

# Passage des systèmes thermiques aux systèmes à neutrons rapides

par K.A. McCarthy, Y.J. Choi et E. Bertel\*

Les questions relatives au changement climatique mondial et à la sécurité de l'approvisionnement énergétique suscitent un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire. Bien que les ressources en uranium utilisées pour le combustible nucléaire soient suffisamment abondantes pour supporter la croissance importante de la production d'électricité des réacteurs actuels pendant plusieurs décennies (AEN/AIEA, 2010), les procédés nucléaires qui utilisent les matières fissiles avec plus d'efficacité sont considérés comme une option souhaitable dans une perspective de durabilité à long terme.

Aujourd'hui, près de 150 000 tonnes de combustible usé provenant des réacteurs nucléaires à eau légère et d'autres types de réacteurs sont entreposées pour refroidissement avant stockage final ou traitement. Ces combustibles contiennent entre 1 300 et 1 500 tonnes d'éléments transuraniens (TRU), principalement du plutonium, et une petite quantité d'actinides mineurs (AM) comme le neptunium, l'américium et le curium. La poursuite de la production d'électricité nucléaire dans un nombre toujours plus important de pays va inévitablement nécessiter l'augmentation des volumes d'entreposage nécessaires pour ces combustibles usés.

Des cycles de combustible avancés avec systèmes à neutrons rapides critiques ou sous-critiques, comme les réacteurs Génération IV et les systèmes pilotés par accélérateur de particules (*accelerator-driven systems*, ADS), peuvent optimiser l'utilisation des ressources en uranium, réduire au minimum les déchets radioactifs et augmenter la résistance à la prolifération. Ces cycles du combustible comprennent la séparation et la transmutation (P&T) des TRU et/ou des AM, une option qui permet de réduire la radiotoxicité et la charge thermique des déchets radioactifs.

Dans ce cadre, les chercheurs étudient la faisabilité de mise en œuvre de scénarios de transition pour passer du parc actuel de réacteurs à neutrons thermiques qui fonctionnent avec un cycle de combustible ouvert ou partiellement fermé à des systèmes à neutrons rapides avancés capables d'utiliser des matières fissiles recyclées. Simultanément, les analystes qui répondent aux préoccupations des décideurs sur les questions de coût-efficacité, les aspects industriels et les questions internationales, cherchent quels sont les opportunités et les défis associés aux différents scénarios de transition.

Le Comité des sciences nucléaires (CSN) de l'AEN (AEN, 2009a et AEN, 2009b) et le Comité chargé des études techniques et économiques sur le développe-

ment de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) (AEN, 2009c) ont entrepris plusieurs études sur les aspects techniques, stratégiques et politiques des différents scénarios de transition pour le cycle du combustible. Les principaux résultats sont décrits ci-dessous.

## Principaux résultats issus des analyses techniques des scénarios de transition

Sous les auspices du CSN, les questions techniques soulevées par les scénarios de transition, ainsi que le rôle potentiel de la P&T, ont fait l'objet de recherches aux niveaux national et régional européen. Des scénarios à échelle mondiale sont également en cours d'études.

La P&T joue un rôle important dans certains scénarios de transition parce qu'elle est considérée comme un moyen efficace de réduire les contraintes et les exigences de gestion des déchets radioactifs. En effet, la majeure partie de la radiotoxicité et de la chaleur résiduelle à long terme issue des déchets radioactifs est générée par le plutonium et les actinides mineurs, que la P&T peut réduire significativement. L'idée est de séparer ces nucléides du combustible irradié et de les transmuter dans des matériaux à vie courte ou stables. La séparation et la transmutation peuvent être mises en œuvre à l'aide des systèmes à neutrons rapides ou thermiques. En général, l'utilisation des systèmes à neutrons rapides critiques ou sous-critiques présente l'avantage d'avoir un meilleur taux de transmutation des TRU et/ou des AM. Les analyses démontrent que dans les pays sans technologie avancée pour le cycle du combustible, la mise en place du multi-recyclage des TRU dans les réacteurs rapides refroidis au sodium prendrait une vingtaine d'années et celle de systèmes plus avancés, comme le recyclage des TRU dans d'autres types de réacteurs rapides ou ADS, en prendrait une trentaine.

D'un point de vue technique, les principales questions soulevées par les scénarios de transition comprennent la conception et le développement de :

- combustibles pour recyclage dans les réacteurs à eau légère (du recyclage standard du plutonium au recyclage des TRU) ;

\* Mme Kathryn A. McCarty ([kathryn.mccarthy@inl.gov](mailto:kathryn.mccarthy@inl.gov)) est Directrice adjointe associée de Science nucléaire et technologie au Laboratoire national d'Idaho, M. Yong-Joon Choi ([yongjoon.choi@oecd.org](mailto:yongjoon.choi@oecd.org)) est Secrétaire scientifique du Groupe de travail de l'AEN sur les aspects scientifiques du cycle du combustible et Mme Evelyne Bertel est consultante pour l'AEN.

- combustibles pour recyclage dans les réacteurs à haute température (de l'uranium à l'incinération du plutonium) ;
- combustibles pour recyclage dans les systèmes de réacteur rapide-recyclage (combustibles pour recyclage homogène ou cibles pour recyclage hétérogène des TRU, et combustibles dédiés, par exemple pour la consommation des actinides mineurs) ;
- technologies de séparation (processus aqueux ou pyrochimiques) ;
- réacteurs (critiques ou sous-critiques) et des technologies associées (par exemple des technologies et matériaux spécifiques pour le réfrigérant).

En plus des exigences de développement des technologies, il faut prendre en compte les questions relatives à la gestion adéquate et opportune des matières fissiles et à l'utilisation de processus avancés à l'échelle industrielle. La préparation technologique est essentielle pour garantir l'excellence des performances tout au long de la chaîne, depuis le traitement jusqu'à la fabrication des combustibles, lors du passage de l'échelle laboratoire à la production commerciale à l'échelle industrielle.

Les scénarios de neuf pays membres de l'AEN (Allemagne, Belgique, Canada, Corée, Espagne, États-Unis, France, Japon et Royaume-Uni) ont été analysés. Ils couvrent les différents schémas de développement de l'énergie nucléaire. Les analyses montrent que :

- Dans les pays qui ont commencé à utiliser des cycles de combustible fermés tôt et qui ont pour but de continuer à utiliser l'énergie nucléaire, les réserves de TRU et/ou d'AM peuvent être stabilisées avant la fin du siècle.
- Les pays qui veulent réduire leur dépendance à l'énergie nucléaire ne pourront diminuer que partiellement leurs inventaires avant la fin du siècle, sauf s'ils agissent dans un contexte régional.
- Les pays qui vont mettre en place de nouveaux cycles de combustible nucléaire – par exemple des réacteurs rapides pour le recyclage du plutonium et des actinides mineurs, plus tard au cours de ce siècle, par exemple vers 2050 – peuvent quand même stabiliser les inventaires d'actinides mineurs sur l'ensemble du cycle du combustible au cours de ce siècle.

En outre, il faut bien noter que l'inventaire des actinides mineurs est lié au rythme de déploiement des réacteurs rapides et qu'il faudra beaucoup de temps pour remplacer tous les réacteurs à eau légère par des réacteurs rapides car ceux-ci auront besoin du plutonium des réacteurs à eau légère comme combustible de démarrage. Pour éviter que l'inventaire des actinides mineurs ne s'alourdisse, les cycles de combustible doivent être mis en œuvre aussi tôt que possible pour les réacteurs rapides. Ce contexte motive également le développement d'une approche « régionale », pour des raisons liées à l'économie, à la disponibilité des ressources, à la sûreté (recours aux meilleures pratiques et aux technologies internationalement reconnues), à la non prolifération (contrôle international strict des flux de

transport et existence d'un nombre très limité de sites exploités conjointement).

Les scénarios régionaux peuvent en principe fournir un cadre à la mise en œuvre des cycles de combustible nucléaire avancés, car les efforts sont équitablement divisés entre les différents pays et les questions de prolifération et d'optimisation des ressources sont prises en compte. Des scénarios spécifiques ont été étudiés dans le cadre d'un effort plus large entrepris en Europe. Ils ont pour objectif de préparer une feuille de route pour l'éventuelle mise en place des technologies de P&T. Quatre groupes potentiels de pays, avec des scénarios différents, sont proposés dans l'étude de l'AEN :

- groupe A : l'énergie nucléaire n'évolue pas ou est en cours de suppression, y compris la gestion du combustible utilisé ;
- groupe B : maintien de l'utilisation de l'énergie nucléaire et optimisation des ressources en plutonium pour le déploiement à venir des réacteurs rapides ;
- groupe C : sous-ensemble du groupe A, après un état de stagnation, « renaissance » envisagée de l'énergie nucléaire ;
- groupe D : pays sans énergie nucléaire au départ mais qui décident de l'ajouter à leur mix énergétique.

Quatre scénarios européens différents, utilisant les systèmes à neutrons rapides, les deux types d'ADS (scénarios 1 et 2) ou les réacteurs rapides critiques (scénario 3) ont été étudiés de la manière suivante :

- Les scénarios 1 et 2 ont pour objet le déploiement d'un groupe de systèmes ADS partagé par les groupes A et B. Les systèmes ADS utilisent le plutonium du groupe A et transmutent les actinides mineurs des deux groupes. Le plutonium du groupe B est soit mono-recyclé dans des réacteurs à eau pressurisée (REP) puis entreposé pour servir lors du déploiement futur des réacteurs rapides (scénario 1), ou bien il est recyclé en continu dans les REP (scénario 2).
- Le scénario 3 s'intéresse à la question du déploiement des réacteurs rapides dans le groupe B. Ces réacteurs rapides utilisent le plutonium des groupes A et B et recyclent tous les actinides mineurs.
- Le scénario 4 est celui d'une « renaissance » de l'énergie nucléaire dans les pays sélectionnés. En commençant avec le scénario 3, le groupe B et certains pays du groupe A vont déployer des réacteurs rapides pour gérer leurs propres éléments transuraniens.

Les résultats des études indiquent que la P&T peut être intéressante pour toute une région, bien que les politiques en matière d'énergie nucléaire soient différentes dans chaque pays. Une stratégie régionale peut également favoriser la « renaissance » de l'énergie nucléaire dans certains pays. Si les réacteurs rapides avec recyclage homogène des TRU non séparés sont déployés, leur utilisation et les infrastructures de soutien doivent prendre en considération les caractéristiques du cycle du combustible, telles le taux de conversion et la durée du refroidissement,

Figure 1 : Schéma des scénarios 1 et 2

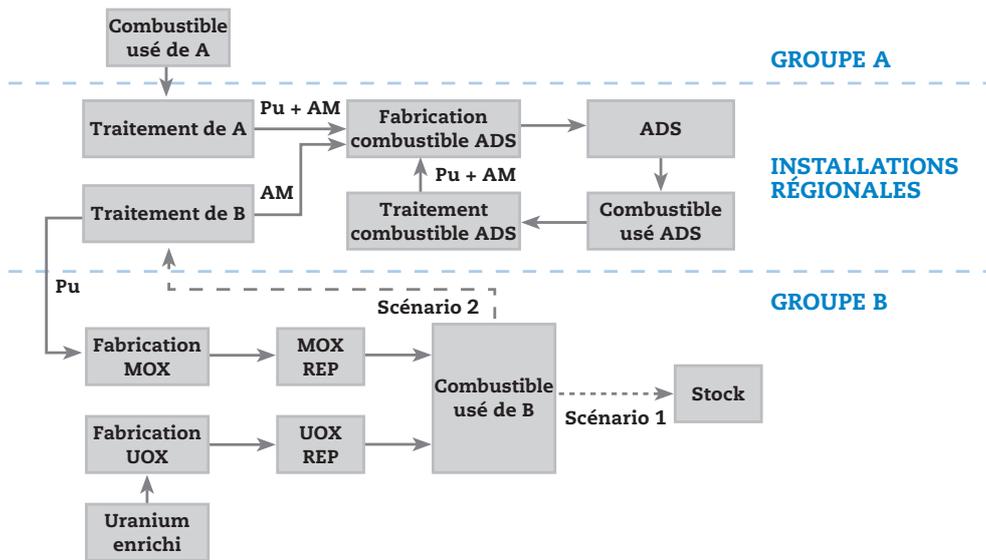


Figure 2 : Schéma du scénario 3

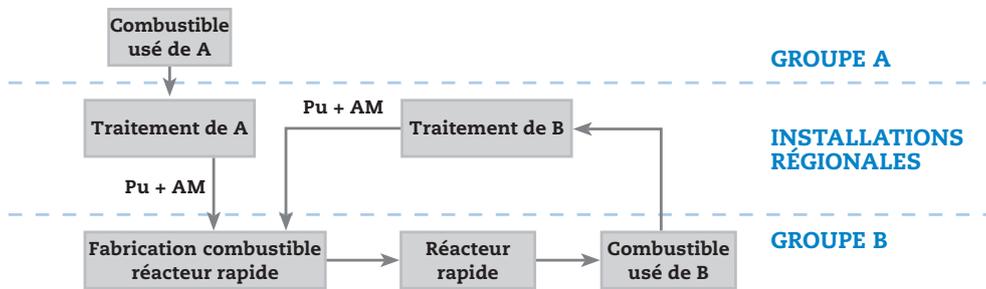
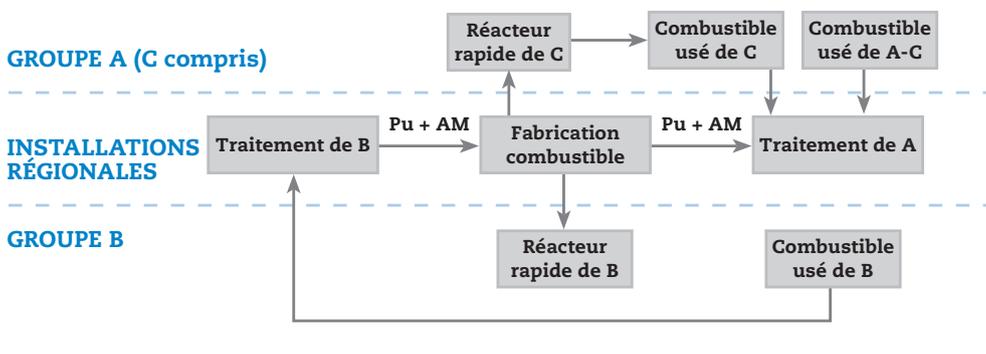


Figure 3 : Schéma du scénario 4



Le but est d'atteindre les objectifs potentiellement différents des divers pays se trouvant dans une région donnée. Si un scénario « double strate » est déployé, avec à la fois les réacteurs rapides et les systèmes ADS, la plupart des systèmes ADS seront utilisés pour la transmutation des actinides mineurs. Pour réduire les déchets, les systèmes ADS conviendront mieux à un scénario régional où les pays ont des objectifs différents mais partagent les mêmes ressources, installations et inventaires de combustible usé. Les systèmes ADS seraient moins adaptés à un pays unique avec une politique énergétique stagnante ou en cours de suppression, qui déploierait la P&T « séparation » pour la gestion des déchets.

Les analyses des scénarios de transition à l'échelle mondiale qui sont en cours de réalisation au sein de l'AEN couvrent le développement des infrastructures nécessaires pour soutenir la croissance mondiale de l'énergie nucléaire ainsi que la manière dont ces infrastructures pourraient être utilisées dans les différentes régions. Les cycles de combustible ouverts, le recyclage limité et le recyclage continu seront les options des prochaines décennies. Le passage du cycle du combustible actuel à un cycle avancé dépendra évidemment de la maturité et de la disponibilité des technologies spécifiques ainsi que de facteurs non techniques tels que l'économie ou les différences de politique nationale.

## Principales conclusions relatives aux questions stratégiques et politiques

Étant donné l'âge et les performances des centrales existantes, il est probable que le rôle de l'énergie nucléaire prenne de l'importance au cours des décennies à venir, puisque la durée de vie des centrales existantes sera prolongée et de nouveaux réacteurs construits, avant que ne soient développés et déployés des systèmes nucléaires avancés, après 2050. La durée de vie des centrales nucléaires en cours d'exploitation ou de construction devra vraisemblablement dépasser 50 ans. Les systèmes à neutrons rapides avancés de quatrième génération, qui sont en cours de développement, ne pourront pas être commercialisés avant une vingtaine d'années au moins. Par conséquent, le passage aux systèmes à neutrons rapides va durer encore longtemps, probablement jusqu'à la fin du siècle.

Les systèmes à neutrons rapides exploités avec des cycles de combustible fermés permettent d'améliorer la sécurité de l'approvisionnement en énergie, en utilisant mieux le contenu énergétique de l'uranium naturel et de faciliter la gestion des déchets, en réduisant les volumes et la radiotoxicité de ceux qui doivent finalement être stockés. Le recyclage de l'uranium, du plutonium et des actinides mineurs dans les réacteurs à neutrons rapides peut multiplier par 50 ou plus l'énergie fournie par chaque unité d'uranium naturel extrait. En outre, il réduit la durée pendant laquelle les déchets les plus radioactifs doivent être gérés.

Cependant, l'intérêt des systèmes à neutrons rapides et la pertinence du passage des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides varient d'un pays à l'autre. Les paramètres principaux influençant les analyses du rapport entre les coûts et les avantages de la transition sont, notamment, la taille et l'âge du parc nucléaire, la confiance future à l'égard de l'énergie nucléaire, l'accès aux ressources d'uranium, les infrastructures nucléaires nationales et le développement des technologies, ainsi que les politiques en œuvre en matière de gestion des déchets radioactifs.

La passage du parc actuel des réacteurs thermiques à des systèmes basés sur les réacteurs à neutrons rapides et les cycles de combustible fermés représente un défi de taille. La gestion des matières fissiles au cours de la période de transition nécessite une planification minutieuse sur le long terme pour évaluer l'évolution dynamique des débits massiques dans les systèmes en cours d'évolution et pour garantir la sécurité continue de l'approvisionnement à toutes les étapes du cycle du combustible. Réaliser des analyses approfondies des exigences concernant les matériaux et services est une condition préalable à la mise en œuvre des scénarios de transition, qui doit se baser sur des données fiables et des modèles solides.

L'adaptation des infrastructures fait partie des principaux défis susceptibles de garantir la réussite du passage des systèmes thermiques aux systèmes

à neutrons rapides. Mais la construction de moyens industriels pour la période de transition peut s'avérer difficile au niveau national. Les installations multinationales peuvent apporter de nouvelles perspectives à l'économie d'échelle et favoriser l'optimisation économique, ce qui serait impossible au niveau national. La coopération internationale peut également aider à garantir la fourniture adéquate des services relatifs au cycle du combustible au niveau global tout en limitant le risque de prolifération.

Le passage des systèmes thermiques aux systèmes à neutrons rapides est un moyen d'atteindre les objectifs nationaux en matière de politique énergétique. Les gouvernements, qui sont responsables de la politique énergétique, peuvent beaucoup faciliter la mise en place des réacteurs à neutrons rapides et des cycles de combustible fermés en les intégrant à leurs choix stratégiques. L'adaptation des cadres juridique et réglementaire, les programmes de R&D, les études et formations, ainsi que la stabilité de la politique énergétique, sont les aspects essentiels de l'implication et des responsabilités des gouvernements.

La renaissance de l'énergie nucléaire attendue au cours des premières décennies du 21<sup>e</sup> siècle est susceptible de renforcer l'attractivité des systèmes à neutrons rapides. Des programmes ambitieux de R&D ont été entrepris dans de nombreux pays et dans le cadre de plusieurs projets internationaux. Ils devraient aboutir à la conception et au développement d'installations avancées pour les réacteurs et les cycles du combustible, en réponse aux objectifs des gouvernements et de la société en matière de développement durable.

La mise en œuvre des systèmes à neutrons rapides nécessitera, cependant, des efforts soutenus et une coopération internationale accrue pour relever les défis posés par la période de transition. Les scientifiques et les analystes peuvent fournir aux décideurs les données et informations qui les aideront à prendre des décisions dans ce domaine. Au final, les décideurs devront prendre les mesures adéquates pour s'assurer que les infrastructures soient adaptées aux exigences des systèmes en évolution et que le contexte général de la politique énergétique nationale soit en accord avec ses objectifs.

### Références

- AEN (2009a), *Nuclear Fuel Cycle Synergies and Regional Scenarios for Europe*, OCDE, Paris.
- AEN (2009b), *Nuclear Fuel Cycle Transition Scenario Studies Status Report*, OCDE, Paris.
- AEN (2009c), *Questions stratégiques et politiques liées à la transition des systèmes nucléaires thermiques aux systèmes rapides*, OCDE, Paris.
- AEN/AIEA (2010), *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*, OCDE, Paris (version française à paraître).