

Rapport de suivi sur les cycles de combustible avancés et les technologies de remplacement pour la gestion des déchets

La Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) a élaboré l'approche de la Gestion adaptative progressive (GAP) en nous appuyant sur une vaste étude et des activités de concertation menées de 2002 à 2005 auprès des Canadiens pour trouver une approche de gestion à long terme pour le combustible nucléaire irradié canadien. En considérant différentes méthodes de gestion à long terme du combustible nucléaire irradié, les Canadiens ont clairement établi leurs valeurs et priorités :



- » La sûreté et la sécurité doivent constituer notre plus haute priorité;
- » La génération actuelle doit assumer la responsabilité des déchets qu'elle a produits;
- » Nous devons nous appuyer sur les meilleures pratiques internationales;
- » Nous devons pouvoir offrir aux générations futures la latitude voulue pour qu'elles puissent prendre leurs propres décisions.

L'approche de la GAP est celle qui correspond le plus à ces valeurs et priorités. Le gouvernement du Canada en a fait le plan canadien en 2007. L'aboutissement technique de la GAP consistera à confiner et isoler de manière sûre le combustible nucléaire irradié au sein d'une formation géologique profonde. Ce concept est conforme aux politiques adoptées par tous les pays dotés de programmes d'énergie nucléaire importants – même ceux qui mettent en oeuvre ou qui préconisent actuellement diverses formes de recyclage prévoient construire des dépôts géologiques en profondeur pour gérer les déchets à vie longue qui en résulteront.

Au cours de l'étude nationale, les Canadiens avaient exprimé l'intérêt d'en savoir plus sur la possibilité de recycler ou de réutiliser le combustible nucléaire irradié et sur les solutions de rechange pour la gestion à long terme du combustible nucléaire irradié. Selon l'analyse réalisée par la SGDN, le retraitement du combustible irradié était très peu probable pour le Canada à l'époque. De plus, aucune méthode technique de remplacement n'avait été jugée préférable. Toutefois, la SGDN avait recommandé de maintenir un dossier de suivi de l'état de la technologie dans le monde et des changements qui pourraient se produire dans le cycle du combustible au Canada.

La SGDN maintient et publie régulièrement ce dossier de suivi depuis 2008. La présente édition de ce rapport de suivi décrit les plus récents travaux de recherche-développement survenus dans le monde relativement aux cycles de combustible avancés, ainsi que les derniers développements qui se sont produits concernant les concepts de stockage en forages profonds. Les principales conclusions sont que :

- » Les nouveaux cycles de combustible continuent de susciter de l'intérêt dans le monde, mais il n'y a eu aucune percée technologique qui modifierait la précédente conclusion concernant l'approche de la GAP et la gestion de l'inventaire actuel de combustible nucléaire irradié canadien.
- » L'exploitation de petits réacteurs modulaires (PRM) au Canada générera, en relativement petites quantités, de nouveaux types de déchets de combustible nucléaire. Les répercussions de ces possibles nouveaux déchets sur le programme de la SGDN sont évaluées dans le cadre de son examen des technologies liées aux PRM.
- » Les cycles de combustible avancés considérés jusqu'à maintenant produiront des déchets de combustible nucléaire à vie longue qui devront être gérés de manière sûre, socialement acceptable, techniquement rigoureuse, responsable sur le plan environnemental et économiquement viable par la SGDN.
- » Les concepts de stockage en forages profonds continuent aussi de susciter de l'intérêt dans le monde. Au Canada, le concept du stockage en dépôt géologique en profondeur et la réglementation associée ont été élaborés au fil de décennies et discutés avec les collectivités hôtes potentielles. En 2024, un site hôte a été sélectionné sur la base du concept du dépôt géologique en profondeur. À ce stade du projet, il ne semble pas qu'il y aurait des avantages majeurs à passer d'un concept de dépôt géologique en profondeur excavé à un concept de forage en profondeur (horizontal ou vertical).
- » La SGDN continuera d'assurer un suivi des développements liés aux cycles de combustible avancés et aux méthodes techniques de remplacement qui pourraient avoir une incidence sur les exigences canadiennes futures en matière de gestion des déchets.

Introduction

La SGDN maintient un dossier de suivi sur les récents développements survenus dans le monde concernant les cycles de combustible avancés, y compris les technologies de retraitement et de recyclage, et sur les méthodes techniques de remplacement pour la gestion à long terme du combustible nucléaire irradié. Les rapports de suivi précédents [p. ex., SGDN, 2024] peuvent être consultés sur le site Web de la SGDN.

En 2024, plusieurs pays et programmes de collaboration internationale ont poursuivi des travaux de recherche-développement pour évaluer la technologie et les conséquences de l'utilisation des cycles de combustible avancés, y compris les cycles fermés basés sur le retraitement, la séparation et la transmutation et les méthodes techniques de remplacement pour la gestion à long terme du combustible nucléaire irradié.

Cycles de combustible actuels

Il existe trois types de cycles du combustible nucléaire :

- » Le cycle « ouvert », ou « à passage unique », où le combustible, qui est irradié dans le réacteur, est considéré comme un déchet au moment de son retrait.
- » Le « recyclage partiel » ou le « cycle à deux passages », où le combustible irradié est réutilisé. Dans une version, le combustible irradié est retraité pour récupérer le plutonium, qui est converti en combustible d'oxyde mixte (Pu-U), ou MOX, et est utilisé une autre fois dans un type existant de réacteur (ce cycle est utilisé dans une certaine mesure en France). Dans une autre version, le combustible irradié d'un réacteur à eau légère (REL) est considéré comme étant converti en combustible pouvant être réutilisé dans un réacteur CANDU (Canada Deuterium Uranium) (la Chine étudie la possibilité d'utiliser ce cycle).
- » Le cycle « fermé », ou « à recyclage complet », où le combustible irradié est retraité pour en récupérer les isotopes fissiles comme le plutonium et d'autres actinides, puis est utilisé dans des réacteurs avancés tels que les réacteurs à neutrons rapides (RNR). Le combustible irradié d'un RNR peut ensuite être retraité et continuellement recyclé dans les RNR pour en extraire l'énergie restante. Selon le réacteur, des quantités supplémentaires d'uranium naturel ou appauvri ou de combustible irradié retraité peuvent être ajoutées pour remplacer le combustible consommé par le RNR.

D'autres variantes peuvent inclure diverses combinaisons de réacteurs thermiques conventionnels, de RNR et/ou de systèmes pilotés par accélérateur (SPA).

Les réacteurs nucléaires commerciaux actuellement exploités dans le monde sont en majorité basés sur les neutrons thermiques (« de faible énergie »). Ces réacteurs utilisent une substance modératrice pour ralentir les neutrons de haute énergie produits par les réactions de fission. Les modérateurs sont habituellement de l'eau normale, ou légère (comme dans la plupart des réacteurs autres que CANDU), de l'eau lourde (les réacteurs CANDU) ou du graphite (les réacteurs refroidis au gaz). Les combustibles utilisés dans ces réacteurs contiennent soit de l'uranium naturel (0,7 pour cent d'U-235 et 99,3 pour cent d'U-238), comme dans les réacteurs CANDU par exemple, ou de l'uranium à plus forte concentration d'U-235 (généralement de 3 à 5 pour cent). Le procédé employé pour obtenir cette concentration plus élevée d'U-235 est appelé « enrichissement ». L'exploitation des types de réacteurs actuels requiert un approvisionnement continu en uranium d'extraction comme source d'U-235. Un sous-produit de ce processus d'enrichissement est l'uranium appauvri, qui contient moins d'U-235, soit approximativement 0,3 pour cent, et est aujourd'hui généralement considéré comme un déchet par les pays qui exploitent des installations d'enrichissement. Toutefois, l'uranium appauvri issu du processus d'enrichissement constitue une source potentielle de combustible pour certains cycles de combustible avancés.

Un cycle de combustible fermé doit comprendre un RNR pour que le combustible récupéré soit utilisé de manière efficace. La technologie des RNR est plus complexe que celle des réacteurs thermiques et, par conséquent, peu de ces installations ont été construites jusqu'à maintenant. Le tableau 1 [AIEA, 2024a] énumère les RNR électrogènes actuellement exploités ou projetés. Ils peuvent extraire de l'énergie de l'U-238 ainsi que d'autres actinides (plutonium, américium, neptunium, etc.). À mesure que l'U-238 est consommé, on peut ajouter de l'uranium ou d'autres actinides issus du retraitement du combustible d'un réacteur thermique, ou de l'uranium appauvri résultant des processus d'enrichissement. L'uranium appauvri est largement disponible, son taux de radioactivité spécifique est faible et il peut être manipulé plus facilement, alors que l'uranium retraité et d'autres actinides tendent à être très radioactifs.

Tableau 1 : Réacteurs à neutrons rapides actuellement en exploitation ou en construction pour la production d'électricité

Pays	Installation	Puissance (MWe)	État
Fédération de Russie	BN-600 BN-800 BREST-OD-300	600 885 320	En exploitation depuis 1980 – type à cuve de sodium En exploitation depuis 2015 – type à cuve de sodium En construction – type à refroidissement au plomb
Inde	Prototype de réacteur surgénérateur (PFBR)	500	En construction – type à cuve de sodium
Chine	CFR-600	2 x 600	En construction – type à cuve de sodium

Le Canada, comme la plupart des pays qui exploitent l'énergie nucléaire, utilise actuellement le cycle de combustible ouvert. Comme le montre le tableau 2, quelques pays, notamment la France, la fédération de Russie et l'Inde, retraitent une partie de leur combustible et utilisent une portion du combustible MOX résiduel dans un cycle de combustible à recyclage partiel ou l'accumulent en vue de le recycler dans d'éventuels réacteurs de types encore indéterminés [AIEA, 2022a]. Récemment, la France a annoncé qu'elle prévoyait d'accroître l'utilisation de combustible MOX et de combustible d'uranium retraité (RepU) dans les réacteurs français en construisant une nouvelle usine de production de combustible MOX et en prolongeant la durée de vie de l'usine de retraitement existante de la Hague [WNN, 2024a, 2024b].

La France, la Fédération de Russie et l'Inde, qui ont mis en oeuvre des cycles de combustible partiellement fermés, prévoient tout de même d'utiliser des dépôts géologiques en profondeur pour stocker les déchets de haute activité contenant des produits de fission séparés résultant du retraitement du combustible.

Certains pays ont retraité une partie de leur combustible dans le passé, mais ne le font plus; leur combustible retraité est traité comme un déchet. Le tableau 3, tiré de la base de données de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) sur les installations liées au cycle du combustible nucléaire [AIEA, 2024b], résume la capacité mondiale de retraitement du combustible commercial, qui ne comprend pas le combustible des installations plus petites et déjà fermées et celui des installations utilisées uniquement à des fins militaires. Il contient également des informations sur les stratégies de gestion du cycle du combustible nucléaire pour les pays utilisant du combustible CANDU.

Tableau 2 : Résumé de la situation actuelle concernant le retraitement pour le cycle du combustible nucléaire

Pays	Installation commerciale de retraitement		Combustible irradié actuellement retraité dans un autre pays	Une certaine quantité de combustible irradié recyclée dans le passé	Prévoit le stockage direct du combustible irradié dans un dépôt
	Existante	Prévue			
Allemagne				✓	✓
Argentine					✓
Belgique				✓	✓
Bulgarie			✓	✓ ⁽⁶⁾	
Canada					✓
Chine ⁽²⁾		✓			✓ ⁽³⁾
Espagne				✓	✓
États-Unis ⁽²⁾				✓	✓
Fédération de Russie ⁽²⁾	✓	✓			
Finlande				✓ ⁽⁶⁾	✓
France ⁽²⁾	✓ ⁽¹⁾				
Hongrie				✓ ⁽⁶⁾	✓
Inde ⁽²⁾	✓	✓			
Italie				✓	
Japon		✓ ⁽⁵⁾	✓		
Lituanie					✓
Mexique					✓
Pakistan ⁽²⁾					
Pays-Bas			✓ ⁽⁴⁾		
Rép. de Corée					✓
République tchèque				✓ ⁽⁶⁾	✓
Roumanie					✓
Royaume-Uni ⁽²⁾				✓	✓
Slovaquie				✓ ⁽⁶⁾	✓
Slovénie					✓
Suède				✓	✓
Suisse				✓	✓
Turquie					✓
Ukraine ⁽⁷⁾				✓ ⁽⁶⁾	✓

(1) La France a fourni des services de retraitement commercial à quelques pays européens et asiatiques.

(2) La Chine, la France, le Royaume-Uni, la fédération de Russie, les États-Unis, le Pakistan et l'Inde pratiquent actuellement ou ont pratiqué dans le passé le retraitement pour des motifs militaires et aux fins des centrales nucléaires.

(3) La politique principale de la Chine est le retraitement au pays. Toutefois, la Chine prévoit de procéder au stockage direct d'une partie de son combustible, principalement celui des réacteurs CANDU.

(4) Combustible irradié envoyé en France pour y être retraité. Le contrat a été prolongé en 2015 pour couvrir la durée de vie des réacteurs actuels.

(5) Installation d'échelle commerciale construite à Rokkasho-mura et en cours d'essai final de mise en service.

(6) Une partie du combustible irradié a été envoyée dans l'ancienne Union soviétique pour y être retraitée. Cette pratique a cessé au début des années 1990.

(7) Une partie du combustible irradié a été envoyée en Fédération de Russie pour y être retraité. Une autre partie est entreposée dans l'attente d'une décision définitive.

Tableau 3 : Résumé de la capacité mondiale actuelle de retraitement des combustibles commerciaux

Pays	Installation	Capacité (tonnes de métaux lourds par année)	État
Chine	Gansu	200	En construction (achèvement prévu vers 2025)
France	UP1, Marcoule UP2-400, La Hague UP2-800, La Hague UP3, La Hague	600 400 1000 1000	Fermée en 1997, déclassement prévu Fermée en 2004, déclassement prévu En exploitation En exploitation
Inde	Tarapur Kalpakkam	100 100	En exploitation et travaux d'expansion de l'usine intégrée de recyclage du combustible nucléaire en cours En exploitation
Japon	Tokai Rokkasho	90 800	Fermée en 2006, déclassement prévu En cours de mise en service (démarrage prévu vers 2026)
Fédération de Russie	RT-1, Mayak MCC-PDC, Zheleznogorsk RT-2, Zheleznogorsk	400 250 800	En exploitation (fermeture prévue vers 2030) En construction En construction (achèvement prévu vers 2035)
Royaume-Uni	MAGNOX, Sellafield THORP, Sellafield	1500 900	Fermée en 2022, déclassement prévu Fermée en 2018, déclassement prévu
États-Unis	West Valley Barnwell GE Morris	300 1500 300	Fermée en 1972, déclassement prévu Fermée en 1983 (jamais exploitée), déclassement prévu Fermée en 1971 (jamais exploitée), déclassement prévu

Cycles de combustible avancés

Un des principaux intérêts que revêtent les combustibles avancés concerne les cycles de combustible fermés. Ces cycles de combustible fermés ont un intérêt parce qu'ils utilisent le combustible d'uranium de manière très efficace. En particulier, certains cycles de combustible fermés sont théoriquement presque auto-soutenables lorsque l'équilibre est atteint.

Réduire le besoin en uranium d'extraction est le principal avantage. Pour le Canada, qui dispose d'importantes ressources d'uranium, cela réduirait l'impact environnemental de l'exploitation minière en utilisant de manière efficace l'uranium d'extraction.

Un second avantage potentiel serait de réduire la « radiotoxicité » des déchets. Cela pourrait être réalisé en retraitant le combustible et en recyclant une partie, voire la plus grande partie des actinides, c.-à-d. l'uranium et les transuraniens, dans un RNR. Les actinides sont généralement à vie longue; les consommer dans un RNR réduit donc la charge radioactive imposée au dépôt qui sera requis pour gérer les déchets à vie longue restantes.

Le troisième avantage est de réduire la taille requise du dépôt, étant donné que le volume de déchets à stocker est plus faible, ou, semblablement, de permettre au dépôt de desservir un plus grand parc de centrales nucléaires. L'uranium constitue la majeure partie du combustible irradié. Le séparer et le réutiliser en diminue donc le volume.

Toutefois, les cycles de combustible fermés posent des problèmes d'ordre scientifique et technique, tels que la mise au point des matériaux spécialisés nécessaires et la mise à échelle des prototypes expérimentaux pour produire des réacteurs pleine grandeur. Des défis économiques et sociopolitiques se posent également, y compris en ce qui a trait aux coûts liés à la construction et à la sélection d'un site pour les installations, ainsi qu'aux mesures qui doivent être prises pour empêcher la prolifération. La réalisation des avantages repose également sur l'hypothèse que l'énergie nucléaire continuera de représenter une bonne solution économique pour le pays en question.

Sur le plan de la taille du dépôt, recycler le combustible irradié dans des RNR peut réduire le volume de déchets de haute activité produits par unité d'énergie générée. Cela peut diminuer la quantité de roche à excaver par unité d'énergie générée pour construire le dépôt, mais ne réduira pas nécessairement de manière substantielle l'empreinte totale du dépôt. La raison en est que l'empreinte est déterminée par la charge thermique totale des déchets et non pas par leur volume total ou leur volume par unité d'énergie générée. La charge thermique des déchets correspond principalement à la quantité d'énergie qui a été produite, quel que soit le cycle de combustible employé. Pour une réduction substantielle de l'empreinte d'un dépôt, il faudrait également entreposer préalablement les déchets en surface pendant une longue période pour laisser suffisamment décroître les radionucléides qui dégagent de la chaleur.

Une étude réalisée en 2021 sur une série de scénarios de cycles de combustible a conclu que l'utilisation de cycles de combustible fermés ne réduirait pas l'impact radiotoxique ou thermique sur les dépôts géologiques en profondeur, à moins que les déchets de combustible de RNR retraités soient entreposés pendant plus de 30 ans. Après 100 ans, le dégagement de chaleur total par unité d'énergie du combustible entreposé provisoirement serait réduit d'environ un tiers par rapport au cycle du combustible à passage unique du même âge et, après 200 ans, serait réduit d'un ordre de grandeur [Dungan et coll., 2021].

De plus, la réduction des actinides ne supprime pas la nécessité d'un stockage à long terme, puisqu'il faut tout de même confiner les actinides résiduels et les produits de fission à vie longue. Bien qu'une diminution des actinides à vie longue diminue la « radiotoxicité » des déchets, ce qui est nettement avantageux, cela n'améliore pas substantiellement la sûreté globale d'un dépôt parce que les éléments actinides ont une très faible mobilité dans l'environnement d'un dépôt. Ce sont les produits de fission à vie longue, comme l'I-129, qui sont les radionucléides qui déterminent généralement la sûreté à long terme d'un dépôt [Andra, 2016; Posiva, 2021; EASAC, 2014; SGDN, 2017, 2018]. Ces produits de fission à vie longue ne sont généralement pas réduits dans les cycles de combustible fermés; la quantité de produits de fission générés correspond approximativement à la quantité totale d'électricité produite, quel que soit le cycle de combustible employé. En outre, la mise en oeuvre d'un cycle de combustible fermé pourrait entraîner le rejet de certains produits de fission mobiles (tels que l'iode 129) dans l'environnement de surface lors des opérations de retraitement [AEN/OCDE, 2022b].

Quoi qu'il en soit, la mise en oeuvre complète d'un cycle de combustible fermé nécessite le déploiement à l'échelle commerciale de réacteurs avancés comme des RNR, ainsi que l'infrastructure associée, par exemple des usines de retraitement et des installations de fabrication du combustible. Bien que les RNR existent depuis les années 50, ils ne sont pas encore largement acceptés et déployés commercialement (voir le tableau 1). Voir par exemple [AIEA, 2012, 2013, 2022d; AEN/OCDE, 2024] pour une description de divers prototypes de RNR et pour un historique de leur exploitation.

Ces facteurs ont été abordés dans divers examens nationaux et internationaux, qui ont continué de confirmer la nécessité d'un dépôt géologique en profondeur pour le stockage du combustible nucléaire irradié ou des déchets de haute activité. En particulier :

- » L'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) a déclaré dans sa note d'orientation sur le stockage des déchets radioactifs publiée en juin 2020 (Policy Brief on the disposal of radioactive waste) et dans son Tableau de bord sur les PRIM qu'« il y a un solide consensus scientifique international voulant que la solution du dépôt géologique en profondeur constitue une approche sûre et efficace pour le stockage permanent des déchets de haute activité et du combustible nucléaire irradié » [AEN/OCDE, 2020a].
- » Une étude menée récemment aux États-Unis par les National Academies of Sciences, Engineering and Medicine sur les avantages et la viabilité de différents cycles de combustible nucléaire à base de réacteurs avancés a conclu ceci : « Chose importante, les réacteurs avancés et les cycles de combustible associés n'élimineraient pas la nécessité de recourir à un dépôt géologique pour certains déchets radioactifs, puisque même les réacteurs avancés nécessiteront le stockage de produits de fission radioactifs » [NASEM, 2023].
- » Dans le cadre d'une récente étude de l'Electric Power Research Institute (EPRI) [EPRI, 2023], l'impact du déploiement d'installations de retraitement et de cycles de combustible avancés sur les programmes nucléaires nationaux a été analysé. Les résultats montrent que pour qu'un cycle de combustible avancé réduise l'inventaire transurain global de 90 pour cent par rapport à un cycle de combustible ouvert, il faudrait plus de 600 ans d'exploitation continue; et pour une réduction de 95 pour cent, il faudrait 1300 ans d'exploitation continue. L'EPRI a déclaré que « les avantages qu'apporterait une transition vers des technologies de combustibles avancés sur le plan de la gestion des déchets seraient secondaires et que les cycles de combustible avancés ne sont pas nécessaires pour assurer un stockage sûr du combustible irradié et des déchets de haute activité. »

Le point sur les technologies liées aux cycles de combustible avancés

Les cycles de combustible avancés continuent de susciter de l'intérêt, et des progrès ont été réalisés à leur égard sur le plan scientifique et technologique. Les constats les plus récents ont été présentés en 2024 lors de diverses conférences internationales et réunions techniques tenues en personne et virtuellement, notamment :

- » La 5^e Conférence internationale sur les réacteurs de génération IV et les petits réacteurs [G4SR-5, 2024] (octobre 2024, Ottawa, Canada);
- » La 31^e Conférence internationale sur le génie nucléaire, ICON31 (août 2024, Prague, République tchèque) [ICONE, 2024], où la conception des centrales nucléaires et les propriétés des types de combustible ont été abordées;
- » Le Symposium de la World Nuclear Association 2024 (septembre 2024, Londres, Royaume-Uni) [WNA, 2024], où l'augmentation de la capacité énergétique nucléaire, l'approvisionnement en combustible et les avancées nucléaires ont été abordés;
- » Le Sommet sur l'énergie nucléaire 2024 (mars 2024, Bruxelles, Belgique) [AIEA, 2024c], où la contribution de l'énergie nucléaire à l'atteinte des objectifs mondiaux de développement durable et des objectifs de sécurité énergétique a été abordé;
- » La Plateforme technologique européenne sur l'énergie nucléaire durable (SNETP), SNETP Forum 2024 (avril 2024) [SNETP, 2024].

La SGDN suit ces conférences, ainsi que les rapports techniques publiés par les organisations internationales telles que l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN/OCDE) [p. ex., AEN/OCDE, 2015-2024], l'AIEA [p. ex., AIEA, 2012-2023b], le Commissariat français à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) [p. ex., CEA, 2015], le département américain de l'Énergie (U.S. DOE) [U.S. DOE, 2023], l'EPRI [p. ex., EPRI, 2015-2023], l'agence Radioactive Waste Management du Royaume-Uni (maintenant appelée Nuclear Waste Services (NWS)) [RWM, 2017], et le SNETP européen [SNETP, 2015-2023].

En plus du présent rapport annuel de suivi, la SGDN a précédemment préparé des rapports techniques et des documents de conférence connexes sur les impacts potentiels des cycles de combustible avancés sur les inventaires de combustible irradié et les besoins de gestion à long terme au Canada [SGDN, 2015a, 2015b; Ion et Gobien, 2016; Gobien et Ion, 2016]. En 2024, la SGDN a présenté à la conférence G4SR-5 les exigences préliminaires en matière de données pour l'évaluation de base de la sûreté des déchets de combustible irradié produits par les PRM [Reilly et Gierszewski, 2024].

Le point sur les réacteurs avancés

Les cycles de combustible avancés sont généralement examinés en fonction de la conception particulière de réacteur considéré, puisque la solution du retraitement est étroitement reliée à la conception du réacteur utilisé ou envisagé.

Les conceptions de réacteurs avancés peuvent être globalement considérées comme des conceptions de 3^e génération avancée (GEN-III+) ou de 4^e génération (GEN-IV), alors que les réacteurs commerciaux actuellement en construction sont considérés comme des conceptions de 3^e génération. Un projet de collaboration internationale sur les réacteurs de 4^e génération examine actuellement plusieurs conceptions de types thermiques et RNR [GIF, 2023; AIEA, 2019, 2022d, 2023a, 2024a]. Ces conceptions de réacteurs avancés fonctionnent habituellement à des températures très élevées (généralement à une température de 400 °C ou plus) et utilisent des métaux liquides (p. ex., le sodium ou le plomb), des sels en fusion (tels que des mélanges à base de fluorure ou de chlorure) ou des gaz (l'hélium) comme réfrigérants plutôt que l'eau légère ou de l'eau lourde.

Par ailleurs, les PRM ont également suscité beaucoup d'intérêt à l'échelle internationale. Ces réacteurs ont une puissance de sortie moins élevée, ce qui leur permet d'être d'une construction plus modulaire, à plus bas prix et peuvent être utilisés à davantage d'endroits que les réacteurs plus conventionnels d'une puissance de 1000 MWe. Les conceptions de PRM regroupent des versions réduites de réacteurs thermiques conventionnels ainsi que des RNR.

Il est toutefois noté dans les recherches du U.S. DOE [U.S. DOE, 2023] que les économies de coûts que pourraient générer les nouveaux concepts de PRM ne devraient se réaliser que lorsque l'énième réacteur du même genre aura été construit.

Bien qu'un grand nombre de conceptions de PRM aient été proposées dans le monde [AIEA, 2022d], celles qui sont décrites dans le tableau 4 sont actuellement considérées au Canada et en sont à différentes étapes du processus d'examen de la conception du fournisseur de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) [CCSN, 2024].

Tableau 4 : Réacteurs avancés en cours d'évaluation au Canada

Réacteur	Fournisseur	Combustible/ réfrigérant	Type	État d'avancement de l'examen de la conception du fournisseur et du processus d'autorisation de la CCSN [CCSN, 2024]
ARC-100	ARC Nuclear Canada Inc.	Métal/sodium liquide	Réacteur à neutrons rapides	Phase 1 terminée Phase 2 en cours ARC et Énergie NB ont présenté une demande de permis pour la préparation de l'emplacement
MMR	Ultra Safe Nuclear Corporation	Oxyde enrobé, dans une pastille de SiC/hélium	Réacteur thermique	Phase 1 terminée Phase 2 en attente
SSR-W300	Moltex Energy	Sel en fusion/ sel en fusion	Réacteur à neutrons rapides	Phase 1 terminée
IMSR400	Terrestrial Energy Inc.	Sel en fusion/ sel en fusion	Réacteur thermique	Phase 1 terminée Phase 2 terminée
Xe-100	X-energy, LLC	Oxyde enrobé, dans une bille de graphite/hélium	Réacteur thermique	Phase 1 terminée Phase 2 terminée
BWRX-300	GE-Hitachi Nuclear Energy	UO ₂ /eau légère	Réacteur thermique	Phase 1 terminée Phase 2 terminée OPG a présenté une demande de permis de construire sur le site de Darlington
eVinci™	Westinghouse Electric Company, LLC	Billes d'oxyde enrobées dans un bloc de graphite/caloduc	Réacteur thermique	Phase 1 en cours Phase 2 en cours
CANDU MONARK	Candu Energy Inc.	UO ₂ /eau lourde	Réacteur thermique	En cours de planification

En 2020, le gouvernement du Canada a lancé un Plan d'action canadien pour les PRM, qui décrit le plan de développement, de démonstration et de déploiement des PRM pour diverses applications [Plan d'action des PRM, 2020]. Un protocole d'entente a été conclu en 2019 entre les gouvernements de l'Ontario, de la Saskatchewan et du Nouveau-Brunswick relativement à une collaboration au développement des PRM et à leur déploiement dans ces provinces. L'Alberta a signé le protocole d'entente en 2021.

Un certain nombre de sociétés d'électricité ont exprimé le souhait de soutenir le développement de technologies de PRM. Un rapport de faisabilité, préparé par Ontario Power Generation (OPG), Bruce Power, Énergie NB et SaskPower, a été publié en 2021, a fourni une évaluation de la faisabilité du développement et du déploiement des PRM dans chacune des trois provinces [OPG, Bruce Power, Énergie NB et SaskPower, 2021]. S'appuyant sur l'étude de faisabilité des sociétés d'électricité, les gouvernements de l'Ontario, du Nouveau-Brunswick, de la Saskatchewan et de l'Alberta ont élaboré un plan stratégique interprovincial pour le déploiement des PRM [Ontario, Nouveau-Brunswick, Alberta et Saskatchewan, 2023].

Le plan stratégique comprend trois volets de déploiement des PRM :

- » Volet 1 – Un projet de PRM à l'échelle du réseau de 300 MWe construit sur le site nucléaire de Darlington en Ontario, suivi de jusqu'à quatre réacteurs en Saskatchewan;
- » Volet 2 – Deux PRM avancés de quatrième génération construits sur le site de la centrale nucléaire de Point Lepreau au Nouveau-Brunswick;
- » Volet 3 – Une nouvelle classe de micro-PRM conçus principalement pour remplacer l'utilisation du diesel dans les collectivités éloignées et sur les sites miniers.

OPG a repris en 2020 ses activités de planification sur le site de Darlington en vue d'accueillir un PRM de taille compatible avec son réseau [OPG, 2020]. En décembre 2021, OPG a annoncé qu'elle collaborerait avec GE Hitachi Nuclear Energy pour déployer un PRM BWRX-300 sur le nouveau site nucléaire de Darlington [OPG, 2021]. OPG a entrepris ses activités de préparation du site conventionnelles en septembre 2022 et a présenté une demande de permis de construire à la CCSN en octobre 2022 [OPG, 2022]. Le 7 juillet 2023, le gouvernement de l'Ontario a annoncé qu'il collaborait avec OPG pour commencer la planification et le processus d'obtention des permis pour trois PRM supplémentaires, pour un total de quatre, à être déployés sur le site nucléaire de Darlington [Ontario, 2023a].

En juillet 2023, le gouvernement de l'Ontario a annoncé qu'elle entamait avec Bruce Power des travaux pré-développement dans le cadre d'un nouveau projet de grand réacteur [Ontario, 2023b]. Bruce Power a présenté à l'Agence d'évaluation d'impact du Canada une description initiale du projet d'augmentation de jusqu'à 4800 MWe de la capacité du site de Bruce Power [Bruce Power, 2024]. Pour le projet Bruce C, plusieurs concepts de réacteurs sont envisagés, y compris des réacteurs thermiques modérés à l'eau légère ou à l'eau lourde avec du combustible à base d' UO_2 , tous basés sur des concepts de cycle de combustible ouvert [Bruce Power, 2024].

En avril 2019, GFP a présenté à la CCSN une demande initiale de permis de préparation d'emplacement pour la construction d'un PRM sur le site de Chalk River [GFP, 2019]. La société a subséquemment présenté la partie 1 de la demande complète en juillet 2023 [GFP, 2023]. En octobre 2024, Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) a annoncé qu'elle cherchait à mener un processus de vente conformément à l'article 363 du chapitre 11 du Code des faillites des États-Unis. Au cours de ce processus, USNC assurerait la continuité opérationnelle de ses projets, y compris le déploiement de ses systèmes de microréacteurs modulaires (MMR) aux États-Unis et au Canada [USNC, 2024]. Au moment de la rédaction du présent document, l'examen par la CCSN de la demande de GFP était toujours en cours.

Énergie Nouveau-Brunswick collabore avec Moltex Energy et Advanced Reactor Concepts (ARC) Clean Energy Canada pour mettre au point et démontrer une grappe de recherche sur l'énergie nucléaire axée sur un PRM avancé [Énergie NB, 2019]. Le 30 juin 2023, Énergie NB a présenté un document d'enregistrement pour une Évaluation d'impact sur l'environnement au ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux [Nouveau-Brunswick, 2023] ainsi qu'une demande de permis de préparation d'emplacement à la CCSN [Énergie NB, 2023].

SaskPower a sélectionné en juin 2022 le réacteur nucléaire BWRX-300 de GE Hitachi pour un déploiement éventuel dans la province [SaskPower, 2022a]. En septembre 2022, SaskPower a identifié deux régions en Saskatchewan en vue d'une étude plus approfondie pour évaluer la possibilité d'accueillir un PRM [SaskPower, 2022b]. En novembre 2023, le gouvernement de la Saskatchewan a annoncé l'octroi de 80 millions \$ au Saskatchewan Research Council pour le déploiement d'un microréacteur eVinci™, qui sera construit par Westinghouse Electric Company et devrait être mis en service d'ici 2029 [Saskatchewan, 2023].

Bruce Power et Westinghouse ont annoncé la conclusion d'une entente visant à poursuivre les applications du programme de microréacteur eVinci™ proposé par Westinghouse au Canada [Bruce Power, 2020]. De plus, Bruce Power s'est également engagée à développer la technologie des PRM, notamment en signant des protocoles d'entente avec MIRARCO Mining Innovation et l'Université Laurentienne [Bruce Power, 2018a], ainsi qu'avec NuScale Power [Bruce Power, 2018b].

Les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) cherchent à établir des partenariats avec des fournisseurs de technologie de PRM pour développer, promouvoir et démontrer la technologie au Canada, et continuent de publier annuellement des appels de propositions pour leur programme Initiative canadienne de recherche nucléaire (ICRN), le quatrième appel à propositions ayant été annoncé en octobre 2024 [LNC, 2024]. Les LNC ont actuellement conclu des contrats avec plusieurs fournisseurs de technologie de PRM, notamment GFP, StarCore Nuclear [LNC, 2019], Moltex Energy [LNC, 2020a], USNC [LNC, 2020b], Énergie NB [LNC, 2020c], Terrestrial Energy [LNC, 2020d] et ARC Canada [LNC, 2022].

En 2021, le Groupe CSA (Association canadienne de normalisation) a publié un rapport sur le rôle des normes dans la facilitation du déploiement des PRM au Canada [CSA, 2021].

Les conceptions de PRM de type RNR rendues à un stade de considération avancé utilisent des combustibles métalliques ou à base de sels : le combustible d'ARC pourrait être de type métallique, composé d'un mélange d'U et de Zr, et le combustible de Moltex pourrait être un mélange de chlorures ou de fluorures de sodium/plutonium/actinide. Les conceptions de PRM thermiques utilisent un sel à base de fluorure d'uranium comme combustible et comme réfrigérant (Terrestrial Energy), des pastilles de SiC contenant du dioxyde d'uranium (UO₂) enrobé (USNC), des billes de graphite contenant du dioxyde d'uranium ou de l'oxycarbure d'uranium (UO₂/UCO) enrobé (X-energy) ou de l'UO₂ (BWRX-300, SMR-160 et NuScale). Aux fins de comparaison, le combustible CANDU actuel est de l'UO₂.

Au niveau international, les projets de réacteurs avancés ont connu de nouveaux développements. Les projets actuels de RNR sont énumérés dans le tableau 1. Une synthèse de l'état d'avancement des projets de PRM dans le monde est présentée dans le tableau de bord des PRM de l'AEN [AEN/OCDE, 2024]. L'AEN note que les réacteurs avancés pourraient présenter l'avantage de réduire la quantité de déchets de haute activité devant être stockés dans les dépôts géologiques en profondeur ainsi que les besoins en ressources d'uranium en amont du cycle du combustible nucléaire. Au moment de la publication de l'édition de 2024, les renseignements disponibles provenant de sources publiques vérifiables étaient insuffisants pour évaluer l'avancement des projets de PRM sur les plans de la planification de la gestion des déchets et de la préparation de la gestion de l'ensemble du cycle de vie du combustible. Les travaux de préparation des prochaines éditions du tableau de bord des PRM de l'AEN devraient inclure l'élaboration d'une méthodologie et de critères pour l'évaluation des progrès réalisés dans ce domaine.

En 2024, en particulier aux États-Unis, un intérêt accru a été constaté pour l'utilisation de réacteurs avancés pour alimenter de nouvelles industries, telles que les centres de données d'intelligence artificielle (IA). Google a conclu un partenariat avec Kairos Power pour le développement de plusieurs PRM aux États-Unis, le premier devant être mis en service d'ici 2030 et d'autres d'ici 2035, pour un objectif total de 500 MW [Terrell, 2024]. Amazon et Energy Northwest se sont également entendus pour avancer le développement de quatre réacteurs Xe-100 [Energy Northwest, 2024]. Ces deux concepts de PRM seraient des réacteurs thermiques à cycle ouvert, mais alimentés par un combustible à base d'uranium faiblement enrichi à haut dosage (HALEU). De plus, en décembre 2024, la société Meta a annoncé qu'elle publierait une demande de propositions pour trouver des entreprises d'énergie nucléaire qui pourraient l'aider à atteindre ses objectifs d'innovation et de durabilité pour le secteur de l'IA. La cible pour Meta, aux États-Unis, serait une nouvelle capacité nucléaire de 1 à 4 GW [Meta, 2024].

Aux États-Unis également, la construction du volet non nucléaire d'un nouveau RNR commercial a démarré en juin 2024. Ce projet pourrait être basé sur un cycle de combustible partiellement fermé. Dans le Wyoming, le projet de réacteur de démonstration Natrium, de TerraPower, concerne un réacteur de 345 MW refroidi au sodium, alimenté par un combustible à base de sels fondus comprenant de l'HALEU. TerraPower a déposé une demande de permis de construire pour ce projet auprès de la Nuclear Regulatory Commission des États-Unis [TerraPower, 2024].

Le point sur le retraitement

Les cycles de combustible avancés qui sont fermés ou partiellement fermés nécessitent un type ou un autre de retraitement. La technologie commerciale actuelle de retraitement employée par les installations énumérées dans le tableau 3 utilise des combustibles à base d'oxydes et la chimie humide (le procédé « PUREX »). Le combustible d' UO_2 irradié est dissous dans des acides concentrés, puis soumis à une série de procédés chimiques visant à en séparer les divers constituants. Du Pu relativement pur est séparé et converti en un oxyde qui peut être mélangé à de l' UO_2 pour former du combustible MOX, qui peut être réutilisé dans un réacteur thermique classique.

Le combustible dissous a comme sous-produit un flux de déchets aqueux de haute activité contenant la majorité des produits de fission qui doivent être gérés. La méthode la plus optimale de traiter ces déchets de haute activité est leur immobilisation dans du verre à des températures avoisinant les 1000°C, c'est-à-dire la vitrification. Les conditions trouvées dans le processus de vitrification sont favorables à la libération de radionucléides volatils et semi-volatils (tels que l'I-129 et le Cl-36) dans un flux d'effluents gazeux, radionucléides qui doivent être captés et convertis en une autre forme de déchet appropriée pour le stockage géologique ou libéré dans l'environnement [AEN/OCDE, 2022b].

Des descriptions du procédé utilisé sont fournies dans la littérature technique, par exemple dans [AEN/OCDE, 2012].

Puisque le combustible nucléaire irradié est hautement radioactif, tout cela doit se faire à l'aide d'équipements télécommandés et d'installations lourdement blindées. Même les opérations régulières d'entretien doivent être menées à distance en raison de la contamination résiduelle de l'équipement. Les étapes de retraitement et de séparation produisent également de grandes quantités de déchets chimiquement complexes. Certaines de ces matières pourront être recyclées dans le cadre du processus, mais la plupart d'entre elles deviendront des déchets de haute activité secondaires qui devront être stabilisés

avant d'être entreposés, puis finalement stockés dans un dépôt [AEN/OCDE, 2020a, 2022b]. De plus, les procédés et les activités d'exploitation génèrent des quantités importantes de déchets de faible et moyenne activité (résidus, matériaux de structure, équipements, etc.) qui doivent être gérés conformément aux normes de l'industrie et de la réglementation en vigueur.

Ce processus est la référence en matière de retraitement du combustible et est relativement coûteux. Certaines recherches en cours ont pour but d'optimiser ce processus. Deux options principales sont en cours de développement – des procédés hydrométallurgiques et électrométallurgiques. La séparation hydrométallurgique, aussi appelée « extraction par solvants », s'appuie sur l'expérience industrielle actuelle. Le concept électrométallurgique, ou le pyrotraitement, est un procédé non aqueux. Un autre concept qui est moins avancé dans son développement est le procédé basé sur la volatilité des fluorures.

La méthode du pyrotraitement convient directement aux combustibles métalliques et salins, mais peut également convenir aux combustibles oxydés après un prétraitement tel que la réduction électrochimique vers un métal [AEN/OCDE, 2022b]. Cette approche a été employée dans le passé dans des prototypes de RNR (notamment dans le cadre du programme américain Experimental Breeder Reactor qui a eu cours des années 1950 aux années 1980 [AIEA, 2012]) et a été proposée pour d'autres systèmes, comme le PRM d'ARC [Cheng et coll., 2018]. Bien qu'il ait été utilisé avec succès dans des essais de démonstration, le pyrotraitement n'a pas encore atteint le stade de la mise en oeuvre à l'échelle commerciale. (Voir, par exemple, [AIEA, 2021], et Iizuka et coll. dans [AEN/OCDE, 2012].) L'Argonne National Laboratory, aux États-Unis, a élaboré un schéma conceptuel pour une installation de pyrotraitement à l'échelle pilote [Chang et coll., 2018] et la Corée mène depuis un certain temps des études de démonstration à l'échelle du laboratoire et de l'ingénierie [AEN/OCDE, 2019c].

Moltex Energy propose d'utiliser une forme de pyrotraitement à base de sels fondus à haute température, appelée WATSS (Waste To Stable Salts) [Moltex, 2024], pour convertir un combustible irradié à base d'oxyde (comme le combustible CANDU irradié) en un combustible à base de sel pour son réacteur à sels stables – Wasteburner (SSR-W). Une caractéristique particulière de ce concept de SSR-W est qu'il tolère davantage les actinides présents dans le combustible, ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire que le retraitement aboutisse à un produit hautement purifié. La conception est donc simplifiée. Moltex a rapporté l'achèvement d'expériences visant à démontrer le procédé WATSS à l'aide d'un combustible simulé inactif et a entrepris des expériences aux LNC en utilisant du combustible irradié CANDU dans des cellules chaudes sécurisées [Moltex, 2023]. Parallèlement, Moltex a engagé des discussions avec la CCSN en vue d'officialiser un accord de services visant à faciliter un dialogue bilatéral sur son concept de recyclage du combustible irradié [Moltex, 2023].

Pour que ces réacteurs avancés et procédés de retraitement puissent être déployés avec succès sur une base commerciale, le coût de leur cycle de vie doit être inférieur au coût des autres moyens de production d'électricité, y compris des centrales nucléaires classiques et des technologies non nucléaires actuelles. Une étude publiée en 2013 par l'AEN de l'OCDE [AEN/OCDE, 2013] a examiné le coût du cycle de vie entier associé à diverses options de cycles de combustible et a conclu que le cycle à passage unique demeurerait le plus économique à ce moment-là. Le coût du cycle de vie comprend les coûts de développement, de construction, d'exploitation, d'entretien, de déclassement et de gestion des déchets produits par la centrale nucléaire ainsi que par les installations du cycle de combustible et les systèmes de transport associés. Une autre étude, publiée par l'Idaho National Laboratory en 2017, a fourni un ensemble exhaustif de données liées aux coûts, aux processus et aux structures à l'appui de l'évaluation menée par le U.S. DOE sur les cycles de combustible nucléaire avancés [INL, 2017].

Une étude technique commandée par le gouvernement de l'Ontario [LNC, 2016] a examiné divers scénarios pour le recyclage du combustible irradié des réacteurs CANDU ontariens. L'étude montrait que le coût du cycle de vie de chaque option de recyclage était plus élevé que celui du plan de référence actuel, qui consiste à stocker le combustible CANDU irradié dans un dépôt géologique en profondeur. Ces options de recyclage nécessitent un investissement initial important et posent des défis sociaux et techniques considérables. En outre, elles génèrent des quantités importantes de déchets radioactifs qui devraient aussi être stockés un jour dans un dépôt géologique en profondeur.

En général, les études montrent que l'économie des cycles du combustible nucléaire ouverts ou fermés est dominée par les coûts d'investissements liés aux réacteurs. Les coûts de l'aval du cycle du combustible ont généralement été estimés à moins de 5 pour cent et jusqu'à 20 pour cent du coût total du cycle de vie de l'énergie nucléaire. Par conséquent, le choix d'un cycle du combustible ouvert ou fermé n'a pas d'incidence importante sur l'économie totale, même s'il a toujours été démontré que les cycles du combustible fermés sont en moyenne plus coûteux que les cycles du combustible ouverts, généralement aussi dans une fourchette de moins de 5 à 20 pour cent. Cela est encore plus évident dans le court terme, les cycles de combustible fermés nécessitant des périodes beaucoup plus longues pour que les avantages économiques se concrétisent comparativement aux cycles de combustible ouverts [Taylor et coll., 2022].

Plusieurs de ces études soulignent que comme solution de rechange au retraitement du combustible nucléaire irradié des réacteurs actuels, il y aurait suffisamment d'uranium appauvri (issu de l'enrichissement du combustible utilisé dans les REL) pour soutenir des réacteurs avancés partout dans le monde pendant plusieurs siècles. Cet uranium est de radioactivité relativement faible et plus facile à manipuler. Approximativement 1,2 million de tonnes d'uranium appauvri sont actuellement stockées dans le monde. De plus, l'utilisation d'uranium enrichi pourrait remplacer le plutonium recyclé, au moins à court terme [WNA, 2023].

Le point sur la transmutation

La transmutation des actinides en des éléments moins radioactifs ou des éléments stables peut également se faire dans un SPA, où les neutrons produits par un accélérateur sont dirigés vers un assemblage de couverture contenant les déchets (éléments de la catégorie des actinides) ainsi que du combustible fissile. Contrairement à un réacteur nucléaire, il s'agit d'un système sous-critique : la réaction nucléaire s'arrête lorsque l'accélérateur est éteint. Une autre proposition utilise un puissant laser à impulsion brève comme accélérateur de particules. Un SPA pourra potentiellement accepter un large éventail de combinaisons d'isotopes, fournissant ainsi des actinides de transmutation très efficaces et certains autres radionucléides à vie longue.

Une quantité importante d'électricité est nécessaire pour générer les neutrons. Certaines recherches sont en cours en Europe, au Japon et ailleurs pour le développement de la technologie de SPA. Toutefois, la technologie n'a guère progressé au-delà du stade théorique. La disponibilité de faisceaux continus de neutrons de forte puissance constitue actuellement un facteur contraignant clé, bien que des installations expérimentales aient été conçues et construites dans le monde et aient produit des résultats qui ont permis d'élaborer des concepts pour des projets pilotes basés sur la technologie de SPA [AIEA, 2015].

Les résultats des recherches sont rapportés dans des conférences scientifiques et des réunions comme le 4^e Atelier international sur la technologie et les composants des systèmes pilotés par accélérateur [AEN/OCDE, 2019a] et la 16^e Réunion d'échange d'informations sur la séparation et la transmutation des actinides et des produits de fission (16IEMPT) [AEN/OCDE, 2023].

Le point sur le stockage en forages profonds

Une autre approche proposée pour la gestion des déchets serait de placer le combustible irradié dans des forages profonds. Ce concept consisterait à placer des conteneurs de déchets à des profondeurs supérieures à 1 kilomètre, à l'intérieur de trous individuels forés depuis la surface. Dans chaque puits foré, les colis de déchets seraient empilés verticalement ou horizontalement les uns contre les autres sur une certaine distance. Une fois les déchets en place, les trous de forage seraient remblayés et scellés en surface. Si les déchets étaient stockés à cette profondeur, plus loin de la biosphère que dans le concept du dépôt excavé, la sûreté à long terme du système reposerait principalement sur la séparation du réseau hydrogéologique qui existe à la profondeur des colis de déchets du réseau près de la surface, ainsi que sur l'intégrité des bouchons et sceaux des puits.

Jusqu'ici, un certain nombre d'études ont conclu que les forages profonds pourraient présenter un certain nombre d'avantages techniques par rapport aux dépôts géologiques excavés pour certains types de déchets de haute activité. Ceux-ci comprennent un meilleur isolement des déchets et une réduction de la mobilité des radionucléides grâce à la profondeur accrue des déchets, ainsi qu'une amélioration de la modularité, c'est-à-dire de la possibilité d'augmenter la capacité de stockage en forant des puits supplémentaires une fois un emplacement approprié trouvé et autorisé.

Le concept du stockage en forages profonds a été étudié comme solution de remplacement à un dépôt géologique en profondeur aux États-Unis [Sandia, 2009-2019; U.S. NWTRB, 2016; Deep Isolation, 2020; EPRI, 2020], en Suède [SKB, 1989-2013c; KASAM, 2007], au Royaume-Uni [NIREX, 2004] et ailleurs dans le monde [von Hippel et Hayes, 2010; Chapman, 2013].

Le concept des forages profonds est envisagé pour le stockage souterrain des petits inventaires de déchets de moyenne et de haute activité [AIEA, 2017c, 2020d; ARPANSA, 2008]. L'Australie envisage actuellement le stockage en puits pour les déchets de moyenne activité [ARPANSA, 2020], et l'Estonie et la Slovaquie étudient ce concept pour le stockage du combustible irradié généré par leurs PRM et réacteur de recherche, respectivement [WNN, 2021a, 2021b]. En 2023, l'AIEA, en réponse à l'intérêt manifesté par des pays ayant de petits inventaires (tels que l'Australie, la Croatie, le Danemark, la Norvège et la Slovaquie), a annoncé un nouveau projet coordonné de recherche visant à accroître les connaissances internationales et à faire progresser les essais de stockage en forage profond pour les déchets de moyenne et haute activité. L'intention est de développer les travaux scientifiques et techniques préliminaires démontrant la sûreté et la faisabilité du concept de forage profond afin de jeter les bases d'une éventuelle mise en oeuvre future [AIEA, 2023b].

Le U.S. DOE a entrepris des études en 2009 sur le concept des forages profonds en vue du stockage des assemblages de combustible irradié des réacteurs américains. Des études initiales publiées par les Sandia National Laboratories ont présenté une évaluation préliminaire du concept [Sandia, 2009] et une conception de référence [Sandia, 2011a, 2011b]. Suivant cette dernière, il est présumé que les déchets seraient stockés dans la portion du 1^{er} et du 2^e kilomètres les plus profonds d'un trou de 3 à 5 kilomètres de profondeur et d'approximativement 45 centimètres de diamètre foré verticalement dans la couche de roche supérieure jusque dans la roche cristalline du socle. Bien que la récupération du combustible reste possible pendant les opérations de mise en place, il est présumé qu'elle ne serait pas requise une fois le forage scellé.

En 2014, le U.S. DOE a lancé un projet de perçage d'un trou de forage en profondeur pour évaluer la technologie pour des types précis de déchets de haute activité de petite taille (comme des capsules de Cs et de Sr concentrés actuellement stockés sur le site de Hanford) [Sandia, 2014b; U.S. DOE, 2014; U.S. NWTRB, 2016]. Le programme Deep Borehole Field Test prévoyait la réalisation d'au moins un forage non radioactif à pleine échelle percé à une profondeur de 5 kilomètres [Sandia, 2012c, 2015a, 2015b]. Un dossier de sûreté générique préliminaire avait été monté pour démontrer la faisabilité du concept de stockage des capsules de Cs et de Sr [Sandia, 2016, 2019]. En 2016, le U.S. DOE avait annoncé qu'un site de 20 acres de terres publiques près de Rugby, au Dakota du Nord, avait été choisi pour l'essai [U.S. DOE, 2016]. Toutefois, même si aucun véritable déchet radioactif ne devait être utilisé dans l'essai, celui-ci s'est heurté à une opposition locale et le permis de forage nécessaire n'a pas été accordé. Le projet a été discontinué en 2017 [U.S. DOE, 2017].

Un autre concept a aussi été proposé : le stockage des déchets radioactifs dans des forages horizontaux moins profonds, où les colis de déchets subiraient moins de pression et pourraient être récupérés. Selon ce concept, un trou serait foré verticalement depuis la surface, à travers la roche, à une profondeur d'approximativement 1 kilomètre. Ensuite, le forage prendrait une direction subhorizontale [Deep Isolation, 2020]. Plusieurs longs forages subhorizontaux seraient utilisés pour confiner les colis de déchets radioactifs.

Une société privée de stockage des déchets nucléaires aux États-Unis, Deep Isolation, a proposé d'utiliser les technologies existantes de forage directionnel. Elle a réalisé un essai de démonstration publique en 2019 de ce concept en plaçant et en récupérant un prototype de conteneur d'un forage horizontal percé à une profondeur d'approximativement 600 mètres [Deep Isolation, 2019].

Deep Isolation a réalisé une analyse de sûreté post-fermeture pour le stockage du combustible irradié de réacteurs à eau légère dans des forages profonds subhorizontaux d'environ 1 kilomètre réalisés dans une roche hôte schisteuse hypothétique, à l'intérieur de conteneurs de déchets dont l'échéance de défaillance serait de 10 000 ans [Finsterle et coll., 2020]. Les résultats montrent que la dose reçue par le public pourrait être faible et acceptable sur un site approprié. L'une des incertitudes en matière de performance de ce modèle est la possibilité que les forages eux-mêmes agissent comme une voie de migration rapide directe vers la surface des radionucléides provenant des conteneurs de stockage défaillants. Deep Isolation a réalisé une analyse numérique des effets de différents matériaux d'étanchéité sur la migration des radionucléides. L'analyse montre que le rapport longueur/diamètre élevé des forages constituerait un élément de sûreté passive beaucoup plus important que le matériau de scellement [Finsterle et coll., 2021]. Une autre incertitude relative à la mise en oeuvre sur un site réel concerne l'effet que pourraient avoir sur la roche hôte les gaz générés par la corrosion des conteneurs et des déchets [Finsterle et coll., 2020].

Deep Isolation a publié une étude commandée par la filiale de la Nuclear Decommissioning Authority du Royaume-Uni, Nuclear Waste Services (NWS), pour évaluer le rôle que la technologie des forages directionnels pourrait jouer pour soutenir l'engagement stratégique pris par le gouvernement britannique en faveur du stockage des déchets nucléaires en couche géologique profonde [Deep Isolation, 2023]. NWS a conclu que le recours éventuel au stockage par forages directionnels n'abolirait pas la nécessité de développer un dépôt géologique en profondeur au Royaume-Uni, car la méthode des forages profonds n'est pas adaptée à toute la diversité de l'inventaire des déchets du pays. Un dépôt géologique en profondeur sera nécessaire, mais le stockage en forages profonds pourrait être envisagé à l'avenir pour stocker une partie des déchets de haute activité du Royaume-Uni (p. ex., les déchets de verre de haute activité, le combustible irradié et certaines matières nucléaires classées comme déchets). Des travaux seront nécessaires pour affiner la technologie des forages profonds directionnels en vue d'une possible application à l'inventaire envisageable. Il faudra notamment examiner l'aspect sûreté des phases d'exploitation et post-fermeture [Deep Isolation, 2023]. Le Royaume-Uni collabore actuellement avec Deep Isolation à la mise au point de conteneurs résistants à la corrosion compatibles avec le concept des forages directionnels pour stocker une partie des déchets de haute activité britanniques (y compris le combustible irradié) [Nuclear AMRC, 2023]. Le premier prototype de conteneur a été produit au début de l'année 2024 par le Centre de recherche sur la fabrication nucléaire avancée de l'Université de Sheffield (Nuclear AMRC). Le conteneur devrait subir des essais de terrain au Centre de démonstration des forages profonds. En parallèle, l'Université de Sheffield validera la sûreté de la conception du conteneur en modélisant sa performance dans des environnements géologiques génériques du Royaume-Uni. La fabrication d'un deuxième prototype est prévue pour 2025 [Deep Isolation, 2024a]. Deep Isolation, grâce à des fonds de recherche du U.S. DOE, développe également un système de conteneur universel (UCS) pour une possible utilisation en tant que conteneur pour le stockage des déchets de combustible issus de réacteurs avancés dans un dépôt géologique en profondeur ou des concepts de stockage en forages profonds. Des prototypes de ces UCS ont été fabriqués et devraient être utilisés dans le cadre d'essais sur le terrain [Deep Isolation, 2024b].

Bien que le concept du stockage du combustible irradié en forages profonds soit considéré comme techniquement faisable, l'approche soulève certaines questions, en particulier :

- » La faisabilité de forer des puits du diamètre et de la profondeur appropriés n'a pas encore été démontrée;
- » La mise en place contrôlée des colis de déchets (p. ex., les problèmes d'ingénierie posés par la taille restreinte que devraient avoir les conteneurs/colis de combustible irradié ainsi que les problèmes à résoudre au cas où un colis resterait pris dans le trou de forage avant qu'il n'ait atteint la profondeur souhaitée);
- » La mise au point d'une technologie robuste de surveillance pour une superficie et une profondeur substantielles;
- » La mise au point de dispositifs de scellement des forages qui pourraient être placés à distance depuis la surface;
- » Une fois les colis de déchets en place et scellés, la récupération serait très difficile.

La SGDN continuera de surveiller le concept des forages profonds dans le cadre de notre examen continu de l'approche de la GAP.

Conclusions

La SGDN continue de surveiller les développements dans le domaine des cycles de combustible avancés et des méthodes de remplacement pour la gestion à long terme des déchets.

Les principales conclusions de la SGDN sont que :

- » Les nouveaux cycles de combustible continuent de susciter de l'intérêt dans le monde, mais il n'y a eu aucune percée technologique qui modifierait la précédente conclusion concernant l'approche de la GAP et la gestion de l'inventaire actuel de combustible nucléaire irradié canadien.
- » L'exploitation de PRM au Canada générera, en relativement petites quantités, de nouveaux types de déchets de combustible nucléaire. Les répercussions de ces possibles nouveaux déchets sur le programme de la SGDN sont évaluées dans le cadre de son examen des technologies liées aux PRM.
- » Les cycles de combustible avancés considérés jusqu'à maintenant produiront des déchets de combustible nucléaire à vie longue qui devront être gérés de manière sûre, socialement acceptable, techniquement rigoureuse, responsable sur le plan environnemental et économiquement viable par la SGDN.
- » Les concepts de stockage en forages profonds continuent aussi de susciter de l'intérêt dans le monde. Au Canada, le concept du stockage en dépôt géologique en profondeur et la réglementation associée ont été élaborés au fil de décennies et discutés avec les collectivités hôtes potentielles. En 2024, un site hôte a été sélectionné sur la base du concept du dépôt géologique en profondeur. À ce stade du projet, il ne semble pas qu'il y aurait des avantages majeurs à passer d'un concept de dépôt géologique en profondeur excavé à un concept de forage en profondeur (horizontal ou vertical).
- » La SGDN continuera d'assurer un suivi des développements liés aux cycles de combustible avancés et aux méthodes techniques de remplacement qui pourraient avoir une incidence sur les exigences canadiennes futures en matière de gestion des déchets.

Références

- AEN/OCDE, 2012. Spent Nuclear Fuel Reprocessing Flowsheet. Rapport NEA/NSC/WPFC/DOC(2012)15, préparé par l'AEN de l'OCDE, juin 2012.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2013. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. Rapport 7061, préparé par l'AEN de l'OCDE, septembre 2013.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2015a. Review of Integral Experiments for Minor Actinide Management. Rapport 7222, préparé par l'AEN de l'OCDE, février 2015.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2015b. Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle: Short- to long-term considerations. Rapport 7224, préparé par l'AEN de l'OCDE, juin 2015.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2016. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. Rapport 7213, préparé par l'AEN de l'OCDE, septembre 2016.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2018. State-of-the-Art Report on the Progress of Nuclear Fuel Cycle Chemistry. Rapport 7267, préparé par l'AEN de l'OCDE, 2018.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2019a. 4th International Workshop on Technology and Components of Accelerator-Driven Systems (TCADS-4). 14 au 17 octobre 2019, Anvers, Belgique.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2019b. Proceedings of the Nuclear Energy Agency International Workshop on Chemical Hazards in Fuel Cycle Facilities Nuclear Processing. Rapport NEA/CSNI/R(2019)9 et NEA/CSNI/R(2019)9/ADD1, mai 2019. 17 au 19 avril 2018, Boulogne-Billancourt, France.
(oecd-nea.org, annexe C)
- AEN/OCDE, 2019c. Review of Operating and Forthcoming Experimental Facilities Opened to International R&D Co-operation in the Field of Advanced Fuel Cycles. Rapport NEA/NSC/R(2018)4, préparé par le comité sur la science nucléaire de l'Agence pour l'énergie nucléaire, février 2019.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2020a. NEA Policy Brief: Final Disposal of Radioactive Waste. Juin 2020.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2020b. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. Juillet 2020.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2021a. Strategies and Considerations for the Back End of the Fuel Cycle. Rapport 7469, préparé par l'AEN de l'OCDE, février 2021.
(oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2021b. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. Rapport 7560, préparé par l'AEN de l'OCDE, avril 2021.
(oecd-nea.org)

AEN/OCDE, 2021c. Advanced Nuclear Reactor Systems and Future Energy Market Needs. Rapport 7566, préparé par l'AEN de l'OCDE, décembre 2021.

(oecd-nea.org)

AEN/OCDE, 2022a. High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications. Rapport 7629, préparé par l'AEN de l'OCDE, juin 2022.

(oecd-nea.org)

AEN/OCDE, 2022b. Treatment of Volatile Fission Products. Rapport NEA/NSC/R(2022)4, novembre 2022.

(oecd-nea.org)

AEN/OCDE, 2023. 16^e Réunion d'échange d'informations sur la séparation et la transmutation des actinides et des produits de fission (16IEMPT), Boulogne-Billancourt, France, 24 au 27 octobre 2023.

(oecd-nea.org)

AEN/OCDE, 2024. The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition. Rapport 7671, préparé par l'AEN de l'OCDE, mars 2024.

(oecd-nea.org)

IAEA, 2012. Status of Fast Reactor Research and Technology Development. Rapport IAEA-TECDOC-1691, préparé par l'AIEA, décembre 2012.

(iaea.org)

IAEA, 2013. Design Features and Operating Experience of Experimental Fast Reactors. Report NP-T-1.9, préparé par l'AIEA, novembre 2013.

(iaea.org)

IAEA, 2015. Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development. Rapport IAEA-TECDOC-1766, préparé par l'AIEA, juin 2015.

(iaea.org)

IAEA, 2017a. Use of Low Enriched Uranium Fuel in Accelerator Driven Subcritical Systems. Rapport IAEA-TECDOC-1821, préparé par l'AIEA, août 2017.

(iaea.org)

IAEA, 2017b. Research Reactors for the Development of Materials and Fuels for Innovative Nuclear Energy Systems. Rapport NP-T-5.8, préparé par l'AIEA, septembre 2017.

(iaea.org)

IAEA, 2017c. Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste.

Rapport IAEA-TECDOC-1817, préparé par l'AIEA, juillet 2017.

(iaea.org)

IAEA, 2018. Experimental Facilities in Support of Liquid Metal Cooled Fast Neutron Systems.

Rapport NP-T-1.15, préparé par l'AIEA, octobre 2018.

(iaea.org)

IAEA, 2019. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles: A Preliminary Study.

Rapport NW-T-1.7, préparé par l'AIEA, juillet 2019.

(iaea.org)

IAEA, 2020a. Understanding and Prediction of Thermohydraulic Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs). Rapport IAEA-TECDOC-1900, préparé par l'AIEA, février 2020.

(iaea.org)

IAEA, 2020b. Passive Shutdown Systems for Fast Neutron Reactors. Rapport NR-T-1.16, préparé par l'AIEA, mars 2020.

(iaea.org)

AIEA, 2020c. Challenges for Coolants in Fast Neutron Spectrum Systems. Rapport IAEA-TECDOC-1912, préparé par l'AIEA, mai 2020.

(iaea.org)

AIEA, 2020d. Underground Disposal Concepts for Small Inventories of Intermediate and High Level Radioactive Waste. Rapport IAEA-TECDOC-1934, préparé par l'AIEA, décembre 2020.

(iaea.org)

AIEA, 2021. Status and Trends in Pyroprocessing of Spent Nuclear Fuels. Rapport IAEA-TECDOC-1967, préparé par l'AIEA, août 2021.

(iaea.org)

AIEA, 2022a. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. Rapport NW-T-1.14 (Rév. 1), préparé par l'AIEA, janvier 2022.

(iaea.org)

AIEA, 2022b. Modelling and Simulation of the Source Term for a Sodium Cooled Fast Reactor Under Hypothetical Severe Accident Conditions. Rapport IAEA-TECDOC-2006, préparé par l'AIEA, août 2022.

(iaea.org)

AIEA, 2022c. Near Term and Promising Long Term Options for the Deployment of Thorium Based Nuclear Energy. Rapport IAEA-TECDOC-2009, préparé par l'AIEA, septembre 2022.

(iaea.org)

AIEA, 2022d. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), édition 2022, septembre 2022.

(aris.iaea.org)

AIEA, 2023a. Status of Molten Salt Reactor Technology. Rapport technique n° 489, préparé par l'AIEA, novembre 2023.

(iaea.org)

AIEA, 2023b. « New CRP: Enhancing Global Knowledge on Deep Borehole Disposal for Nuclear Waste (T22003) », communiqué de presse de l'AIEA, 10 août 2023.

(iaea.org)

AIEA, 2024a. ARIS – Advanced Reactors Information System, database maintained by the IAEA, consulté en décembre 2024.

(aris.iaea.org)

AIEA, 2024b. NFCFDB – Nuclear Fuel Cycle Facilities Database, database maintained by the IAEA, consulté en décembre 2024.

(infcis.iaea.org)

AIEA, 2024c. Sommet sur l'Énergie nucléaire 2024, organisé par l'AIEA, 21 mars 2024, Bruxelles, Belgique.

(www.iaea.org/events/nuclear-energy-summit-2024)

Andra, 2016. Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture, rapport CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062 de l'Agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs, juillet 2016.

(andra.fr)

ARPANSA, 2008. Predisposal Management of Radioactive Waste. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency Safety Guide, Radiation Protection Series No. 16, août 2008.

(arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps16.pdf)

ARPANSA, 2020. Australian National Report to the Joint Convention Seventh Review Meeting, octobre 2020.

(arpansa.gov.au/sites/default/files/7th_national_report_to_the_joint_convention.pdf)

Bruce Power, 2018a. « Bruce Power signs \$1 million MOU for sustainable energy research group », communiqué de presse de Bruce Power, 6 avril 2018.

(brucepower.com)

Bruce Power, 2018b. « Bruce and NuScale collaborate on Canadian SMR business case », communiqué de presse de Bruce Power, 27 novembre 2018.

(brucepower.com)

Bruce Power, 2020. « Bruce Power and Westinghouse collaborate to advance application of eVinci™ battery technology to support Canada's Net Zero initiative », communiqué de presse de Bruce Power, 10 octobre 2020.

(brucepower.com)

Bruce Power, 2024. Bruce C Project Initial Project Description Plain Language Summary. Août 2024.

(iaac-aeic.gc.ca/050/documents/p88771/158466E.pdf)

CCSN, 2024. Examen de la conception de fournisseurs préalable à l'autorisation. Page Web de la CCSN, date modifiée, 4 novembre 2024.

(nuclearsafety.gc.ca)

CEA, 2015. Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides. Rapport préparé par la CEA, juin 2015.

(cea.fr)

Chang Yoon Il et coll., 2018. Conceptual Design of a Pilot-Scale Pyroprocessing Facility, Nuclear Technology, volume 205, n° 5, 2019.

(https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1513243)

Chapman, 2013. Deep Borehole Disposal of Spent Fuel and Other Radioactive Wastes. Rapport préparé par Neil A. Chapman pour le Nautilus Institute, juillet 2013.

(nautilus.org)

Cheng et coll., 2018. Phenomena Important in Liquid Metal Reactor Simulations. Rapport préparé par Lap-Yan Cheng, Michael Todosow and David Diamond pour la Nuclear Regulatory Commission des États-Unis, Rapport BNL-207816-2018-INRE, août 2018.

(nrc.gov/docs/ML1829/ML18291B305.pdf)

CSA, 2021. The Role of Standards in Facilitating Deployment of SMRs in Canada. Rapport produit par Hatch Itée pour l'Association canadienne de normalisation, août 2021.

(csagroup.org)

Deep Isolation, 2019. « Private company successfully demonstrates deep geologic disposal of prototype nuclear waste canister », communiqué de presse de Deep Isolation, 16 janvier 2019.

(deepisolation.com)

Deep Isolation, 2020. Spent Nuclear Fuel Disposal in a Deep Horizontal Drillhole Repository Sited in Shale: Numerical Simulations in Support of a Generic Post-Closure Safety Analysis. Rapport préparé par Deep Isolation Inc., DI-2020-01-R0, mai 2020.

(deepisolation.com)

Deep Isolation, 2023. Deep Isolation in the U.K.: Initial study to consider the suitability of elements of U.K. nuclear waste inventory for Deep Isolation's disposal solution, 20 mars 2023.

(deepisolation.com)

Deep Isolation, 2024a. « Deep Isolation with the support of the UK government, delivers first prototype canister for the disposal of nuclear waste in deep boreholes », communiqué de presse de Deep Isolation, 29 février 2024.

(deepisolation.com)

- Deep Isolation, 2024b. « Deep Isolation Leads Third Technical Workshop for UPWARDS Project on Universal Canister System Development », communiqué de presse de Deep Isolation, 22 octobre 2024.
(deepisolation.com)
- Dungan et coll., 2021. Assessment of the disposability of radioactive waste inventories for a range of nuclear fuel cycles: Inventory and evolution over time. *Energy*, volume 221, 119826.
(doi.org/10.1016/j.energy.2021.119826)
- EASAC, 2014. Management of Spent Nuclear Fuel and its Waste. Rapport sur les politiques de l'EASAC n° 23, préparé par le comité consultatif des sciences des Académies européennes, juillet 2014.
(easac.eu)
- Énergie NB, 2019. « NB Power pleased with progress on Small Modular Reactor work », communiqué de presse d'Énergie Nouveau-Brunswick, 25 juillet 2019.
(nbpower.com)
- Énergie NB, 2023. Demande de permis de préparation d'emplacement. Énergie NB, rapport 0930-00581-0001-001-LPA-A-00. 30 juin 2023.
(nbpower.com)
- Energy Northwest, 2024. « Amazon and Energy Northwest announce plans to develop advanced nuclear technology in Washington », communiqué de presse d'Energy Northwest, 16 octobre 2024.
(<https://www.energy-northwest.com/whoweare/news-and-info/Pages/Amazon-and-Energy-Northwestannounce-plans-to-develop--advanced-nuclear-technology-in-Washington.aspx>)
- EPRI, 2015. Program on Technology Innovation: Technology Assessment of a Molten Salt Reactor Design. Electric Power Research Institute, rapport 3002005460, octobre 2015.
(epri.com)
- EPRI, 2016. Program on Technology Innovation: Assessment of Nuclear Fuel Cycle Simulation Tools. Electric Power Research Institute, rapport 3002008044, novembre 2016.
(epri.com)
- EPRI, 2017. Program on Technology Innovation: Dynamic Nuclear Fuel Cycle Modeling for Evaluating Liquid-Fueled Molten Salt Reactor Designs. Electric Power Research Institute, rapport 3002010474, septembre 2017.
(epri.com)
- EPRI, 2020. Feasibility of Borehole Co-Location with Advanced Reactors for Onsite Management of Spent Nuclear Fuel. Electric Power Research Institute, rapport 3002019751, décembre 2020.
(epri.com)
- EPRI, 2021. Evaluation of Chloride Fuel Salt Lifetime in a Fast-Spectrum, Liquid-Fuel Molten Salt Reactor. Electric Power Research Institute, rapport 3002021038, décembre 2021.
(epri.com)
- EPRI, 2023. Nuclear Fuel Reprocessing For the Advanced Nuclear Era. Electric Power Research Institute, rapport 3002026537, décembre 2023.
(epri.com)
- Finsterle, S., Muller, R.A., Grimsich, J., Apps, J. et Baltzer, R., 2020. Post-Closure Safety Calculations for the Disposal of Spent Nuclear Fuel in a Generic Horizontal Drillhole Repository. *Energies* 2020, vol. 13, n° 2599.
(<https://doi.org/10.3390/en13102599>)
- Finsterle, S., Cooper, C., Muller, R.A., Grimsich, J. et Apps, J., 2021. Sealing of a Deep Horizontal Borehole Repository for Nuclear Waste. *Energies* 2021, vol. 14, n° 91.
(<https://dx.doi.org/10.3390/en14010091>)

G4SR-5, 2024. Generation IV and Small Reactors Conference. 1^{er} au 4 octobre 2024. Ottawa, Canada.
(www.g4sr.org)

GFP, 2019. Licence to Prepare Site Initial Application: MMR Nuclear Plant at Chalk River. Global First Power, document CRP-LIC-01-002, juin 2019.
(globalfirstpower.com)

GFP, 2023. « MICRO MODULAR REACTOR® at Chalk River – 2023 Project Update Presentation », 29 novembre 2023.
(gfpcleanenergy.com)

GIF, 2023. Generation IV International Forum Annual Report 2022, octobre 2023.
(gen-4.org)

Gobien et Ion, 2016. Some Implications of Recycling Used CANDU Fuel in Fast Reactors, papier préparé par M. Gobien, SGDN, présenté lors de la 14^e réunion d'échange d'informations sur la séparation et la transmutation des actinides et des produits de fission, organisée par l'AEN de l'OCDE, 17 au 20 octobre 2016, San Diego, États-Unis.
(oecd-nea.org)

ICONE, 2024. 31^e Conférence internationale sur le génie nucléaire, organisée par l'American Society of Mechanical Engineers, la Japanese Society of Mechanical Engineers et la Chinese Nuclear Society, 4 au 8 août 2024, Prague, République tchèque.
(event.asme.org/ICONE-2024)

INL, 2017. Advanced Fuel Cycle Cost Basis – 2017 Edition.
Rapport INL/EXT-17-43826, NTRD-FCO-2017-000265, préparé par l'Idaho National Laboratory pour la Campagne sur les options de cycles de combustible du département américain de l'Énergie, septembre 2017.
(inl.gov)

Ion et Gobien, 2016. Some Implications of Recycling Used CANDU Fuel in Fast Reactors, papier préparé par M. Ion, SGDN, présenté à la 3^e Conférence canadienne sur la gestion des déchets nucléaires, le déclassé et la restauration environnementale, organisée par la Société nucléaire canadienne, 11 au 14 septembre 2016, Ottawa, Canada.
(cns-snc.ca)

KASAM, 2007. Deep boreholes: An alternative for final disposal of spent nuclear fuel? Rapport 2007:6e, préparé pour le Conseil national suédois pour les déchets nucléaires par Annika Olofsdotter, décembre 2007.
(karnavfallsradet.mkg.se)

LNC, 2016. A Feasibility Study on the Recycling of Used CANDU Fuel, Rapport 153-124900-REPT-002. Préparé par les LNC, avril 2016.
(crednb.files.wordpress.com/2022/10/cnl-recycling_juin_2016-1.pdf)

LNC, 2019. « Update on CNL's SMR Invitation Process: Technology developers advance in CNL's process to site a small modular reactor », communiqué de presse des LNC, 15 février 2019.
(cnl.ca)

LNC, 2020a. « CNL & Moltex Energy partner on SMR fuel research », communiqué de presse des LNC, 23 avril 2020.
(cnl.ca)

LNC, 2020b. « CNL & USNC partner on SMR fuel research », communiqué de presse des LNC, 26 février 2020.
(cnl.ca)

LNC, 2020c. « Canadian Nuclear Laboratories and NB Power sign collaboration agreement to advance small modular reactors », communiqué de presse des LNC, 27 février 2020.

(cnl.ca)

LNC, 2020d. « CNL and Terrestrial Energy partner on SMR fuel research », communiqué de presse des LNC, 16 septembre 2020.

(cnl.ca)

LNC, 2022. « CNL Partners with ARC Canada to advance fuel development », communiqué de presse des LNC, 27 juillet 2022.

(cnl.ca)

LNC, 2024. « CNL expands highly successful CNRI program to include fusion technologies in annual call for proposals », communiqué de presse des LNC, 4 octobre 2024.

(cnl.ca)

Meta, 2024. « Accelerating the Next Wave of Nuclear to Power AI Innovation », communiqué de presse de Meta, 3 décembre 2024.

(<https://sustainability.atmeta.com/blog/2024/12/03/accelerating-the-next-wave-of-nuclear-to-powerai-innovation>)

Moltex, 2023. « Successful experiments derisk Moltex's innovative waste recycling process », communiqué de presse de Moltex, 30 octobre 2023.

(moltexenergy.com)

Moltex, 2024. « Canadian patent granted for Moltex's spent nuclear fuel recycling process », communiqué de presse de Moltex, 11 janvier 2024.

(moltexenergy.com)

NASEM, 2023. Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactors. The National Academies Press, Washington, États-Unis.

(nap.nationalacademies.org)

NIREX, 2004. A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste. Rapport N/108, préparé par Safety Assessment Management Ltd. pour United Kingdom Nirex Limited, juin 2004.

(gov.uk)

Nouveau-Brunswick, 2023. ARC Clean Technology Advanced Small Modular Reactor – Commercial Demonstration Unit. Rapport 0930-07020-7000-001-ENA-A-00, préparé pour le ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick par Énergie NB, juin 2023.

(www2.gnb.ca)

Nuclear AMRC, 2023. « Canister manufacturing study for Deep Isolation », communiqué de presse de Nuclear AMRC, 21 février 2023.

(energyamrc.co.uk)

Ontario, 2023a. « Ontario Building More Small Modular Reactors to Power Province's Growth », communiqué de presse du gouvernement de l'Ontario, 7 juillet 2023.

(news.ontario.ca)

Ontario, 2023b. « Province Starts Pre-Development Work for New Nuclear Generation to Power Ontario's Growth », communiqué de presse du gouvernement de l'Ontario, 5 juillet 2023.

(news.ontario.ca)

Ontario, Nouveau-Brunswick, Alberta et Saskatchewan, 2023. A Strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors. 2 mars 2022 (mise à jour du 25 janvier 2023).

(ontario.ca)

OPG, 2020. « OPG resumes planning activities for Darlington New Nuclear », communiqué de presse d'Ontario Power Generation, 13 novembre 2020.

(opg.com)

OPG, 2021. « OPG advances clean energy generation project », communiqué de presse d'Ontario Power Generation, 2 décembre 2021.

(opg.com)

OPG, 2022. « OPG applies to Canadian Nuclear Safety Commission for Licence to Construct communiqué de presse d'Ontario Power Generation, 31 octobre 2022.

(opg.com)

OPG, Bruce Power, Énergie NB et SaskPower, 2021. Feasibility of Small Modular Reactor Development and Deployment in Canada. Préparé par SaskPower, Énergie NB, Bruce Power et Ontario Power Generation, mars 2021.

(opg.com)

Plan d'action des PRM, 2020. Plan d'action canadien des petits réacteurs modulaires.

(plandactionprm.ca)

Posiva, 2021. Safety Case for the Operating Licence Application: Biosphere Radionuclide Transport and Dose Modelling. Rapport Posiva 2020-24, préparé pour Posiva Oy, par Robert Broed, Pekka Kupiainen, Lauri Parviainen et Aleksi Isoaho, décembre 2021.

(posiva.fi)

Reilly, T. et Gierszewski, P., 2024. Preliminary data requirements for the safety assessment basis of Small Modular Reactor used fuel waste for disposal in a Canadian Deep Geological Repository, Cinquième conférence internationale sur les réacteurs de génération IV et les petits réacteurs, organisée par la Société nucléaire canadienne, Procès-verbal de la Conférence sur la gestion des déchets, 1^{er} au 4 octobre 2024, Ottawa, Canada.

(cns-snc.ca)

RWM, 2017. Geological Disposal: Review of Alternative Radioactive Waste Management Options. Rapport NDA/RWM/146, préparé par Radioactive Waste Management Ltd., Royaume-Uni, mars 2017.

(gov.uk)

Sandia, 2009. Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Rapport SAND2009-4401 préparé pour les Sandia National Laboratories par Patrick V. Brady, Bill W. Arnold, Geoff A. Freeze, Peter N. Swift, Stephen J. Bauer, Joseph L. Kanney, Robert P. Rechard et Joshua S. Stein, juillet 2009.

(sandia.gov)

Sandia, 2011a. Generic Repository Design Concepts and Thermal Analysis (FY11). Rapport SAND2011-6202 préparé pour les Sandia National Laboratories par Ernest Hardin, Jim Blink, Harris Greenberg, Mark Sutton, Massimiliano Fratoni, Joe Carter, Mark Dupont et Rob Howard, août 2011.

(sandia.gov)

Sandia, 2011b. Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Rapport SAND2011-6749 préparé pour les Sandia National Laboratories par Bill W. Arnold, Patrick V. Brady, Stephen J. Bauer, Courtney Herrick, Stephen Pye et John Finger, octobre 2011.

(sandia.gov)

Sandia, 2012a. Influence of Nuclear Fuel Cycles on Uncertainty of Long-Term Performance of Geologic Disposal Systems. Rapport SAND2012-6383P, préparé pour la Campagne sur la gestion du combustible irradié du département américain de l'Énergie par Robert P. Rechard, Mark Sutton, James A. Blink, Harris R. Greenberg, M. Sharma et Bruce A. Robinson, juillet 2012.

(sandia.gov)

Sandia, 2012b. Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report. Rapport SAND2012-7789, préparé pour les Sandia National Laboratories par Pat Brady, Bill Arnold, Susan Altman et Palmer Vaughn, septembre 2012.

(sandia.gov)

Sandia, 2012c. Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. Rapport préparé par les Sandia National Laboratories. FCRD-USED-2012-000269, SAND2012-8527P, août 2012.

(energy.gov)

Sandia, 2012d. Site Characterization Methodology for Deep Borehole Disposal. Rapport SAND2012-7981, préparé pour les Sandia National Laboratories par Palmer Vaughn, Bill W. Arnold, Susan J. Altman, Patrick V. Brady et William P. Gardner, septembre 2012.

(sandia.gov)

Sandia, 2013. Deep Borehole Disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and RD&D Needs. Rapport SAND2013-9490P préparé pour la Campagne sur la gestion du combustible irradié du département américain de l'Énergie par Bill W. Arnold, Patrick Brady, Susan Altman, Palmer Vaughn, Dennis Nielson, Joon Lee, Fergus Gibb, Paul Mariner, Karl Travis, William Halsey, John Beswick et Jack Tillman, 25 octobre 2013.

(sandia.gov)

Sandia, 2014a. Deep Borehole Disposal Research: Geological Data Evaluation Alternative Waste Forms and Borehole Seals. Rapport SAND2014-17430R, préparé pour les Sandia National Laboratories par Bill W. Arnold, Patrick Brady, Mark Sutton, Karl Travis, Robert MacKinnon, Fergus Gibb et Harris Greenberg, septembre 2014.

(sandia.gov)

Sandia, 2014b. Project Plan: Deep Borehole Field Test. Rapport SAND2014-18559R, préparé pour la Campagne sur la gestion du combustible irradié du département américain de l'Énergie par les Sandia National Laboratories, septembre 2014.

(sandia.gov)

Sandia, 2015a. Handling and Emplacement Options for Deep Borehole Disposal Conceptual Design. Rapport SAND2015-6218, préparé pour les Sandia National Laboratories par John R. Cochran et Ernest L. Hardin, juillet 2015.

(sandia.gov)

Sandia, 2015b. Deep Borehole Field Test: Characterization Borehole Science Objectives. Rapport SAND2015-4424R, préparé pour les Sandia National Laboratories par Kristopher L. Kuhlman, Patrick V. Brady, Robert J. Mackinnon, W. Payton Gardner, Jason E. Heath, Courtney G. Herrick, Richard P. Jensen, Teklu Hadgu, S. David Sevougian, Jens Birkholzer, Barry M. Freifeld et Tom Daley, juin 2015.

(sandia.gov)

Sandia, 2015c. Conceptual Waste Packaging Options for Deep Borehole Disposal. Rapport SAND2015-6335, préparé pour les Sandia National Laboratories par Jiann-Cherng Su et Ernest L. Hardin, juillet 2015.

(sandia.gov)

Sandia, 2015d. Active Suppression of Drilling System Vibrations for Deep Drilling. Rapport SAND2015-9432, préparé pour les Sandia National Laboratories par David W. Raymond, Stephen Buerger, Avery Cashion, Mikhail Mesh, William Radigan et Jiann-Cherng Su, septembre 2015.

(sandia.gov)

Sandia, 2015e. Deep Borehole Field Test Requirements and Controlled Assumptions. Rapport SAND2015-6009, préparé pour les Sandia National Laboratories par Ernest L. Hardin, juillet 2015.

(sandia.gov)

Sandia, 2016. Deep Borehole Disposal Safety Analysis. Rapport SAND2016-10949R, préparé pour les Sandia National Laboratories par Geoff Freeze, Emily Stein, Laura Price, Robert MacKinnon et Jack Tillman, septembre 2016.
(sandia.gov)

Sandia, 2019. Deep Borehole Disposal Safety Case. Rapport SAND2019-1915, préparé pour les Sandia National Laboratories par Geoff Freeze, Emily Stein, Patrick V. Brady, Carlos Lopez, David Sassani, Karl Travis et Fergus Gibb, février 2019.
(sandia.gov)

Saskatchewan, 2023. « Government of Saskatchewan Funds Microreactor Research », communiqué de presse du gouvernement de la Saskatchewan, 27 novembre 2023.
(saskatchewan.ca)

SaskPower, 2022a. « SaskPower selects the GE-Hitachi BWRX-300 Small Modular Reactor technology for potential deployment in Saskatchewan », communiqué de presse de SaskPower, 27 juin 2022.
(saskpower.com)

SaskPower, 2022b. « Two areas identified for further study to host Small Modular Reactor », communiqué de presse de SaskPower, 20 septembre 2022.
(saskpower.com)

SGDN, 2015a. Some Implications of Recycling CANDU Used Fuel in Fast Reactors. Rapport NWMO-TR-2015-11, préparé par Mihaela Ion, décembre 2015.
(nwmo.ca)

SGDN, 2015b. Preliminary Hazard Assessment of Waste from an Advanced Fuel Cycle. Rapport NWMO-TR-2015-22, préparé par Mark Gobien, décembre 2015.
(nwmo.ca)

SGDN, 2017. Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Crystalline Rock. Rapport NWMO TR-2017-02, décembre 2017.
(nwmo.ca)

SGDN, 2018. Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock. Rapport NWMO-TR-2018-08, décembre 2018.
(nwmo.ca)

SGDN, 2024. Watching brief on advanced fuel cycles and alternative waste management technology – 2023 update, mars 2024.
(nwmo.ca)

SKB, 1989. Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: Feasibility Study and Assessment of Economic Potential. Part I: Geological Considerations. Part II: Overall Facility Plan and Cost Analysis. Rapport TR 89-39, préparé par Svensk Kärnbränslehantering AB, décembre 1989.
(skb.com)

SKB, 1998. The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. Rapport TR 98-05, préparé pour Svensk Kärnbränslehantering par C. Juhlin, T. Wallroth, J. Smellie, T. Eliasson, C. Ljunggren, B. Leijon et J. Beswick, juin 1998.
(skb.com)

SKB, 2000. Very deep borehole: Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. Rapport R-00-35, préparé pour Svensk Kärnbränslehantering par Tim Harrison, mai 2000.
(mkg.se)

- SKB, 2004. Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. Rapport R-04-09, préparé pour Svensk Kärnbränslehantering par John Smellie, janvier 2004.
([skb.com](https://www.skb.com))
- SKB, 2013a. Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock. Rapport P-13-12, préparé pour Svensk Kärnbränslehantering par Niko Marsic et Bertil Grundfelt, septembre 2013.
([skb.com](https://www.skb.com))
- SKB, 2013b. Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. Rapport P-13-13, préparé pour Svensk Kärnbränslehantering par Bertil Grundfelt, juillet 2013.
([skb.com](https://www.skb.com))
- SKB, 2013c. Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes. Rapport P-13-10, préparé pour Svensk Kärnbränslehantering par Niko Marsic et Bertil Grundfelt, septembre 2013.
([skb.com](https://www.skb.com))
- SNETP, 2015. Deployment Strategy. Préparé par Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, décembre 2015.
([snetp.eu](https://www.snetp.eu))
- SNETP, 2021. SNETP Strategic Research and Innovation Agenda. Préparé par Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, juillet 2021.
([snetp.eu](https://www.snetp.eu))
- SNETP, 2023. SNETP Forum Scope 2023, 15 au 17 mai 2023.
([snetp.eu](https://www.snetp.eu))
- SNETP, 2024. SNETP Forum Scope 2024, 17 au 19 avril 2024.
([snetp.eu](https://www.snetp.eu))
- Taylor, R., Bodel, W. et Butler, G., 2022. A Review of Environmental and Economic Implications of Closing the Nuclear Fuel Cycle – Part Two: Economic Impacts. *Energies*, 15, 2472.
(<https://doi.org/10.3390/en15072472>)
- TerraPower, 2024. « TerraPower Begins Construction on Advanced Nuclear Project in Wyoming », communiqué de presse de TerraPower, 10 juin 2024.
(www.terrapower.com/terrapower-begins-construction-in-wyoming)
- Terrell, M., 2024. « New nuclear clean energy agreement with Kairos Power », communiqué de presse de Google, 14 octobre 2024.
(blog.google/outreach-initiatives/sustainability/google-kairos-power-nuclear-energy-agreement)
- U.S. DOE, 2014. Assessment of Disposal Options for DOE-Managed High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel. Octobre 2014.
([energy.gov](https://www.energy.gov))
- U.S. DOE, 2016. « Energy Department selects Battelle team for a deep borehole field test in North Dakota », communiqué de presse du département américain de l'Énergie, 5 janvier 2016.
([energy.gov](https://www.energy.gov))
- U.S. DOE, 2017. « Studying the feasibility of deep boreholes », communiqué de presse du département américain de l'Énergie, 19 décembre 2016 (mise à jour du 23 mai 2017).
([energy.gov](https://www.energy.gov))

U.S. DOE, 2023. Pathways to Commercial Liftoff: Advanced Nuclear. Rapport du département américain de l'Énergie, mars 2023.

(energy.gov)

U.S. NWTRB, 2016. Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. Préparé pour le Congrès des États-Unis et le secrétaire de l'Énergie des États-Unis par le United States Nuclear Waste Technical Review Board, janvier 2016.

(nwtrb.gov)

USNC, 2024. « Ultra Safe Nuclear Corporation ("USNC") Files Chapter 11 Petition to Facilitate Sale », communiqué de presse d'Ultra Safe Nuclear Corporation, 29 octobre 2024.

(www.usnc.com)

von Hippel, D. et Hayes, P., 2010. Deep Borehole Disposal of Nuclear Spent Fuel and High Level Waste as a Focus of Regional East Asia Nuclear Fuel Cycle Cooperation. Préparé pour le Nautilus Institute Australia, décembre 2010.

(nautilus.org)

WNA, 2023. Supply of Uranium. Préparé par World Nuclear Association (mise à jour d'août 2023).

(world-nuclear.org)

WNA, 2024. World Nuclear Association Symposium 24, organisé par la WNA, 4 au 6 septembre 2024, Londres, Royaume-Uni.

(www.wna-symposium.org)

WNN, 2021a. « Estonia's geology suitable for deep borehole repository », article de World Nuclear News, 1^{er} février 2021.

(world-nuclear-news.org)

WNN, 2021b. « Slovenia considers deep borehole disposal », article de World Nuclear News, 31 août 2021.

(world-nuclear-news.org)

WNN, 2024a. « France sets out long-term nuclear recycling plans », article de World Nuclear News, 8 mars 2024.

(world-nuclear-news.org)

WNN, 2024b. « French reactor using full core of recycled uranium fuel », article de World Nuclear News, 1^{er} mars 2024.

(world-nuclear-news.org)

Pour plus d'informations,
veuillez contacter :

Société de gestion des déchets nucléaires

22, avenue St. Clair Est, 4^e étage

Toronto (ON) M4T 2S3, Canada

Tél. : 416.934.9814 Sans frais : 1.866.249.6966

Courriel : contactus@nwmoc.ca

Site Web : nwmoc.ca

   @LaSGDN

 /company/nwmocanada

© 2025 Société de gestion des déchets nucléaires

