

Les matières premières nucléaires

Depuis 1990, la production annuelle des mines d'uranium ne couvre que de 50 à 60 % de la consommation totale des réacteurs. Le complément d'offre, que l'on nomme « ressources secondaires », correspond à de l'uranium déjà extrait, c'est-à-dire à de la matière fissile déjà stockée ou déjà utilisée, mais retraitée afin d'être réutilisable. Cependant, les stocks commerciaux excédentaires sont désormais proches de la résorption...

par Bernard BIGOT*

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire assure 16 % de la production mondiale d'électricité, soit 2 700 TWh/an, avec plus de 400 réacteurs en fonctionnement. 45 réacteurs électronucléaires sont en construction dans le monde et environ 130 autres sont prévus, principalement en Chine, en Inde, au Japon, aux Etats-Unis et dans la Fédération de Russie. En outre, de nombreux pays (notamment du Moyen-Orient et d'Asie) ne comptant pas encore de réacteurs de puissance dans leur parc électrique ont décidé d'opter pour le nucléaire. L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) prévoit une augmentation de 20 à 80 % de la puissance nucléaire installée dans le monde à l'horizon 2030.

La croissance de la demande mondiale d'électricité, l'épuisement progressif des ressources fossiles et la logique de réduction des émissions de gaz à effet de serre promettent un bel avenir au nucléaire civil. Mais celui-ci pourra-t-il satisfaire durablement une demande d'énergie qui ne cesse d'augmenter ?

La matière première nécessaire pour assurer le développement du nucléaire est, en premier lieu, la ressource combustible. Actuellement, cette ressource est le minerai d'uranium, qui est de mieux en mieux utilisé, mais d'une façon encore très partielle (à hauteur de moins de 1 %), car une partie seulement de l'uranium naturel est fissile, dans les réacteurs actuels. A terme (d'ici quelques dizaines d'années), l'utilisation de cette ressource pourra être considérablement améliorée... A plus long terme encore, le lithium et le deutérium contenu dans l'eau pourront être les combustibles des réacteurs à fusion.

Nous montrerons dans cet article que les ressources actuellement identifiées sont suffisantes pour assurer des centaines (voire des milliers d'années) de fonctionnement des réacteurs nucléaires, dès lors que les technologies de réacteurs adéquates sont (et seront) développées.

La consommation d'uranium par les réacteurs actuels

Le combustible de la plupart des réacteurs nucléaires actuels est l'uranium, un élément naturel constitué de deux principaux isotopes ^{238}U et ^{235}U , dans un rapport de 99,27 %

d' ^{238}U et seulement 0,72 % d' ^{235}U . Dans les réacteurs actuels à eau « légère » (en abrégé, REL) (l'eau légère étant ici entendue par opposition à l'eau lourde), c'est principalement l'isotope naturel ^{235}U qui est fissile et peut donc libérer de l'énergie. Dans ces réacteurs, l'uranium naturel doit être enrichi en isotope 235 dans une proportion de l'ordre de 3 à 5 %, pour fabriquer un combustible dit UOX (pour oxyde d'uranium). De cette opération d'enrichissement résulte de l'uranium dit « appauvri », qui ne contient plus que de 0,2 à 0,3 % d' ^{235}U . Il faut toutefois noter que, dans le cœur des réacteurs REL, l'isotope ^{238}U se transmute en faible proportion en plutonium ^{239}Pu fissile, et que cet isotope de plutonium fournit environ un tiers de l'énergie totale. Au final, l'uranium naturel initial n'est utilisé qu'à moins de 1 % et l'essentiel de ce qui est retiré des mines se retrouve ainsi sous la forme d'uranium appauvri, entreposé en attendant une valorisation future.

Pour tous les réacteurs qui en consomment, le besoin en uranium naturel peut être exprimé en fonction des besoins de l'amont du cycle nucléaire et des performances des réacteurs (rendement thermoélectrique et taux de combustion), par la formule simple ci-après :

$$U = \frac{365,25}{T \times R} \times \frac{\varepsilon - \varepsilon a}{\varepsilon n - \varepsilon a}$$

Dans laquelle :

U représente la masse d'uranium naturel par unité d'énergie électrique produite (t/GWe/an) ;

T est le taux de combustion de décharge du combustible (GWj/t) ;

R : le rendement thermoélectrique du réacteur ($R < 1$) ;

ε : le taux d'enrichissement du combustible (en %) ;

εa : le taux d'enrichissement de rejet (en %) ;

εn : le taux d'enrichissement de l'uranium naturel (en %).

Nous verrons plus loin comment il est possible de diminuer la consommation d'uranium rapportée à l'énergie produite non seulement en mettant à contribution ces différents paramètres, mais aussi en prenant en considération l'aval du cycle sous l'angle des possibilités de recyclage des matières fissiles.

Les réacteurs actuellement en service dans le monde sont de divers types, et même si les réacteurs à eau légère

constituent une très forte majorité, il existe aussi des réacteurs à eau lourde (comme les CANDU canadiens) et des réacteurs à gaz (GT-MHR). L'économie de l'uranium est un peu meilleure dans ces réacteurs à eau lourde, sachant qu'en règle générale le facteur clé qui différencie les réacteurs, est surtout le rendement thermodynamique, un facteur lié essentiellement à la température de fonctionnement des fluides caloporteurs utilisés.

La figure 1 présente une comparaison entre les consommations en uranium naturel des principales filières de réacteurs nucléaires.

Un ordre de grandeur de 150 à 200 tonnes d'uranium par GWe/an (c'est-à-dire une vingtaine de tonnes d'uranium naturel par TWh) est assez robuste. La consommation mondiale peut en être rapidement déduite : compte tenu des 2 700 TWh annuels produits par le nucléaire, elle s'établit à un peu plus de 60 000 tonnes.

Face à cette demande actuelle très inélastique (très peu sensible au prix) à court terme, nous présenterons les aspects miniers de la ressource en uranium, puis nous passerons en revue les moyens permettant d'économiser la ressource dans une perspective de moyen et long terme.

Les ressources mondiales en uranium

En dehors de la production d'énergie nucléaire, l'uranium n'a pas d'autre utilisation importante. Il est relativement répandu dans l'écorce terrestre, au taux d'environ de 3 g/tonne. Il est généralement extrait de gisements de concentrations allant de 1kg/tonne à 200 kg/tonne, par des techniques minières et hydro-métallurgiques classiques. L'uranium peut également être un sous-produit de l'extraction de phosphates, de charbon, de cuivre ou d'or. Il est également présent dans l'eau de mer, à raison de 3 mg/m³.

On distingue les ressources primaires d'uranium (ou ressources en terre) des ressources secondaires, qui sont essentiellement le fruit du recyclage (direct ou différé) de matières nucléaires (civiles ou militaires).

Les ressources primaires

L'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) et l'OCDE/AEN (Organisation de Coopération et de

Développement Économique/Agence pour l'Énergie Nucléaire) répertorient les données sur les ressources en uranium, qu'elles éditent tous les deux ans dans leur « Livre rouge ». Le tableau 1, extrait de l'édition 2008, présente la meilleure évaluation actuellement disponible des ressources conventionnelles en uranium de la planète.

Les ressources primaires (dites classiques ou conventionnelles) sont les ressources ayant déjà fait l'objet d'une exploitation industrielle. Elles se subdivisent en diverses catégories, par degré de connaissance géologique des gisements et par catégorie de coût de récupération de l'uranium. Elles comportent les « ressources identifiées » (qui sont le regroupement des ressources « raisonnablement assurées » et des ressources « présumées »), autrement dit les gisements découverts, étudiés et correctement évalués, ainsi que leurs prolongements immédiats. Les ressources classiques comportent aussi des ressources « non découvertes », dont l'évaluation est faite à dire d'expert, sur la base des connaissances et raisonnements géologiques du moment.

Les réserves mondiales identifiées, du moins celles estimées récupérables pour un coût inférieur à 130 \$ par kg d'uranium, étaient, en 2007, de 3,3 millions de tonnes, auxquelles il convient d'ajouter 2,1 millions de tonnes de ressources présumées. Compte tenu d'une consommation actuelle de l'ordre de 65 000 tonnes par an (cf. supra), les ressources identifiées correspondraient à près de quarante-cinq années de fonctionnement des réacteurs en service. Mais, selon l'AEN, 10 millions de tonnes d'uranium resteraient à découvrir. A ces quantités, on peut aussi ajouter environ 22 millions de tonnes d'uranium susceptibles d'être extraites de minerais de phosphates (à des prix plus élevés) (cf. les figures 2 et 3).

Il faut noter que ces réserves sont en grande partie accessibles au cours actuel du marché, qui a remonté très fortement depuis 2007, atteignant actuellement environ 60 USD/lbU308, pour les contrats de long terme (cf. la figure 7).

La production mondiale d'uranium s'établit à environ 40 000 tonnes. Elle est en croissance assez marquée, notamment grâce à une augmentation importante de la production kazakhe. La couverture de la différence entre production et consommation reste assurée grâce à un déstockage important de ressources secondaires.

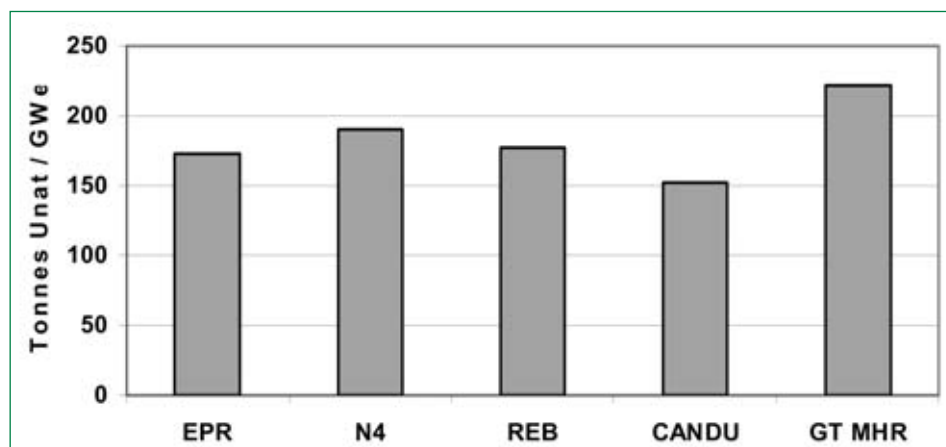


Figure 1 : Consommation d'uranium par filières de réacteurs pour les réacteurs EPR, N4 (réacteur à eau pressurisée de 2^e génération), réacteur à eau bouillante standard, CANDU canadien à eau lourde et réacteur à haute température GT-MHR.

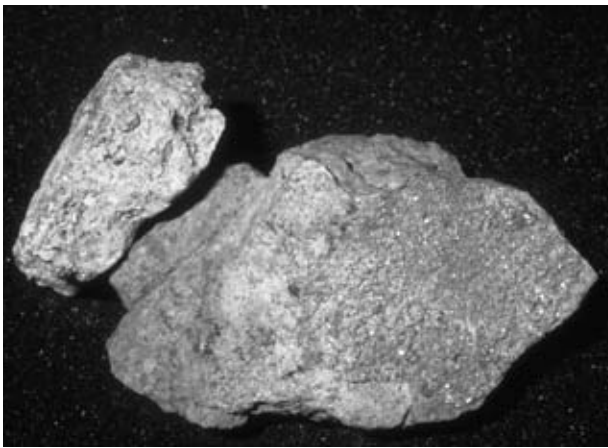


Figure 2 : Minerai d'uranium, source AREVA.



Figure 3 : Mine à ciel ouvert du site Mc Lean Lake, au Canada (source AREVA).

Les principaux pays où l'on extrait actuellement de l'uranium sont représentés sur le planisphère de la figure 4. Selon les dernières statistiques (Livre rouge 2008), le Canada et l'Australie représentent, à eux seuls, 44 % de la production mondiale d'uranium, et 8 pays seulement, à savoir le Canada (25 %), l'Australie (19 %), le Kazakhstan (13 %), le Niger (9 %), la Fédération de Russie (8 %), la Namibie (8 %), l'Ouzbékistan (6 %) et les Etats-Unis (5 %), contribuent à cette production à la hauteur de près des 93 %.

Les ressources secondaires

Depuis 1990, la production annuelle des mines, de l'ordre de 40 000 t, ne couvre que de 50 à 60 % de la consommation totale des réacteurs en uranium. Le complément d'offre, que l'on nomme « ressources secondaires », correspond à de l'uranium déjà extrait, c'est-à-dire à de la matière déjà stockée ou déjà utilisée, mais retraitée afin d'être réutilisable.

De 1945 à 2006, la production mondiale d'uranium aurait dépassé les besoins d'environ 625 000 t d'uranium. (La figure 5 montre ce désajustement structurel entre la production et la demande).

L'analyse traditionnelle opérée par les spécialistes du secteur distingue trois origines différentes de ces ressources secondaires :

- ✓ les stocks d'uranium (naturel et enrichi, d'origine tant civile que militaire) ;
- ✓ l'uranium produit par ré-enrichissement d'uranium appauvri ;
- ✓ enfin, l'uranium et le plutonium obtenus par traitement/recyclage du combustible utilisé extrait des réacteurs.

Le déstockage d'uranium militaire s'inscrit dans le cadre d'accords stratégiques pour la réduction des arsenaux. Il est

	Ressources conventionnelles ou classiques (MtU)			
	Ressources identifiées		Ressources non découvertes	
	Raisonnement assurées	Présumées	Pronostiquées	Spéculatives
< 40 USD/kgU (15 USD/lbU3O8)	1,8	1,2	1,9	
40-80 USD/kgU (15-30 USD/lbU3O8)	0,8	0,6		4,8
80-130 USD/kgU (30-50 USD/lbU3O8)	0,7	0,3	0,8	
> 130 USD/kgU (> 50 USD/lbU3O8)				3,0
Sous Total	3,34	2,13	2,8	7,8
TOTAL	5,5		10,5	

Tableau 1 : Ressources conventionnelles mondiales en uranium. Les ressources sont données en millions de tonnes d'uranium et les prix en US dollar/kg d'uranium ou par livre britannique (lb) d'oxyde U3O8, unité usuelle des mineurs.

Source : AIEA/OCDE 2008.

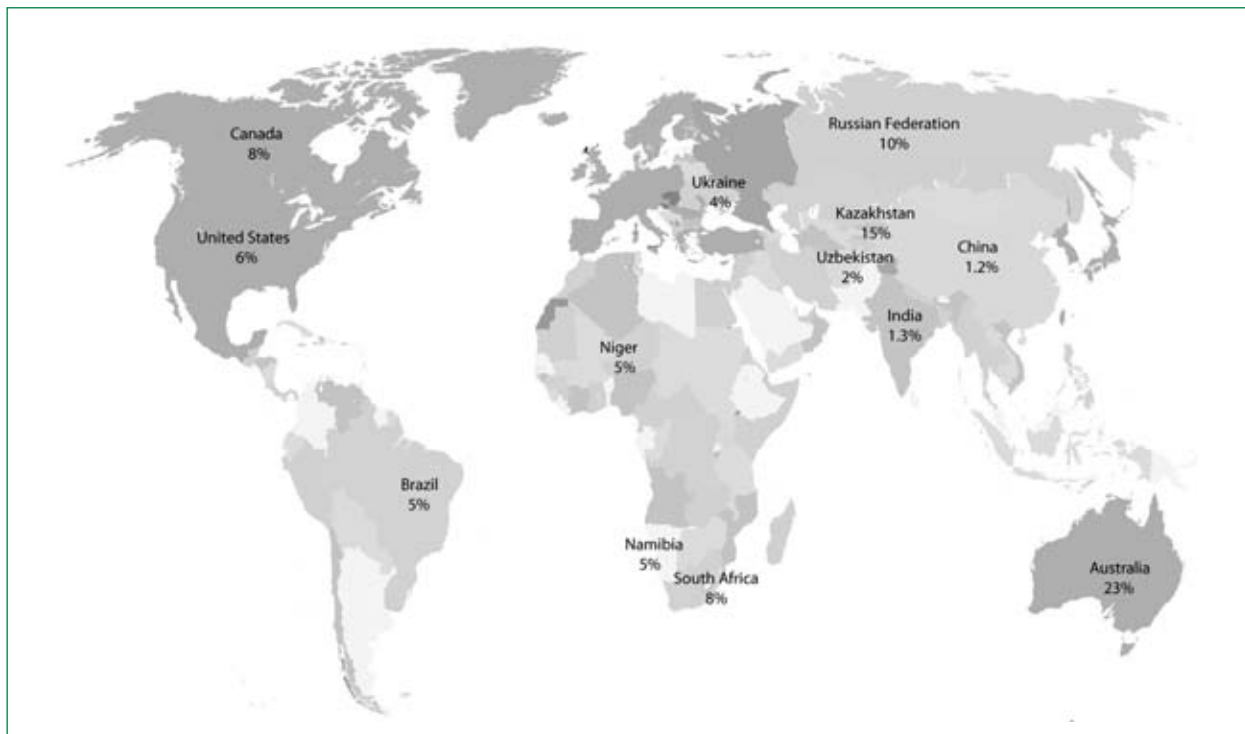


Figure 4 : Répartition mondiale des ressources identifiées d'uranium (<130 \$/kg d'U).
Source : AIEA/OCDE 2008.

en effet précisé, dans les accords russo-américains, que la Fédération de Russie transformerait (sur une période de 20 ans) 500 t d'uranium hautement enrichi (issu de son armement nucléaire) en uranium faiblement enrichi. De leur côté, les Etats-Unis se sont engagés à assurer le traitement final de près de 375 t d'uranium hautement enrichi pour alimenter des réacteurs commerciaux, des réacteurs de recherche, ou des réacteurs de propulsion navale. Ces quantités contribuent aujourd'hui encore à alimenter les marchés de l'uranium et de l'enrichissement.

Le second moyen de compléter les ressources primaires actuelles consiste à ré-enrichir de l'uranium appauvri. En

effet, selon le prix de l'uranium naturel et le coût des services d'enrichissement, un intérêt économique à enrichir de l'uranium appauvri à des teneurs plus élevées que celles correspondant à l'équilibre économique en vigueur est susceptible de se faire jour. La hausse récente du cours de l'uranium naturel a ainsi conduit à mobiliser les quantités d'uranium appauvri produites lors de périodes où l'uranium était bon marché : les prix élevés atteints par l'uranium naturel permettent en effet, dès à présent, d'exploiter le différentiel des teneurs en ^{235}U constaté entre les uraniums appauvris les plus « riches » et les taux de rejet actuels. Une estimation – prudente – de ce volume aboutit à 2 000 ou 3 000 t d'ura-

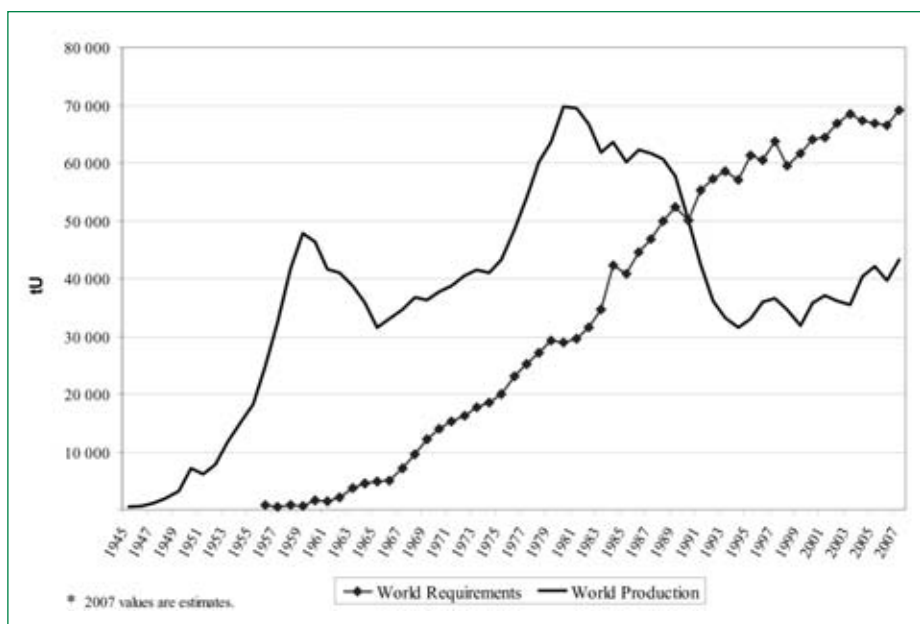


Figure 5 : Production et demande annuelles d'uranium (1945-2007).

Source : AIEA/OCDE 2008.

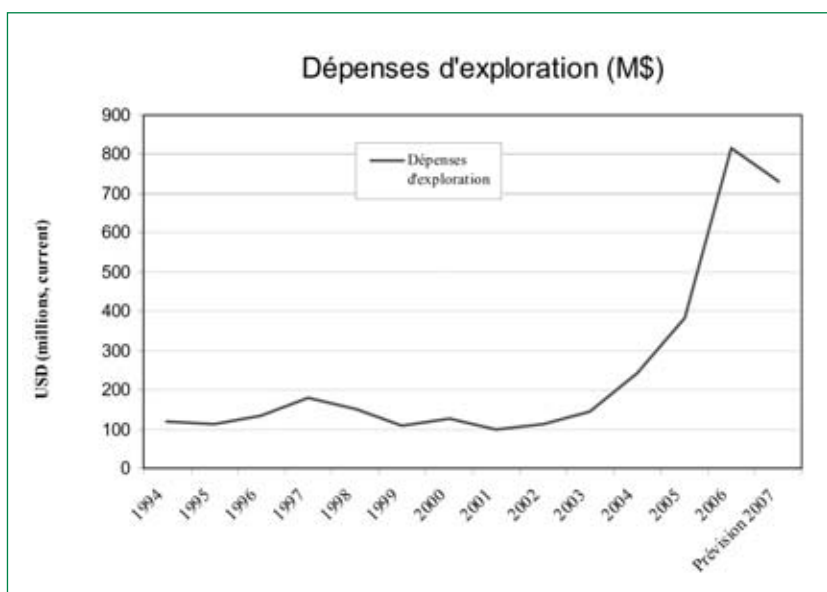


Figure 6 : Évolution des dépenses de prospection et de développement.

Source : AIEA/OCDE 2008.

nium par an. Ce rythme dépendra à la fois du prix de marché de l'uranium naturel et des capacités industrielles. Ces opérations pourront s'étager sur 30 à 50 ans, c'est-à-dire sur une durée d'ordre comparable à celle de la constitution des stocks actuels.

La troisième ressource secondaire, le recyclage (que nous présenterons plus loin) porte sur les progrès techniques des prochaines décennies, seuls capables d'infléchir les tendances à long terme (les deux premières sources secondaires ayant chacune une durée limitée).

Géopolitique de l'uranium

La comparaison entre les niveaux de demande et les ressources d'uranium actuelles montre que la production de combustible nucléaire peut être assurée à moyen terme sans encourir le risque majeur d'une flambée des prix, qui mettrait la compétitivité du nucléaire en danger. Signalons d'ailleurs que la part de l'uranium dans le coût de production de l'énergie électronucléaire est de l'ordre de 5 % – à comparer à celles du charbon et du gaz dans la production d'électricité thermique, qui dépassent les 50 % : la vulnérabilité de la filière nucléaire en est réduite d'autant.

Ainsi, plus que le pétrole et le gaz, l'énergie nucléaire est en mesure de garantir la sécurité de l'approvisionnement en électricité. En outre, l'uranium provient de sources diversifiées. Les principaux fournisseurs opèrent dans des pays politiquement stables. Les pays de l'OCDE ont approximativement 40 % des ressources d'uranium identifiées, ce qui est comparable au charbon, et bien supérieur à leur taux de détention des ressources en pétrole (de l'ordre de 7 %) ou en gaz (de l'ordre de 12 %).

Par ailleurs, les pays de l'OCDE sont autosuffisants pour les services essentiels allant de l'uranium au combustible fini : conversion, enrichissement et fabrication. Ainsi, la production électrique française est dans une large mesure (on pourrait dire quasi totalement) d'origine domestique.

Le fort potentiel énergétique du combustible, la stabilité de sa forme céramique et la faible part du combustible dans

le coût de production de l'électricité nucléaire font qu'il est usuel de conserver des réserves de combustible tout au long de la chaîne de fabrication. Ces réserves contribuent à assurer une très grande sécurité d'approvisionnement de la filière électronucléaire, en laissant un délai important (de plusieurs années) à la recherche d'une solution alternative, en cas de défaut d'une source.

Cependant, les stocks commerciaux excédentaires sont désormais proches de la résorption ; ceux des matières militaires réputés mobilisables sont, eux aussi, théoriquement bien connus et leur date de résorption se rapproche (2013, pour la plus grosse part). Cela impose que la production minière mondiale d'uranium rejoigne la demande et passe du niveau actuel (d'un peu plus de 40 000 t/an) à un niveau d'au moins 60 000 t/an. Le délai, pour ce faire, peut être estimé significativement à moins de 10 ans.

Les producteurs d'uranium, qui ont conscience de ce déficit, cherchent à accroître leurs capacités de production en consacrant de nouveaux investissements à la relance de la prospection (cf. la figure 6). Ainsi, les activités actuelles de prospection et d'ouverture de nouvelles mines sont intenses ; des projets très significatifs sont lancés tant au Canada qu'en Afrique (comme à Imouraren, au Niger) ou en Australie.

Ainsi, selon les projections actuelles, la capacité théorique de production minière atteindrait plus de 95 000 tonnes par an en 2015, contre 54 000 tonnes en 2007 (cf. la figure 8).

L'évolution des prix de l'uranium

Il existe deux types de prix pour l'uranium : les prix dits *spot* provenant de négociations du minerai sur de courtes périodes (de 2 à 12 mois) et de faibles volumes (n'excédant généralement pas les cent tonnes) et les prix des contrats à long terme. Ainsi, en 2007, 30 % de l'uranium consommé était issu de sources secondaires (excédents commerciaux et surplus des stocks militaires), 15 % du marché *spot* et 55 % provenaient de transactions à long terme (la prospection ayant été stoppée pendant vingt ans, les fournisseurs préfèrent vendre sur le long terme).

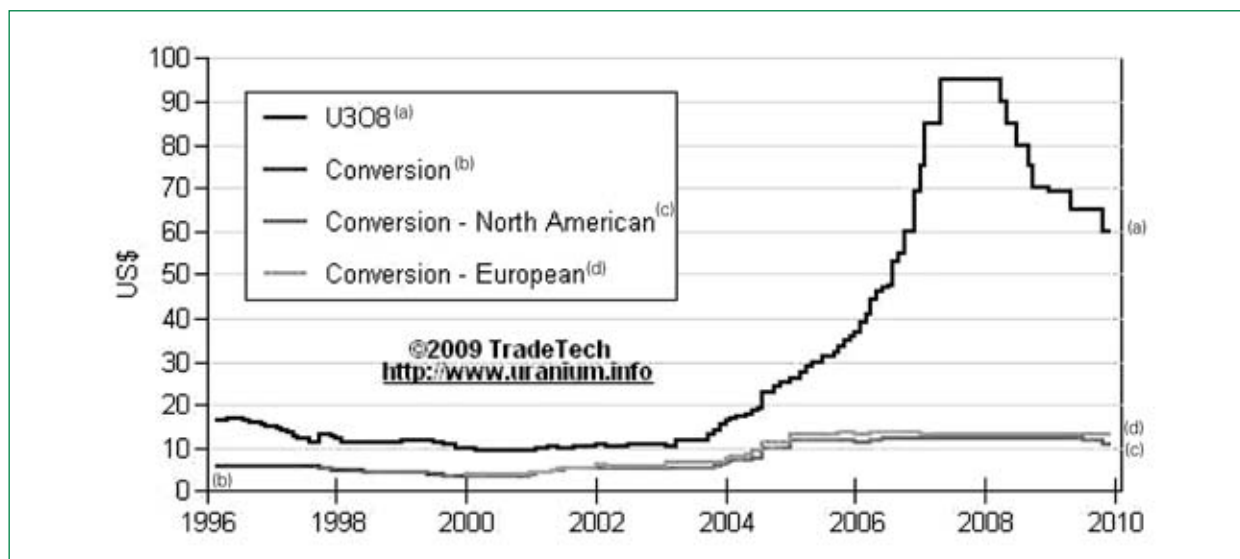


Figure 7 : Evolution du prix de l'uranium des contrats à long terme en dollars/livre d'oxyde U3O8.
Source : Trade Tech.

Le prix de l'uranium a atteint un premier record historique dans les années 1970, sous l'effet de la demande d'uranium pour les besoins militaires et du développement de l'électronucléaire civil. Après une première chute en pente raide, il a amorcé un lent tassement, au cours des vingt dernières années, qui s'explique par le développement du nucléaire, plus lent que prévu à cette époque, et par une offre supérieure à la capacité, qui a entraîné l'accumulation de stocks importants. Ce prix est tombé à son niveau le plus bas en 2000, avant d'entamer une ascension jusqu'en 2008, à mesure que le marché prenait conscience de la réalité d'une pénurie potentielle de l'offre à court ou moyen terme, mais également à cause de spéculations, puis il a chuté significativement, les effets spéculatifs se dégonflant en 2008 et 2009, ce qui n'est pas sans lien avec la crise financière qui a affecté l'ensemble des marchés des matières premières (cf. la figure 7).

Prospective de l'offre et de la demande jusqu'en 2030

À court terme, les besoins en uranium des réacteurs sont essentiellement déterminés par la puissance nucléaire installée, si bien que les besoins peuvent être prédits avec une certitude relative, le parc nucléaire étant bien connu (c'est l'inélasticité que nous avons évoquée plus haut). Les améliorations possibles dans le moyen et le long terme sont, pour l'essentiel, contenues dans les termes de la formule décrite au début de cet article : diminution de la teneur de rejet de l'opération d'enrichissement, augmentation du taux de combustion des réacteurs et recyclage des combustibles usés.

La diminution de la teneur de rejet de l'opération d'enrichissement

Lors du processus d'enrichissement de l'uranium naturel, on augmente la teneur de l'isotope ^{235}U , de sa valeur initiale

(environ 0,7 %) à une valeur se situant entre 3,5 et 5 %, selon le type de combustible et le procédé utilisé. Pour une valeur d'enrichissement final souhaitée (par exemple de 4 %), le besoin en uranium naturel passe de 7,6 à 7 kg pour produire 1 kg d'uranium enrichi quand la teneur de rejet est ramenée de 0,20 à 0,15 %, soit un gain de 9 %. En pratique, les gains permis au cours des dernières années par le choix de teneurs de rejet plus faibles, liés à un prix de l'uranium à la hausse, sont de cet ordre.

L'augmentation du taux de combustion

L'augmentation, qui a été significative au cours du temps, du taux de combustion des combustibles permet, entre autres avantages, des économies sur la consommation d'uranium naturel, même si cette augmentation s'accompagne d'une augmentation de l'enrichissement en ^{235}U . Le tableau 2 montre les ordres de grandeur de ces gains dans les conditions de gestion, typiques, de l'EPR, le passage de 45 à 60 GWj/t (toutes choses étant égales par ailleurs) permettant un gain d'environ 7 % d'uranium naturel. Ce phénomène s'est actuellement ralenti en France, car il est en concurrence avec d'autres phénomènes, tels que les besoins de flexibilité de la charge des réacteurs et de la gestion de leurs périodes d'arrêt. La tendance demeure, toutefois, et l'arrivée de nouveaux réacteurs devrait contribuer à la maintenir.

Le recyclage des combustibles usés

Les combustibles usés comportent un potentiel énergétique important, constitué par l' ^{235}U résiduel et le plutonium, celui-ci étant produit pendant l'irradiation de l'uranium. Leur recyclage, pratiqué couramment en France et dans plusieurs autres pays, est un moyen supplémentaire de réaliser des économies d'uranium naturel. Le recyclage s'intensifie actuellement : EDF est passé en début 2010 à 1 050 t/an (au

Taux de combustion	GWj/t	45	60
Enrichissement en ²³⁵ U	%	4	4,9
Uranium enrichi consommé	tonnes/TWhe	2,7	2,1
Uranium naturel consommé	tonnes/TWhe	22,3	20,8

Tableau 2 : Comparaison des taux de combustion et des consommations d'uranium naturel entre réacteurs actuels (données de la colonne de gauche) et réacteurs EPR (données de la colonne de droite).

lieu de 850 t/an). Dans le monde, les pays intéressés sont de plus en plus nombreux, avec, récemment, la Chine, qui souhaite développer cette technique.

Le recyclage de l'uranium « de retraitement » (URT)

Après irradiation dans le réacteur, l'uranium des combustibles UOX conserve un enrichissement légèrement supérieur à celui de l'uranium naturel. Typiquement, un combustible enrichi initialement à 4,7 %, avec un taux de combustion de 60 GWj/t, conserve un enrichissement résiduel en ²³⁵U de 0,8 %. Cet uranium peut alors être ré-enrichi en vue d'une nouvelle utilisation en réacteur. Cette pratique est associée à une certaine pénalité, car, du fait de la présence des isotopes absorbants ²³⁴U et ²³⁶U, il est nécessaire de sur-enrichir légèrement le combustible. Les économies en uranium naturel permises par ce recyclage sont néanmoins de l'ordre de 10 %.

Le recyclage du plutonium

Le plutonium produit durant l'irradiation des combustibles UOX peut être, selon la pratique courante en France et dans plusieurs autres pays, utilisé à son tour dans les combustibles MOX. A taux de combustion égal pour les deux types de combustible, le recyclage de la totalité du plutonium produit dans un parc d'un pays donné, dans un certain nombre de réacteurs, conduit à des économies d'uranium de l'ordre de 10 %.

Au total, un recyclage systématique de l'uranium et du plutonium permet de diminuer la consommation d'uranium d'environ 20 %.

Vers une meilleure gestion de l'uranium : le cas de l'EPR

L'EPR permet, par rapport aux réacteurs du parc actuel, une meilleure utilisation de l'uranium naturel.

D'une part, ce réacteur est prévu pour porter le combustible à des taux de combustion élevés (de l'ordre de 60 GWj/t), ce qui conduit à une économie en uranium naturel (cf. le tableau 2). D'autre part, le dessin du cœur du réacteur apporte deux caractéristiques nouvelles allant dans le même sens :

- ✓ l'utilisation d'un cœur plus volumineux (241 assemblages, contre 205 pour le palier N4 à puissance sensiblement égale) se traduit par une puissance volumique plus faible et la possibilité d'accommoder des gestions du combustible de type faible fuite ;

- ✓ la présence, en périphérie du cœur, d'un baffle lourd qui améliore l'économie des neutrons et, par conséquent, permet une meilleure utilisation de l'uranium.

Ces deux aspects permettent une économie d'environ 10 % qui s'ajoutent aux gains permis par les taux de combustion visés, de 60 GWj/t.

Enfin, le rendement thermodynamique légèrement plus élevé (à noter que le rendement est d'autant meilleur que le réacteur est construit en pays froid) permet une économie supplémentaire de quelques pourcents.

Bilan global à l'horizon 2030

Ainsi, à l'horizon 2030, de multiples voies sont possibles pour améliorer l'usage de l'uranium dans les réacteurs des parcs électronucléaires mondiaux. L'ensemble cumulé des effets décrits plus haut peut jouer raisonnablement sur une décreue, d'un ordre de quelques dizaines de pourcents, de la demande d'uranium rapportée aux TWh d'électricité produits.

L'autre facteur qui gouvernera le marché est l'augmentation prévue de la puissance installée. Selon les projections de l'AEN, d'ici à 2030, la puissance nucléaire installée devrait s'accroître, passant d'environ 370 GWe nets au début de 2007 à environ 509 GWe nets (hypothèse basse, +38 %) ou à 663 GWe nets (hypothèse haute, +80 %). La demande respective en uranium serait alors de près de 95 000 t à 120 000 t d'uranium par an, dans l'hypothèse pessimiste d'une teneur de rejet de 0,3 %.

Les conditions du marché de l'uranium constituent le principal facteur motivant les décisions de mettre en place de nouveaux centres de production minière ou d'agrandir les centres existants.

La situation de l'offre et de la demande est en train d'évoluer rapidement, car la fermeté du marché incite à intensifier l'activité. Non seulement la demande devrait, selon les projections (cf. la figure 8), s'accroître jusqu'en 2030, mais des anticipations d'augmentation dynamique de la capacité théorique de production ont notablement modifié la relation entre l'offre et la demande que l'on a connue dans un passé récent, de sorte que même les besoins découlant du scénario de demande correspondant à l'hypothèse haute, pourraient être satisfaits jusque vers 2030, à condition que tous les centres de production (existants, commandés prévus et envisagés) soient mis en place et que la pleine capacité de production ait été atteinte. En revanche, la capacité théorique de tous les centres de production existants et commandés (en cours de développement) devrait satisfaire environ 90 % des besoins dans l'hypothèse basse,

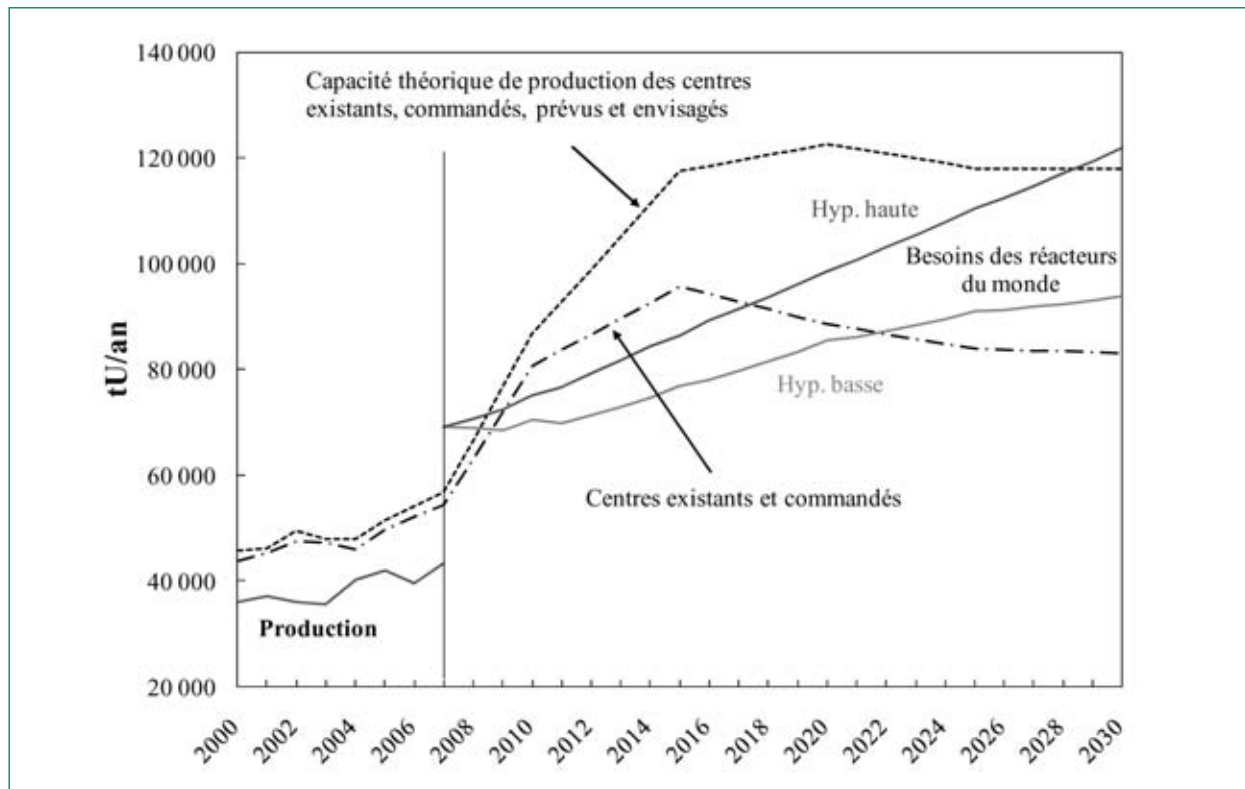


Figure 8 : Capacité de production d'uranium et besoins des réacteurs.
Source : AIEA/OCDE 2008.

mais seulement un peu moins de 70 % dans l'hypothèse haute en 2030.

Face à ces chiffres, il est pertinent de rappeler que la production mondiale n'a jamais dépassé 90 % de la capacité théorique de production déclarée. Par conséquent, même si l'industrie minière a réagi vigoureusement au signal du marché que constituent des prix élevés, une production primaire supplémentaire et des approvisionnements secondaires seront nécessaires.

Au-delà de 2013 (environ), les sources secondaires d'uranium par déstockage devraient devenir moins disponibles, ce qui implique que les besoins des réacteurs devront être de plus en plus satisfaits par la production primaire. Inversement, les possibilités d'économie d'uranium décrites plus haut pourront se développer. Au total, le marché devrait s'accroître sans crise majeure. La tendance reste à des prix qui devraient s'établir durablement à des niveaux supérieurs à ceux relevés aux cours des deux dernières décennies : tant le coût d'accès aux ressources qui seront mobilisées que l'anticipation sur les marchés de long terme (les réacteurs nucléaires de dernière génération fonctionneront au minimum durant 60 ans) devraient maintenir les prix à des niveaux comparables au niveau actuel, voire à des niveaux significativement supérieurs, en fin de période.

Au-delà de 2030-2040 : valoriser l'uranium 238 via les réacteurs à neutrons rapides

Même si les performances en termes de consommation d'uranium s'améliorent chaque jour, via le recyclage et la

mise en œuvre à court terme des réacteurs de 3^e génération avec l'EPR, les performances décrites ci-dessus peuvent apparaître encore modestes, en termes d'utilisation de l'uranium naturel.

En outre, les tendances mises en évidence au paragraphe précédent vont se poursuivre au-delà de 2030 et les parcs de réacteurs nucléaires devraient continuer à s'accroître, ce mécanisme correspondant, d'une part, à l'accroissement de la production électrique et, d'autre part, à la volonté de développer des centrales émettant peu de gaz à effet de serre. La figure 9 montre que, autour de 2100, selon différents scénarios de croissance de la puissance nucléaire (d'origine IASA), les réserves totales au sens de l'OCDE et de l'AIEA, soit 15 millions de tonnes issues de ressources conventionnelles et 22 millions de tonnes extraites des phosphates, devraient être épuisées. Mais la seconde courbe montre que les réacteurs construits vers 2050 engageront déjà des réserves d'uranium fortement spéculatives : ainsi, c'est dès le milieu du siècle qu'il faudra disposer de techniques qui soient capables de détendre ces tensions annoncées.

Le niveau actuel des connaissances technologiques permet d'ores et déjà d'anticiper qu'à un terme de quelques décennies, il sera possible d'utiliser la quasi-totalité de l'²³⁸U, via la mise en service graduelle de réacteurs à neutrons rapides (RNR). Ces réacteurs permettent, en effet, bien mieux la transmutation de l'²³⁸U en ²³⁹Pu, un isotope dont la fission est plus facile à obtenir.

Les travaux de recherche et développement portant sur cette « filière RNR » sont notamment mis en œuvre par le

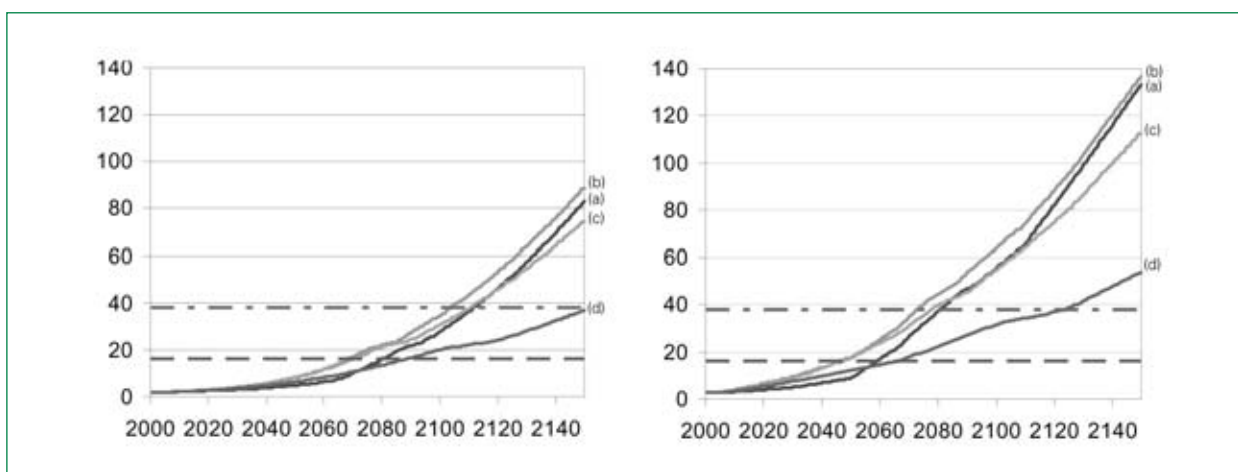


Figure 9 : Consommation des réserves d'uranium (à gauche) et engagement de ces mêmes réserves (à droite).

Scénarios : 1: IAS A2 (a) 2: IAS A3 (b) 3: IAS B (c) 4: IAS C2 (d).

Source : CEA/I-tésé 2009.

CEA, en étroite collaboration avec l'industrie. Ils devront permettre, dans un premier temps, de concevoir un prototype (ASTRID), qui sera construit sur le sol français d'ici une dizaine d'années. Les objectifs portent tant sur son degré d'innovation que sur l'amélioration de la sûreté et sur sa capacité à préfigurer la filière nucléaire du futur.

Via cette technologie, les stocks d'uranium appauvri disponibles, en combinaison avec les combustibles usés contenant du plutonium, permettront, à partir du siècle prochain, de s'affranchir totalement des mines d'uranium et ce, pendant plusieurs millénaires : l'on valorisera, dès lors, les 99 % de l'uranium extrait mis actuellement de côté. De surcroît, la radio-toxicité des actinides mineurs (des éléments radioactifs présents dans les combustibles nucléaires usés) pourra être diminuée grâce à leur transmutation en réacteur, réduisant ainsi la toxicité des colis de déchets à stocker.

Mais qui dit optimisation des ressources et économies d'uranium dans les systèmes du futur à neutrons rapides pose la question de la disponibilité du plutonium. En effet, cet élément doit être introduit dans le combustible des systèmes du futur, ce qui en fait un enjeu fort pour un déploiement d'importance des RNR. Les calculs de l'Institut de technico-économie (I-tésé) du CEA montrent que, selon les scénarios de croissance du nucléaire envisagés, les quantités de plutonium accessibles via le recyclage des combustibles usés des réacteurs à eau permettraient d'installer de l'ordre de 2 TWe de puissance nucléaire RNR en 2100 (soit 5 fois plus que le total de la puissance actuelle). Si la puissance de cette époque est encore plus élevée, ce qui apparaît dans certains scénarios, il faudra alors probablement tabler sur une coexistence des deux filières REL et RNR au-delà du tournant de ce siècle, voire recourir à des cycles nouveaux, tel que le cycle nucléaire basé sur le thorium.

Au-delà des réacteurs à fission : la fusion nucléaire et les besoins en lithium

A plus long terme, on envisage de nouveaux types de réacteurs nucléaires basés sur la réaction de fusion d'iso-

topes de l'hydrogène (deutérium et tritium). La fusion nucléaire consommerait 3 tonnes de lithium par an et par GWe (pour produire le tritium), soit de l'ordre de 0,01 % de la production annuelle actuelle de lithium (sans compter les premières charges en lithium des couvertures tritigènes).

Les ressources en lithium sont estimées entre 17 et 30 millions de tonnes (suivant les sources), les réserves exploitables en 2008 étant comprises entre 4 et 16 millions de tonnes. Dans l'hypothèse (très « majorante ») d'une couverture de la totalité de la production nucléaire mondiale par des réacteurs à fusion, les gisements miniers en lithium seraient épuisés au bout de 5 000 ans. Ce sont donc plutôt les autres usages de cet élément qui détermineront les tensions sur les réserves. L'extraction du lithium de l'eau de mer pourrait (il en va d'ailleurs de même en ce qui concerne celle de l'uranium) repousser d'éventuelles limites hors de la vision humaine (à l'horizon de plusieurs millions d'années).

Le problème est moins la quantité de la ressource en lithium disponible que sa disponibilité. En effet, les ressources en lithium sont, pour plus de 70 %, situées dans le « triangle du lithium », dans les salars andins du Chili, de la Bolivie et de l'Argentine. La production de lithium a été en 2008 de 22 800 tonnes. Quatre pays se sont partagé 93 % du marché : le Chili (12 000 tonnes), l'Argentine (3 200 tonnes), l'Australie (6 900 tonnes) et la Chine (3 500 tonnes) (Source : US Geological Survey). De surcroît, l'usage du lithium peut se tendre notablement avec les besoins d'industries telles que la production d'accumulateurs électriques : ces marchés se développent actuellement, en forte avance de phase par rapport à la fusion nucléaire.

Conclusion

Aujourd'hui, le parc nucléaire mondial est constitué en majorité de réacteurs à eau légère (REL), très sûrs et compétitifs. Cependant, l'efficacité dans l'utilisation des ressources est un indicateur fondamental du développement durable dans le secteur de l'énergie.

La dépendance du nucléaire actuel vis-à-vis de la disponibilité en uranium peut être qualifiée de faible. D'une part, les coûts de cette ressource sont modestes au regard du coût de production de l'électricité, d'autre part, des stocks stratégiques existent et, enfin, les ressources sont importantes. En effet, la connaissance actuelle des ressources en uranium et les perspectives de développement du nucléaire montrent que les seules ressources formellement identifiées (raisonnablement assurées) permettent près d'une centaine d'années de fonctionnement du parc à son niveau actuel, ce qui est une bonne performance, par rapport à d'autres énergies.

Le nucléaire est toutefois appelé à se développer fortement. Nous avons passé en revue les principales directions des progrès techniques qui permettront de continuer à diminuer la quantité d'uranium consommée par TWh d'électricité produit. La France est le leader mondial concernant nombre d'entre elles (notamment le recyclage des combustibles usés). A l'horizon de quelques dizaines d'années, les améliorations de la gestion de l'uranium dans les réacteurs à eau pourraient ainsi permettre de gagner encore plusieurs dizaines de pourcents dans ce domaine.

Au-delà, il faudra faire mieux que se contenter de ne consommer que moins de 1 % de l'uranium naturel extrait. Il faudra donc faire évoluer le parc et remplacer les REL par des réacteurs utilisant beaucoup mieux l'uranium naturel, comme les réacteurs à neutrons rapides (RNR) (qui peuvent produire de l'ordre de 100 fois plus d'énergie avec la même

quantité d'uranium naturel). Les défis à relever par ces RNR sont principalement ceux de la sûreté et de l'économie. Notons que si leur coût d'investissement apparaît aujourd'hui plus élevé que celui des REL, c'est justement un prix de l'uranium naturel suffisamment haut qui les rendra compétitifs... un prix qui sera atteint avec la raréfaction graduelle des ressources naturelles. Un développement important de ces réacteurs est prévu vers la moitié de ce siècle. Le CEA travaille activement à leur mise au point avec ses partenaires, dans le cadre de la loi française du 28 juin 2006 et ce, en coopération avec de nombreux pays.

A plus long terme, des possibilités alternatives sont actuellement en cours de développement *via* la fusion nucléaire, attendue pour la fin de ce siècle. Si la réussite de cette grande aventure scientifique et technologique ne peut être assurée, nous savons déjà que cette filière ne devrait pas rencontrer d'obstacle significatif en termes de disponibilité de sa ressource principale, le lithium.

Au total, un développement important du nucléaire, attendu pour faire face aux enjeux environnementaux très forts qui sont les nôtres, ne devrait pas être significativement limité par les ressources disponibles, grâce à des choix technologiques appropriés. Une des missions du CEA est d'y contribuer en très bonne place.

Note

* Administrateur général du CEA.