

L'apport du progrès technologique pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre dans le monde

Le cas de la production d'électricité

Maurice Claverie (53),
ancien président du conseil scientifique de l'ADEME

La maîtrise des émissions de gaz à effet de serre est un défi pour la civilisation industrielle dans laquelle nous vivons.

La pression des opinions publiques a conduit les gouvernements à mettre en place une concertation mondiale qui a abouti au protocole de Kyoto.

Celui-ci prévoit un engagement de plafonnement en 2010 des émissions au niveau de 1990 et la mise en place de procédures qui permettent de tenir compte des disparités de développement économique et de ressources des pays signataires.

L'application de ce protocole par les pays les plus développés apparaît très contraignant dans l'immédiat. Mais à plus long terme, les pays en développement vont probablement en surajouter aux difficultés : quoique leurs émissions ne dépassent pas 0,4 tonne de carbone par habitant pour le moment (contre 3 tonnes pour ceux de l'OCDE), les besoins de leur développement vont entraîner – au moins à court terme – une augmentation rapide des émissions. Un effort important est donc à faire dès à présent dans les pays développés, mais les mesures à prendre

pour limiter les émissions doivent être pensées dans le contexte mondial qui prévaudra au milieu du XXI^e siècle.

Comme il est moralement inacceptable, et de toute façon complètement irréaliste, de brider le développement économique, notamment dans le tiers-monde, les voies qui s'offrent à nous pour maîtriser les émissions de gaz à effet de serre relèvent du progrès technologique, de choix de modes de vie et d'une meilleure organisation de la société.

En ce qui concerne le seul CO₂ ce sont :

- le choix de services moins consommateurs en énergie, par exemple le recours aux transports collectifs de préférence aux transports individuels,
- la recherche d'une meilleure efficacité énergétique dans le cadre d'un service rendu identique. C'est le cas de la pompe à chaleur vis-à-vis du chauffage électrique par effet Joule,
- l'utilisation d'énergies non fossiles : énergie hydraulique, éolienne ou solaire ou sans contenu en carbone comme l'énergie nucléaire ou la géothermie,

- la substitution d'énergie fossile riche en carbone, par une autre moins riche, en allant des charbons vers le pétrole puis le gaz naturel,
- la récupération du carbone à la cheminée ou l'échappement en vue de son confinement pour une très longue durée dans des structures géologiques profondes.

À l'exception du premier point cité, les autres font appel à un changement ou une adaptation des technologies mises en œuvre lors de la conversion ou de l'utilisation finale de l'énergie. Le comité de la recherche de l'IEA ⁽¹⁾ a procédé à une consultation internationale pour identifier les technologies jugées prometteuses pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les vingt prochaines années. Le catalogue de ces technologies est impressionnant, même si nombre d'entre elles éprouvent des difficultés à pénétrer le marché, notamment pour des raisons économiques.

Ne pouvant être exhaustif, j'ai fait le choix de présenter le cas de quelques technologies émergentes dans le domaine de la production d'électricité, et d'indiquer leurs possibilités en termes d'économie d'énergie ou de substitution.

Il existe en effet un lien étroit entre la réduction des émissions de gaz à effet de serre et les économies d'énergie primaire, car les émissions de gaz carbonique – 65 % de l'effet de serre – sont proportionnelles à l'énergie fossile consommée. Après prise en compte des contraintes techniques et des coûts résultant de la minimisation des émissions mineures, le problème de la réduction des émissions se confond pour une large part avec celui des économies d'énergie fossile

Or un effort considérable de recherche et de développement a été poursuivi partout dans le monde entre 1973, année du premier choc pétrolier et la fin des années 80, époque où la baisse du prix des énergies fossiles a découragé à la fois la recherche et les investissements dans les nouvelles technologies. Seule différence notable, la substitution du pétrole par le charbon, encouragée dans les années 70, est devenue contraire au but qui est poursuivi maintenant. D'une manière générale, il existe un portefeuille de technologies qui est mobilisable à moyen terme sous la réserve éventuelle d'un développement de produits actualisés et d'une mise en place d'incitations fiscales ou réglementaires.

L'énergie nucléaire

L'apport des technologies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre concerne évidemment la substitution d'énergie, de celles riches en carbone vers celles qui en sont exemptes. Se pose alors immédiatement la question de l'avenir de l'énergie nucléaire.

La centrale à fission nucléaire est le seul moyen de production centralisé d'électricité, avec la grande hydraulique, qui ne rejette pas de gaz à effet de serre.

Elle dépend d'une ressource fossile (l'uranium naturel), mais en cas de besoin l'utilisation du thorium pourrait être envisagée et les filières surgénératrices permettraient de diviser dans un rapport 100 le besoin d'uranium fossile (et par conséquent de faire passer d'environ cent ans à quelques milliers d'années l'horizon d'utilisation). En 1999, la puissance totale installée dans le monde était de 355 GW, mais le développement en est pratiquement stoppé partout

à l'exception du Japon, de la Corée et de la Russie. Sauf revirement majeur dans l'opinion, une telle situation devrait se poursuivre pour plusieurs décennies. Aussi, sur la base des prévisions actuelles, la puissance électronucléaire mondiale ne devrait pas dépasser 379 GW en 2015, soit une augmentation modeste de 6,6 %.

Les raisons données pour cette désaffection sont de plusieurs natures :

- le manque de compétitivité dans certains contextes de l'électricité nucléaire,
- la crainte des accidents après celui de Three Miles Islands aux États-Unis et de Tchernobyl en URSS,
- l'incertitude sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue liée à la réticence du public vis-à-vis des stockages souterrains de déchets nucléaires,
- les obstacles à l'exportation : les centrales nucléaires ne peuvent être construites que dans les pays ayant à la fois la culture technologique et la stabilité politique. De plus les pouvoirs politiques des pays exportateurs, signataires du Traité de non prolifération nucléaire, estiment que ces pays ne doivent avoir aucune tentation de développer des armes nucléaires.

En évolution tendancielle, il y aura peu de nouvelles substitutions d'énergie vers l'énergie nucléaire dans le monde au cours des vingt prochaines années.

En ce qui concerne la France, au prix d'une extension de durée des centrales à quarante ou quarante-cinq ans, le parc actuel de centrales restera probablement inchangé jusqu'à 2020, ce qui donne le temps de faire les meilleurs choix pour l'avenir du nucléaire.

Il pourrait en effet être néfaste de renoncer à l'acquis industriel de l'énergie nucléaire, sous prétexte de l'imperfection de sa première génération. Il semble nécessaire de mener des recherches en vue de poursuivre l'amélioration de la sûreté des réacteurs nucléaires et des stockages, d'une part et de développer de nouvelles filières de réacteurs limitant la production de déchets radioactifs, d'autre part.

La substitution vers le gaz naturel

La substitution du charbon ou du pétrole par le gaz naturel offre de grands avantages en matière de pollution. Le gaz naturel ne contient ni soufre ni azote ni métaux lourds. Sa composition offre le plus grand nombre d'atomes d'hydrogène par atome de carbone. Sa combustion produit relativement moins de gaz carbonique et seulement des NO_x résultant de la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air dans la flamme, comme le montre le tableau 1 ci-après.

Le remplacement du charbon par le gaz sera donc accompagné par une réduction de 40% de l'émission de gaz carbonique et le remplacement du pétrole par une réduction de 25%.

L'utilisation du gaz permet en outre le recours à une solution technique particulièrement performante : la turbine à cycle combiné associant une turbine à gaz et une turbine à vapeur. Ces centrales atteindront prochainement des rendements industriels de 60 % et leurs coûts de construction sont très inférieurs à ceux des centrales thermiques classiques.

Or 39 % de l'électricité est produite dans le monde à partir de charbon et 9 % à partir de pétrole. Dans de nombreux pays, la production de l'électricité s'appuie en majorité sur le charbon : 75 % en Chine, 53 % aux États-Unis, 55 % en Allemagne, etc. Dans d'autres pays, c'est le pétrole qui est dominant, par exemple en Italie avec 49 %. Pour eux, l'intérêt du passage au gaz naturel est évident à court terme.

Dans ces pays, l'obstacle principal pour la modernisation des parcs de production électrique est simplement la durée de vie de ces parcs. L'Europe de l'Ouest dispose d'une surcapacité de production et de nombreuses centrales récentes ; toutes choses égales

TABLEAU 1

| | Gaz naturel | Pétrole | Charbon |
|----------------|-------------|---------|---------|
| Gaz carbonique | 1 | 1,3 | 1,7 |
| Oxydes d'azote | 1 | 1,5 à 2 | 2,5 |

Émissions comparées dans une application thermique typique, normées à 1 pour le gaz.

par ailleurs il faudrait vraisemblablement plusieurs décennies pour constater un changement. La situation aux États-Unis est plus favorable : ils auraient 52 GW de centrales nucléaires et 73 GW de centrales conventionnelles arrivant en fin de vie théorique entre 2000 et 2020. Mais leur vie pratique ne sera-t-elle pas plus longue ?

L'amélioration de la combustion du charbon

Malgré tous les avantages relatifs du gaz naturel, l'utilisation du charbon pour la production d'électricité, les utilisations industrielles lourdes et la fourniture de chaleur à des réseaux urbains aura naturellement tendance à se poursuivre. Les réserves sont en effet abondantes, le prix du charbon est bas et stable et le gaz naturel n'est pas une ressource universelle.

Face à cette situation, le développement de centrales à charbon de rendement énergétique amélioré et dotées de dispositifs de purification des gaz de combustion s'imposait.

La première réponse a été le développement des centrales à charbon pulvérisé avec injection de calcaire ou de chaux pour fixer le soufre, ce qui est d'ailleurs défavorable sur le plan des émissions de gaz carbonique. Leur rendement commercial, qui plafonnait à 39 %, atteindrait jusqu'à 47 % dans les centrales "supercritiques" en cours de développement. Ces centrales sont dotées d'un traitement élaboré des gaz de fumée : désulfuration et réduction catalytique des NO_x, qui augmente beaucoup leur coût et leur complexité.

Une autre voie est l'utilisation de chaudières à lit fluidisé, qui permettent d'abaisser la température de

combustion ce qui limite la production de NO_x. Deux centrales de ce type ont été construites en France.

Les centrales les plus complexes qui sont au stade de la démonstration commerciale utilisent la gazéification préalable du charbon à l'air ou l'oxygène et à l'eau. Le gaz de synthèse issu du gazéifieur après être traité chimiquement pour retirer le soufre alimente un cycle combiné. Cette centrale IGCC, malgré une autoconsommation de 5 % (oxygène, gazéifieur), peut atteindre un rendement supérieur à 50 %.

Il est probable que ces centrales à charbon à haute performance trouveront leur place d'abord aux États-Unis qui disposent à la fois de gisements de charbon à bon marché et de la capacité financière pour en supporter le surcoût initial d'investissement des centrales. Par contre, c'est plus incertain en ce qui concerne les pays ayant de grands besoins de développement pour qui le charbon est une énergie domestique. Le charbon permet de produire 75 % de l'électricité en Chine et 73 % en Inde. Ces deux pays auront-ils la volonté et les moyens pour retenir des innovations technologiques qui apportent seulement, nous l'avons vu, 20 % de réduction des émissions de carbone ?

Les piles à combustible

Une pile à combustible est un système électrochimique dans lequel un électrolyte, qui donne le nom au type de pile, assure le transport d'ions entre deux électrodes. Les réactions d'oxydation par l'air et de réduction par le combustible se produisent au contact des électrodes, qui sont des conducteurs poreux. Un catalyseur imprégnant les électrodes augmente la cinétique des réactions.

Cette technologie a été imaginée au XIX^e siècle, et a été développée pour la conquête de la Lune durant les années soixante avec l'hydrogène comme combustible. Ses qualités potentielles ont justifié depuis quinze ans des programmes de recherche très soutenus au Japon et aux États-Unis et un soutien plus modeste de la DG XII de l'Union européenne.

Au-delà de la filière spatiale utilisant un électrolyte basique, des décennies de recherche ont abouti à la sélection de quatre systèmes (tableau 2).

Les piles PEFMC et PAFC sont déjà commercialisées. Un parc de 2 000 MW de piles PAFC pourrait être installé au Japon dans les prochaines années. Des prototypes de puissance unitaire de 1 à 3 MW sont en essai aux États-Unis et au Japon.

Les piles MCFC (rendement électrique de 50 %) et SOFC (rendement 55 %) conviennent pour la cogénération et même pour la constitution d'un cycle combiné permettant d'atteindre un rendement global de 60 % à 70 %. Une pile MCFC de 2 MW est en cours d'essai en Californie.

Westinghouse développe un cycle combiné de 1 MW (800 kW SOFC et 200 kW turbine).

Il est maintenant acquis que les piles à combustible ont bien les qualités mises en avant par leurs promoteurs : rendement électrique élevé 40 à 55 % même en faible puissance et en charge partielle, très faibles rejets de gaz polluants locaux (CO ou NO_x) et aptitude à la cogénération y compris en milieu résidentiel.

Des progrès sont encore nécessaires pour réduire les coûts de construction encore dissuasifs et confirmer la durée de vie des équipements.

TABLEAU 2

| Désignation | Électrolyte | Catalyse | Température | Applications | Développement |
|-------------|--------------------|----------|--------------|----------------------------|---------------------------------|
| PEFMC | Polymère | Platine | 100 °C | Espace automobile | Commercialisé |
| PAFC | Acide phosphorique | Platine | 200 °C | Cogénération microcentrale | Commercialisé (unité de 200 kW) |
| MCFC | Carbonate fondu | Sans | 650 °C | Cogénération cycle combiné | Démonstration |
| SOFC | Céramique zircon | Sans | 800-1 000 °C | Cogénération cycle combiné | Démonstration |

Les éoliennes

Les éoliennes sont représentatives des nouvelles sources de production d'électricité utilisant les énergies renouvelables. En effet quoique les moulins à vent aient été utilisés dès le Moyen Âge, les éoliennes modernes sont des objets techniques rendus faisables par les progrès récents sur les matériaux composites et l'électrotechnique. La majorité des éoliennes, éventuellement raccordées aux réseaux, ont des puissances unitaires de 100 à 600 kW. Des machines de 1 000 à 1 500 kW sont en cours d'installation en Europe. D'après l'IEA, le parc mondial aurait une puissance de l'ordre de 10 GW avec une croissance très forte.

Le coût de l'énergie produite est très dépendant de la disponibilité du vent, mais il ne dépasse pas deux fois les coûts de production des centrales utilisant l'énergie fossile. Ceci lui permet dès maintenant de remplir des niches de marché et laisse espérer une rentabilité dans le contexte d'un grand réseau d'ici une dizaine d'années.

Les inconnues pour le développement des éoliennes sont la faisabilité technique d'intégrer dans les réseaux une part non négligeable d'énergie dont la production est aléa-

toire et l'acceptation sociale de la construction de structures métalliques très visibles dans des sites (régions côtières, montagnes) ayant souvent une vocation touristique.

La récupération et le stockage de CO₂

Comme on l'a vu précédemment, la poursuite de l'utilisation du charbon est incontournable et les gains de rendement possibles sur la conversion du charbon seront limités et coûteux. Augmenter le rendement thermodynamique d'une centrale de 40 à 50 % n'apporte qu'une réduction de 20 % des rejets de gaz carbonique.

Face à ce constat, l'idée de récupérer le CO₂ produit par les installations industrielles et de le stocker dans un environnement naturel (fond des océans ou formation géologique) a été proposée dès les années 70. La faisabilité d'un grand nombre de variantes a été étudiée. On peut en tirer plusieurs conclusions.

- La complexité des installations nécessaires restreindrait l'utilisation économique de ces procédés aux centrales électrogènes de grande puissance ou à certaines installations industrielles (cimenteries, hauts fourneaux).

- La faisabilité industrielle de la récupération du CO₂ dans les fumées est acquise, mais les procédés chimiques ou physiques disponibles sont très coûteux (40 à 50 \$ par tonne de CO₂). L'intégration de la récupération dans des centrales avec gazéification du charbon à l'oxygène pourrait diviser ce coût par deux.

- La capture du CO₂ est coûteuse en investissement mais aussi en énergie, entraînant une surconsommation de combustible allant de 31 % avec les procédés chimiques à 18 % avec les technologies intégrées les plus avancées.

- Le stockage dans les fonds océaniques est une solution intellectuellement satisfaisante, car elle consiste à accélérer un processus naturel, mais inacceptable pour les défenseurs de l'environnement en raison de ses effets potentiels sur la faune et la flore des océans. Elle est aussi très coûteuse : les zones de production d'électricité sont rarement proches des grands fonds marins.

- Le stockage dans les gisements épuisés d'hydrocarbures ou dans des aquifères profonds est expérimenté par Statoil en mer du Nord qui réinjecte, à partir d'une plate-forme, le gaz carbonique séparé du gaz naturel qu'il exploite à un autre niveau. La capacité totale de stockage dans les gisements d'hydrocarbures connus serait de 16 gigatonnes de carbone. La capacité des aquifères serait, avec beaucoup d'incertitude, de 80 gigatonnes. Dans les cas favorables, le coût du transport et du stockage est estimé à 25 \$ la tonne de CO₂.

En conclusion, l'émergence de cette technologie au cours du vingt et unième siècle est plausible mais devrait rester marginale dans des pays où des conditions favorables seraient remplies, par exemple les pays riverains de la mer du Nord qui sont grands consommateurs de charbon. Ce n'est pas une solution miracle universelle. Un gros inconvénient, difficile à contourner, est le coût énergétique de la récupération accroissant la pression sur les ressources fossiles.

Conclusion

Ce regard non exhaustif sur les technologies de production d'électricité fait apparaître les points forts et les points faibles typiques de l'apport des technologies à la réduction des émissions de gaz carbonique.

Le gaz naturel, là où il est disponible, est le grand gagnant à court terme de cet examen. Il s'agit toute-

fois d'une solution qui est loin d'être une solution miracle, car son utilisation produit toujours des quantités significatives de CO₂, et il s'agit d'une ressource non renouvelable, avec un horizon de visibilité qui est du même ordre de grandeur que celui du pétrole (un peu moins d'un siècle à consommation constante).

Les centrales à cycle combiné au gaz naturel sont cependant préférables aux centrales à charbon sur tous les plans : moins d'investissement, un meilleur rendement et des émissions de gaz à effet de serre très inférieures. Le gaz naturel est aussi le combustible de choix pour la cogénération et la production décentralisée dans les pays industrialisés, là où existe un réseau de distribution de gaz, mais si le bilan en gaz à effet de serre est bon avec le charbon, il est mauvais avec le nucléaire.

Les éoliennes sont l'une des réusites techniques des énergies renouvelables, mais leur insertion dans le système énergétique n'est pas totalement résolue (intermittence, encombrement). Ce cas est représentatif de la situation des énergies renouvelables. Ces énergies bénéficient d'un préjugé favorable. Mais il est encore difficile de juger des obstacles que leur dépendance vis-à-vis des ressources naturelles, leurs exigences d'usage des sols et leur impact sur l'environnement feront peser sur leur développement, au-delà d'une utilisation marginale.

Le cas du charbon illustre les limites du progrès technologique pur quand il n'y a pas substitution mais simple amélioration. Les solutions technologiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du charbon et des produits pétroliers lourds sont d'une efficacité limitée à 20 % et exigent des investissements particulièrement coûteux. Par ailleurs la voie du stockage du gaz carbonique apparaît également coûteuse et réservée à des sites particuliers.

Ces remarques faites sur les technologies lourdes de production d'électricité peuvent en fait assez facilement être extrapolées à d'autres sources majeures d'émission. Malgré des succès ponctuels comme les cycles combinés et les piles à combustible, il faut

considérer avec modestie l'apport du progrès technologique pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre dans le monde. Pour maîtriser ces émissions, les plus grands progrès, donc les plus grands efforts, devront être faits au niveau de l'utilisation rationnelle de l'énergie par le choix des infrastructures, des équipements et des comportements les plus performants de ce point de vue. ■

(1) International Energy Agency.

Références

- *The role of technology in reducing energy-related greenhouse emissions*, Juin Committee on Energy research and technology, June 1999, International Energy Agency.
- *Natural gas in power generation*, GUY MAISONNIER, February 1999, Cedigaz.