

Nuclear Development

**Accelerator-driven Systems (ADS)
and Fast Reactors (FR) in
Advanced Nuclear Fuel Cycles**

A Comparative Study

NUCLEAR ENERGY AGENCY
ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT

NOTE DE SYNTHÈSE

Champ de l'étude et principaux messages

Les risques à long terme que présentent les déchets radioactifs résultant de la production d'énergie nucléaire sont au cœur d'un débat de longue date et des préoccupations du public dans de nombreux pays. Par rapport au cycle ouvert, la séparation et la transmutation des actinides et de certains produits de fission à vie longue pourraient atténuer la radiotoxicité des déchets de haute activité, et éventuellement la rigueur des conditions à respecter pour leur stockage dans des dépôts géologiques. Pour que la mise en œuvre de cette technologie complexe en vaille la peine, il est souhaitable que la radiotoxicité des déchets de haute activité soit divisée par cent au moins. Ceci exige la mise en place de stratégies très efficaces de réacteurs et de cycles du combustible comprenant des réacteurs rapides et/ou des systèmes hybrides sous-critiques. Les systèmes hybrides, qui peuvent améliorer la souplesse et la sûreté des systèmes de transmutation, font actuellement l'objet d'une attention accrue.

On trouvera dans cette étude une comparaison entre divers systèmes de transmutation, systèmes hybrides et réacteurs rapides, établie en fonction des propriétés des réacteurs, des spécifications des cycles du combustible, des aspects économiques et des besoins de recherche. L'analyse des principales différences entre les divers systèmes est effectuée pour des cycles du combustible représentatifs. Les stratégies étudiées recouvrent un scénario de transmutation « évolutif » dans lequel le système hybride apporte une souplesse supplémentaire dans la mesure où il permet de consommer le plutonium dans des réacteurs conventionnels et de restreindre les actinides mineurs à une petite partie du cycle du combustible, et deux stratégies novatrices d'incinération des transuraniens consistant à utiliser un réacteur rapide ou un système hybride pour gérer ensemble le plutonium et les actinides mineurs de façon à minimiser le risque de prolifération. L'originalité de cette étude tient à l'homogénéité des analyses qui ont été réalisées avec une série de paramètres définis en commun par les experts internationaux pour les réacteurs et les cycles du combustible.

Les principaux messages émergeant de l'étude, qui pourraient marquer l'évolution des politiques en matière de séparation et de transmutation sont les suivants :

- pour diviser par cent la radiotoxicité des déchets, on a besoin de cycles avec multirecyclage du combustible où les pertes de combustible soient très faibles ;
- toutes les stratégies de transmutation avec multirecyclage du combustible autorisent une réduction du même ordre de la radiotoxicité, mais le choix de la stratégie conditionne fortement les besoins du cycle du combustible ;
- les systèmes hybrides constituent d'excellents incinérateurs d'actinides mineurs « dédiés » en régime permanent et offrent une certaine souplesse dans les scénarios de transition ;
- les approches évolutives fondées sur les systèmes hybrides et les solutions innovantes faisant appel aux réacteurs rapides se révèlent être les stratégies de transmutation les plus intéressantes, techniquement comme économiquement ;

- pour exploiter toutes les potentialités des systèmes de transmutation, il faut les utiliser au moins une centaine d'années ;
- le développement industriel de la transmutation dans des systèmes hybrides passe par des études et recherches considérables sur les réacteurs sous-critiques, les combustibles avancés et les matériaux.

Contexte général

La croissance de la demande d'énergie, et en particulier de la demande d'électricité, exige que l'on reconsidère la place de la fission en tant que source d'énergie pour le long terme. C'est dans ce contexte que l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN/OCDE) a récemment publié une étude de la compatibilité de l'énergie nucléaire avec les objectifs du développement durable et de la meilleure façon de les atteindre¹. Bien que les réacteurs à eau ordinaire actuels (REO) soient capables de répondre à la demande d'énergie nucléaire pendant de nombreuses décennies, on aura besoin à long terme d'intégrer des réacteurs avancés, dont les réacteurs rapides, dans le système énergétique nucléaire. Le développement de ces systèmes avancés devra viser des objectifs essentiels tels que la protection de l'environnement, l'utilisation efficace des ressources et la rentabilité tout en répondant à des préoccupations socio-politiques comme la prolifération.

Aux premiers jours de l'énergie nucléaire, la production d'électricité dans les REO et les réacteurs rapides était jugée concurrentielle par rapport aux autres modes de production électrique. À l'époque, on estimait que le déploiement de l'énergie nucléaire serait limité par les ressources en uranium, et les déchets radioactifs, en quantité limitée, étaient jugés moins préoccupants qu'ils ne le sont aujourd'hui. Cette conception initiale supposait l'introduction rapide de RNR classiques brûlant un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium avec un cycle entièrement fermé dans le cas du plutonium mais non dans celui des actinides mineurs, neptunium, américium et curium, qui sont au moins aussi radiotoxiques que le plutonium. La fermeture totale du cycle du combustible par le recyclage des actinides mineurs était également envisagée à l'époque sans recevoir toutefois beaucoup d'attention parce que la teneur énergétique des actinides mineurs ne présente pas d'intérêt économique.

Aujourd'hui, l'uranium est toujours abondant, mais les déchets radioactifs inquiètent de plus en plus le public. Le moment est donc venu d'essayer d'avancer vers l'objectif ultime, à savoir un cycle totalement fermé reposant sur des RNR, en passant par l'étape intermédiaire d'un système de transmutation. La séparation et la transmutation des actinides et des produits de fission aujourd'hui rejetés avec les déchets amélioreraient la « propreté radiologique » de l'énergie nucléaire et permettraient de satisfaire l'une des conditions majeures pour que le système énergétique nucléaire soit plus respectueux de l'environnement. Il conviendra bien sûr de démontrer non seulement la faisabilité technique d'un tel système mais sa faisabilité économique.

Études antérieures et démarche adoptée

Devant l'intérêt manifesté par les pays Membres et compte tenu des activités déjà entreprises dans ce domaine, en 1989, l'Agence pour l'énergie nucléaire a lancé un programme d'étude à long terme de la séparation et de la transmutation recouvrant un large éventail de problèmes techniques et scientifiques². Pour renforcer la collaboration internationale, un programme d'échange d'informations

-
1. L'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable, OCDE, 2000.
 2. On trouvera à l'annexe C un historique des travaux sur la séparation et la transmutation menés dans les pays Membres de l'Agence pour l'énergie nucléaire et dans les organisations internationales.

a été mis sur pied, et une première étude systémique de la séparation et de la transmutation a été réalisée de 1996 à 1998 [2]. Cette étude consistait pour l'essentiel en une récapitulation des progrès dans ce domaine et des avantages éventuels de la séparation et de la transmutation pour la gestion des déchets. Elle comportait une analyse de certaines stratégies du cycle, dont le recyclage du plutonium et l'incinération complémentaire des actinides mineurs dans des systèmes de réacteurs dédiés. Cependant, elle n'abordait ni les stratégies de transmutation les plus efficaces dans des cycles du combustible entièrement fermés, ni le rôle spécifique des systèmes hybrides dans ces cycles. Cette deuxième étude systémique de la séparation et de la transmutation vise à compléter la première étude. Plus précisément, il s'agit cette fois de clarifier, au travers d'une étude comparative, les rôles et mérites relatifs des réacteurs rapides et des systèmes hybrides à spectres rapides dans des cycles fermés mais aussi d'évaluer l'état d'avancement des systèmes hybrides, l'accent étant mis sur la technologie (réacteur et cycle du combustible), la sûreté, l'économie et la faisabilité générale du réacteur et du cycle du combustible.

Pour quantifier les avantages et inconvénients des différentes stratégies d'incinération du plutonium et des actinides mineurs, sept cycles du combustible ont été choisis et comparés au cycle ouvert actuel (voir figure 1). Il s'agit de « cycles » génériques qui représentent différentes grandes stratégies avec des variantes possibles en fonction des préférences nationales.

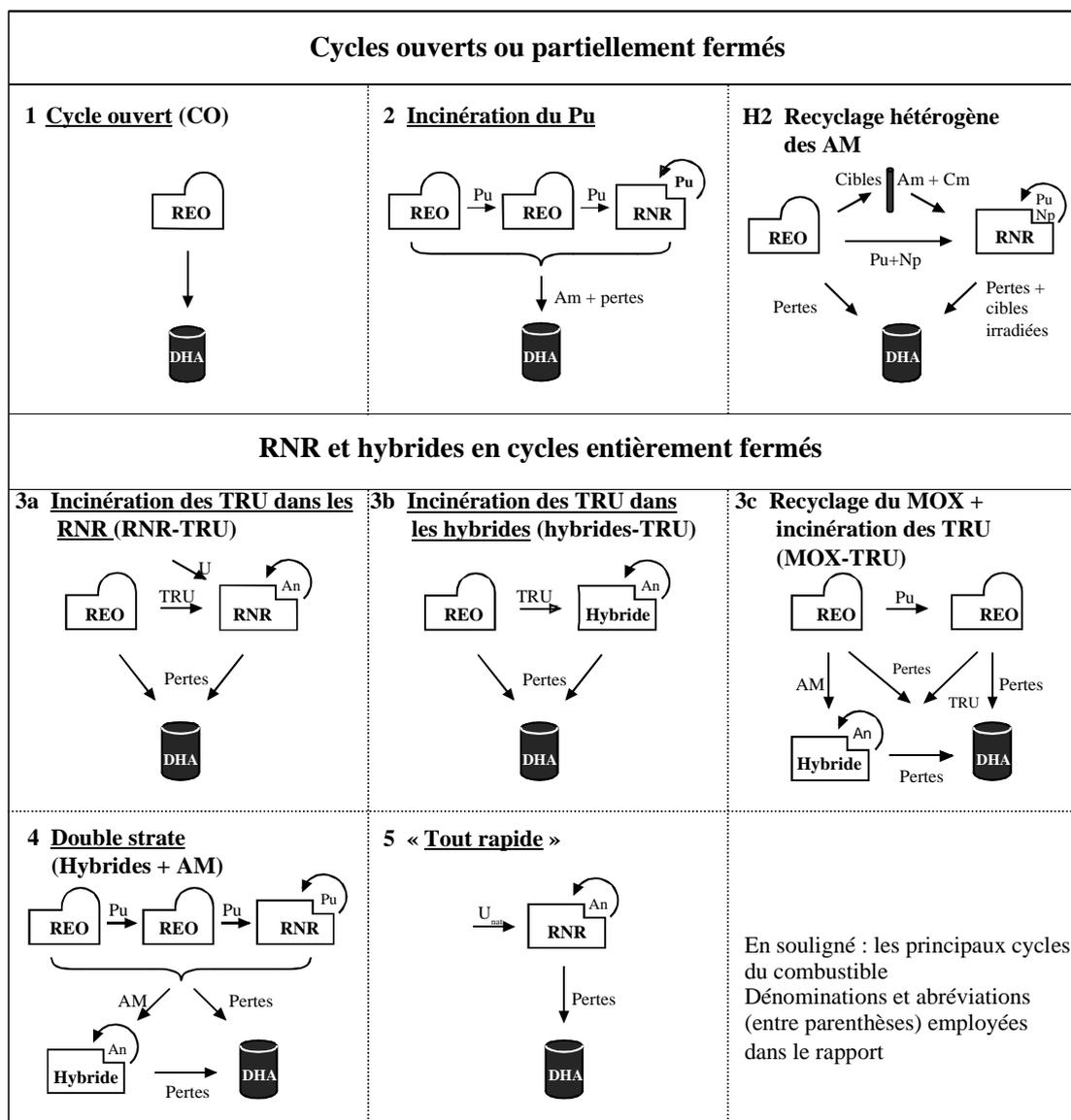
Les cycles 3a, 3b, 3c et 4 permettent de mettre en évidence les principales différences entre les stratégies de fermeture totale du cycle fondées sur les rapides et sur les hybrides. Deux cycles partiellement fermés sont également étudiés : l'intérêt du cycle 2 tient à l'importance de la question de l'incinération du plutonium et au fait que la transmutation est toujours précédée ou accompagnée de l'incinération du plutonium. Le cycle avec recyclage hétérogène H2 constitue une alternative possible au cycle fermé bien qu'offrant de moindres possibilités de transmutation. Enfin, la stratégie « tout rapide » représente l'objectif à long terme du développement de l'énergie nucléaire. Seuls sont étudiés les réacteurs incinérateurs fonctionnant avec des combustibles solides et optimisés pour obtenir un taux d'incinération élevé de façon à pouvoir desservir un parc fortement doté en REO. L'originalité de cette comparaison tient à l'harmonisation des méthodes de calcul et l'utilisation, pour les réacteurs et les cycles, de paramètres évalués spécialement pour cette étude.

Critères de durabilité

La comparaison porte sur trois dimensions de la durabilité, l'efficacité d'utilisation des ressources, la protection de l'environnement et la rentabilité. Les principaux critères portés sur le second axe sont les quantités de métal lourd et de TRU évacués dans le dépôt (pertes) ainsi que leur radiotoxicité. Les principaux résultats que l'on trouvera présentés sur la figure 2 peuvent être résumés comme suit :

- toutes les stratégies de transmutation dans des cycles entièrement fermés permettent, en principe, des réductions identiques de l'inventaire des actinides et de la radiotoxicité à long terme des déchets de haute activité, et en tout cas comparables à celles obtenues avec une stratégie purement RNR. Il n'existe par conséquent pas de différences marquées entre les possibilités offertes par les RNR et par les systèmes hybrides ;

Figure 1. Récapitulatif des cycles du combustible analysé



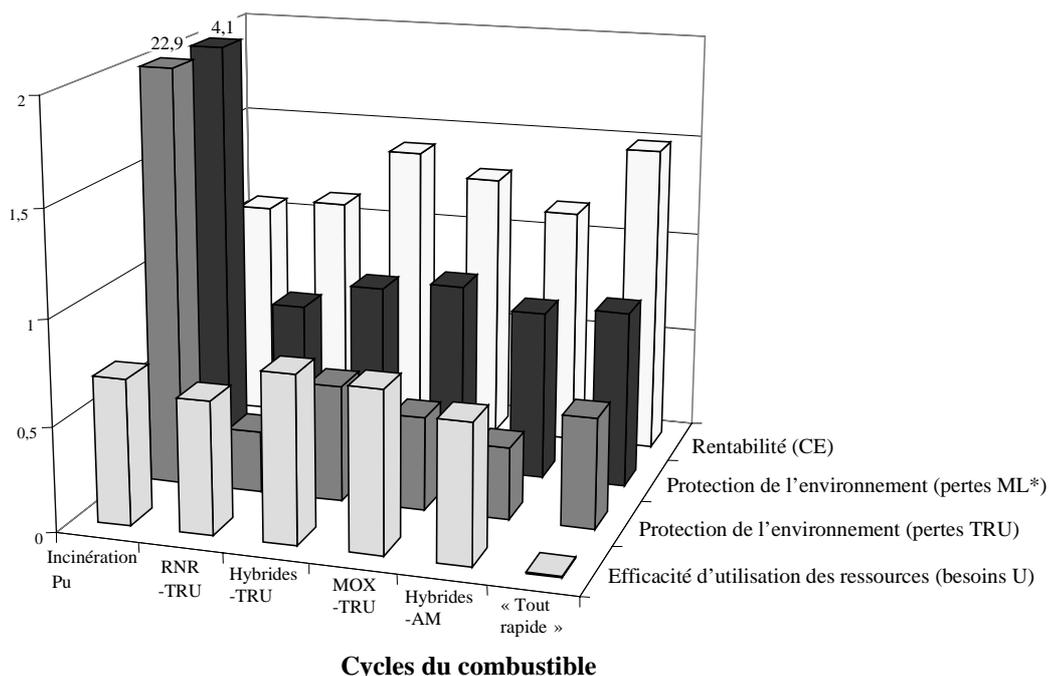
Note :

Les « principaux » cycles du combustible correspondent à des stratégies fondamentales. Il est possible de les combiner. Par exemple, le cycle MOX-TRU associe des éléments du cycle « hybrides-TRU » et des cycles d'incinération du plutonium. L'analyse de ces cycles a été effectuée à l'aide d'une même bibliothèque de données nucléaires et d'un même système de codes de réacteur.

- avec les paramètres adoptés pour les réacteurs et les cycles du combustible, ces stratégies permettent une division par plus de cent de la radiotoxicité des déchets, et une réduction plus forte des quantités de métal lourd et de TRU mises en dépôt (pertes), par rapport au cycle ouvert. Ceci suppose le multirecyclage des combustibles, des taux de combustion élevés et des pertes très limitées lors du retraitement et de la fabrication du combustible. En ce qui concerne ce dernier paramètre, le pourcentage de 0,1 %, valable actuellement pour l'uranium et le plutonium, a été appliqué à l'ensemble des actinides, bien que cela représente un objectif ambitieux ;

- du point de vue de la production de déchets de haute activité et de la technologie, les cycles RNR-TRU et hybrides-AM sont équivalents. Le premier peut évoluer progressivement vers une stratégie tout rapide, mais exige un investissement initial plus lourd dans les technologies des réacteurs rapides et des cycles du combustible avancés. Le second restreint les actinides mineurs à un petit flux secondaire du cycle pour lequel on a néanmoins besoin d'une technologie très innovante. Les systèmes hybrides présentent l'avantage d'incinérer des actinides mineurs purs sans dégrader les paramètres de sûreté du cœur du réacteur ;
- l'analyse économique montre que la compétitivité de la technologie de la transmutation dans des systèmes hybrides peut être accrue si l'on incinère le maximum de plutonium dans des réacteurs classiques, c'est-à-dire des REO alimentés en MOX et des rapides. Cela favorise le cycle hybrides-AM qui, avec le cycle RNR-TRU, présente également les plus faibles coûts de production d'électricité de tous les cycles avec transmutation. Dans ces cas, la hausse du coût de l'électricité de la stratégie de séparation-transmutation par rapport au cycle ouvert est relativement faible, de 10-20 %. Bien qu'inacceptable dans la conjoncture actuelle, une pareille hausse de coût reste limitée et pourrait se révéler abordable si les prix des combustibles fossiles devenaient moins intéressants ou si la société décidait de valoriser davantage la diminution de la radiotoxicité des déchets.

Figure 2. Comparaison en fonction des critères de durabilité



*ML = Métaux lourds.

Besoins U : besoins en uranium naturel par rapport à un cycle ouvert.

Pertes ML : pourcentage de transuraniens mis en dépôt (% du cycle ouvert).

Pertes TRU : pourcentage de métal lourd évacué (% du cycle ouvert).

CE : coût de l'électricité par rapport au cycle ouvert (cas nominal).

Note : dans le cas du cycle d'incinération du Pu, les pertes de TRU et de ML ne sont pas à l'échelle.

Cette étude montre également que, en soi, l'incinération du plutonium est utile dans une optique de gestion du plutonium mais qu'elle ne remplit pas les conditions requises pour les stratégies de transmutation étant donné que la radiotoxicité des déchets de haute activité n'est divisée que par cinq.

Le recyclage hétérogène de l'américium et du curium dans des aiguilles cibles spéciales évacuées après irradiation, représenté par le cycle de recyclage hétérogène des actinides mineurs, est techniquement moins contraignant qu'un cycle du combustible fermé mais aussi deux fois moins efficace pour atténuer la radiotoxicité. Cette solution est étudiée pour la transmutation à court terme sans système hybride.

S'agissant des périodes de transition, l'étude confirme que les contraintes physiques associées à la production et la destruction en pile et hors pile des inventaires de combustible imposent des constantes de temps très longues pour l'introduction et l'abandon définitif de tout système électro-nucléaire avancé quel qu'il soit, et que la technologie de la séparation et de la transmutation ne pourra tenir ses promesses que si elle est introduite avec l'intention de l'exploiter au moins un siècle. En particulier, on ne pourra en tirer tout le bénéfice attendu que si l'inventaire de TRU du système est finalement incinéré et non évacué avec les déchets. À cet égard, il convient de mentionner que la stratégie hybrides-TRU se caractérise par un inventaire en TRU moindre en régime permanent et, dans l'hypothèse d'une sortie du nucléaire, par le fait que cet inventaire pourrait être incinéré plus rapidement qu'avec les autres stratégies.

Enfin, on retiendra que toutes les stratégies de transmutation reposant sur un parc de réacteurs comportant des REO exigent des ressources en uranium équivalentes et produisent des quantités d'uranium résiduel aussi importantes qu'un parc de REO en cycle ouvert. Si l'uranium résiduel n'est pas considéré comme une ressource pour les futurs réacteurs rapides, il faudra aussi évaluer ses répercussions radiologiques à long terme.

Technologie et sûreté des systèmes hybrides

Si les réacteurs rapides et les systèmes hybrides affichent des résultats équivalents pour ce qui est de leur impact sur l'environnement, en revanche leurs caractéristiques technologiques, leur fonctionnement et leurs niveaux de sûreté sont très différents.

Deux avantages des systèmes hybrides nous intéressent tout particulièrement ici :

- le système hybride sous-critique permet de concevoir des cœurs de réacteurs dont les caractéristiques de fonctionnement ne seraient pas satisfaisantes dans d'autres circonstances. En particulier, la possibilité d'exploiter un incinérateur d'actinides sous-critique avec un combustible exempt d'uranium (ou de thorium) permet de maximiser l'efficacité de l'incinérateur et, par conséquent, d'utiliser un minimum d'installations de transmutation spécialisées dans le parc de réacteurs ;
- en outre, ce concept permet d'ajuster, c'est-à-dire d'élargir, la marge de réactivité à la criticité prompte, ce qui limite les possibilités d'excursion de puissance du cœur. Cette propriété s'avère particulièrement intéressante dans les incinérateurs d'actinides mineurs où la marge est seulement de moitié de celle d'un réacteur rapide normal si le cœur fonctionne en mode critique. Les cœurs d'incinérateurs de TRU sont donc moins dégradés de ce point de vue.

Il faut toutefois mettre en balance les avantages des systèmes hybrides avec les défis techniques que représente le couplage d'un réacteur et d'un accélérateur et la nécessité de faire face à de nouveaux types de transitoires d'exploitation et d'accidents.

Les premiers appellent une analyse des problèmes suivants :

- bien que la mise au point des accélérateurs ait progressé, puisqu'il paraît désormais possible d'utiliser des faisceaux de 10 MW, dans le cas des cyclotrons, et de 100 MW, dans celui des accélérateurs linéaires, les pertes de faisceau et, plus important, la fréquence des instabilités de faisceau doit être encore réduite si l'on veut remplir les critères d'activation, de fluctuation rapide de la température et de contraintes mécaniques pour les structures sensibles.
- il faut encore approfondir divers problèmes liés au couplage de l'accélérateur au réacteur. En particulier, la cible, et plus précisément la fenêtre, méritent qu'on leur accorde une attention particulière car ce sont des composants soumis à des conditions de contrainte, de corrosion et d'irradiation complexes que l'on ne rencontre pas dans des réacteurs normaux.

S'agissant du pilotage et du comportement dynamique de ces systèmes, les questions suivantes doivent être étudiées :

- le pilotage d'un système hybride par un faisceau plutôt que par un système de compensation de la réactivité utilisant un absorbeur limite les possibilités de transitoires de réactivité. Dans un incinérateur de transuraniens sous-critique, cependant, cet avantage est compensé par la pénalité économique que constitue la perte de réactivité aux taux de combustion élevés, ce qui exige d'augmenter l'intensité du faisceau pour maintenir la puissance à la fin du cycle en réacteur. La comparaison est compliquée car elle suppose aussi que l'on puisse comparer les exigences de sûreté des deux systèmes de pilotage ;
- contrairement à leur comportement statique, on connaît mal le comportement des cœurs sous-critiques lors de transitoires de réactivité ou de transitoires touchant les sources. L'utilisation d'une source externe de neutrons qui peut varier très rapidement, associée au fait que la contre-réaction de la réactivité soit très faible, impliquent des réactions très brusques et violentes (suivant le niveau de sous-criticité) à des instabilités de l'accélérateur et à des contrôles-commandes d'où des contraintes supplémentaires pour les mécanismes de commande, le combustible et les procédés d'évacuation de la chaleur. Le combustible en particulier doit être capable d'amortir les différentes perturbations de l'équilibre thermique.
- si la possibilité d'un accident provoquant la dislocation du cœur ne peut pas être exclue de manière déterministe, il faudra mettre au point un mécanisme de contre-réaction de réactivité prompte.

Spécifications du cycle du combustible

Le cycle du combustible d'un système de transmutation pose aussi d'importants problèmes technologiques qui découlent directement de l'objectif même de la transmutation qui suppose la contamination du cycle du combustible par de fortes concentrations d'actinides mineurs. L'un des principaux est le retraitement du combustible, mais la fabrication, la manutention et le transport soulèvent également de nouvelles difficultés. Les conclusions concernant ces différents aspects peuvent être résumées comme suit :

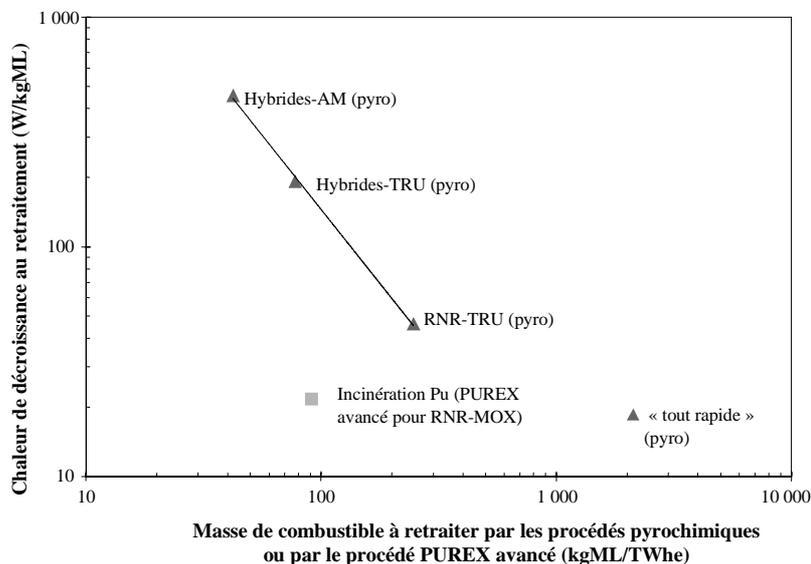
- les systèmes de transmutation font en général appel à des combustibles inhabituels caractérisés par de fortes chaleurs de décroissance et émission de neutrons. La démonstration de la capacité de fabriquer et de retraiter ces combustibles et de leur comportement à des taux de combustion élevés nécessitera d'importants travaux. Les combustibles utilisés dans les

systemes hybrides sont particulierement enrichis en actinides mineurs et ne pourront probablement etre retraites que par les methodes pyrochimiques. Or ces methodes doivent encore etre perfectionnees pour pouvoir supporter des chaleurs de decroissance dix a plus de vingt fois superieures aux niveaux rencontres lors du retraitement pyrochimique des combustibles de reacteurs rapides.

- l'introduction a echelle industrielle des technologies de retraitement pyrochimiques passe par la mise au point de nouveaux schemas de procede et le recours a des reactifs eventuellement tres corrosifs dans des environnements hostiles. D'où de nouveaux dangers chimiques et radiologiques contre lesquels il faudra prendre des mesures ;
- le procede aqueux de retraitement PUREX peut etre considere comme valable pour le combustible RNR-MOX dans les cycles d'incineration du plutonium et le cycle a double strate. Le retraitement de ce combustible apres un court temps de refroidissement avec le rendement de separation exige necessite cependant une amelioration du rendement de dissolution du plutonium et une modification du procede PUREX ;
- en raison de la forte radioactivite du RNR-MOX, des mesures s'imposent pour limiter les doses de rayonnement dans l'usine de fabrication et durant le transport des assemblages combustibles. Les contraintes de blindage et la necessite d'ecourter les transports de combustibles multirecyclés plaident en faveur du retraitement pyrochimique sur le site meme du reacteur.

Ces dernieres annees, une bonne partie de ces problemes, notamment ceux poses par la separation, ont ete resolus a l'echelle du laboratoire. Pourtant, la mise en oeuvre des procedes a l'echelle industrielle exige aujourd'hui encore d'importantes extrapolations.

Figure 3. **Besoins de retraitement avance**



Notes :

1. Le cycle hybrides-AM exige tant un retraitement pyrochimique qu'un procédé PUREX avancé. Pour ce dernier, les besoins sont très proches de ceux d'un cycle d'incineration du Pu.
2. Les chaleurs de décroissance sont à comparer à une valeur « normale » de 6 W/kgML dans le cas du combustible REO-MOX.

La figure 3 récapitule les exigences des différents cycles du combustible en matière de procédé avancé de retraitement aqueux, dans le cas combustible RNR-MOX multirecyclé, et de retraitement pyrochimique. S'agissant du retraitement pyrochimique dans les stratégies de transmutation, la forte chaleur de décroissance est légèrement compensée par les petites quantités produites, si bien que les difficultés de retraitement restent globalement du même ordre que pour les autres solutions (le produit des deux valeurs étant à peu près constant, comme le montre la figure 3).

Fait remarquable, les besoins de traitement pyrochimique du cycle tout rapide sont nettement supérieurs à ceux des cycles de transmutation ce qui s'explique par la nécessité d'installer dans la même aiguille le combustible nourricier et le combustible de couverture et de mélanger les deux composants avant le traitement. Le mélange présente l'avantage d'atténuer la chaleur de décroissance du combustible à retraiter et de renforcer la résistance à la prolifération du système, mais, en revanche, il impose une forte production de combustible avec les conséquences économiques que cela suppose. Cette pénalité économique pourrait être allégée en séparant la couverture du combustible nourricier et en la retraitant par les procédés PUREX ou UREX. Du seul point de vue de la chaleur de décroissance, il serait évidemment préférable d'éviter la stratégie de transmutation et de passer directement à la stratégie des réacteurs rapides.

Transmutation des produits de fission

La transmutation des produits de fission avait été étudiée dans le rapport de synthèse publié en 1999. La présente étude montre que en dehors de son intérêt potentiel, comme puissante source de neutrons, le système hybride n'ouvre pas de perspectives très nouvelles dans ce domaine. On retiendra cependant que :

- l'excès de neutrons produits dans les incinérateurs critiques et sous-critiques peut en principe servir à transmuter les produits de fission. Avec les flux de neutrons qui existent dans ces systèmes, il est théoriquement possible de transmuter les produits de fission à vie longue. La transmutation des produits de fission à vie courte, plus abondants, n'y est cependant pas réalisable, les taux de consommation étant insuffisants. En d'autres termes, la transmutation permet en principe d'atténuer le risque que présentent à long terme les produits de fission évacués dans un dépôt géologique, mais elle n'est pas capable de réduire dans de fortes proportions la production de chaleur ni la masse des produits de fission évacués ;
- maximiser le ratio du nombre de réacteurs classiques au nombre de réacteurs incinérateurs peut se solder par un bilan neutronique insuffisant pour pouvoir transmuter les produits de fission à vie longue de tout un parc nucléaire. Cela vaut en particulier pour les incinérateurs d'actinides mineurs dans le cycle de séparation-transmutation d'une stratégie à double strate. Les stratégies d'incinération des TRU, et plus précisément la stratégie RNR-TRU, présentent de bonnes capacités de transmutation des produits de fission. Si l'on se contente de transmuter l' ^{129}I et le ^{99}Tc , toutes les stratégies d'incinération peuvent en théorie s'acquitter de cette mission ;
- dans la pratique, la nécessité d'une séparation isotopique de même que les difficultés de réalisation des cibles constituent d'importants obstacles à la transmutation des produits de fission si bien que l'on ne compte aujourd'hui qu'un ou deux éléments transmutables (à ce jour, la faisabilité de la transmutation a été démontrée pour le ^{99}Tc seulement). De ce fait, la séparation, suivie de l'immobilisation dans une matrice particulièrement stable, pourrait bien être la seule méthode réaliste pour réduire l'impact radiologique des autres produits de fission à vie longue.

Besoins de R&D

La mise au point de réacteurs et de cycles du combustible avancés jusqu'au stade où leur exploitation peut s'effectuer dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes est une entreprise de longue haleine. L'étude conclut que, pour maintenir ouverte la voie de la séparation et de la transmutation, il faudra poursuivre des études et recherches ciblées sur les réacteurs rapides critiques et sous-critiques, les combustibles avancés et les cibles d'irradiation contenant des éléments transmutables. L'accent devrait être mis par conséquent sur :

- l'expérimentation des combustibles, dans la mesure où il sera impensable d'envisager sérieusement l'un ou l'autre concept tant que les combustibles pertinents n'auront pas été définis et démontrés, c'est-à-dire caractérisés, fabriqués, irradiés et retraités ;
- la disponibilité d'installations d'irradiation à spectres rapides, sachant qu'il n'est pas nécessaire que ces installations soient des systèmes hybrides ;
- la démonstration à une échelle appropriée des performances des procédés pyrochimiques de manière à affiner l'évaluation de la viabilité technico-économique des diverses options du cycle du combustible ;
- la mise en évidence des avantages et inconvénients des différents caloporteurs utilisables dans les systèmes à spectres rapides.
- des outils de modélisation améliorés permettant de simuler le comportement des matériaux dans diverses conditions d'irradiation et, éventuellement, à haute température ;
- des analyses de sûreté des systèmes hybrides afin d'étudier les mécanismes pouvant provoquer la dislocation du cœur, si l'éventualité de tels accidents ne peut être exclue de manière déterministe.

Enfin, il convient de souligner que, indépendamment des travaux de R&D mentionnés ci-dessus, on ne saura si les mérites de la séparation et de la transmutation compensent les investissements technologiques et financiers nécessaires qu'au prix d'un renforcement substantiel des évaluations des performances de dépôts géologiques pour un terme source représentatif de la séparation et la transmutation.