

# L'énergie nucléaire



Centrale nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux dans le Loir-et-Cher (France) © Yann Arthus-Bertrand

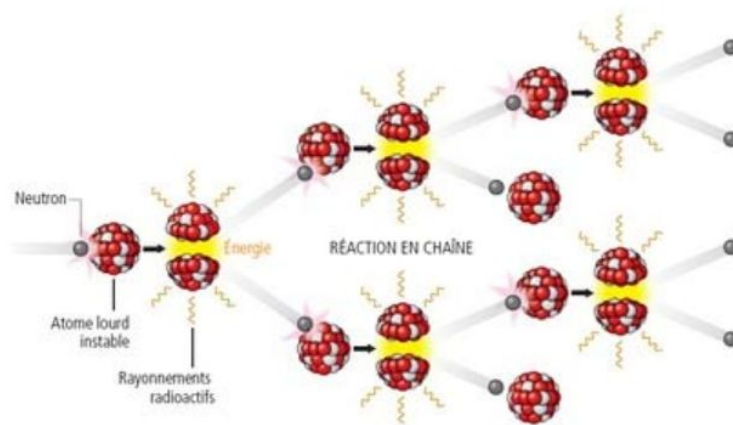
**Produite à partir d'uranium, l'énergie nucléaire est extrêmement puissante. Après avoir servi à des fins militaires – la bombe atomique –, elle a été utilisée pour produire de l'électricité. Très peu répandue dans le monde, elle représente en France la principale source d'électricité. Peu carbonée, elle est très controversée en raison de sa dangerosité.**

## Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

**L'énergie nucléaire** provient de la désintégration du noyau des atomes. C'est pour cette raison qu'on l'appelle aussi **énergie atomique**. Toute matière, vivante ou inerte, est constituée d'atomes. Chaque atome est composé d'un **noyau**, lui-même constitué de **protons**, chargés positivement, et de **neutrons**. Autour de ce noyau gravitent des **électrons**, chargés négativement, en nombre égal aux protons.

**L'uranium** est un métal, dont l'atome est composé de 92 protons et de 92 électrons. D'un atome d'uranium à un autre, le nombre de protons et d'électrons ne change pas, en revanche, le nombre de neutrons varie : on parle **d'isotopes** différents. L'uranium a plusieurs isotopes dont **l'uranium 238**, qui a 146 neutrons, et **l'uranium 235**, qui en a 143.

L'**uranium 235** a une particularité, il est **instable** et **fissile**. C'est-à-dire que si l'on bombarde son noyau avec un neutron, il est capable de se casser en deux noyaux plus petits. Ce phénomène, dénommé fission **nucléaire**, s'accompagne d'un grand dégagement de chaleur et de la libération de deux ou trois neutrons. Ces neutrons peuvent à leur tour casser d'autres noyaux, dégager de l'énergie et libérer d'autres neutrons, et ainsi de suite. C'est ce que l'on appelle une **réaction en chaîne**. Durant cette réaction, un autre élément radioactif se développe au cœur du réacteur : le **plutonium**.



La réaction de la fission nucléaire © IRSN

La chaleur libérée par la fission est utilisée dans les centrales nucléaires pour faire bouillir de l'eau. La vapeur ainsi obtenue fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. Une pastille de 7 grammes d'uranium peut libérer autant d'énergie... qu'une tonne de charbon ! Contrairement aux énergies fossiles, l'énergie nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre et ne représente donc pas un danger pour le climat.

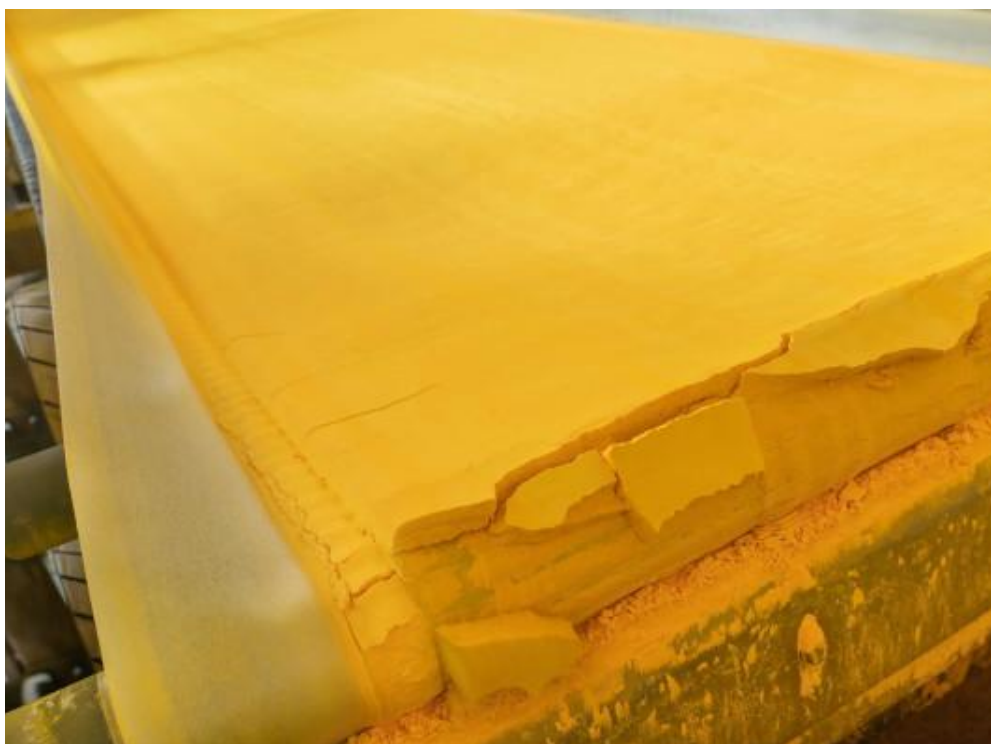
### Qu'est-ce que la radioactivité ?

En se désintégrant, les atomes fissiles émettent des **rayonnements** ou **radiations**, c'est ce qu'on appelle la **radioactivité**. La radioactivité existe naturellement sur Terre et elle n'est pas dangereuse à petite dose. En revanche à haute dose, qu'elle soit naturelle ou artificiellement reproduite par l'homme dans une centrale nucléaire, elle est dangereuse pour la santé, voire mortelle. Invisibles, ces rayonnements peuvent en effet endommager ou détruire des cellules. Lors d'une irradiation importante, comme en cas d'accident nucléaire, les radiations peuvent causer de graves brûlures et des cancers, comme celui du sang. Ce sont ces rejets radioactifs dans l'atmosphère qui ont contaminé des centaines de milliers d'habitants lors des catastrophes de Tchernobyl (1986) et de Fukushima (2011).

De l'art à l'industrie, en passant par l'aérospatiale ou l'agroalimentaire, les différentes propriétés de la radioactivité sont mises à profit dans notre vie de tous les jours. C'est par exemple le cas en médecine, lorsqu'on va « passer une radio », pour voir si l'on s'est cassé la jambe.

## Comment produire de l'uranium 235 en quantité ?

L'uranium est un métal relativement répandu. Dans la croûte terrestre, il est 50 fois plus abondant que le mercure et 1 000 fois plus abondant que l'or. Il n'est pas présent dans le sous-sol à l'état pur, mais combiné dans la roche à d'autres éléments chimiques. Pour ne pas transporter inutilement des tonnes de minerai sur des milliers de kilomètres, on commence par broyer les roches sur le lieu d'extraction, avant de les dissoudre dans de l'acide sulfurique. On finit par obtenir une pâte jaune contenant alors trois-quarts d'uranium, c'est le **yellow cake** (gâteau jaune en anglais).



*Yellow cake au Kazakhstan © Orano*

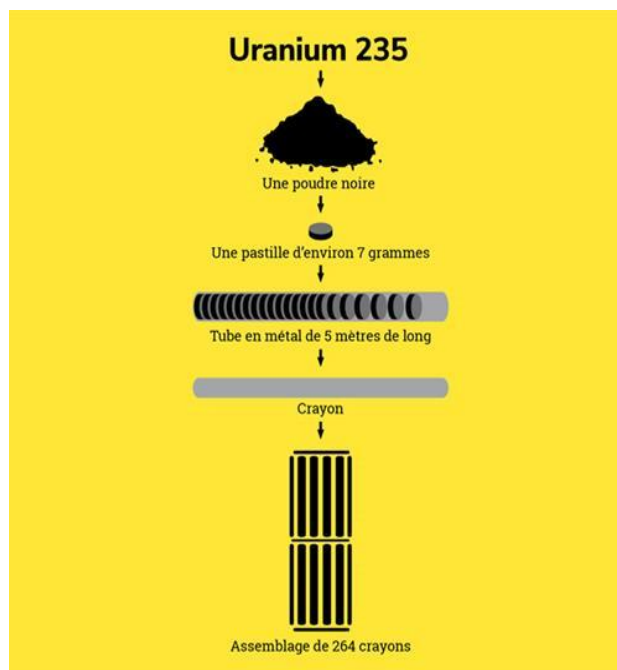
La difficulté est que l'uranium naturel est beaucoup plus riche en uranium 238 qu'en uranium 235, le seul capable de produire une réaction de fission. Sur 100 kilos d'uranium, il y a 99,3 kilos d'uranium 238 et 0,7 kilo d'uranium 235.

Or pour alimenter les réacteurs français et provoquer la réaction de fission nucléaire, il faut disposer d'un combustible dont la proportion d'uranium 235 se situe entre 3% et 5%. Il faut donc **enrichir** le combustible nucléaire en uranium 235, autrement dit en augmenter la proportion. Il y a très peu d'usines au monde qui réalisent ce procédé d'**enrichissement de l'uranium**. En France, cela se passe à l'usine Orano du Tricastin dans la Drôme. En ressortent de l'uranium enrichi, et des déchets appelés **uranium appauvri**.

## Que fait-on de l'uranium enrichi ?

L'uranium enrichi est conditionné en **pastilles de 7 grammes**. Celles-ci sont empilées les unes sur les autres dans de longs tubes métalliques de 4 à 5 mètres de long : les **crayons**. Chaque crayon contient un peu moins de 300 pastilles et est scellé à chaque extrémité pour éviter que ne se disperse la radioactivité. On regroupe 264 crayons pour former un **assemblage**. Ces assemblages sont ensuite placés verticalement au cœur du réacteur nucléaire. Ils y resteront 3 à 4 ans.

Tous les ans, on change un tiers du combustible qui est utilisé. Ces déchets restent radioactifs. C'est pourquoi les manipulations sont robotisées et se font sous plusieurs mètres d'eau, celle-ci constituant une protection efficace contre les rayonnements. Une fois sortis du cœur du réacteur, les assemblages de combustible utilisés sont entreposés pendant au moins un an dans une **piscine** voisine afin de faire baisser leur température et leur niveau de radioactivité.



*L'uranium, de la roche aux crayons © Orano*

## Le retraitement et le stockage des déchets nucléaires

On transporte ensuite le combustible utilisé à l'**usine de retraitement** Orano de la Hague en Normandie dans un conteneur en acier, baptisé le **château**. Il est entreposé durant une dizaine d'années dans une nouvelle piscine pour que chute encore sa radioactivité. La France est l'un des rares pays au monde à retraiter ses déchets : les crayons de combustible utilisés sont cisailés en petits morceaux et dissous dans des solutions acides. Cette technique permet de séparer les déchets de haute activité à vie longue (HA-VL) de l'uranium et du plutonium recyclables. Environ 96% du combustible utilisé est recyclé, les 4% restant constituent les **déchets ultimes**. Ces déchets présentent **une très forte radioactivité**, pour des durées qui peuvent dépasser **100 000 ans**. Leur retraitement est très critiqué par les écologistes qui dénoncent une pratique polluante, inutile et coûteuse.

Ces déchets radioactifs sont coulés dans du verre en fusion et entreposés pendant 30 à 40 ans dans des conteneurs étanches en acier inoxydable, où ils poursuivent leur refroidissement et leur décroissance radioactive. Il existe trois centres de stockage en France : un à la Hague, dans la Manche, et deux dans l'Aube. Pour les **déchets HA-VL**, un stockage en profondeur, dans une roche argileuse imperméable, est actuellement à l'étude. A **Bure**, la France envisage un projet très controversé – baptisé **Cigéo** - qui consisterait à enfouir ces déchets à 500 mètres sous terre.



Déchargement de combustible sous eau dans la centrale nucléaire de Golfech (Tarn-et-Garonne) © EDF

## Le MOX

L'uranium récupéré à la sortie de la centrale est enrichi à nouveau pour fabriquer du combustible standard (UOX). Le **plutonium** qui lui aussi sort du réacteur peut être utilisé pour fabriquer du combustible **MOX**. Le **MOX** est un combustible nucléaire composé de 8% de plutonium et de 92% d'uranium appauvri, c'est-à-dire des déchets d'uranium provenant de la phase d'enrichissement. Il est utilisé en France depuis 1987 dans une vingtaine de réacteurs sur 58. Il permet d'économiser des ressources, car on n'a pas à extraire d'autre uranium naturel.

Le problème est que le MOX est beaucoup plus radioactif – jusqu'à 100 000 fois ! – que le combustible classique, à base d'uranium enrichi. De ce fait, sa fabrication, son transport à travers le monde et son utilisation dans un réacteur nécessitent des précautions particulières pour protéger les travailleurs et les populations traversées. Il est très critiqué.



## LE SAVIEZ-VOUS ?

La fusion nucléaire, c'est différent de la fusion nucléaire

Pour produire de l'énergie, la fission nucléaire désintègre des noyaux atomiques. La fusion, à l'inverse, consiste à fusionner des noyaux légers, comme ceux du deutérium ou du tritium, en un noyau plus lourd et plus stable. Bien plus puissant que la fission, ce phénomène est celui qui a lieu au cœur du Soleil et des étoiles ! Mais cette technologie à laquelle travaille l'Union européenne avec 6 autres pays à Cadarache, dans le sud-est de la France, ne sera pas opérationnelle avant plusieurs décennies : le projet s'appelle ITER. C'est l'un des plus grands chantiers d'Europe.



Vue panoramique du chantier ITER en 2018 © ITER

## Histoire du nucléaire

C'est en 1789 que le minerai d'uranium a été découvert. On lui a donné ce nom en l'honneur de la planète Uranus. Mais cela fait seulement 120 ans que l'homme a découvert la radioactivité, et 70 ans qu'il s'en sert pour produire de l'électricité. Sa découverte revient au physicien français **Henri Becquerel** en 1896. Ses travaux seront complétés les années suivantes par ceux de **Pierre et Marie Curie**, puis dans les années 1930 par **Irène et Frédéric Joliot-Curie**. En 1938, des chercheurs allemands et autrichiens comprennent le phénomène de la fission nucléaire, qui consiste à bombarder des noyaux d'uranium avec des neutrons, tandis qu'en 1942, l'Italien **Enrico Fermi** perce le secret de la réaction en chaîne.



Avec l'aide du scientifique allemand **Robert Oppenheimer**, les Etats-Unis utilisent ce procédé pour fabriquer une redoutable invention : **la bombe atomique** ou **bombe A**. Ils lâchent deux d'entre elles sur les villes japonaises de **Hiroshima** et de **Nagasaki** en août 1945, mettant fin à la guerre en provoquant une catastrophe sans précédent. Plus de 200 000 Japonais moururent en quelques secondes, puis dans les années suivantes de maladies provoquées par leur irradiation.

Après-guerre, les usages militaires du nucléaire restent la priorité de plusieurs pays dont la France. Dès 1945, le général de Gaulle crée le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). En 1960, l'armée française fait exploser sa première bombe A.

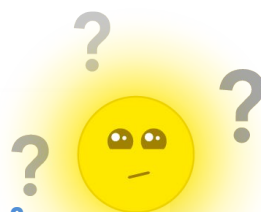
Fin 1951, les Américains produisent les premiers kilowatts-heure électriques d'origine nucléaire : ils permettent d'éclairer la petite ville d'Arco dans l'Idaho. L'Union soviétique, le Royaume-Uni et la France suivent le mouvement. Tous se mettent à développer le nucléaire civil, une politique qui est renforcée dans les années 1970 après les **chocs pétroliers** qui font flamber les prix du pétrole et poussent de nombreux pays à diversifier leurs sources d'énergie. **Electricité de France (EDF)** met ses premiers réacteurs en service en 1963. Très vite, la France change de technologie et privilégie les réacteurs à eau sous pression (REP), une technologie dite de « **2e génération** », qu'elle a achetée aux Américains en 1974. De 1978 à 2002, EDF met en service 58 réacteurs de type REP, construits par la société Framatome. Ces 58 réacteurs sont répartis dans 19 centrales sur tout le territoire.

C'est **Orano** (ex-Areva) qui s'occupe du combustible, de l'extraction de l'uranium au stockage des déchets. **EDF** gère quant à elle la construction, l'entretien et le fonctionnement des centrales. Ces deux sociétés sont largement détenues par l'Etat français, à hauteur de 84% pour EDF et de 90% pour Orano. En 1995 est créée l'**Agence nationale pour la gestion des déchets (Andra)** et en 2006, l'**Autorité de Sûreté nucléaire (ASN)** qui contrôle la sûreté des centrales nucléaires.

## LA QUESTION DE SUNNY

### Les fumées qui sortent des centrales sont-elles dangereuses?

La réaction de fission nucléaire dégage une chaleur si forte que l'on doit refroidir les réacteurs avec de l'eau froide, qui provient souvent de la mer ou d'un cours d'eau voisin. La fumée que l'on voit s'échapper des grandes cheminées des centrales est donc de la vapeur d'eau, et pas de la pollution. Une fois utilisée, cette eau, qui ne contient pas d'éléments radioactifs, est refroidie et renvoyée dans le fleuve ou la rivière. Ces rejets sont contrôlés afin de vérifier la température de l'eau. Trop chaude, elle perturberait les poissons et les plantes aquatiques.

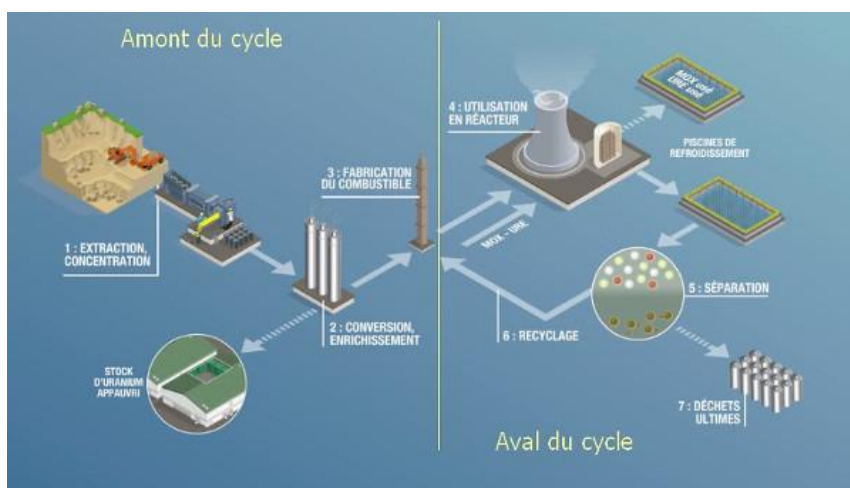


## L'énergie nucléaire dans le monde

En août 2019, 450 réacteurs étaient opérationnels dans 31 pays, et 52 étaient en construction. On en comptait 97 aux Etats-Unis, 58 en France, 48 en Chine, 37 au Japon et 36 en Russie. Ces réacteurs représentent un peu moins de 5% de l'énergie primaire consommée dans le monde, mais environ 10% de l'électricité. La France se démarque puisque 72% de son électricité vient du nucléaire : elle est le pays le plus nucléarisé au monde, rapporté au nombre d'habitants.

Après l'accident de Fukushima au Japon en 2011, de nombreux pays ont décidé de sortir du nucléaire, comme l'Allemagne, la Suisse et la Belgique. Mais globalement, la production d'énergie nucléaire n'a diminué que de 1% après Fukushima, et elle est revenue depuis au même niveau. Au Japon et en Allemagne, où un nombre important de réacteurs ont été mis à l'arrêt, le charbon est apparu comme solution de remplacement.

Les pays qui développent aujourd'hui leur industrie nucléaire sont ceux qui cherchent à décarboner leur énergie comme la Finlande, la Pologne, la République Tchèque, la Chine ou l'Inde. La production nucléaire de la Chine, qui construisait 9 réacteurs en 2019, devrait dépasser celle de la France et des Etats-Unis d'ici 10 à 15 ans. En 1979, un grave accident à la centrale américaine de Three Mile Island, où la catastrophe a été évitée de justesse, a stoppé net toute nouvelle construction de réacteurs aux Etats-Unis, et ce pour 30 ans. Depuis quelques années, le pays a réactivé son programme de construction nucléaire.



Le cycle de l'uranium ©CEA

## L'EPR

L'EPR incarne la **3e génération** de réacteur nucléaire. Il est le fruit d'une collaboration franco-allemande qui a débuté en 1992. Six ans après la catastrophe de Tchernobyl, en Ukraine, le but était de concevoir des réacteurs plus sûrs. Ce réacteur, d'une durée de vie de 60 ans, contre 40 ans pour la précédente génération, devrait produire 22% de plus d'électricité qu'un réacteur traditionnel, à partir de la même quantité de combustible.

Le premier EPR au monde a été mis en service en Chine en 2018. A ce jour, quatre autres sont en construction : en France à Flamanville, en Finlande, au Royaume-Uni et un second en Chine. Mais l'EPR de Flamanville n'en finit pas d'accumuler les retards : le chantier, débuté en 2007, devait s'achever en 2012, mais il est toujours en cours pour plusieurs années. Quant à son coût, il a plus que triplé.





## LE DOCUMENT POUR ALLER PLUS LOIN

## *Les centrales flottantes, bonne ou mauvaise idée ?*

La Russie n'a jamais eu froid aux yeux, elle le prouve une nouvelle fois en s'engageant dans un projet vigoureusement contesté par les défenseurs de l'environnement. C'est ce que raconte cet article du Parisien. Moscou extrait des tonnes d'hydrocarbures en Sibérie orientale. Or pour extraire ce pétrole et faire vivre les hommes travaillant sur ces plateformes pétrolières, elle a besoin d'électricité. Elle a donc décidé d'acheminer une centrale nucléaire flottante en Sibérie orientale, profitant du fait que l'océan Arctique est de plus en plus navigable, en raison de la fonte des glaces provoquée par le changement climatique. Outre le côté très cynique de la situation (le changement climatique, provoqué par la combustion du pétrole permet à la Russie de continuer à aller en puiser encore plus), se pose la question du risque. Car cette centrale flottante est beaucoup plus vulnérable aux tempêtes. Certains l'appellent déjà le « Titanic nucléaire ».

## SUR CE SUJET, VOIR AUSSI LES FICHES :

- D'où vient, et où va, l'électricité ?
- Le nucléaire est-il la solution aux énergies fossiles ?
- L'énergie en France

## QUELQUES SOURCES INTÉRESSANTES

- [Histoire de l'énergie nucléaire](#), Encyclopédie de l'Énergie
- [Agence internationale de l'énergie atomique \(AIEA\)](#)
- [La radioactivité.com](#), site grand public de documentation sur la radioactivité alimenté par des physiciens du CERN...
- [Le parc français des centrales nucléaires](#), ASN, 2018
- [L'uranium, le combustible nucléaire](#), EDF, vidéo sur l'utilisation du combustible dans la centrale
- [Tout savoir sur l'uranium ?](#) Orano Group
- [Quiz : la radioactivité](#), janvier 2019, CEA
- [L'essentiel sur l'uranium](#), CEA
- [La radioactivité, de Homer à Oppenheimer](#), ANDRA
- [La vérité scientifique sur le nucléaire \(en 10 questions\)](#), Chantal Bourry, Rue de l'Echiquier, 2012