

# Le cycle du combustible nucléaire

## Les aspects économiques de l'offre et de la demande d'uranium

par Ph. Darmayan\*

Le marché de l'uranium est un marché jeune dont les "lois" n'apparaissent pas encore très nettement, ce qui risque de désorienter les observateurs et les décideurs qui souhaiteraient prévoir son évolution. Il présente certaines caractéristiques très différentes de celles du marché d'autres minéraux, dont ceux qui servent à la production d'énergie.

Premièrement, l'uranium a des emplois très limités, pratiquement réservés à la technologie militaire et à l'énergie nucléaire civile. De 1942 à 1974, les besoins militaires d'uranium se sont élevés à plus de 200 000 tonnes d'uranium, soit près de 50% du total de la production mondiale pendant la même période. Ces besoins ne jouent plus aujourd'hui un rôle capital, seule la production d'électricité détermine désormais pratiquement l'allure du marché de l'uranium. Très peu d'autres métaux ont des emplois aussi limités; ce sont entre autres le barium (qu'on utilise presque en totalité sous forme de baryte pour le forage des puits de pétrole), le gallium (pour la fabrication de diodes et de superconducteurs) et le titane (pour la construction aéronautique).

La seconde caractéristique remarquable est qu'il n'y a pas de succédanés directs de l'uranium. Dans une centrale nucléaire achevée, on ne peut pas remplacer l'uranium par un autre combustible. C'est peut-être le seul métal dont la substitution soit quasi impossible, à moins de procéder à de longues et coûteuses modifications du système de production d'énergie. Le barium, le gallium et le titane eux-mêmes peuvent être remplacés par d'autres métaux lorsque leur prix devient excessif.

\* M. Darmayan est économiste chez Uranium Pechiney Ugine Kuhlmann et organise les réunions d'un groupe de travail de l'Institut de l'uranium chargé d'études économiques sur l'offre et la demande. Il tient à remercier ses collègues de l'Institut qui l'ont aidé à rédiger le présent article.

On peut par exemple, en cas de besoin, fabriquer en aluminium ou en aciers spéciaux la plupart des pièces en titane.

Troisièmement, l'uranium présente des caractéristiques économiques insolites par rapport aux autres matières premières servant à la production d'énergie. Les frais de traitement du minéral représentent une très forte proportion (environ 88%) du coût des assemblages combustibles qu'on introduit dans les réacteurs nucléaires, alors que cette proportion n'est respectivement que de 42 et 33% dans les centrales chauffées au charbon et au mazout. Mais en valeur absolue, le combustible nucléaire est peu coûteux ce qui, en dépit de l'importance des dépenses initiales (principalement consacrées à l'usine d'enrichissement et à la centrale elle-même) permet de prévoir le bilan général de l'exploitation d'une centrale électrique. Un des effets pratiques de ce faible coût du combustible est que la quantité d'uranium nécessaire pour alimenter une centrale pendant les 30 années que peut durer son exploitation peut être considérée comme engagée, quelles que soient, ou presque, les variations du coût de l'uranium naturel.

Quatrièmement, en ce qui concerne les frais de transport et de stockage, l'uranium est avantagé par rapport à toutes les autres sources d'énergie, notamment le pétrole et le charbon (voir tableau 1). Cette facilité de stockage, jointe au besoin que ressentent les exploitants de centrales d'assurer à long terme leurs approvisionnements en combustible, explique l'importance des stocks d'uranium que possèdent actuellement les compagnies d'électricité du monde entier (93 000 tonnes d'uranium à la fin de 1979).

Enfin l'industrie nucléaire comporte des délais exceptionnellement longs. Tant en ce qui concerne

Tableau 1. Besoins annuels de combustible d'une centrale de 1000 MW(e) [1]

	Charbon	Mazout	Nucléaire (réacteur à eau sous pression)
Tonnage	2,2 x 10 <sup>6</sup> tonnes d'équivalent charbon	1,5 x 10 <sup>6</sup> tonnes d'équivalent pétrole	150 tonnes d'uranium naturel
Stockage	40 ha (400 x 100 m)	25 ha (50 réservoirs de 30 000 m <sup>3</sup> )	< 50 m <sup>2</sup> (66 conteneurs de 3 tonnes)
Coût approximatif du combustible (en F français)	450 millions	600 millions	60 millions
Transport	22 vraquiers de 100 000 t (port en lourd) un tous les 16 jours	1500 péniches de 1000 tonnes — quatre par jour	2 wagons ou 7 camions

Tableau 2. Préviation de la puissance électrique installée (en GW<sub>e</sub>) dans le monde à l'exception des pays à économie planifiée [2]

	DOE (faible)	NAC	Institut de l'U (faible)	NUKEM	DOE (forte)	Institut de l'U (forte)	INFCE (faible)	NUEXCO	NAC d'après compagnies d'électricité	INFCE (forte)
	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1979	1980	1980	1979
1985	209	208	227	227	242	227	245	264	264	274
1990	292	306	335	345	360	350	373	328	375	462
1995	388	395	356	—	493	494	550	—	—	770

- DOE: Department of Energy
- NAC: Nuclear Assurance Corporation
- NUKEM: Nucleare Chemie und Metallurgie
- NUEXCO: publication paraissant à Menlo Park Calif.

l'extraction que la production de courant, il peut s'écouler dix ans ou davantage entre le moment où l'on décide d'exécuter un projet et celui où une mine ou une centrale nouvelles entrent en service. Ces longs délais font que l'on a déjà pratiquement fixé la capacité maximale des centrales nucléaires et des usines d'enrichissement à installer d'ici la fin des années 1980. C'est aussi pourquoi l'on connaît avec une grande certitude la capacité maximale de production d'uranium dont on pourra disposer d'ici là.

Pour toutes ces raisons, le marché de l'uranium dépend beaucoup des prévisions relatives à la production d'électricité par voie nucléaire ainsi que des perspectives du marché des principaux services du cycle du combustible, notamment de l'enrichissement. Cela ne suffit pas toutefois à protéger entièrement l'uranium contre les fluctuations possibles de l'offre et de la demande jusqu'en 1990 et au-delà. Les réductions sensibles opérées sur les programmes d'installation de centrales depuis 1976, l'excédent de la capacité d'enrichissement et l'allongement des délais de mise en service de nouvelles installations nucléaires, tout cela joint à la souplesse que confère la facilité de stockage de l'uranium, justifie une observation attentive et continue de l'équilibre entre l'offre et la demande du métal.

L'Institut de l'uranium, créé en 1975, est une association industrielle internationale qui groupe des représentants des producteurs d'uranium et des compagnies d'électricité. Plus de 50 grandes sociétés appartenant à 14 pays participent à ses travaux. L'un des principaux buts que poursuit l'Institut est de mettre les compétences de ses membres au service d'une meilleure compréhension du marché de l'uranium. Cette tâche incombe avant tout à un Comité de l'offre et de la demande créé en 1978, et qui a pour fonctions d'étudier les perspectives de l'offre et de la demande d'uranium, et de publier des rapports analysant les facteurs qui agissent sur le marché. De plus, l'Institut de l'uranium organise chaque année en septembre un colloque lors duquel de nombreux participants: producteurs, consommateurs, consultants, organismes publics, font une étude détaillée du marché de l'uranium.

Le Comité de l'offre et de la demande met actuellement à jour ses prévisions et publiera cette année un nouveau rapport. Entre-temps, on peut prévoir assez nettement les tendances probables en faisant appel aux exposés détaillés de certains aspects du marché de l'uranium présentés lors des colloques précédents.

### La souplesse de la demande

Le tableau 2 donne les prévisions faites en septembre 1980 par l'Institut de l'uranium sur la puissance nucléaire qui sera installée d'ici à 1995. D'après ces estimations\* qui tiennent compte de tous les réacteurs actuellement en service, en construction ou commandés ferme (en septembre 1980) la puissance nucléaire installée s'établira à 227 GW(e) en 1985 et 335 GW(e) en 1990. Si l'on y ajoute tous les réacteurs projetés (en septembre 1980) les chiffres prévus pour 1990 et 1995 sont portés respectivement à 350 et 494 GW(e).

Ces prévisions tiennent compte de l'état d'avancement de chaque réacteur en construction et de l'évolution de la production d'énergie par voie nucléaire dans chaque pays. Elles reposent sur l'hypothèse que, hors des Etats-Unis, les délais de construction ne dépasseront pas six ans. Quelque 20 centrales seulement, toutes encore aux premiers stades de la construction, sont jugées comme étant en difficulté et ne pouvant être mises en service que dans 8 ou 10 ans. Pour les Etats-Unis on a supposé que le délai serait plus long: dix ans. Il est encore trop tôt pour estimer l'influence que pourra exercer une attitude plus favorable de l'opinion à l'égard de l'énergie nucléaire.

Outre les prévisions sur la puissance nucléaire installée, les principaux facteurs qui agissent sur la demande d'uranium sont les teneurs de rejet des usines d'enrichissement, et la possibilité de recycler l'uranium et le plutonium dans les réacteurs à eau sous pression et les surgénérateurs rapides après retraitement du combustible irradié. Les techniques d'enrichissement actuelles permettent d'obtenir des teneurs de rejet de 0,15 à 0,30%. D'autres méthodes, qui en sont encore au stade expérimental, permettront peut-être de les ramener à 0,10, voire 0,05%. Le tableau 3 donne une indication de la mesure dans laquelle on pourrait réduire la consommation d'uranium en faisant varier les teneurs de rejet par rapport à un cas de référence défini par une concentration de produit de 3,25% d'U-235, une teneur de rejet de 0,20%, et l'absence de recyclage.

Toutefois, les producteurs d'électricité ne peuvent pas toujours profiter en pratique de la souplesse qui

\* Les estimations correspondantes faites par l'Evaluation internationale du cycle du combustible font l'objet de l'article de M. Bennett à la page 8 du présent Bulletin.

**Tableau 3: Réduction possible des besoins en uranium du fait de certaines modifications du cycle du combustible [1]**

Modification du procédé	Réduction de la consommation de l'uranium (en %)
Teneur de rejet amenée à:	
0,15%	7,3
0,10%	13,4
0,05%	18,6
Retraitement/recyclage:	
de l'uranium	19,0
de l'uranium et du plutonium	30,0
Utilisation générale du surgénérateur rapide:	approx. 99,0

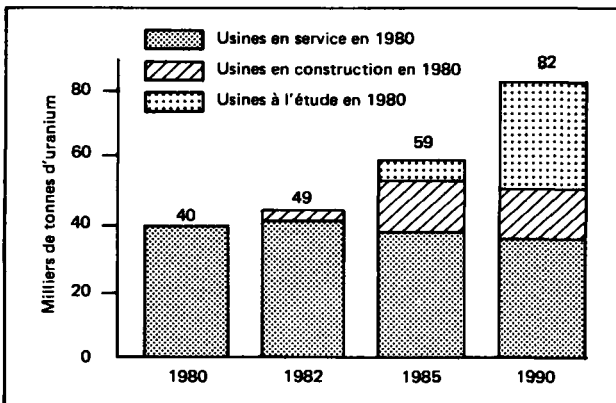
Dans le cas du recyclage, ces économies ne se réalisent qu'au bout de quelques années. Les réductions ci-dessus doivent être rapportées au cas type ci-après: rejets, 0,20%; produit, 3,25% U<sub>235</sub>; pas de recyclage.

caractérise théoriquement la structure de la demande, car les entreprises d'enrichissement ne permettent à leurs clients de choisir que des teneurs de rejet situées entre 0,20 et 0,30% et ce moyennant préavis de 15 mois à 4 ans. Le choix dépend beaucoup du prix en vigueur de l'uranium naturel et de celui du travail de séparation (qui dépend surtout du coût de l'électricité pour l'enrichisseur). Suivant la teneur de rejet choisie, la variation de la demande peut atteindre 20%, et c'est là un facteur très important dans l'équilibre général entre l'offre et la demande.

**La souplesse de l'offre d'uranium**

Jusqu'à 1979, la question de savoir si l'industrie minière pourrait trouver assez d'uranium pour éviter une pénurie a gravement préoccupé les consommateurs. Mais tout a changé en 1980, année dont on se souviendra probablement comme de celle où le prix au comptant a baissé brutalement, où l'on a différé ou annulé des projets d'extraction, fermé des usines ou exploité une partie seulement de leur capacité. Ces changements étaient naturellement une conséquence directe des retards continuels apportés à l'exécution des programmes nucléaires. Ils ont eu pour effet d'aggraver les incertitudes quant à la production d'uranium dans l'avenir. La figure 1 montre, vue d'aujourd'hui, la structure de la capacité de fourniture de 1980 à 1995.

Figure 1. Prévision de la production annuelle d'uranium pour certaines années de la décennie 1980-1990 [2].



**Tableau 4. Concentration des ressources en uranium dans un petit nombre de gisements [3]**

Nombre de gisements	Nombre de gisements	Réserves cumulées	
		(en milliers de tonnes)	% du total
9	9	982,0	49,5
17	26	1336,3	67,3
60	86	1811,0	91,2
48	134	1985,3	100,0

La capacité de production des usines actuellement en service se monte à quelque 40 000 tonnes par an dont la moitié aux Etats-Unis. En 1985, d'après les prévisions de l'Institut, l'offre d'uranium pourra atteindre environ 60 000 tonnes à condition qu'aucune usine existante ne soit fermée ou exploitée à capacité réduite. Cette production totale serait fournie à concurrence de 65% par les usines actuellement en service et de 24% par celles qui sont aujourd'hui en construction; 10% seulement proviendraient des usines actuellement à l'étude.

Un beaucoup plus grand nombre d'installations pourraient entrer en service d'ici à 1990, date à laquelle la capacité potentielle s'élèverait à au moins 82 000 tonnes. 45% du tonnage seraient alors fournis par les usines existantes, 17% par les usines en construction et 38% par celles qui sont aujourd'hui à l'étude. Il ne faut toutefois pas perdre de vue qu'il reste à démontrer que nombre de ces projets sont techniquement et économiquement viables.

Cette industrie de l'uranium est fortement concentrée. Les tableaux 4 et 5 montrent que 17 gisements représentent 67% des réserves (ressources raisonnablement assurées et économiquement exploitables, à terme, à moins de 30 dollars des Etats-Unis par

**Tableau 5. Récapitulation par pays des gisements d'uranium (en tonnes courtes d'U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) [3]**

Pays	Nombre de gisements	Réserves (en milliers de tonnes)	Réserves par gisement (en milliers de tonnes)
Algérie	1	34,0	34,0
Australie	14	491,7	35,1
Brésil	2	4,0	2,0
République Centrafricaine	1	10,5	10,5
Canada	45	527,3	11,7
France	3	156,2	52,1
Gabon	5	46,5	9,3
Groenland	1	0,1	0,1
Niger	6	273,5	45,6
Namibie	2	125,0	62,5
Etats-Unis	52	315,4	6,0
Allemagne (Rép. féd. d')	2	1,1	0,5
<b>Total</b>	<b>134</b>	<b>1985,3</b>	<b>14,8</b>

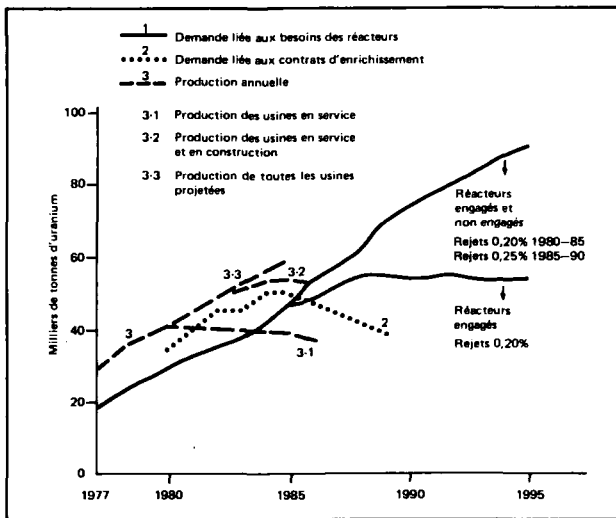


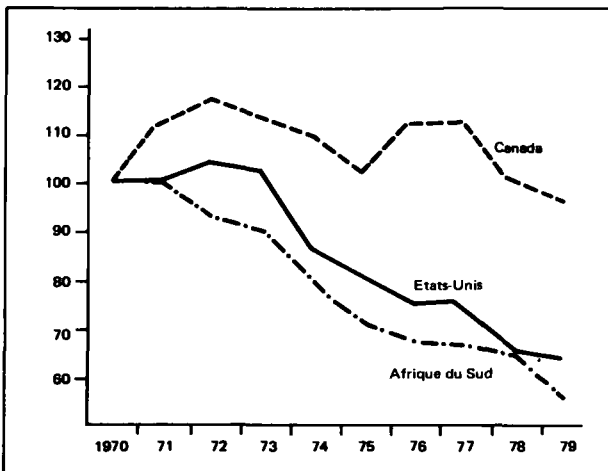
Figure 2. Estimation de l'offre et de la demande d'uranium [2]. (Chiffres annuels, de 1980 à 1995, en milliers de tonnes d'uranium).

livre d' $U_3O_8$ ), et que quatre pays possèdent 81% des réserves. Cette concentration, assez surprenante car l'uranium est largement répandu dans l'écorce terrestre, est une des principales causes possibles d'une rupture d'approvisionnement qui pourrait affecter le marché de l'uranium.

### L'équilibre entre l'offre et la demande

La figure 2 donne la comparaison entre la consommation d'uranium et la capacité de production d'après les estimations de l'Institut mentionnées plus haut. Il est évident que jusqu'à 1985, malgré plusieurs annulations de contrats d'enrichissement, la demande résultant de tels contrats restera supérieure à celle issue des besoins des réacteurs. Mais on voit aussi que, de 1980 à 1985, la production des usines actuellement en service et en construction dépassera probablement la demande, quelle qu'en soit l'origine.

Figure 3. Evolution des teneurs moyennes de livraisons d'uranium extrait; de 1970 à 1979 [4]. (Indice 100 = 1970, moyennes annuelles). Les chiffres des Etats-Unis portent sur la teneur à l'extraction du minerai alimentant les usines de traitement, avant correction pour tenir compte des variations des taux de récupération; les chiffres canadiens tiennent compte de ces variations.



Après 1990 l'équilibre entre l'offre et la demande dépendra en très grande partie de la politique nucléaire suivie. La figure 2 montre également les limites supérieure et inférieure des besoins des réacteurs d'après les estimations de l'Institut et compte tenu des variations des teneurs de rejet. En ce qui concerne l'offre, les décisions de construction de nouvelles usines dépendront probablement pour beaucoup des décisions de relance des programmes nucléaires.

### Analyse du prix de l'uranium

On essaie souvent d'étudier le marché de l'uranium sans tenter d'analyser l'influence qu'exercent les mouvements des prix sur l'équilibre entre l'offre et la demande. On a vu que la demande est relativement insensible aux changements de prix, au point que la notion de seuil de rentabilité n'a pas grand sens lorsqu'il s'agit de produire de l'énergie à partir d'uranium. Ce seuil pourrait se définir comme le prix qu'un producteur d'électricité devrait payer pour son uranium afin que son courant d'origine nucléaire coûte le même prix que celui qu'on produit par le procédé tout juste moins cher, qui est d'ordinaire le charbon. Il est évident qu'en pratique, vu les longs délais qu'exige la construction des installations nucléaires, cette notion peut servir d'avantage à évaluer les avantages économiques du nucléaire par rapport au charbon qu'à aider l'industrie et le marché à équilibrer l'offre et la demande.

En ce qui concerne l'offre, il faut distinguer entre producteurs potentiels et producteurs actuels. Ces derniers n'ont qu'une faculté limitée de s'adapter aux changements de l'environnement économique. Les principaux paramètres qui peuvent dépendre des décisions de la direction sont les teneurs du minerai à l'extraction, le facteur d'utilisation de l'usine de traitement et le rendement de la récupération de l'uranium. Aucun d'eux n'est très souple, et l'on risque même de compromettre la production future en les manipulant trop longtemps. Il faut cependant remarquer que dans le passé les teneurs ont manifesté une tendance générale à augmenter en période de récession, pour baisser en période de reprise économique.

La courbe canadienne de la figure 3 offre un bon exemple de l'influence qu'exerce le prix du marché sur les qualités de minerai traitées. Les mines d'Elliot Lake ont exploité des minerais riches pendant la récession des premières années 1970. Par la suite, la perspective d'amélioration des marges et l'augmentation de la demande ont encouragé l'agrandissement de la mine et la mise en valeur de minerais plus pauvres. A l'exception de la mise en exploitation du gisement relativement riche de Rabbit Lake à la fin de 1975, cette tendance à l'appauvrissement de la moyenne des minerais extraits au Canada s'est maintenue jusqu'en 1979.

L'influence des prix est encore plus sensible en ce qui concerne la prospection. Comme le montre la figure 4, l'évolution de la prospection a été, en gros, parallèle à celle des commandes de réacteurs aux Etats-Unis. Le graphique illustre l'histoire de 20 années de forages de prospection et de mise en valeur aux Etats-Unis, exprimée en nombre de forages par an. Il reflète



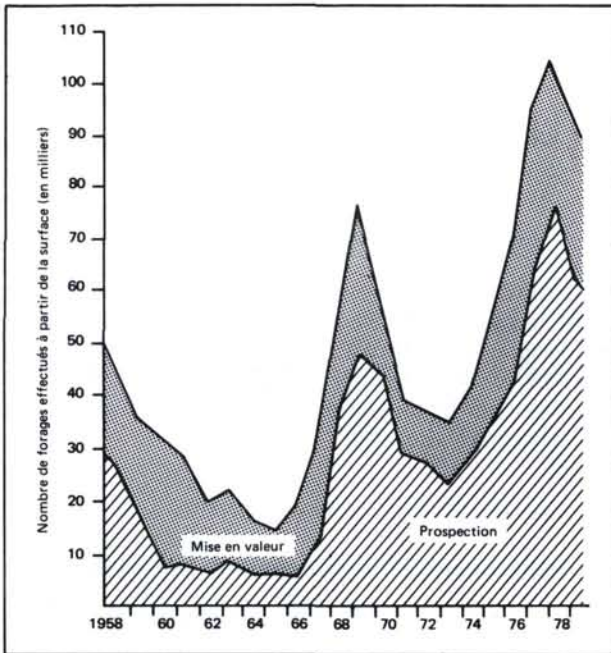


Figure 4. Statistiques de la prospection de l'uranium aux Etats-Unis [4].

nettement les récessions de l'industrie au début des années 1960 et 1970, et le début possible d'un nouveau recul en 1979.

L'évolution des teneurs du minerai et celle des dépenses de prospection offrent deux exemples du lien

étroit qui a toujours existé entre les prix du métal et la production tant effective que potentielle. Alors que les mouvements des prix n'ont que peu d'influence sur les capacités de production existantes, ils peuvent décourager les sociétés minières, qui ont souvent des intérêts ailleurs que dans l'uranium, de continuer à investir dans la prospection de ce métal. La persistance d'une telle tendance pourrait entraîner un retour aux très faibles chiffres de prospection du début des années 1970, avec toutes les conséquences qui pourraient en résulter plus tard pour la production et pour la sécurité à long terme de l'approvisionnement en combustibles des centrales nucléaires en service dans le monde entier.

Références

[1] *The uranium market and its characteristics*, Jean-Paul Langlois, in: Comptes rendus du 3ème colloque international de l'Institut de l'uranium, Mining Journal Books, Londres (Royaume-Uni), 1978.  
 [2] *The balance of supply and demand; a reassessment*, Philippe Darmayan, in: Comptes rendus du 5ème colloque international de l'Institut de l'uranium, Westbury House, Guildford (Royaume-Uni), 1980.  
 [3] *Reserve/grade relationships by type of uranium deposit; key to strategies for securing future uranium supplies*, Hugh Douglas, in: Comptes rendus du 5ème colloque international de l'Institut de l'uranium, Westbury House, Guildford (Royaume-Uni), 1980.  
 [4] *Economic factors and the uranium market*, Philip Crowson, in: Comptes rendus du 5ème colloque international de l'Institut de l'uranium, Westbury House, Guildford (Royaume-Uni), 1980.

Une mine d'uranium à ciel ouvert en Vendée (France).

