

Risques et avantages de l'énergie nucléaire

S. Gordelier*

Demande d'énergie, hausse des prix, sécurité d'approvisionnement, changement climatique... autant de problèmes majeurs que doivent résoudre les responsables des politiques énergétiques aujourd'hui. Pour leur fournir des informations fiables sur lesquelles fonder leurs décisions, l'AEN vient de publier une étude consacrée aux risques et avantages de l'énergie nucléaire. Cet article est largement inspiré de l'étude.

Demande d'énergie et efficacité énergétique

La demande mondiale d'énergie continue son ascension apparemment inexorable. D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE)¹, la demande a plus que doublé entre 1970 et 2005, passant de près de 5 500 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) à 11 200 Mtep. Avec les politiques gouvernementales actuelles, cette demande continuera de croître, toujours d'après l'AIE, pour atteindre 17 400 Mtep en 2030, soit une nouvelle progression de 55 % par rapport aux niveaux de 2005 et plus de trois fois ceux de 1970. En valeur absolue, c'est le charbon qui devrait connaître le plus fort essor.

* M. Stan Gordelier (stan.gordelier@oecd.org) est Chef de la Division du développement de l'énergie nucléaire de l'AEN.

La demande d'électricité continue de progresser encore plus vite que la demande d'énergie avec le développement économique. L'AIE prévoit qu'elle aura augmenté de 100 % d'ici 2030¹ et qu'en 2050, elle aura atteint 260 % de sa valeur de 2005².

L'efficacité énergétique est donc importante et vaut la peine que l'on fasse des efforts pour l'améliorer. On va souvent jusqu'à dire que ce serait la solution au problème. Or, à moins d'être convaincu, et de pouvoir le prouver, que la demande mondiale d'énergie plafonnera, l'efficacité énergétique, aussi utile soit-elle, permettra, au mieux, de gagner du temps pour trouver une véritable solution qui sera très certainement technologique.

Supposons par exemple que l'on parvienne du jour au lendemain à économiser 10 % de l'énergie consommée. L'offre totale d'énergie primaire croît à un rythme voisin de 1,9 % par an. En moins de six ans, on sera ramené au même niveau. Soyons plus ambitieux et améliorons l'efficacité énergétique de 20 %. Il faudra alors moins de 12 ans pour être ramené au même niveau. Cela ne veut pas dire qu'il faille abandonner l'idée d'améliorer l'efficacité énergétique, mais plutôt que le temps ainsi gagné doit être exploité pour accomplir les progrès technologiques qui apporteront les véritables réponses.

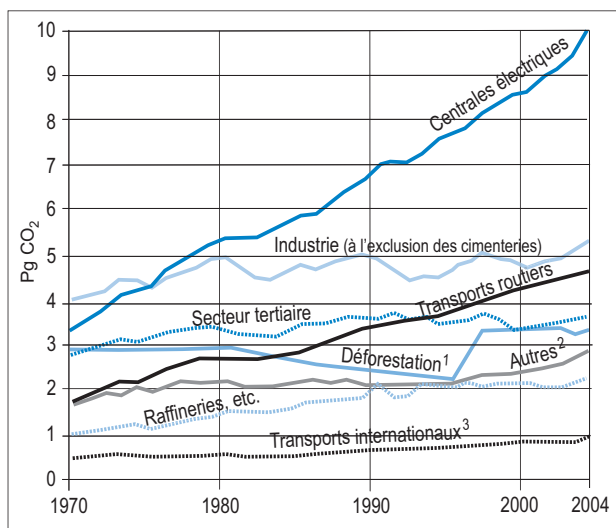
Émissions de gaz à effet de serre

S'agissant des émissions de CO₂, si l'intensité en carbone de la production totale d'énergie primaire s'est légèrement améliorée et si les émissions par unité du PIB ont décliné un peu plus, ces émissions suivent de près l'évolution démographique, le PIB par habitant et l'offre totale d'énergie primaire. La figure 1 montre les émissions de CO₂ de diverses formes de consommation d'énergie. Dans le

secteur énergétique, il est clair que les centrales électriques sont les principaux responsables de la croissance des émissions. Elles consomment deux fois plus d'énergie que le secteur qui les suit immédiatement, et leur consommation augmente beaucoup plus vite que celle des autres secteurs. Les transports routiers, qui sont au centre de l'attention des médias et des débats politiques, consomment moitié moins. Leur progression, bien que la deuxième par sa rapidité, est aussi plus lente. Les transports internationaux, et notamment aéronautiques, également montrés du doigt, seraient en réalité l'un des secteurs les moins préoccupants à l'échelle mondiale.

On retiendra donc que les centrales électriques sont **LE** problème principal. Il ne s'agit pas pour autant d'ignorer les autres secteurs, mais il est clair que l'on ne peut espérer réduire les émissions de manière significative si l'on ne règle pas le problème des émissions des centrales. L'énergie nucléaire

Figure 1. Origine des émissions mondiales de CO₂, 1974-2004 (émissions directes seulement, par secteur)



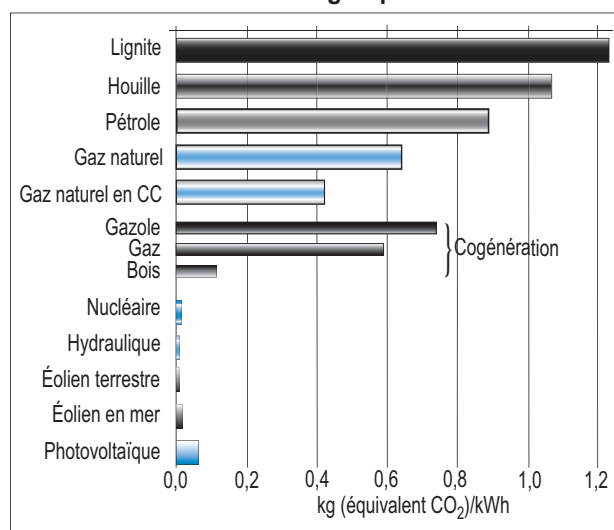
1. Y compris le bois de chauffage dont la contribution nette est de 10 %. S'agissant de la combustion à grande échelle de la biomasse, les données moyennes sur la période 1997-2002 sont fondées sur les données recueillies par satellite dans la *Global Fire Emissions Database* (van der Werf et al, 2003). Inclut la décomposition et les feux de tourbe (Hooijer et al, 2006). Exclut les feux de combustibles fossiles.
2. Autres transports en surface nationaux, usages non énergétiques des combustibles, cimenteries et torchères dans la production de pétrole.
3. Y compris les transports aériens et maritimes.

Source : GIEC (2007), *Climate Change 2007 : Mitigation of Climate Change*, Working Group III Report, Cambridge University Press, Cambridge.

peut assurément jouer un rôle, mais elle demeure aujourd'hui un acteur de second plan puisqu'elle ne représente que 16 % (25 % dans les économies plus développées de l'OCDE) de la production d'électricité et seulement 6 % de l'offre totale d'énergie primaire. La polémique qu'elle suscite dans les milieux politiques et le public a freiné sa croissance.

On trouvera à la figure 2 les émissions sur le cycle de vie des centrales des divers modes de production d'électricité, mesurées en kilogrammes normalisés d'équivalents CO₂ compte tenu du potentiel de réchauffement climatique propre à chaque gaz. Toutes les données présentées correspondent aux pays membres de l'Union pour la coordination du transport de l'électricité (UCTE)* en 2000. Les émissions de gaz à effet de serre du nucléaire et

Figure 2. Émissions de gaz à effet de serre de plusieurs filières énergétiques



Source : AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

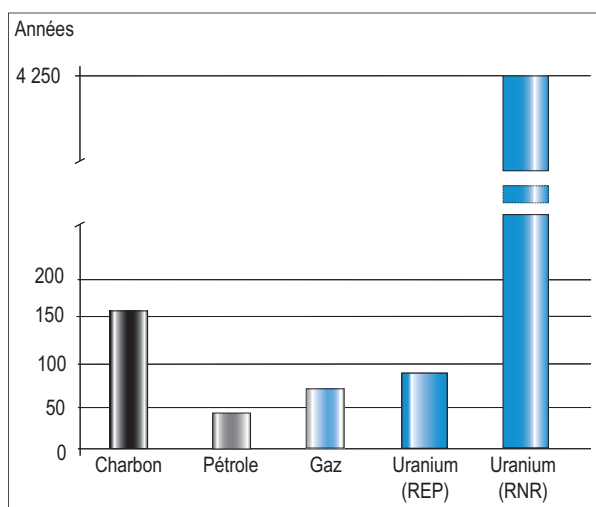
*En 2000 les pays suivants étaient représentés à l'Union pour la coordination du transport de l'électricité (UCTE) : Allemagne, Autriche, Belgique, Bosnie-Herzégovine, Croatie, Danemark (membre associé), Espagne, Ex-République yougoslave de Macédoine, France, Grèce, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Serbie et Monténégro, Slovaquie et Suisse. (La Hongrie, la Pologne, la République slovaque et la République tchèque ont adhéré officiellement à l'UCTE en 2001.)

des énergies renouvelables sont inférieures d'un à deux ordres de grandeur aux émissions des chaînes combustibles fossiles. Les moyennes pour les pays de l'UCTE avoisinent 5 g d'équivalent CO₂/kWh pour l'énergie hydraulique, 8 g pour le nucléaire, 11 g pour l'éolien terrestre, 14 g pour l'éolien en mer, 60 g pour l'énergie photovoltaïque et 100 g pour la cogénération au bois.

Sécurité d'approvisionnement en uranium

D'après certains, les minerais à forte teneur en uranium viendront bientôt à s'épuiser et l'avantage du nucléaire en termes d'émissions sur la totalité du cycle de vie s'évanouira lorsque l'extraction de l'uranium nécessitera de consommer davantage d'énergie. Les statistiques officielles démontrent le contraire. D'après la publication intitulée *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*³, le rapport entre les réserves et la production est nettement plus élevé pour l'uranium que pour le pétrole ou le gaz (voir figure 3). L'industrie ne consacre pas beaucoup de capitaux à prospecter très longtemps à l'avance, quelle que soit la source d'énergie considérée.

Figure 3. Durée de vie des ressources en combustibles* (années)



* Ressources identifiées, c'est-à-dire les ressources dont on sait qu'elles sont exploitables à un prix raisonnable.

Source : D'après des données publiées dans AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

Tableau 1. Durée de vie des ressources en uranium (années)

Technologie	Ressources identifiées** ~4,7MtU	Total** res- sources classiques ~14,8 MtU	Total ressources classiques plus phosphates ~36,8 MtU
REP en cycle ouvert	85	270	675
Introduction progressive des RNR*	4 250	13 500	33 750

* On fait l'hypothèse que l'introduction progressive des réacteurs surgénérateurs rapides multiplie par 50 la quantité d'électricité produite avec 1 tonne d'uranium.

** Le lecteur trouvera dans la référence 3 citée à la fin de cet article les définitions de ressources identifiées et de ressources classiques totales.

De plus, si le nucléaire devait se développer de manière importante, le tableau 1 montre que l'introduction progressive des réacteurs surgénérateurs rapides, parce qu'elle multiplierait par 50 fois, voire plus, la quantité d'énergie tirée d'une quantité donnée d'uranium, augmenterait considérablement les quantités d'énergie disponibles. Étant donné que l'énergie nucléaire contribue actuellement à 6 % de l'offre totale d'énergie primaire, on peut facilement démontrer que les ressources en uranium dont on connaît l'existence dans des gisements classiques ou liés à des phosphates permettraient de produire de l'énergie représentant 2000 ans de l'offre totale d'énergie primaire actuelle et cela sans pratiquement produire de CO₂.

Le prix spot de l'uranium est passé d'un plancher historique au cours des vingt dernières années à de tels sommets que l'on envisage aujourd'hui d'extraire à échelle commerciale les infimes quantités d'uranium contenues dans certaines cendres de charbons. Si l'on devait utiliser cet uranium dans des réacteurs rapides, il produirait davantage d'énergie que le charbon dont il a été extrait. Il est également possible de mettre en place le cycle au thorium qui n'a jamais encore été développé à l'échelle commerciale. Or, le thorium est trois fois plus abondant dans la croûte terrestre que l'uranium. En résumé, celui qui choisit cette énergie, pour ainsi dire exempte de CO₂, n'a pas à redouter la pénurie.

Les centrales nucléaires - une opportunité et un risque

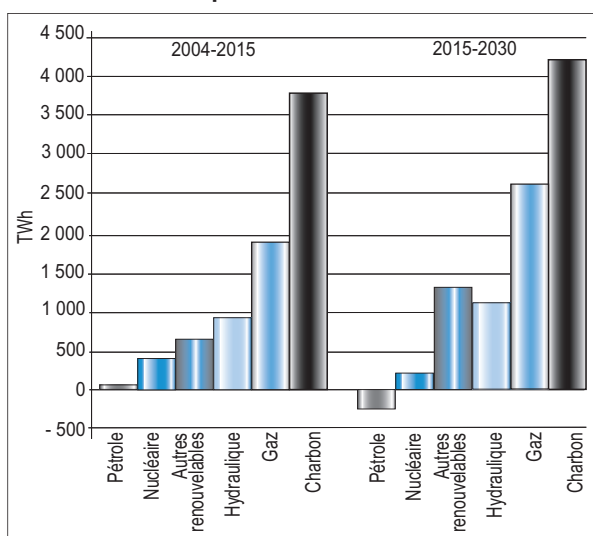
D'après le *World Energy Outlook*¹, il faudra investir environ 5 000 milliards d'USD dans les centrales électriques d'ici 2030. Étant donné que ces investissements ont des durées de vie économique moyennes de 40 ans environ, leur renouvellement est très lent. Nous avons, par conséquent, une occasion unique d'investir pour l'avenir dans des centrales produisant peu d'émissions. Choisir, à l'inverse, de construire des centrales thermiques classiques revient à condamner des régions entières à des émissions jusqu'en 2050 voire plus (les techniques de captation et de stockage du carbone pourraient éventuellement atténuer le problème à condition que la technologie soit au point et démontrée à l'échelle commerciale et que les centrales thermiques classiques aient été construites pour pouvoir intégrer ultérieurement ces techniques). La figure 4 correspondant aux politiques publiques actuelles montre que la grande majorité des nouvelles centrales brûleront des combustibles fossiles et que la demande supplémentaire d'électricité devrait être satisfaite en majeure partie par des centrales à charbon qui resteront les principaux producteurs d'électricité jusqu'en 2030. Dans cette

situation, nous ne sommes pas près d'atteindre les objectifs visés pour parer au changement climatique. Un changement rapide des politiques publiques sera nécessaire.

Étude des risques et avantages

La publication récente de l'AEN intitulée *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*⁴ aborde les aspects quantitatifs et qualitatifs de ces risques et avantages du point de vue économique, social et environnemental. Le lecteur y trouvera de nombreuses comparaisons entre le nucléaire et les autres modes de production de l'électricité ainsi qu'une analyse des techniques permettant de pondérer un large éventail de facteurs dans le cadre d'une évaluation globale. Quelques exemples sont présentés ci-dessous. Les avantages du nucléaire en termes d'émissions de gaz à effet de serre ont déjà été évoqués ci-dessus. Sur le plan économique, le nucléaire est concurrentiel dans de nombreux pays où les rejets de carbone ne sont pas frappés d'une taxe et donc encore davantage là où la taxe est prélevée. La publication de l'AEN/AIE intitulée *Coûts prévisionnels de production de l'électricité*⁵ contient une description complète des questions de coûts et des comparaisons entre sources d'énergie.

Figure 4. Production mondiale d'électricité par combustible



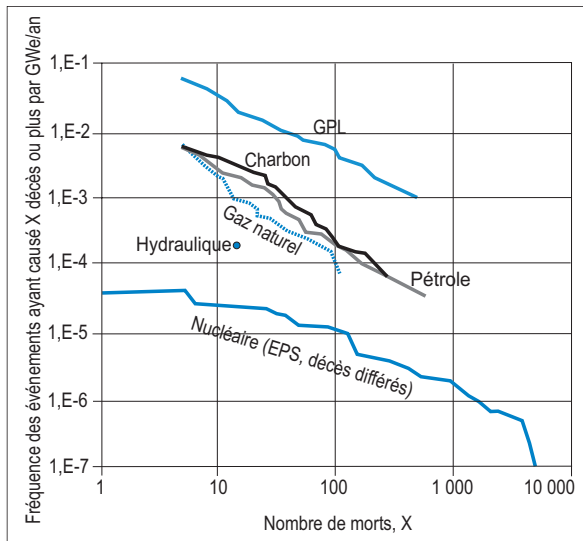
Source : AIE (2006), *World Energy Outlook, The Reference Scenario*, OCDE/AIE, Paris.

Risques d'accidents

La sûreté des centrales nucléaires est une préoccupation permanente du public et des hommes politiques. L'ENSAD, à savoir l'*Energy-related Severe Accident Database* créée par l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, contient des données sur plus de 18 400 accidents survenus principalement entre 1969 et 2000, dont 35 % ont un rapport avec l'énergie et 3 117 sont classés parmi les accidents graves (ayant provoqués au moins 5 décès immédiats). La figure 5 montre les courbes fréquences/conséquences tirées de ces données dans les pays de l'OCDE. Les données pour le GPL, le charbon, le pétrole et le gaz naturel correspondent à des accidents réels. Au cours de cette période, les pays de l'OCDE n'ont enregistré qu'un seul accident grave dans l'hydroélectrique qui a provoqué 14 décès immédiats. Aucun accident nucléaire ne figure parmi les accidents graves dans les pays de l'OCDE.

Pour les besoins de la comparaison, la figure 5 montre également l'étude probabiliste de sûreté (EPS) d'une centrale nucléaire suisse. Il convient de souligner que le résultat n'est pas directement comparable puisqu'il concerne les morts tardives (par opposition aux morts immédiates des autres

Figure 5. Comparaison des courbes fréquences/conséquences de filières énergétiques complètes dans les pays de l'OCDE sur la période 1969-2000



Source : AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

statistiques) que provoqueraient des rejets théoriques éventuels (non pas des rejets ou accidents réels). Cette figure permet néanmoins de conclure que l'énergie nucléaire est nettement plus sûre, par rapport aux autres sources d'énergie, que ne le penserait le grand public. Dans les pays de l'OCDE, l'hydraulique et le nucléaire surclassent nettement les autres sources d'énergie de ce point de vue.

Cette courbe pourrait prêter à plusieurs critiques. En choisissant les pays de l'OCDE, elle oublie l'accident de Tchernobyl. Toutefois, la centrale de Tchernobyl appartient à une filière qui n'existe pas dans les pays de l'OCDE et, aussi grave fut-il, l'accident n'a provoqué que 40 morts immédiates. On pourrait également reprocher à cette courbe de laisser de côté les estimations des morts tardives imputables à l'accident de Tchernobyl, mais il faudrait alors inclure aussi les morts tardives dues à l'exploitation et aux accidents des centrales thermiques classiques, ce qui placerait les technologies fondées sur des combustibles fossiles en mauvaise position (voir figure 6). Les accidents les plus graves qui se soient produits dans le secteur énergétique hors de la zone OCDE se rencontrent dans l'industrie pétrolière (3000 morts aux Philippines en 1987, 2700 morts en Afghanistan en 1982), dans l'hydro-électrique (1000 morts en Inde en 1980) et

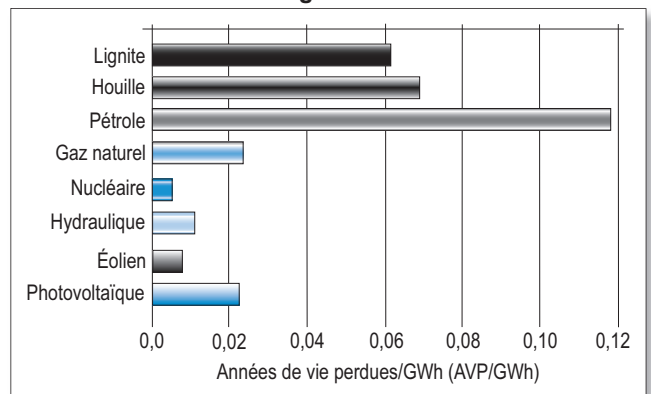
lors du transport de GPL (600 morts en Russie en 1989).

Pourquoi donc la sûreté de l'énergie nucléaire semble-t-elle susciter des craintes inhabituelles dans le subconscient public ? On pourrait évoquer l'assimilation avec les armes nucléaires, la crainte d'accidents de très faible probabilité mais d'une ampleur exceptionnelle, le fait que les morts tardives soient associées au cancer, une maladie à juste titre très redoutée (avec en plus le fait que le cancer peut tous nous toucher tandis que les accidents dans les secteurs du pétrole et du gaz ne concernent généralement que ceux qui y travaillent, sauf s'il s'agit d'une catastrophe) ainsi que la réputation faite au nucléaire à cause de ces particularités. Nul n'a oublié Tchernobyl ni même Three Mile Island (aucun décès immédiat). Qui se souvient (ou a même jamais entendu parlé) des accidents survenus dans les secteurs du pétrole, de l'hydroélectrique et du GPL que nous avons énumérés ci-dessus et qui se sont produits à peu près au même moment, faisant directement des milliers de victimes ?

Répercussions sanitaires de l'exploitation normale

Les répercussions de l'exploitation normale des centrales sur la vie humaine peuvent être représentées par la mortalité que l'on définit par la réduction de l'espérance de vie calculée en années de vie perdues (AVP). La figure 6 montre, à titre d'exemple, les résultats d'une analyse de la mortalité

Figure 6. Mortalité liée à l'exploitation normale d'installations de diverses filières énergétiques en Allemagne en 2000



Source : AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

due aux émissions des principaux polluants associés aux systèmes énergétiques en Allemagne. L'énergie nucléaire, l'éolien et l'hydraulique affichent des taux de mortalité très faibles. La mortalité correspondant à l'exploitation normale des centrales au gaz naturel et aux centrales photovoltaïques est légèrement supérieure, et les autres systèmes exploitant des énergies fossiles présentent une mortalité nettement supérieure. On notera que, quelle que soit la filière énergétique, la mortalité due aux accidents est pour ainsi dire négligeable par rapport aux effets correspondants de l'exploitation normale, comme nous avons pu le voir ci-dessus. Un fait qui semble, une fois de plus, bien mal connu du public et des décideurs.

Aides à la décision

Deux techniques d'aide à la décision sont analysées dans l'ouvrage intitulé *Risques et avantages de l'énergie nucléaire : l'internationalisation des coûts externes et l'analyse multicritères*. On dit qu'il y a externalité lorsqu'un effet négatif ou positif est produit par une activité économique et imposé à des tiers sans faire l'objet d'une transaction sur un marché⁶. Si l'on pouvait dresser une liste exhaustive des externalités et si leur valeur pouvait être estimée de manière précise et fiable, l'internalisation des coûts externes permettrait de connaître les meilleurs choix. Malheureusement, ces deux conditions sont rarement remplies. La technique peut toutefois être intéressante si elle permet de prendre en compte des éléments essentiels raisonnablement fiables.

L'analyse multicritères s'emploie isolément ou en complément d'autres techniques. Elle offre une meilleure représentation des critères sociaux qui sont plus difficiles à définir, sélectionner et mesurer, et donc les plus discutables. La publication analyse plusieurs exemples correspondant à trois catégories de facteurs (évalués et pondérés les uns par rapport aux autres) : économiques, environnementaux et sociaux. En général, il faut avoir attribué des pondérations très élevées aux facteurs sociaux (aversion pour des accidents hypothétiques graves) pour que l'analyse élimine l'énergie nucléaire du groupe des techniques de production les plus intéressantes. Bon nombre de ces considérations sociales restent néanmoins controversées et, suivant la perspective socio-politique adoptée, peuvent prendre une importance cruciale. Sinon, avec des pondérations équilibrées, l'énergie nucléaire se classe régulièrement parmi les meilleures techniques de production disponibles.

Conclusions

Les défis énergétiques que la planète doit relever sont critiques. Les centrales électriques sont responsables de la part la plus importante de la production de gaz à effet de serre, et leur contribution est celle qui augmente le plus vite. Elles en produisent deux fois plus que le secteur qui les suit immédiatement.

Étant donné l'envolée de la demande d'énergie dans les pays en développement et la nécessité de remplacer les centrales anciennes dans les économies développées, on aura besoin d'investir environ 5 000 milliards d'USD au cours des vingt années qui viennent. Ce serait là une excellente occasion d'investir dans une capacité de production quasi-exempte de gaz à effet de serre. Les gouvernements et l'industrie doivent agir sans tarder pour ne pas manquer cette occasion.

L'électronucléaire ne produit pour ainsi dire pas de CO₂ et, en principe du moins, offre d'énormes quantités d'énergie aux pays qui décident de l'exploiter. Les ressources en uranium connues représentent une énergie potentielle équivalent à 2000 ans au niveau actuel de l'offre totale d'énergie primaire dans le monde.

Toutefois, l'énergie nucléaire reste un sujet de polémique dans de nombreux pays. L'OCDE/AEN a publié cette étude consacrée aux *Risques et avantages de l'énergie nucléaire* pour offrir aux décideurs une information fiable qui puisse nourrir les débats publics. ■

Références

1. AIE (2006), *World Energy Outlook*, OCDE/AIE, Paris.
2. AIE (2006), *Energy Technology Perspectives*, OCDE/AIE, Paris.
3. AEN (2006), *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris.
4. AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.
5. AEN et AIE (2005), *Coûts prévisionnels de production de l'électricité – Mise à jour 2005*, OCDE, Paris.
6. D. Pearce (2002), "Energy Policy and Externalities : An Overview", tiré des actes de l'Atelier de l'AIE/AEN consacré aux *Externalities and Energy Policy : The Life Cycle Analysis Approach*, OCDE, Paris.