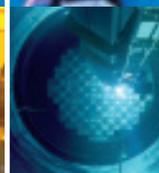


- 1 > L'atome
- 2 > La radioactivité
- 3 > L'homme et les rayonnements
- 4 > L'énergie
- 5 > L'énergie nucléaire: fusion et fission
- 6 > Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 > Le cycle du combustible nucléaire
- 8 > La microélectronique

DE LA RECHERCHE  
À L'INDUSTRIE

# 7 > Le cycle du combustible nucléaire



AVANT LE RÉACTEUR:  
LA PRÉPARATION DU COMBUSTIBLE

DANS LE RÉACTEUR:  
LA CONSOMMATION DU COMBUSTIBLE

APRÈS LE RÉACTEUR: LE RETRAITEMENT  
DES DÉCHETS NUCLÉAIRES



**AVANT LE RÉACTEUR :  
LA PRÉPARATION  
DU COMBUSTIBLE 4**

L'extraction de l'uranium du minerai	5
La concentration et le raffinage de l'uranium	6
L'enrichissement de l'uranium	6
Différentes méthodes d'enrichissement	8

**DANS LE RÉACTEUR :  
LA CONSOMMATION  
DU COMBUSTIBLE 9**

La préparation des assemblages de combustible	10
La consommation de l'uranium 235	10
La dégradation du combustible	11

**APRÈS LE RÉACTEUR :  
LE RETRAITEMENT 12**

Les objectifs du retraitement	13
L'extraction des produits de fission	13
Le recyclage des matières combustibles	14



© Cogema/P. Lesage

Le combustible usé est entreposé dans une piscine de refroidissement sur place. Il y restera trois ans.

**LES DÉCHETS NUCLÉAIRES 16**

La production de déchets nucléaires en France	17
Le tri et le stockage des déchets radioactifs	18
La recherche sur les déchets à vie longue	19



© Cogema

L'extraction du minerai uranifère s'effectue dans des mines à ciel ouvert – ici, les mines de Mc Clear (Canada) – ou en galeries souterraines.

“De l'extraction de l'uranium au stockage des déchets radioactifs, le cycle du combustible nucléaire comporte une multitude d'opérations industrielles.”

## introduction

Un combustible est une matière qui fournit de la chaleur en brûlant. Les plus connus sont le bois, le charbon, le gaz naturel ou le pétrole. Par analogie, l'uranium, utilisé dans les centrales nucléaires, est appelé “combustible nucléaire” car il dégage aussi de la chaleur mais cette fois par fission et non par combustion.

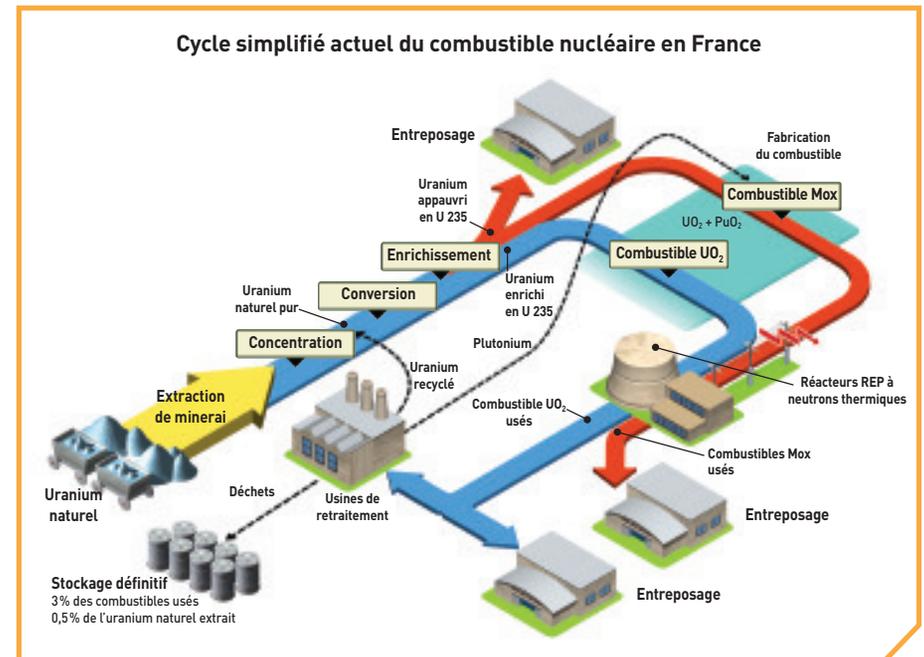
Le combustible nucléaire, après son utilisation dans le réacteur, peut être retraité afin d'en extraire les matières énergétiques recyclables. C'est pourquoi on parle de cycle du combustible nucléaire. Ce cycle regroupe l'ensemble des opérations industrielles suivantes :

- extraction de l'uranium des mines ;
- fabrication du combustible ;
- utilisation dans le réacteur ;
- retraitement du combustible déchargé du réacteur ;
- traitement et stockage des déchets.

Le combustible nucléaire fournit par unité ou masse, par kilo par exemple, beaucoup plus d'énergie qu'un combustible fossile (charbon ou pétrole). Utilisé dans un réacteur à eau sous pression, un kilo d'uranium produit 10 000 fois plus d'énergie qu'un kilo de charbon ou de pétrole dans une centrale thermique. De plus, le combustible restera longtemps (plusieurs années) dans le réacteur, contrairement aux combustibles classiques qui sont brûlés rapidement. Le combustible nucléaire est aussi différent des autres parce que l'uranium doit subir de nombreuses opérations après son extraction et avant son utilisation dans le réacteur. Pour simplifier, nous parlerons, dans les pages qui suivent, du combustible nucléaire utilisé dans les réacteurs à eau sous pression (REP). En effet, les centrales nucléaires constituées d'un ou plusieurs REP sont les plus répandues dans le monde (voir livret *Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire*).

UNE FOIS EXTRAIT DE LA MINE,  
L'URANIUM EST PURIFIÉ, CONCENTRÉ  
ET ENRICHÍ.

# Avant le réacteur : la préparation du combustible



## L'EXTRACTION DE L'URANIUM DU MINÉRAI

L'uranium est un métal relativement répandu dans l'écorce terrestre (50 fois plus que le mercure par exemple). Comme la plupart des métaux, il ne s'extrait pas directement sous sa forme pure parce qu'à l'état naturel il se trouve, dans des roches, combiné à d'autres éléments chimiques. Les roches les plus riches

en uranium sont les minerais uranifères (c'est-à-dire contenant de l'uranium), telles, par exemple, l'uraninite et la pechblende.

Le cycle du combustible nucléaire commence donc par l'extraction du minerai uranifère dans des mines à ciel ouvert ou en galeries souterraines. Les principaux gisements connus se trouvent en Australie, aux États-Unis, au Canada, en Afrique du Sud et en Russie.

**“Pour augmenter leur teneur en uranium, les roches du minerai sont concassées et finement broyées. Le concentré obtenu est appelé *yellow cake*.”**

### LA CONCENTRATION ET LE RAFFINAGE DE L'URANIUM

La teneur du minerai en uranium est en général assez faible. En France, par exemple, chaque tonne de minerai contient de 1 à 5 kg d'uranium (soit entre 0,1 et 0,5%). Il est donc indispensable de concentrer l'uranium de ces minerais, ce qui se fait le plus souvent sur place.

Les roches sont d'abord concassées et finement broyées, puis l'uranium est extrait par diverses opérations chimiques.

Le concentré fabriqué a l'aspect d'une pâte jaune appelée “*yellow cake*”. Il contient environ 75 % d'oxyde d'uranium, soit 750 kg par tonne.

L'uranium est un métal qui s'oxyde très rapidement au contact de l'oxygène de l'air, se transformant en oxyde d'uranium.

Le concentré d'uranium ne peut pas être utilisé tel quel dans les réacteurs nucléaires. L'oxyde d'uranium doit d'abord être débarrassé des impuretés par différentes étapes de purification (raffinage). Très pur, il est ensuite converti en tétrafluorure d'uranium ( $UF_4$ ) constitué de quatre atomes de fluor et d'un atome d'uranium.

### L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

Pour alimenter les REP, il faut disposer d'un combustible dont la proportion d'uranium 235 se situe entre 3 et 5%, car seul cet isotope de l'uranium peut subir la fission nucléaire libératrice d'énergie (voir livret *Le fonctionnement*

d'un réacteur nucléaire). Or, dans 100 kg d'uranium naturel, il y a 99,3 kg d'uranium 238 et 0,7 kg d'uranium 235, soit 0,7% seulement d'uranium 235 fissile. L'opération consistant à augmenter la proportion d'uranium 235 est appelée enrichissement.

**“Pour alimenter les réacteurs nucléaires, l'uranium naturel doit être enrichi en uranium 235.”**

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 quasiment les mêmes propriétés chimiques (voir livret *L'atome*). 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.

Foration montante en terrain congelé dans la mine de McArthur (Canada).



© Cogema/Carnico

Des mines d'uranium au stockage des déchets

Usine COMINAK de traitement du minerai au Niger.



© Cogema/0. Martel

Des mines d'uranium au stockage des déchets

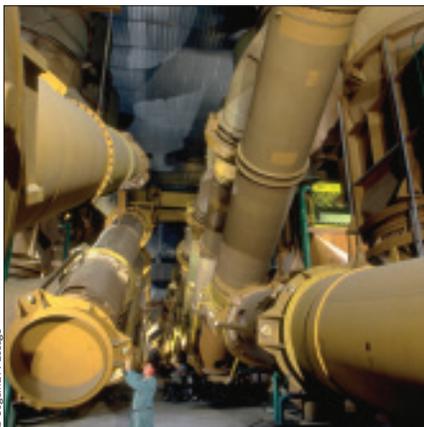
## DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ENRICHISSEMENT

### La diffusion gazeuse

Avant son enrichissement par ce procédé, le tétrafluorure d'uranium, obtenu après extraction du minerai et raffinage, sera transformé en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) qui a la propriété d'être gazeux à partir de 56 °C.

Le procédé par diffusion gazeuse consiste à faire passer l' $UF_6$  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 d'uranium 238, traversent un peu plus rapidement chaque barrière, ce qui permet d'enrichir peu à peu l'uranium.

Allée de diffuseurs à l'usine Georges Besse d'Eurodif.



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, en France, dans l'usine d'enrichissement de l'uranium (usine Eurodif de Tricastin dans la vallée du Rhône fournissant plus du tiers de la production mondiale d'uranium enrichi), **l'opération doit être répétée 1400 fois pour produire un uranium assez enrichi en uranium 235**, alors utilisable dans des centrales nucléaires classiques.

### L'ultracentrifugation

Un autre procédé d'enrichissement de l'uranium est utilisé à moins grande échelle par le groupe européen Urenco (Allemagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne) : c'est l'**ultracentrifugation**.

Ce principe de séparation utilise 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 d'uranium 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.

TROIS OU QUATRE ANS : C'EST LA DURÉE D'UTILISATION DU COMBUSTIBLE DANS UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE.

# Dans le réacteur : la consommation du combustible



## “Pour une centrale, plus de 40 000 “crayons” sont préparés pour être rassemblés en “fagots” de section carrée, appelés assemblages de combustible.”



© CEAM - Faugère

Chaque assemblage de combustible contient 264 “crayons”, lesquels renferment les “pastilles” d’oxyde d’uranium.

### LA PRÉPARATION DES ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE

Après enrichissement, l’hexafluorure d’uranium est converti en oxyde d’uranium sous la forme d’une poudre noire. Celle-ci est comprimée puis frittée (cuite au four) pour donner des petits cylindres d’environ 1 cm de long et gros comme des petits morceaux de craie, appelés “pastilles”. Chaque pastille, qui ne pèse que 7 g, peut libérer autant d’énergie qu’une tonne de charbon (1 million de grammes). Les pastilles sont enfilées dans de longs tubes métalliques de 4 m de long en alliage de

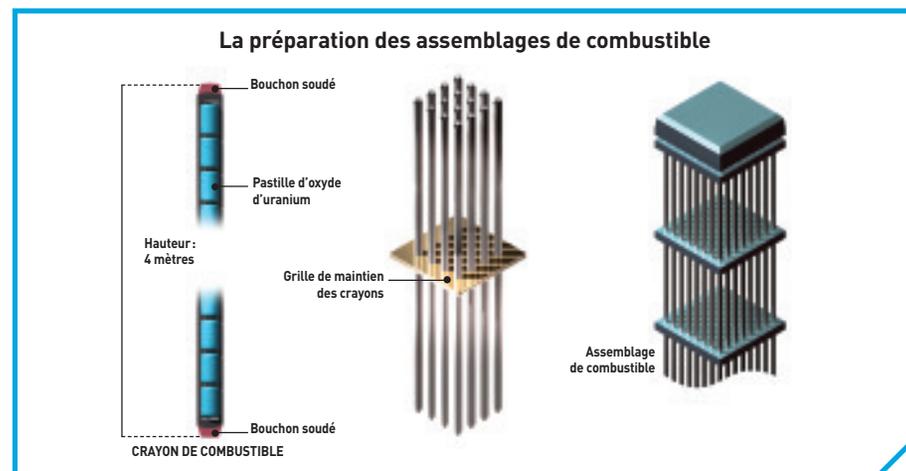
zirconium, les “gaines”, dont les extrémités sont bouchées de manière étanche pour constituer les “crayons” de combustible. Pour une centrale, plus de 40 000 crayons sont préparés pour être rassemblés en “fagots” de section carrée, appelés assemblages de combustible. Chaque assemblage contient 264 crayons. Le chargement d’un réacteur nucléaire de 900 mégawatts (millions de watts) nécessite 157 assemblages contenant en tout 11 millions de pastilles.

### LA CONSOMMATION DE L’URANIUM 235

Les assemblages de combustible, disposés selon une géométrie précise, forment le cœur du réacteur. Chacun va y séjourner pendant trois ou quatre ans. Durant cette période, la fission de l’uranium 235 va fournir la chaleur nécessaire à la production de vapeur puis d’électricité. En effet, l’uranium 235 est fissile. Cela signifie que, sous l’effet de la collision avec un neutron, son noyau se casse (fissionne) en produits de fission **radioactifs** tout en libérant de l’énergie.

Les atomes dont les noyaux sont instables sont dits radioactifs. Ces noyaux se transforment naturellement en d’autres noyaux en émettant des rayonnements (voir livret *La radioactivité*).

En revanche, l’uranium 238, qui représente pourtant 97 % de la masse d’uranium enrichi, ne se casse pas lors de l’absorption d’un neutron. Cependant, certains noyaux d’uranium 238 capturent un neutron et se transforment en plutonium 239, lequel est fissile comme l’uranium 235 : c’est pourquoi on



dit que l’uranium 238 est fertile. Une partie du plutonium 239 peut fournir de l’énergie par fission des noyaux. Une petite partie se transforme aussi en d’autres isotopes du plutonium par capture de neutrons.

### LA DÉGRADATION DU COMBUSTIBLE

Au fil du temps, le combustible va subir certaines transformations qui le rendent moins performant :

- consommation progressive d’uranium 235 ;
- apparition de produits de fission (absorbant les neutrons, ces produits perturbent la réaction en chaîne).

Au bout d’un certain temps, le combustible doit donc être retiré du réacteur même s’il contient encore des quantités importantes de matières énergétiques récupérables, notamment l’uranium et le plutonium. Ce combus-

tible utilisé est également très radioactif en raison de la présence des produits de fission. Les rayonnements émis par ces atomes radioactifs dégagent beaucoup de chaleur et, après son utilisation, le combustible utilisé est donc entreposé dans une piscine de refroidissement près du réacteur pendant trois ans pour laisser diminuer son activité (voir livret *La radioactivité*).

**“Le combustible utilisé est entreposé dans une piscine de refroidissement sur place. Il y restera trois ans.”**

LE RETRAITEMENT CONSISTE À RÉCUPÉRER LA MATIÈRE UTILISABLE, LE PLUTONIUM ET L'URANIUM, ET À ISOLER LES DÉCHETS RADIOACTIFS NON RÉCUPÉRABLES.

# Après le réacteur: le retraitement



© Cogema/PL Lesage

Des mines d'uranium au stockage des déchets

7 > Le cycle du combustible nucléaire

“Certains pays retraitent eux-mêmes leurs déchets, d'autres sous-traitent cette opération en dehors de leurs frontières, en France notamment.”

## LES OBJECTIFS DU RETRAITEMENT

Le retraitement consiste à :

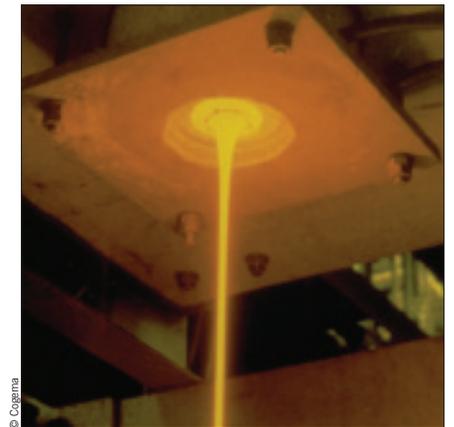
- récupérer la matière encore utilisable, le plutonium et l'uranium, pour produire à nouveau de l'électricité. C'est le recyclage des matières énergétiques contenues dans les combustibles usés ;
- trier les déchets radioactifs non récupérables.

Certains pays n'ont pas opté pour le retraitement, par exemple, la Suède et les États-Unis. Dans ce cas, les combustibles usés sont considérés comme des déchets et sont directement stockés après leur retrait du réacteur. Les pays ayant choisi d'avoir une usine de retraitement sont la France, la Grande-Bretagne, la Russie et le Japon. D'autres pays comme l'Allemagne, la Suisse et la Belgique font retraiter dans d'autres pays (notamment en France).

## L'EXTRACTION DES PRODUITS DE FISSION

Lors de leur arrivée dans l'usine de retraitement, les assemblages de combustible usés sont de nouveau entreposés dans une piscine. Ils sont ensuite cisailés en petits tronçons, lesquels sont alors introduits dans une solution chimique qui dissout le combustible

mais laisse intacts les morceaux métalliques (gaines...). Ceux-ci seront stockés comme déchets nucléaires. Des traitements chimiques successifs sur le combustible en solution permettent de séparer le plutonium et l'uranium des produits de fission. Ces derniers seront intégrés dans des verres spéciaux (vitrification) et stockés comme déchets nucléaires. L'uranium et le plutonium, qui représentent



© Cogema

Une fois séparés, les produits de fission sont intégrés à des verres spéciaux et stockés comme déchets nucléaires.

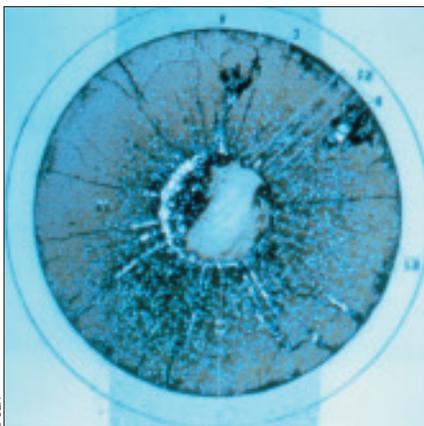
Des mines d'uranium au stockage des déchets

7 > Le cycle du combustible nucléaire

96 % de l'ensemble, sont séparés et conditionnés séparément.

### LE RECYCLAGE DES MATIÈRES COMBUSTIBLES

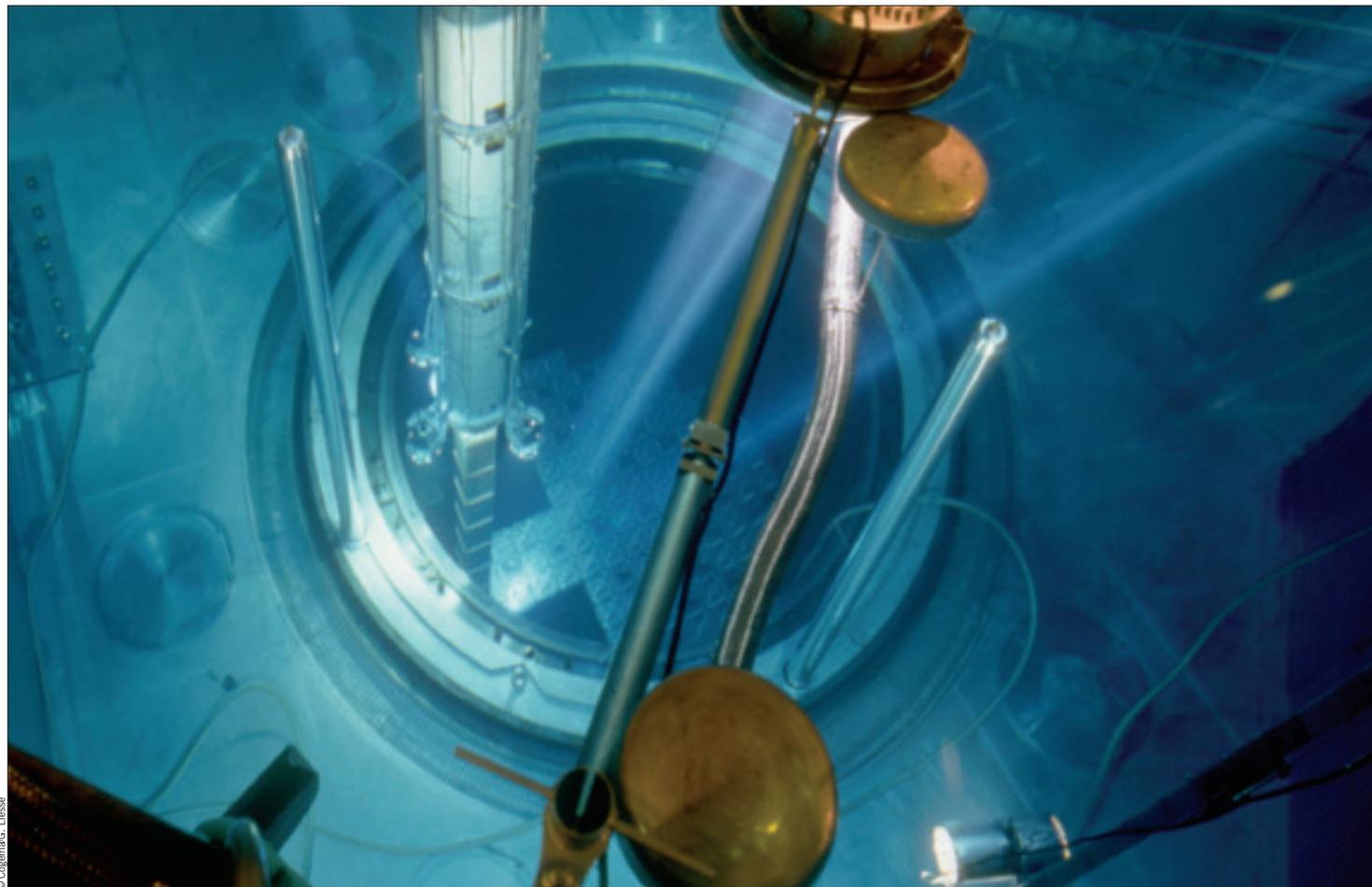
L'utilisation du plutonium issu du retraitement fait l'objet de nombreuses études, notamment au CEA. **De nouveaux combustibles composés d'un mélange d'oxyde d'uranium et oxyde de plutonium** (appelés Mox, de l'anglais "*Mixed Oxides*") **sont déjà utilisés** dans certains réacteurs (REP) d'EDF. De plus, en ce qui concerne l'uranium récupéré au cours du retraitement et qui est encore légèrement plus riche que l'uranium naturel (environ 1 % d'uranium 235), il pourra être à nouveau enrichi à plus de 3 % et suivre une voie analogue à celle d'un combustible ordinaire.



© CEA

Coupe de combustible Mox colorisée.

Chargement de cœur dans la centrale nucléaire de Daya Bay (Chine).



© Cogema/G. Liesse

**“L'uranium récupéré pourra encore être enrichi à plus de 3 % et suivre une voie analogue à celle d'un combustible ordinaire.”**

LE MODE DE STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES DÉPEND DE LA DURÉE DE LEUR RADIOACTIVITÉ.

# Les déchets nucléaires



© CEA/IEA - July

## LA PRODUCTION DE DÉCHETS NUCLÉAIRES EN FRANCE

Toute activité humaine génère des déchets. La croissance démographique et industrielle s'accompagne d'un accroissement du volume de déchets à traiter, conditionner, recycler ou stocker lorsque le recyclage n'est pas possible. L'industrie nucléaire n'échappe pas à la règle. Cependant, ces déchets ne constituent qu'une part minime des déchets produits par la société. À titre de comparaison, la **quantité**

annuelle de déchets industriels produits en France, par habitant, est de 2 500 kg (dont 100 kg de déchets toxiques) contre 1 kg environ de déchets nucléaires. Dans ce kilo, seuls 10 g sont des déchets de haute activité. La quantité n'est cependant pas le seul aspect à prendre en compte ; la toxicité est aussi très importante. C'est pourquoi les recherches sur le traitement et le stockage de ces déchets font l'objet de nombreuses études.

## LES TROIS CATÉGORIES DE DÉCHETS RADIOACTIFS

### Catégorie A

- Déchets à vie courte (période de moins de 30 ans) de faible et moyenne activité.
- Rayonnement "bêta" et "gamma".
- Radioactivité comparable à la radioactivité naturelle d'ici à 300 ans.
- > Origine : laboratoires, médecine nucléaire, industrie (agroalimentaire, métallurgie, etc.), usines nucléaires (objets contaminés : gants, filtres, résines, etc.).

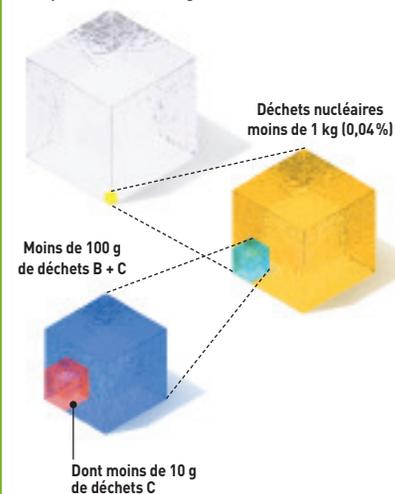
### Catégorie B

- Déchets à vie longue (plusieurs dizaines de milliers d'années) de faible et moyenne activité.
- Rayonnement "alpha".

### Catégorie C

- Déchets à vie longue et à haute activité et dégagement de chaleur pendant plusieurs centaines d'années.
- Rayonnement "alpha", "bêta" et "gamma".
- > Origine : retraitement des combustibles usés issus des centrales nucléaires (cendres de la combustion).

Déchets industriels par an et par habitant : 2 500 kg



## “Au bout de 300 ans, 90 % des déchets ont perdu leur radioactivité.”

Les déchets nucléaires sont produits à toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire : extraction minière, enrichissement de l'uranium, fabrication des assemblages, exploitation des réacteurs, retraitement. Ils sont aussi engendrés lors du démantèlement des installations nucléaires. S'y ajoutent les déchets radioactifs produits par les centres de recherche (CEA...), ainsi que les industries et hôpitaux utilisant des éléments radioactifs.

### LE TRI ET LE STOCKAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Tous les déchets radioactifs n'étant pas identiques, ils sont classés selon deux critères en vue de leur stockage :

- leur niveau d'activité, c'est-à-dire l'**intensité du rayonnement**, qui conditionne l'importance des protections à utiliser contre la radioactivité ;
- leur **période radioactive**, qui permet de définir la durée de leur nuisance potentielle.

**Période radioactive d'un radioélément :** temps au bout duquel la moitié des atomes de ce radioélément initialement présents a disparu par désintégration.

On distingue ainsi les déchets selon leur durée de vie et leur activité.

- **Les déchets à vie courte, de faible et moyenne activité.** Ils représentent 90 % des déchets radioactifs produits en France. Au bout de 300 ans, ces déchets ont perdu presque toute leur activité (voir livret *La radioactivité*). Ils sont compactés dans des fûts en acier ou en béton qui sont stockés dans des centres de stockage de surface. Il en existe deux en



Conditionnement des déchets dans une matrice en béton.

France, à La Hague (Manche) et à Soulaïnes (Aube). Leur gestion est assurée par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs).

- **Les déchets à vie longue et/ou de haute activité** (10 % du volume total). Leur décroissance radioactive s'étend sur plusieurs milliers voire centaines de milliers d'années. Ils sont coulés dans du bitume ou du verre. En France, leur devenir fait l'objet d'une loi votée en 1991. L'une des options envisagées est le stockage en formation géologique profonde. Elle sera étudiée grâce à la réalisation de deux laboratoires souterrains. Les autres options sont leur transformation, en réacteur nucléaire, en déchets radioactifs à vie plus courte

(cette opération s'appelle la transmutation), mais également l'étude des procédés de conditionnement et l'entreposage de longue durée en surface ou en subsurface (à quelques dizaines de mètres sous terre). En attendant une décision finale, ils sont entreposés en surface à La Hague et à Marcoule.

### LA RECHERCHE SUR LES DÉCHETS À VIE LONGUE

La réduction du volume et de l'activité des déchets solides et liquides est au premier rang des objectifs de recherche et développement qui comprennent :

- la recherche, effectuée au CEA, de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- l'étude, au CEA, de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface ou en subsurface ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains, effectuée par l'Andra. La protection de l'homme et de son environnement est une composante majeure des travaux des chercheurs et ingénieurs du CEA, qui apportent un soin particulier à la mise au point de procédés et technologies visant à diminuer sans cesse les risques liés à la radioactivité. Au quotidien, une même attention vise la gestion des déchets liés à leurs propres activités de recherche.

## “En 2006, le parlement français se prononcera sur le mode de gestion définitif des déchets nucléaires à vie longue.”

Chaîne blindée de vitrification des produits de fission.

