

Contexte

Ce document donne les conclusions des études réalisées pour répondre à la prescription du Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs de l'Article 12 de l'Arrêté du 23 février 2017 :

Art. 12. – EDF remet au ministre chargé de l'énergie avant le 31 décembre 2017 un rapport sur la faisabilité technico-économique d'un traitement à grande échelle des combustibles usés MOx et URE puis d'une valorisation des substances séparées (uranium et plutonium) dans les installations du cycle ainsi que dans les réacteurs à neutrons thermiques. Ce rapport précise, en lien avec le CEA, les quantités de plutonium nécessaires à la mise en place d'un parc de réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération et, le cas échéant, les quantités maximales de combustibles usés URE, MOx et UOx non utilisés dans le parc actuel qui seraient mobilisées à cette fin. L'ASN est saisie pour avis sur ce rapport.

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre EDF, Orano, Framatome et le CEA.

Hypothèses et cadrage

La question d'un possible multi-recyclage des matières dans les réacteurs à neutrons thermiques (Réacteurs à Eau Pressurisés – REP) n'est pas nouvelle et a déjà fait l'objet d'études à partir des années 90. Elle nécessite la mise en œuvre de nouveaux concepts d'assemblage. En effet, à l'issue du mono-recyclage, l'isotopie du plutonium contenu dans les assemblages MOX usés est dégradée (augmentation des isotopes pairs peu fissiles dans les réacteurs à neutrons thermiques). Si l'on voulait recycler une deuxième fois ce plutonium dans un concept identique d'assemblage MOX, il faudrait augmenter sa teneur en plutonium afin de respecter le principe de réactivité identique (appelé encore « équivalence énergétique »). Mais il existe une limite de teneur en plutonium dans l'assemblage au-dessus de laquelle les démonstrations de sûreté se complexifient, notamment en situation de vidange accidentelle de l'eau. La limite en réacteur de cette teneur définie comme le rapport Pu/U+Pu dans l'assemblage est usuellement prise à 12%. Cette limite contraint le système et nécessite de changer de concept d'assemblage pour atteindre des niveaux de performance équivalents à ceux des combustibles UOX actuels.

Deux concepts d'assemblages, considérés comme étant les plus prometteurs, ont été retenus pour les études dans le cadre de l'article 12 du PNGMDR : le concept MIX haute teneur et le concept CORAIL.

- Le concept MIX haute teneur est un concept d'assemblage dans lequel on mélange le plutonium recyclé avec de l'uranium enrichi. Trois valeurs fixes de teneurs plutonium ont été considérées dans l'étude : MIX 8%, 9,54% et 12%. La valeur d'enrichissement en ²³⁵U s'ajuste afin de compenser la dégradation du vecteur isotopique du plutonium. Dans le scénario étudié, l'enrichissement en ²³⁵U augmente au fur et à mesure des recyclages, pour se stabiliser à une valeur comprise entre 3% et 4%.
- L'assemblage CORAIL est un assemblage composé de crayons UOX standards et de crayons MOX standards (plutonium mélangé avec de l'uranium appauvri). Il peut être considéré comme une version hétérogène du concept MIX avec l'avantage d'utiliser les procédés de fabrication actuels. Plusieurs concepts sont possibles en fonction de la disposition des crayons UOX et MOX dans l'assemblage. L'assemblage CORAIL étudié dans le document est le concept directement dérivé de celui développé par le CEA et COGEMA à la fin des années 1990. Il est constitué de 181 crayons UOX enrichis en ²³⁵U à 5% au centre et de 84 crayons MOX placés en périphérie. Dans les études, la teneur en plutonium des MOX est ajustée pour assurer l'équivalence énergétique de l'assemblage. Le concept CORAIL fait actuellement l'objet d'un travail d'optimisation en augmentant le nombre de crayons MOX par assemblage, afin de réduire la part du parc devant fonctionner avec du combustible CORAIL pour pouvoir recycler la totalité des combustibles. Framatome et Orano ont proposé récemment une optimisation complémentaire en plaçant les crayons UOX en périphérie et les crayons MOX au centre. Cette optimisation permet de simplifier les interfaces de cœurs mixtes UOX / CORAIL et d'obtenir une souplesse accrue pour faire coexister au sein d'un même cœur des assemblages CORAIL et UOX, ce qui procure un avantage pour les cœurs de transition et en cas de rupture de la chaîne d'approvisionnement des crayons MOX.

Les études réalisées en réponse à la prescription du PNGMDR sont des études préliminaires de scénarios de déploiement des concepts MIX ou CORAIL sur le parc français. Elles ont été réalisées avec les mêmes hypothèses que les scénarios avec déploiement progressif d'un parc de RNR à des fins de comparaisons (scénarios étudiés par le CEA dans le cadre de l'article 51 du PNGMDR). Dans ces hypothèses, le parc REP actuel est remplacé progressivement par un parc de réacteurs EPR avec une production cible de 420 TWh/an, soit à l'équilibre, 38 EPR fonctionnant avec un taux de charge (Kp) de 83%. Le recyclage de l'URE reprend à partir de 2025 dans six réacteurs du parc. Enfin, l'hypothèse est faite que les concepts MIX et CORAIL peuvent être mis en œuvre industriellement en 2045. Le concept CORAIL pourrait être testé dans les installations actuelles, permettant l'introduction en réacteur d'assemblages précurseurs dans les nouveaux EPR à un horizon 2035.

Pour apporter des éléments de réponses à la demande, les calculs ont été menés avec l'objectif de trouver la composition du parc qui permet de traiter au plus vite le stock de MOX usés à partir de 2045 puis tendre vers un équilibre des flux de plutonium. Les combustibles URE usés sont traités à partir de 2090, comme dans les scénarios avec déploiement des réacteurs rapides étudiés dans le cadre de l'article 51. Enfin, on vérifie s'il est possible de démarrer un parc RNR après la phase de multi-recyclage en REP, au niveau d'inventaire auquel les matières se sont stabilisées.

Ces hypothèses ont été choisies *a priori* et ne garantissent pas une optimisation de l'ensemble des paramètres ; cette optimisation pourra être approchée de manière itérative en faisant évoluer les hypothèses en fonction des premiers résultats. Les calculs de scénario ont été réalisés par le CEA.

Conclusions

Les résultats de ces études préliminaires montrent que la mise en œuvre des concepts MIX ou CORAIL permet de stabiliser les inventaires de combustibles usés (y compris les combustibles MOX et URE) et de plutonium. Comparé au mono-recyclage de l'uranium et du plutonium, ces options réduisent jusqu'à environ 10% supplémentaire le besoin de ressources en uranium naturel lorsque le recyclage de l'uranium de traitement est mis en œuvre (soit plus de 25 % d'économie de ressources comparé à une situation sans aucun recyclage). Les études ne montrent pas à ce stade d'aspects rédhibitoires sur le fonctionnement des réacteurs mais ces résultats doivent être encore consolidés par des études d'ingénierie complémentaires. Pour un déploiement à l'échelle du parc et avec les hypothèses retenues dans ces études préliminaires, ces concepts nécessitent de nouvelles infrastructures du cycle (avec notamment des capacités de gestion du plutonium triplées dans les usines du cycle).

La mise en œuvre des concepts MIX ou CORAIL entraîne une augmentation de la production d'actinides mineurs, de l'ordre de 30% dans les scénarios étudiés, par rapport au mono-recyclage et par voie de conséquence du nombre de colis de verre produits annuellement. En revanche, tous les combustibles usés sont valorisés et les déchets conditionnés, diminuant d'autant le volume des déchets ultimes à stocker. Des optimisations supplémentaires, notamment au niveau des temps de refroidissement avant traitement sont à investiguer, pour diminuer encore l'emprise au stockage.

Dans le cas d'une mise en œuvre de façon transitoire entre le mono-recyclage actuel et le déploiement des RNR, les options de multi-recyclage en REP permettent de faire progresser les procédés et la maturité industrielle des usines du cycle nécessaires au développement des RNR, les flux de plutonium et de combustible MOX à l'équilibre se situant à un niveau intermédiaire entre ceux nécessaires au mono-recyclage et ceux qui seraient nécessaires pour une flotte de RNR. Des étapes de ces procédés industriels sont toutefois de TRL bas et requièrent des travaux de recherche significatifs.

Le multi-recyclage en REP dégrade la qualité du plutonium actuellement gardé en ressource pour le démarrage de la filière RNR. Il a la capacité de stabiliser voire réduire l'inventaire plutonium. Un déploiement rapide de ces concepts pourrait conduire à un inventaire de plutonium inférieur à celui nécessaire à un déploiement accéléré des RNR à puissance installée constante. Ce déploiement pourrait donc être rendu délicat voire impossible selon les hypothèses de scénarios, par manque de ressource plutonium.

Il est à noter que les performances techniques du multi-recyclage en REP en termes d'utilisation de la ressource en uranium naturel ou de production des déchets restent très en retrait des performances atteintes par des réacteurs à neutrons rapides qui demeurent l'option la plus pertinente aujourd'hui dans un objectif de fermeture du cycle. En revanche, le saut technologique pour la mise en œuvre du multi-recyclage en REP est moindre que pour le multi-recyclage en RNR car il n'est pas nécessaire de mettre en service la nouvelle filière de réacteurs rapides, et les flux de plutonium nécessaires pour arriver à stabiliser les inventaires sont moindres. D'autre part, les concepts de multi-recyclage en REP sont optimisés afin de ne pas nécessiter d'investissements significatifs côté réacteur. La complexification du cycle en multi-recyclage REP par rapport au mono-recyclage devra être évaluée au regard d'hypothèses de flux affinées sur les matières recyclées, de l'analyse approfondie de faisabilité industrielle et des progrès technologiques à mettre en œuvre pour les réacteurs et les usines du cycle.

Perspectives

Compte-tenu de ces résultats préliminaires et des optimisations envisagées, les partenaires ont jugé que les concepts d'assemblages MIX ou CORAIL présentent un réel intérêt pour stabiliser les quantités de combustibles usés et les quantités de plutonium dans le cycle.

Pour autant, l'emploi de ce type de combustible nécessite un programme approfondi de R&D et d'études d'ingénierie sur la sûreté en réacteur, l'évolution éventuelle des conditions d'exploitation, et la fabrication en usine, la logistique des transports...

Afin que les solutions étudiées permettent de limiter la production de déchets, d'économiser des ressources primaires, mais aussi de produire un kWh nucléaire compétitif, les préoccupations économiques et de faisabilité technique doivent être complètement prises en compte. Leur impact sur les capacités d'entreposage en cycle et le stockage en couches géologiques profondes doit être aussi approfondi.

Un plan d'action sera mis en œuvre avec pour objectif l'introduction d'un assemblage test en réacteur à l'horizon 2025. En fonction des résultats obtenus ce programme pourra être renforcé progressivement, notamment en définissant les principales orientations génériques pour les aspects liés au cycle.