



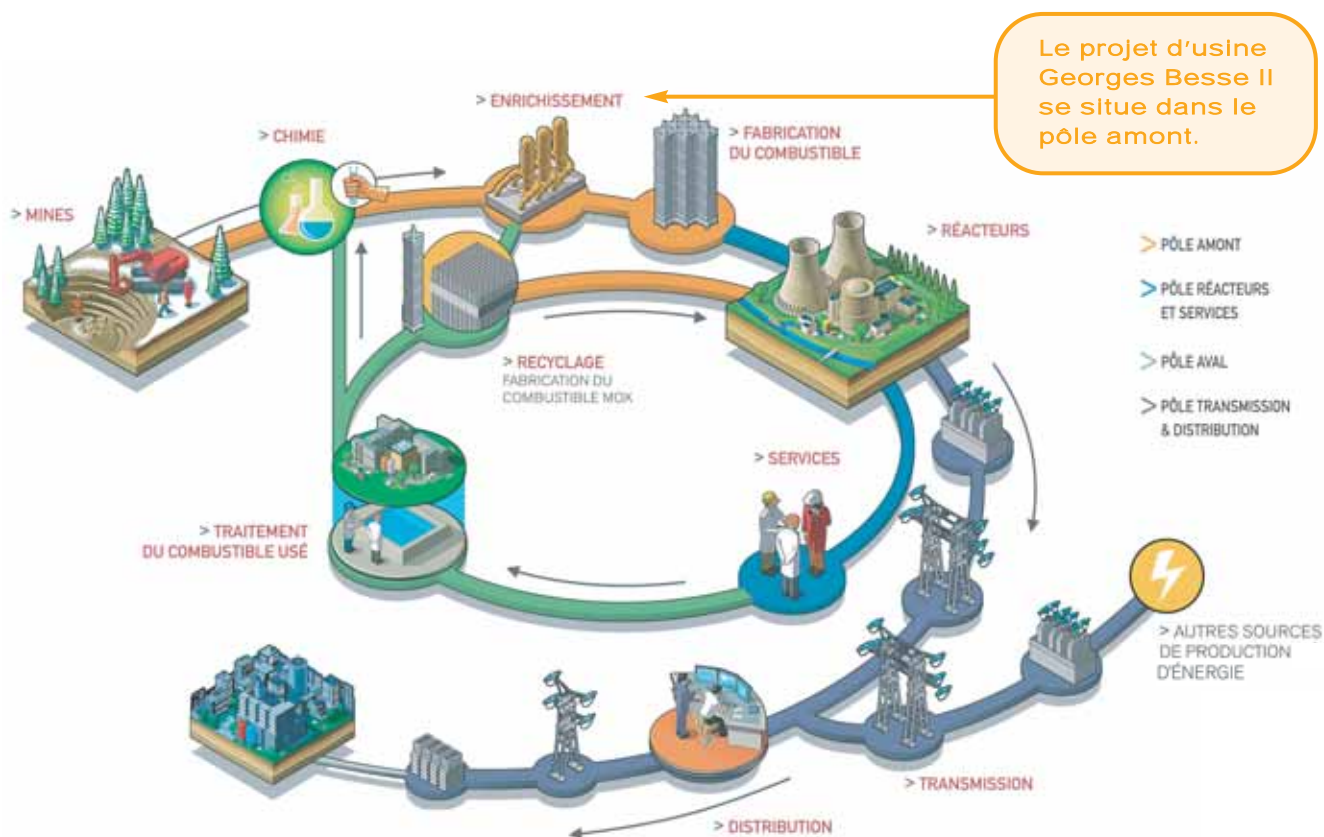
I. Le contexte : l'enrichissement de l'uranium

A	Le cycle du combustible nucléaire	8
B	L'enrichissement isotopique.	9
C	Les différentes technologies d'enrichissement	11
D	Le marché de l'enrichissement.	14

A Le cycle du combustible nucléaire

CLASSIQUEMENT, UN COMBUSTIBLE EST UNE SUBSTANCE QUE L'ON PEUT COMBINER À L'OXYGÈNE POUR PRODUIRE DE LA CHALEUR PAR COMBUSTION.

PAR EXTENSION, ON APPELLE "COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE" UN OBJET QUI PEUT PRODUIRE DE LA CHALEUR PAR FISSION DES ATOMES LOURDS QU'IL CONTIENT.



Ce n'est pas directement le minerai d'uranium qui constitue le combustible nucléaire : pour que les noyaux lourds puissent fournir de la chaleur utile par fission, ils doivent suivre un cycle du combustible, qui combine de nombreuses étapes industrielles schématisées ci-dessus.

Le cycle habituel du combustible pour les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) - qui constituent notamment le parc nucléaire français - comporte les étapes suivantes :

- > **extraction** du minerai d'uranium en mines souterraines ou en carrières à ciel ouvert,
- > **concentration** du minerai (qui contient souvent moins de 1 % d'uranium) sur le site même de l'extraction,

- > **conversion** des concentrés d'uranium en hexafluorure UF_6 , solide à température ambiante et gazeux à température modérée,
- > **enrichissement isotopique** de l' UF_6 , pour augmenter la proportion de noyaux fissiles ^{235}U , trop faible dans l'uranium naturel,
- > **fabrication** du combustible (conversion du fluorure en oxyde d'uranium enrichi UO_2 , pastillage, frittage des pastilles, crayonnage, assemblage des crayons en faisceaux),
- > **production** d'électricité pendant quatre ans environ dans le réacteur,
- > **traitement** qui se découpe en différentes phases (réception, entreposage sous l'eau, cisailage...),
- > **recyclage** des matières récupérables : fabrication du combustible MOX.



B L'enrichissement isotopique

Pour alimenter les réacteurs nucléaires, l'uranium doit être enrichi.

L'uranium est un métal composé principalement de deux atomes très semblables appelés **isotopes** : l'uranium 238 (99,3 %) et l'uranium 235 (0,7 %). Il est possible de les différencier par leur masse.

Peu abondant dans l'uranium naturel, l'U 235 est le seul à libérer de l'énergie par fission dans la plupart des réacteurs nucléaires. Pour assurer le bon fonctionnement de ces derniers, il faut disposer d'uranium dont la proportion d'uranium 235 se situe entre 3 % et 6 % pour les réacteurs actuels.

Pour certains réacteurs de "Génération IV" (les réacteurs qui arriveront sur le marché

du nucléaire civil à l'horizon 2020-2040) la proportion nécessaire d'uranium 235 pourrait se situer aux alentours de 15 % sans dépasser en tout état de cause 19,95 %. Il faut donc enrichir l'uranium naturel.

Actuellement deux procédés d'enrichissement sont exploités à l'échelle industrielle : la diffusion gazeuse, technique notamment utilisée par AREVA dans l'usine Georges Besse d'EURODIF et la centrifugation, technique utilisée par d'autres enrichisseurs comme URENCO en Europe occidentale, MINATOM en Russie ou JNFL au Japon.



L'atome d'uranium 235 est fissile. Son noyau a la faculté de se diviser en deux, sous l'impact d'un neutron. Cette fragmentation s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie : c'est la réaction de fission.

Dans une tonne d'uranium naturel, il y a en moyenne 993 kg d'uranium 238 et 7 kg d'uranium 235, soit 0,7 % d'uranium fissile.

Qu'est-ce qu'un isotope



On appelle ISOTOPES des noyaux qui diffèrent par le nombre de neutrons. Des isotopes possèdent les mêmes propriétés chimiques et physiques. En revanche les propriétés nucléaires sont différentes, car le nombre de neutrons influe sur la stabilité du noyau. La majorité des atomes présents dans la nature sont des isotopes stables. Les isotopes radioactifs ont généralement disparu en raison de leur instabilité. Ils peuvent être recréés artificiellement par exemple pour des applications médicales.

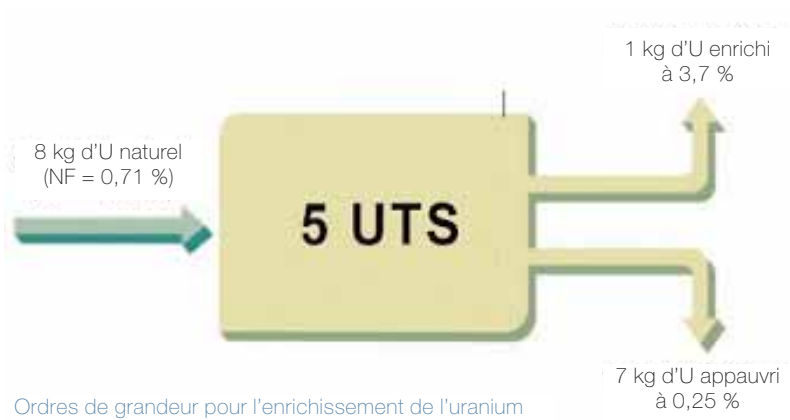
L'UTS : l'unité de mesure de l'enrichissement

L'Unité de Travail de Séparation (UTS) est l'unité de mesure utilisée comme standard international pour quantifier les besoins en enrichissement des réacteurs et la capacité des usines d'enrichissement, quelle que soit la technologie utilisée.

Le procédé est alimenté par de l'uranium naturel. Il en ressort, d'une part,

de l'uranium enrichi et, d'autre part, de l'uranium appauvri. L'UTS matérialise ce travail de séparation.

Il faut un peu plus de 100 000 UTS pour enrichir l'uranium nécessaire à l'alimentation d'un réacteur à eau pressurisée de 900 mégawatts (MW) pendant un an.



Un réacteur de 900 MW consomme annuellement environ 100 000 UTS/an, à raison de 5 UTS/kg d'uranium enrichi à 3,7 % à partir de 8 kg d'uranium naturel. La structure du coût unitaire de l'UTS est fortement dépendante de la technologie employée.

Qu'est-ce qu'une cascade ?

Les méthodes d'enrichissement par diffusion gazeuse et par centrifugation procèdent par séparation de l'uranium 238 et de l'uranium 235.

Le pouvoir séparateur élémentaire de ces procédés est faible (ou très faible), ce qui

oblige à recommencer plusieurs fois, en cascade, l'étape élémentaire pour obtenir l'enrichissement désiré.

Un ensemble d'étapes élémentaires, centrifugeuses ou diffuseurs gazeux mis en série, forme une cascade.





C Les différentes technologies d'enrichissement

La diffusion gazeuse



La diffusion gazeuse est, parmi les procédés d'enrichissement isotopique de l'uranium, celui qui le premier a fait l'objet de réalisations industrielles importantes.

La France a réalisé sur son territoire deux usines de diffusion gazeuse. La première, à vocation militaire, est arrêtée. La seconde, à vocation civile, l'usine Georges Besse, sur le site du Tricastin, fournit aujourd'hui environ 25 % des UTS nécessaires aux réacteurs mondiaux.

Le procédé d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse utilise un composé

gazeux de l'uranium : l'hexafluorure d'uranium (UF_6). Les molécules de $^{235}\text{UF}_6$ (de masse 349) se déplacent plus vite que les molécules de $^{238}\text{UF}_6$ (de masse 352), et durant un même intervalle de temps, elles viennent frapper un plus grand nombre de fois la paroi du récipient qui les contient.

Dans ces conditions, si on fait diffuser de l' UF_6 gazeux à travers une paroi poreuse, on trouvera en aval de la barrière une fraction de gaz légèrement plus enrichi en ^{235}U que ne l'était la totalité du gaz injecté en amont de celle-ci.



La diffusion gazeuse offre l'intérêt d'une technologie connue qui a fait ses preuves et ne nécessite donc pas de recherche et de développement.

Néanmoins, la séparation isotopique par diffusion gazeuse est très consommatrice en énergie : environ 2 500 kWh par UTS. Pour alimenter l'usine Georges Besse à sa pleine capacité de production de 10,8 millions d'UTS par an, il faut trois des quatre réacteurs EDF de 900 Mwe situés sur le même site du Tricastin.



Enrichissement par LASER



COGEMA et le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) ont travaillé longtemps à la mise au point d'un procédé totalement nouveau, SILVA. Il utilisait un rayonnement laser pour exciter sélectivement les atomes ^{235}U au sein d'une vapeur d'uranium métallique à très haute température, afin de les séparer ensuite par un champ électrique.

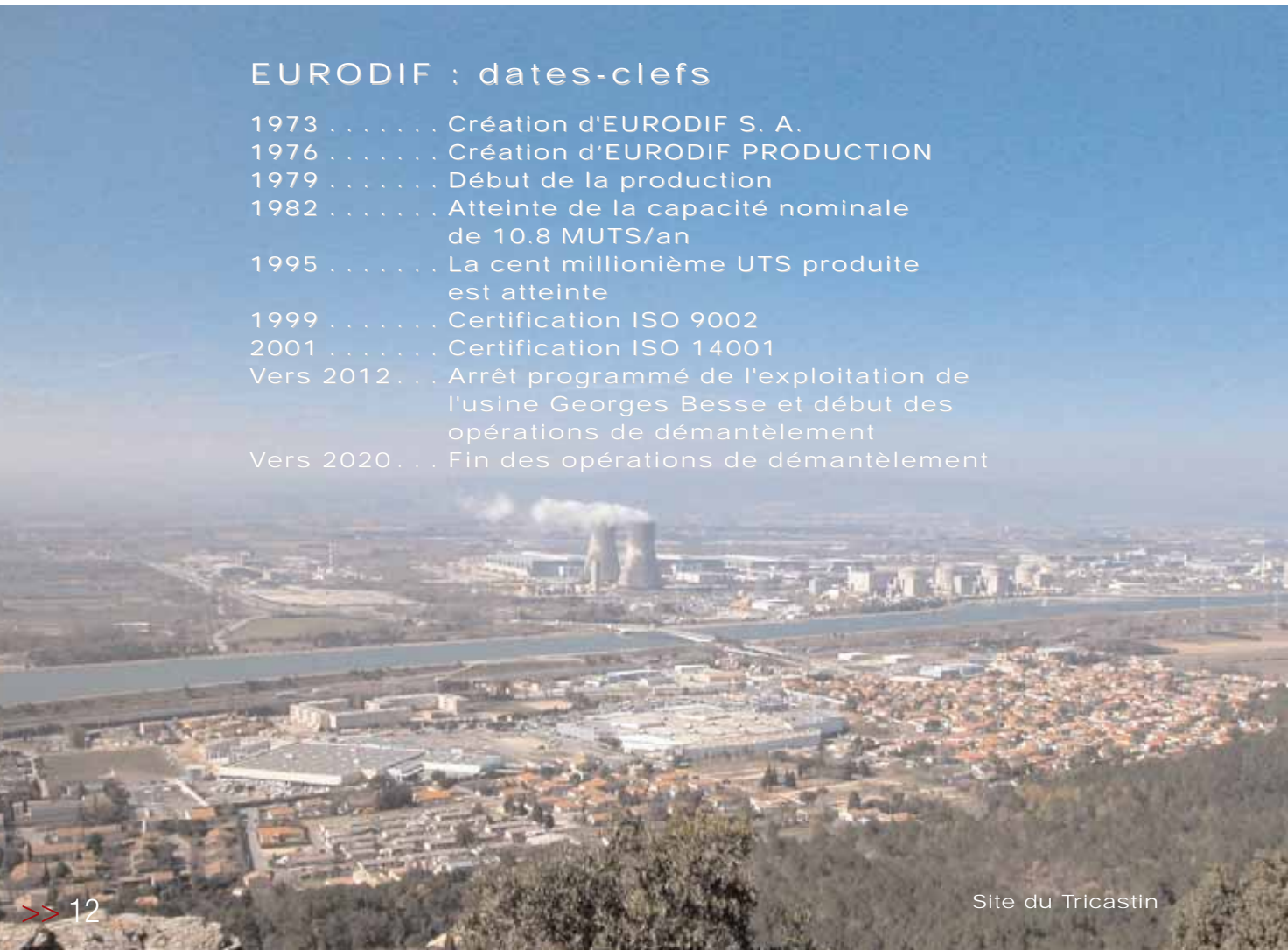
Le procédé d'enrichissement par laser demande peu d'énergie et l'enrichissement isotopique se fait pratiquement en un seul passage alors que les autres procédés nécessitent une succession de passages en cascade.

Si le procédé SILVA a fait la preuve de sa capacité théorique à enrichir de l'uranium, son utilisation industrielle se heurte à des coûts rédhibitoires compte-tenu de la technologie et des matériaux actuels.

Aux États-Unis, le DOE (Department Of Energy) puis l'USEC (société d'enrichissement américaine) avaient développé le même procédé (AVLIS) pour parvenir aux mêmes conclusions, en 1999. Ils ont alors abandonné toutes les recherches portant sur ce procédé et reportent tous leurs efforts sur la technologie de centrifugation, dont ils avaient interrompu le développement en 1985.

EURODIF : dates-clefs

- 1973 Création d'EURODIF S. A.
- 1976 Création d'EURODIF PRODUCTION
- 1979 Début de la production
- 1982 Atteinte de la capacité nominale de 10.8 MUTS/an
- 1995 La cent millionième UTS produite est atteinte
- 1999 Certification ISO 9002
- 2001 Certification ISO 14001
- Vers 2012 Arrêt programmé de l'exploitation de l'usine Georges Besse et début des opérations de démantèlement
- Vers 2020 Fin des opérations de démantèlement



La centrifugation

Ce procédé, qui date de l'après guerre, assure aujourd'hui la production d'une fraction conséquente des UTS produites dans le monde si on inclut l'ex-URSS où il est majoritairement utilisé.

Ce procédé consiste à faire tourner à très haute vitesse un bol cylindrique contenant du gaz UF_6 (figure ci-après). Les molécules les plus lourdes se concentrent à la périphérie, tandis que les plus légères migrent préférentiellement vers le centre.

Les progrès réalisés en matière de résistance des matériaux au début des années 1990 (utilisation de la fibre de carbone) ont permis à la technologie par centrifugation de s'imposer progressivement face à la diffusion gazeuse.

La centrifugation est actuellement considérée par tous les experts comme la technologie la plus performante en matière d'enrichissement de l'uranium.

En particulier, elle présente l'avantage de consommer beaucoup moins d'électricité que la diffusion gazeuse, technologie actuellement utilisée par le groupe AREVA, et présente ainsi une structure de coût très différente.

Cette technologie, qui a un impact très faible sur l'environnement, a été mise en œuvre par la société URENCO depuis de nombreuses années, dans les pays européens suivants :

- l'Allemagne (Gronau),
- la Grande-Bretagne (Capenhurst),
- les Pays-Bas (Almelo).

Elle est également utilisée en Russie et au Japon et le sera sans doute prochainement aux États-Unis.

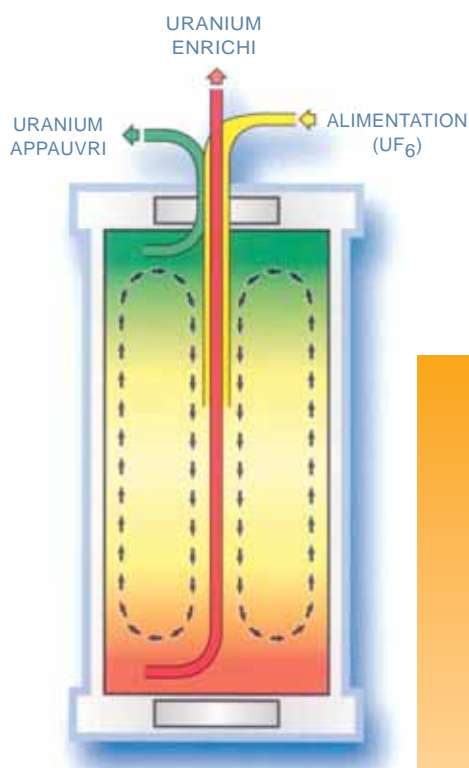


Schéma d'une centrifugeuse

SAVOIR PLUS

Les fonctions fondamentales d'une centrifugeuse

>> Un cylindre allongé tourne à très haute vitesse sous vide dans un carter étanche. Selon les générations de machines, ce cylindre ou "bol" est construit en matériaux métalliques à haute résistance mécanique ou en composite à base de fibres de carbone. Les propriétés mécaniques des ces dernières ont permis de multiplier de 5 à 10 fois les performances des machines.

>> L'uranium est introduit sous forme d'hexafluorure d'uranium UF_6 comme en diffusion gazeuse.

>> Par l'effet de la force centrifuge, les particules les plus lourdes sont envoyées à la périphérie, créant un effet de séparation isotopique.

>> De façon à accroître l'effet isotopique, ce gaz est mis en circulation axiale par des mécanismes physiques. Le gaz enrichi en isotope léger, et situé plus au centre du bol, est transporté vers le haut de la machine tandis que le gaz enrichi en isotope lourd descend vers le bas. Les produits enrichis et appauvris sont récupérés aux deux extrémités de la machine.

URENCO est une entreprise de droit anglais dont l'origine remonte au Traité d'Almelo conclu au début des années 70 entre les gouvernements allemand, néerlandais et britannique afin de développer la technologie d'enrichissement d'uranium par centrifugation.

Cascade de centrifugeuses URENCO



Le marché de l'enrichissement

L'évolution du parc nucléaire mondial

Face aux besoins énergétiques croissants, le nucléaire devrait continuer à assurer une partie significative des productions d'électricité de base. Aujourd'hui, la production d'électricité d'origine nucléaire croît plus vite que la demande globale d'énergie. D'intenses besoins de renouvellement du parc électrique existent partout dans le monde. Il est prévisible que le rythme de développement mondial, actuellement de 2 % par an, se maintienne, au moins pour la production mondiale d'électricité d'origine nucléaire.

L'électricité d'origine nucléaire est devenue un enjeu politique, particulièrement en Europe. Ce paramètre doit être pris en compte dans une perspective d'évolution de cette source d'énergie bien que son influence soit pondérée par l'inertie des capacités installées.

En se fondant sur le parc électronucléaire installé en 2000, la prolongation de durée de vie des réacteurs en fonctionnement combinée à l'installation de nouveaux réacteurs, soit pour compenser des fermetures, soit pour accroître la capacité installée dans une région, laisse augurer d'une croissance modérée en accord avec celle de la demande d'électricité.

Ce scénario ne prévoit ni une diminution de la part du nucléaire, ni des mesures spécifiques en sa faveur telles que la mise en place d'une taxation du carbone pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ces perspectives prudentes servent de référence au projet Georges Besse II.

En effet, cette nouvelle usine, dans la continuité de l'usine actuelle, est dimensionnée pour répondre au seul besoin du parc nucléaire existant.

L'électricité nucléaire dans le monde

On dénombre 441 réacteurs nucléaires de par le monde : 118 en Amérique du Nord, 213 en Europe et 102 en Asie. En Afrique, l'Afrique du Sud dispose de 2 réacteurs nucléaires et, pour l'Amérique Centrale et du Sud, le Mexique, le Brésil et l'Argentine disposent d'un parc de 6 réacteurs. Le nucléaire représente 35 % de la production d'électricité dans les pays de l'Union Européenne, 30 % en Asie du Nord-Est et environ 20 % aux États-Unis.



Les acteurs et la répartition du marché

L'industrie de l'enrichissement est concentrée. Quatre grandes entités cumulent la quasi-totalité des capacités d'enrichissement :

- AREVA à travers sa filiale EURODIF,
- URENCO (Royaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne),
- MINATOM (Russie),
- USEC (États-Unis).

Les capacités mondiales d'enrichissement disponibles sont de l'ordre de 34 millions d'UTS par an, auxquels s'ajoutent l'équivalent de 5,5 millions d'UTS issues du HEU⁽¹⁾ militaire russe, dont USEC⁽²⁾ est l'importateur exclusif. La répartition du marché correspond aux capacités de production disponibles des différents acteurs.

AREVA et USEC utilisent actuellement la technologie de diffusion gazeuse, URENCO et MINATOM celle de la centrifugation.

L'arrivée sur le marché civil des matières issues du désarmement (HEU) renforce la compétition sur un marché déjà très concurrentiel.

Dans un tel contexte, la compétitivité, la fiabilité et la flexibilité sont des éléments importants.

L'opération d'enrichissement de l'uranium constitue pour le groupe AREVA une activité clé.

AREVA, premier fournisseur mondial pour l'énergie nucléaire, a réalisé en 2003 un chiffre d'affaires de 8,2 milliards d'euros dont environ 9 % provient de l'activité "enrichissement". Les ventes de cette dernière activité se sont élevées à 727 millions d'euros en 2003.

A ce jour, plus de 40 % des ventes d'uranium enrichi sont réalisées à l'exportation, le reste alimentant les besoins français.

ACTEUR	CAPACITÉ DISPONIBLE	TECHNOLOGIE ACTUELLE
MINATOM (Russie)	11 MUTS / an	Centrifugation
AREVA / EURODIF (France)	10 MUTS / an	Diffusion gazeuse
USEC (États-Unis)	5 MUTS / an	Diffusion gazeuse
URENCO (Royaume-Uni, Allemagne, Pays-Bas)	6 MUTS / an	Centrifugation
JNFL (Japon)	1 MUTS / an	Centrifugation
CNEIC (Chine)	1 MUTS / an	Centrifugation
USEC Importateur de HEU militaire russe	5 MUTS / an	Dilution
Total	38 à 39 MUTS / an	

Source : AREVA



(1) HEU
Highly Enriched Uranium
(Uranium Hautement Enrichi) :
matières issues du désarmement.

(2) USEC
United States
Enrichment
Corporation.