

En amont de la filière nucléaire (mines d'uranium et préparation du combustible)

LA FILIÈRE NUCLÉAIRE :
UNE DYNAMIQUE ENTRE
DES MARCHÉS DIVERSIFIÉS

L'innovation technologique est au cœur du cycle du combustible nucléaire. Les différentes étapes qui mènent à la fabrication du combustible font intervenir un savoir-faire et des technologies en constante évolution. Les combustibles utilisés aujourd'hui sont le fruit d'une longue période de développements, de modélisations très pointues et d'un retour d'expérience très important. Ils présentent des caractéristiques optimisées tant au plan opérationnel qu'au plan accidentel. Il en va de même pour les procédés de fabrication actuels. Dans un contexte post-Fukushima, l'enjeu principal pour les années à venir sera de garantir un niveau de sûreté toujours plus élevé pour les personnels de la filière comme pour les populations. Optimiser la productivité, assurer la stabilité d'approvisionnement des clients et amoindrir toujours plus l'impact sur l'environnement restent des impératifs fondamentaux pour l'avenir de l'industrie nucléaire.

Par **Philippe KNOCHE***

L'EXTRACTION DU MINÉRAI D'URANIUM

À l'état naturel, l'uranium est renfermé dans des minerais (pechblende, uraninite) contenus dans des roches granitiques ou sédimentaires, ainsi que dans certains phosphates. Deux principaux isotopes composent le minerai d'uranium, l'U 238 (²³⁸U) (dit fertile) et l'U 235 (²³⁵U) (qui est fissile).

L'U 235 est beaucoup plus rare que le premier, il ne représente que 0,7 % des ressources terrestres d'uranium. Or, il est, de par son caractère fissile, l'élément nécessaire pour le fonctionnement des réacteurs à eau

ordinaire (REO), qui composent l'essentiel du parc mondial. L'U 235 constitue la matière permettant la réaction en chaîne de fissions nucléaires qui se produit dans le cœur des réacteurs. Cela étant, le minerai à l'état brut n'est pas directement exploitable, l'extraction de l'uranium qu'il renferme nécessite plusieurs transformations exigeant un haut degré de technicité industrielle.

Si le minerai d'uranium est une ressource naturelle, certes en quantités finies, ses ressources connues couvrent aujourd'hui de façon très large les besoins à

* Areva.

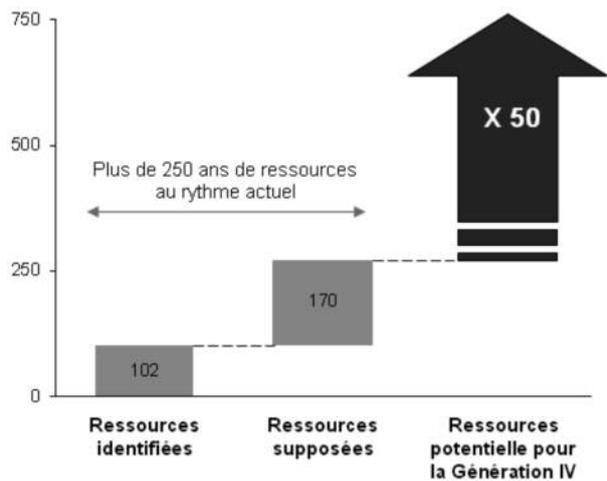
Pays producteurs (tU)	2008	2009	2010
Australie	8 430	7 982	5 900
Canada	9 000	10 173	9 783
Kazakhstan	8 521	14 020	17 803
Namibie	4 366	4 626	4 496
Niger	3 032	3 243	4 198
Total	43 853	50 772	55 663

Source : Areva.

Tableau 1 : Principaux pays producteurs d'uranium, 2008-2010.

venir. Il existe trois types de ressources en uranium : les ressources conventionnelles identifiées (6,3 millions de tonnes), les ressources conventionnelles supplémentaires estimées (10,4 millions de tonnes) et, enfin, les ressources non conventionnelles (principalement dans des phosphates – estimées entre 9 et 22 millions de tonnes).

Au rythme des besoins actuels (soit environ 60 000 tonnes/an), les ressources conventionnelles identifiées d'uranium permettront une production d'électricité durant un siècle, suivies de 170 années supplémentaires, si l'ensemble des ressources de minerais tant identifiées que supposées sont prises en considération.



Sources : AIEA, OCDE-NEA, 2009.

Graphique 1 : Ressources fissiles (années de consommation 2009).

À l'heure actuelle, la prospection de l'uranium est réalisée grâce à des images satellites et à des techniques géophysiques, notamment la radiométrie qui vise à détecter les descendants radioactifs de l'uranium. Les indications sur la quantité de minerai des gisements sont obtenues par des méthodes électriques et électromagnétiques, ainsi que par des études géochimiques. Quinze années peuvent s'écouler entre la détection de l'uranium et son exploitation. Ce délai relativement long s'explique par des contraintes réglementaires (permis de recherche, convention minière,...), ainsi que par la multiplicité des étapes à franchir avant la mise en production (prospection détaillée, sondages de reconnaissance,...).

Plusieurs techniques d'extraction sont actuellement utilisées. L'extraction à ciel ouvert consiste à ôter la partie supérieure de la roche recouvrant le gisement. Il est également possible d'accéder au minerai en creusant des galeries souterraines. Une technique plus récente, l'extraction par lixiviation *in situ* suppose l'injection dans le sous-sol de solutions acides ou basiques qui dissolvent l'uranium (la solution contenant de l'uranium est ensuite pompée). Enfin, l'uranium peut être extrait par coproduction, c'est-à-dire dans une mine contenant majoritairement un autre minerai.

Type d'extraction	Tonnes U	% à l'échelle mondiale
Souterraine	15 094	28
Ciel ouvert	13 541	25
Lixiviation	22 108	42
Total	53 663	100

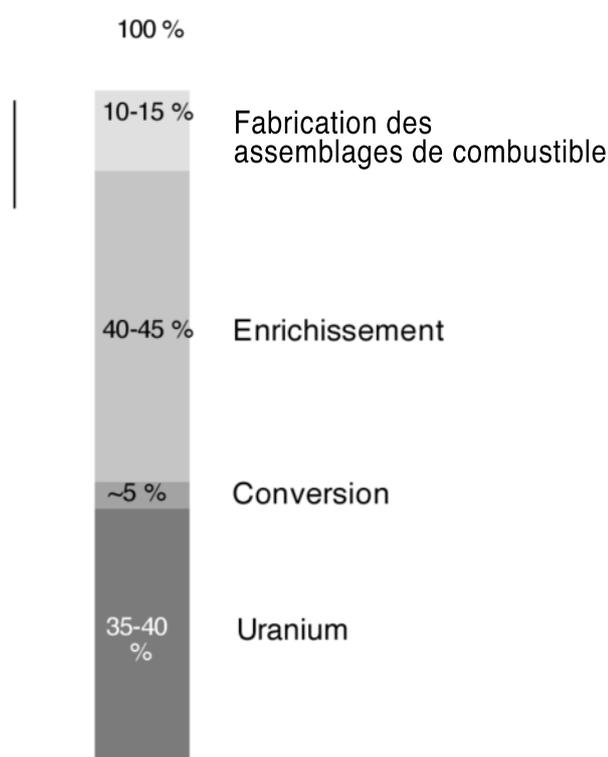
Source : World Nuclear Association, The Global Nuclear Fuel Market, 2011.

Tableau 2 : Répartition des différentes méthodes d'extraction de l'uranium.

Après le démantèlement des installations minières, les sites font l'objet d'une remédiation, puis sont placés sous surveillance radiologique et environnementale. Cette remise en l'état de l'écosystème occupe une place de plus en plus importante dans les contrats de concession minière signés entre les Etats et les exploitants.

Des évolutions majeures vont s'avérer structurantes pour l'extraction d'uranium dans les années à venir afin de diminuer la part des ressources énergétiques actuellement employées dans l'exploitation des mines. En effet, la mise en œuvre de nouveaux procédés d'exploration constitue un objectif significatif allant de pair avec la valorisation des ressources uranifères utilisées pour les réacteurs de prochaine génération. En outre, l'enjeu pour les décennies à venir sera d'améliorer l'extraction de l'uranium, qui en étant plus sélective permettra de réduire le poids de certaines opérations mécaniques de traitement du minerai (broyage, concassage) fortement consommatrices d'énergie et d'eau.

Certaines technologies sont actuellement à l'étude. Ainsi, l'extraction liquide/liquide (favorisant la décantation) ou l'extraction sur support solide utiliseront des molécules sélectives et robustes permettant de concentrer l'uranium plus efficacement. Sur un temps plus long, la récupération de l'uranium contenu dans des solutions peu concentrées pourrait également être envisagée. Cela suppose la mise au point d'une technique concentrant hautement l'uranium sur des supports solides afin de limiter les étapes de traitement permettant ainsi de gagner en énergie, en productivité et en impact sur l'environnement (par une diminution de la quantité des déchets industriels toxiques). Une fois extrait, l'uranium doit encore être acheminé, sous la forme de *yellowcake*, une poudre concentrée contenant environ 75 % d'oxyde d'uranium. Deux étapes indispensables suivent : la conversion et l'enrichissement de l'uranium.



Source : AREVA.

Graphique 2 : Décomposition des coûts de l'amont du cycle du combustible (€/MWh).

LA CONVERSION

La conversion consiste à raffiner le *yellowcake* (oxyde d'uranium) provenant des mines pour le purifier et à le transformer en hexafluorure d'uranium (UF_6).

Il existe actuellement dans le monde six acteurs industriels capables d'opérer la conversion de l'uranium à une échelle commerciale. La réduction programmée de la part du nucléaire dans le mix électrique en

Allemagne et au Japon a contracté la demande mondiale, tandis que les industriels ont des difficultés à réduire leurs coûts fixes. De plus, les fermetures temporaires d'installations, en Amérique du Nord, font également craindre une rupture dans le cycle, et donc dans la sécurité d'approvisionnement en uranium, sur le plus long terme.

Actuellement, l'usine Comurhex II d'Areva est le seul projet mondial d'envergure ayant pour but de donner un second souffle à une filière en difficulté, mais indispensable au cycle du combustible. Ces installations auront une capacité de conversion de 15 000 tonnes d'uranium par an (contre 14 000 tonnes actuellement, pour Comurhex I).

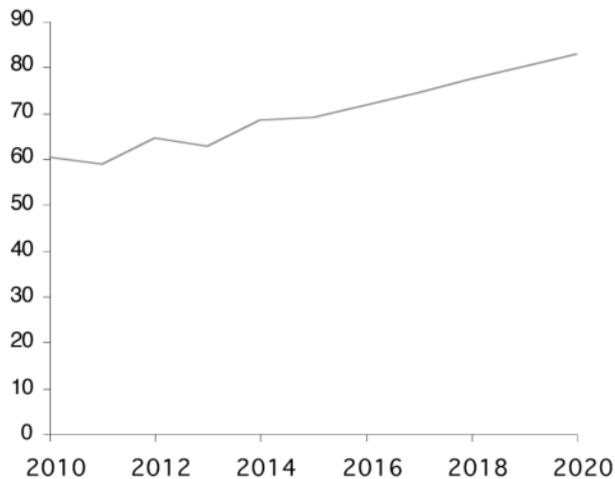
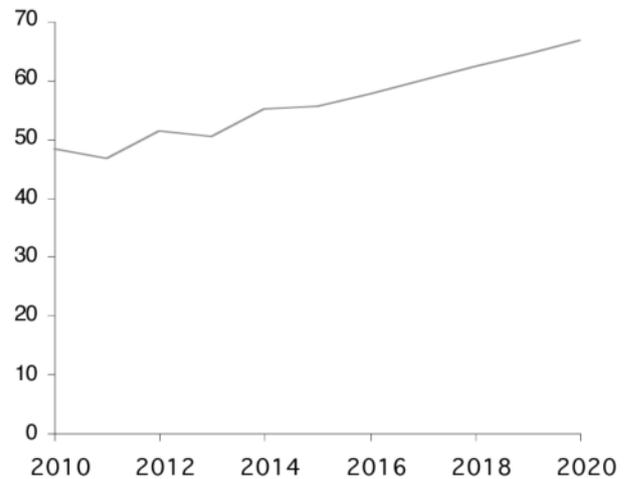
L'ENRICHISSEMENT

Une fois concentré et converti, l'hexafluorure d'uranium (UF_6) doit être enrichi afin de faire fonctionner les réacteurs à eau. L'enrichissement de l'uranium est une opération consistant à accroître la proportion de l'isotope U 235 présent dans l'uranium naturel à hauteur de 0,7 % en la faisant passer à une valeur comprise entre 3 et 5 %. Environ huit tonnes d' UF_6 entrant dans l'usine d'enrichissement produisent une tonne d'uranium enrichi avec une teneur en U 235 se situant entre 3 et 5 %. Le solde contient de l'uranium appauvri, dont la teneur en isotope U 235 est inférieure à 0,3 %.

Parmi les procédés d'enrichissement existants, deux sont exploités à l'échelle industrielle, la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation gazeuse. Ces méthodes s'appuient sur le différentiel de masse molaire entre l'U 235 et l'U 238.

La diffusion gazeuse est historiquement le premier procédé à avoir été opéré à grande échelle. Son principe consiste à séparer les deux éléments grâce à un diffuseur, à un compresseur et à un échangeur de chaleur. Ainsi, la différence de masse molaire entre l'hexafluorure d'uranium 235 et l'hexafluorure d'uranium 238 (ce dernier étant plus dense que le premier) conduit à leur séparation isotopique lorsqu'un mélange gazeux contenant les deux molécules traverse une membrane de filtration présentant les qualités requises.

La diffusion gazeuse est très énergivore, cette opération étant répétée jusqu'à 1 400 fois afin de produire un uranium qui soit suffisamment enrichi. Cette technologie est donc peu à peu remplacée par l'ultracentrifugation. D'ici à 2020, la moitié des capacités d'enrichissement installées devrait être renouvelée, ce qui amène l'industrie à s'orienter vers le procédé d'ultracentrifugation, plus économe en énergie. Un des exemples concrets est le passage, pour Areva, de l'usine Georges Besse I (diffusion gazeuse) à l'usine Georges Besse II (ultracentrifugation). Cette transi-

Demande en conversion
(Milliers de tonne tUnat)Demande d'enrichissement
(MUTS)

Source : World Nuclear Association, The Global Nuclear Fuel Market 2011, Reference scenario.

Graphique 3.

tion se traduira par une nette baisse de la consommation d'électricité dans la mesure où l'ultracentrifugation en consomme cinquante fois moins que la diffusion gazeuse.

L'ultracentrifugation s'opère *via* des rotors contenant du gaz hexafluorure d'uranium (UF_6) tournant à grande vitesse. L'effet de la force centrifuge éloigne les molécules les plus lourdes à la périphérie tandis que les plus légères se rapprochent du centre.

En sus de la diffusion et de l'ultracentrifugation, l'enrichissement par laser est actuellement à l'étude. Les essais opérés par *Global Laser Enrichment* (de la *General Electric Energy*) aux Etats-Unis en 2009 et en 2010 sont jugés satisfaisants à l'échelle du laboratoire. Pour l'heure, l'inexistence de procédé industriel rend incertain le montant des investissements nécessaires. Le projet SILVA (*Séparation Isotopique par Laser sur la Vapeur Atomique de l'uranium*) mené en France n'a pas eu de suite, pour les mêmes raisons.

À l'image de l'industrie de la conversion, l'industrie de l'enrichissement est un marché très concurrentiel de type oligopolistique. Quatre acteurs principaux ont une présence significative à l'échelle mondiale. Il s'agit d'Areva, du consortium Urenco, du russe Tenex/TVEL et de l'américain USEC. Les coûts d'entrée sur ce marché expliquent le faible nombre des concurrents. Les trois principales barrières sont l'importance des capitaux à mobiliser, le haut niveau de technologie à maîtriser et les aspects juridiques afin de se conformer au droit international.

Les préoccupations liées à la non-prolifération nucléaire impliquent en effet le respect de règles strictes. Ces préoccupations expliquent pourquoi le nucléaire civil (en particulier l'enrichissement) fait l'objet d'engagements internationaux à travers le traité de non-prolifération nucléaire de 1968 (1). Le développement des capacités d'enrichissement repré-

sente en effet une étape clé difficile à franchir pour tout pays souhaitant maîtriser l'ensemble du cycle du combustible nucléaire à des fins civiles et/ou militaires.

Le marché de l'enrichissement est un marché en croissance. En 2010, la demande s'est établie à 49 MUTS (millions d'unités de travail de séparation, l'unité de mesure de l'enrichissement). Les programmes ambitieux de construction de nouvelles centrales (en particulier, indiens et chinois) expliquent en partie la raison pour laquelle la demande devrait atteindre 66 MUTS en 2020 et se situer au-delà de 80 MUTS en 2030 (2).

LA FABRICATION D'ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

Une fois enrichi, l'uranium n'est pas encore directement utilisable dans les réacteurs. Pour qu'il le devienne, il est nécessaire de disposer de pastilles d'oxyde d'uranium (UO_2) dans des assemblages de combustible nucléaire. Ces assemblages constitueront le cœur du réacteur, là où se déroule la fission nucléaire libératrice d'énergie. Leur conception a pour finalité de maximiser le rendement énergétique et de maîtriser la réaction en chaîne, tout en assurant une barrière fiable pour empêcher la dispersion de matière fissile. Ces

(1) Aux termes du traité de non-prolifération nucléaire, l'Agence Internationale pour l'Énergie Atomique (AIEA) devient responsable de l'application du traité. Une des fonctions principales de l'AIEA est d'inspecter les installations nucléaires existantes et de s'assurer que celles-ci sont conformes aux engagements internationaux.

(2) Selon le rapport de la World Nuclear Association publié en septembre 2011.

	900 MWe	1 300 MWe	1 500 MWe	EPR
Nombre d'assemblages par cœur	157	193	205	241
Nombres de crayons par assemblage	264	264	264	265
Longueur des crayons (mètres)	3,6	4,3	4,3	4,2
Masse d'un assemblage (kg)	649	760	760	760

Source : AREVA.

Tableau 3 : Comparaison des assemblages de combustibles des REP français.

assemblages peuvent contenir de 200 à 500 kilogrammes de matière fissile. Ils sont composés de crayons contenant la matière uranifère et d'un cadre métallique généralement fabriqué en alliage de zirconium (ce matériau a pour propriétés principales de résister à la corrosion par l'eau à très haute température et de ne pas absorber les neutrons, ce qui permet d'optimiser la réaction nucléaire dans le cœur du réacteur).

Au préalable, l'UF₆ enrichi est dé-fluoré afin de convertir en poudre d'oxyde d'uranium (UO₂) par un procédé de conversion qui utilise un mélange gazeux de vapeur d'eau et d'hydrogène. La poudre obtenue est ensuite comprimée dans des petits moules cylindriques afin de les transformer en pastilles d'oxyde d'uranium. Ces pastilles sont ensuite « frites » (autrement dit cuites) dans des fours, à température très élevée (1 700°C). Elles sont ensuite enfilées dans des gaines de zirconium chargées en hélium afin de constituer des « crayons » contenant chacun environ 300 pastilles. Les crayons sont alors placés dans des grilles (le plus souvent carrées) afin de constituer un assemblage complet.

Le nombre d'assemblages de combustible dans le cœur du réacteur dépend de la conception de ce dernier et de la gestion du combustible. Ce nombre pourra également varier suivant l'étape dans la vie d'un réacteur, par exemple s'il s'agit d'un cœur en démarrage ou d'un cœur en fonctionnement équilibré.

En France, environ 1 200 tonnes de combustibles neufs (1 080 tonnes d'UOX et 120 tonnes de MOX) sont chargées chaque année dans les cinquante-huit réacteurs du parc nucléaire national. Cela nécessite l'extraction d'environ 8 000 tonnes d'uranium.

Le marché européen du combustible nucléaire est toutefois marqué par un déséquilibre conjoncturel entre l'offre et la demande. Ce déséquilibre a un impact direct sur les marchés à court et moyen terme. Entre 2012 et 2020, la demande de combustible ne devrait pas croître en Europe, tandis qu'elle connaîtra une croissance annuelle moyenne de 6 % en Asie. En 2030, sur les 304 GWe produits par les nouveaux réacteurs construits, 60 % le seront en Asie.

Pour chaque réacteur pressurisé européen (EPR) mis en service, l'impact positif sur le marché du combustible en Europe s'élèvera à 130 tonnes d'uranium (tU) pour le premier cœur, puis de 35 à 40 tU tous les dix-huit mois. L'impact est donc favorable, mais il est limité.

En ce qui concerne la fabrication des assemblages de combustibles, les capacités de conception, d'analyse de sûreté et de modélisation s'avèrent capitales. Les conditions sans cesse renforcées en matière de sûreté impliquent que l'examen des dossiers techniques sera de plus en plus exigeant. De ce fait, la filière doit se structurer au regard d'un environnement réglementaire déjà très strict et qui le deviendra encore davantage suite à l'accident du 11 mars 2011 à Fukushima.

Différentes pistes d'amélioration sont d'ores et déjà envisagées en ce qui concernent le développement, le coût de production et la sécurité offerte par les architectures de combustible. Ces recherches visent notamment une meilleure tenue du combustible en phase accidentelle, l'efficacité de la réaction en chaîne et son contrôle, des options céramiques pour le gainage et des améliorations concernant l'entreposage de longue durée des combustibles usés.

Areva a développé des solutions visant à récupérer 96 % des matières issues du combustible usé. Au cours d'une étape ultérieure, dite de retraitement, l'uranium (appelé uranium de retraitement, URT) et le plutonium (présent dans le combustible usé) sont séparés des actinides mineurs et des produits de fission. L'URT peut être recyclé dans des réacteurs à eau ordinaire, après une phase d'enrichissement.

En France, chaque année, 600 tonnes d'URT sont ainsi ré-enrichies pour alimenter deux réacteurs d'EDF. Le plutonium est, quant à lui, recyclé sous la forme de combustible MOX, qui est composé d'environ 8 à 10 % de plutonium (Pu), le solde étant de l'uranium appauvri.

CONCLUSION

L'uranium est la matière à l'origine de la production d'électricité nucléaire. Il nécessite plusieurs étapes de transformation industrielle afin qu'une fission nucléaire puisse s'opérer. Malgré ces étapes successives d'extraction minière, de conversion, d'enrichissement et d'assemblage, l'électricité d'origine nucléaire demeure compétitive pour les ménages comme pour les entreprises.

Le cycle du combustible constitue également un élément majeur de la sûreté nucléaire et de la fiabilité des installations nucléaires françaises. Satisfaire à ces critères est une priorité pour la filière.

Le contexte économique et industriel du cycle du combustible nucléaire peut être amené à évoluer, mais les préoccupations en matière de sûreté et de sécurité demeurent fondamentales. C'est en cela que la recherche et le développement de techniques plus efficaces, toujours plus sûres et respectueuses de l'environnement sont une priorité pour l'avenir de la filière nucléaire.