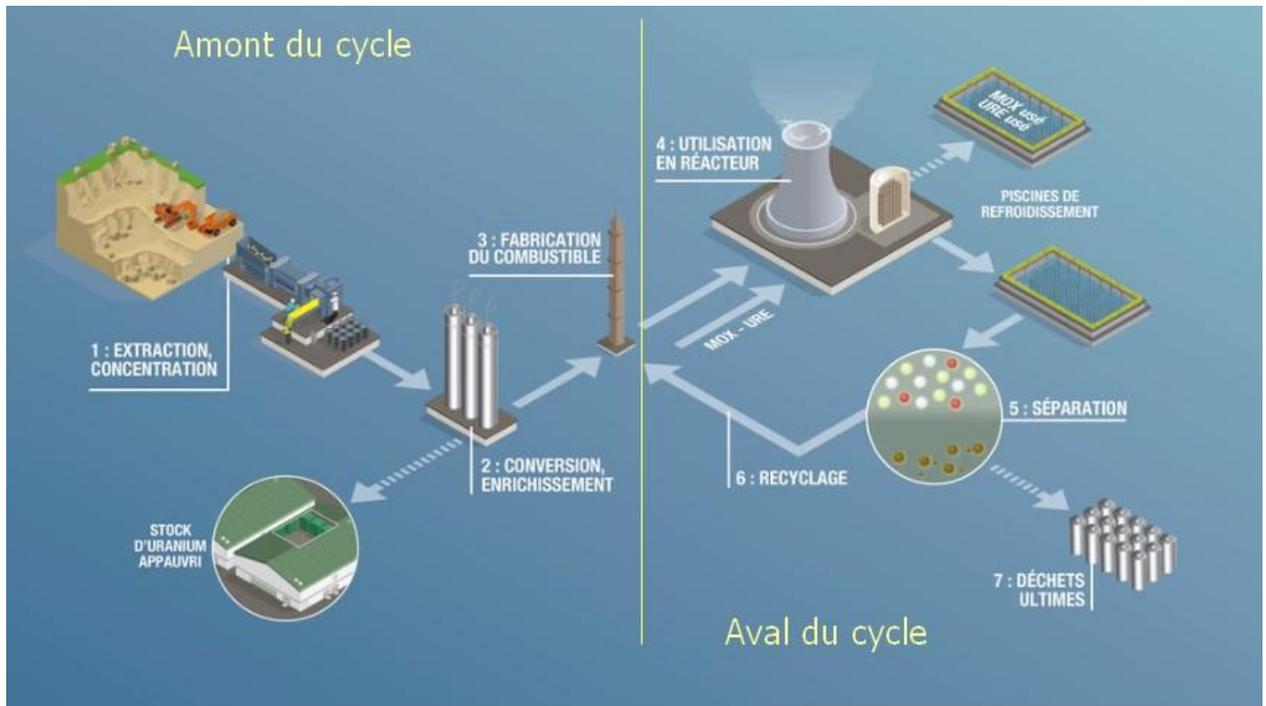


# L'URANIUM

---

L'uranium est un élément chimique radioactif présent à l'état naturel en quantité significative sur Terre. Il est essentiellement utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires.

## 1 - RESSOURCE MINIÈRE/ABONDANCE



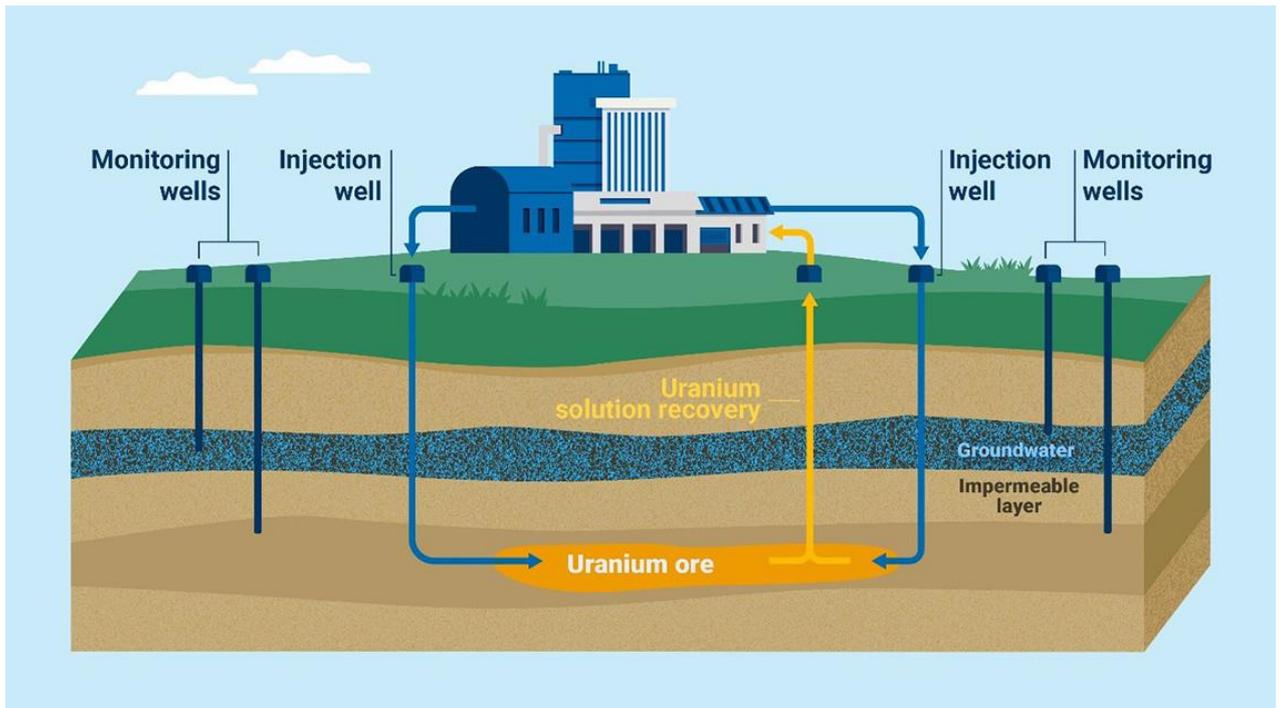
Dans le sol, il est inégalement réparti mais des mines sont exploitées sur quasiment tous les continents. Les principaux pays disposant de ressources sont l'Australie, le Canada, le Kazakhstan, le Niger, la Namibie, la Russie et l'Afrique du sud.

### 1 - 1 - L'extraction

L'uranium est un métal assez répandu dans le sous-sol de la Terre. Il est contenu dans des minerais, qui sont extraits de gisements à ciel ouvert ou en galeries souterraines. Ces gisements se trouvent essentiellement en Australie, aux États-Unis, au Canada, en Afrique du Sud et en Russie. En France, il en existe en Vendée et dans le Limousin, mais ils sont en voie d'épuisement.

Au XXe siècle, le minerai d'uranium était principalement extrait de **mines à ciel ouvert** ou de mines souterraines, ce qui nécessitait le concassage et le raffinage du minerai pour séparer l'uranium des autres éléments.

Au XXIe siècle, cette méthode a été progressivement remplacée par la « **lixiviation in situ** ». Bien que cette technique n'ait permis de produire que 16 % de l'uranium extrait en 2000, la lixiviation in situ est actuellement la méthode d'extraction de l'uranium la plus courante. En 2020, environ 58 % de l'uranium extrait dans le monde l'a été par cette méthode.



La lixiviation in situ consiste à faire circuler dans les gisements souterrains d'uranium de l'eau à laquelle ont été ajoutés des éléments, tels que des agents complexants ou oxydants, ou des acides. Cette méthode permet de dissoudre l'uranium directement à partir du gisement. La solution obtenue est ensuite extraite du sous-sol et raffinée pour produire de l'oxyde d'uranium — du concentré d'uranium ou « yellowcake » —, qui est utilisé pour enrichir l'uranium.

## 1 – 2 -Le traitement

Le minerai est réduit en petits morceaux, finement broyé et soumis à des opérations chimiques pour en extraire l'uranium. Cela permet d'obtenir un uranium très concentré, sous forme d'une poudre jaune appelée **yellow cake**. 1 000 t de minerai donnent de 1,5 à 10 t de yellow cake, contenant 75 % d'uranium. Le yellow cake est ensuite raffiné pour le débarrasser de ses impuretés et obtenir un uranium complètement pur.

## 1 – 3 -L'enrichissement

À ce stade, 1 kg d'uranium naturel est composé de 993 g d'uranium 238 et de 7 g d'uranium 235.

Seul l'uranium 235 est fissile mais il n'est pas en proportion suffisante pour être utilisable dans les réacteurs des centrales. L'uranium doit donc être enrichi en uranium 235, de façon à ce qu'il en comporte entre 30 et 50 g.

## 1 – 4- La fabrication du combustible

Une fois enrichi, l'uranium est transformé en poudre noire. Comprimée et cuite au four, elle donne des petits cylindres d'environ 7 g et de 1 cm de long, appelés pastilles. Chaque pastille peut libérer autant d'énergie qu'1 t de charbon.

Les pastilles sont enfilées dans des tubes en métal de 4 m de long dont les extrémités sont bouchées, pour constituer ce que l'on appelle des **crayons**. Ces crayons sont regroupés par lots dans des assemblages combustibles. Ces assemblages sont placés dans le cœur du réacteur pour le faire fonctionner.

### **1 – 5 - La consommation**

Les pastilles vont séjourner entre 4 et 5 ans dans le réacteur et subir des réactions de fission nucléaire.

Au fil du temps, elles vont s'épuiser en uranium 235 et devront être remplacées. Cette opération s'effectue dans l'eau car elle permet de piéger les rayonnements radioactifs.

Le combustible usé reste ensuite pendant 3 ans en piscine de refroidissement, le temps de perdre peu à peu une partie de sa radioactivité.

### **1 – 6 - Le retraitement**

Dans la plupart des pays, le combustible usé est mis dans des conteneurs d'acier et transporté vers une usine de retraitement. Celle de La Hague (AREVA), en France, dans le département de la Manche, est la plus grande installation de retraitement du monde.

Le retraitement consiste à séparer les différents éléments du combustible par des traitements mécaniques et chimiques de façon à les réutiliser et également à séparer les déchets. Ainsi, l'uranium est à nouveau enrichi pour produire du combustible nucléaire. 96 % du combustible usé est réutilisé.

La partie du combustible usé qui ne peut pas être réutilisée, appelée **déchets ultimes**, est coulée dans du verre en fusion et entreposée pendant 30 à 40 ans à l'usine de La Hague.

## **2 – Différents Types de combustibles**

Il existe au moins trois principaux combustibles nucléaires. Si le **Mox** et le thorium présentent l'un et l'autre des avantages, le combustible UOX (Uranium diOxyde) est le combustible le plus utilisé dans les réacteurs nucléaires.

### **2 – 1 -Le combustible UOX**

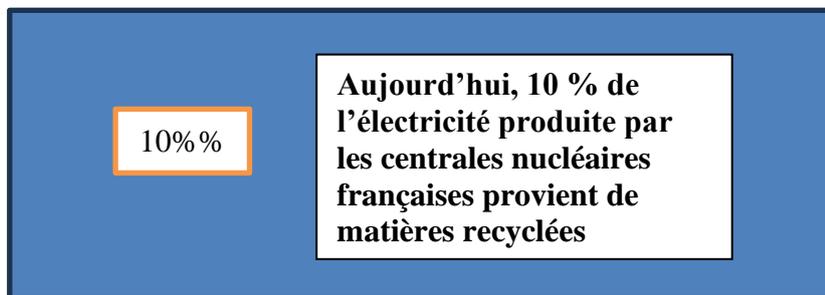
Le combustible UOX est fabriqué à partir de l'uranium naturel, directement issu de l'extraction minière, converti, puis enrichi. Lors de la réaction nucléaire, du plutonium se développe dans le cœur du réacteur, si bien qu'à la fin de son utilisation, le combustible usé UOX a produit 30 à 40 % de son énergie par le biais de fission du plutonium en cours de cycle et contient encore environ 1 % de plutonium.

En France, ce plutonium est utilisé pour fabriquer un nouveau combustible, recyclé, le combustible MOX.

## 2 – 2 – Le combustible MOX

La France a fait le choix du « cycle fermé » qui permet de recycler les matières valorisables des combustibles usés et d'optimiser la gestion des déchets ultimes. C'est le seul pays qui maîtrise les technologies du recyclage du combustible usé. Le MOX – « Mixed uranium and plutonium OXide » – permet de recycler potentiellement 96 % des combustibles nucléaires usés, tout en divisant par 5 le volume de déchets de haute activité et par 10 la radiotoxicité des déchets, par rapport à un stockage des combustibles usés sans traitement. Cette ressource recyclable permet d'économiser la ressource première : l'uranium naturel (120 tonnes de MOX remplacent environ 120 tonnes d'uranium naturel, soit 1 000 tonnes de réserves de minerai).

En France, 22 réacteurs de puissance de 900 MWe utilisent du combustible MOX. Ce nombre devrait croître dans les années à venir, avec des combustibles MOX encore plus performants.

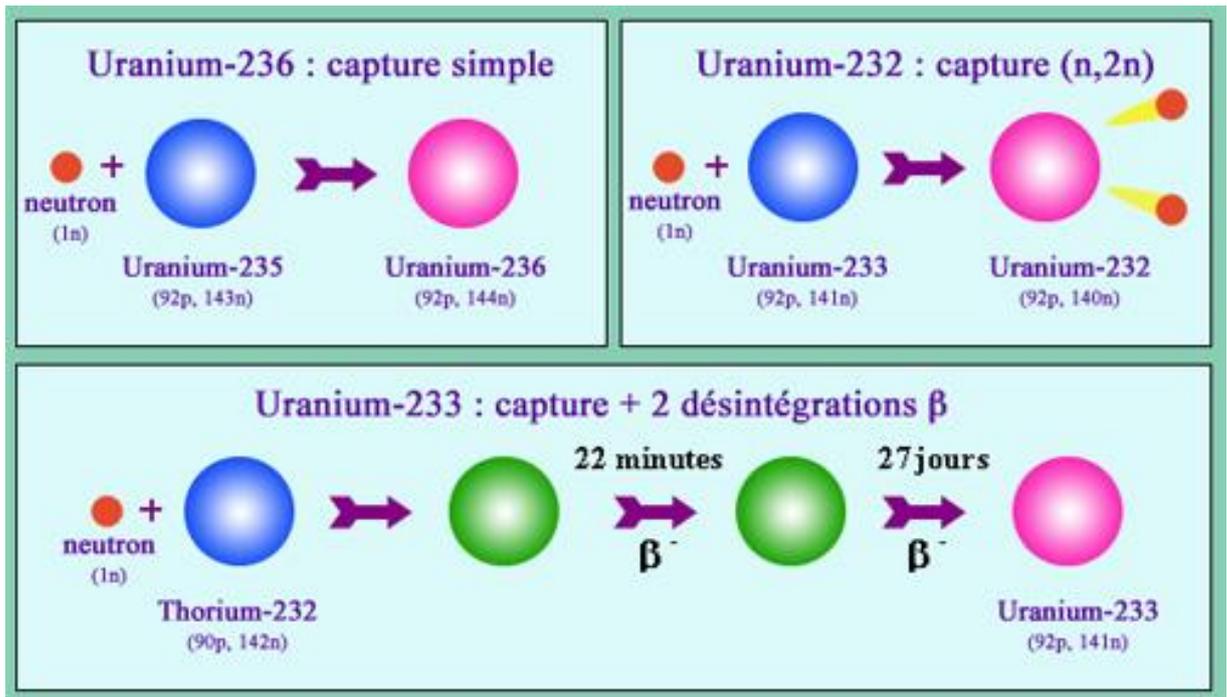


## 2 – 3 - Le thorium

Le recours à un autre élément naturel, le thorium, est également théoriquement possible pour alimenter un parc nucléaire. Le thorium n'est pas lui-même fissile, mais dans le cœur d'un réacteur il peut se transformer, par capture d'un neutron, en uranium 233 fissile. Des pays réfléchissent à l'utilisation de ce combustible, dont l'Inde qui en possède des réserves très importantes. Une caractéristique intéressante des réacteurs au thorium réside dans le fait que les résidus produits contiennent une quantité plus faible d'actinides mineurs et ne produisent pas de plutonium, ce qui est un avantage dans la gestion à long terme des déchets nucléaires. La maturité industrielle de la « filière thorium » sera atteinte d'ici 20 à 30 ans si les efforts en matière de recherche sont déployés. Un certain de pays s'intéressent à cette filière, comme la Chine, les Etats-Unis, la Russie, l'Europe.

## 3 - ISOTOPE DE L'URANIUM

L'uranium naturel est constitué principalement d'uranium-238 accompagné de 0,7 % d'uranium-235 et d'une quantité infime d'isotope 234. Trois isotopes, les uraniums 236, 233 et 232, sont également produits en réacteurs à partir de l'uranium-235 et du thorium. Ces trois isotopes naturels et ces trois isotopes artificiels sont tous émetteurs alpha.



### 3 – 1 -Formation des isotopes 236, 233 et 232

Les isotopes 236, 233 et 232 de l'uranium sont formés dans les réacteurs à partir de captures de neutrons non suivies de fission. L'uranium-236 est formé lors d'une simple capture radiative par un noyau d'uranium 235 par opposition aux captures qui provoquent la fission. L'uranium-233 est formé par une capture similaire par un noyau naturel de thorium, suivie de deux transformations radioactives. Cet uranium 233 est lui-même fissile. Soumis au flux de neutrons d'un réacteur, il lui arrive de se transformer en uranium 232 par une réaction de capture particulière (n,2n) suivie de l'expulsion de deux neutrons.

### 3 – 2 -Trois isotopes naturels

**3 – 2 – 1 -L'uranium 238** constitue à lui seul 99,3 % de l'uranium naturel. Il possède la durée de vie la plus longue : sa période radioactive est de 4,5 milliards d'années, soit à peu près l'âge de la Terre. Il est très peu radioactif. Sa très longue période explique qu'il soit encore présent dans la croûte terrestre. Dans un réacteur, la capture de neutrons par ce noyau aboutit à la formation de plutonium 239 fissile. Lui même peu fissile, l'U-238 contribue à la marche des réacteurs et à la production d'électricité par l'intermédiaire de ce plutonium. Son impressionnant potentiel d'énergie de fission demeure encore largement inexploité. L'objet des réacteurs surgénérateurs de quatrième génération est de récupérer ce potentiel.

**3 – 2 -2- L'uranium 235**, seul noyau fissile existant à l'état naturel, sert de combustible pour les réacteurs et d'explosif pour l'arme atomique. Cet isotope excessivement rare, présent à raison de 0,7 % dans l'uranium naturel est de ce fait un matériau éminemment stratégique et convoité. Sa période excessivement longue, 700 millions d'années, est toutefois 6,5 fois plus courte que celle de l'isotope 238. À l'époque de la formation de la Terre, l'U-235 était 85 fois plus abondant et les 0,7 % d'aujourd'hui ne sont plus que le pâle résidu de cette abondance passée. Si les humains avaient été présents à cette

époque, ils n'auraient pas eu besoin d'enrichir leur uranium pour faire fonctionner leurs réacteurs ou fabriquer leurs bombes atomiques !

**3 – 2 – 3 - L'uranium 234** est le premier descendant à vie longue de l'uranium 238. Dans un échantillon d'uranium d'origine naturelle, ces noyaux sont présents dans les proportions immuables – celles de l'équilibre radioactif – à raison d'un atome d'uranium 234 pour 18 800 atomes d'uranium 238. Les deux isotopes contribuent de manière égale aux radiations émises par cet uranium.

### 3 – 3 – Trois isotopes naturels3 –

**3 – 3 - 1 - L'uranium 236** est formé dans le combustible nucléaire à partir de l'uranium 235, lors de captures qui n'ont pas provoqué de fissions. La présence de cet isotope dans un échantillon d'uranium signifie que cet échantillon est passé en réacteur.

**3 – 3 -2 -L'uranium 233** est un noyau fissile qui n'existe pas naturellement comme le plutonium 239, dont il est proche par son mode de production. Il est produit par des captures de neutrons dans des réacteurs contenant du thorium. Fissile par des neutrons rapides et des neutrons lents, ce noyau possède des caractéristiques intéressantes pour la production d'énergie. Les réacteurs au thorium et à l'uranium 233 constituent l'une des options étudiées pour les futurs réacteurs de quatrième génération.

**3 – 3 – 3 - L'uranium 232** est un sous produit des réacteurs marchant au thorium et l'uranium 233. La formation de cet isotope résulte de captures particulières de neutrons par l'uranium 233 qui provoquent l'éjection de deux neutrons. L'uranium 232 possède une période assez courte de 68,9 ans, mais surtout sa filiation radioactive génère assez vite un descendant, le thallium 208, émetteur de rayons gamma de 2,6 MeV très énergiques et très pénétrants. Ces radiations intenses rendent la manipulation de matières fissiles à l'uranium 233 contaminé par l'uranium 232, beaucoup plus dangereuses que celles classiques à l'uranium 235 ou au plutonium 239. Elles sont un obstacles à la prolifération de bombes qui utiliseraient l'uranium 233.

*Propriétés radioactives d'isotopes de l'uranium et des radioéléments associés*

Isotope	Période (années)	Abondance naturelle (%)	Activité Spécifique (Gbq/g)	Mode	Energie des radiations (MeV)		
					Alpha ( $\alpha$ )	Beta ( $\beta$ )	Gamma ( $\gamma$ )
U-232	72	0	814	$\alpha$	5.3	0.017	0.0022
U-233	160 000	0	0,363	$\alpha$	4.8	0.0061	0.0013
U-234	240 000	0,0055	0,233	$\alpha$	4.8	0.013	0.0017
U-235	700 000 000	0,72	0,0000814	$\alpha$	4.4	0.049	0.16
U-236	23 000 000	0	0,00241	$\alpha$	4.5	0.011	0.0016
U-238	4 500 000 000	99,3	0,0000126	$\alpha$	4.2	0.010	0.0014

### Comparaison des propriétés radioactives

Les principaux isotopes de l'uranium présentés dans cette table possèdent des vies moyennes extrêmement longues à l'exception de l'uranium 232. Tous sont émetteurs de rayons alpha de 4 à 5 MeV d'énergie. Les colonnes à droite de la table montrent la présence d'un rayonnement gamma de faible énergie et de rares désintégrations bêta. Les activités spécifiques (activités ramenées à 1 gramme) sont en raison inverse des périodes.

#### 4 – Enrichissement de l'uranium

##### À RETENIR

- Pour alimenter des réacteurs nucléaires, il faut disposer d'un combustible dont la proportion d'uranium 235 fissile se situe entre 3% et 5% (contre 0,7% dans l'uranium naturel).
- L'ultracentrifugation est aujourd'hui le principal procédé d'enrichissement développé à l'échelle industrielle.
- Ce procédé exploite la très légère différence de masse entre les isotopes d'uranium 235 et 238 : les centrifugeuses tournent à très grande vitesse et projettent plus vite à leur périphérie l'hexafluorure d'uranium 238 que l'hexafluorure 235. Cette opération doit être réalisée à de nombreuses reprises pour obtenir un uranium suffisamment enrichi pour le combustible nucléaire.
- Trois acteurs principaux assurent l'enrichissement d'uranium dans le monde : le russe Tenex, l'européen Urenco et le français Orano (anciennement Areva).

À l'instar de la plupart des métaux, l'uranium ne se trouve pas dans la nature sous sa forme pure. Il se combine dans les roches à d'autres éléments chimiques pour former principalement deux minerais uranifères (qui contiennent de l'uranium) : la pechblende ( $U_3O_8$ ) et l'uranite ( $UO_2$ ). Leur exploitation se fait dans des mines à ciel ouvert ou des galeries d'extraction souterraines.

La teneur en uranium du minerai étant généralement faible, on commence par le concentrer sur le lieu d'extraction afin de ne pas alourdir les coûts du transport. Pour cela, les roches sont broyées, concassées en poudre fine, puis dissoutes dans une solution d'acide sulfurique chaud.

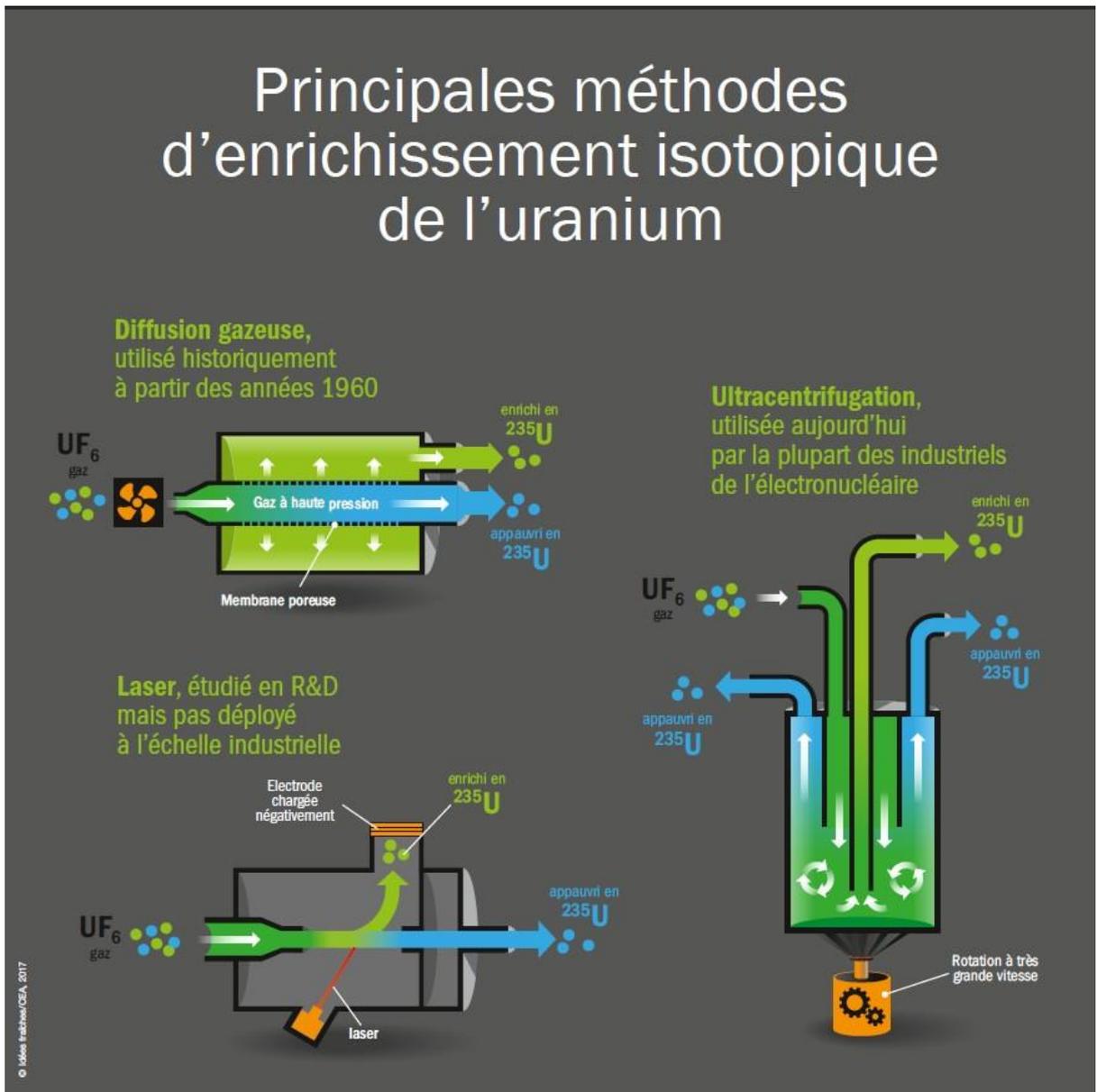
La solution liquide est ensuite précipitée, filtrée, lavée et séchée. On obtient alors une pâte jaune contenant environ 75% d'oxyde d'uranium ( $U_3O_8$ ), appelée « yellow cake ». Mais ce concentré n'est pas utilisable tel quel dans un réacteur nucléaire. Il faut d'abord le débarrasser de ses impuretés (raffinage), puis convertir l'oxyde d'uranium presque pur en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) pour faciliter l'étape ultérieure d'enrichissement.

Les méthodes d'enrichissement

L'enrichissement est une opération difficile car, comme tous les isotopes d'un même élément, l'uranium 235 et l'uranium 238 se ressemblent beaucoup et ont les mêmes propriétés chimiques. Cependant, il est possible de les différencier grâce à leur légère

différence de masse. En effet, l'uranium 235 est un tout petit peu plus léger que l'uranium 238.

C'est pourquoi, actuellement, l'enrichissement de l'uranium est basé sur la différence de mobilité due à cette faible différence de masse. De tous les procédés d'enrichissement étudiés jusqu'à présent, deux ont été développés à l'échelle industrielle : la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation (d'où provient actuellement la majorité de l'uranium enrichi).



### La diffusion gazeuse

En France, la technologie de diffusion gazeuse a été développée par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Cette technologie a été utilisée

dans l'usine Georges Besse (également appelée usine Eurodif dans le passé) sur le site du Tricastin à Pierrelatte (Drôme) entre 1979 et 2012

Avant son enrichissement par ce procédé, le tétrafluorure d'uranium, obtenu après extraction du minerai et raffinage, est transformé en hexafluorure d'uranium (UF<sub>6</sub>) qui a la propriété d'être gazeux à partir de 56°C.

Le procédé par diffusion gazeuse consiste à faire passer l'UF<sub>6</sub> à l'état gazeux à travers une multitude de « barrières » qui sont des membranes percées de trous minuscules. Les molécules d'hexafluorure d'uranium 235, plus légères que celles d'hexafluorure 238, traversent un peu plus rapidement chaque barrière, ce qui permet d'enrichir peu à peu l'uranium.

Mais étant donné la masse très voisine des deux isotopes, le ralentissement de l'uranium 238 est très faible par rapport à celui de l'uranium 235. C'est pourquoi l'opération doit être répétée 1 400 fois pour produire un uranium assez enrichi en uranium 235 pour être utilisable dans des centrales nucléaires classiques.

Ce procédé a été progressivement remplacé par celui de centrifugation.

### **L'ultracentrifugation**

Ce principe de séparation, désormais utilisé partout dans le monde (notamment dans l'usine Georges Besse II d'Orano depuis 2011), a lieu dans une centrifugeuse qui, telle une essoreuse à salade tournant à grande vitesse, projette plus vite à sa périphérie l'hexafluorure d'uranium 238 que l'hexafluorure 235 qu'elle contient.

La très légère différence de masse entre les deux molécules permet ainsi d'augmenter petit à petit la concentration en uranium 235. Là encore, de nombreuses étapes successives sont nécessaires pour obtenir un enrichissement suffisant.

## **Les principaux acteurs de l'enrichissement**

Trois acteurs principaux assurent l'enrichissement de l'uranium pour les producteurs d'électricité :

- Tenex (Russie) sur les sites d'Angarsk, de Novouralsk, de Zelenogorsk et de Seversk ;
- Urenco Enrichment Company sur des sites au Royaume-Uni, en Allemagne, aux Pays-Bas et aux États-Unis ;
- Orano (France) sur le site de Georges Besse II.

Citons par ailleurs USEC (États-Unis), CNNC (Chine) et JNFL (Japon).

Avec l'usine George Besse II (mise en service en 2011, pleine capacité atteinte fin 2016), Orano a une capacité d'enrichissement de 7,5 millions d'UTS par an(2). Cette capacité a fortement progressé, suite à la transition entre Georges Besse I et II.



## Annexe 1 : Bibliologie

- <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/produire-de-lelectricite/luranium-le-combustible-nucleaire#:~:text=L'uranium%20est%20un%20m%C3%A9tal,l'extraire%20et%20le%20transformer.>
- <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx>