

# Vers une réduction de l'inventaire des déchets nucléaires

La loi votée le 28 juin 2006 délivre deux grands principes pour la gestion des déchets nucléaires « à haute activité et à vie longue » :

- réduire le « terme source » (volume et nocivité des déchets finaux) autant que cela est raisonnablement possible, notamment par une politique de recyclage ;
- confiner ces déchets finaux dans des matrices durables et envisager de les stocker (de façon potentiellement réversible) en couches géologiques profondes.

Le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) est en charge de coordonner les recherches sur le premier point (l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, étant en charge du second), et nous nous proposons de dresser ici un état des avancées et des perspectives de la recherche en ce domaine.

## Les déchets nucléaires à haute activité et à vie longue

Il s'agit, aujourd'hui en France, des résidus qui subsistent à l'issue des opérations de recyclage des combustibles nucléaires usés régulièrement déchargés des 58 réacteurs nucléaires. La *figure 1* présente une vision schématique des opérations du cycle des matières, de la mine au réacteur (l'amont du cycle du combustible), puis à l'issue des quelques années de séjour du combustible dans le réacteur (l'aval du cycle, du recyclage aux déchets ultimes). Les grandes lignes en sont les suivantes :

- Les réacteurs employés aujourd'hui en France (pour produire près des  $\frac{3}{4}$  des besoins en électricité) sont des réacteurs à eau pressurisée, qui utilisent la possibilité de fissions en chaîne de l'isotope  $^{235}\text{U}$  de l'uranium ; près de mille tonnes d'uranium enrichi en  $^{235}\text{U}$  (à environ 4 %), sous forme oxyde  $\text{UO}_2$ , sont chaque année chargées – et déchargées – du parc français.
- Pour ce faire, on utilise environ 8 000 t d'uranium naturel (dont la teneur isotopique en  $^{235}\text{U}$  n'est que de 0,7 %) qui, lors de l'opération d'enrichissement, laisse sans emploi immédiat environ 7 000 t d'uranium appauvri (constitué à plus de 99,7 % de  $^{238}\text{U}$ , non fissile en réacteur à eau).
- Au cours du séjour en réacteur,  $^{235}\text{U}$  est fissionné, ce qui fournit l'énergie recherchée (environ 200 MeV par fission) et donne naissance à des « produits de fission » (plusieurs centaines de nucléides très divers et radioactifs pour une large part d'entre eux) ;  $^{238}\text{U}$  conduit lui (par absorption de neutrons suivie de décroissances radioactives) à la formation d'éléments transuraniens (plutonium et actinides dits « mineurs », émetteurs alpha présentant une période radioactive longue).
- Les opérations de retraitement du combustible conduisent à mettre en solution l'ensemble des éléments constitutifs du combustible et à récupérer (pour les recycler en réacteur) l'uranium et le plutonium, qui comportent encore des isotopes fissiles ; le reste (produits de fission et actinides mineurs) est concentré et confiné – à l'échelle atomique – au sein d'une matrice de verre particulièrement résistante vis-à-vis des effets de lixiviation. Sur mille tonnes annuelles d'uranium enrichi irradié, on récupère ainsi environ 940 t d'uranium résiduel (qui peut être réenrichi, se substituant ainsi à l'uranium provenant d'extraction minière) et 10 t de plutonium (qui est recyclé sous forme d'un combustible dit MOX,

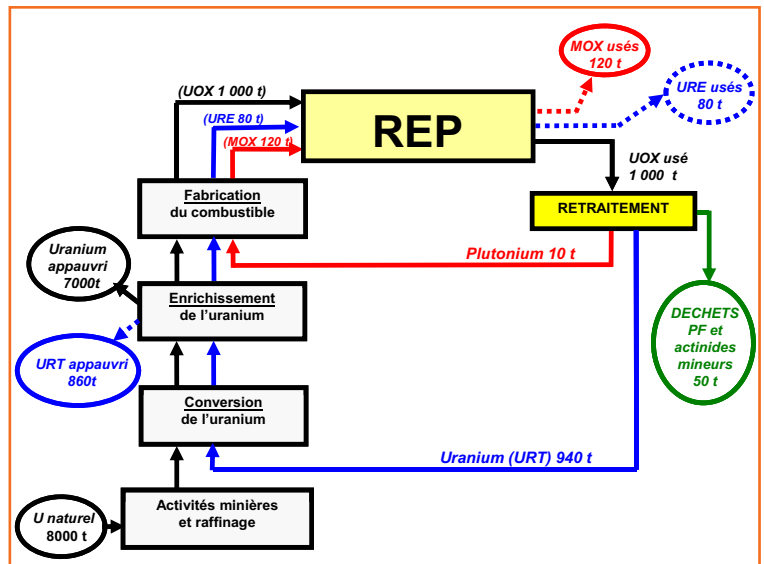


Figure 1 - Le cycle des matières dans le parc français (flux annuels indicatifs pour ~ 400 TWh/an).

en mélange avec de l'uranium appauvri, ce qui fournit aujourd'hui environ 10 % de l'électricité nucléaire française). Le reste (environ 50 t de résidus non recyclables vitrifiés) constitue le déchet ultime.

## Comment réduire le « terme source » ?

Les déchets vitrifiés renferment des nucléides très divers de par leur nature, leurs propriétés chimiques (toutes les colonnes du tableau de Mendeleïev sont représentées), et aussi leurs propriétés radioactives. On trouve ainsi des éléments de durée de vie très courte à courte (période radioactive jusqu'à 30 ans), qui sont les produits de fission à quelques rares exceptions près, et conditionnent fortement les dispositions de gestion des déchets dans les premières décennies, mais qui s'éteindront au fil des siècles. D'un autre côté, il y a des éléments moins radioactifs mais (ou parce que) de période beaucoup plus longue, soit directement soit par l'intermédiaire de leurs produits de filiation dans leurs longues chaînes de décroissance : ce sont les actinides mineurs (américium, neptunium, curium). Ces derniers (*voir figure 2*) sont peu abondants (seulement le millième de la masse d'un combustible nucléaire usé), mais sont les principaux contributeurs à la radiotoxicité résiduelle des déchets après quelques siècles (plus de 99 % de la radiotoxicité totale après trois siècles, dans la mesure où le plutonium – autre radioélément à vie longue, encore plus abondant dans le combustible usé – a été recyclé).

C'est pourquoi l'idée d'une « transmutation » (*voir figure 3*) de ces éléments à vie longue a germé : extraire ces éléments des déchets finaux et les transmuter (en éléments stables ou radioactifs, mais à durée de vie plus courte) par de nouvelles réactions nucléaires dans des dispositifs appropriés permettrait de simplifier considérablement la problématique de la gestion à long terme des déchets nucléaires.

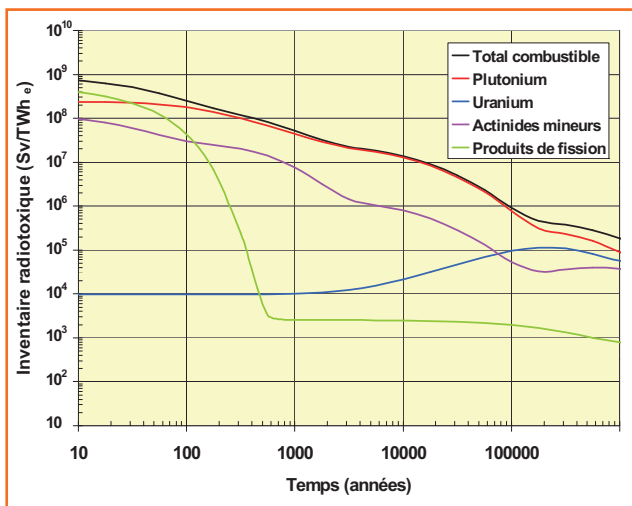


Figure 2 - Évolution de la contribution des différents composants du combustible usé à son « inventaire radiotoxique » au cours du temps.

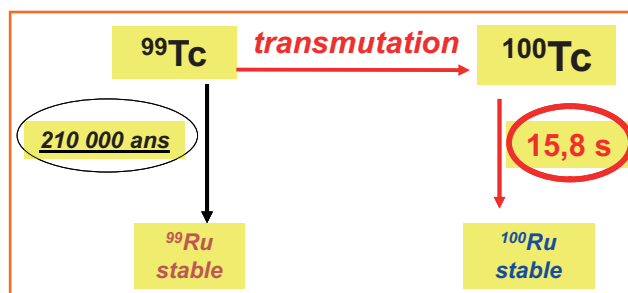


Figure 3 - Le principe de la transmutation des radioéléments à vie longue.

Un autre volet à considérer est la gestion des combustibles MOX usés : ils ne sont aujourd’hui pas « recyclés » car le plutonium qu’ils renferment présente une composition isotopique qui se prête difficilement à une utilisation en réacteur à eau. C’est pourquoi ils sont entreposés en attente d’un traitement différé, pour alimenter les futurs réacteurs nucléaires, dits « de 4<sup>e</sup> génération ».

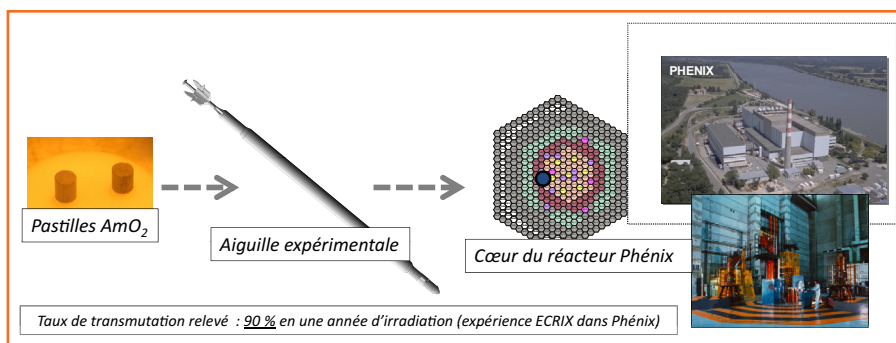


Figure 4 - Les expériences de transmutation de l’américium dans le réacteur Phénix.

### Les études et recherches en cours

Les réacteurs à neutrons rapides sont mieux adaptés que les réacteurs à eau pour « brûler » efficacement les transuraniens : ils privilégient les fissions plutôt que les réactions de capture (celles qui conduisent, dans les réacteurs à eau, à la formation d’isotopes élevés du plutonium et d’actinides mineurs). Tant la transmutation de ces derniers que le recyclage récurrent du plutonium peuvent ainsi être envisagés avec l’avènement de ces nouveaux réacteurs pour la prochaine génération de systèmes électronucléaires. Ces systèmes font l’objet depuis plusieurs années de recherches au niveau mondial.

En France, des avancées importantes ont permis la mise au point de procédés, basés sur l’utilisation de nouvelles architectures moléculaires, pour l’extraction sélective de ces éléments à vie longue. Diverses expériences ont été menées (notamment dans le réacteur Phénix, voir figure 4) qui ont confirmé, à l’échelle de quelques pastilles (soit quelques grammes) la faisabilité de la transmutation de certains éléments, et notamment de l’américium ; restent à étudier les conditions d’une mise en œuvre à l’échelle industrielle.

Le projet ASTRID (voir figure 5), dont la mise en service pourrait intervenir à l’horizon 2025, constituera le « démonstrateur technologique » d’un réacteur rapide de 4<sup>e</sup> génération, capable de « multirecycler » le plutonium et les actinides mineurs, ouvrant ainsi la voie à une utilisation plus effective de l’uranium naturel, à une diminution de l’inventaire et de la nocivité des déchets ultimes, et donc, comme le préconise la loi de juin 2006, à « une gestion durable des matières et déchets nucléaires ».

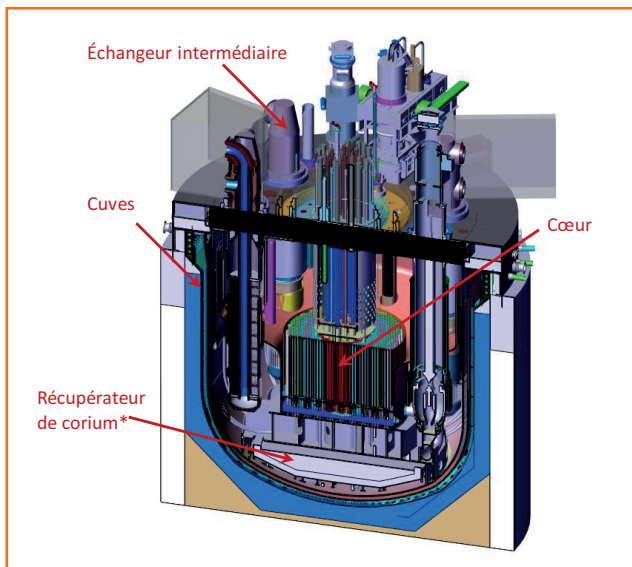


Figure 5 - Le projet ASTRID, démonstrateur de réacteur de 4<sup>e</sup> génération. Calendrier de principe : 2012-2019 : études conceptuelles et d’avant-projet ; 2019 : décision de construire ; 2025 : mise en service. \* en cas d’accident conduisant à la fusion du cœur.

### Pour en savoir plus

- *Chimie et enjeux énergétiques*, M.-T. Dinh-Audouin, P. Rigny, D. Olivier (coord.), EDP sciences, 2013.

Cette fiche a été réalisée par **Bernard Boullis**, directeur du programme des technologies du cycle du combustible et de gestion des déchets au CEA (CEA Saclay, Direction de l’Énergie Nucléaire, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, bernard.boullis@cea.fr), professeur à l’Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN).

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre Foulon (contact : bleneau@lactualitechimique.org).