NON PAS UNE, MAIS PLUSIEURS SOLUTIONS POUR LA MAÎTRISE EN AMONT DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Ce n'est pas une mais bien tout un éventail de formules qui sont à l'étude pour éliminer la part la plus radiotoxique des déchets nucléaires. Au niveau du parc d'installations industrielles, c'est en tenant compte de la totalité du cycle des matières nucléaires et de leur évolution dans le temps que les chercheurs du CEA les comparent entre elles. Un grand nombre de scénarios impliquant différents types d'installations – dont certaines dédiées éventuellement au seul traitement des déchets - ont ainsi été étudiés afin de connaître les avantages et les inconvénients des différentes décisions qui pourraient être prises.

Claude Pauquet/EDF

Le réacteur Phénix, à Marcoule (Gard). Les réacteurs à neutrons rapides permettent d'obtenir les bilans neutroniques les plus favorables à la transmutation.

Pourquoi des études de scénarios ?

Le cycle électronucléaire met en œuvre différentes installations qui permettent d'élaborer, d'utiliser, de traiter le **combustible** afin de recycler les matières nucléaires à fort potentiel énergétique comme le plutonium et l'uranium et de gérer les déchets. L'analyse des performances de la **transmutation** vis-à-vis de la gestion des déchets ne peut se faire qu'avec la vue globale de ce cycle et non pas à la lumière des performances d'un seul de ses maillons. Les options de base présentées dans ce numéro de *Clefs CEA* doivent donc, pour être évaluées, être replacées dans le contexte d'un parc industriel électronucléaire complet (réacteurs et usines du cycle) et en prenant en compte son évolution dans le temps. C'est l'objet des études de scénarios.

Les scénarios sélectionnés

Les scénarios considérés pour la transmutation font intervenir à la fois des réacteurs de technologies actuelles tels que les **réacteurs à eau pressurisée** (**REP**) ou les **réacteurs à neutrons rapides** (**RNR**) refroidis au sodium, et des systèmes innovants tels que les réacteurs à **caloporteur** gaz (**RCG**) ou les systèmes hybrides couplant un réacteur **sous-critique** à une source neutronique externe piloté par un **accélérateur** (voir *Du réacteur critique au système hybride sous-critique : les outils de la transmutation*, l'encadré E, ***Qu'est-ce qu'un système hybride ?*** et l'encadré F, ***REP, RNR et RCG***).

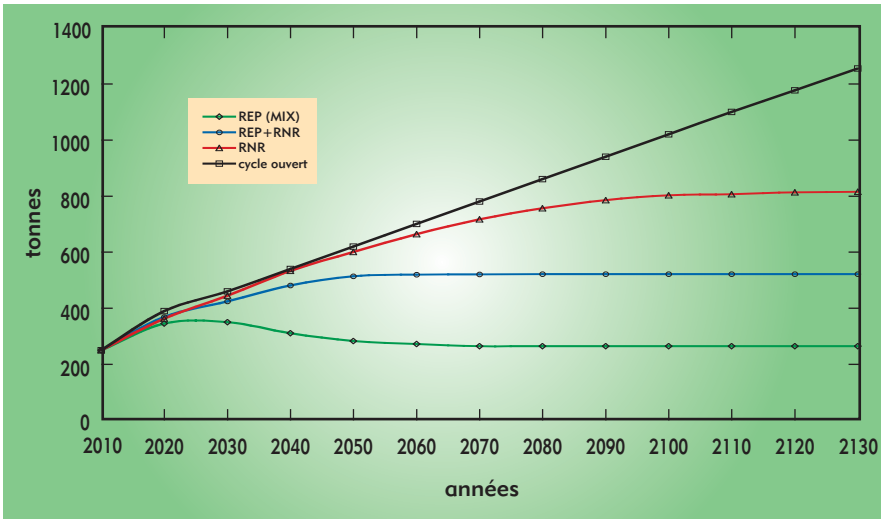
Trois familles de parc avec les technologies actuelles

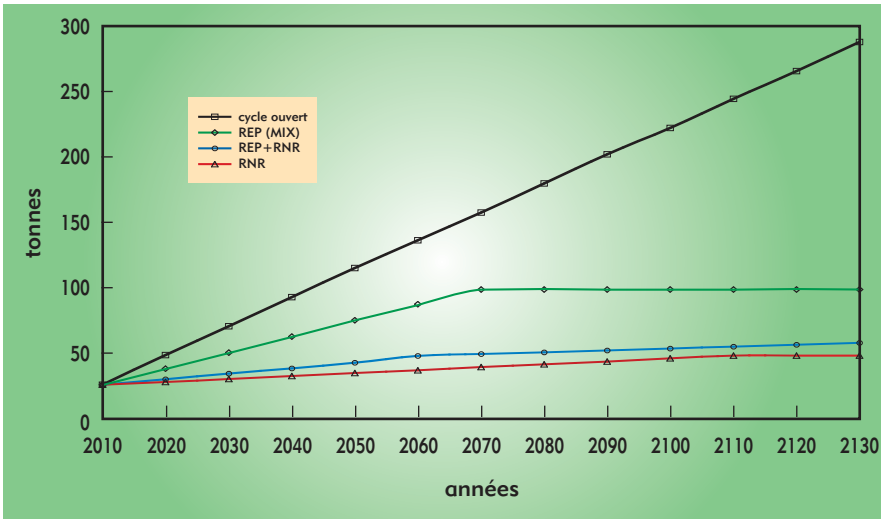
Les résultats de la R&D menée ces dernières années ont mis en évidence des options, scientifiquement faisables, pour **recycler** le plutonium et les **actinides mineurs** (neptunium, américium et curium) dans des parcs faisant appel aux technologies actuelles : combustibles oxydes (oxyde d'uranium **UOX** ou mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium **MOX**), REP et RNR refroidis au sodium. Les scénarios sélectionnés ont une période commune jusqu'en 2010, date à partir de laquelle la transmutation est supposée être mise en œuvre. Pour chaque parc électronucléaire, deux variantes sont étudiées : recyclage du seul plutonium et recyclage du plutonium et des actinides mineurs. Ces variantes correspondent à trois familles de parcs de réacteurs.

Les deux réacteurs à eau sous pression (REP) de la centrale EDF Chooz B. Les réacteurs à neutrons lents comme les REP pourraient participer à la transmutation des actinides mineurs ainsi qu'au recyclage du plutonium.

Marc Morceau/EDF

Figure 1. Évolution de l'inventaire total de plutonium (en haut) et en actinides mineurs (en bas) dans trois configurations de parc et dans l'hypothèse du cycle ouvert.





Une première famille est constituée de REP qui (multi)recyclent plutonium et actinides mineurs mélangés de façon homogène dans un combustible de type MIX, c'est-à-dire du plutonium avec support d'uranium enrichi en uranium 235 (voir *Du réacteur critique au système hybride sous-critique : les outils de la transmutation* et son encadré *La maîtrise de l'inventaire plutonium en REP*).

Une deuxième famille est composée de REP chargés de combustibles standards UOX et de RNR qui recyclent le plutonium et le neptunium sous forme homogène dans du combustible MOX et l'ensemble des deux autres actinides mineurs les plus importants (américium et curium), à 90 %, dans des capsules ("cibles") irradiées en un seul passage en réacteur, à l'issue duquel ces dernières sont considérées comme des déchets.

La troisième famille est celle de RNR qui (multi)recyclent le plutonium et les actinides mineurs sous forme homogène dans du combustible de type MOX.

Les performances d'ensemble sont comparées à celles d'un scénario dit "cycle ouvert" où le combustible UOX issu des REP n'est pas retraité et est envoyé en l'état aux déchets.

Transmuter à partir de 2010 et stabiliser l'inventaire des actinides ?

Pour chaque scénario, le parc (60 gigawatts électriques de puissance installée) est prolongé dans sa structure actuelle jusqu'en 2010. Au delà, la simulation de l'introduction des différents types de réacteurs et des options de

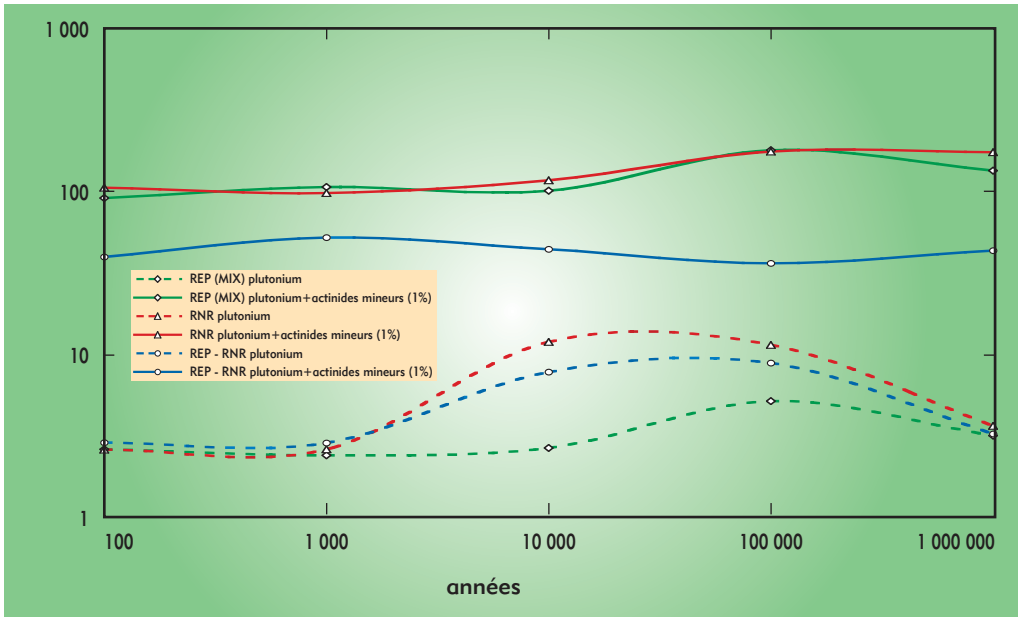


Figure 2. Gain en inventaire radiotoxique (évalué en termes d'ingestion de radionucléides selon la publication CIPR 72) dans six configurations de parc.

recyclage respecte l'objectif d'une production électrique constante (400 térawatts-heures). Le nombre de réacteurs nécessaires à chaque famille pour stabiliser l'inventaire massique des actinides est atteint respectivement au bout de 20, 60 et 100 ans pour les parcs 100 % REP à combustible MIX, mixte (45 % de REP à combustible UOX plus 55 % de RNR à combustible MOX) et 100 % de RNR consommant du MOX.

Les scénarios sélectionnés permettent cette stabilisation dans les différents parcs entre 250 et 800 tonnes pour le plutonium et entre 50 et 90 tonnes pour les actinides mineurs. Le scénario "cycle ouvert", par définition non "stabilisé", produit annuellement 10 tonnes de plutonium et 1,5 tonne d'actinides mineurs (figure 1). Le parc constitué de REP chargés en MIX permet d'avoir le plus bas inventaire en plutonium au prix de l'inventaire en actinides mineurs le plus élevé (50 % de curium contre 20 % pour les autres scénarios).

À partir des déchets générés chaque année par le parc, le gain sur l'**inventaire radiotoxique** peut être évalué, en fonction du temps de refroidissement (figure 2), à partir du rapport radiotoxicité du scénario "cycle ouvert" sur radiotoxicité du scénario étudié avec une hypothèse de taux de récupération au traitement de 99,9 % pour le plutonium et de 99 % pour les actinides mineurs.

Deux familles de courbes se dégagent. Dans la première, avec le recyclage du seul plutonium, le gain varie entre un facteur 3 et 10 ; le scénario "tout RNR" apparaît le plus efficace. Dans la seconde, avec le recyclage du plutonium et des actinides mineurs, le gain varie en moyenne entre un facteur 130 (parc "tout RNR" et "tout REP") et un facteur 60 pour le scénario "REP + RNR". Ce scénario est rendu moins efficace en termes de radiotoxicité des déchets par les 10 % d'actinides restant dans les "cibles" après un seul passage en réacteur. Il permet en revanche de concentrer l'américium et le curium qui sont les actinides les plus difficiles à manipuler en termes de radioprotection et du point de vue thermique. Ces matières ne représenteraient dans les installations du cycle qu'un flux de 1,6 tonne par an, à comparer aux 850 et 340 tonnes respectivement pour les scénarios REP chargé en MIX et RNR chargé en MOX.

Les possibilités offertes par les technologies innovantes

Les études relatives à des scénarios mettant en œuvre des technologies innovantes donnent actuellement des tendances qui devront être confirmées par les programmes de R&D en cours, tant en matière de combustibles qu'en matière de systèmes.

Des combustibles innovants tels que l'Assemblage plutonium avancé, composé de crayons standard à l'oxyde d'uranium (UO_2) et de crayons d'oxyde de plutonium (PuO_2) sur matrice inerte (APA ou Duplex) permettraient une consommation accrue du plutonium et la transmutation des actinides mineurs dans des REP de technologie actuelle. Les performances de transmutation d'un parc REP mettant en œuvre de tels combustibles dans une proportion de 40 % seraient équivalentes à celles d'un parc REP comportant 100 % de combustible MIX.

Des systèmes innovants (**RCG, systèmes hybrides**) permettent d'envisager la transmutation suivant deux stratégies. Dans la première, équivalente aux scénarios présentés précédemment, le parc serait composé de REP et de RCG dans lesquels seraient recyclés le plutonium et les actinides mineurs. Dans la seconde, le parc serait configuré en deux "strates", la première composée de réacteurs électrogènes (REP + RCG ou RCG seuls) et où le recyclage du plutonium et du neptunium serait réalisé dans les RCG, la deuxième dédiée à la transmutation, dans des systèmes hybrides, des autres actinides mineurs et des produits de fission à vie longue.

Dans les deux cas, le gain sur l'inventaire des déchets sur le plan de la radiotoxicité est sensiblement le même (facteur 300) ; la stratégie "double strate" permettant de limiter la transmutation à 5 % à 10 % du parc en termes de puissance électrique du parc.

La faisabilité industrielle à l'étude

Après s'être assurés que les technologies actuelles en REP ou RNR permettent d'obtenir des parcs électronucléaires conduisant à stabiliser l'inventaire en plutonium et en actinides mineurs avec des gains significatifs sur l'inventaire radiotoxique des déchets générés, les chercheurs ont engagé des études détaillées sur la faisabilité industrielle de chaque installation. Il s'agit d'évaluer l'impact de la transmutation sur l'environnement (rejets radioactifs gazeux et liquides) et sur l'économie du cycle. Le même type d'études sera ensuite lancé sur des scénarios mettant en œuvre des combustibles de type Corail (mélange de crayons standards à l'oxyde d'uranium et MOX) facilitant le recyclage du plutonium avec les technologies actuelles, des combustibles innovants (APA) qui laissent entrevoir des solutions de recyclage efficace en REP, et des systèmes innovants comme les RCG et les hybrides, plus performants en termes de réduction de l'inventaire radiotoxique des déchets.

Jean-Paul Grouiller
Direction de l'énergie nucléaire
CEA/Cadarache