

LA GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES : UNE PROBLÉMATIQUE MONDIALE !

Patrice Bray, Noël Baffier, Jean-Claude Bernier

D'après l'article *La chimie pour la séparation et la gestion des déchets nucléaires* de Bernard Bouillis publié dans l'ouvrage « Chimie et enjeux énergétiques » EDP Sciences, 2013, ISBN : 978-2-7598-0973-8

INTRODUCTION

En France, l'énergie électrique est produite à 75 % à partir de l'énergie nucléaire. À ce jour, EDF exploite en France 58 réacteurs nucléaires. Les centrales nucléaires ont l'avantage de produire pas ou peu de gaz à effets de serre et donc de ne pas contribuer au réchauffement climatique. Elles produisent en revanche des déchets radioactifs dangereux qui posent d'autres difficultés.

QU'EST-CE QUE LA FISSION NUCLÉAIRE ?

Le diamètre du noyau d'un atome est de l'ordre du femtomètre (10^{-15} m). La contiguïté des protons chargés positivement ne devrait pas permettre au noyau d'exister si on ne considère que la répulsion entre les charges positives liée aux interactions électrostatiques, bien que la présence de neutrons tende à diminuer ces interactions. Il y a donc d'autres interactions qui permettent de maintenir le noyau

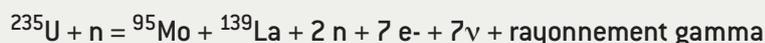
dans cette configuration. Ces autres interactions peuvent être plus ou moins fortes, elles compensent les interactions électrostatiques.

Une réorganisation des nucléons peut conduire à des édifices atomiques plus stables. Deux petits noyaux peuvent éventuellement en former un plus gros qui soit plus stable : c'est la fusion nucléaire, qui se produit notamment au sein des étoiles. Au contraire, un gros noyau peut en donner deux plus petits : il s'agit alors de fission nucléaire. Le noyau d'uranium 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) est composé de 92 protons et 143 neutrons. Le grand nombre de protons entraîne un équilibre précaire entre les interactions électrostatiques et les interactions fortes et faibles. Une perturbation va pouvoir induire une cassure du noyau d'uranium 235 pour former des noyaux plus petits et plus stables. Ce processus libère de l'énergie qui peut être exploitée (voir [Encart](#)).

Deux exemples de réactions de fission nucléaire

La fission nucléaire consiste en l'éclatement d'un noyau d'atome lourd fissile (U, Pu) sous l'impact d'un neutron en deux noyaux plus légers (produits de fission) et quelques particules élémentaires. Ce phénomène libère une énergie nucléaire considérable (200 MeV par noyau) essentiellement sous forme d'énergie cinétique des fragments de fission qui se transforme ensuite en énergie thermique par collision et interaction avec la matière traversée.

Deux exemples de réaction de fission :



Avec ν = neutrino, n = neutron, e^- = électron.

LES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES

Les 58 centrales françaises utilisent comme combustible soit du dioxyde d'uranium UO_2 enrichi en ^{235}U fissile (au maximum à 5 %), dit combustible UOX, soit du combustible MOX, mélange de dioxyde d'uranium appauvri et de dioxyde de plutonium PuO_2 . Dans les deux combustibles, c'est la fission de ^{235}U et de ^{239}Pu qui libère l'énergie nucléaire. L'uranium naturel extrait des minerais est essentiellement composé de ^{238}U non fissile (0,7 % de ^{235}U). On doit donc l'enrichir en ^{235}U fissile avant d'en faire du combustible UOX (1).

Dans le combustible nucléaire, il se forme, par fission et par d'autres réactions nucléaires, de nombreux isotopes stables ou radioactifs. Pour des raisons de sûreté, le combustible utilisé est déchargé périodiquement des réacteurs. Le combustible UOX « utilisé » contient encore ^{235}U et des isotopes de Pu que l'on peut récupérer et valoriser. Dans ce cas, les produits de fission sont les déchets à traiter.

LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

Le cycle de ce combustible comprend essentiellement deux étapes.

L'amont du cycle

C'est tout ce qui se passe depuis l'extraction de l'uranium naturel jusqu'au réacteur : obtention de l'oxyde d'uranium UO_2 purifié et enrichi en ^{235}U . Pour alimenter le parc actuel de centrales nucléaires d'une puissance de 63 GWe, il faut environ 1 100 tonnes d'uranium enrichi/an pour fabriquer le combustible UOX et 11 tonnes de Pu/an pour fabriquer 130 tonnes de combustible MOX. 8 500 tonnes de U naturel sont nécessaires pour obtenir l'uranium enrichi. On met environ 7 000 tonnes d'uranium appauvri en réserve et 120 tonnes servent à préparer le combustible MOX (avec les 11 tonnes de Pu) (2).

L'aval du cycle

C'est-à-dire la gestion des combustibles utilisés. On décharge 1 100 tonnes de combustible utilisé par an qui sont retraitées. Cela donne 11 tonnes de Pu qui servent à fabriquer le combustible MOX et environ 1 050 tonnes d'uranium de retraitement que l'on met en réserve (ou que l'on réutilise en partie). Le combustible MOX utilisé est lui aussi mis en réserve.

Le combustible UOX utilisé contient les produits de fission, soit environ 700 isotopes radioactifs dont la radioactivité et les durées de vie sont variables, allant d'une forte radioactivité mais à demi-vie courte (< 30 ans) à des radioactivités plus faibles mais sur

des temps très longs (milliers à centaine de milliers d'années). Après quelques mois, tous les produits de fission à vie courte ont disparu et il reste une centaine de radionucléides. Certains sont valorisables (comme ^{235}U fissile), d'autres ne le sont pas et sont potentiellement dangereux parmi lesquels on trouve les isotopes 238 à 242 de Pu, plus ou moins fissiles, des isotopes des éléments Np, Am, Cm dits « actinides mineurs ». Au bout de 4 ans, il reste 95 % d'uranium, 4 % de produits de fission, 1 % de transuraniens (éléments dont le numéro atomique est supérieur à celui de l'uranium) dont essentiellement le plutonium Pu. On retraite le combustible utilisé 5 à 10 ans après son déchargement des réacteurs.

TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS

Les différentes options

Il existe trois principales options de traitement (Figure 1).

La première est celle de l'entreposage, où l'on conditionne le combustible utilisé en vue de le reprendre ultérieurement. Il ne s'agit que d'une solution d'attente, qui laisse ouvert le choix du mode de gestion ultérieur. L'entreposage concerne l'immense majorité (plus de 80 %) des combustibles déchargés dans le monde à ce jour. Il s'agit d'à peu près 300 000 tonnes de combustibles utilisés.

Deux options contrastées peuvent ensuite être mises en œuvre : on peut renoncer au potentiel énergétique résiduel des combustibles utilisés et le juger économiquement inintéressant. On le considère alors comme un déchet. La solution de référence dans ce cas est le stockage direct du combustible en formation géologique. Aujourd'hui, il n'y a dans le monde aucun site de stockage de combustible utilisé opérationnel, mais certains pays y travaillent. La Finlande et la Suède devraient mettre un site de stockage en service au cours de la décennie 2020-30.

D'autres pays, comme la France, se sont engagés dans une troisième option qui est de valoriser le contenu énergétique de ces combustibles utilisés par une politique de recyclage (3).

Lorsque la chimie participe à la valorisation des combustibles utilisés

Sur les 1 000 tonnes de combustibles « utilisés » produits annuellement en France, 95 % correspondent à de l'uranium 238 qui peut compléter l'uranium 238 prélevé dans la nature ; 1 % (soit 10 t) correspondent à Pu utilisable dans les réacteurs nucléaires et 4 % (soit environ 40 t) correspondent aux produits de fission qui ne sont pas utilisables.

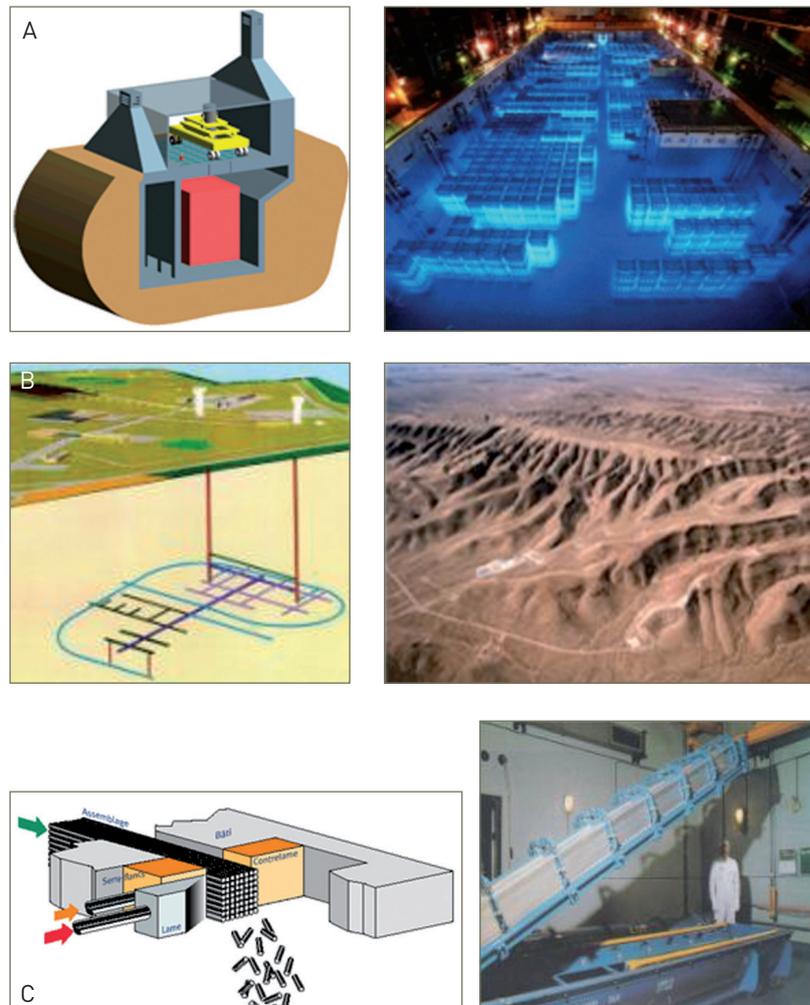


Figure 1 – Trois options pour la gestion des combustibles usés : l'entreposage [A], le stockage direct [B] et le recyclage [C].

La séparation des éléments intéressants du combustible usé utilise un procédé chimique classique, l'extraction liquide-liquide. Par dissolution dans l'acide nitrique très concentré, on met tout le combustible (constitué principalement d'oxyde d'uranium irradié) en solution. Elle contient donc l'uranium, le plutonium, les produits de fission les actinides mineurs. La séparation proprement dite utilise la très grande solubilité de l'uranium U(VI) et du plutonium Pu(IV) dans un solvant organique constitué de 30 % de tributylphosphate (TBP) et d'un alcane. Ce solvant est non miscible à l'acide nitrique. Lorsqu'on le mélange à la solution nitrique contenant tous les produits dissous, l'uranium et le plutonium passent dans le solvant organique et les produits de fission, les autres actinides restent dans l'acide nitrique. Les deux liquides étant non miscibles, ils se séparent lors de la décantation. On récupère le plutonium par retour dans une phase aqueuse réductrice, puis l'uranium dans une autre. Les éléments sont ainsi séparés [2].

Comme indiqué plus haut, ce principe permet de valoriser environ 1 000 tonnes de combustibles

UOX usés obtenus chaque année (Figure 2). Restent alors 40 tonnes de produits de fission et d'autres actinides mineurs qu'il faut isoler à cause de leur dangerosité. Ils sont vitrifiés. Ces colis de verre nucléaire sont des déchets ultimes de l'option stratégique française qui consiste à recycler Pu en une seule fois (monorecyclage) et à mettre en réserve le « MOX usé ». En France, ces contenus de verre très radioactifs sont entreposés en « puits » où leur radioactivité décroît et où ils refroidissent, alors que les combustibles MOX restent entreposés sous eau (en « piscine »), pour l'essentiel sur le site de La Hague.

Les options de gestion ultérieure envisagées sont les suivantes :

1. l'enfouissement des déchets ultimes (colis de verre) à environ 500 m de profondeur dans une strate argileuse quasi imperméable, permettant ainsi d'étaler la décroissance de la radioactivité sur un temps très long [4] ;
2. la mise en réserve de « MOX usé », car il contient encore du plutonium Pu, pour lancer des réacteurs

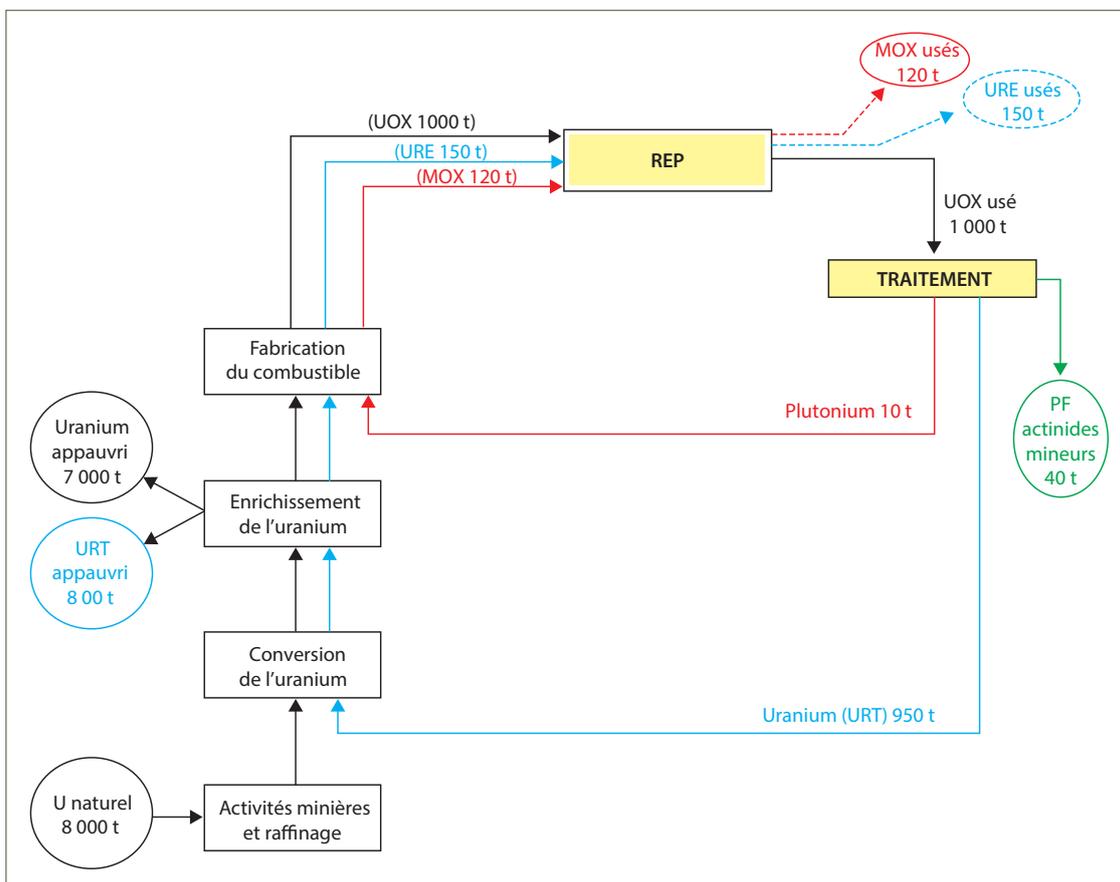


Figure 2 – Le cycle des matières dans le parc français (flux annuels indicatifs pour 400 TWh/an). Les différentes étapes sont : récupération de l'uranium résiduel (en bleu) ; récupération du plutonium (en rouge) ; récupération des produits de fissions (actinides mineurs) (en vert).

« à neutrons rapides » ou « surgénérateurs » dont certains fonctionnent déjà et d'autres sont en préparation. Ces réacteurs « dits de quatrième génération » utilisent 100 fois mieux l'uranium naturel (le plus abondant) et éventuellement le thorium (encore plus abondant) [5]. Les réserves mondiales de combustibles nucléaires sont de plusieurs milliers d'années pour ce type de réacteurs.

CONCLUSION

Le recours au nucléaire permet de ne pas contribuer au réchauffement climatique. Il permet aussi de moins dépendre des autres ressources fossiles. Le nécessaire traitement des déchets ou leur recyclage sont au cœur des enjeux de durabilité. Il en est

de même pour le démantèlement des centrales nucléaires, qui constituera lui aussi un enjeu critique dans les années à venir.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] On va manquer d'uranium
<http://www.mediachimie.org/node/1170>
- [2] Le cycle du combustible nucléaire : de la mine d'uranium jusqu'au recyclage et aux déchets
<http://www.mediachimie.org/node/254>
- [3] Le traitement et le recyclage des combustibles usés
<http://www.mediachimie.org/node/2017>
- [4] Le démantèlement nucléaire
<http://www.mediachimie.org/node/1301>
- [5] ASTRID, démonstrateur technologique du nucléaire de 4^e génération
<http://www.mediachimie.org/node/679>

Noël Baffier, professeur honoraire d'université, ancien directeur des Études de l'École d'Ingénieurs de Chimie Paristech, spécialité de recherches : science des matériaux

Jean-Claude Bernier, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

Patrice Bray, professeur de physique chimie

Grégory Syoën, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie