

L'énergie nucléaire

compétitive sur toute la ligne?

Fatih Birol

En vue, un avenir énergétique mondial contrasté.

En matière d'énergie, le monde connaît deux craintes: celle de manquer d'énergie suffisante et sûre à un prix abordable, et celle de voir l'environnement s'endommager. La flambée des prix de l'énergie et les récents événements géopolitiques nous ont rappelé le rôle essentiel qu'une énergie abordable joue dans la croissance économique et dans le développement humain, ainsi que la vulnérabilité du système énergétique mondial face aux interruptions d'approvisionnement.

La protection des approvisionnements énergétiques est de nouveau à l'ordre du jour. Or, la nature actuelle de ces approvisionnements porte en soi la menace de dommages graves et irréversibles pour l'environnement. Pour concilier sécurité énergétique et protection de l'environnement, il faut une action publique forte et coordonnée et l'appui de la population.

Ces préoccupations ont relancé le débat sur le rôle du nucléaire. Ces deux dernières années, plusieurs gouvernements se sont déclarés favorables à un accroissement de la part du nucléaire dans les différentes sources d'énergie et quelques-uns ont entrepris concrètement la construction d'une nouvelle génération de réacteurs sûrs et rentables.

Dans les vingt-cinq années à venir, le nucléaire, les mesures d'économie d'énergie et les sources renouvelables

pourraient aider à diminuer la consommation de combustibles fossiles, à atténuer les changements climatiques et à réduire la dépendance croissante vis-à-vis des importations de gaz.

✓ Le nucléaire est une source d'électricité qui émet peu de carbone. La production d'un gigawatt d'électricité d'origine nucléaire, lorsqu'elle remplace une production au charbon, évite d'émettre 5,6 millions de tonnes de CO₂ par an. Les centrales nucléaires n'émettent aucun polluant atmosphérique tel que le dioxyde de soufre, l'oxyde d'azote ou des particules.

✓ Les centrales nucléaires peuvent aider à réduire la dépendance vis-à-vis du gaz importé; à la différence du gaz, en outre, l'uranium est largement disponible dans le monde. Avec les politiques actuelles, la dépendance vis-à-vis des importations de gaz va s'accroître dans toutes les régions de l'OCDE et dans certains pays en développement jusqu'en 2030, principalement du fait du secteur de l'électricité.

✓ Les centrales nucléaires produisent de l'électricité à des coûts relativement stables, car le coût du combustible représente une faible part du coût de production; l'uranium brut représente environ 5% et l'uranium traité environ 15%. Dans les centrales au gaz, le combustible représente environ 75% du coût de production.

Perspectives du nucléaire

Le *World Energy Outlook 2006*, publication phare de l'Agence internationale de l'énergie, envisage deux scénarios :

● Le **scénario de référence** suppose que les États maintiennent globalement leurs politiques actuelles et qu'ils continuent de développer ou d'abandonner progressivement le nucléaire. Les objectifs jugés irréalistes de production nucléaire d'électricité sont supposés ne pas être tenus. Les hypothèses macroéconomiques, techniques et financières qui sous-tendent les objectifs de nombreux pays diffèrent souvent de celles utilisées dans l'*Outlook*.

● Le **scénario alternatif** suppose que des mesures sont prises pour combattre le réchauffement planétaire et garantir la sécurité des approvisionnements, y compris par le renforcement du nucléaire. Les pays qui possèdent déjà des centrales nucléaires sont supposés prolonger la durée de vie des réacteurs existants ou en construire de nouveaux. Dans les pays qui abandonnent le nucléaire, on suppose que les réacteurs sont fermés plus tard que prévu pour limiter les émissions de CO₂, garantir la sécurité des approvisionnements et retarder de nouveaux investissements. L'*Outlook* prévoit que la capacité mondiale de production nucléaire d'électricité passera de 368 GW aujourd'hui à 416 GW en 2030 dans le scénario de référence et à 519 GW dans le scénario alternatif.

Scénario de référence. Dans ce scénario, la production nucléaire mondiale d'électricité passe de 2789 TWh en 2005 à 3304 TWh en 2030, ce qui représente une croissance moyenne de 0,7% l'an, contre 2,5% l'an pour la production totale d'électricité. La capacité installée passe de 368 GW à 416 GW. Les facteurs de capacité nucléaire sont supposés s'améliorer dans le temps, principalement dans les pays qui sont actuellement en dessous de la moyenne mondiale. Globalement, le facteur de capacité mondial moyen passe de 85% en 2005 à 91% en 2030.

Les augmentations les plus fortes de la capacité installée sont prévues en Chine, au Japon, en Inde, aux États-Unis, en Russie et en République de Corée. La capacité nucléaire des pays européens de l'OCDE passe de 131 GW à 74 GW. L'abandon du nucléaire en Allemagne, en Suède et en Belgique représente 35 GW. Les centrales de ces pays sont toutes supposées fermées avant 2030.

La part du nucléaire dans la production mondiale d'électricité passe de 15% à 10%. La diminution la plus importante se produit dans la région Europe de l'OCDE : de 29% en 2005 à 12% en 2030.

Scénario alternatif. Dans ce scénario, la production nucléaire mondiale d'électricité atteint 4106 TWh en 2030, croissant en moyenne de 1,6% l'an. La part du nucléaire dans la production mondiale d'électricité diminue légèrement, passant de 15% à environ 14% sur la période de projection. La capacité nucléaire installée atteint 519 GW en 2030. La principale différence entre les deux scénarios survient après 2020, en raison des longs délais de réalisation des centrales nucléaires.

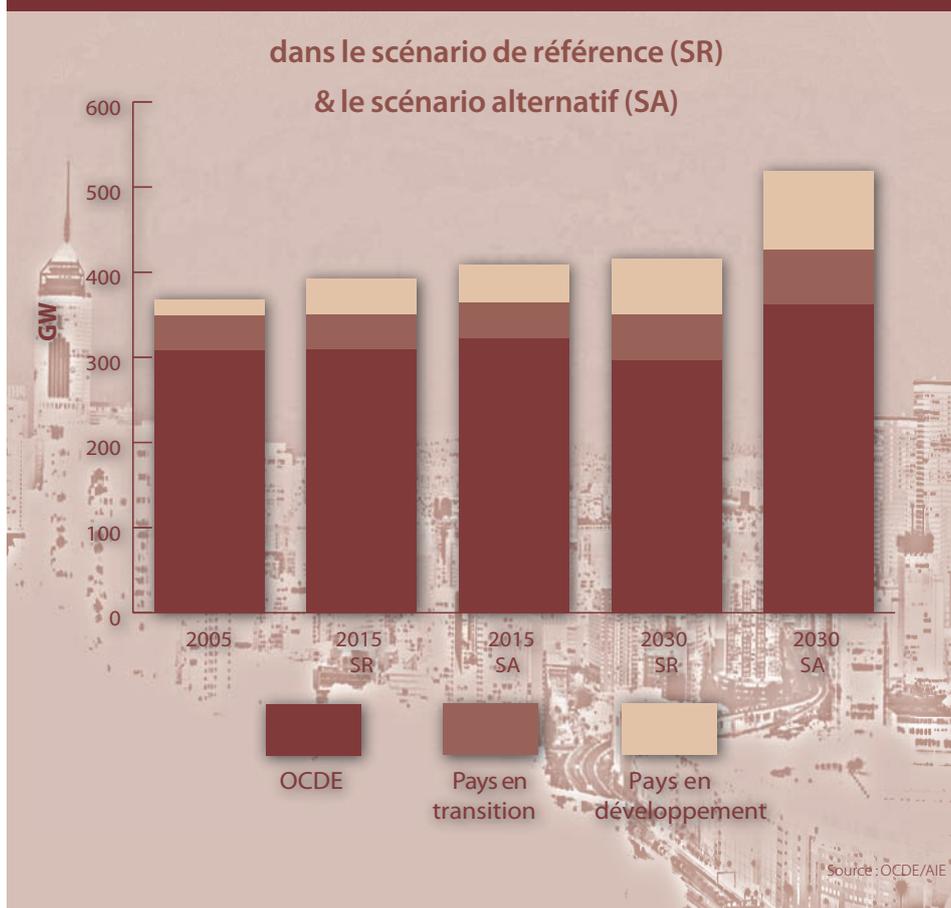
La capacité installée augmente dans toutes les régions hormis la région Europe de l'OCDE, où les nouvelles constructions ne compenseront pas les fermetures. Pour que ce tableau change en Europe, il faudra probablement que le marché envoie de forts signaux découlant d'engagements pris à long terme de réduire les émissions de CO₂. À la mi-2006, cependant, il n'avait été fixé, en la matière, aucun objectif au-delà de 2012. Les politiques de sortie du nucléaire sont supposées tenir, mais sont retardées d'une dizaine d'années. Dans ce scénario, en 2030, l'Allemagne ne conserve qu'un réacteur tandis que ceux de Belgique et de Suède fonctionnent encore. Au Royaume-Uni, tous les réacteurs sauf un sont arrêtés sans être remplacés.

Les augmentations les plus fortes de la capacité nucléaire de production d'électricité sont attendues en Chine, aux États-Unis, au Japon, en République de Corée, en Inde et en Russie. En 2030, ces pays détiendront deux tiers de la capacité nucléaire mondiale.

Les augmentations les plus fortes de la capacité nucléaire de production d'électricité sont attendues en Chine, aux États-Unis, au Japon, en République de Corée, en Inde et en Russie. En 2030, ces pays détiendront deux tiers de la capacité nucléaire mondiale, contre à peine plus de la moitié aujourd'hui. Les facteurs de capacité nucléaire sont les mêmes que dans le scénario de référence.

L'augmentation la plus forte de la part du nucléaire dans la production d'électricité est attendue dans la région Pacifique de l'OCDE, où elle atteint 41% en 2030, contre 25% actuellement. Dans la région Amérique du Nord de l'OCDE, cette part reste inchangée. Dans la région Europe de l'OCDE, elle chute à 20% en 2030. Cette part est supérieure à celle du scénario de référence, mais reste inférieure à celle, actuelle, de 29%. Dans les pays en transition, la part du nucléaire passe de 17% à 23%. En Chine et en Inde, elle atteint, respectivement, 6% et 9% en 2030, contre 2% et 3% aujourd'hui.

Capacité nucléaire mondiale



des sites existants, du moins pendant les dix à quinze prochaines années.

En fonction des risques qu'elles encourent, les entités – actionnaires de l'exploitant ou financiers extérieurs – qui investissent dans la centrale rechercheront différents rendements. Deux cas sont analysés ici :

✓ celui d'un taux d'actualisation faible correspondant à un contexte d'investissement à risque modéré dans lequel les risques de construction et d'exploitation sont partagés par l'acheteur, le vendeur, les financiers extérieurs et les usagers en vertu d'arrangements tels que des accords d'achat d'électricité à long terme.

✓ celui d'un taux d'actualisation élevé correspondant à un contexte d'investissement plus risqué dans lequel l'acheteur, les investisseurs et les prêteurs assument une proportion plus élevée des risques de construction et d'exploitation.

L'*Outlook* compare le coût de production de l'électricité d'origine nucléaire à celui des principales alternatives de base avec un taux

d'actualisation faible. Dans l'hypothèse d'un coût de construction élevé (2 500 dollars/kW), le nucléaire est compétitif avec des centrales à TGCC à des prix du gaz avoisinant 6 dollars par MBtu (ce qui est proche du prix moyen de l'OCDE en 2005 et dans la gamme de prix supposée de 6 à 7 dollars par MBtu sur l'ensemble de la période de projection), mais plus onéreux que le charbon à 55 dollars la tonne. Dans celle d'un coût de construction faible (2 000 dollars/kW), le nucléaire est compétitif avec le charbon (voir graphique *Coûts de la production d'électricité*).

L'*Outlook* examine ensuite les coûts de production avec un taux d'actualisation élevé. Dans les hypothèses de coûts de construction élevés et faibles, les coûts de production du nucléaire sont de 5,7 cents et 4,9 cents par kWh. Avec un taux d'actualisation élevé, des techniques à forte intensité de capital comme le nucléaire et l'énergie éolienne ne sont pas compétitives par rapport aux centrales à TGCC ou au charbon. Dans ce cas, les coûts de production du nucléaire vont de 6,8 à 8,1 cents par kWh (voir graphique *Coûts de la production d'électricité*)

Nombre d'incertitudes prévalent quant à l'importance des paramètres utilisés dans les estimations ci-dessus. Les plus importants, pour la compétitivité du nucléaire, sont le coût d'investissement, le taux d'actualisation et la durée de vie de la centrale. Toute augmentation du prix du gaz ou du charbon ou introduction d'une valeur carbone amé-

L'économie du nucléaire dans un marché compétitif

Quel est le fondement économique de nouvelles centrales nucléaires par rapport à celui de techniques matures concurrentes : turbines à gaz à cycle combiné (TGCC), charbon vapeur, cycle combiné de gazéification intégrée (CCGI) et turbines éoliennes terrestres ?

Les hypothèses de coût se fondent sur les attentes des dix à quinze prochaines années. Le coût de construction de centrales à CCGI et de fermes éoliennes est inférieur de 10 à 15% au coût actuel. Les prix du gaz naturel sont supposés être de l'ordre de 6 à 7 dollars par MBtu jusqu'en 2030. Le prix du charbon renvoie au prix international du charbon importé dans l'OCDE (55 dollars la tonne en 2015 et 60 dollars la tonne en 2030), mais certains pays, dont les États-Unis et le Canada, ont accès à du charbon local meilleur marché, ce qui rend la production au charbon plus compétitive. Pour les centrales nucléaires, on a utilisé divers coûts de construction pour intégrer l'incertitude liée au coût des réacteurs qui entreraient en service en 2015. Ces coûts concernent des réacteurs nucléaires construits sur des sites existants. Les projets entièrement nouveaux seront probablement plus onéreux. Dans les pays de l'OCDE, la plupart des nouveaux réacteurs seront probablement construits sur

lière la compétitivité du nucléaire. L'emplacement et la taille jouent également sur les coûts.

Le combustible entre peu en ligne de compte dans le coût de production du nucléaire. En cas d'augmentation de 50% des prix de l'uranium, du gaz et du charbon (par rapport aux hypothèses de base), le coût du nucléaire augmenterait d'environ 3%, celui d'une production charbon de 21% et celui d'une production TGCC de 38%, ce qui montre la résilience supérieure du nucléaire au risque de prix du combustible.

Quelle serait l'incidence du prix du carbone sur le coût de la production nucléaire, charbon et gaz avec un taux d'actualisation faible ? À environ 10 dollars la tonne de CO₂, le nucléaire est compétitif par rapport au charbon, même dans l'hypothèse d'un coût de construction élevé. Ce faible prix du carbone tend à indiquer que le nucléaire est un moyen rentable de réduire les émissions. Le prix moyen du carbone utilisé dans le système européen d'échange de droits d'émission a souvent été bien supérieur. En 2005, le prix moyen du CO₂ était de 18,3 euros la tonne (environ 23 dollars) ; en 2006, il est passé à 22,9 euros (33 dollars) jusqu'à la fin d'avril, lorsqu'il s'est effondré. Entre avril et la fin d'août 2006, il a été en moyenne de 15,5 euros (19 dollars). Avec un taux d'actualisation élevé, il faut, dans les hypothèses de coût d'investissement faible et élevé, un prix de 10 à 25 dollars pour rendre le nucléaire compétitif avec le charbon et de 15 à 50 dollars pour le rendre compétitif avec les centrales à gaz (voir graphique *Incidence du prix du CO₂ sur les coûts de production*)

Le nucléaire a une intensité de capital bien supérieure à celle des techniques de base qui utilisent du combustible fossile (TGCC et charbon). Des trois principaux éléments – capital, combustible et exploitation/maintenance – qui forment son coût de production, le capital est le plus important, représentant environ trois quarts du total. Il ne représente qu'environ 20% du coût total d'une centrale TGCC. Une centrale nucléaire requiert un investissement initial de 2 à 3,5 milliards de dollars par réacteur. Un tel investissement peut être plus difficile à financer.

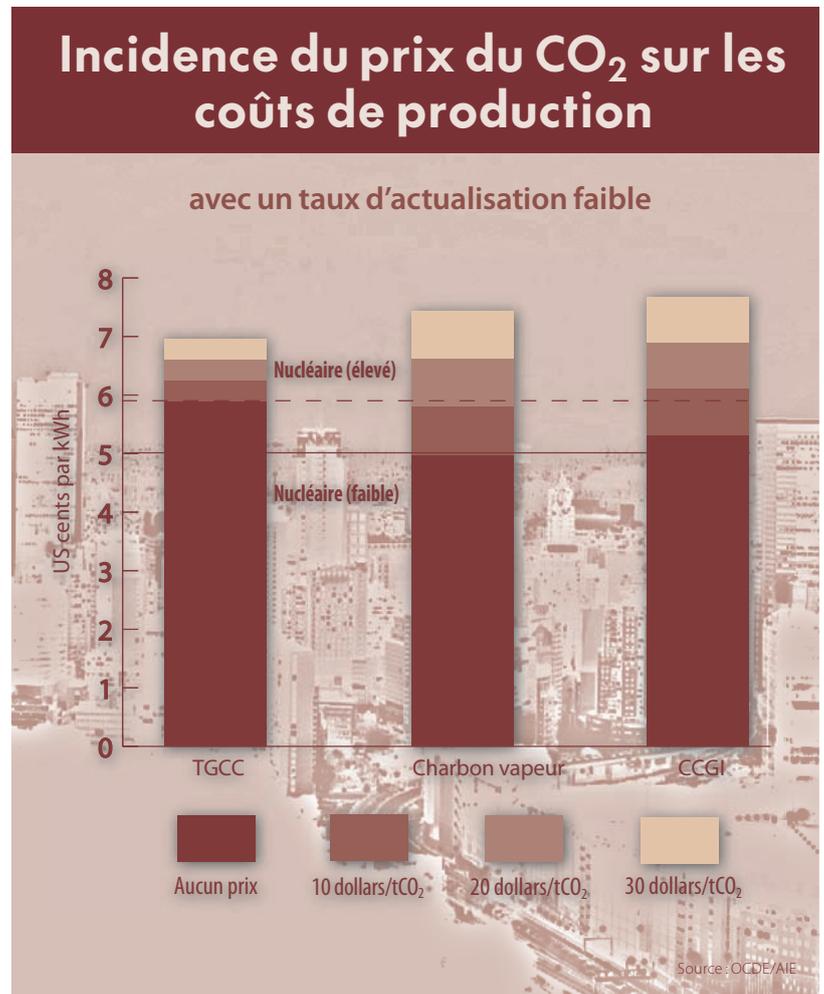
Les centrales nucléaires ont, entre la planification, l'autorisation et la construction, de longs délais de réalisation. Les pays qui possèdent l'infrastructure peuvent escompter, entre la décision politique et l'exploitation commerciale, un délai de 7 à 15 ans. Une centrale nucléaire est bien plus longue à construire qu'une centrale TGCC (deux à trois ans), qu'une ferme éolienne (un à deux ans) ou, dans un moindre mesure, qu'une centrale à charbon (quatre ans).

Les délais de construction de centrales nucléaires sont longs dans plusieurs pays, notamment aux États-Unis et au Royaume-Uni. Au

Japon, ce délai est inférieur à quatre ans. En Chine et en République de Corée, certaines centrales nucléaires ont été livrées en avance.

Le coût du combustible nucléaire se décompose en coûts initiaux et terminaux. Les coûts initiaux sont celui de l'uranium (environ 25% du coût total), de sa conversion (5%), de son enrichissement en réacteur à eau ordinaire (30%) et de son montage en assemblages combustibles (15%). Les coûts terminaux (environ 25% du coût total) comprennent l'évacuation ou le retraitement, puis le recyclage des matières fissiles. Le coût de l'évacuation, actuellement assumé par les compagnies, comprend le coût du stockage sur site et la commission d'évacuation finale perçue dans certains pays. Ces coûts ne forment qu'un faible pourcentage du coût de production total.

Le coût du déclassement d'une centrale est de 200 à 500 dollars/kW pour les REP occidentaux (en dollars de 2001), de 330 dollars pour les VVER russes, de 300 à 550 dollars pour les REB et de 270 à 430 dollars pour les CANDU canadiens, atteignant jusqu'à 2 600 dollars pour certains réacteurs Magnox refroidis par gaz (Royaume-Uni). Le coût de déclassement, pour les centrales actuelles, représente 9 à 15% du coût d'investissement initial ; une fois actualisé, cependant, il n'en représente qu'un faible pourcentage. Globalement, le déclassement ne représente



qu'une faible partie du coût total de production. Aux États-Unis, pour financer le déclassement, les compagnies d'électricité prélèvent 0,1 à 0,2 cent par kWh.

Incidences générales

L'analyse ci-dessus montre que les nouvelles centrales nucléaires peuvent produire de l'électricité à des prix compétitifs si les prix du gaz et du charbon sont suffisamment élevés et si les risques de construction et d'exploitation du nucléaire sont bien gérés par le vendeur, l'exploitant et/ou l'autorité de tutelle (marchés réglementés), maintenant le coût d'investissement ou le taux d'actualisation suffisam-

ment bas. L'électricité d'origine nucléaire coûte, avec un taux d'actualisation faible, de 4,9 à 5,7 cents par kWh, ce qui fait de cette technique un moyen potentiellement rentable de réduire les émissions de CO₂, de diversifier les sources d'énergie et de réduire la dépendance vis-à-vis du gaz importé.

L'économie n'est pas le seul facteur. Pour faciliter l'investissement dans le nucléaire, il faut aussi résoudre d'autres problèmes. La réglementation qui régit l'obtention d'une autorisation de construction et d'exploitation d'une centrale nucléaire joue un rôle déterminant. Il faut limiter l'incertitude et le coût de la procédure de choix du site et d'autorisation. Plusieurs pays qui débattent actuellement du rôle du nucléaire n'ont pas construit de centrale depuis longtemps. Les États-Unis ont entrepris de réexaminer et de rationaliser leur réglementation. Ils proposent, en outre, des incitations économiques pour la construction de nouvelles centrales. Le Royaume-Uni, également, a annoncé son intention de rationaliser sa réglementation.

La sûreté, l'évacuation des déchets et le risque de prolifération sont autant de points qui conditionnent l'acceptation du public et qu'il faut résoudre de manière convaincante. Dans une économie libérale, les investisseurs qui assument le coût du déclassement et des déchets provenant des nouvelles centrales doivent pouvoir évaluer les mécanismes mis en place pour gérer ces coûts. Une coopération internationale (partage, par exemple, de structures d'évacuation des déchets) pourra aider. On ne pourra, enfin, atténuer les craintes de prolifération que suscitant les activités nucléaires civiles qu'en garantissant une pleine participation et en démontrant que les conventions internationales relatives à l'utilisation de l'énergie nucléaire sont respectées.

Les gouvernements déterminés à accroître la sécurité énergétique, à réduire les émissions de carbone et à atténuer la pression liée au prix des combustibles fossiles peuvent choisir de contribuer à lever les obstacles qui s'opposent au nucléaire, de faciliter l'important investissement initial que requiert la construction de centrales nucléaires – 2 à 3,5 milliards de dollars l'unité – et d'ouvrir la voie à la conception d'une nouvelle génération de réacteurs. Cependant, même si, depuis quelque temps, ces objectifs se précisent et l'économie joue en faveur du nucléaire, les mesures concrètes ne sont pas encore légion.

Fatih Birol (weo@iea.org) est économiste en chef à l'Agence internationale de l'énergie de l'Organisation de coopération et de développement économiques (www.iea.org) (Paris).

