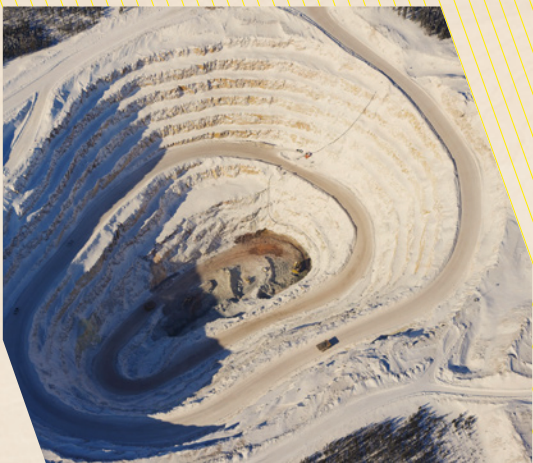


LE CYCLE DU COMBUS- TIBLE



© Black & Veatch

© ASN et IRSN — sous la direction de : Geneviève Beaumont, Emmanuel Bouchot, Olivier Javay
Conception : Âme en science, La-fabrique-créative, Phélixon consultant — Illustration : B2 Infographie — Dessin de la mascotte : Thomas Caballé
Reproduction interdite sans l'autorisation de l'ASN/IRSN



4 | 1 +

DE LA MINE AU DÉCHET

Le **COMBUSTIBLE** utilisé dans les centrales nucléaires est fabriqué à partir d'**URANIUM** extrait dans des **MINES**. En France, une fois utilisée, une partie du combustible devient un **DÉCHET**, le reste peut être **RECYCLÉ**.

Les mines d'uranium

La plupart du temps, l'uranium est extrait de la pitchblende. Ce minerai brut, on produit une poudre concentrée d'uranium, appelée le gâteau jaune ou « yellow cake ». Ces résidus et des déchets restent sur place. Aujourd'hui les mines françaises sont fermées, l'uranium provient de l'étranger.

Photo: Getty Images

L'enrichissement de l'uranium

Seul l'uranium 235 est fissile et donc utile pour le fonctionnement des centrales nucléaires. Or, l'uranium naturel en contient moins de 1%, il faut donc concentrer l'uranium avant de l'insérer pour atteindre les 3 à 5% requis pour le combustible défectif.

Photo: Agence Solaire

L'usine d'enrichissement au Tricastin

En France au Tricastin, dans des centrifugeuses tournant à très grande vitesse, l'uranium 238 est projeté à la périphérie alors que l'uranium 235, plus léger, migre vers le milieu. L'enrichissement est le plus sûr et le plus rapide après le passage d'une seule centrifugeuse aussi l'usine en contient plusieurs montées en cascade. Ce procédé nouveau demande 100 fois moins d'énergie que le procédé de diffusion utilisé auparavant.

La fabrication du combustible

Une fois l'uranium enrichi, il est compressé sous forme de pastilles, d'oxyde d'uranium d'un centimètre de diamètre. Les pastilles sont empilées dans des tubes d'environ 5 mètres. Les tubes ou « crayons » sont assemblés en faisceaux carrés pour former le combustible fini.

Photo: Getty Images

Les assemblages combustibles

Photo: Getty Images

Dans le réacteur

Plus de 300 assemblages sont déposés dans la cuve du réacteur et forment le cœur. Un Cœur d'assemblages est renouvelé chaque année pour les réacteurs 900 MWe et chaque 18 mois pour les réacteurs 1 300 MWe.

Photo: Getty Images

Le transport

Une fois le combustible suffisamment refroidi, on le transporte dans un conteneur spécialement conçu vers l'usine de retraitement.

Photo: Getty Images

Le retraitement

Les assemblages sont dissolus et dissous chimiquement. On sort alors l'uranium et le plutonium dont on se sert pour fabriquer de nouveaux combustibles. Le plutonium entre dans la composition des combustibles MOX.

Photo: Getty Images

Le refroidissement

Les recommandations issues des produits de fission continuent à chauffer les pastilles même lorsque les assemblages sont vides et sortis de la cuve. Aussi faut-il les refroidir en permanence dans une piscine remplie d'un liquide de circulation d'eau, et cela pendant plusieurs années avant de pouvoir les retraiter.

Photo: Getty Images

Le stockage

Les produits de fission et les actinides, déchets radioactifs inutilisables lors du renouvellement, sont incrustés dans du verre en fusion, que l'on coule dans des conteneurs en acier inoxydable hermétiquement fermés. Ces conteneurs sont ensuite entreposés dans l'attente d'un lieu de stockage définitif.

Photo: Getty Images

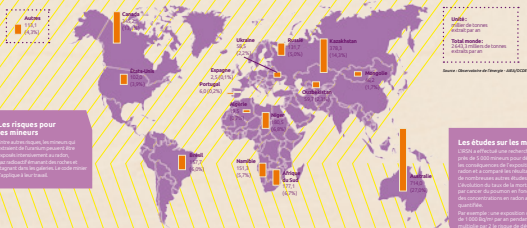
Il n'y a pas que les centrales nucléaires, il y a aussi toutes les usines qui traitent l'uranium. Elles présentent chacune des risques spécifiques à maîtriser.



4 | 2 +

L'URANIUM provient aujourd'hui exclusivement de L'ÉTRANGER.
Mais LA FRANCE a exploité des mines pendant plus de 50 ANS, et a
produit des STÉRILES et des RÉSIDUS qu'il faut encore GÉRER.

LES MINES D'URANIUM DANS LE MONDE



Les anciennes mines en France

Des mines d'uranium ont été exploitées en France entre 1946 et 2001, avec un pic de production dans les années 80. On compte environ 250 anciens sites miniers, répartis sur 27 départements et qui ont produit au total 76 000 tonnes d'uranium.

LES ANCIENNES MINES EN FRANCE



Un bon filon



POUR PLUS DE DÉTAILS SUR LES MINES EN FRANCE
<http://mima.univ-bd.fr/>

Combien coûte l'uranium ?

L'uranium n'est pas une ressource très onéreuse. En 2014, 1 kg d'uranium brut (hors traitement) coûte 80 euros. Pour comparaison, 1 kg d'argent vaut environ 500 euros et 1 kg d'or 130 000 euros.

Les mines d'Areva à l'étranger

La Cogema, devenue aujourd'hui Areva, a investi dans des mines à forte teneur en minerais situées à l'étranger, par exemple au Niger et au Canada.

En débat

La question des résidus miniers

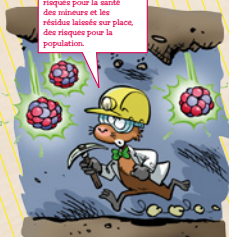


⬅ L'exploitation des mines d'uranium en France a entraîné la production de plusieurs millions de tonnes de stériles et de résidus radioactifs. Parfois, ils ont pu être utilisés comme remblais ou comme matériaux de construction.



➤ Aujourd'hui, on ne peut pas déplacer les résidus donc ils doivent faire l'objet d'un suivi.
Des actions sont menées pour cartographier les sites et évaluer les risques.

La réglementation a évolué : il est désormais interdit d'utiliser les stériles pour la construction.



LA FABRICATION DU COMBUSTIBLE

Sorti de la mine, l'uranium subit de **MULTIPLES TRAITEMENTS PHYSICO-CHIMIQUES** pour finalement être mis sous forme de pastilles de dioxyde d'uranium. Elles sont empilées dans des gaines de « crayons » qui composent les « **ASSEMBLAGES** ».

Une cascade de transformations chimiques ...

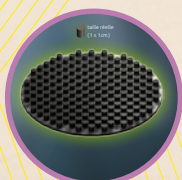
L'uranium extrait des mines, concentré sous forme de « yellow cake », n'est pas utilisable dans les réacteurs nucléaires.

Pour devenir du combustible, il doit subir différentes opérations. Dans un premier temps, le « yellow cake » est dissous par de l'acide, puis purifié. En le calcinant, on obtient de la poudre de trioxyde d'uranium (UO_3) qui est ensuite transformée en tétrafluorure d'uranium (UF_4).

Ces opérations sont réalisées dans l'usine Comurhex à Malvesi près de Narbonne.

Dans l'usine Comurhex du Tricastin dans la Drôme, l' UF_4 est ensuite converti en hexafluorure d'uranium (UF_6) que l'on fait passer de l'état solide à l'état gazeux pour l'enrichir en isotope 235. Puis des pastilles d'oxyde d'uranium (UO_2) sont produites avec de la poudre d'uranium enrichi.

... Pour fabriquer des pastilles d'oxyde d'uranium...



... Et des crayons gainés de zircaloy



Le zircaloy

Un alliage qui laisse passer les neutrons, mais qui malheureusement s'oxyde en présence de l'eau. En cas d'accident, la quantité d'hydrogène produite est telle qu'elle peut engendrer un risque d'explosion.

Le montage d'un assemblage

On assemble plus de 200 crayons dans des gaines dans lesquelles s'insère une barre de commande qui permettra de contrôler la réaction en chaîne.



La transformation de l'uranium induit des risques chimiques et radiologiques qu'il faut surveiller de près.



La chimie de l'uranium n'est pas sans risque

L'hexafluorure d'uranium est radioactif. De plus, c'est un produit très toxique: il réagit avec l'eau en se transformant en fluorure d'uranyle (UO_2F_2) et en acide fluorhydrique (HF). Cette réaction est rapide et forte, elle s'accompagne d'émission de fumées irritantes et suffocantes d'acide fluorhydrique. Ces risques aussi doivent être maîtrisés.

LE RETRAITEMENT DU COMBUSTIBLE

En France, seule une partie du **COMBUSTIBLE** usé des centrales nucléaires devient un **DÉCHET**. Le reste peut être **RECYCLÉ** pour fabriquer du **COMBUSTIBLE NEUF**.

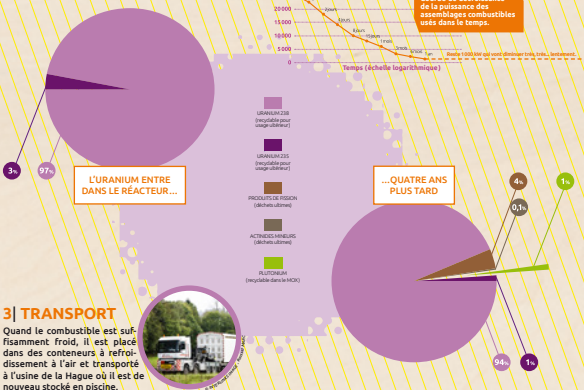
1| RÉACTEUR : usure du combustible

La teneur en **URANIUM 235** des pastilles de combustible diminue au fil de leur irradiation. Ces isotopes se transforment en radioéléments artificiels qui sont autant de déchets. En effet, chaque fission détruit un atome, le remplaçant par deux atomes dénommés **PRODUITS DE FISSION**.

Quand un neutron frappe un atome d'**URANIUM 238**, cet atome peut absorber les neutrons, formant des produits lourds, les actinides tels que **AMÉRICIUM**, **LE NEPTUNIUM** ou encore le plutonium.

Le plutonium est aussi fissile, et en France il peut être utilisé pour fabriquer du combustible MOX. La teneur en **PLUTONIUM** est de l'ordre de 1% dans le combustible usé.

Le retraitement sépare ces différents produits.



3| TRANSPORT

Quand le combustible est suffisamment froid, il est placé dans des conteneurs à refroidissement à l'air et transporté à l'usine de La Hague où il est de nouveau stocké en piscine.

Une des piscines de La Hague contient l'équivalent de 40 cœurs de réacteurs nucléaires. Une hauteur de 20 mètres d'eau protège les travailleurs des rayonnements ionisants.



4| RECYCLAGE : la seconde vie du combustible

Il reste de l'uranium dans le combustible usé qui est extrait. Il peut être ré-enrichi dans certaines conditions.

Dans le combustible usé, se trouve également du plutonium fissile qui est utilisable dans un réacteur nucléaire. On le mélange à l'uranium pour fabriquer un combustible « valorisé » appelé MOX (oxyde mélangé).

Le combustible le plus utilisé en France, à base d'uranium seul, est appelé UOX (oxyde d'uranium).

En débat

Le MOX n'a-t-il que des avantages ?

- ➔ Pour la fabrication du combustible MOX, on réutilise le plutonium contenu dans le combustible usé. Cela permet d'éviter de le mettre dans les déchets et économise la ressource en uranium.
- ➔ En cas d'accident, les produits de fission du combustible MOX sont plus dangereux que ceux de l'UOX. Le plutonium est aussi très toxique chimiquement pour les travailleurs, ce qui nécessite des mesures de protection supplémentaires. Du point de vue de la sécurité, le plutonium sous forme purifiée peut être la cible de vols pour fabriquer des armes.

En France, on a choisi de recycler une partie du combustible usé des centrales nucléaires.



LE TRANSPORT DES SUBSTANCES RADIOACTIVES

En France, **800 000 TRANSPORTS** de substances radioactives sont organisés chaque année. Les transports de combustibles usés n'en constituent qu'une part limitée mais présentent les plus forts enjeux de sûreté.



TEST DE RÉSISTANCE AUX CHUTES



TEST DE RÉSISTANCE AU POINÇONNAGE



TEST DE RÉSISTANCE AU FEU



TEST DE RÉSISTANCE À L'IMMERSION



Illustration : CEA / J. P. B. / J. P. B.

La sûreté des transports de substances radioactives

Le responsable du transport doit respecter une réglementation internationale qui porte sur la robustesse des emballages contenant les substances radioactives, la fiabilité des opérations de transport et la préparation aux situations d'urgence. Les colis présentant de forts enjeux de sûreté doivent faire l'objet d'un agrément de l'ASN, après expertise technique de l'IRSN.

De plus, il faut bien veiller à ce que :

- les exploitants et les personnels concernés soient organisés et formés pour faire face à toute éventualité ;
- la traçabilité des matières radioactives transportées soit assurée et que l'étiquetage soit précis et normé, donnant des informations et consignes claires pour ceux qui interviendraient en cas d'accident.
- des contrôles et des vérifications du respect de ces règles soient exercés.

Dans la sûreté des transports tout compte :

- les emballages,
- la formation des personnels,
- les itinéraires.



Des conteneurs très résistants pour le combustible usé

Il existe plusieurs catégories de colis dans le secteur nucléaire, la catégorie A concerne les substances de radioactivité moyenne et B celles de haute radioactivité comme celles du combustible usé. Les ingénieurs ont conçu des conditionnements qui peuvent résister à différents accidents.

Obligations réglementaires

Catégorie A (radioactivité moyenne)	Résiste à l'aspersion d'eau simulant une forte tempête.	Résiste à la pénétration d'une barre de 6 kg lâchée, selon les contenus, d'une hauteur de 1 à 1,70 m.
Catégorie B (haute radioactivité)	Supporte une immersion jusqu'à 200 mètres de profondeur.	Résiste à une chute de 9 m et à une chute de 1 m sur un poinçon.

Et pour les colis de faible activité ?

Même s'ils étaient entièrement détruits lors d'un accident, l'exposition du public et des intervenants resterait limitée.

Le retour des déchets à l'étranger

Près d'un millier de transports sont également réalisés depuis ou vers l'étranger. La loi française impose le retour obligatoire des déchets étrangers dans leur pays d'origine.

En débat

Les risques liés aux transports

⚠ Même s'ils sont très protecteurs, les colis continuent d'émettre des rayonnements. Ils peuvent emprunter tous les modes de transport et toutes les voies publiques. Des élus et des associations dénoncent les risques d'exposition pour les populations, ainsi que l'absence d'information sur les itinéraires.

⚠ Les risques d'exposition du public sont faibles. Une personne devrait rester dix heures à deux mètres d'un véhicule transportant des substances radioactives à haute activité pour être exposée à 1 millisievert, soit la limite réglementaire annuelle pour le public. Pour éviter des actes de malveillance, les itinéraires des transports les plus sensibles doivent rester confidentiels.