



ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM:

Offre, demande et coûts

par J. Tom Roberts

La plupart des types éprouvés de réacteurs dont on prévoit l'exploitation industrielle au cours des deux prochaines décennies consomment de l'uranium enrichi. Même en admettant que la proportion des réacteurs à eau lourde et uranium naturel augmente et

que les surgénérateurs commencent à fonctionner à l'échelle industrielle dans un proche avenir, les centrales utilisant l'uranium enrichi comme combustible constitueront probablement l'essentiel de la puissance nucléo-électrique qui sera installée d'ici à la fin du siècle. Il est donc tout aussi important de s'assurer des services d'enrichissement suffisants au prix le plus bas possible que de pouvoir compter sur des réserves sûres de minerais d'uranium. La capacité d'enrichissement disponible dans le monde occidental sera probablement saturée au début des années 1980, à une date qui dépendra du rythme d'accroissement de la puissance nucléo-électrique installée et des variations probables de la proportion respective des différentes filières de réacteurs. Etant donné que le délai entre l'étude et la mise en service d'une installation d'enrichissement est de l'ordre de 8 à 10 ans et que la question a des répercussions importantes à l'échelon national, régional et international et sur le plan commercial et politique, elle s'est récemment placée au premier plan des préoccupations générales, et aucune étude des perspectives de l'énergie d'origine nucléaire ne serait complète si elle n'en tenait pas compte.

DEMANDE ET OFFRE

La demande de services de séparation est fonction de la demande d'uranium enrichi, des degrés d'enrichissement du combustible et des teneurs résiduelles. La demande d'uranium enrichi est à son tour déterminée par la demande d'énergie nucléaire, les différentes options de réacteurs, les caractéristiques des réacteurs, la puissance installée, les délais, et la politique de recyclage du plutonium.

Influence du rythme d'expansion de la puissance installée et des différentes options de réacteurs*

La figure 1 indique les besoins annuels en travail de séparation jusqu'en 1990 calculés pour diverses options de réacteurs avec différents mélanges pour réacteurs comportant une teneur résiduelle en U 235 de 0,25% et sans recyclage du plutonium. On voit que la demande est davantage fonction de l'expansion de la puissance installée que de la filière adoptée. Dans l'hypothèse de l'expansion moyenne de la puissance installée, les besoins en travail de séparation passent d'environ 10 000 tonnes d'unités de travail de séparation (UTS) par an à 90 000 à 110 000 tonnes environ en 1990. La fourchette des projections pour 1990, en tenant compte à la fois de l'expansion faible et de l'expansion forte de la puissance installée est comprise entre 70 000 et 130 000 tonnes d'unités par an.

* Une grande partie de la documentation présentée ici est tirée de l'étude sur l'uranium « Ressources, production et demande », établie conjointement par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire et l'AIEA, publiée en août 1973.

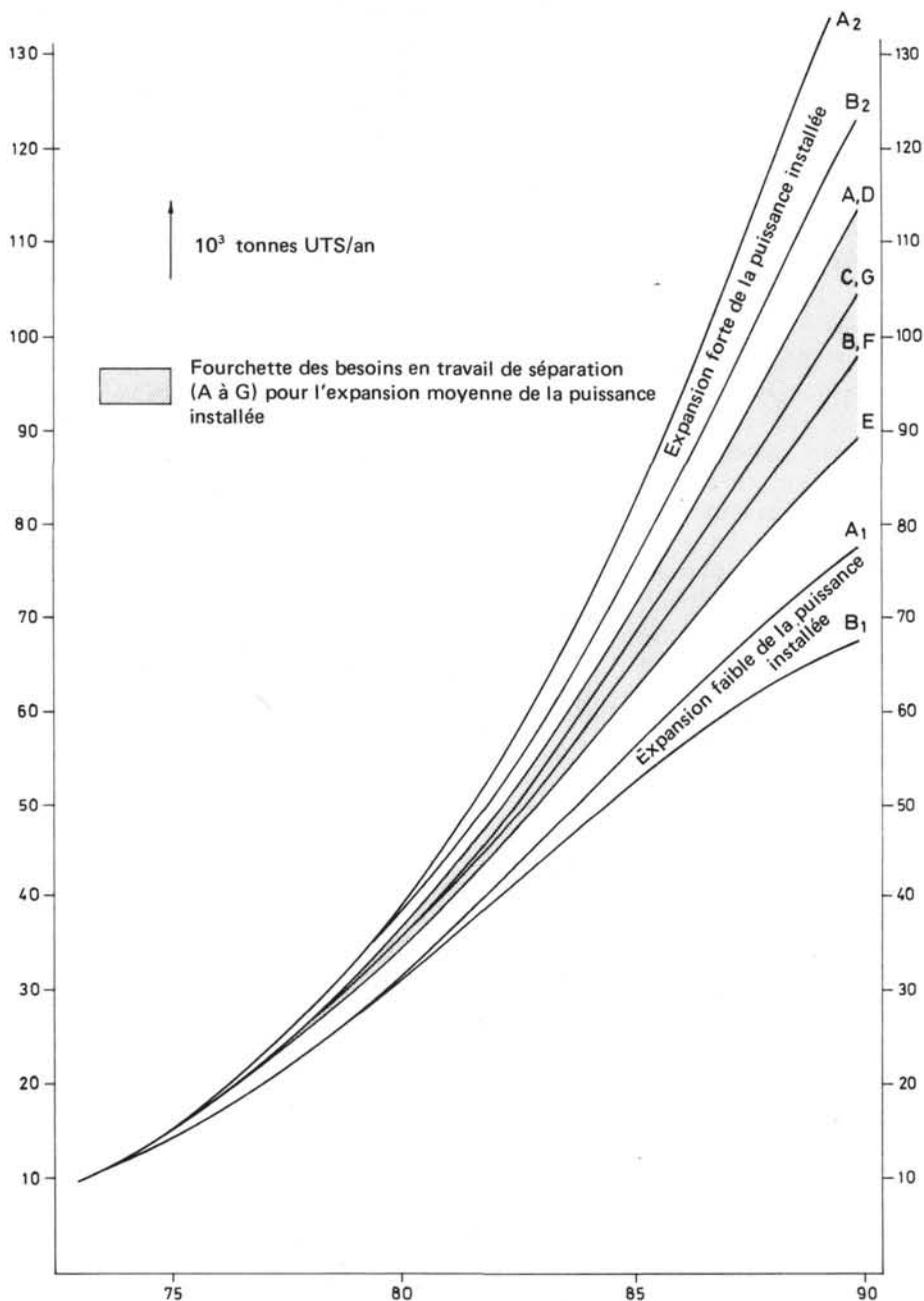


Figure 1. Besoins annuels en travail de séparation en fonction des différentes options en matière de filières de réacteurs et de l'expansion de la puissance installée (sans recyclage du plutonium; teneur résiduelle en U 235 de 0,25%).

Dans les cas d'expansion moyenne de la puissance installée (A à G), on peut constater que la demande de travail de séparation ne dépend pas sensiblement des options de réacteurs de haute température (par exemple, hypothèse A où l'expansion des réacteurs à haute température est faible et hypothèse D, qui n'en diffère que par une forte expansion des réacteurs à haute température; l'une et l'autre ont essentiellement les mêmes besoins en travail de séparation). En revanche, la forte expansion des réacteurs surgénérateurs rapides (par exemple, passage de l'hypothèse A à l'hypothèse B), réduit la demande en 1990 d'environ 15%, tandis que la forte expansion des réacteurs à eau lourde (par exemple, passage de l'hypothèse A à l'hypothèse C) la réduit d'environ 8%. (Au delà de 1990, l'effet d'une expansion forte deviendrait de plus en plus significatif.)

Le **tableau 1** indique les besoins annuels en travail de séparation et les besoins cumulés de 1973 à 1990 pour les hypothèses A (continuation de la tendance actuelle), B (comme A, mais avec un taux élevé d'introduction de réacteurs surgénérateurs rapides), A₂ (besoins en travail de séparation les plus élevés des 15 hypothèses considérées) et B₁ (besoins les plus faibles). Le tableau 1 suppose une teneur résiduelle en U 235 de 0,275% et un recyclage du plutonium commençant en 1978, tandis que la figure 1 suppose une teneur résiduelle en U 235 de 0,25% sans recyclage du plutonium. Ces modifications ont réduit la demande en 1990 d'environ 15% pour l'hypothèse A, mais de 6% environ seulement pour l'hypothèse B, c'est-à-dire que la demande est moins sensible à l'expansion des réacteurs surgénérateurs rapides.

TABLEAU 1. BESOINS ANNUELS MONDIAUX EN TRAVAIL DE SEPARATION
EXPRIMES EN MILLIERS DE TONNES D'UNITES DE SEPARATION (en admettant une
teneur résiduelle en U-235 de 0,275% et un recyclage du plutonium)

Année	Limite inférieure		Fourchette moyenne				Limite supérieure	
	Hypothèse B ₁ *		Hypothèse B*		Hypothèse A*		Hypothèse A ₂ *	
	Annuels	Cumulés	Annuels	Cumulés	Annuels	Cumulés	Annuels	Cumulés
1973	9	9	9	9	9	9	9	9
1974	10	19	11	20	11	20	11	20
1975	13	32	14	34	14	34	14	34
1976	16	48	17	51	17	51	18	52
1977	18	66	20	71	20	71	22	74
1978	21	87	24	95	24	95	26	100
1979	23	110	26	121	26	121	29	129
1980	26	136	30	151	31	152	33	162
1981	30	166	35	186	35	187	39	201
1982	34	200	40	226	41	228	46	247
1983	37	237	45	271	46	274	52	299
1984	41	278	51	322	52	326	60	359
1985	45	323	57	379	58	384	68	427
1986	48	371	63	442	65	449	78	505
1987	51	422	70	512	73	522	88	593
1988	56	478	77	589	81	603	99	692
1989	59	537	85	674	89	692	111	803
1990	61	598	91	765	97	789	124	927

* B avec une forte proportion de surgénérateurs rapides

* A avec une faible proportion de surgénérateurs rapides

TABLEAU 2. PREVISIONS RELATIVES AUX NIVEAUX DE PUISSANCE DES INSTALLATIONS DE DIFFUSION ET COMPARAISON ENTRE LE TRAVAIL DE SEPARATION DISPONIBLE ET LE TRAVAIL DE SEPARATION NECESSAIRE EN ADMETTANT L'EXPANSION « LA PLUS PROBABLE » DE L'ENERGIE NUCLEAIRE (Travail de séparation en millions d'UTS)

	EF 1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
OPERATIONS DES INSTALLATIONS DE DIFFUSION													
Teneur résiduelle (% de U 235)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,275	0,275	0,275	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Niveau de puissance moyen pour 3 sites (mégawatts)	4069	4558	5008	5567	5733	6199	6788	7110	7110	7178	7380	7380	7380
Production annuelle des installations de séparation	12,7	14,2	15,7	18,0	19,8	22,5	25,4	26,9	26,9	27,2	27,7	27,7	27,7
Y compris le travail de séparation : du Programme de perfectionnement de la cascade du Programme d'accroissement de la cascade		0,6	1,9	3,4	4,4	5,4	5,4	5,7	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8
					0,9	2,9	4,0	4,0	4,0	4,2	4,7	4,7	4,7
TRAVAIL DE SEPARATION: OFFRE ET DEMANDE (TENEUR RESIDUELLE DE 0,30%)													
Accroissement annuel effectif du travail de séparation disponible du fait du recyclage de la teneur résiduelle de 0,30% et évaluation à cette teneur						(1,7)	(1,9)	(1,4)					
Travail de séparation cumulé disponible, y compris le stock de 17,1 milliers d'unités au 1 ^{er} juillet 1973	29,8	44,0	59,7	77,7	97,5	118,3	141,8	167,3	194,2	221,4	249,1	276,8	304,5
Travail de séparation annuel nécessaire ¹	12,7	8,3	12,2	15,5	15,1	21,3	26,4	30,4	34,9	45,9 ²	42,8 ²	46,6 ²	53,2 ²
Travail de séparation cumulé nécessaire	12,7	21,0	33,2	48,7	63,8	85,1	111,5	141,9	176,8	222,7	265,5	312,1	365,3
Travail de séparation en stock	17,1	23,0	26,5	29,0	33,7	33,2	30,3	25,4	17,4				
Travail de séparation nécessaire pour les nouvelles installations:													
Annuel									1,3	1,3	15,1	18,9	25,5
Cumulé									1,3	1,3	16,4	35,3	60,8
<p>¹ Comprend la demande des centrales nationales et étrangères prévue, les applications non énergétiques gouvernementales et autres. Chiffre ajusté pour tenir compte de la vente anticipée de travail de séparation au Japon.</p> <p>² Le travail de séparation nécessaire comprend un volant équivalant à 1/6ème des besoins des années suivantes. Le volant est de 7,1 pour l'EF 1983, 0,5 pour l'EF 1984, 1,1 pour l'EF 1985 et 1,0 pour l'EF 1986.</p>													

Comparaison entre la demande et l'offre

Le **tableau 2** présente la projection établie par la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis en juillet 1973 concernant l'offre de travail de séparation des trois installations de diffusion gazeuses des Etats-Unis, qui atteindra 27 700 tonnes d'unités y compris la capacité additionnelle provenant du programme de perfectionnement de la cascade et du programme d'accroissement de la cascade. Il indique le travail de séparation cumulé disponible (y compris la quantité disponible au début de l'exercice financier 1973). Ce tableau indique également les estimations des besoins de travail de séparation annuel et cumulé jusqu'en 1986, les estimations de la Commission de l'énergie atomique n'étant pas très différentes de l'hypothèse B du tableau 1 (compte tenu du fait que le tableau 1 est établi sur la base d'une année civile et le tableau 2 sur celle d'un exercice financier, qui commence six mois avant l'année civile). Le tableau 2 indique aussi le stock (provenant de la préproduction de l'uranium enrichi, c'est-à-dire, avant qu'il ne soit effectivement nécessaire) qui atteint un maximum en 1978 et tombe à zéro pour l'exercice financier 1983, et la nécessité correspondante d'augmenter la capacité en 1983-1986.

Le **tableau 3** présente la capacité de production actuelle et prévue des installations de séparation en Europe occidentale; la capacité annuelle atteindrait 10 000 tonnes d'unités en 1985. En l'absence de renseignements précis, on n'a pas tenu compte d'autres projets de création de nouvelles installations d'enrichissement aux Etats-Unis et ailleurs, bien que d'après des renseignements récents il semble qu'une capacité substantielle de travail de séparation soit disponible en URSS. En outre, Eurodif étudie un projet de la France concernant l'aménagement d'une grande installation de diffusion gazeuse qui pourrait avoir une capacité initiale de 5 000 tonnes d'unités, qui serait portée à 9 000 tonnes au début des années 1980; la République d'Afrique du Sud a annoncé son intention de construire une installation d'enrichissement selon un procédé non dévoilé.

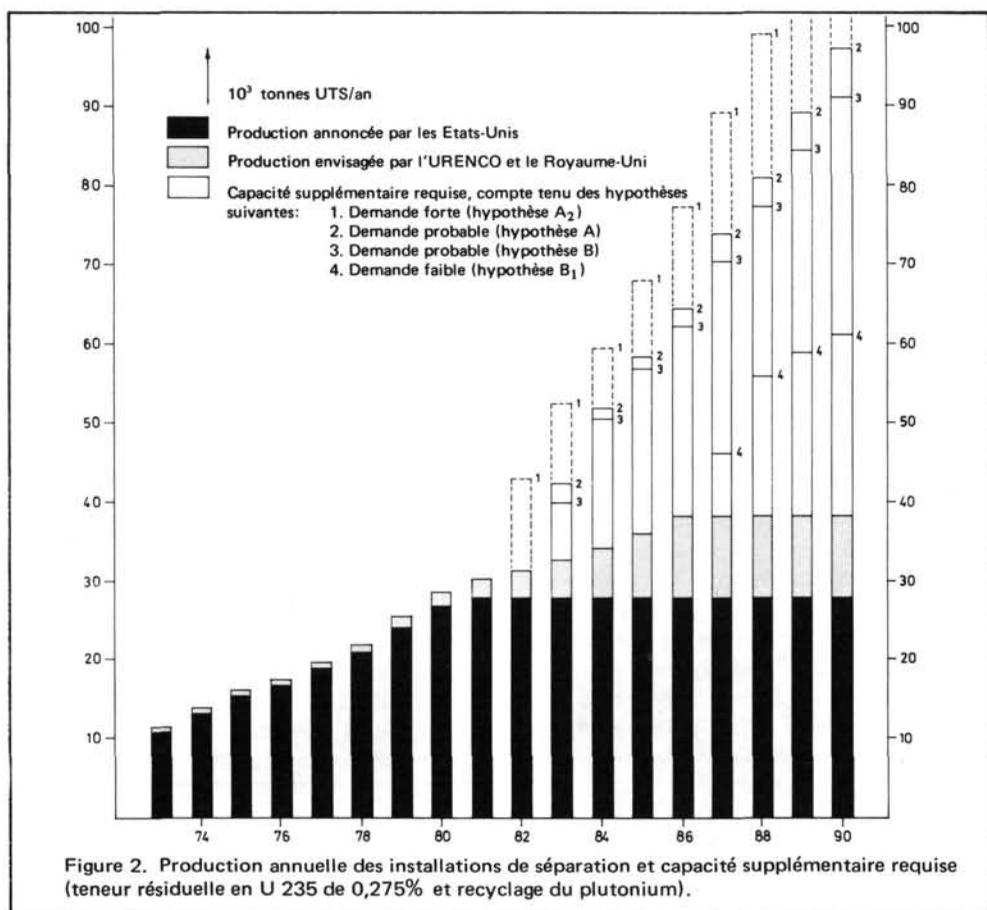
TABLEAU 3. TRAVAIL DE SEPARATION: CAPACITE DE PRODUCTION ACTUELLE ET PREVUE* EN EUROPE (en tonnes UTS)				
	1973	1975	1980	1985
Urenco**	50	400	2000/3000	10000
CEA France, Pierrelatte	200			
UKAEA, Capenhurst	400			

* Renseignements obtenus au Colloque sur la technologie de l'enrichissement de l'uranium à Nuclex 72, Bâle.

** Ajusté compte tenu d'informations récentes (voir Nucleonex Week 22 mars 1973).

La **figure 2** présente la production annuelle des installations de séparation aux Etats-Unis (d'après le tableau 2) et en Europe (d'après le tableau 3), ainsi que la capacité supplémentaire requise compte tenu des quatre hypothèses du tableau 1. On constate que dans le cas de la demande forte une capacité supplémentaire est requise en 1982, dans celui de la demande probable en 1983, et dans celui de la demande faible, en 1987. La **figure 3** présente les mêmes informations en fonction de la réserve de travail de séparation, qui atteint un maximum, puis tombe à zéro en 1981-1986 suivant l'hypothèse retenue concernant la demande d'énergie d'origine nucléaire.

On constate d'après la **figure 4** que les besoins des Etats-Unis dépasseront les ressources actuellement prévues en 1985 dans le cas A et qu'ils doubleront presque en 1990. On constate également que la demande prévue en dehors des Etats-Unis est essentiellement égale à la demande prévue aux Etats-Unis, tandis que les ressources actuellement envisagées en Europe sont inférieures à celles des Etats-Unis.



La figure 5 présente les variations des besoins prévus en travail de séparation en fonction de teneurs résiduelles supposées, sans recyclage du plutonium. Si on la compare avec la figure 1, établie pour une teneur résiduelle de 0,25%, on voit que l'augmentation de la teneur résiduelle à 0,30% diminuerait les besoins en 1990 d'environ 10%.

Les incertitudes de la situation de l'offre telle qu'elle est présentée ci-dessus tiennent compte de tout excès de la capacité d'enrichissement par rapport aux besoins dans les pays qui n'ont pas été compris dans l'enquête (URSS, Europe orientale, Chine, Afrique du Sud) et de l'utilisation éventuelle de stocks militaires d'uranium enrichi et de plutonium.

COUTS

Coûts passés et actuels

La Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis, qui a assuré la plus grande partie du travail de séparation à l'échelle industrielle à ce jour, a élevé ses prix au kilogramme de \$ 26,00 à \$ 28,70 en 1970, à \$ 32,00 en 1971 et à un montant compris entre \$ 36,00 et \$ 38,00 (suivant le type de contrat) en 1973. Les prix de vente d'autres sources (par exemple, l'URSS et la France) n'ont pas été annoncés.

Les prix actuels de la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis sont légèrement inférieurs aux coûts effectifs en raison de la nécessité de passer des contrats d'achat huit ans à l'avance, des sanctions étant prévues en cas d'annulation, et parce qu'une partie

Figure 3. Potentiel mondial de travail de séparation résultant de la production de l'URENCO, du Royaume-Uni et des Etats-Unis (teneur résiduelle en U 235 de 0,275% avec recyclage du plutonium).

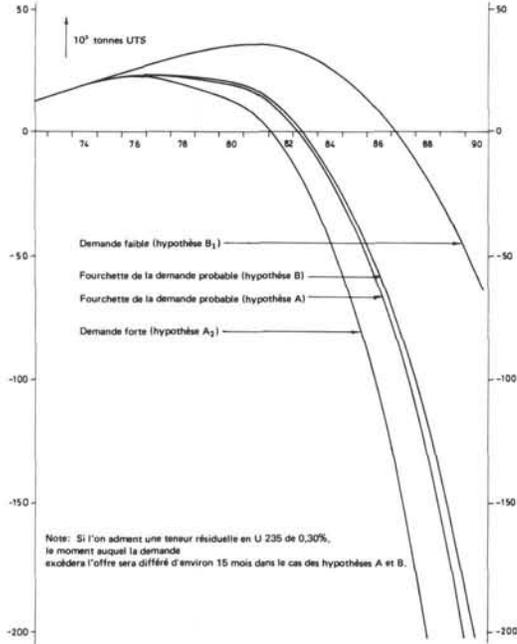
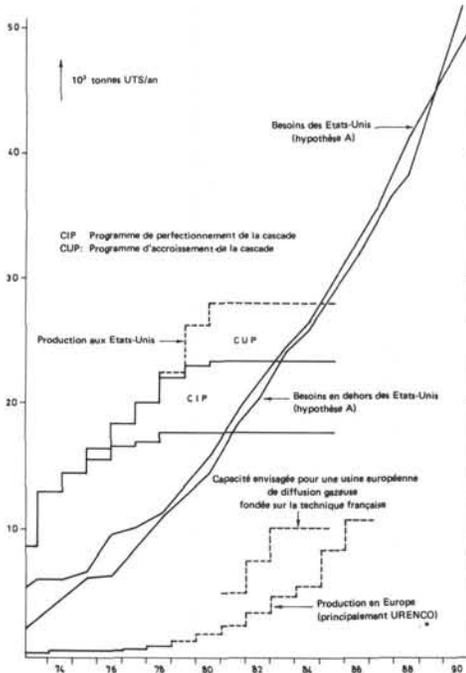


Figure 3 ►

Figure 4. Travail de séparation: besoins et production annuels (teneur résiduelle en U 235 de 0,275%, recyclage du plutonium).



▲ Figure 4

Figure 5. Besoins annuels en travail de séparation en fonction de différentes teneurs résiduelles en U 234 (sans recyclage du plutonium).

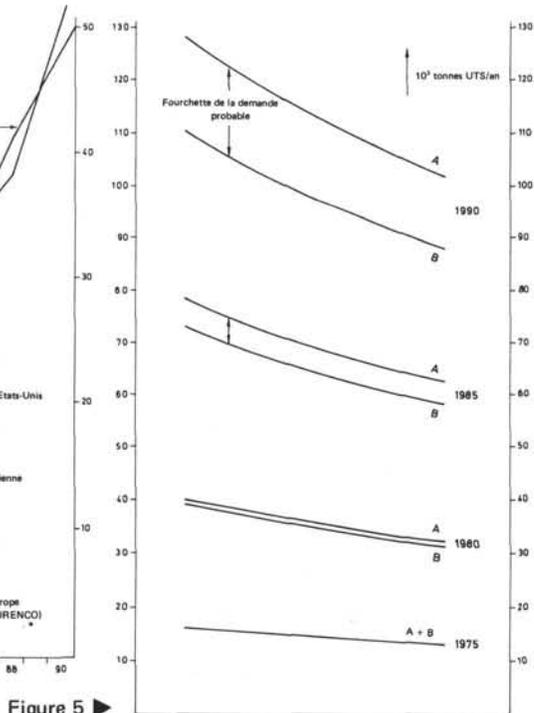


Figure 5 ►

du montant doit être versée à l'avance. De plus, le coût effectif pour le client est légèrement augmenté du fait que la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis a pour principe de calculer les besoins en uranium naturel et le prix du travail de séparation pour une teneur résiduelle en U 235 de 0,20%, au lieu de se fonder sur la teneur effective de 0,30% ou sur une teneur résiduelle choisie par le client. Pour une cascade d'enrichissement «idéale», la relation entre le coût du produit enrichi et son degré d'enrichissement est telle qu'il existe une valeur «optimale» de la teneur résiduelle qui augmente avec l'augmentation du coût du travail de séparation et diminue avec l'augmentation du coût de l'hexafluorure d'uranium naturel. Pour les coûts actuels de ces deux articles, la teneur résiduelle optimale se situe entre 0,25 et 0,30%. Pour l'uranium enrichi en uranium 235 dans une proportion de 2,2% à 2,6%, la politique suivie par la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis se traduit par un coût combiné de l'uranium naturel et de l'enrichissement supérieur d'environ 3% à celui qui correspondrait à la politique optimale.

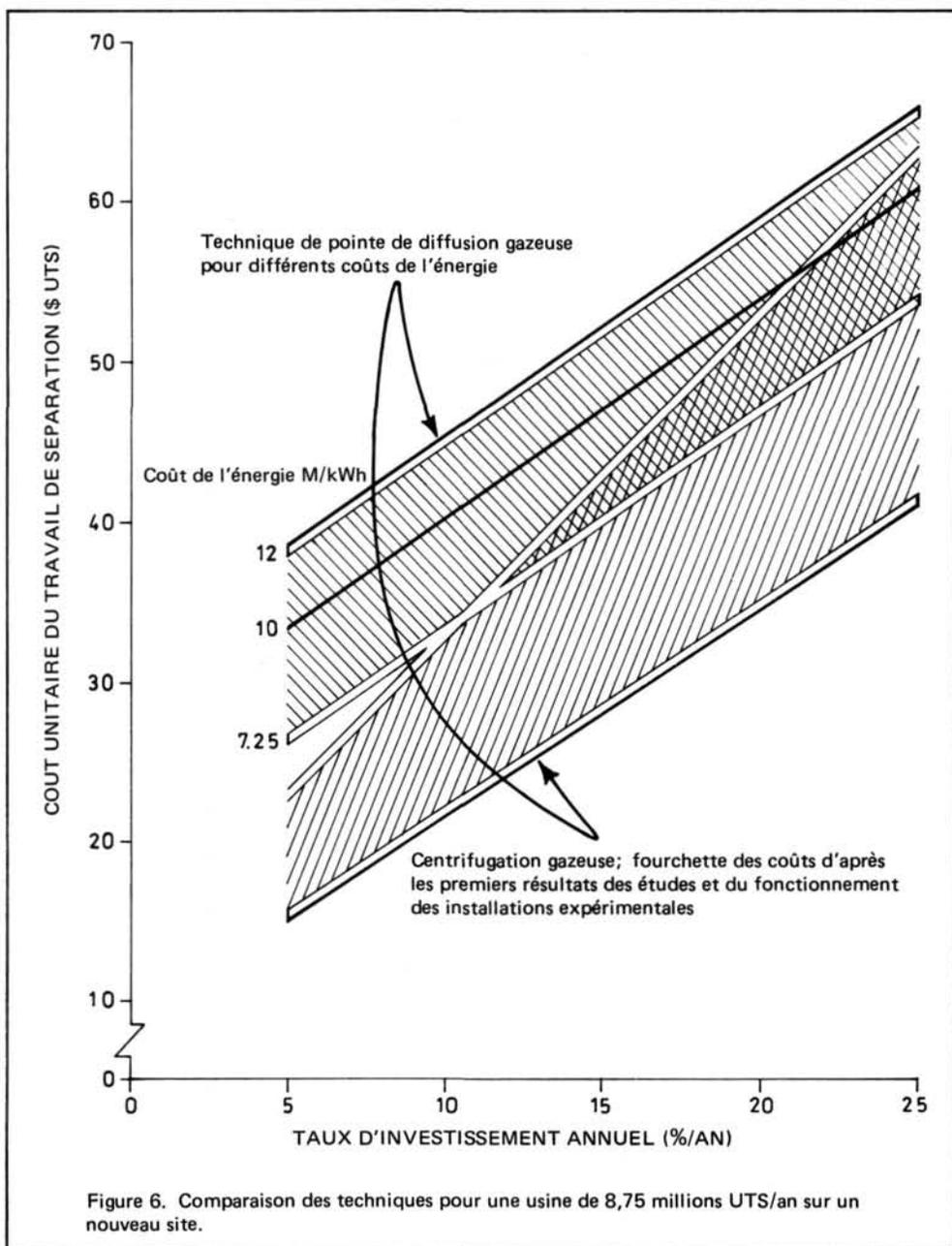
Coûts futurs

Jusqu'à maintenant les prévisions relatives aux coûts futurs du travail de séparation ont eu un caractère assez hypothétique, étant donné que la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis a augmenté assez rapidement ses prix au cours des dernières années et a eu relativement peu de concurrence. Cependant, l'URENCO a annoncé tout à fait récemment qu'elle est disposée à s'engager par contrat à fournir de l'uranium enrichi au prix de \$ 48 par kilo, dans un délai de quatre ans. C'est un prix supérieur à celui qui est actuellement pratiqué par la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis, sans être forcément supérieur à celui qui serait demandé par une nouvelle installation privée aux Etats-Unis, comme nous allons le voir.

Les coûts du travail de séparation par diffusion gazeuse dépendent à la fois des dépenses d'investissement et des frais d'exploitation, qui sont eux-mêmes fonction des coûts de l'énergie électrique. Les installations de centrifugation ne doivent consommer qu'environ 10% de l'énergie électrique nécessaire aux installations de diffusion gazeuse de capacité comparable, mais leurs autres frais d'exploitation seront plus élevés.

Le **tableau 4** présente les estimations les plus récentes de la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis concernant les dépenses d'investissement et les dépenses d'exploitation — non compris les coûts de l'énergie électrique — pour les installations de diffusion et de centrifugation gazeuses. Les dépenses d'investissement pour les deux procédés sont du même ordre, mais les dépenses d'exploitation — non compris l'énergie électrique — seront beaucoup plus élevées pour une installations de centrifugation gazeuse.

TABLEAU 4. ESTIMATIONS SOMMAIRES RELATIVES AUX INSTALLATIONS D'ENRICHISSEMENT (Usine de 8,75 millions UTS/an sur un nouveau site, dollars EF 1974)			
	Usine de diffusion gazeuse		Fourchette des coûts d'une usine de centrifugation gazeuse
	Technologie CIP	Technologie de pointe	
Dépenses d'investissement en millions de dollars	1 400	1 200	1130-1710
Investissement spécifique dollars/UTS	160	137	129- 195
Dépenses d'exploitation (non compris l'énergie) en millions de dollars/an	16	16	70- 115
Une installation de diffusion gazeuse d'une capacité de 8,75 millions d'UTS consomme environ 2400 MW(e). Une installation de centrifugation gazeuse de même capacité consomme sensiblement moins d'énergie, soit environ 10% de la quantité susmentionnée.			



La figure 6 présente les dernières estimations de la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis relatives à l'éventail des coûts du travail de séparation pour les installations de diffusion et de centrifugation gazeuses en fonction du coût de l'énergie et du taux annuel de charges fixes. Pour des taux de charges fixes faibles (moins de 10%/an), les installations de centrifugation ont nettement l'avantage; néanmoins, pour les taux de charges fixes plus élevés, caractéristiques de la propriété privée, il semble que les usines de diffusion gazeuse soient concurrentielles et présentent moins de risques, étant donné que le procédé est considéré comme éprouvé.