

Cycles du combustible avancés et gestion des déchets radioactifs

E. Bertel *

Une publication récente de l'AEN évalue les effets de divers cycles du combustible avancés sur la gestion des déchets radioactifs par comparaison avec les techniques et les options actuelles, à l'aide d'outils tels que l'analyse des performances du dépôt et les études de coûts. Les résultats de l'étude montrent qu'avec les cycles du combustible avancés il est possible d'effectuer de nouveaux choix stratégiques concernant l'exploitation des ressources en uranium ainsi que l'optimisation des sites et de la capacité des dépôts, sans modifier sensiblement l'impact radiologique des dépôts et les répercussions économiques du cycle complet.

Réduire le volume et la radiotoxicité des déchets radioactifs pour faciliter leur gestion et leur stockage définitif est un objectif de première importance pour les concepteurs de systèmes nucléaires avancés. L'essentiel des efforts porte sur les déchets de haute activité (DHA) contenant des isotopes à vie longue car ils nécessitent une surveillance à long terme pour assurer leur isolation de la biosphère. De nombreux programmes de cycles du combustible nucléaire innovants, à divers stades de développement et d'avancement technologique,

sont envisagés par les chercheurs et les concepteurs pour réduire la quantité de déchets de haute activité générée par unité d'électricité produite. Le retraitement du combustible usé, le recyclage des matières fissiles dans des réacteurs à eau ordinaire ou à neutrons rapides et, le cas échéant, la séparation et la transmutation des actinides mineurs sont autant de solutions susceptibles de contribuer à cet objectif.

Une étude¹ examinant les impacts des cycles du combustible avancés sur les politiques de gestion des déchets radioactifs, réalisée par un groupe d'experts sous les auspices du Comité de l'AEN sur le développement de l'énergie nucléaire (NDC), a été publiée par l'OCDE au milieu de l'année 2006. Les experts ont étudié et analysé divers cycles du combustible (voir tableau 1) pour évaluer leurs effets qualitatifs et quantitatifs sur la performance de différents concepts de dépôts. En outre, l'étude aborde la question des besoins en ressources naturelles et les aspects économiques dans une perspective élargie de développement durable.

Le spectre des cycles du combustible analysés comprend des options qui ont déjà atteint le stade du développement industriel et commercial, ainsi que des variantes très innovantes qui n'ont pas encore été pleinement démontrées. Les cycles du combustible considérés se classent en trois grands groupes : technologies existantes, cycles partiellement fermés et cycles entièrement fermés. Par cycle de référence on entend des réacteurs à eau sous pression exploités avec un cycle du combustible ouvert.

Des experts de 13 pays ont fourni des informations sur les cycles du combustible existants et avancés. Bien que certains des procédés qui seront utilisés dans les cycles les plus innovants n'en soient

* Mme Evelyne Bertel (bertel@nea.fr) travaille dans la Division du développement nucléaire de l'AEN.

qu'au début de la phase de conception, il a été possible de réunir des données raisonnablement fiables sur les flux massiques pour l'éventail complet de tous ces cycles du combustible. Sur la base de ces données, des estimations des flux de déchets pour des systèmes en état d'équilibre ont été calculées au moyen de codes de calcul dont les résultats ont fait l'objet d'un examen par les pairs au sein du groupe d'experts. Compte tenu des incertitudes qui subsistent concernant la performance future des procédés avancés, des fourchettes de valeur ont été envisagées pour de nombreux paramètres et des études de sensibilité ont été réalisées quand il y avait lieu.

Bien que l'accent ait été mis sur les DHA, l'impact des cycles du combustible avancés sur la production, la gestion et le stockage des déchets de faible et moyenne activité est brièvement abordé dans l'étude. Les résultats indiquent qu'il ne faudrait pas négliger les questions soulevées par les déchets

secondaires, en particulier s'agissant des cycles innovants conduisant à la production de nouveaux types de déchets dont les compositions chimiques et isotopiques sont différentes de ceux générés par les cycles du combustible actuels.

Les dépôts de DHA évalués dans l'étude sont situés dans plusieurs formations géologiques profondes jugées appropriées pour isoler pendant une longue période les déchets de la biosphère. L'évaluation a été réalisée pour des dépôts hypothétiques, conceptuels dans des formations granitiques, argileuses, salines et volcaniques comme le tuf. Les paramètres affectant la performance des dépôts analysés dans l'étude sont notamment la composition isotopique des DHA, leur charge thermique et leur volume.

Les indicateurs retenus pour illustrer les principaux résultats des analyses (voir tableau 2) représentent les aspects clés des cycles du point de vue de leur aptitude à répondre aux objectifs de

Tableau 1. **Cycles du combustible analysés**

Cycles fondés sur la technologie industrielle actuelle et ses prolongements possibles	
1a	Cycle ouvert dans des réacteurs à eau pressurisée (REP), référence
1b	Plutonium (Pu) recyclé une fois sous forme de combustible à mélange d'oxydes (MOX)
1c	Identique à 1b, avec recyclage du neptunium en plus du plutonium
1d	Utilisation directe du combustible utilisé des REP dans des réacteurs Candu (DUPIC)
Cycles partiellement fermés	
2a	Incinération du plutonium dans des REP
2b	Incinération du plutonium et de l'américium dans des REP
2c	Recyclage hétérogène de l'américium
2cV	Entreposage et stockage ou recyclage de l'américium et du curium
Cycles entièrement fermés	
3a	Incinération des transuraniens (TRU) dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR)
3b	Incinération du plutonium dans des REP et des RNR ; cycle du combustible à double strate
3bV	Incinération du plutonium dans des REP et des systèmes hybrides
3cV1	Stratégie tout RNR à caloporteur gaz avec combustible carbure
3cV2	Stratégie tout RNR à caloporteur sodium ; pas de recyclage de l'uranium



Rudy de Barse, Electabel S.A.

développement durable. Les mesures utilisées dans l'évaluation sont les rapports entre les valeurs des indicateurs pour un cycle donné et leurs valeurs pour le cycle de référence (REP, cycle ouvert).

Plusieurs autres paramètres sont estimés et comparés dans l'étude pour compléter l'évaluation et donner une vision globale des cycles du combustible analysés. Ces paramètres comprennent les flux de plutonium séparé et les volumes des déchets de faible et moyenne activité à vie courte.

La consommation d'uranium est fonction de la proportion de réacteurs rapides dans le parc nucléaire ; un parc tout RNR à caloporteur gaz permet une réduction potentielle théorique de deux ordres de grandeur par rapport au cycle de référence (REP, cycle ouvert). Les quantités de transuraniens rejetées avec les déchets peuvent être divisées par six avec les cycles partiellement fermés, et cette réduction peut atteindre jusqu'à deux ordres de grandeur avec les cycles entièrement fermés.

L'activité des DHA après 1 000 ans n'est pas sensiblement modifiée par les cycles partiellement fermés, mais les cycles entièrement fermés peuvent la réduire dans une proportion approchant deux

ordres de grandeur. Le volume des DHA est nettement réduit par tous les cycles avec retraitement et recyclage, le facteur de réduction pouvant atteindre 24 pour certains cycles entièrement fermés.

Aucun cycle ne divise par plus de quatre la chaleur de décroissance des DHA après 50 ans par rapport au cycle de référence. Toutefois, la chaleur de décroissance après 200 ans est divisée jusqu'à 30 fois avec les cycles faisant intervenir la séparation et la transmutation des actinides mineurs.

Les évaluations de la performance des dépôts sont fondées sur l'analyse des effets de différentes compositions isotopiques des DHA et de leur charge thermique sur la capacité du dépôt et sur les doses maximales relâchées. Conformément à l'approche adoptée dans les pays de l'OCDE, tous les concepts de dépôt envisagés garantissent que les doses maximales relâchées dans la biosphère à un moment quelconque dans des conditions normales restent nettement en deçà des seuils de radioprotection acceptés et des limites autorisées.

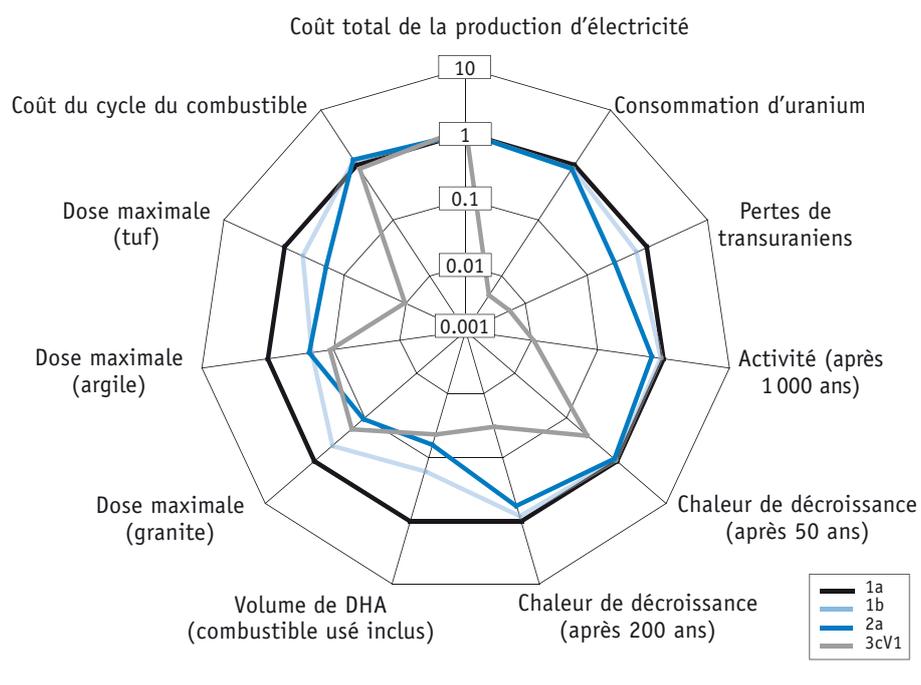
Dans ce contexte, l'avantage comparatif d'un cycle déterminé par rapport au cycle ouvert de référence est la quantité supplémentaire de DHA qui pourrait être stockée dans un dépôt donné tout

Tableau 2. Indicateurs d'évaluation comparatifs

Indicateur	Unité
Consommation d'uranium naturel	kgU/TWh
Volume de DHA conditionnés, y compris le combustible utilisé	kg de métal lourd/TWh
Pertes de transuraniens/transfert aux DHA	kgTRU/TWh
Activité des DHA après 1000 ans	TBq/TWh
Chaleur de décroissance des DHA après 50 ans	W_{th}/TWh
Chaleur de décroissance des DHA après 200 ans	W_{th}/TWh
Dose maximale au contact du dépôt des DHA dans l'argile*	Sv par an/TWh
Dose maximale au contact du dépôt des DHA dans le granite*	Sv par an/TWh
Dose maximale au contact du dépôt des DHA dans du tuf*	Sv par an/TWh
Coût du cycle du combustible	US\$/TWh
Coût total de la production d'électricité	US\$/TWh

* Les doses maximales calculées pour le stockage des DHA dans le sel sont extrêmement faibles et les différences entre les cycles du combustible à cet égard ne sont pas suffisamment significatives pour pouvoir être utilisées comme un indicateur de comparaison.

Figure 1. Comparaison des principaux indicateurs pour les cycles représentatifs



en respectant les limites de doses. La charge thermique et le volume des déchets sont les paramètres les plus affectés. Par exemple, certains cycles du combustible avancés pourraient permettre de stocker dans un dépôt les déchets résultant d'une production d'électricité 5 à 20 fois supérieure à la production atteinte avec le cycle de référence (REP, cycle ouvert).

Les analyses de l'évolution de la radioactivité dans les déchets au fil du temps illustrent les complémentarités et les échelles de temps pertinentes des trois grandes options en matière de gestion des déchets : conditionnement, stockage géologique, et séparation et transmutation. La séparation suivie de la transmutation, le stockage, l'incorporation dans des matrices durables, le conditionnement et le stockage dans des formations géologiques profondes sont des moyens redondants et complémentaires de parvenir à un confinement sûr des déchets.

L'analyse économique réalisée dans l'étude montre que les différences dans le coût total de la production d'électricité entre les différents cycles envisagés ne sont pas significatives car les coûts de la gestion et du stockage des déchets ne représentent qu'une très petite fraction des coûts de production. Toutes les options, y compris les plus avancées, peuvent être mises en œuvre sans compromettre

la compétitivité de l'électricité nucléaire. Les différences entre les coûts du cycle du combustible sont plus évidentes, mais il est clair qu'elles ne constituent pas un facteur décisif pour évaluer et comparer les différentes options.

Les principaux résultats de l'analyse sont récapitulés dans la Figure 1. Le diagramme en toile d'araignée présente les indicateurs sur des échelles logarithmiques. Plus l'indicateur est proche du centre, meilleure est la performance du cycle.

On peut retenir des conclusions de l'étude le message essentiel suivant : quels que soient les cycles du combustible considérés, tous les concepts de dépôt analysés offrent des solutions fiables et sûres pour le stockage des DHA. Compte tenu de la flexibilité des cycles du combustible avancés en cours de développement, il est possible de concevoir des cycles innovants qui utilisent les ressources de façon plus efficace et produisent moins de déchets à des coûts acceptables. ■

Référence

1. AEN (2006), *Cycles du combustible nucléaire avancés et gestion des déchets radioactifs*, OCDE, Paris.