

# Énergie : comment répondre à une demande sans cesse croissante ?

Tous les mois dans *Le Figaro*, des membres de l'Académie des sciences répondent aux grandes questions de l'actualité scientifique.

SI LES deux premiers siècles de la révolution industrielle (1750-1945) sont souvent qualifiés d'époque du « tout-charbon », on doit, pour la période plus récente qui a vu la généralisation de l'exploitation des ressources pétrolières et gazières, utiliser le concept de « mix » énergétique. On exprime ainsi le recours à toute la gamme des ressources disponibles qui fait face à la hausse de la demande mondiale sous l'effet de la croissance démographique et de l'augmentation de la consommation moyenne par habitant. Quelques chiffres permettent de fixer les idées : la Terre devrait compter 9 milliards d'habitants en 2050 (mais une projection « haute » évoque 14 milliards) et la croissance de la demande mondiale en énergie, d'ici à 2030, devrait être de 60 %, essentiellement en provenance des pays émergents (90 %).

À l'échelle de la planète, la composition du mix énergétique dépend des ressources exploitables mais aussi des innovations technologiques. Le concept de « peak » (peak gas, peak oil), introduit en 1956 par le géophysicien américain Marion King Hubbert pour caractériser le moment à partir duquel la production des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) va décroître, doit être révisé, au moins en ce qui concerne ses échéances. Cela afin de tenir compte des progrès dans les techniques d'exploration et d'exploitation des gisements ainsi que de l'évolution des critères de rentabilité. Le mix énergétique est également contraint par les besoins spécifiques de certains secteurs économiques (à titre d'exemple, les trans-

ports tirent 97 % de leur énergie du pétrole) et, de plus en plus, par les contraintes environnementales. Ce dernier point concerne notamment les ressources fossiles : l'augmentation de la concentration de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère doit être maîtrisée en raison de l'acidification observée des océans et du changement climatique dont elle est une cause.

L'évolution du mix énergétique mondial durant la décennie 1998-2008, au cours de laquelle la production a augmenté de 27 %, met en évidence une baisse de la contribution du pétrole de 39 à 34 %, compensée par une augmentation de la part du charbon de 25 à 29 %, tandis que le gaz naturel passait de

25 % à 24 %, le nucléaire et l'hydraulique demeurant stables entre 5 et 6 %. On constate aussi l'émergence de la production éolienne, estimée à 1 %, alors que le photovoltaïque ne représentait encore que 0,04 %. Les ressources fossiles sont donc largement prépondérantes. Selon les experts de BP, elles devraient le rester à l'horizon 2030, avec 78 % du total (à parts égales entre le charbon, le pétrole et le gaz) contre 87 % en 2008. Nucléaire, hydraulique et énergies renouvelables (biocarburants compris) interviendraient, quant à eux, à hauteur de 7 % chacun.

## Attentes sociétales

Cette vision globale recouvre des situations nationales contrastées. Pour un État, la diversification des productions énergétiques permet de sécuriser ses approvisionnements et d'éviter la dépendance exclusive à l'égard d'une technologie. Il doit aussi être en mesure de satisfaire les besoins spécifiques de ses industries et les contraintes techniques imposées par les pointes de consommation journalières ou saisonnières ainsi que par l'intermittence des énergies renouvelables. Les politiques nationales doivent, enfin, répondre aux attentes sociétales. On constate ainsi des arbitrages très différents de part et d'autre du Rhin (chiffres 2008) : 41,3 TWh (térawatts-heure) de production éolienne en Allemagne pour 6 TWh en France ; une puissance installée photovoltaïque de 5498 MW (mégawatts) outre-Rhin et de 121 MW dans notre pays ; enfin, une production nucléaire (1158 TWh) trois fois plus élevée en France qu'en Allemagne (392 TWh) où les émissions de gaz carbonique par habitant sont les plus élevées d'Europe, du fait d'un recours massif aux énergies fossiles. À ce propos, la déclaration commune du G8 en 2009 prenait acte du caractère incontournable du recours aux énergies fossiles, du moins à moyen terme, mais recommandait que l'on affronte le problème du CO<sub>2</sub> émis en recourant, notamment, à sa capture (séquestration) et à son stockage.

Le fait nouveau est la volonté affir-



Jean Salençon\*

PHYSICIEN,  
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ET DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

mée d'accroître significativement la part des énergies renouvelables. L'hydroélectricité est bien maîtrisée mais peut rencontrer des difficultés d'acceptation sociale en raison des dommages écologiques et humains causés par l'implantation de très grands barrages. Ces équipements, dont la puissance, modulable, dépasse la dizaine de gigawatts (GW), peuvent assurer une part importante de la demande des pays concernés comme c'est le cas pour le barrage d'Itaipu (Brésil-Paraguay).

## Réserve de puissance

Sans préjuger de l'intérêt d'autres solutions (solaire thermodynamique, par exemple), les énergies renouvelables dont la croissance est actuellement la plus importante sont le solaire photovoltaïque et l'éolien. Deux caractéristiques majeures les différencient des précédentes : des équipements de faible puissance unitaire et une production intermittente. Typiquement, la puissance installée d'un panneau photovoltaïque est de 1000 watts pour 10 m<sup>2</sup> avec la technologie de première génération au silicium cristallin ; celle d'une éolienne de grande taille est de 7 MW (pour mémoire, la puissance d'une « tranche nucléaire » est de 1 à 1,5 GW). Pour le photovoltaïque, la priorité a été donnée au modèle économique diffus ou les investissements sont faits par les particuliers.

L'intermittence du photovoltaïque est évidemment liée à celle du soleil. Quant à l'énergie éolienne, elle dépend du vent : ni trop ni trop peu ! Les contraintes techniques de stabilité du réseau

électrique imposent donc de disposer d'une réserve de puissance rapidement mobilisable pour pallier la défaillance éventuelle de ces unités de production. Cette réserve est fournie soit par des centrales thermiques, soit par de l'énergie stockée, ce qui est évidemment préférable. Dans le dernier cas, on utilise les capacités disponibles dans les barrages (lesquels représentent 99 % de la puissance cumulée mondiale des moyens de stockage d'énergie) pour remonter de l'eau par pompage en période de production excédentaire et la turbiner ensuite à la demande. Le temps de réponse de ces installations est de l'ordre de quelques minutes. La nécessité d'accroître les capacités conduit à mettre en œuvre le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé en sous-sol, voire à envisager la construction d'atolls artificiels en mer. Des temps de réponse extrêmement brefs sont également obtenus avec le stockage électrochimique (batteries), électromagnétique (supraconductivité) ou électrique (supercapacités). Sans oublier la production de combustibles à fort contenu énergétique, comme l'hydrogène (voir article ci-dessous).

Une réflexion sur l'évolution du mix énergétique se doit de mentionner, au titre des ressources, la recherche de l'efficacité énergétique dans la production et dans l'utilisation. Qualifiée par certains de production de « négawatts », cette démarche n'a rien d'un retour passéiste mais vise notamment à éradiquer des pratiques et des comportements, naguère encouragés, individuels ou collectifs, économiques et industriels. Elle implique le souci de la vérité des coûts, incluant l'analyse complète du cycle de vie des moyens de production et les impacts environnementaux. Elle suppose, de la part des puissances publiques nationales et internationales, la continuité d'une action réfléchie, à long terme. ■

\*Auteur de *Énergie : des solutions réalistes pour un développement durable ?* Ed. Académie des Sciences/De Vive Voix. (1) Un térawatt est égal à mille milliards de watts, un gigawatt en vaut un milliard, un mégawatt un million.



Le solaire photovoltaïque (en haut) et l'énergie éolienne (en bas) sont en forte croissance. JEAN-PIERRE MULLER/AFP, FRANÇOIS BOUCHON/LE FIGARO



## En 2030, les énergies fossiles devraient rester prépondérantes



## Produire de l'hydrogène à partir du Soleil : les plantes donnent l'exemple

LA SOURCE d'énergie renouvelable la plus abondante est sans aucun doute l'énergie solaire. Le Soleil envoie sur Terre une puissance de 90 000 térawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années. Cependant, en raison de son caractère intermittent et de sa faible densité, il est capital de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire sous forme de carburant.

L'une des possibilités les plus séduisantes consiste à la transformer en hydrogène, un carburant propre (sa combustion ne produit que de l'eau) avec une forte densité énergétique (2,7 fois plus que le pétrole), même si son état gazeux, à température et pression ambiantes, rend son stockage et son transport difficiles. Cet hydrogène sert ensuite à alimenter des piles à combustible pour produire de l'électricité. Il y a plusieurs façons d'obtenir de l'hydrogène



Marc Fontecave

CHIMISTE, MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

grâce au Soleil. La première consiste à effectuer une électrolyse de l'eau à partir de l'énergie électrique fournie par des panneaux photovoltaïques. Mais une autre méthode, qui s'inspire de processus biologiques, pourrait révolutionner, dans un avenir plus ou moins proche, notre approvisionnement énergétique.

La conversion de l'énergie solaire en carburant est en effet admirablement

réalisée par le monde vivant, végétal notamment, grâce à la photosynthèse. Les plantes vertes utilisent en permanence le Soleil pour transformer l'eau et le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) en molécules à haute valeur énergétique, comme les sucres ou les lipides. Elles ne sont pas les seules. Certains micro-organismes, comme les algues unicellulaires ou les cyanobactéries, ont même la capacité de réaliser une simple photolyse de l'eau.

En clair, ils se servent de l'énergie solaire pour « casser » la molécule d'eau en oxygène et en hydrogène. L'eau n'absorbe pas les photons (ou « grains » de lumière) du Soleil, ce véritable « tour de force » s'effectue au moyen de systèmes moléculaires incroyablement sophistiqués et efficaces pour collecter les photons solaires et les convertir efficacement en énergie chimique : le photosystème pour l'oxydation de l'eau en oxygène et des hydro-

génèses pour la réduction de l'eau en hydrogène. Ce qui est remarquable, c'est que ces deux systèmes enzymatiques utilisent comme catalyseurs des métaux abondants comme le manganèse, le nickel ou le fer, alors que les électrolyseurs et les piles à combustible actuels font appel à des métaux nobles comme le platine, très chers et peu abondants dans la croûte terrestre. On oublie souvent de dire qu'il n'y a pas de futur pour une économie à hydrogène si on ne résout pas ces problèmes de catalyseurs.

## Énergétiquement autonome

Grâce à la connaissance de plus en plus approfondie de ces mécanismes naturels et au développement spectaculaire de la chimie « bio-inspirée », bon nombre de chimistes pensent que la photosynthèse artificielle, c'est-à-dire la mise en œuvre de la conversion directe de l'énergie solaire en carburant par des systèmes synthétiques, non na-

turels, est à notre portée et doit être développée. En témoignent certains grands programmes de recherche aux États-Unis, impliquant le ministère de l'Énergie (DoE) ou des universités prestigieuses (CalTech, MIT), en Europe (projet SolarH2) et dans de nombreux pays européens (EPFL, Suisse).

Cette recherche, encore très fondamentale, doit conduire à l'invention, l'élaboration puis la mise sur le marché de dispositifs technologiques originaux : des cellules photoélectrochimiques, capables de produire l'hydrogène uniquement à partir d'eau et de Soleil. Il est fascinant d'imaginer un monde dans lequel chacun deviendrait énergétiquement autonome grâce à la disponibilité locale de « photo-électrolyseurs » et de piles à hydrogène qui fourniraient l'électricité nécessaire, le Soleil étant la source d'énergie primaire, l'hydrogène le vecteur énergétique et l'eau la source d'hydrogène. ■