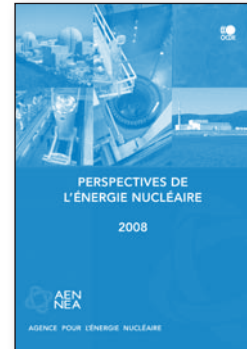


# Perspectives de l'énergie nucléaire 2008

Pour marquer son 50<sup>e</sup> anniversaire, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire a publié la première édition des *Perspectives de l'énergie nucléaire*. Cette publication s'inscrit dans une nouvelle dynamique marquée par un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire à un moment où la sécurité énergétique, le changement climatique et les coûts de l'énergie sont devenus des priorités des politiques énergétiques à court et à long terme.



À partir des données et statistiques les plus récentes, les Perspectives présentent des projections jusqu'à l'horizon 2050 afin d'examiner des scénarios de croissance et leurs implications possibles sur l'exploitation future de l'énergie nucléaire. Elles offrent aussi des analyses inédites et des recommandations sur les défis potentiels de demain.

Ces Perspectives abordent les sujets suivants :

- la situation actuelle du nucléaire et ses évolutions prévues ;
- ses répercussions sur l'environnement ;
- les ressources en uranium et la sécurité d'approvisionnement ;
- les coûts, la sûreté et la réglementation ;
- la gestion des déchets radioactifs et le démantèlement ;
- la non-prolifération et la sécurité ;
- les régimes juridiques ;
- les infrastructures ;
- la participation du public ;
- les réacteurs et les cycles du combustible avancés.

La publication est disponible en anglais et en français et peut être achetée en ligne à [www.oecdbookshop.org](http://www.oecdbookshop.org). Une version japonaise sera bientôt disponible.

Les sommaires exécutifs des Perspectives peuvent être téléchargés gratuitement depuis le site internet de l'AEN ([www.nea.fr/neo](http://www.nea.fr/neo)) en allemand, en anglais, en chinois, en coréen, en espagnol, en français, en hongrois, en italien, en japonais et en russe.

Nous avons le plaisir d'offrir à nos lecteurs le Sommaire exécutif en français dans les pages qui suivent.

## **Perspectives de l'énergie nucléaire 2008**

ISBN 978-92-64-05416-5. 500 pages. Prix : € 105, US\$ 161, £ 81, ¥ 16 800.

# Principaux messages

## Satisfaire la demande d'énergie mondiale en maîtrisant ses répercussions environnementales, sociales et politiques

**De l'avis général, satisfaire les besoins énergétiques indispensables à la poursuite du progrès social et économique tout en maîtrisant les répercussions environnementales et sociopolitiques potentielles constitue un défi majeur du 21<sup>e</sup> siècle. D'ici 2050, la demande mondiale d'électricité devrait être multipliée par 2,5 environ.**

L'énergie, et en particulier l'électricité, est indispensable au développement économique et social et à la qualité de la vie, mais tous s'accordent à dire que les comportements énergétiques du siècle dernier ne sont plus viables. La planète est confrontée aux menaces que fait peser sur l'environnement le changement climatique provoqué par les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et aux menaces sociopolitiques que peuvent entraîner la hausse des prix de l'énergie et l'éventuelle pénurie de sources d'énergie.

- La production d'électricité, qui est responsable d'environ 27% des émissions anthropiques mondiales de CO<sub>2</sub>, est de loin la source de gaz à effet de serre la plus importante et, qui plus est, celle qui augmente le plus vite.
- La sécurité d'approvisionnement est devenue une préoccupation majeure, notamment des pays

aux ressources limitées en combustibles fossiles qui sont, par conséquent, dépendants de leurs importations d'énergie.

Dans les scénarios du « statu quo », la vigoureuse croissance économique de nombreux pays en développement, se traduisant par des modes de vie plus énergivores, et une croissance démographique mondiale de 50 %, concentrée dans les régions en développement, sont les moteurs de l'augmentation de la demande d'énergie. Pour répondre à cette demande, la consommation de combustibles fossiles poursuivra inexorablement sa progression à moins que les pouvoirs publics ne changent de politiques énergétiques à l'échelle mondiale. L'énergie nucléaire peut apporter une contribution importante à la résolution de ces problèmes.

## Contribution actuelle et probable de l'énergie nucléaire à l'approvisionnement en énergie de la planète

**En 2006, les centrales nucléaires ont produit 2,6 milliards de MWh, soit 16 % de l'électricité de la planète et 23 % de l'électricité des pays de l'OCDE.**

- En juin 2008, 439 réacteurs nucléaires étaient en service dans 30 pays et une économie, représentant une puissance installée totale de 372 GWe.
- La France, le Japon et les États-Unis détiennent 57 % de la puissance nucléaire installée dans le monde. Seize pays produisaient, en 2007, un quart de leur électricité dans des centrales nucléaires.

En juin 2008, 41 réacteurs étaient en construction dans 14 pays et une économie. Il est courant dans les pays d'Asie de parvenir à des durées de construction de 62 mois, en moyenne. Sur les 18 tranches connectées au réseau entre décembre 2001 et mai 2007, trois ont été construites en 48 mois ou moins.

Les plans actuels et les déclarations d'intention d'autorités nationales indiquent que les pays qui auraient la plus importante puissance nucléaire installée en 2020 seraient les États-Unis, la France, le Japon, la Fédération de Russie, la Chine et la Corée. C'est en Chine et aux États-Unis que les plus fortes augmentations de la puissance installée sont prévues.

LAEN a effectué des projections de la puissance nucléaire mondiale jusqu'en 2050 à partir de scénarios haut et bas. Le résultat est le suivant :

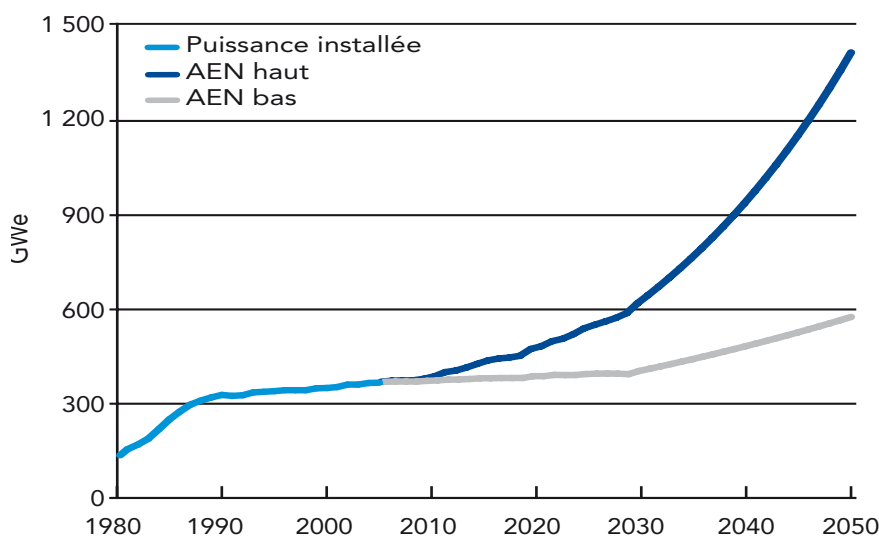
- D'ici 2050, la puissance nucléaire installée dans le monde devrait augmenter d'un facteur situé entre 1,5 et 3,8.

- Dans le scénario haut, la contribution du nucléaire à la production mondiale d'électricité passerait de 16 % aujourd'hui à 22 % en 2050.
- Dans les deux scénarios, ce sont les pays de l'OCDE principalement qui produiront de l'électricité nucléaire.
- Certains pays jusqu'alors dépourvus de centrales nucléaires ont l'intention de rejoindre les pays dotés de parcs électronucléaires, mais ils

ne devraient au mieux augmenter que de 5 % environ la puissance nucléaire installée mondiale d'ici 2020.

Ces projections concordent globalement avec celles d'autres organisations. D'après l'expérience passée, il sera possible de construire des centrales nucléaires à un rythme suffisant largement à satisfaire la demande prévue dans le scénario haut de l'AEN à l'horizon 2050.

Projections de la capacité nucléaire – scénarios haut et bas de l'AEN



## Contribution de l'énergie nucléaire à la réduction des effets négatifs de la croissance de la demande d'énergie

**L'énergie nucléaire pourrait contribuer de manière significative à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, à la sécurité énergétique et à la réduction des effets sanitaires graves de la combustion des combustibles fossiles.**

### Changement climatique

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies a conclu qu'il faut réduire de moitié les émissions de CO<sub>2</sub>, y compris celles imputables à la production d'électricité, si l'on veut pouvoir maintenir à un niveau tolérable les conséquences du changement climatique.

- L'analyse de l'intégralité du cycle de vie montre que l'énergie nucléaire ne produit pratiquement pas de carbone.
- Seule l'alliance de différentes techniques de production permettra d'atteindre cet objectif ambitieux, mais l'énergie nucléaire est la seule technol-

ogie qui ait prouvé qu'elle était capable de réduire les émissions de carbone à l'échelle voulue.

- L'énergie nucléaire pourrait prendre une part croissante à la production d'électricité, mais aussi de chaleur, pratiquement sans émettre de carbone. Les études et recherches entreprises dans le monde sur la production dans des centrales nucléaires d'hydrogène destiné au secteur des transports peuvent déboucher sur des applications importantes.

Les coûts externes (à savoir ceux qui n'entrent pas dans les prix, y compris les conséquences du changement climatique) sont pour la plupart déjà internalisés dans le cas de l'énergie nucléaire, tandis que dans celui des combustibles fossiles, les coûts

externes sont presque aussi importants que les coûts directs.

### **Sécurité énergétique**

**Plus que le pétrole et le gaz, l'énergie nucléaire est en mesure de garantir la sécurité d'approvisionnement car son combustible, l'uranium, provient de sources diverses et, de plus, les principaux fournisseurs opèrent dans des pays politiquement stables.**

- Il y a suffisamment de ressources en uranium identifiées pour soutenir le développement de la puissance nucléaire installée dans le monde sans faire appel au retraitement, jusqu'en 2050 au moins. Les ressources supplémentaires que laissent entrevoir les données géologiques locales devraient garantir un approvisionnement en uranium de plusieurs centaines d'années.
- Si les programmes nucléaires devaient se développer dans de fortes proportions au niveau mondial, la base de ressources identifiées aujourd'hui permettrait d'assurer l'approvisionnement des réacteurs pendant plusieurs milliers d'années. Toutefois, il faudrait pour ce faire exploiter des surgénérateurs rapides, une technologie au point, mais qui n'est pas encore exploitée industriellement.

- En raison de la forte densité énergétique de l'uranium (1 tonne d'uranium produit autant d'énergie que 10 000 à 16 000 tonnes de pétrole avec les techniques actuelles), son transport est moins vulnérable que celui des combustibles fossiles et il est plus facile de constituer d'importantes réserves énergétiques d'uranium que de combustibles fossiles.

### **Effets sanitaires**

**Le recours à l'énergie nucléaire pourrait réduire les risques sanitaires liés à l'utilisation des combustibles fossiles.**

- Les effets sanitaires des émissions des centrales nucléaires sont négligeables comparés à ceux résultant de l'utilisation de combustibles fossiles.
- Les décès dus aux effets sanitaires des émissions produites lors de la combustion des combustibles fossiles sont sans commune mesure avec ceux qui résultent des accidents liés à toutes les sources d'énergie.
- La comparaison de la fréquence et des conséquences d'accidents réels sur toute la chaîne énergétique montre que, contrairement à la croyance populaire, l'énergie nucléaire présente un risque d'accident nettement inférieur à celui des sources d'énergies fossiles.

## **Affronter les défis de la croissance de la production d'énergie nucléaire**

**L'énergie nucléaire permettrait de satisfaire une grande partie de la hausse prévue de la demande d'électricité avec des effets environnementaux, politiques et économiques potentiels bien moindres que ceux associés aux combustibles fossiles. Toutefois, une fraction importante de l'opinion publique juge que les risques de l'énergie nucléaire sont supérieurs à ses avantages. L'industrie nucléaire et les gouvernements qui souhaitent recourir à cette énergie doivent gérer les problèmes réels ou perçus que posent la sûreté, le stockage des déchets et le démantèlement, la non-prolifération et la sécurité ainsi que les coûts.**

### **Sûreté**

**La sûreté nucléaire est un enjeu à l'échelle planétaire : un accident grave dans un pays peut avoir un impact significatif sur les pays voisins. L'industrie a placé la sûreté et la protection de l'environnement au premier rang de ses priorités et doit les y maintenir. Un contrôle réglementaire efficace restera donc un impératif primordial.**

- Les niveaux de sûreté atteints dans les centrales et les autres installations nucléaires des pays membres de l'OCDE sont excellents, comme le montrent plusieurs indicateurs de sûreté. Ce palmarès

témoigne de la maturité de l'industrie et de la robustesse de son système réglementaire.

- Les performances de sûreté de l'industrie nucléaire n'ont cessé de progresser au cours des dernières décennies. Les nouveaux modèles de réacteurs sont dotés de systèmes passifs dont la particularité est de maintenir la centrale dans un état sûr, notamment lors d'un événement imprévu, sans nécessiter de commande active.
- Devant l'intérêt croissant manifesté pour la construction de centrales nucléaires et pour les

filières de nouvelle génération, la communauté internationale a lancé des initiatives afin d'améliorer l'efficacité et l'efficience de la réglementation.

- Il convient d'aider les pays inexpérimentés à mettre en place des pratiques industrielles, réglementaires et juridiques satisfaisantes s'ils décident de construire des centrales nucléaires.

### **Stockage définitif des déchets et démantèlement**

Les reports et échecs de certains grands programmes de stockage définitif de déchets de haute activité continuent de ternir fortement l'image de l'énergie nucléaire. Les gouvernements et l'industrie nucléaire doivent travailler ensemble pour mettre en service des installations sûres de stockage définitif.

- Comme aucun dépôt de combustible nucléaire usé et de déchets de haute activité issus du retraitement n'a encore été aménagé, la construction de ces installations est jugée par certains techniquement difficile, voire impossible.
- En réalité, le volume de déchets radioactifs produits est faible, les technologies pour les gérer existent et, de plus, il y a un consensus international sur la faisabilité technique et la sûreté du stockage en formation géologique des déchets de haute activité.
- Diverses installations nucléaires ont été démantelées sans problème, dont, aux États-Unis, plusieurs centrales d'une puissance supérieure à 100 MWe, aujourd'hui entièrement démontées.
- Les coûts de la gestion des déchets et du démantèlement des centrales nucléaires représentent 3 % seulement des coûts totaux de production de l'électricité nucléaire. Les mécanismes de financement de la gestion des déchets et du démantèlement sont en place.

### **Non-prolifération et sécurité**

La communauté nucléaire internationale doit se mobiliser pour éviter la dissémination des armes nucléaires par des États et l'usage délictueux des substances radioactives par des groupes terroristes ou des associations criminelles.

- Depuis une quarantaine d'années, le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires est le socle juridique et politique sur lequel repose le régime international qui a permis de limiter la dissémination des armes nucléaires.
- Les approches multilatérales du cycle du combustible nucléaire actuellement envisagées permettraient d'apporter à la communauté internationale la garantie que les technologies nucléaires présentant un risque de prolifération ne risquent pas de se propager.

- Les systèmes nucléaires avancés possèdent des caractéristiques techniques conçues pour en améliorer la résistance à la prolifération et la robustesse en cas de menaces de sabotage ou d'attentat terroriste.

### **Coûts**

Sur la base des coûts actualisés, la construction et l'exploitation des centrales nucléaires sont économiquement viables dans la plupart des situations. Toutefois, les gouvernements qui souhaiteraient encourager l'investissement dans des centrales nucléaires devront veiller à limiter les risques financiers liés à la procédure d'autorisation et à la planification ainsi que ceux que les financiers associent à la gestion des déchets radioactifs et au démantèlement.

- Une comparaison internationale des coûts actualisés de la production d'électricité dans des centrales nucléaires, au charbon et au gaz, effectuée en 2005, a montré que le nucléaire concurrence le charbon et le gaz, de façon plus ou moins nette en fonction des circonstances locales. Depuis, les prix du pétrole ont quadruplé (au mois de juin 2008), et ceux des autres énergies fossiles les ont suivis.
- Le coût de l'uranium ne représente qu'environ 5 % du coût total de la production d'électricité nucléaire.
- Le défi économique pour l'énergie nucléaire concerne le financement des investissements plutôt que le coût actualisé de production d'électricité.
- L'amélioration de la disponibilité, l'augmentation de la puissance des centrales et le renouvellement des autorisations ont permis, dans bien des cas, de tirer davantage de profit des investissements effectués à ce jour dans l'énergie nucléaire. En moyenne dans le monde, la disponibilité a progressé de 10 % ces 15 dernières années pour atteindre aujourd'hui 83 %. De nombreuses centrales ont vu leur puissance augmenter, parfois de 20 %. De plus, la durée de vie de nombreux réacteurs a été prolongée de 40 à 60 ans.

### **L'énergie nucléaire et la société**

Si l'énergie nucléaire se développe, il importera de plus en plus que s'instaure une relation régulière entre les décideurs, l'industrie nucléaire et la société, qui soit propice au développement des connaissances et à la participation du public.

- D'après les sondages, la moitié des citoyens de l'Union européenne sont convaincus que les risques de l'énergie nucléaire sont supérieurs à ses avantages.

- Toutefois, leur préoccupation concerne davantage certains aspects périphériques à l'énergie nucléaire (déchets radioactifs, terrorisme et prolifération) que le fonctionnement proprement dit des centrales nucléaires.
- L'adhésion à l'énergie nucléaire croît avec la connaissance que l'on en a mais la plupart des gens estiment mal la connaître.
- Les scientifiques et les organisations non gouvernementales (ONG) sont jugés les plus dignes de confiance pour assurer l'information du public.
- Si l'on veut faire accepter l'énergie nucléaire comme partie intégrante de la politique énergétique nationale, les mécanismes participatifs et les dispositions pour gagner la confiance du public devraient revêtir une importance croissante.

## Mise au point de la technologie

**La génération actuelle de réacteurs est capable d'excellentes performances. Ces réacteurs assureront l'essentiel de la croissance du nucléaire dans les 20 à 30 prochaines années. La coopération internationale engagée pour développer des concepts et cycles du combustible laisse entrevoir de nouvelles avancées.**

### Réacteurs avancés

Les futurs réacteurs à eau ordinaire, qui seront probablement les principales filières de réacteurs exploitées jusqu'au milieu du siècle, seront des réacteurs de génération III+, dotés de caractéristiques de sûreté améliorées et plus intéressants sur le plan économique. Il existe aujourd'hui quatre réacteurs de cette génération en exploitation ou en chantier.

- Les futurs réacteurs à haute température à caloporteur gaz qui devraient être exploitables à l'échelle industrielle autour de 2020 fonctionneront à des températures suffisamment élevées pour produire l'hydrogène utilisé comme carburant dans les transports, et pour d'autres applications de la chaleur de procédé.
- Les réacteurs de petite puissance conçus pour les pays en développement reposent sur des approches de sûreté intrinsèque et passive, particulièrement intéressantes pour des pays ayant une expérience limitée de l'énergie nucléaire. Toutefois, ces technologies n'ont pas encore atteint le niveau du développement commercial.
- Les concepts de systèmes nucléaires de quatrième génération, qui devraient être exploités à l'échelle industrielle après 2030, se caractérisent par une meilleure résistance à la prolifération et une protection physique accrue. Des initiatives internationales visent à soutenir le développement, dans des conditions sûres et durables, d'une énergie nucléaire fiable, à un prix concurrentiel, et qui produise un minimum de déchets.
- L'énergie de fusion, qui n'en est qu'au stade expérimental, ne devrait pas pouvoir être déployée pour produire de l'électricité à l'échelle industrielle au mieux avant la seconde moitié du siècle.

### Cycles du combustible actuels et avancés

À l'heure actuelle, les pays se partagent entre ceux qui retraitent leur combustible nucléaire et ceux qui ne le font pas. Des trois pays qui possèdent les plus grands parcs nucléaires, la France et le Japon retraitent aujourd'hui leur combustible nucléaire, les États-Unis ne le retraitent pas. De nombreux pays envisagent et mettent au point des cycles de retraitement avancés, y compris les États-Unis.

- Le retraitement du combustible utilisé déjà produit permettrait d'alimenter les réacteurs à eau ordinaire pendant 700 années-réacteur environ. Les autres sources secondaires potentielles de combustible pourraient porter cette durée à plus de 3 000 années-réacteur.
- Les réacteurs rapides associés à des cycles du combustible fermés, tels que ceux qui sont envisagés par le Forum international Génération IV, peuvent être conçus pour brûler les stocks existants de plutonium ou pour produire du plutonium à partir d'isotopes non fissiles de l'uranium. Dans ce dernier cas, l'énergie extraite d'une quantité donnée d'uranium peut être multipliée par 60, prolongeant ainsi les ressources d'uranium pendant des milliers d'années.
- Le retraitement présente également l'avantage, en termes de gestion du combustible utilisé, de réduire fortement les volumes de déchets de haute activité qu'il faut ensuite stocker dans des formations géologiques.
- Les cycles du combustible avancés permettraient de séparer les isotopes à vie longue à l'échelle commerciale puis de les réirradier pour les éliminer. La radioactivité des déchets issus du combustible nucléaire utilisé décroîtrait ensuite naturellement, en quelques centaines d'années, à un niveau inférieur à celui de l'uranium à partir duquel le combustible a été produit.

# Synthèse

## Conséquences politiques, sociales et environnementales de la demande d'énergie mondiale au 21<sup>e</sup> siècle

**Satisfaire les besoins énergétiques indispensables à la poursuite du progrès social et économique tout en maîtrisant les répercussions environnementales et sociopolitiques potentielles constitue un défi majeur du 21<sup>e</sup> siècle.**

L'énergie, et en particulier l'électricité, est essentielle au développement économique et social et à une meilleure qualité de la vie, mais il ne sera plus viable, de l'avis général, de la consommer au même rythme qu'au siècle dernier. La planète est confrontée aux menaces que fait peser sur l'environnement le changement climatique pro-

voqué par les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et aux menaces sociopolitiques que peuvent entraîner la hausse des prix de l'énergie et l'éventuelle insécurité d'approvisionnement en énergie.

La vigoureuse croissance économique de nombreux pays en développement, se traduisant par des modes de vie plus énergivores ainsi que le doublement prévu de la population mondiale, principalement dans les régions en développement, pousseront la demande d'énergie à la hausse au 21<sup>e</sup> siècle. Actuellement, la consommation d'énergie annuelle par habitant varie profondément suivant les pays, voire d'une région à l'autre. Les pays en développement aujourd'hui, qui représentent les trois quarts de la population mondiale, ne consomment qu'un quart de l'énergie de la planète. D'ici 2050, si les politiques publiques restent identiques, l'offre totale d'énergie primaire et la demande mondiale d'électricité devraient avoir augmenté d'un facteur de 2,5.

Si la plupart des pays continuent de suivre leurs politiques actuelles, la consommation de combustibles fossiles poursuivra sa

croissance inexorable pour satisfaire cette demande toujours plus forte, tandis que l'énergie nucléaire n'occupera pas une place importante. Cette poussée de la consommation de combustibles fossiles n'entraîne pas seule-

ment une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>, dont la science et l'expérience récente ont montré

les répercussions sur le climat, mais une instabilité politique et économique provoquée par la moindre sécurité d'approvisionnement et la hausse des prix de l'énergie.

Dans le plus récent de ses importants rapports, qui a été publié en 2007, le Groupe d'experts intergouvernemental sur le changement climatique montre qu'il est impératif d'opter pour des sources d'énergie écologiques si l'on veut maîtriser les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre, en particulier du CO<sub>2</sub>. La production d'électricité, qui est responsable de 27 % des émissions mondiales anthropiques de CO<sub>2</sub>, est de loin la source la plus importante de gaz à effet de serre et celle qui augmente le plus vite.

En 2005, la plupart des habitants de la planète consommaient nettement moins de 4 000 kWh par habitant, soit le seuil en-deçà duquel l'espérance de vie et le niveau d'éducation diminuent rapidement. D'ici 2030, ce sont l'Inde et la Chine qui devraient connaître la plus forte croissance de la demande d'électricité. Aux États-Unis, cette demande a poursuivi son ascension sans discontinuer au cours des 55 dernières années et ne montre aucun signe de ralentissement. D'autres pays aspirent à atteindre le niveau de développement économique des pays de l'OCDE, et devraient voir leur demande d'énergie suivre un jour le même schéma, ce qui laisse à penser que la demande d'électricité a peu de chance de se stabiliser.

Si les projections de la population mondiale des Nations Unies ainsi que du produit intérieur brut par habitant et de l'intensité énergétique du GIEC se vérifient, l'intensité de carbone du système énergétique mondial devra être divisée par 4 pour parvenir à réduire de 50 % les émissions de CO<sub>2</sub> comme le juge nécessaire le GIEC pour stabiliser le changement climatique. Or, il s'agit là d'un défi considérable à en juger par les données du GIEC qui montrent que l'intensité de carbone s'est améliorée de moins de 10 % au cours des 35 dernières années.

**D'ici 2050, tant l'offre totale d'énergie primaire que la demande mondiale d'électricité devraient avoir augmenté d'un facteur de 2,5.**

**Si les prévisions se confirment, les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie consommée devront être divisées par 4 à l'horizon 2050.**

La sécurité d'approvisionnement est devenue une préoccupation majeure dans le monde, notamment des pays détenant peu de ressources en combustibles fossiles qui sont par conséquent dépendants de leurs importations d'énergie. Les

réserves de pétrole et de gaz facilement exploitables sont concentrées dans un petit nombre de pays du Moyen-Orient et en Fédération de Russie, ce qui s'est révélé une importante source de tension au cours des dernières décennies.

## Contribution actuelle et probable de l'énergie nucléaire à l'approvisionnement en énergie de la planète

**En principe, l'énergie nucléaire pourrait satisfaire une proportion significative de la hausse prévue de la demande d'électricité.**

L'énergie nucléaire pourrait satisfaire une proportion significative de la hausse prévue de la demande d'électricité, et ainsi contribuer à réduire les effets environnementaux, politiques et économiques associés à la consommation de combustibles fossiles.

### Contribution actuelle de l'énergie nucléaire à l'approvisionnement mondial

Les premières centrales nucléaires civiles ont été construites dans les années 50, et l'industrie nucléaire a pris son essor dans les années 70 et 80. Les accidents de Three Mile Island (1979) et de Tchernobyl (1986), et la chute des prix des combustibles fossiles au milieu des années 80 ont mis fin à son déploiement rapide.

En juin 2008, 439 réacteurs nucléaires étaient en service dans 30 pays et une économie, et cumulaient une puissance totale de 372 GWe. Les centrales nucléaires ont produit 2,6 milliards MWh en 2006, soit 16 % de l'électricité dans le monde et 23 % dans les pays membres de l'OCDE. L'expérience d'exploitation des centrales nucléaires dépasse aujourd'hui 12 700 années-réacteur sur la planète toute entière. La France, le Japon et les États-Unis détiennent 57 % de la puissance nucléaire installée dans le monde ; en 2007, 16 pays produisaient plus d'un quart de leur électricité dans ce type de centrales.

**En 2006, 439 réacteurs ont assuré 16 % de la production mondiale d'électricité et 23 % de celle des pays de l'OCDE.**

En juin 2008, 41 réacteurs de puissance étaient en construction dans 14 pays et une économie. Lorsqu'ils seront achevés, la puissance installée mondiale aura augmenté de 9,4 %. Les pays d'Asie parviennent régulièrement à des durées de construction de 62 mois en moyenne. Sur les 18 tranches connectées au réseau entre le mois de décembre 2001 et le mois de mai 2007, trois ont été construites en 48 mois ou moins.

La quantité d'énergie produite grâce aux investissements dans l'énergie nucléaire s'est améliorée

avec la disponibilité, l'augmentation de la puissance et des renouvellements d'autorisations. Le coefficient de disponibilité en énergie des centrales de la planète s'est fortement accru au cours des dix dernières années ; bien que la puissance installée n'ait progressé que de 1 % par an, la production d'électricité nucléaire elle-même, a augmenté au rythme de 2,5 % par an. Les augmentations de puissance des centrales existantes ont permis également d'accroître d'environ 7 GWe la puissance nucléaire installée mondiale et, aux États-Unis, 48 réacteurs avaient, en mai 2008, obtenu un renouvellement d'autorisation prolongeant leur durée de vie de 40 à 60 ans, soit jusqu'en 2046 pour la dernière centrale.

Bien qu'en majorité les services du cycle du combustible soient concentrés aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France et au Royaume-Uni, 18 pays sont capables de fabriquer du combustible, éventuellement en important de l'uranium enrichi.

### Contribution probable de l'énergie nucléaire dans l'avenir

Les constructions de centrales doivent se multiplier en particulier en Chine, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en Inde et en Ukraine. Les pays d'Europe de l'Ouest n'ont pas de programmes fermes de construction d'installations supplémentaires, si ce n'est les tranches actuellement en chantier en Finlande et en France. Le gouvernement britannique encourage la construction de tranches nucléaires, mais aucune commande ferme n'a été passée à ce jour. Plus récemment, le gouvernement italien nouvellement élu a manifesté de l'intérêt pour la construction de centrales nucléaires. Plusieurs pays d'Europe, à savoir l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne et la Suède prévoient au contraire de réduire fortement leur dépendance vis-à-vis de l'énergie nucléaire parce qu'ils ont adopté des politiques de sortie du nucléaire. Toutefois, dans plusieurs d'entre eux, l'opinion des politiques est partagée sur le nucléaire, et l'énergie nucléaire continuera encore longtemps de figurer dans le paysage énergétique puisque les dernières centrales devraient être mises à l'arrêt définitivement en 2022 en Allemagne et en 2025



## Hypothèses adoptées par l'AEN

### Scénario bas

La construction de centrales se réduit au remplacement des anciennes d'ici 2030 – la puissance installée reste identique ou augmente légèrement grâce aux prolongations de la durée de vie, aux augmentations de puissance et au remplacement des anciennes centrales par de plus puissantes.

#### De 2030 à 2050 :

- Les techniques de piégeage et de stockage du carbone sont un succès.
- Les énergies renouvelables sont un succès.
- Les nouvelles technologies nucléaires sont peu performantes.
- L'opinion publique et les politiques sont peu favorables à l'énergie nucléaire.

### Scénario haut

Les prolongations de durée de vie et les augmentations de puissance se poursuivent. Les plans actuels et déclarations d'intention des autorités nationales prévoyant une augmentation de la puissance installée d'ici 2030 se concrétisent pour la plupart.

#### De 2030 à 2050 :

- Les techniques de piégeage et de stockage du carbone ne sont pas très concluantes.
- Les sources renouvelables ne produisent que des quantités faibles d'énergie.
- L'expérience des nouvelles technologies nucléaires est bonne.
- L'inquiétude du public au sujet du changement climatique et de la sécurité d'approvisionnement croît, rejaillissant fortement sur l'attitude des gouvernements.
- Le public et les décideurs acceptent bien l'énergie nucléaire.
- Les échanges de droits d'émission de carbone sont largement répandus et efficaces.

en Belgique et en Suède. L'énergie nucléaire est considérée sous un jour plus favorable dans les pays d'Europe de l'Est dont certains sont déterminés à augmenter leur puissance nucléaire installée.

D'après les plans actuels et déclarations d'intention d'autorités nationales, les pays qui auront la plus forte puissance installée en 2020 devraient être les États-Unis, la France, le Japon, la Fédération de Russie, la Chine et la Corée. C'est en Chine et aux États-Unis que les augmentations de la puissance installée les plus importantes sont prévues. Les pays qui produisent le plus d'électricité nucléaire dans le monde ne sont pas, à l'exception de la France, ceux qui en dépendent le plus. Parmi les cinq producteurs qui devraient arriver en tête en 2020, les États-Unis et la Chine ne compteront que 20 % et 5 % d'énergie nucléaire respectivement dans leur production d'électricité. Même si plusieurs pays aujourd'hui non nucléaires envisagent de rejoindre les pays ayant des centrales nucléaires, ils ne devraient faire progresser la puissance installée mondiale que de 5 % d'ici 2020.

L'AEN a établi des projections de l'offre d'électricité nucléaire dans des scénarios haut et bas, qui montrent que la puissance nucléaire installée dans le monde pourrait passer de 372 GWe en 2008 à 580-1 400 GWe en 2050. Dans le scénario haut, la part du nucléaire dans la production d'électricité mondiale, qui est de 16 % aujourd'hui, s'élèverait à

22 % en 2050. Ces projections concordent globalement avec celles d'autres organisations.

Pour parvenir à ce résultat, il faudrait mettre en service en moyenne entre 23 (scénario bas) et 54 (scénario haut) réacteurs par an entre 2030 et 2050 pour remplacer les centrales fermées et pour augmenter la production nucléaire. L'expérience passée montre que le monde est capable de construire des centrales nucléaires au rythme nécessaire pour atteindre les projections prévues dans le scénario haut de l'AEN sur la période allant jusqu'à 2050. Elle prouve également que, si les pays le désirent, on est en mesure de construire des centrales nucléaires suffisamment vite pour que d'ici 2030 la puissance nucléaire installée représente 30 % de la puissance mondiale, tandis que le scénario de référence de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) envisage une proportion de 10 % seulement.

Dans les deux scénarios de l'AEN, la production électronucléaire reste concentrée dans les pays de l'OCDE. Malgré la croissance économique rapide de l'Inde et de la Chine, leur contribution à la puissance nucléaire installée mondiale resterait relativement faible en 2050.

**D'après les projections de l'AEN allant jusqu'en 2050, la production électronucléaire restera concentrée dans les pays de l'OCDE.**

## Rôle potentiel de l'énergie nucléaire pour atténuer les conséquences négatives de la croissance de la demande d'énergie mondiale

### Conséquences sur le changement climatique

L'analyse du GIEC montre que les émissions annuelles de CO<sub>2</sub> doivent être divisées par deux par rapport aux niveaux de 2005 si l'on veut pouvoir maintenir à un niveau tolérable les conséquences du changement climatique. Ces émissions devront donc être ramenées à environ 13 Gt/an d'ici 2050. Or, d'après des évaluations, elles avoisineront 60 Gt/an en 2050 si l'on ne prend pas de mesures sérieuses pour améliorer la situation. Avec 27 % des émissions anthropiques mondiales de CO<sub>2</sub>, la production d'électricité est de loin la source la plus importante de gaz à effet de serre. Elle est aussi celle qui augmente le plus vite. Sur un cycle de vie complet, l'énergie nucléaire ne produit pour ainsi dire pas de CO<sub>2</sub>.

**La production d'électricité est la source de gaz à effet de serre la plus importante et celle qui augmente le plus vite.**

Selon l'AIE, il faudra associer diverses technologies pour parvenir à atteindre cet objectif très ambitieux, et notamment améliorer considérablement l'efficacité tant de la production que de la consommation d'énergie, développer massivement les énergies renouvelables, procéder au piégeage et au stockage d'importantes quantités de carbone et développer dans de très fortes proportions l'énergie nucléaire.

L'énergie nucléaire est la seule technologie ne produisant pas de carbone qui a fait ses preuves à l'échelle requise. Dans les scénarios bas et haut de l'AEN, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pourraient atteindre 4 à 12 Gt/an en 2050 si le nucléaire remplaçait le charbon, un résultat intéressant compte tenu de l'objectif de 13 Gt/an que recommande le GIEC.

**L'énergie nucléaire peut produire de l'électricité sans pour ainsi dire émettre de CO<sub>2</sub> – elle est la seule technologie mature disponible à l'échelle requise.**

Appliqué à la production d'électricité, le concept des coûts externes désigne les conséquences qui n'apparaissent pas dans les prix, et notamment celles sur le changement climatique. Des évaluations incluant les coûts externes de la production d'électricité montrent que le nucléaire et l'hydraulique sont les modes de production les moins chers si l'on tient compte du cycle de vie intégral.

Toutefois, le Protocole de Kyoto n'accepte pas de compter l'énergie nucléaire parmi les technologies éligibles dans le cadre des mécanismes pour un développement propre et de mise en œuvre

conjointe. En outre, la durée d'application du protocole est trop courte pour avoir une influence significative sur les décisions d'investir dans des centrales électriques. Les négociations en vue d'une convention qui lui ferait suite ont commencé. Comme les centrales électriques représentent le secteur qui produit le plus de dioxyde de carbone et que leurs émissions augmentent plus vite que celles de tout autre secteur, la convention nouvelle qui sera adoptée devra porter sur une échéance à plus long terme et prendre en compte toutes les solutions possibles.

### Conséquences en termes de sécurité énergétique

Plus que les énergies fossiles l'énergie nucléaire est capable de garantir la sécurité d'approvisionnement parce que le combustible consommé, l'uranium, provient de diverses sources et que les principaux fournisseurs sont des pays politiquement stables. En raison de la forte densité énergétique de l'uranium (une tonne d'uranium produit autant d'énergie que 10 000 à 16 000 tonnes de pétrole avec les techniques actuelles), les perturbations des transports n'ont pas de conséquence significative. De plus, associée à la faible part de l'uranium dans le coût de production de l'électricité, cette densité énergétique élevée permet de constituer sans problème d'importantes réserves énergétiques à des prix abordables.

**Si les programmes nucléaires devaient se développer fortement dans le monde, la base de ressources identifiées aujourd'hui permettrait d'assurer l'approvisionnement des réacteurs pendant plusieurs milliers d'années, mais l'on aurait alors besoin de surgénérateurs rapides qui ne sont pas encore exploités à l'échelle industrielle.**

Il existe suffisamment de ressources identifiées d'uranium pour que la puissance nucléaire installée mondiale puisse se développer jusqu'en 2050 au moins, au cas où l'on opterait pour un cycle ouvert (sans retraitement), sachant qu'il reste quelques décennies pour découvrir de nouveaux gisements. Le ratio actuel des ressources à la consommation est meilleur que celui du gaz ou du pétrole. Les ressources supplémentaires que laissent entrevoir les données géologiques locales devraient garantir un approvisionnement en uranium de plusieurs centaines d'années.

Si l'on retire le combustible irradié existant, qui contient encore plus de la moitié de sa teneur

énergétique initiale, on pourrait disposer de combustible pendant 700 années-réacteur à supposer que les réacteurs soient des REO de 1 000 MWe ayant un coefficient de disponibilité de 80 %. Des ressources supplémentaires existantes, comme les stocks d'uranium appauvri, et l'uranium et le plutonium provenant du démantèlement des armes nucléaires, viendraient augmenter la disponibilité de combustible nucléaire de 3 100 années-réacteur.

La conversion de l'uranium non fissile en matière fissile dans des réacteurs surgénérateurs rapides en cycles fermés permettrait de multiplier par 60 la quantité d'énergie produite à partir de l'uranium. Avec cette technologie, on disposerait de combustible nucléaire pendant des milliers d'années, sachant que pour l'instant ces surgénérateurs ne sont pas encore exploités à l'échelle industrielle. La France, la Fédération de Russie, l'Inde et le Japon possèdent des réacteurs rapides en état de marche (dont certains sont des réacteurs de recherche).

### Conséquences sanitaires

La consommation croissante d'énergie a des effets sanitaires importants. Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé ne sont pas précisément connus, mais les *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030* les estiment aujourd'hui à 1 million de décès prématurés par an. L'énergie nucléaire pourrait contribuer à réduire les effets sur la santé de l'utilisation des combustibles fossiles.

Toute évaluation rationnelle des effets sanitaires des différentes technologies de production d'électricité doit intégrer tant les effets sanitaires à long terme des rejets éventuels de radioactivité lors d'accidents que les émissions résultant de l'exploitation de sources fossiles, qui sont de loin les plus importantes. Les émissions de gaz et de particules associées à la consommation de combustibles fossiles (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et particules fines) sont connues pour leurs effets délétères graves. L'analyse du cycle de vie des divers systèmes de production d'énergie électrique montre que l'énergie nucléaire (y compris les rejets de radioactivité) est l'un des moyens de production d'électricité les plus efficaces pour éviter les effets sanitaires liés aux émissions. Les pertes de vies humaines résultant des effets sanitaires des émissions toxiques dépassent largement celles dues aux accidents dans l'ensemble des chaînes d'approvisionnement énergétique.

Il ressort des comparaisons de courbes fréquence-conséquences établies d'après des statistiques sur les accidents survenus sur toute la chaîne de production d'énergie dans les pays membres de l'OCDE que, de 1969 à 2000, le nucléaire était très nettement plus sûr que le pétrole, le charbon et le gaz naturel qui eux-mêmes étaient bien plus sûrs que le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Toutefois, le public, comme les hommes politiques, se focalisent sur des accidents graves de très faible probabilité dont les rejets de radioactivité pourraient à long terme provoquer des morts.

## Relever les défis de la croissance du nucléaire

Alors que l'énergie nucléaire est capable de diminuer les menaces environnementales et socio-économiques pour la planète, une bonne partie de l'opinion publique est convaincue que ses risques sont supérieurs à ses avantages. Si l'on veut pouvoir exploiter dans les années qui viennent tout le potentiel de l'énergie nucléaire, il faudra réussir à convaincre le public et les hommes politiques sur plusieurs aspects de la technologie et notamment la sûreté, le stockage des déchets et le démantèlement, la sécurité physique et la non-prolifération mais aussi les coûts.

---

**Si l'on veut pouvoir exploiter tout le potentiel de l'énergie nucléaire, il faudra obtenir l'adhésion du public sur des sujets comme la sûreté, le stockage des déchets, la prolifération et les coûts.**

---

### Sûreté

L'industrie nucléaire doit maintenir la sûreté et la protection de l'environnement au premier rang de

ses priorités. Ce sont principalement les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl qui ont brisé l'essor rapide du nucléaire dans les années 70 et 80. Parallèlement, les prix des combustibles fossiles, qui étaient bas, faisaient que la construction de centrales nucléaires n'était plus rentable dans de nombreux pays. Malgré la flambée actuelle des prix des combustibles fossiles, un autre accident grave, qu'il se traduise ou non par le rejet de quantités importantes de radioactivité dans l'environnement, aurait des répercussions graves sur l'avenir du nucléaire.

La sûreté nucléaire est un enjeu à l'échelle planétaire puisqu'un accident grave dans un pays peut avoir des répercussions sur ses voisins. Bien que la responsabilité de la sûreté nucléaire appartienne à

---

**Devant l'intérêt croissant manifesté pour la construction de centrales nucléaires et pour les filières de nouvelle génération, la communauté internationale a lancé des initiatives afin d'améliorer l'efficacité et l'efficience de la réglementation.**

---

chaque pays, la communauté nucléaire internationale s'efforce d'harmoniser les pratiques nationales dans ce domaine par l'intermédiaire d'initiatives telles que le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP).

Ce Programme multinational d'évaluation des conceptions a été entrepris par dix pays avec le soutien de l'AEN afin de mettre au point des démarches innovantes destinées à tirer le meilleur parti des ressources et des savoirs des autorités de sûreté nationales à qui il reviendra d'examiner les nouvelles conceptions de centrales nucléaires. Il s'agit ainsi surtout d'établir des pratiques réglementaires et des réglementations de référence destinées à renforcer la sûreté des nouvelles filières de réacteurs. La convergence recherchée des pratiques réglementaires et des réglementations devrait faciliter la coopération entre autorités de sûreté, améliorer l'efficacité et l'efficacité de l'examen réglementaire des conceptions qui fait partie de la procédure d'autorisation mise en place par chaque pays.

De nouvelles conceptions de réacteurs sont équipées de systèmes à sûreté passive dont la fonction est de maintenir l'installation dans un état sûr, particulièrement lors d'un événement imprévu, sans nécessiter de commande active. Certaines conceptions avancées de réacteurs de plus petite taille, qui n'ont pas encore été construits, possèdent un système de refroidissement intégral, au sens où les générateurs de vapeur, le pressuriseur et les pompes sont tous logés à l'intérieur de la cuve sous pression du réacteur de façon à réduire la probabilité et les conséquences des accidents de perte de réfrigérant primaire.

Des pays ayant une expérience très limitée du nucléaire et de la réglementation de cette activité pourraient être amenés à développer cette technologie. La communauté internationale, et en particulier les pays constructeurs de centrales, aura le devoir de veiller à ce que ces « nouveaux » pays nucléaires adoptent des approches industrielles et réglementaires appropriées et mettent en place des procédures juridiques suffisamment solides.

### **Stockage des déchets et démantèlement**

Les déchets de faible activité et les déchets de moyenne activité à vie courte représentent les volumes les plus importants, mais seulement une faible proportion de la radioactivité totale, de tous les déchets radioactifs. Les technologies de stockage de ces déchets sont au point, et la plupart des pays dotés de grands programmes électronucléaires exploitent des installations de stockage ou sont parvenus à un stade avancé de leur mise au point.

Les reports et échecs de certains grands programmes de stockage des déchets de haute activité

(DHA) continuent de ternir fortement l'image de l'énergie nucléaire. Les gouvernements et l'industrie nucléaire doivent travailler ensemble à la mise en place de systèmes de stockage sûrs. Comme aucun dépôt de déchets de haute activité n'a encore été aménagé, l'impression générale est que le stockage est techniquement très difficile, voire impossible. Par ailleurs, la gestion des déchets et le démantèlement sont parfois considérés comme hors de prix.

Les déchets de haute activité sont produits en faible quantité et peuvent être entreposés en toute sécurité sur de longues périodes. Un réacteur à eau ordinaire de 1 000 MWe produit environ 25 tonnes de combustible usé par an qui peuvent être conditionnées et stockées sous forme de DHA. En revanche, si l'on retire le combustible usé, ce sont 3 m<sup>3</sup> de déchets de haute activité vitrifiés qui sont produits.

La solution sur laquelle s'accordent tous les spécialistes pour la gestion finale du combustible nucléaire usé et des déchets de haute activité est le stockage en formation géologique qui repose sur des bases technologiques bien établies. À ce jour, aucune installation de stockage de ces déchets n'a obtenu d'autorisation, mais des progrès sont accomplis sur cette voie, grâce à la démarche participative adoptée pour prendre les décisions. Aux États-Unis, un site a été sélectionné, et d'importants travaux de reconnaissance ont été effectués. En Finlande, le site choisi bénéficie du soutien des instances politiques et des populations locales, et il est possible que la Suède se trouve bientôt dans la même situation. Bon nombre d'autres pays, et notamment la France, le Japon et le Royaume-Uni sont actuellement à la recherche d'un site de dépôt de DHA acceptable. Si tous les pays qui étudient le stockage en formation géologique parviennent à exploiter un dépôt avant 2050, un quart seulement du combustible nucléaire usé et des déchets de haute activité produits dans le scénario haut de l'AEN restera alors sans voie de stockage définie.

Des installations nucléaires ont été démantelées avec succès, dont plusieurs centrales américaines d'une puissance supérieure à 100 MWe. Les déchets correspondants ont été stockés. Une analyse du Ministère du Commerce et de l'Industrie du Royaume-Uni démontre que les coûts de la gestion des déchets et du démantèlement des centrales nucléaires représentent 3 % seulement du coût total de la production nucléaire. Des schémas de

---

**Le fait que l'on ne soit pas encore parvenu à construire des dépôts de déchets de haute activité contribue pour beaucoup à ternir l'image du nucléaire. Pourtant il existe un consensus international en faveur du stockage en formation géologique.**

---

financement sont en place pour faire face aux charges financières du démantèlement.

On estime que les activités militaires durant la Guerre froide sont responsables de 70 % des charges liées au démantèlement des installations nucléaires dans le monde et non les centrales nucléaires civiles.

### **Non-prolifération et sécurité**

Nombreux sont ceux qui redoutent que des matières ou technologies élaborées pour produire de l'électricité, donc pour des objectifs pacifiques, ne soient détournées à des fins militaires. Le système des garanties mis en place par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en application du Traité sur la

---

**Le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires a effectivement limité la dissémination des armes nucléaires quarante années durant.**

---

non-prolifération des armes nucléaires (TNP) a bien servi la communauté internationale dans la mesure où il a évité le détournement de matières et technologies nucléaires civiles à des fins militaires. Un total de 191 pays sont parties au TNP qui est entré en vigueur

en 1970. En 1995, il a été prorogé indéfiniment. Les accords de garantie sont complétés par des mesures diplomatiques, politiques et économiques et des contrôles des exportations de technologies sensibles.

Le TNP constitue le socle juridique sur lequel repose le régime international qui a permis d'éviter la dissémination des armes nucléaires pendant près de 40 ans. Pourtant, son efficacité et le soutien dont il jouit pourraient être compromis par diverses évolutions politiques, juridiques et techniques. Il aura donc besoin d'être renforcé pour continuer de produire des résultats aussi efficaces.

Soucieuse d'empêcher la dissémination des technologies de retraitement et d'enrichissement, l'AIEA a proposé des approches multilatérales destinées à réduire le risque de prolifération dans les activités du cycle du combustible nucléaire. Ces démarches visent à renforcer les contrats commerciaux d'enrichissement et de retraitement en vigueur en proposant un éventail de mécanismes tels que la mise en œuvre de garanties internationales d'approvisionnement en combustible nucléaire, des mesures pour favoriser la conversion volontaire d'installations nationales en installations multinationales, la création de nouvelles installations d'enrichissement et de stockage du combustible usé en partenariat multinational.

Plusieurs autres propositions sont également à l'étude ou en gestation. Le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), une initiative

des États-Unis qui comptait 21 pays participants en août 2008, est au nombre de ces propositions ainsi que le projet russe de création d'un centre international d'enrichissement de l'uranium. Des propositions émanant du Japon, de l'Allemagne et d'un groupe de six pays dotés d'usines d'enrichissement commercial sont également venues alimenter le débat international.

Le régime international des garanties est certes l'un des grands outils de la non-prolifération, mais il est possible également de faciliter, par la conception même des installations, le contrôle des garanties. Les technologies nucléaires avancées sont conçues de façon à offrir une meilleure résistance aux menaces de prolifération et une grande robustesse en cas de sabotage ou d'attentat terroriste.

### **Coûts et financement**

Une comparaison des coûts actualisés de la production d'électricité dans les centrales nucléaires, au charbon et au gaz, effectuée en 2005 par l'AEN et l'AIE montre que l'énergie nucléaire concurrence le charbon et le gaz, de façon plus ou moins nette en fonction des circonstances locales. Depuis lors, le prix du pétrole a quadruplé (juin 2008), suivi par les prix des autres énergies fossiles. Il est économiquement viable de construire et d'exploiter des centrales nucléaires dans de nombreux cas. Toutefois, l'analyse de sensibilité des coûts de production de l'électricité nucléaire révèle que ces coûts sont particulièrement dépendants des coûts de construction directs et du coût du financement du capital. Les forts coûts amont des centrales nucléaires sont également un facteur dissuasif pour les investisseurs. Par conséquent, dans le cas de l'énergie nucléaire, les défis économiques sont davantage liés au financement de l'investissement qu'au coût actualisé de la production d'électricité.

---

**Une comparaison internationale montre que le nucléaire concurrence le charbon et le gaz – mais les gouvernements devront peut-être veiller à atténuer les risques liés à la procédure d'autorisation et la planification pour encourager l'investissement.**

---

Le coût de la production d'électricité nucléaire se décompose en trois parties : le coût en capital, les coûts d'exploitation et de maintenance et les coûts du cycle du combustible. L'investissement exigé pour construire une centrale nucléaire représente normalement 60 % du coût total de la production d'électricité nucléaire tandis que les coûts d'exploitation et de maintenance et les coûts du cycle du combustible s'élèvent respectivement à 25 et 15 %. Le coût de l'uranium lui-même avoisine 5 % seulement du coût de production de

l'électricité. On est donc loin de la structure des coûts de production dans des centrales thermiques à flamme, en particulier les centrales à gaz où les coûts du combustible sont prédominants.

L'apparition des marchés libéralisés de l'électricité s'est révélée globalement positive pour les centrales nucléaires. La concurrence a favorisé de meilleures performances, permettant ainsi de valoriser pleinement les actifs de production. Les augmentations de puissance, la prolongation de la durée de vie et une meilleure disponibilité permettent d'améliorer les performances économiques des centrales anciennes et nouvelles. Dans le monde entier, la disponibilité moyenne a progressé de près de 10 % au cours des 15 dernières années pour atteindre aujourd'hui 83 %. En 2006, elle dépassait 90 % en moyenne dans cinq pays et en 2007 dans six. Les réacteurs les plus performants du monde affichent des disponibilités voisines de 95 %. La puissance de bon nombre de centrales a été relevée, parfois de 20 %, et les réacteurs dont la durée de vie a été prolongée de 40 à 60 ans sont nombreux.

Les coûts en capital élevés des centrales nucléaires et la durée des processus d'autorisation ont incité les investisseurs à la plus grande prudence. Les gouvernements qui souhaitent encourager l'investissement dans le nucléaire devront peut-être faire en sorte d'éliminer ou du moins d'atténuer les risques financiers réels ou perçus qui sont associés à la procédure d'autorisation, à la planification ainsi qu'à la gestion des déchets radioactifs et au démantèlement. Il serait également utile, pour réduire les risques politiques auxquels sont exposés les investisseurs, de parvenir à un large consensus national sur le programme nucléaire.

Les gouvernements devront aussi parfois mettre en place des mécanismes transparents de longue durée pour fixer le prix du carbone et organiser des échanges de droits d'émission. Dans le cas de l'énergie nucléaire, la plupart des coûts externes sont déjà internalisés, tandis que, pour les combustibles fossiles, ces coûts sont presque aussi importants que les coûts directs. Les impôts auxquels sont soumises les compagnies d'électricité peuvent influencer sur la compétitivité relative des techniques de production et décourager la construction d'installations à forte intensité capitalistique, comme les installations nucléaires ou celles qui fonctionnent avec des énergies renouvelables. Les gouvernements devront donc s'assurer que la fiscalité appliquée sert bien les objectifs de leurs politiques énergétiques.

### **Régime juridique, infrastructure et ressources**

Le régime juridique international actuel recouvre une série de traités, conventions, accords et résolutions

internationales juridiquement contraignants, auxquels viennent s'ajouter de nombreux codes, règles et normes qui n'ont aucune force exécutoire. Ce régime a subi d'importantes transformations au cours des 50 dernières années. Au niveau national comme international, les cadres juridiques doivent être suffisamment souples pour s'adapter à des évolutions futures, y compris à une forte progression de la production d'énergie nucléaire dans le monde. L'un des défis majeurs consistera à persuader les pays qui se lancent dans l'électronucléaire de respecter les dispositions du régime international actuellement en vigueur. Il en ira de même des pays qui sont déjà dotés de programmes électronucléaires mais qui ont jusqu'alors refusé d'harmoniser leur régime avec le régime international existant.

---

**L'un des défis majeurs lié à l'essor du nucléaire consistera à persuader les pays qui se lancent dans l'électronucléaire de respecter les dispositions du régime légal international actuellement en vigueur.**

---

Les autorités de sûreté nationales constituent des éléments majeurs des régimes juridiques nationaux auxquels il importera de conserver les attributs suivants :

- autorité juridique, compétences techniques et managériales satisfaisantes ;
- ressources humaines et financières suffisantes pour accomplir leur mission ;
- indépendance par rapport à toute influence ou pression qui pourrait aller à l'encontre de la sûreté.

Avec la hausse prévue de la demande d'électricité nucléaire, les parties intéressées pourraient exiger non seulement l'adoption d'une législation nationale plus complète et définitive mais des conventions internationales sur la participation du public qui soient plus efficaces. Il faudra continuer d'approfondir et de mettre en œuvre des principes de bonne gouvernance afin de former la société civile au processus qui mène à la décision et à la conception de l'avenir de l'énergie nucléaire et de l'y associer. Pour en garantir la réalisation concrète, on aura besoin d'un cadre juridique favorisant la transparence de l'information et la participation des intéressés. Les législateurs mettront très vraisemblablement en place des procédures juridiques pour permettre aux intéressés de prendre plus largement part au processus de décision. Ils sont d'ores et déjà convaincus que la participation de la société civile à la décision conduira à la mise en place de politiques nucléaires et environnementales plus efficaces et contribuera à gagner la confiance du public.

Bon nombre des travailleurs du secteur nucléaire actuellement en poste ont reçu leur formation et commencé leur carrière dans les années 60

et 70 à l'époque de l'essor rapide des programmes nucléaires. Ils sont aujourd'hui près de la retraite ou ont déjà quitté l'industrie. Le long cycle de vie des centrales nucléaires et les compétences techniques indispensables signifient que l'industrie nucléaire a aujourd'hui, dans de nombreux pays, des difficultés à préserver les compétences et savoir-faire et à former une nouvelle génération de personnel qualifié capable d'accompagner le déploiement du nucléaire.

---

**À la suite du vieillissement des effectifs, du ralentissement des constructions de centrales et en raison du niveau d'expertise nécessaire, le secteur nucléaire connaît des problèmes de ressources humaines.**

---

L'ouverture à la concurrence des marchés d'électricité, avec les pressions en faveur d'une baisse des coûts et la réduction des financements publics de la recherche nucléaire qu'elle entraîne, se répercute sur la disponibilité des ressources humaines. La plupart des pays sont aujourd'hui conscients de

la nécessité de trouver des ressources humaines qualifiées, et des initiatives internationales, régionales et nationales récentes visent à encourager et à faciliter l'inscription des étudiants dans les filières nucléaires. Des progrès ont été certes accomplis, mais il faut poursuivre l'effort.

La recherche nucléaire est primordiale dans un certain nombre de domaines dont la sûreté, la gestion des déchets radioactifs, les sciences nucléaires et pour le développement de technologies. Au cours des années 90, la plupart des gouvernements des pays de l'OCDE dotés de programmes électronucléaires ont diminué leurs financements de la R-D sur la fission nucléaire. Cette réduction des ressources nationales a renforcé l'importance des organisations internationales telles que l'AEN et l'AIEA en tant que lieux où mettre en commun les compétences et les ressources des laboratoires, industries et universités nationales. Ces organisations jouent en outre un rôle important dans toutes les activités liées à la préservation des savoirs.

Le petit nombre de centrales nucléaires construites dans le monde ces dernières années a provoqué une forte concentration des entreprises dans le secteur de la construction nucléaire, qui explique que la capacité de construction de nouvelles installations soit limitée. Cette capacité peut être rétablie, si la demande existe, et l'on perçoit déjà des signes d'une évolution dans ce sens.

### **L'énergie nucléaire et la société**

Si l'électricité d'origine nucléaire produite est concurrentielle, les populations s'intéressent davantage à certains aspects périphériques (déchets radioactifs, terrorisme et prolifération) qu'au fonctionnement réel des centrales. L'opposition à l'énergie nucléaire

diminuerait considérablement avec la résolution du problème des sites de dépôts de déchets.

Toutefois, plus de la moitié des citoyens de l'Union européenne jugent que les risques que présente l'énergie nucléaire sont supérieurs à ses avantages : il s'agit en particulier de ceux qui estiment qu'ils ne sont pas bien informés ainsi que des citoyens de pays sans programme électronucléaire, qui ont donc peu d'expérience personnelle du nucléaire. Une meilleure connaissance de l'énergie nucléaire entraîne une opinion plus favorable, or la plupart des gens estiment qu'ils la connaissent mal. Pour l'information, les scientifiques et les ONG sont jugés les plus fiables. Les gouvernements nationaux, les producteurs d'énergie et les autorités de sûreté nucléaire jouissent d'une moindre confiance. Si l'on veut que l'énergie nucléaire se développe, il importera de plus en plus que s'instaure une relation régulière entre les décideurs, l'industrie nucléaire et la société, qui soit propice au développement des connaissances et à la participation du public.

---

**Si l'on veut que l'énergie nucléaire se développe, il importera de plus en plus que s'instaure une relation régulière entre les décideurs, l'industrie nucléaire et la société, qui soit propice au développement des connaissances et à la participation du public.**

---

Faire en sorte que les citoyens puissent acquérir une connaissance approfondie des questions nucléaires grâce à leur participation directe s'est révélée être une démarche très efficace. Et s'il est nécessaire de communiquer des informations pour mieux informer la société sur les risques nucléaires, acquérir la confiance du public doit être considéré comme tout aussi important. La communication doit se faire franchement et simplement, et doit l'emporter sur des exigences contradictoires telles que la sécurité et les pressions financières.

## **Développer la technologie**

### **Réacteurs avancés**

Font partie des réacteurs avancés, les réacteurs des générations III, III+ et IV. Environ 80 % des centrales nucléaires d'aujourd'hui utilisent des réacteurs à eau ordinaire (REO) de deuxième génération, construits pour la plupart dans les années 70 et 80. Les REO devraient continuer de dominer la production électronucléaire jusqu'au milieu du siècle. Toutefois, les futures centrales

nucléaires appartiendront à la génération III+. Quatre REO de génération III+ sont en service aujourd'hui et plusieurs autres en construction. Ces filières ont des caractéristiques de sûreté et des performances économiques meilleures que les réacteurs de deuxième génération actuellement exploités.

L'énergie nucléaire pourrait contribuer davantage à l'approvisionnement en électricité, mais aussi à la production de chaleur quasiment sans produire d'émissions de carbone. La chaleur nucléaire des REO est aujourd'hui utilisée pour deux applications : le chauffage urbain et le dessalement de l'eau de mer. La plupart des autres procédés industriels exigent des températures qui ne peuvent être atteintes que dans

---

**L'énergie nucléaire pourrait contribuer davantage à produire de la chaleur tout autant que de l'électricité, quasiment sans émettre de carbone ; la production nucléaire d'hydrogène pour les transports pourrait devenir une application importante.**

---

les réacteurs à haute température à gaz (RHT). Ces réacteurs sont conçus pour produire de l'électricité dans une turbine à gaz et pour fonctionner à des températures adaptées à la production d'hydrogène et à d'autres applications de la chaleur de procédé. À l'échelle du globe, des investissements importants ont été consentis dans les études et recherches sur la production d'hydrogène dans des centrales nucléaires avec la volonté de réduire la dépendance par rap-

port au pétrole importé. L'exploitation commerciale est envisagée autour de 2020. La production d'hydrogène pourrait devenir par conséquent l'une des applications importantes de l'énergie nucléaire dans les décennies qui viennent.

La croissance projetée de la demande d'électricité interviendra surtout dans les pays en développement pour qui les grandes centrales nucléaires que mettent au point et construisent les pays avancés ne sont pas nécessairement adaptées. Les grandes centrales ne seront en effet pas toujours la solution optimale sauf pour fournir de l'électricité en base dans de grands pays comme la Chine et l'Inde. L'isolement géographique de certains centres de population les prédispose à se doter de réacteurs de petite ou moyenne puissance (RPMP), en particulier pour produire également de la chaleur et/ou de l'eau potable. Plusieurs concepts de réacteurs de petite et moyenne puissance de génération III et III+ sont à l'étude. La moitié d'entre eux, de par leur conception, n'exigent pas de rechargement sur site, cela afin de réduire les coûts en capital et d'améliorer la résistance à la prolifération de ces installations. Il s'agit principalement de REO à sûreté passive et intrinsèque qui sont dotés par exemple de circuits de refroidissement primaire

intégrés. Ces caractéristiques de conception sont particulièrement adaptées aux pays ayant une expérience limitée dans le domaine nucléaire. Toutefois, il faut savoir que ces technologies n'ont pas encore été exploitées à l'échelle industrielle.

Pour le plus long terme, les systèmes énergétiques de génération IV, c'est-à-dire reposant sur des concepts de réacteurs avancés, devraient être exploités à l'échelle industrielle après 2030. Aujourd'hui dans le monde un large éventail de concepts de réacteurs avancés sont à l'étude et, à l'évidence, il faudra compter beaucoup sur la coopération internationale si l'on veut tirer le meilleur parti possible des financements limités accordés à la recherche et au développement. Il importe de noter que les systèmes énergétiques de quatrième génération ont une résistance à la prolifération et une protection physique contre les menaces terroristes qui ont été renforcées. Le Forum international Génération IV a sélectionné pour des études et recherches approfondies six systèmes avec leurs cycles du combustible. Plusieurs d'entre eux sont des réacteurs rapides à cycles du combustible fermés. Trois initiatives internationales au moins ont été lancées pour favoriser le développement de technologies nucléaires qui allient fiabilité et rentabilité et produisent un minimum de déchets, cela dans des conditions à la fois sûres et durables et sans favoriser la prolifération.

- le Forum international Génération IV dont l'IAEA assure le Secrétariat technique ;
- le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), entrepris à l'initiative des États-Unis ;
- le Projet international de l'IAEA sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible innovants (INPRO).

Au niveau de la recherche et du développement, on est parvenu à réaliser la fusion nucléaire contrôlée quelques secondes seulement. Cadarache, en France, a été sélectionné pour y installer le projet de réacteur thermonucléaire expérimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) qui marquera la prochaine grande étape de développement de cette technologie. C'est une technologie en soi beaucoup plus complexe que la fission, et dont les performances économiques sont très incertaines. La fusion ne devrait pas pouvoir être exploitée à l'échelle industrielle avant la deuxième partie du siècle au plus tôt.

---

**L'énergie de fusion, qui n'en est qu'au stade expérimental, ne devrait pas pouvoir être déployée pour produire de l'électricité à l'échelle industrielle avant la seconde moitié du siècle au moins.**

---



## Cycles du combustible avancés

À l'heure actuelle, les pays soit retraitent leur combustible nucléaire usé soit ont l'intention de le stocker directement dans un dépôt en formation géologique, une fois conditionné dans des colis adaptés. Sur les trois pays qui possèdent les plus grands parcs nucléaires, la France retraite son combustible et assure des services de retraitement commerciaux à d'autres pays, le Japon retraite son combustible et achète des services à l'étranger tout en développant sa propre capacité de retraitement, et les États-Unis ne retraitent pas leur combustible bien qu'ils en aient eu la capacité.

Les technologies de retraitement exploitées à l'échelle industrielle aujourd'hui permettent à la fois de récupérer l'uranium inutilisé et le plutonium afin de les réemployer dans des combustibles à

---

**Les cycles du combustible avancés permettraient d'éliminer les isotopes à vie longue des déchets nucléaires.**

---

oxydes mixtes destinés aux REO et aux futurs réacteurs rapides, et de réduire les volumes de déchets à stocker ultérieurement dans des dépôts en formation géologique. Toutefois, dans les années 90, les prix de l'uranium étaient si bas que le retraitement paraissait

économiquement moins intéressant. D'autre part, la séparation du plutonium posait le problème des risques potentiels de prolifération. Ces dernières années, le prix de l'uranium s'est redressé.

Plusieurs pays mettent au point des technologies avancées de retraitement qui font d'ailleurs l'objet de coopérations internationales dans le cadre du Forum international Génération IV et du Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP) mené par les États-Unis. Ces techniques devraient présenter plusieurs avantages. Les risques de prolifération peuvent être atténués en évitant de séparer le plutonium de l'uranium. La séparation des isotopes à vie longue du combustible usé (séparation poussée) afin de les réirradier ultérieurement permettra d'éliminer ces isotopes (transmutation). Ensuite, la radiotoxicité des déchets issus du traitement du combustible usé pourra diminuer par décroissance radioactive naturelle pour atteindre, en quelques centaines d'années seulement, un niveau inférieur à celui de l'uranium naturel qui aura servi à produire le combustible initialement. Avec ces techniques, le volume et la charge thermique des déchets à stocker dans les dépôts en formation géologique pourraient être énormément réduits, avec pour conséquence d'augmenter fortement la capacité de stockage des dépôts.

Il est également possible d'utiliser du thorium pour produire de l'énergie dans des réacteurs nucléaires. Il s'agit d'un élément dont l'abondance

dans la croûte terrestre est supérieure à celle de l'uranium. L'isotope du thorium que l'on rencontre dans la nature peut être transmuté en un isotope fissile de l'uranium. Plusieurs pays ont consacré des études et recherches aux cycles du combustible thorium, mais la technologie n'a pas encore atteint le stade de l'exploitation industrielle. ■