

Tendances de la demande, de l'offre et du coût des services du cycle du combustible

par H. Fujii et R.B. Fitts*

Un groupe consultatif sur les tendances de la demande, de l'offre et du coût des services du cycle du combustible s'est réuni à Vienne du 11 au 14 novembre 1975 pour passer en revue l'ensemble de la question du cycle du combustible nucléaire. Les discussions ont comporté d'une part une étude générale du cycle du combustible, depuis les projections jusqu'à l'an 2000 de la puissance nucléaire installée dans le monde¹ et la demande de services du cycle du combustible qui en résulterait, d'autre part un examen détaillé des différentes étapes du cycle du combustible.

A cet égard, il a été considéré que les problèmes les plus urgents tenaient à l'augmentation rapide des besoins d'uranium, aux lourdes dépenses occasionnées par la création de services du cycle du combustible, et au manque d'installations satisfaisantes pour le retraitement et le recyclage du combustible.

PREVISIONS RELATIVES A L'EXPANSION DE LA PUISSANCE INSTALLEE

Selon les prévisions, la puissance nucléaire installée dans le monde, devrait passer d'environ 70 GW(e) en 1975 à quelques 500 GW(e) en 1985 et à plus de 2000 GW(e) à la fin du siècle.

Pour effectuer les calculs liés au cycle du combustible, on a été amené à faire les hypothèses suivantes en ce qui concerne la répartition de cette puissance par type de réacteurs:

1. Un tiers des réacteurs à eau légère seraient des réacteurs à eau bouillante et deux tiers des réacteurs à eau sous pression;
2. L'introduction de surgénérateurs rapides industriels deviendrait importante à partir de 1995;
3. Le rythme d'introduction des réacteurs à haute température a diminué par rapport aux projections antérieures tandis que celui des réacteurs à eau lourde a augmenté.

Le tableau 1 donne en détail la répartition prévue des types de réacteurs pour les pays de l'OCDE (plus de 90% de l'énergie d'origine nucléaire dans le monde jusqu'à l'an 2000).

DEMANDE, OFFRE ET COUTS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

A partir des prévisions ci-dessus et des caractéristiques des réacteurs, plusieurs participants ont effectué des estimations de la demande de services du cycle du combustible (voir tableau II).

* Membres de la section des matières nucléaires et du cycle du combustible, Division de l'énergie d'origine nucléaire et des réacteurs.

¹ A l'exclusion des pays à économie planifiée.

Tableau I. Répartition des types de réacteurs (en GWe)
(dans le cas d'une forte expansion de la puissance installée) — OCDE

Année	Réacteurs à eau légère*	Réacteurs à eau lourde à tube de force	Réacteurs avancés refroidis par gaz	Réacteurs à eau lourde	Réacteurs à haute température	Réacteurs refroidis par un gaz	Sur-générateurs rapides	Total
1975	60,1	—	1,0	2,5	0,3	5,8	0,5	70
1980	162	—	5,8	7,2	0,6	5,8	1,4	183
1985	434	5,3	6,0	18,4	8,3	4,2	4,0	481
1990	775	22	6,0	41	29	1,1	15	889
2000	1584	79	4,5	115	126	—	200	2089

* Relation Réacteurs à eau pressurisée: Réacteurs à eau bouillante = 2,1

Tableau II. Exemple de projection de la demande mondiale de services du cycle du combustible

Service considéré	Années					
	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Production d'uranium (en milliers de tonnes par an)	21	50	100	160	240	300
Production cumulée d'uranium à partir de 1975 (en milliers de tonnes d'U)	21	200	600	1300	2300	3700
Enrichissement (en milliers de tonnes d'unités de travail de séparation par an)	11	35	70	110	180	240
Fabrication de combustible (en milliers de tonnes de métal lourd par an) (Réacteurs à eau légère seulement)	2,5	7	15	25	40	55
Retraitement (en milliers de tonnes U/an) (Réacteurs à eau légère seulement)	0,5	3,5	10	18	30	45

On a supposé, pour le calcul de la demande, que le facteur de charge globale serait de 70% pour tous les types de réacteurs, et que la teneur résiduelle en U 235 serait de 0,25%. Le groupe a envisagé la production de plutonium et son recyclage partiel dans les réacteurs thermiques en liaison avec son utilisation dans les réacteurs rapides. Le recyclage du plutonium devrait commencer vers 1981, compte tenu des retards dans les calendriers des installations de retraitement et de la situation en matière de permis d'exploiter.

Considérant ces besoins calculés, le groupe a examiné les différentes étapes du cycle du combustible comme suit:

Uranium

Le **tableau III** donne les estimations actuelles des ressources mondiales d'uranium². En comparant ces chiffres avec ceux de la demande cumulative prévue (**tableau II**), on constate qu'un problème grave risque de se poser. Les réserves raisonnablement assurées dans la tranche de prix inférieure, auxquelles on fait normalement appel, ne permettront de satisfaire la demande que jusque vers 1990. En outre, les ressources totales actuellement connues et estimées à moins de 30 dollars la livre d' U_3O_8 seront épuisées vers l'an 2000. Les efforts déployés actuellement pour trouver et évaluer de nouvelles ressources d'uranium revêtent donc une importance particulière.

Tableau III. Ressources mondiales d'uranium
(en milliers de tonnes d'uranium)

Ressources raisonnablement assurées	
< 15 dollars/livre d' U_3O_8 1080	15–30 dollars/livre d' U_3O_8 730
Ressources supplémentaires estimées	
< 15 dollars/livre d' U_3O_8 1000	15–30 dollars/livre d' U_3O_8 680

Une comparaison de la capacité de production projetée et des besoins annuels d'uranium indique que la capacité potentielle d'extraction et de traitement de minerai sera suffisante jusqu'en 1983 au moins. Mais il va de soi que le marché ne se présente pas de façon aussi schématique, et le groupe a reconnu que la production de quantités suffisantes d'uranium risquait de poser certaines difficultés à court terme.

Avant 1973, le coût du "gâteau jaune" (U_3O_8) d'uranium était très stable et se situait entre 7 et 8 dollars la livre. Depuis, il a enregistré une hausse rapide, passant à près de 15 dollars la livre en 1974 pour les livraisons du milieu de 1975, chiffre qui devait être majoré de 1,30 à 1,50 dollars par livre pour chaque année suivante de livraison. Or aujourd'hui, il approche les 30 dollars et augmente d'environ 2 dollars chaque année.

Le coût de conversion d' U_3O_8 en UF_6 , qui était stable depuis 1965, a augmenté régulièrement de 0,14 dollar par kg et par an au cours des cinq dernières années et représentait entre 3,5 et 4 dollars/kg pour les livraisons de 1975.

Enrichissement

L'étude des besoins annuels et cumulés en travail de séparation, correspondant à l'expansion prévue de la puissance installée a montré comme on s'y attendait que la demande augmentera avec la puissance nucléaire installée jusqu'à ce que l'utilisation du plutonium entraîne, vers la fin des années 1980, un léger ralentissement de son taux de croissance. La capacité d'enrichissement des installations existantes ou dont la construction a été décidée dépasse les projections de la demande jusqu'en 1980 environ. Pour la période postérieure, étant donné les délais de construction et la nécessité de porter rapidement la capacité de 6000 à 9000 tonnes d'unités de travail de séparation par an entre 1985 et 1990, il y a lieu d'établir avec soin le calendrier de création de nouvelles usines de séparation et de prendre les décisions requises en temps opportun.

² Pour plus de détails, voir dans le présent numéro l'article intitulé "Ressources et approvisionnement en uranium".

En 1967, le coût unitaire du travail de séparation était de 26 dollars aux Etats-Unis. A partir de 1971, il a augmenté progressivement pour atteindre 60,95 dollars/kg d'unité de travail de séparation pour des contrats à la demande et 53,25 dollars/kg par unité de travail de séparation pour des contrats à long terme. Pour 1985, les estimations oscillent entre 86 dollars et 160 dollars/kg. Toutefois, le coût du travail de séparation est très sensible au coût de l'énergie électrique et au coût de construction des usines d'enrichissement; il est donc très difficile d'établir des estimations rigoureuses.

Fabrication du combustible

D'après les projections, la demande de fabrication de combustible intéressera pour plus de 90% les réacteurs à eau légère, du moins jusque vers 1990; la capacité actuellement disponible permettra de faire face à la demande au moins jusqu'en 1985 (voir **tableau II**). En ce qui concerne les réacteurs surgénérateurs rapides et les réacteurs à haute température, la capacité de fabrication de combustible est faible, mais la demande l'est aussi. Dans l'un et l'autre cas, l'augmentation de la capacité ne devrait pas poser de problème technique.

Les coûts de fabrication du combustible pour les réacteurs à eau légère sont restés à peu près stables au cours des dernières années, se situant généralement entre 120 et 170 dollars/kg d'uranium pour des commandes ordinaires. Ils devraient diminuer ou se stabiliser au cours des années à venir. Le coût de transformation du combustible à oxyde mixte est nettement plus élevé que celui du combustible à bioxyde d'uranium. Le coût de fabrication du combustible mixte se situe autour de 300 dollars (valeur de 1975) le kilogramme d'uranium et de plutonium pour un réacteur à eau légère et atteint jusqu'à 800 ou 1000 dollars le kilogramme d'uranium et de plutonium pour les réacteurs surgénérateurs rapides refroidis par un métal liquide.

Retraitement

L'augmentation projetée de la capacité de retraitement requise est indiquée au **tableau II**. Le groupe a examiné les prévisions et des projections et a constaté que la capacité existante ne suffit pas à couvrir les besoins. Pour les combustibles destinés aux réacteurs à eau légère, les projections de la capacité pour 1975, 1980 et 1985 sont respectivement 100, 3400 et 6800 tonnes d'uranium par an. Il resterait donc 21 000 tonnes de combustible non retraité en 1985.

Etant donné les délais de conception et de construction des installations (de 5 à 7 ans) et le manque d'expérience dans ce domaine, il y aura sans doute encore un déficit de capacité au début des années 1980. Par conséquent, compte tenu des hypothèses relatives à l'expansion de la puissance installée, on devra probablement accroître la capacité de stockage du combustible irradié avant la capacité de retraitement.

En ce qui concerne les coûts de retraitement et leur tendance, il convient de noter que la conception des installations évolue très rapidement, et que l'on manque de données auxquelles on puisse se fier. On estime généralement que les coûts de retraitement se situent entre 150 et 200 dollars le kg d'uranium (valeur de 1975); les dépenses d'équipements, quant à elles, seront très élevées.

Stockage du combustible irradié

Cette étape du cycle du combustible a fait l'objet d'une attention particulière, étant donné les besoins accrus qui résulteront du déficit en capacité de retraitement. Il ne devrait toutefois pas y avoir de problème, les techniques requises pour créer la capacité nécessaire étant ou allant être disponibles.

Le coût de stockage du combustible irradié des réacteurs à eau légère a été estimé à environ 10 dollars par kilogramme d'uranium et par an. Dans le cas du réacteur CANDU, il se situe entre 3 et 5 dollars par kilogramme d'uranium.

Transport du combustible irradié

Les techniques de transport du combustible progressent de façon satisfaisante. Le coût de transport en Europe, dans les nouveaux châteaux et avec les nouveaux moyens, sera d'environ 20 à 35 dollars/kg d'uranium (valeur de 1975). Le coût dépend naturellement de la distance, du mode de transport et des règlements en matière de santé, de sécurité et de protection en vigueur.

Evacuation des déchets

Ce dernier aspect du cycle du combustible nucléaire a été envisagé sur le plan général. Le groupe consultatif a en effet estimé que le sujet, malgré son intérêt et son importance, était trop vaste et trop mouvant pour être examiné avec profit dans le détail. L'opinion générale a cependant été que les moyens techniques dont on dispose actuellement pour l'évacuation des déchets ne représentent certes pas un idéal, mais sont acceptables.

EXEMPLES DE COUTS DE CONSTRUCTION D'UNE USINE DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

Les coûts unitaires de chaque étape du cycle du combustible nucléaire (en dollars par kilogramme d'uranium) comprennent les coûts d'exploitation et les dépenses d'équipement, lesquelles constituent l'un des principaux paramètres. Ces dernières années, elles ont augmenté rapidement pour chacune des étapes du cycle en raison de la hausse des coûts des matériaux et de la main-d'œuvre, ainsi que des dépenses liées à la protection de l'environnement. Les données disponibles sur les coûts de construction, pour chaque étape du cycle, sont limitées et les estimations que l'on peut faire sont entachées d'incertitude. Le groupe consultatif a donc décidé que ces estimations ne devaient être utilisées qu'à titre indicatif dans les études économiques relatives au cycle du combustible nucléaire. Compte tenu de ces réserves, le **tableau IV** donne un ordre de grandeur des coûts en question. La puissance des centrales nucléaires que chaque installation pourrait alimenter est indiquée pour montrer que, d'une façon générale, ces installations se justifient dans la mesure où elles ont à alimenter des réseaux où la demande est assez importante.

Tableau IV. Coûts de construction indicatifs d'installations du cycle du combustible
(en dollars de 1975)

Type d'activité	Capacité	Coût de construction (en millions de dollars E.U.)	Puissance des centrales alimentées (MWe)
Conversion	5000 TU/an ¹	50	6 000—7 000
Enrichissement	3000 TSWU/an ²	1 000	40 000
Fabrication de combustible, UO ₂	1500 TU/an	100	50 000
(U, Pu)O ₂	1500 TU/an	200	50 000
Retraitement	1500 TU/an	1 000	50 000
Stockage du combustible irradié	1000 TU	20	~ 9 coeurs de réacteurs à eau légère de 1000 MW(e)

¹ Tonnes d'uranium par an

² Tonnes d'unités de travail de séparation par an

RECOMMANDATIONS

Après avoir fait le point des différentes étapes du cycle du combustible nucléaire et évalué dans chaque cas les moyens de faire face à la demande d'énergie d'origine nucléaire, les membres du groupe consultatif ont recommandé un certain nombre de mesures.

- La mise en œuvre du cycle complet du combustible nucléaire pose des problèmes, notamment pour les petits pays, en raison de la nécessité d'avoir des installations de grande capacité et, de ce fait, d'effectuer des investissements importants aux divers stades du cycle du combustible tels que l'enrichissement et le retraitement. Le groupe consultatif recommande donc que des efforts accrus soient déployés pour trouver à ces problèmes des solutions techniques et institutionnelles, et notamment que la notion de centre régional du cycle du combustible soit étudiée de plus près.
- Une des principales difficultés liées aux programmes de réalisation, de prospection et de construction requis pour le cycle du combustible nucléaire est de trouver des moyens de financement et ainsi que des assureurs. Les choses se compliquent souvent en raison du caractère international des participants et des responsabilités en cause. Le groupe consultatif recommande donc que le financement des activités importantes du cycle du combustible nucléaire et la possibilité de les assurer soient examinés en détail prochainement.
- Reconnaisant le rôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique en ce qui concerne la préparation de guides visant à normaliser les procédures d'autorisations et les règlements concernant l'exploitation des centrales nucléaires, le transport et l'évacuation des déchets, le groupe consultatif recommande que ces travaux soient étendus à toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire.

Le groupe considère qu'il importe particulièrement:

- de préparer des guides sur le choix des sites pour les diverses installations du cycle du combustible nucléaire et,
- d'établir des normes internationales en matière de sécurité pour chaque étape, indiquant le degré de sûreté requis, les critères applicables, ainsi qu'une étude de la rentabilité de ces mesures.
- Une condition fondamentale du développement de l'énergie d'origine nucléaire est l'existence d'uranium naturel en quantités suffisantes. Aussi le groupe recommande-t-il une accélération des travaux de prospection dans le monde entier.
- Quand les installations de retraitement commenceront à fournir de l'uranium et du plutonium à un rythme satisfaisant, elles couvriront une proportion appréciable des besoins mondiaux en matières fissiles. Si le plutonium récupéré est utile pour le cycle du combustible des réacteurs à eau légère, il est indispensable pour le cycle du combustible des surgénérateurs. C'est pour des raisons de ce genre que le groupe a jugé nécessaire d'insister sur les activités liées aux stades du retraitement et de la fabrication de combustible de recyclage (c'est-à-dire, sur les activités relatives à la coopération dans le cadre de centres régionaux du cycle du combustible).
- Les projections de la demande de services du cycle du combustible, de la demande d'uranium jusqu'à l'élimination des déchets, devraient être publiées régulièrement, à partir de prévisions actuelles en matière d'énergie d'origine nucléaire.
- Pour que le grand public ne soit pas abusé par certaines tentatives visant à discréditer l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité, et par la présentation parfois tendancieuse des questions relatives à la sûreté et à la fiabilité des centrales nucléaires et du cycle du combustible nucléaire, le groupe recommande en outre que soit entrepris un effort d'information. Il s'agirait de décrire avec précision les dangers de l'énergie d'origine nucléaire, en indiquant le degré de confiance que l'on peut accorder aux solutions existantes.