

De la mine à l'électricité : aperçu de la filière de l'uranium en France

Michel Bornuat¹.

Découvert en 1789, l'uranium est longtemps resté sans intérêt jusqu'à ce que, à la fin du XIX^e siècle, Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie découvrent la radioactivité. De l'intérêt scientifique, l'uranium allait passer, un demi siècle plus tard, dans le domaine des applications militaires puis énergétiques grâce à la découverte, en 1939, de la fission et de la réaction en chaîne.

L'industrie de l'uranium est donc une industrie jeune, qui n'a qu'un gros demi-siècle d'existence et qui a connu deux grandes phases d'expansion, durant la seconde guerre mondiale (programme nucléaire militaire américain) et dans les années 1970, à la suite du premier choc pétrolier (programmes électronucléaires). Cette industrie a donc dû tester des solutions – d'où la diversité des filières en France et dans le monde – et résoudre de nombreux problèmes apparus lors des diverses phases de préparation, d'utilisation et de retraitement du combustible.

L'extraction du minerai

En France, il s'agit d'un rappel puisque la dernière mine d'uranium, celle du Bernardan, à Jouac, dans le nord Limousin, a cessé toute activité en 2001. De 1948 à 2001, environ 80 000 t d'uranium ont été extraites des mines françaises, principalement dans le nord du Limousin (33 kt), la Vendée (14,5 kt), le bassin permien de Lodève (14,2 kt), le Forez (7,2 kt) et divers districts du Massif central (environ 10 kt). Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

et la Compagnie générale des matières nucléaires (Cogema), premier et dernier exploitants², en ont produit environ 85%, les 15% restants ayant été extraits par diverses sociétés privées (Scumra, Cfm, Simura, Dong Trieu, Total Compagnie Minière...).

Les teneurs des minerais des mines françaises étaient généralement situées entre 1 et 6‰ (en moyenne 3 kg d'uranium par tonne, soit environ 1000 fois le clark, teneur moyenne de l'écorce terrestre) avec cependant quelques valeurs plus élevées dans de petites mines du Limousin (15‰ aux Loges et 20‰ à Henriette, découverte dès 1948). Ces teneurs ont été longtemps dans les normes internationales mais, depuis une vingtaine d'années, des gisements à très haute teneur ont été découverts en Australie et surtout au Canada (Athabasca avec notamment 12,75% à McArthur River).

Les mines françaises ont apporté une contribution importante aux applications nucléaires, militaires et civiles, mais n'ont jamais couvert l'intégralité des besoins de la France. L'essentiel de l'approvisionnement français provient maintenant du Niger et du Canada, comme le montre le tableau 1 ci-après. La Cogema produit environ 7000 t d'uranium par an (5 540 t en 2003, du fait de l'arrêt de Cluff Lake), soit de l'ordre de 20% de la production mondiale estimée à environ 35 300 t U en 2003 (29% Canada, 22% Australie, 9% Niger). À noter que la Cogema est également un producteur d'or : Australie, Côte d'Ivoire, Soudan.

1. Remerciements à Bertrand Barré, Philippe Garderet et Michel Jorda pour leur contribution à l'élaboration de ce texte.

Courriels : bertrand.barre@areva.com ; philippe.garderet@areva.com ; michel.jorda@irsn.fr

2. Le 3 septembre 2001, le groupe Areva a été créé par rapprochement de CEA Industrie, Cogema et Framatome.

Pays	Sociétés	Répartition capital	Commentaires
Niger	Société des Mines de l'Aïr (Somaïr)	- 63,4% Cogema - 36,6% État nigérien	Gisement sédimentaire. Environ 40 000 t U produites entre 1971 et 2003. Production annuelle de 1000 t U environ. Teneur : 3 kgU /t minerai.
	Compagnie minière d'Akouta (Cominak)	- 34% Cogema - 31% État nigérien - 25% société japonaise Ourd - 10% société espagnole Enusa	Gisement sédimentaire. Environ 50 000 t produites depuis 1974. Production annuelle d'environ 1000 t. Teneur : 4-5 kg U /t minerai.
Canada	Cogema Resources Inc (100% Cogema)	100% Cogema	Cluff Lake : - environ 22 000 t U produites depuis ouverture (1000-2000 t/an U ; teneurs : 5-20 kg U /t minerai) ; - arrêt en 2002.
		70% Cogema	McClellan Lake : - environ 12 000 t U produites entre 1999 et 2003 ; - production annuelle d'environ 3000 t U ; - teneur : 28 kg U /t minerai.
		70,5% Cogema	Midwest : non encore en exploitation ; réserves de 10 000 t U ; minerai sera traité à l'usine de McClellan.
		30,2% Cogema	McArthur River : découvert en 1989 ; réserves dépassant 150 000 t U à environ 180 kg U /t de minerai. Exploitation en souterrain par Cameco depuis 1999. Production annuelle de 7000 t U. Traitement dans usine de Key Lake (Cogema : 16,7%).
		37,1% Cogema	Cigar Lake : découvert en 1981 ; réserves estimées à 135 000 t U à 200 kg U/t de minerai. Production pourrait démarrer en 2005. Opérateur Cameco.
Kazakhstan	Katco	- 51% Cogema - 49% organisme d'État kazakh Kazatomprom	Muyunkum : première production fin 2001. Capacité usine entre 500 et 1000 t U/an.
Australie			Koongara (Territoire du Nord) : moratoire sur une exploitation éventuelle. Participation de 7,5% dans <i>Energy Resources of Australia</i> qui détient les gisements de Ranger et Jabiluka (Territoire du Nord).

Tableau 1. Gisements et production d'uranium par la Cogema : source Cogema (Photos 1 à 5).



Photo 1. Mine à ciel ouvert de SOMAÏR, Arlit, Niger (cliché AREVA/Jean-Marie Taillat).



Photo 2. Usine de traitement du minerai de la SOMAÏR, Arlit, Niger (cliché AREVA/Olivier Martel).



Photo 3. Remontée du minerai par bande transporteuse. Mine souterraine d'Akouta. COMINAK, Niger (cliché AREVA/Jean-Marie Taillat).



Photo 4. Usine de traitement du minerai d'Akouta. COMINAK, Niger (cliché AREVA/Jean-Marie Taillat).



Photo 5. Site de McClean Lake, Canada (cliché AREVA/DARKHORSESTUDIO).

D'un point de vue géologique, les gisements français du socle hercynien étaient soit filoniens, soit en amas liés aux épisyénites. Les gisements liés aux strates étaient situés dans les bassins permien de Lodève, Bourbon-l'Archambault (Autunien) ou les formations tertiaires à Saint-Pierre-du-Cantal (Oligocène) ou Coutras (Lutétien, Gironde, non exploité).

Au Canada, la plupart des gisements sont situés à la base du bassin précambrien de l'Athabasca (Saskatchewan). D'une manière générale, les grands gisements mondiaux sont liés, soit à des intrusions de granitoïdes évolués (Rossing en Namibie, Roxby Downs en Australie), soit à des formations sédimentaires continentales (Niger, par exemple).

Le traitement du minerai

Beaucoup de gisements ou de petits districts miniers français étaient trop petits pour supporter le coût de l'investissement nécessaire à une usine de traitement. Il y a donc eu beaucoup de transport de minerais, concentrés et résines vers les diverses usines des gros districts : l'Ecarpière (Vendée), la première en 1957, Bessines (Haute-Vienne, 1958), Les Bois Noirs (Loire, 1960), Le Cellier (Lozère), Saint-Martin-du-Bosc (Hérault, 1970), Mailhac (Haute-Vienne, 1977) et, à un moindre degré, Saint-Pierre-du-Cantal (Cantal, 1977) et Bertholène (Aveyron, 1984).

Les *flow-sheets* des usines de traitement sont évidemment différents et adaptés aux caractéristiques des minerais traités. Classiquement, après la phase de concassage – broyage, ils comportent une phase de lixiviation acide (ou alcaline pour les minerais à gangue calcaire comme à Lodève), puis la séparation liquide – solide par lavage des résidus à contre-courant, la purification des liqueurs par des solvants (et/ou résines) et la précipitation de l'uranium sous forme d'uranate. Par séchage, on obtient le fameux « *yellow cake* » titrant 70 à 80% d'uranium. Suivant les installations, le minerai et le *flow-sheet*, le rendement des usines était de 92 à 97%.

Une petite proportion des minerais de moyenne teneur (Les Bondons, Saint-Pierre-du-Cantal, Bertholène, entre autres), ainsi que ceux à basse teneur (environ 0,3%), ont été traités par lixiviation de longue durée, en tas.

D'une manière générale, peu de sous-produits économiquement récupérables sont associés à l'uranium.



Photo 6. « Yellow cake » sur filtre à bande. Ancienne usine de traitement du minerai de la Société des mines de Jouac, Haute-Vienne (cliché AREVA/Philippe Lesage).

La conversion

Les concentrés d'uranate de sodium (« yellow cake », Photo 6) provenant des diverses usines de traitement étaient envoyés à Malveys (Aude) puis à Pierrelatte (Drôme) dans les usines de la COMURHEX, Société pour la conversion de l'uranium en hexafluorure, dépendant de la Cogema.

La conversion peut se faire par voie humide ou par voie sèche. Dans le premier cas, quelques étapes supplémentaires sont nécessaires : dissolution nitrique, purification et précipitation du diuranate d'ammoniaque avant d'obtenir de l' UO_3 par calcination. Les deux voies se terminent par la réduction en UO_2 , la fluoruration en UF_4 et la fluoration en UF_6 qui permettent d'obtenir un UF_6 très pur pour enrichissement en uranium 235.

L'enrichissement isotopique

L'uranium naturel extrait du minerai est constitué à 99,3% d'uranium 238, non fissile, et de 0,7% d'uranium 235, seul susceptible de produire de l'énergie par fission. Cette proportion reste identique dans les produits issus du traitement et de la conversion. L'enrichissement isotopique permet d'obtenir un combustible UO_2 dont la teneur en uranium 235 est portée à environ 4%, soit 5 fois plus que dans l'uranium naturel. Il produit aussi, *de facto*, un uranium appauvri à 0,2-0,3% ^{235}U (5 kg pour 1 kg d'uranium enrichi), actuellement entreposé mais qui peut être utilisé en surgénérateur.

En France, l'enrichissement est réalisé par diffusion gazeuse dans l'usine George Besse (Photo 7) de la

Société européenne de diffusion gazeuse (Eurodif), dans le Tricastin (vallée du Rhône). Eurodif, contrôlée par la Cogema, est le résultat d'une association entre la France, la Belgique, l'Italie et l'Espagne. Elle possède dans le Tricastin la plus grande usine d'enrichissement au monde, représentant environ un quart de la capacité mondiale actuelle et qui peut assurer l'enrichissement des recharges annuelles de combustible d'environ 100 tranches de réacteurs de 1000 MWe. Active depuis 1982, cette usine a bénéficié de l'expérience acquise depuis 1967 dans la technologie de la diffusion gazeuse, dans l'ancienne usine militaire d'enrichissement de Pierrelatte.

Parmi les autres procédés d'enrichissement isotopique, l'ultracentrifugation gazeuse est maintenant opérationnelle au stade industriel et a été retenue par AREVA pour la future usine d'enrichissement Georges Besse II. Les procédés de séparation par laser ont fait l'objet d'études approfondies sans toutefois déboucher sur un procédé aujourd'hui industrialisable.

L'uranium appauvri peut être entreposé à long terme sous forme d' UO_2 , après défluoration de l' UF_6 .

La fabrication du combustible

Le combustible nucléaire contient la matière fissile (U , UO_2 ou $UO_2 - PuO_2$) sous une forme propice à sa tenue mécanique, à sa manipulation et à l'évacuation de la chaleur, en général sous gaine métallique étanche en Al - Mg - Zr qui transmet la chaleur au caloporteur.

AREVA est impliquée dans la fabrication des combustibles nucléaires à travers des filiales comme la Société industrielle de combustibles nucléaires (SICN) à



Photo 7. Vue de l'usine d'enrichissement Georges Besse d'Eurodif. Site du Tricastin (cliché DR/AREVA).

Annecy, ou des associations comme la Franco-belge de fabrication de combustibles (FBFC) à Dessel (Belgique), Romans et Pierrelatte.

La phase d'enrichissement isotopique produit aussi de l'uranium appauvri en uranium 235 qui est soit entreposé, soit utilisé dans la fabrication du combustible MOX (Mixed OXide) dans lequel l' UO_2 (92%) est associé au PuO_2 (8%) produit par les réacteurs électronucléaires et séparé lors de l'opération de retraitement.

L'utilisation du combustible dans les réacteurs

Le cœur d'un réacteur REP est constitué d'un grand nombre (150 à 200 environ) d'assemblages, eux-mêmes composés de centaines de « crayons », obtenus par empilements de pastilles dans une gaine en alliage de zirconium. À chaque arrêt pour rechargement, tous les 12 à 18 mois, une partie seulement (un tiers à un quart) du combustible est renouvelée. Le combustible reste donc 3 à 4 ans dans le réacteur. Le déchargement du combustible impose l'arrêt de la tranche.

Le contenu uranium global d'un réacteur varie d'environ 70 t à 110 t, suivant sa puissance. Compte tenu du parc actuel français, les besoins annuels en combustible sont d'environ 1100 t de combustible REP 235U et de 110 t de combustible MOX. Ceci correspond à un besoin annuel en uranium naturel d'environ 9000 t pour une production d'électricité de 400 TWh approximativement.

Dans le réacteur, le combustible est fortement modifié dans son aspect physique, sa teneur en matière fissile et sa composition. L'uranium 235 disparaît progressivement jusqu'à 1% environ, par fission surtout ; l'uranium 238 engendre le plutonium par capture neutronique et la fission de l'uranium 235 et du plutonium 239 provoque l'apparition de « produits de fission » divers, radioactifs, dont les principaux s'échelonnent entre le brome et l'europium. Par ailleurs, l'irradiation prolongée de l'uranium et du plutonium fait apparaître d'autres noyaux plus lourds : les transuraniens¹, actinides de numéro atomique supérieur à 92, essentiellement du neptunium (93) au curium (96).

La moitié du plutonium produit est « brûlé » dans le réacteur REP lui-même et l'autre moitié, séparée lors du retraitement (cf. ci-après), est réutilisable. Actuellement, le plutonium produit est réutilisé dans le combustible MOX.

Une partie des produits de fission sont des gaz (xénon, krypton) qui altèrent les propriétés physiques du combustible. La nécessité de la recharge a donc deux

raisons, d'ordre neutronique (teneur en matière fissile décroissante) et technologique (dégradation des gaines). A la sortie du réacteur, le combustible usé comprend 96% d'uranium résiduel (95% 238U, 1% 235U), 1% Pu et 3% de vrais déchets. Il possède une radioactivité intense mais une partie de celle-ci est due à des éléments à période courte ou très courte. Après une première désactivation de quelques mois en piscine attenante au réacteur, les combustibles irradiés sont transportés jusqu'à l'usine de retraitement (La Hague) où ils poursuivent leur désactivation pendant quelques années avant d'être retraités.

Le retraitement des combustibles usés.

L'usine de retraitement est située à La Hague (Cotentin) dans les unités UP2, avant 1988, et UP3, depuis, qui traitent les combustibles usés français et étrangers (Photos 8 et 9). Ces usines de retraitement sont très rares dans le monde. Outre les unités françaises, les seules usines actives sont au Royaume-Uni (Sellafield ; Dounreay est arrêtée), au Japon (Tokaimura) et en Russie (Cheliabinsk). Le Canada et les États-Unis ne font pas (ou plus) de retraitement et l'usine belge de Dessel est arrêtée depuis 1974. Mais des réalisations sont en cours au Japon (Rokkascomura, prévue pour 2006), en Inde et il y a également un projet en Chine.

Le combustible irradié est un mélange complexe de cinq types de constituants : uranium appauvri en uranium 235 par rapport au combustible frais, plutonium (divers isotopes), transuraniens (neptunium, américium et curium sont les principaux), produits de fission divers et zirconium provenant de la gaine. Le but est de séparer



Photo 8. Vue aérienne de l'usine de traitement des combustibles usés de COGEMA-La Hague, Manche (cliché AREVA/LES FILMS DE ROGER LEENHARDT).

1. Le plutonium (numéro atomique 94) fait partie des actinides transuraniens, mais en est généralement distingué du fait de son importance dans la filière nucléaire.



Photo 9. Piscine E, entreposage des combustibles usés. Usine de traitement des combustibles usés COGEMA-La Hague (cliché AREVA/Philippe Lesage).

ces composants pour en réutiliser certains (U, Pu) et stocker ceux qui sont inutilisables (déchets). Les opérations sont complexes et comprennent schématiquement, après l'entreposage en piscine :

- le dégainage mécanique par cisailage ;
- la dissolution du matériau combustible par l'acide nitrique (avec dégazage) et la séparation des tronçons de gaine et autres pièces métalliques pour compactage ;
- l'extraction conjointe des éléments U et Pu par solvant organique ;
- la purification et la concentration du plutonium et de l'uranium après séparation l'un de l'autre ;
- le traitement et le conditionnement des produits de fission et actinides mineurs par vitrification.

L'uranium de retraitement et l'uranium appauvri peuvent être utilisés dans les surgénérateurs avec le plutonium. Le plutonium est actuellement recyclé dans certains réacteurs REP 900 MWe, sous forme d'oxyde mixte $UO_2 - PuO_2$ (combustible MOX). Dans ce cas, la teneur en plutonium est d'environ 8% alors qu'elle pourra atteindre 20% dans le combustible des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides.

L'élimination des transuraniens par incinération nucléaire ne peut se faire qu'en réacteur et implique un retraitement beaucoup plus poussé pour séparer les transuraniens les uns des autres. L'incinération conduit alors à des éléments à vie beaucoup plus courte mais plus actifs, la durée et l'activité évoluant en sens inverse.

Le réenrichissement de l'uranium de retraitement à environ 1% d'uranium 235 est un processus plus compliqué que dans le cas de l'uranium naturel en raison de

la présence de divers isotopes artificiels de l'uranium. Cet enrichissement doit donc se faire dans des installations spécifiques et selon un processus différent, la centrifugation. L'Allemagne et la Russie disposent d'installations pour ce type d'enrichissement.

La gestion des déchets

Actuellement, la plus grande partie des déchets à haute activité est entreposée à La Hague ; pour les déchets de faible à moyenne activité, il existe un centre de stockage à Soullaines-Dhuys (Aube) géré par l'Agence nationale pour les déchets radioactifs (Andra).

La question des déchets est un des points auxquels le grand public, à juste titre soucieux de l'environnement, est sensible, et elle est traitée dans l'article suivant « Électronucléaire : quelques grandes questions » aux côtés d'autres aspects concernant la sûreté, le démantèlement des centrales nucléaires, les surgénérateurs, etc.