

## DEBAT PUBLIC SUR LES DECHETS RADIOACTIFS

CNDP  
Commission Particulière

### CONTRIBUTION AU DEBAT PUBLIC

Ministères

OPECST

Industriels

Acteurs  
de la recherche

CNE

Analyse  
contradictoire

# La séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue

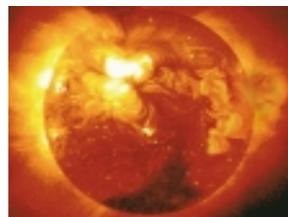
Axe de recherche 1  
Pilote : Commissariat à l'Énergie Atomique

# LE CEA

## AU CŒUR DES GRANDS DÉFIS EUROPÉENS

Acteur majeur en matière de recherche, de développement et d'innovation, le Commissariat à l'énergie atomique intervient dans trois grands domaines : l'énergie, la défense et les technologies pour l'information et la santé, s'appuyant sur une recherche fondamentale d'excellence. À travers la diversité de ses programmes, le CEA poursuit deux objectifs

majeurs : devenir le premier organisme de recherche technologique en Europe et garantir la pérennité de la dissuasion nucléaire. Reconnu comme un expert dans ses domaines de compétences, le CEA est pleinement inséré dans l'Espace européen de la recherche et exerce une présence croissante au niveau international.



### ÉNERGIE

Disposer d'énergies plus compétitives, non émettrices de gaz à effet de serre et respectueuses de l'environnement.



### DÉFENSE ET SÉCURITÉ

Garantir la pérennité de la dissuasion nucléaire et la sécurité.



### TECHNOLOGIES POUR L'INFORMATION ET LA SANTÉ

Valoriser l'industrie grâce à la recherche technologique.



### RECHERCHE FONDAMENTALE

S'appuyer sur une recherche fondamentale d'excellence pour développer les programmes de recherche technologique.

## SOMMAIRE

page  
**03**  
L'AXE 1 :  
LES ENJEUX

page  
**05**  
LA SÉPARATION  
POUSSÉE : TRIER  
POUR MIEUX  
GÉRER

page  
**06**  
LA TRANSMUTATION :  
ÉLIMINER  
LES ÉLÉMENTS  
À VIE LONGUE

page  
**07**  
LES CHOIX POSSIBLES  
APPORTÉS PAR LA  
SÉPARATION-TRANSMUTATION

# LA SÉPARATION-TRANSMUTATION DES ÉLÉMENTS RADIOACTIFS À VIE LONGUE

La loi du 30 décembre 1991, qui porte sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue, prévoit la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets. À la demande du gouvernement, ces études ont été pilotées par le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) et effectuées majoritairement par ses propres équipes ou par celles du CNRS ou des universités. Un bref bilan en est donné ci-dessous.

## L'AXE 1 : LES ENJEUX

### Comment le principe général de la réduction des quantités et de la nocivité des déchets ultimes s'applique-t-il aux déchets radioactifs ?

L'objectif de l'axe 1 est de réduire les quantités et la nocivité des déchets radioactifs ultimes. Le combustible des réacteurs EDF est constitué d'oxyde d'uranium ou d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium. Après son séjour dans le réacteur, le combustible contient encore une quantité importante de matières valorisables, qu'il est intéressant de récupérer. Par ailleurs, les réactions nucléaires dans le réacteur qui ont produit de l'énergie ont également créé d'autres éléments que l'on appelle les produits de fission et les actinides mineurs. Ces éléments rendent le combustible usé extrêmement radioactif.



Vue aérienne de l'usine de traitement des combustibles usés de Cogema-La Hague (Manche).

C'est la raison pour laquelle le combustible est retraité de manière à :

- > récupérer les matières énergétiquement valorisables ;
- > séparer ces matières des autres éléments radioactifs qui constituent les déchets ;
- > conditionner les déchets sous une

forme inerte et sûre en les incorporant dans du verre, c'est le procédé de vitrification qui est mis en œuvre dans l'usine COGEMA de La Hague.

L'axe 1 de la loi de 91 propose d'examiner des solutions industrialisables permettant de réduire encore les quantités de





déchets de haute activité contenus dans les verres et d'aller plus loin dans le recyclage des matières contenues dans le combustible usé.

Chaque année, 1 150 tonnes de combustible usé sont retirées des réacteurs EDF. Ce combustible contient :

- 94 % d'uranium et 1 % de plutonium, des éléments au fort potentiel énergétique qui sont valorisables et, en partie, recyclés (à titre d'exemple, pour produire la même quantité d'énergie, ce millier de tonnes de combustible nucléaire représente l'équivalent d'environ 23 millions de tonnes de pétrole).

- 5 % d'autres éléments radioactifs, qui représentent aujourd'hui les déchets de la production d'énergie. Une part importante de ces éléments (4,6 %) a une période de décroissance inférieure à 30 ans et il n'est pas considéré utile d'essayer de diminuer la quantité de ces éléments.

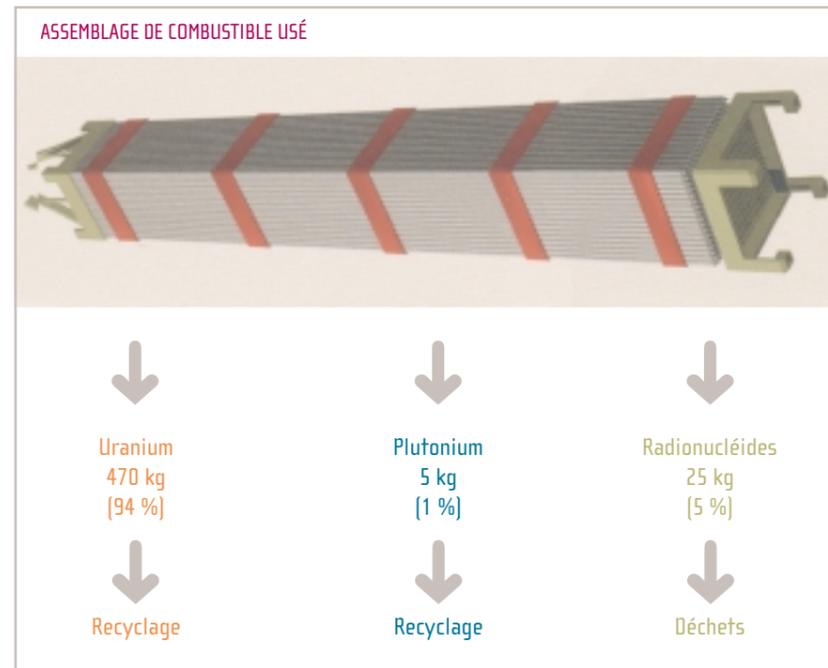
Reste donc 0,4 % de déchets à vie longue : 0,1 % « d'actinides mineurs » (ainsi qualifiés de par leur faible quantité), notamment neptunium, américium et curium et 0,3 % de produits de fission. Leurs périodes de décroissance radioactive vont de plusieurs milliers d'années (américium, par exemple) à plusieurs millions d'années

(neptunium, par exemple). Ils sont donc responsables d'une radioactivité et d'un dégagement de chaleur résiduels sur des durées très longues. Leur radioactivité entraîne l'émission de différents types de rayonnements (alpha, bêta et gamma) qui auraient des effets biologiques dangereux s'ils entraient en contact avec l'organisme humain. La radiotoxicité, contribution de chaque élément à ces effets sur l'organisme, lors de leur inhalation ou ingestion, traduit le caractère potentiellement dangereux des déchets radioactifs.

Ce sont donc ces éléments radioactifs à vie longue dont il faut viser à diminuer la quantité dans les déchets.

Pour y parvenir, il faut :

- > extraire ces éléments du combustible usé, c'est l'étape de séparation ;
- > les éliminer en les transformant en éléments non radioactifs ou à vie plus courte, c'est l'étape de transmutation.



## LA SÉPARATION POUSSÉE : TRIER POUR MIEUX GÉRER

Le traitement des combustibles usés, tel qu'il est réalisé actuellement en France, a pour fonction d'extraire l'uranium et le plutonium et de conditionner les déchets de haute activité restants dans une matrice de verre. Ce conditionnement satisfait les critères de sûreté et est de bonne qualité, comme le montrent les études de comportement à long terme. Pour cette extraction du plutonium et de l'uranium, un procédé baptisé Purex est utilisé avec succès depuis plusieurs décennies, en particulier en France où COGEMA exploite, à La Hague, une usine d'une capacité de traitement de 1 700 tonnes de combustibles usés par an. Depuis une vingtaine d'années, la France a fait le choix d'utiliser le plutonium extrait par Purex sous forme de combustible MOX dans vingt des cinquante-huit réacteurs EDF : le plutonium subit déjà ainsi la transmutation à l'échelle industrielle !

La séparation poussée vise à compléter le procédé industriel Purex en extrayant du combustible usé, par étapes successives, les actinides mineurs, neptunium, américium et curium. La séparation poussée a aussi été étudiée pour extraire les produits de fission à vie longue suivants : iode 129, technétium 99 et césium 135.

### Quels avantages apportés par la séparation poussée ?

Les déchets ultimes ainsi obtenus après séparation poussée, conditionnés sous forme de verres, seraient moins radioactifs à long terme et moins chauds, car contenant moins d'éléments radioactifs générateurs de chaleur, que les verres actuels. La radiotoxicité après 500 ans du

verre allégé de l'uranium, du plutonium et des actinides mineurs, pourrait alors être diminuée au maximum de 100 par rapport à la radiotoxicité après 500 ans du verre produit aujourd'hui. En outre, la diminution de la puissance thermique des déchets pourrait permettre de réduire le volume du stockage de façon plus ou moins importante selon le concept de stockage retenu.

Pour les verres déjà produits, une reprise a été étudiée afin d'en extraire les actinides mineurs et les produits de fission à vie longue pour les traiter par séparation-transmutation. Les résultats indiquent que cette reprise n'est pas réaliste pour différentes raisons techniques et économiques. L'industrialisation de ce procédé complexe, à plusieurs étapes, nécessiterait d'importants développements et entraînerait la construction de plusieurs ateliers similaires aux ateliers existants de La Hague. Ainsi, la séparation-transmutation ne pourra s'appliquer qu'aux déchets qui seront produits dans le futur.

### Comment séparer les éléments radioactifs à vie longue ?

Pour réaliser la séparation poussée, les actinides mineurs et les produits de fission, solubilisés dans de l'acide nitrique, doivent être capturés sélectivement grâce à des « molécules pièges » spécifiques. Il faut donc trouver et mettre au point pour extraire chaque élément une molécule hautement sélective, résistante à l'acide nitrique et qui génère peu ou pas de déchets : c'est là l'enjeu des recherches menées depuis une dizaine d'années dont certaines présenteraient de vrais défis scientifiques.

### Les résultats des recherches de la séparation poussée

Les équipes du CEA, en collaboration avec des laboratoires français et étrangers, ont montré qu'au prix de quelques adaptations, Purex permet de récupérer 99 % du neptunium et de l'iode et plus de 95 % du technétium. L'extraction de l'américium et du curium s'est révélée plus complexe et il a fallu développer d'autres procédés recourant à de nouvelles molécules pièges. Trois procédés, mis en œuvre successivement, permettent de capturer séparément 99,9 % de l'américium et 99,9 % du curium. Un dernier procédé, basé sur une molécule d'un autre type, permet, lui, de piéger 99 % du césium.

La faisabilité au laboratoire de la séparation poussée des actinides mineurs et produits de fission a ainsi été établie. C'est un résultat majeur de la recherche. Cette faisabilité devrait être confirmée en 2005 par le test des procédés en continu à partir d'une solution contenant 15 kg de combustible usé, dans le laboratoire Atalante.

Une fois séparés, les actinides mineurs devront être incorporés dans du combustible pour être transmutés dans des réacteurs appropriés. Un entreposage a donc été étudié pour conserver ces matières pendant quelques années entre les différentes étapes industrielles. Les études ont montré que cet entreposage est faisable, par exemple pour l'américium d'une manière similaire à celle utilisée aujourd'hui industriellement pour le plutonium.

### LES GRANDES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES POUR LES RECHERCHES SUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION



L'installation Atalante regroupe sur le site CEA de Marcoule l'ensemble des laboratoires nécessaires aux recherches en chimie pour la séparation poussée. Cette installation, unique au monde, correspond à un investissement de 250 millions d'euros. Plus de 200 chercheurs y travaillent.

## LA TRANSMUTATION : ÉLIMINER LES ÉLÉMENTS À VIE LONGUE

Après séparation, la transmutation vise à transformer les éléments radioactifs à vie longue en éléments à durée de vie plus courte ou stables. Pour y parvenir, le moyen le plus efficace est de bombarder ces éléments à vie longue par des neutrons disponibles en très grande quantité dans les réacteurs nucléaires.

### Comment et avec quels outils réaliser la transmutation ?

Les trois outils étudiés pour réaliser la transmutation sont les réacteurs à neutrons thermiques (les réacteurs à eau sous pression actuels d'EDF), les réacteurs à neutrons rapides et des installations couplant un accélérateur de particules et un réacteur sous-critique à neutrons rapides (appelées « systèmes hybrides » ou « Accelerator Driven System ADS »).

Les travaux menés au CEA ont montré que la transmutation en réacteurs à neutrons thermiques est techniquement peu efficace. Par contre, les caractéristiques des réacteurs à neutrons rapides, du type de

Phénix, permettent d'envisager la transmutation des actinides mineurs, en utilisant des combustibles contenant des quantités significatives d'actinides mineurs (2,5 % à 5 %).

Les ADS sont des réacteurs originaux mais complexes qui ont des potentialités en tant que réacteurs dédiés à la transmutation. Ces potentialités doivent être démontrées expérimentalement. Les études se poursuivent en ce sens en collaboration étroite avec le CNRS. Leur performance en termes de production d'électricité étant limitée, ils se positionnent donc en complément des réacteurs producteurs d'électricité.

### Quels combustibles pour la transmutation ?

De nouveaux combustibles ont été conçus pour optimiser les performances de transmutation dans les réacteurs à neutrons rapides. Grâce à des expériences en réacteurs expérimentaux, tels que dans le réacteur à neutrons rapides Phénix du CEA à Marcoule, des résultats remarquables ont été obtenus : par exemple,

environ 70 % des noyaux d'américium du combustible sélectionné ont été cassés en fragments à vie courte en une seule campagne d'irradiation.

### Et la transmutation des produits de fission ?

Concernant les produits de fission à vie longue, leur transmutation, théoriquement possible, a rencontré différents types de problèmes techniques, amenant à considérer cette option comme non réaliste sur le plan industriel. Pour le césium, la présence de différents isotopes conduit à générer plus d'éléments à vie longue que l'on en détruit. Pour l'iode, aucun matériau incorporant cet élément instable et pouvant fonctionner en réacteur n'a été identifié.

#### LES GRANDES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES POUR LES RECHERCHES SUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION



Le réacteur Phénix, également implanté à Marcoule, est un réacteur prototype à neutrons rapides RNR à sodium construit et exploité par le CEA et EDF depuis 1973. Après d'importants travaux de rénovation entrepris dès 1994 et d'un montant de 250 millions d'euros, le réacteur fonctionne depuis 2003 à la puissance de 350 MWth pour réaliser le programme d'expériences de transmutation.

### Et si certains éléments radioactifs n'étaient pas transmutables ?

Certains éléments radioactifs séparés peuvent s'avérer difficiles à transmuter et il faut donc pouvoir proposer une alternative à leur transmutation. L'objectif est alors de disposer, pour chacun de ces éléments, de conditionnements aptes à garantir un confinement sur de très longues durées en stockage. Les études ont été consacrées à la recherche de nou-

veaux matériaux pouvant jouer ce rôle de matrice de conditionnement. Toutefois, l'intérêt de ces nouveaux procédés de conditionnement n'est pas aujourd'hui réellement avéré et, si certains éléments séparés n'étaient pas transmutables, ils seraient, comme actuellement, conditionnés dans le verre.

## LES CHOIX POSSIBLES APPORTÉS PAR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION

Il est possible de situer clairement les enjeux et les limites des études conduites dans le cadre de l'axe 1. Ces technologies visent en effet essentiellement, dans une démarche de progrès continu, à diminuer la radiotoxicité et la quantité des déchets ultimes. Les principaux éléments concernés sont le plutonium, qui est déjà recyclé, et aussi les actinides mineurs (américium, curium et neptunium). Les produits de fission (césium, iode, technétium...), pour des raisons techniques, ne se prêtent pas au processus de transmutation et ont donc vocation à être conditionnés de façon pérenne dans les déchets vitrifiés.

La séparation des actinides mineurs est possible et ce résultat constitue une avancée considérable. De nouvelles molécules et de nouveaux procédés d'extraction ont été définis et testés en milieu radioactif. Les performances de séparation sont très satisfaisantes (environ 99,9 % pour les actinides mineurs américium et curium) et pourraient permettre de

diminuer au maximum par 100 la radiotoxicité après 500 ans des verres allégés de ces éléments radioactifs par rapport à la radiotoxicité après 500 ans des verres actuellement produits.

La faisabilité scientifique de la transmutation est démontrée. Des éléments concernant la faisabilité technique existent grâce aux expériences de transmutation dans des réacteurs à neutrons rapides. Toutefois, les données disponibles sur la transmutation doivent encore être complétées pour disposer d'un bilan étayé de ces technologies avant de se lancer dans la construction de prototypes de réacteurs transmutateurs. Un tel bilan pourrait être effectué à l'horizon 2015 environ.

Ces résultats offrent plusieurs solutions pour réduire la radiotoxicité et la thermique des déchets ultimes, grâce à de futurs réacteurs à neutrons rapides remplaçant progressivement à partir de l'horizon 2040

les actuels réacteurs à eau sous pression. Les résultats montrent que, bien que des déchets ultimes à vie longue seraient toujours produits, ces futurs déchets pourraient être optimisés dans une démarche de progrès en vue de leur gestion par les deux axes complémentaires 2 et 3 de la loi de 1991.