'une masse d'air comprimé dans une cavité souterraine, à une pression comprise entre 60 et 100 bars. Le stockage adiabatique, en conservant la chaleur produite lors de la compression, permet de réchauffer l'air en sortie lors de son utilisation pour la production d'électricité par entraînement de turbines et alternateurs. Un rendement de 96 % est annoncé. La faisabilité pratique suppose, entre autres, la disponibilité des sites de stockage, présentant les qualités d'étanchéité et de stabilité nécessaires à l'acceptation sociale.

La forme la plus courante de stockage de l'électricité est l'énergie chimique. L'accumulateur au plomb, inventé en 1859 par Gaston Planté, a fait l'objet de nombreux perfectionnements et est encore très utilisé dans les utilisations industrielles courantes et dans les transports. Mais, notamment en raison de sa faible énergie massique, il ne peut répondre à tous les besoins actuels en matière de stockage chimique de l'énergie électrique qui vont de l'alimentation des téléphones portables et autres équipements électroniques et électriques légers, à l'équipement des véhicules électriques et des véhicules hybrides, et au stockage de l'énergie intermittente. Les recherches sont donc très actives dans un domaine crucial de compétition industrielle pour l'innovation. On connaît la popularité présente des batteries lithium-ion dont on peut constater chaque jour la croissance des capacités de stockage. La recherche porte sur l'utilisation de matériaux nanostructurés pour les électrodes et est orientée vers la production de batteries solides telles que les batteries LMP (lithium, métal, polymère). La disponibilité des ressources en lithium est naturellement à prendre en compte en même temps que les dommages écologiques provoqués par son extraction. À noter l'annonce récemment faite par la Chine de la découverte de nouvelles ressources de lithium au sud-ouest de la région autonome du Tibet.

On peut ici mentionner que divers auteurs évoquent la possibilité d'utiliser les capacités de stockage des futurs véhicules électriques pour servir de "réservoir électrique" pour les particuliers, voire comme recours pour assurer l'approvisionnement de secours d'installations critiques.

L'électricité peut aussi être stockée sous la forme d'un vecteur d'énergie : l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène en est l'exemple le plus immédiat, qui fut utilisé dès le XIX^e siècle. On explore actuellement la possibilité de stocker l'énergie en utilisant l'électricité pour synthétiser des carburants ou d'autres composés organiques à partir du gaz carbonique qui serait ainsi recyclé au lieu d'être stocké.

Le stockage électrique de l'électricité dans des supercondensateurs ou supercapacités est une solution qui répond à des besoins spécifiques, capable de fournir de fortes intensités sur des durées brèves avec des temps de réaction extrêmement courts. Ces éléments ont une grande capacité, une cyclabilité élevée qui les rend particulièrement adaptés à la gestion des pics de demande d'énergie. C'est ici l'occasion d'insister sur l'importance des logiciels de gestion de l'énergie.

Stockage direct de l'énergie solaire

Il s'agit des projets concernant la photosynthèse artificielle pour convertir directement l'eau et le gaz carbonique en carburants, ou encore la photoproduction d'hydrogène par dissociation de l'eau au moyen de photoélectrodes en matériaux nanostructurés utilisant directement l'énergie solaire. Ce sont des domaines de recherche très actifs.

Quelles conclusions ?

L'exposé de la problématique a mis en évidence le caractère inéluctable des défis énergétiques à affronter dans les prochaines décennies : répondre à la croissance de la demande en énergie de la population mondiale en exploitant toute la palette des ressources disponibles, dans le respect des contraintes environnementales et éthiques, chaque jour plus pressantes. Le simple rappel de chiffres déjà mentionnés – 60 % de croissance de la demande mondiale d'ici 2030 - suffit à montrer que le tempo imposé est sans commune mesure avec ce qui a été rencontré par le passé.

Même si le mot est actuellement suremployé, il est clair que seule l'innovation, appuyée sur la recherche scientifique de base pour conduire à des ruptures technologiques, permet d'espérer parvenir à la satisfaction de ces besoins dans les délais imposés. Toutes les disciplines scientifiques sont évidemment concernées, qui vont de la physique fondamentale à l'agronomie en passant par les mathématiques et la modélisation, la chimie, la mécanique, la métallurgie et les sciences des matériaux, la biologie et la biochimie, la géologie, l'océanographie et la climatologie, l'économie. Les innovations et les ruptures technologiques sont attendues dans la gestion et l'utilisation de l'énergie et dans la production. Ceci inclut tous les aspects du stockage et de la transmission de l'électricité, dont le rôle sera essentiel pour répondre à l'objectif d'une économie à bas carbone.

Mais on ne saurait oublier les sciences humaines tant l'impact des choix qui seront faits sera grand sur la population mondiale.

La mise en œuvre du concept de *Mix énergétique* dépend évidemment des spécificités géographiques et économiques, et des choix politiques de chaque pays mais, d'une façon générale, elle suppose des arbitrages et des prises de décisions dont les conséquences portent sur des décennies. Le fait nouveau est l'ampleur de ces conséquences, qui résulte de l'ampleur des besoins à satisfaire. En d'autres termes, une fois effectué, un choix technologique engage de façon difficilement réversible à court terme en raison des investissements qu'il entraîne et dont il faut assurer la rentabilité.

Sans qu'il soit aucunement question d'exclure la compétition économique et technologique, génératrice de progrès, l'importance des tâches en jeu et leur coût imposent des actions au niveau international.

- Il s'agit, en premier lieu, d'un engagement international pour la **recherche**.
- Il s'agit aussi d'un **engagement international pour l'évaluation indépendante** des décisions, fondée sur des analyses scientifiques, technologiques, économiques, environnementales et sociétales.
- Il s'agit enfin d'un **engagement international pour la formation de compétences**. En effet, l'effort à fournir est global et nécessite que des compétences, tant au niveau supérieur qu'au niveau des techniciens, soient présentes et actualisées dans tous les pays :

“The Conference of the Parties urges Parties, in particular developed country Parties, to support, through multilateral and bilateral channels, the development of national strategies or action plans, policies and measures and capacity-building, followed by the implementation of national policies and measures, and national strategies or action plans, that could involve further capacity building, technology development and transfer and results-based demonstration activities ;” (Conférence de Cancún, décembre 2010).

RÉFÉRENCES

- [1] OBAMA, B. (2009). Inaugural address. http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/obama_inauguration/7840646.stm.
- [2] OBAMA, B. (2009). Remarks by the President at the National Academy of Sciences annual meeting. http://www.whitehouse.gov/the_press_office/Remarksby-the-President-at-the-National-Academy-of-Sciences-Annual-Meeting/.
- [3] http://www.g8italia2009.it/static/G8_Allegato/G8_Declaration_08_07_09_final.0.pdf
- [4] http://unfccc.int/files/meetings/cop_15/application/pdf/cop15_cph_auv.pdf
- [5] LORENZI, J.-H. & VILLEMEUR, A. (2010). La double méprise de Copenhague, *Les Échos*, 4 février 2010.
- [6] <http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf>
- [7] KING HUBBERT, M. (1949). Energy from Fossil Fuels, *Science*, **109**, 2823, February 1949, 103-109.
- [8] KING HUBBERT, M. (1956). Nuclear Energy and the Fossil Fuels. *Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute*, 1956.
- [9] GONNOT, F.-M. & MARTIN, Ph. (2011). *Rapport de la mission d'information sur les gaz et huile de schiste*, Assemblée nationale, 8 juin 2011. <http://www.assemblee-nationale.fr/13/pdf/rap-info/i3517.pdf>.
- [10] BIGOT, B. (2010). Les matières premières nucléaires. *Annales des mines. Responsabilité et environnement*, **58**, 41-50.
- [11] http://www.interacademies.net/Object.File/Master/9/075/Statement_RS1579_IAP_05.09final2.pdf
- [12] <http://royalsociety.org/climate-change-summary-of-science/>
- [13] <http://www.academie-sciences.fr/activite/rapport/rapport261010.pdf>
- [14] JEANDEL, C. & MOSSERY, R. (2011). *Le climat à découvert*, CNRS éditions, Paris.
- [15] DAUTRAY, R. (2004). *Quelles énergies pour demain ?*, Odile Jacob sciences, Paris.
- [16] DAUTRAY, R. & LESOURNE, J. (2009). *L'humanité face au changement climatique*, Odile Jacob sciences, Paris.
- [17] DUDLEY, B. (2011). *BP Energy Outlook 2030*. London, 2011.
- [18] WEYMULLER, B. (2010). Les perspectives de l'offre mondiale de pétrole. *Annales des mines. Responsabilité et environnement*, **58**, 13-18.
- [19] HEAL, G. (2009). *The Economics of Renewable Energy*. Paper presented at the Mellon-Sawyer Final Workshop , Nuffield College , Oxford , June 30 and July 1 , 2009.

- [20] ALLÈGRE, Cl. & DARS, R. (2009). *La géologie*. Belin, Paris.
- [21] http://www.metstor.fr/thematiques/roches_basiques.html
- [22] BATAILLE, Ch. & BIRRAUX, C. (2011). *Déchets nucléaires : se méfier du paradoxe de la tranquillité*, Rapport de l'OPECST, 19 janvier 2011.
- [23] DAUTRAY, R. (2011). The long term future for civilian nuclear power generation in France: the case for breeder reactors...*C. R. Mécanique*, **339**, 369-387.
- [24] ROBIEUX, J. (2009). *Vers l'énergie abondante sans pollution*, Les éditions Louis de Broglie, Chatenay-Malabry.
- [25] Académie des sciences (2006). *La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ?* sous la direction de LAVAL, G. RST 26, EDP sciences, Paris.
- [26] LESTER, R. K. (2011). Why Fukushima Won't Kill Nuclear Power, *The Wall Street Journal*, April 6, 2011.
- [27] HAHN, R. W. & CECOT, C. (2008). The Benefits and Costs of Ethanol: An Evaluation of the Government's Analysis (August 1, 2008). AEI-Brookings Joint Center Working Paper No. 07-17; Journal of Regulatory Economics, Forthcoming. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1027692>.
- [28] <http://www-sop.inria.fr/comore/shamash/index.html>
- [29] SALTER, S. (1974), Wave power, *Nature*, **249**, 720-724.
- [30] TREINER, J.(2010), L'énergie éolienne. Un exemple de source intermittente, *Découverte*, **369**, juillet-août 2010, 36-48.
- [31] DIMROTH, F., GUTER, W., et al. (2009). Metamorphic GaInP/GaInAs/Ge Triple-Junction Solar Cells with > 41 % Efficiency, *Proc. 34th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Philadelphia, 2009.
- [32] BATAILLE, C. & BIRRAUX, C., (2009). *Évaluation de la Stratégie nationale de recherche énergétique*. Rapport OPECST, février 2009.

NOTES

- (1) L'Allemagne (30 mai 2011), revenant sur une prise de position antérieure, a fixé à 2022 la date de sa "sortie du nucléaire" tandis que la Suisse adopte actuellement l'échéance de 2034.
- (2) Dans son article fondateur [7] de février 1949, Marion KING HUBBERT notant qu'au cours de la première moitié du XX^e siècle la population mondiale avait crû au rythme annuel de 0,7 % par an, écrivait : "*that the present rate of growth cannot long continue is also evident when we consider that at this rate only 200 more years would be required to reach a population of nearly 9 billion – about the maximum number of people the earth can support.*"
- (3) *World Energy Outlook* 2010.
- (4) Il est intéressant de revisiter ces analyses à la lueur des 50 années qui se sont écoulées depuis leur publication. Les perspectives demeurent fondamentalement exactes même si, comme l'auteur le présentait sans doute, les estimations, tant en ce qui concerne les besoins que les ressources, doivent être actualisées.

- (5) Le rédacteur en chef du journal *Les Échos*, Dominique SEUX, citait (30 mai 2011), sans le nommer, un dirigeant d'une grande entreprise du secteur qui aurait dit : "il y a 300 centrales nucléaires dans le monde et il y a eu 3 accidents majeurs – Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima – un tel pourcentage serait inacceptable dans l'industrie aéronautique".
- (6) *Newsweek*, March 28 – April 4, 2011
- (7) L'échelle de temps relative aux déchets est évidemment bien différente !
- (8) "*Corn-based ethanol has been seen more as an excuse for agricultural subsidies than as a power source*".
- (9) À titre de comparaison, pour fixer les ordres de grandeur, la puissance moyenne d'une rame de TGV en France est de l'ordre de 10 MW.
- (10) On peut à ce propos rappeler le scénario de la défaillance sévère survenu le 4 novembre 2006, qui a privé 10 millions d'Européens d'électricité durant plus d'une heure.
- (11) En fait, cette solution se révèle décevante comme l'indique Jacques TREINER [30]. Ainsi l'Allemagne est soumise à un seul régime de vents dominants, tandis que pour la France, où coexistent trois régimes, le lissage n'aboutit qu'à 20 % de la puissance installée.
- (12) Lors de sa 35^e session annuelle, le 23 juin 2011, l'Unesco a demandé à la France de mettre en œuvre un plan de gestion de la vue autour du Mont Saint-Michel, classé au patrimoine mondial depuis 1979.