

## PROCÉDÉS INDUSTRIELS D'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

### RÉSUMÉ

En faisant le choix, après l'abandon de la filière des réacteurs UNGG (uranium naturel graphite gaz), de la filière des réacteurs à eau pressurisée (les REP) la France a été amené à développer une industrie d'enrichissement de l'uranium naturel qui ne contient que 0,7 % d'uranium U<sup>235</sup>, le seul élément fissile naturel. L'option retenue était la construction en 1978 d'une usine d'enrichissement basée sur la technologie de la diffusion gazeuse (DG), dénommée EURODIF, et rebaptisée en 1988 usine Georges Besse 1, premier président du directoire de la société Eurodif.

#### Nécessité de remplacer l'usine GB 1

Avec la fin des activités de la première usine Georges Besse 1 (GB 1) attendue à l'échéance 2013, il a fallu anticiper pour décider dès 2003 à un nouveau projet industriel qui soit techniquement et commercialement admissible.

Trois procédés étaient en concurrence : la diffusion gazeuse (DG), qui est un procédé très énergivore, l'enrichissement par voie laser SILVA qui a été expérimenté uniquement en laboratoire et l'ultracentrifugation (UC) un procédé plus économique en énergie, mais à caractère proliférant. Pour des raisons économiques, de fiabilité et de rapidité de mise en œuvre, Areva retient la centrifugation et le procédé Urenco.

L'usine Georges Besse 2 (GB2) a été démarrée en 2010. Deux années plus tard, sa capacité de production a été suffisante pour permettre le passage en relais avec l'usine GB 1 et la fermeture de cette dernière. GB 2 a atteint en 2016 sa pleine capacité de 7,5 MUTS (millions d'UTS<sup>1</sup>). Après la fermeture le 10 mai 2012 de GB 1, pour une capacité de production équivalente, il faut avec GB 2 environ 50 kWh électrique par UTS (50 kWh/UTS) soit une consommation électrique 50 fois moindre.

#### Nécessité de remplacer l'usine GB 1

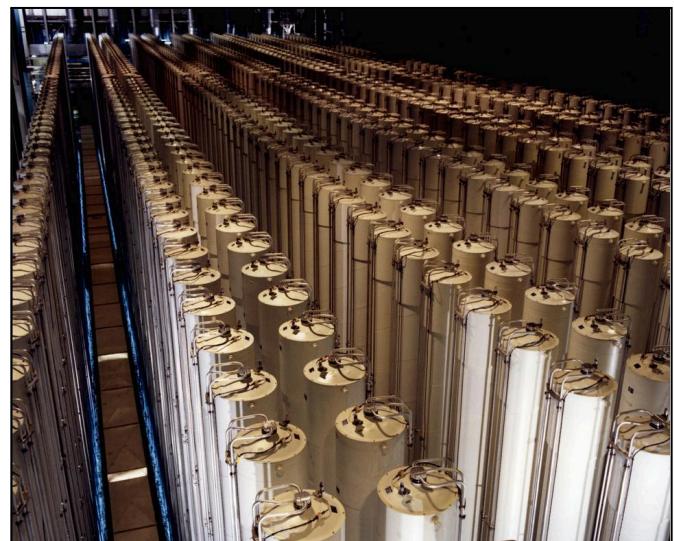
En octobre 2023, Orano a lancé un projet d'extension de l'usine d'enrichissement d'uranium du Tricastin.

Les capacités de production du site seraient augmentées de 30 % à l'échéance 2028 pour un coût d'investissement estimé à 1,7 milliard d'euros

La part d'Orano dans le marché mondial de l'enrichissement est estimée à 12 %, contre 45 % pour le russe [Rosatom](#), 31 % pour l'entreprise anglo-germano-néerlandaise [Urenco](#) et 12 % pour le chinois [CNNC](#).

L'objectif d'Orano est de contribuer à la baisse des importations russes à 15 % d'ici à 2028 contre 25,5 % en 2022. Par ce choix industriel la France se dote d'une autonomie complète du cycle du combustible.

#### Cascade de centrifugeuses ►



<sup>1</sup> L'unité de travail de séparation (UTS, SWU en anglais pour « Separative Work Unit ») correspond au travail nécessaire à la séparation d'un kilogramme d'uranium en deux lots de teneur isotopique différente (en uranium 235 fissile et en uranium 238).

Une mesure d'UTS est proportionnelle à la quantité de matière traitée (uranium) et à la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir la séparation (en kWh). Elle est fonction du taux d'enrichissement et de la qualité recherchés, déterminés par la teneur de résidus d'[uranium appauvri](#) issu de la séparation (variable entre 0.15 % et 0.35 % environ).

## 1. HISTORIQUE

Le seul élément fissile naturel est l'uranium-235 ( $U^{235}$ ), en très faible concentration (0,7 %) dans l'uranium naturel qui contient de l'uranium-238 ( $U^{238}$ ) dit « fertile » à plus de 99 %. Cet élément majoritaire possède une section efficace de capture notable qui permet de le transformer en plutonium-239 ( $Pu^{239}$ ), élément fissile artificiel, même avec des réacteurs nucléaires à uranium naturel modérés au graphite ou à l'eau lourde.

L'enrichissement de l'uranium étant une technologie très consommatrice d'énergie, le développement du nucléaire, militaire et civil, s'est appuyé au départ sur des réacteurs nucléaires à l'uranium naturel graphite gaz (UNGG), puis sur des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, alimentés en  $Pu^{239}$ .

En 1969 l'abandon de la filière française des UNGG se fait au profit de la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP) développée ensuite sous licence américaine Westinghouse. Le choix politique de la filière américaine ne fut politiquement pas facile à prendre, elle sera acceptée avec la condition que l'uranium qu'elle consomme soit enrichi en Europe.

L'inventivité développée pour les procédés d'enrichissement est rappelée dans l'article [GAENA N° 54<sup>2</sup>](#) qui contient une synthèse des différents procédés d'enrichissement à partir de l'uranium naturel (99 % d' $U-238$  fertile, 0,72 % d' $U-235$  fissile et 0,28 % de divers isotopes) : la séparation électromagnétique, la séparation chimique (procédé CHEMEX), la séparation par laser (procédé moléculaire SILMO et procédé sur vapeur atomique SILVA), la séparation par diffusion gazeuse (DG), la séparation par ultracentrifugation (UC) et pour mémoire quelques procédés « divers » (la tuyère Becker, la diffusion thermique, la résonance cyclotronique ionique...).

L'enrichissement de l'uranium naturel est à la base des filières des réacteurs électrogènes les plus courants : réacteurs à eau pressurisée (REP) et réacteurs à eau bouillante (BWR). Cette technologie fonde également le développement du nucléaire militaire.

À la suite du quadruplement du prix du pétrole fin 1973, le plan Messmer (mars 1974) lance un vaste programme de construction de centrales nucléaires. À l'époque, tout autant que les arguments économiques, il s'agissait de justifications politiques : le nucléaire devait être un élément essentiel de « *l'indépendance énergétique du pays* ». Ce plan, en prévoyant la construction de treize réacteurs de 900 MW en deux ans, allait modifier totalement les données industrielles : en 1970, 5 % de l'électricité produite en France est d'origine nucléaire. Des tranches de 1300 MW sont construites à partir de 1976. L'effort se poursuit jusqu'à la fin du siècle, date à laquelle les trois quarts de l'énergie électrique sont d'origine nucléaire (58 réacteurs en service dans 19 centrales).

Dans le monde les principales grandes nations industrielles choisissent de développer le nucléaire civil sans toutefois atteindre le même pourcentage d'énergie électrique d'origine nucléaire qu'en France. Cette situation va induire une forte demande d'uranium faiblement enrichi qualité industrielle (de 3 à 4 % d' $U^{235}$ ) : un REP de 900 MW consomme environ 27 tonnes d'uranium enrichi par an.

Dans les années 60 le centre CEA de Pierrelatte se composait de quatre usines en cascade, permettant d'obtenir à la sortie de l'usine « très haute » un enrichissement supérieur à 90 % d' $U^{235}$ .

Dès 1969, fort de cette expérience acquise dans le nucléaire militaire, la France souhaitait se doter d'une autonomie complète sur le cycle du combustible, et l'idée d'une usine civile européenne d'enrichissement de l'uranium avait fait son chemin. L'évolution du contexte politico-économique allait précipiter les décisions : en novembre 1973, naissance du projet d'une entreprise spécialisée dans l'enrichissement de l'uranium filiale de la société Eurodif (European Gaseous Diffusion Uranium Enrichment Consortium).

L'accord signé décide de constituer une société commune (société anonyme à directoire et conseil de surveillance) pour les études et recherches dans le domaine de l'enrichissement par diffusion gazeuse, ainsi que la réalisation et l'exploitation d'usines et la commercialisation d'uranium enrichi.

Après quelques tractations le site nucléaire du Tricastin à Pierrelatte fut retenu, l'inauguration de l'usine Eurodif aura lieu en avril 1979. Elle avait une durée de fonctionnement prévue de 21 années qui sera prolongée de 12 années (arrêt mai 2012). Elle sera renommée « usine Georges Besse GB I » en l'honneur de Georges Besse, premier président du Directoire de la société Eurodif.

Pour assurer le relais de GB I se posa la question du choix entre trois procédés mis en compétition : soit continuer avec la diffusion gazeuse (DG), soit retenir le procédé sans « mauvaises surprises » d'ultracentrifugation, soit adopter un procédé séduisant et novateur : la séparation isotopique par laser.

<sup>2</sup> Article [GAENA N° 54](#) : L'enrichissement de l'uranium - Robert Brugère.

Les études sur ce dernier procédé ont débuté durant les années 1980 au Etats-Unis, en France et au Japon. Le principe du procédé s'appuie sur une infime différence entre le spectre d'absorption de l'U<sup>235</sup> (502,73 nanomètres) et celui de l'U<sup>238</sup> (502,74 nanomètres). À l'aide d'un laser accordable on produit une excitation et une ionisation sélective de l'U<sup>235</sup> par un effet photoélectrochimique. Le procédé fonctionne à la *température ambiante*, un vaporisateur créant un courant d'uranium gazeux.

Malgré les avantages de ce procédé (bonne efficience énergétique, facteur de séparation élevé et un faible volume de déchets radioactifs) et le fonctionnement avec succès d'un « pilote », Areva (aujourd'hui Orano) n'a pas jugé suffisant le développement technologique du procédé SILVA et a retenu comme procédé industriel l'ultracentrifugation de technologie Urenco (entreprise européenne; participation de l'Allemagne E-On et RWE 1/6 chaque, des Pays-Bas 1/3 et du Royaume-Uni 1/3) au vu de sa percée spectaculaire liée notamment à l'utilisation de fibres de carbone permettant d'accroître de manière significative la vitesse de rotation des centrifugeuses.

Autour des années 2000, l'usine Georges Besse II constitue l'un des plus gros projet industriel national avec un budget initial de 3 milliards d'euro et une durée des travaux d'une dizaine d'années. L'usine sera inaugurée le 14 décembre 2010.

## 2. PROCÉDÉS INDUSTRIELS

À l'échelle industrielle, seuls deux procédés d'enrichissement de l'uranium naturel ont été développés : la diffusion gazeuse (DG) et l'ultracentrifugation (UC) malgré son caractère proliférant<sup>3</sup>.

### 2.1. LA DIFFUSION GAZEUSE

Le procédé de diffusion gazeuse a été mis au point puis industrialisé dans les années 40-45 aux USA dans le cadre du Manhattan Project.

Le principe du procédé est simple : l'UF<sub>6</sub> gazeux (hexafluorure d'uranium) est poussé par de puissants compresseurs (moteurs électriques de plusieurs MW) à travers une cascade de diffuseurs contenant de fines barrières de diffusion poreuse (quelques milliards de pores par cm<sup>2</sup>) pour séparer l'U<sup>235</sup> de l'U<sup>238</sup>.

La différence de masse entre les deux isotopes étant très faible (moins de 1 %), l'enrichissement à chaque passage d'une barrière est très faible, l'usine GB I comportait 1400 étages pour obtenir un enrichissement significatif.

Durant la phase de développement, les techniciens et les industriels ont dû résoudre de nombreux problèmes technologiques (réalisation des barrières constituées d'une céramique poreuse, « garnitures » tournantes d'étanchéité, joints métalliques, ....) liées principalement aux conditions thermodynamiques de fonctionnement : température (> 70 °C et jusqu'à 110 °C pour augmenter les rendements) et pression (> 1,5 atm).

L'usine GB I avait une capacité de production de 10,80 millions d'UTS/an<sup>4</sup>. Cela permettait de fournir le combustible nécessaire au fonctionnement d'une centaine de réacteurs REP de 900 MW, soit sensiblement un quart de la production mondiale d'uranium enrichi.

La consommation électrique était de l'ordre de 2500 MW ce qui correspondait à la production électrique de 3 des 4 réacteurs de 900 MW d'EDF Tricastin. Lors des révisions ou des rechargements en combustible d'un réacteur, les 3 autres (soit 2700 MW) restaient toujours disponibles. La centrale EDF Tricastin est interconnectée au réseau français mais a été construite « volontairement » tout près de GB I pour assurer son alimentation dans toutes les situations.

On retiendra pour la suite : Avec le procédé DG il faut environ 2500 kWh électriques par UTS (2500 kWh/UTS), une part importante de la consommation électrique est prise par les compresseurs (15 TWh par an), la DG est le *procédé historique le plus gros consommateur d'énergie*.

L'image suivante, avec les petits personnages au bas, donne une échelle d'une installation industrielle de diffusion gazeuse.

<sup>3</sup> La prolifération nucléaire désigne l'augmentation du nombre des états possédant l'arme nucléaire, elle concerne donc implicitement l'accès aux matières fissiles militaires (uranium enrichi à 90 % d'U<sup>235</sup>, plutonium enrichi à 93 % de Pu<sup>239</sup>) et aux technologies très perfectionnées permettant de les produire.

<sup>4</sup> L'UTS (Unité de Travail de Séparation isotopique), introduite par P. Dirac est définie dans l'article [GAENA N° 54](#).



## 2.1. L'ULTRA CENTRIFUGATION

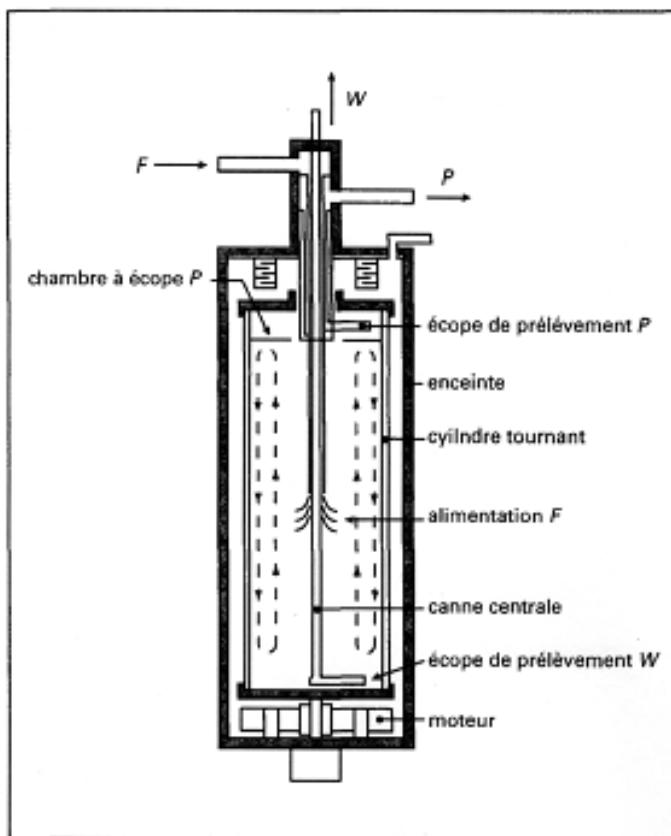
Comme pour la diffusion gazeuse, les recherches actives sur le procédé d'ultracentrifugation ont commencé aux Etats-Unis pour les besoins du Manhattan Project.

Les recherches ont été abandonnées en 1944, les « décideurs » ont estimé que la méthode ne produirait pas de résultats avant la fin de la seconde guerre mondiale. Durant la période de la « guerre froide » (l'après-guerre) cette méthode a été utilisée avec succès dans le programme nucléaire soviétique.

Le procédé d'ultracentrifugation consiste à faire tourner l'hexafluorure d'uranium rendu gazeux dans une ultracentrifugeuse. Sous l'effet de la force centrifuge, proportionnelle à la masse, au carré de la vitesse et à l'inverse du rayon de la particule qui subit cette rotation, les atomes d' $U^{238}$  les plus lourds tendent à se plaquer sur la paroi extérieure du cylindre tournant (le « bol »), alors que les atomes d' $U^{235}$  les plus légers migrent plutôt vers le centre.

Pour un bon rendement, la vitesse de rotation et la température doivent être maintenues constantes. À cet effet, les rotors tournent dans une enceinte où l'on introduit le vide

La figure 1 en page suivante présente le schéma d'une centrifugeuse. On observe la présence des deux « écopes » de prélèvement; l'une permettant la récupération du fluide appauvri en  $U^{235}$ , la seconde l'extraction de la partie enrichie en  $U^{235}$ .



À cause de la très faible différence de masse entre l'U<sup>235</sup> et l'U<sup>238</sup>, il faut utiliser des vitesses atteignant des centaines de m/s. Avec ces conditions de vitesse la paroi de la centrifugeuse est soumise à des accélérations de l'ordre de centaines de milliers de fois l'accélération de la pesanteur. Il faut employer des matériaux extrêmement résistants pour éviter le phénomène d'éclatement du tube en rotation.

À la fin des années 1980, les progrès en résistance des matériaux, grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux composites : les fibres de carbone avec une résistance à la rupture très élevée et une densité bien inférieure à 7,80 celle de l'acier, ont permis à l'UC de se développer. Avec les meilleurs aciers (genre Maraging) la vitesse limite est de l'ordre de 400 m/s, avec des composites (densité 2,5) elle peut atteindre les 900 m/s. Les centrifugeuses doivent être soigneusement réglées et équilibrées pour ne pas présenter un balourd gênant et dangereux.

Malgré les progrès technologiques, au niveau d'une centrifugeuse individuelle, le facteur de séparation qui est donné par la variation de la richesse en U<sup>235</sup>, est faible. Pour arriver à de l'uranium enrichi au taux souhaité, le gaz UF<sub>6</sub> à très basse pression donc à la température ambiante doit traverser des dizaines de milliers de centrifugeuses disposées en cascade. Chaque centrifugeuse reçoit une alimentation et produit deux sorties, un flux enrichi qui alimente l'étage suivant et un autre appauvri qui retourne à l'étage précédent : le *procédé* est *continu* mais énorme avantage - il peut être rendu *modulaire*.

La capacité d'une centrifugeuse (production UTS/an) varie en proportion de sa longueur L et comme la quatrième puissance de la vitesse V de rotation du rotor : production UTS/an = K L V<sup>4</sup>. Le tableau ci-dessous résume les progrès décisifs réalisés depuis les premières centrifugeuses des années soixante : la vitesse de rotation du rotor a été multipliée par 3 et la longueur par un ordre de grandeur.

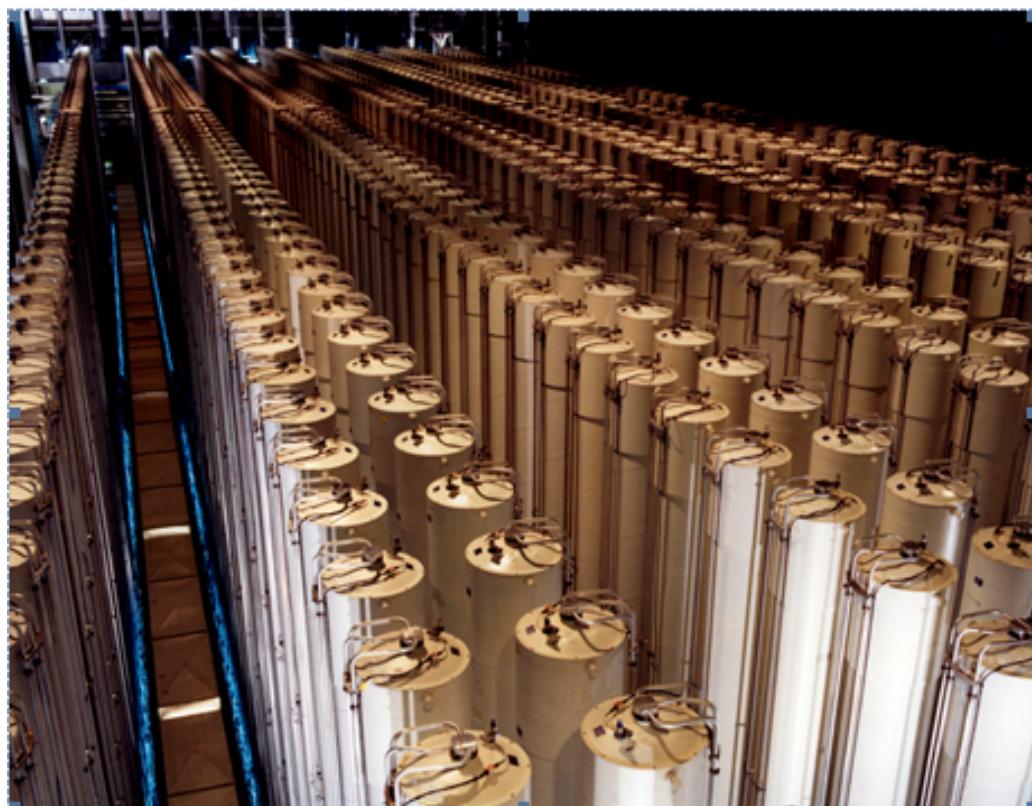
Centrifugeuse	Diamètre (cm)	Longueur (m)	Vitesse (m/s)	Matériaux
Zippe (1961)	7,5	0,305	350	Acier - Al
AC100 (2008)	60	12	900	Composite

Après la fermeture le 10 mai 2012<sup>5</sup> de GB I, pour une capacité de production équivalente, il faut avec GB II environ 50 kWh électrique par UTS (50 kWh/UTS) soit *une consommation électrique 50 fois moindre*.

L'UC est un procédé *économique* en énergie. En près d'un demi-siècle la capacité de production (UTS/an) des centrifugeuses modernes a été multiplié par près de 50.

Avec la délocalisation des activités industrielles de pointe vers des pays d'Asie où la main d'œuvre moins chère a acquis peu à peu le savoir-faire, le coût du procédé devient de plus en plus *abordable*. Mais si l'ultracentrifugation est compétitive pour alimenter en uranium enrichi les réacteurs civils, elle facilite aussi l'accès à la bombe atomique. Le procédé est *proliférant*.

La photo suivante présente une centrifugeuse TC21, de dernière génération développée par la société URENCO, qui a la même capacité d'enrichissement que la batterie de plusieurs dizaines de centrifugeuses de première génération.



### 3. CONCLUSION

Les pays qui veulent accéder au nucléaire ont le souci d'assurer leur avenir énergétique (nucléaire civil) et pour certains également leur sécurité internationale (nucléaire militaire) dont le développement est interdit par le TNP (Traité de Non Prolifération).

En ce début de 21<sup>ème</sup> siècle les capacités mondiales d'enrichissement, réparties à parité entre les deux technologies (DG et UC), permettent de satisfaire aux besoins en uranium enrichi des réacteurs actuels (les REP en France) ; la DG est un procédé très énergétivore et l'UC un procédé plus économique en énergie mais proliférant.

La nécessité, pour l'avenir, d'une meilleure gestion des ressources naturelles (l'uranium) amènera le développement industriel d'un nouveau procédé. Une option possible existe ; le *procédé d'enrichissement par laser* qui ne demande que des installations de faible taille exemptes de « cascades ». Ces installations seront très *difficiles à détecter*, les risques de prolifération seront majeurs.

<sup>5</sup> Article [GAENA N° 1](#) « Arrêt de l'Usine Eurodif » : *La fin de l'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse* ; G. Bruhl - R. Brugère.