

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 le concept de stockage en forages profonds. Les principales conclusions sont que :

- » Les nouveaux cycles de combustible et le concept du forage à très grande profondeur 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 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.
- » 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 techniques détaillés précédents [Jackson, 2008, 2009, 2010] et les résumés des rapports de suivi [p. ex., SGDN, 2020] peuvent être consultés sur le site Web de la SGDN.

En 2021, 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 (RST) 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 converti en combustible afin d'être réutilisé dans un réacteur CANDU (la Chine prévoit 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).

Presque tous les réacteurs nucléaires commerciaux actuellement exploités dans le monde sont 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 – ces 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 fissile (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 soit utilisé de manière efficace. Les RNR n'utilisent pas de modérateur et leur technologie est plus complexe. Le tableau 1 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.). Dans le cas de l'U-238, cela s'effectue en convertissant premièrement l'U-238 en Pu-239 par le biais de la capture neutronique et de la désintégration radioactive subséquente, puis en provoquant la fission du Pu-239 par un autre neutron. 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	560	En exploitation depuis 1980 – type à cuve de sodium
	BN-800	880	En exploitation depuis 2016 – type à cuve de sodium
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, le Royaume-Uni, la 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. 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 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.

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				✓	✓
Belgique				✓	✓
Canada					✓
Chine ⁽³⁾		✓			✓ ⁽⁴⁾
Espagne					✓
États-Unis ⁽³⁾				✓	✓
Fédération de Russie	✓				
Finlande				✓ ⁽⁷⁾	✓
France ⁽³⁾	✓ ⁽²⁾				
Hongrie				✓ ⁽⁷⁾	✓
Inde ⁽³⁾	✓				
Japon		✓ ⁽⁶⁾	✓		
Mexique					✓
Pakistan ⁽³⁾					
Pays-Bas			✓ ⁽⁵⁾		
Rép. de Corée					✓
République tchèque				✓ ⁽⁷⁾	✓
Roumanie					✓
Royaume-Uni ⁽³⁾	✓ ⁽¹⁾			✓	✓
Slovaquie				✓ ⁽⁷⁾	✓
Slovénie					✓
Suède				✓	✓
Suisse				✓	✓
Ukraine				✓ ⁽⁷⁾	✓

(1) Le Royaume-Uni cesse toutes ses opérations de retraitement au terme des contrats en vigueur, soit en 2021. La première installation a été fermée en 2018 aux fins de déclassement.

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

(3) La Chine, la France, le Royaume-Uni, la 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.

(4) La Chine prévoit stocker directement son combustible irradié de type CANDU dans un dépôt. Elle prévoit réutiliser une partie de son combustible de REL dans ses réacteurs CANDU.

(5) 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.

(6) Installation d'échelle commerciale construite à Rokkasho-mura et en phase d'essais.

(7) 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.

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

Pays	Installation	Capacité (tonnes par année)	État
Chine	Gansu	200	En construction (achèvement prévu vers 2030)
France	UP1, Marcoule	600	Fermée/en déclassé
	UP2-400, La Hague	400	Fermée/en déclassé
	UP2-800, La Hague	800	En exploitation
	UP3, La Hague	800	En exploitation
Inde	(4 installations)	~330 (total)	En exploitation
Japon	Tokai	90	Fermée/en déclassé
	Rokkasho	800	En cours de mise en service (démarrage prévu vers 2022)
Fédération de Russie	RT-1, Mayak	400	En exploitation (fermeture prévue vers 2030)
	MCC, Zheleznogorsk	60	En exploitation
	RT-2, Zheleznogorsk	700	En construction (achèvement prévu vers 2025)
Royaume-Uni	MAGNOX, Sellafield	1,500	En exploitation (fermeture prévue à la fin de 2021)
	THORP, Sellafield	900	Fermée en 2018
États-Unis	West Valley	300	Exploitée de 1966 à 1972, déclassée

Cycles de combustible avancés

Les principaux cycles de combustible avancés qui revêtent un intérêt sont les combustibles fermés (bien que des cycles à recyclage partiel soient actuellement utilisés de manière limitée). Ces cycles de combustible avancés ont un intérêt parce qu'ils utilisent le combustible d'uranium de manière très efficace. En particulier, certains cycles de combustible avancés 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 avancés 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 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 mégawatt d'électricité généré. Cela peut diminuer la quantité de roche à excaver par mégawatt 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 mégawatt généré. 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 séparer les produits de fission à vie plus courte et stocker préalablement les déchets en surface pendant une longue période pour laisser suffisamment décroître les radionucléides qui dégagent de la chaleur. Même dans ce cas, la diminution de l'espace de stockage requis pour les déchets de haute activité peut être neutralisée par l'augmentation de la quantité de déchets de moyenne activité à vie longue générés par ces cycles de combustible [RED-IMPACT, 2008].

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 [Kessler et coll., 2012; Sandia, 2012a; Posiva, 2013; EASAC, 2014; SGDN, 2017, 2018]. Ces produits de fission à vie longue ne sont généralement pas réduits dans les cycles de combustible avancés. De plus, recycler le combustible pour produire davantage d'électricité aboutit au total à une plus grande quantité de produits de fission, qui correspond approximativement à la quantité totale d'électricité produite, quel que soit le cycle de combustible employé.

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] pour une description de divers prototypes de RNR et pour un historique de leur exploitation.

Ces facteurs ont été abordés dans divers examens nationaux, 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 :

- » Aux États-Unis, après que la décision a été prise de mettre un terme au processus de demande de permis pour le dépôt de Yucca Mountain, la Commission Blue Ribbon sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis (BRC) a mené en 2010 et 2011 une étude exhaustive sur les options de gestion de l'aval du cycle du combustible nucléaire aux États-Unis. Dans son rapport final [U.S. BRC, 2012], la BRC a affirmé que « ... l'évacuation est nécessaire et que l'évacuation en couches géologiques profondes constitue l'approche la mieux fondée sur le plan scientifique et la solution à laquelle sont parvenus tous les comités d'experts qui ont examiné la question et tous les pays dotés d'un programme de gestion des déchets nucléaires ».
- » Un examen exhaustif des options possibles de gestion du combustible irradié mené en 2013 pour la Corée stipule ceci : « ... il n'y a aucun motif de considérer la séparation et la transmutation comme une

option de rechange à l'évacuation géologique directe, aucune donnée ne permet de penser que les systèmes de séparation et de transmutation conventionnels pourraient, même s'ils pouvaient être mis en oeuvre, éliminer la nécessité de recourir à l'évacuation géologique en profondeur ou même rendre l'évacuation substantiellement plus facile ou plus sûre » [MIIIS, 2013].

- » La Commission royale australienne sur le cycle de combustible nucléaire a déclaré que « selon le consensus international, le stockage géologique en profondeur est la meilleure solution disponible pour la gestion à long terme du combustible irradié » [Gouvernement de l'Australie du Sud, 2016].

À noter que l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) a récemment déclaré dans sa note d'orientation sur le stockage des déchets radioactifs publiée en juin 2020 (Policy Brief on the disposal of radioactive waste) qu'« il y a un solide consensus scientifique international voulant que la solution du dépôt géologique en profondeur (DGP) constitue une approche sûre et efficace pour le stockage permanent des déchets de haute activité et du combustible nucléaire irradié » [AEN/OCDE, 2020a].

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 2021 lors de diverses conférences internationales et réunions techniques tenues en personne et virtuellement, notamment :

- » Le 10^e Symposium international sur les réacteurs à eau supercritique, ISSCWR-10 (mars 2021, Prague, République tchèque) [CVŘ, 2021];
- » La 28^e Conférence internationale sur le génie nucléaire, ICON28 (août 2021, virtuel) [ICONE, 2021];
- » Le Symposium de la World Nuclear Association (septembre 2021, virtuel) [WNA, 2021];
- » L'événement TopFuel 2021 (octobre 2021, Santander, Espagne) [ENS, 2021];
- » Le Congrès international 2021 sur les progrès liés aux centrales nucléaires, ICAPP 2021 (octobre 2021, EAU, virtuel) [ICAPP, 2021];
- » La Conférence internationale sur la gestion des déchets radioactifs : Solutions pour un avenir durable, 1^{er} au 5 novembre 2021, Vienne, Autriche) [AIEA, 2021a];
- » Le Sommet virtuel G4SR-3 de la Société nucléaire canadienne (novembre 2021, Canada) [SNC, 2021].

La SGDN assure un suivi des présentations données à l'occasion de ces conférences virtuelles ainsi que des rapports techniques publiés par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN/OCDE) [p. ex., AEN/OCDE, 2011-2021c], l'Agence internationale de l'énergie atomique [p. ex., AIEA, 2012-2021b], le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA, France) [p. ex., CEA, 2015], la Nuclear Regulatory Commission des États-Unis [U.S. NRC, 2012], l'Electric Power Research Institute [p. ex., EPRI, 2015-2017], l'agence Radioactive Waste Management du Royaume-Uni [RWM, 2017] et divers projets de collaboration internationale (comme les projets European Sustainable Nuclear Energy Technology Platform [SNETP, 2012-2018], Advanced Fuels for Generation IV Reactors: Reprocessing and Dissolution [ASGARD, 2016] et GEN IV Integrated Oxide Fuels Recycling Strategies [GENIORS, 2017]).

Le personnel de la SGDN a également préparé des rapports techniques et des exposés de conférences connexes décrivant les incidences potentielles des cycles de combustible avancés sur les inventaires canadiens de combustible irradié et les besoins de gestion à long terme qui en découlent [SGDN, 2015a,b; Ion, 2016; Gobien, 2016].

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 liée 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 [AIEA, 2019, 2020d, 2020e], [GIF, 2018]. 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 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.

Bien qu'un grand nombre de conceptions de PRM aient été proposées [AIEA, 2020d], 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). Outre les PRM figurant au tableau 4, deux fournisseurs (Westinghouse Electric Company, LLC et StarCore Nuclear) ont également demandé à la CCSN de conclure des ententes de service afin d'évaluer leurs concepts (coeur solide et tuyaux caloripoteurs pour le microréacteur eVinci, et gaz haute température pour le module StarCore, respectivement) [CCSN, 2021].

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 pour les 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].

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, qui est le seul site actuellement autorisé au Canada pour la construction de nouveaux réacteurs nucléaires [OPG, 2021].

En 2019, Global First Power, Ultra Safe Nuclear Corporation et OPG ont formé une coentreprise pour posséder et exploiter le projet de microréacteur modulaire à Chalk River [GFP, 2020a]. Global First Power a présenté à la CCSN une demande initiale de permis de préparation de l'emplacement, et l'examen réglementaire est en cours [GFP, 2019a, 2019b].

Tableau 4 : PRM en cours d'évaluation au Canada

Réacteur	Fournisseur	Combustible/ réfrigérant	Type	État d'avancement de l'examen de la conception du fournisseur de la CCSN [CCSN, 2021]
ARC-100	ARC Nuclear Canada Inc.	Métal/sodium liquide	Réacteur à neutrons rapides	Phase 1 terminée
MMR-5, MMR-10	Ultra Safe Nuclear Corporation	Oxyde enrobé, dans une pastille de SiC/hélium	Réacteur ther- mique	Phase 1 terminée Phase 2 en cours Global First Power a présenté une demande de permis de préparation d'un emplacement
SSR	Moltex Energy	Sel en fusion/sel en fusion	Réacteur à neutrons rapides	Phase 1 terminée
IMSR	Terrestrial Energy Inc.	Sel en fusion/sel en fusion	Réacteur thermique	Phase 1 terminée Phase 2 en cours
Xe-100	X-energy, LLC	Oxyde enrobé, dans une bille de graphite/hélium	Réacteur thermique	Phase 2 en cours
BWRX-300	GE-Hitachi Nuclear Energy	UO ₂ /eau légère	Réacteur thermique	Phase 2 en cours Le BWRX-300 a été choisi par OPG pour être déployé sur le site de Darlington
SMR-160	SMR, LLC (filiale de Holtec International)	UO ₂ /eau légère	Réacteur thermique	Phase 1 terminée
NuScale	NuScale Power, LLC	UO ₂ /eau légère	Réacteur thermique	Phase 2 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].

Bruce Power et Westinghouse ont annoncé la conclusion d'une entente visant à poursuivre les applications du programme de microréacteur eVinci^{MC} proposé par Westinghouse au Canada [Bruce Power, 2020]. 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) cherche à établir des partenariats avec des promoteurs de technologies de PRM pour mettre au point, promouvoir et démontrer ce type de technologie au Canada [LNC, 2017]. En ce moment, quatre promoteurs en sont à divers stades de l'évaluation des LNC [LNC, 2019; GFP, 2020b]. Les LNC ont également conclu des partenariats avec des concepteurs de PRM pour la réalisation de recherches sur les combustibles de PRM et les technologies avancées de PRM au Canada [LNC, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d]. Les LNC ont récemment lancé un appel à propositions pour la troisième ronde de son programme d'Initiative canadienne de recherche nucléaire (ICRN), qui a été établie pour accélérer le déploiement des PRM et des réacteurs avancés, y compris les concepts de PRM [LNC, 2021].

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 (UO_2) enrobé (Ultra Safe Nuclear Corporation), des billes de graphite contenant du dioxyde d'uranium ou du carbure d'uranium (UO_2/UC) enrobé (X-energy) ou de l' UO_2 (BWRX-300, SMR-160 et NuScale). Aux fins de comparaison, le combustible CANDU actuel est de l' UO_2 .

Le point sur le retraitement

Les cycles de combustible avancés nécessitent un type ou un autre de retraitement. La technologie commerciale actuelle de retraitement employée par les installations énumérées dans le tableau 1 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. Des descriptions du procédé utilisé sont fournies dans la littérature technique, par exemple dans [AEN/OCDE, 2012b].

Puisque le combustible nucléaire irradié est hautement radioactif, tout cela doit se faire à l'aide de systèmes télécommandés lourdement blindés. 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 radioactifs secondaires qui devront être stabilisés avant d'être entreposés, puis finalement stockés dans un dépôt [MIT, 2011; MIRS, 2013].

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 aux combustibles métalliques et à base de sels. 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 Integral Fast Reactors et PRISM [Triplett et coll., 2012] et 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, 2021b, et Iizuka et coll. dans [AEN/OCDE, 2012a].) La Corée mène depuis un certain temps des études de démonstration à l'échelle de laboratoire ainsi qu'à l'échelle de l'ingénierie [AEN/OCDE, 2019c].

Moltex Energy propose d'utiliser une forme de pyrotraitement, appelée WATSS (Waste To Stable Salts), pour convertir un combustible usé à base d'oxyde en un combustible à base de sel pour son Stable Salt Reactor (SSR). Une caractéristique particulière de ce concept de SSR 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. Actuellement, des recherches et de la planification pour le développement et la démonstration inactive du procédé WATSS sont en cours.

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, 2013a] 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 l'heure actuelle. Le coût du cycle de vie comprend les coûts de développement, de construction, d'exploitation, d'entretien, de déclasserment 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, fournit un ensemble exhaustif de données liées aux coûts, aux processus et aux structures; ces informations sous-tendent l'évaluation actuellement menée par le Département américain de l'énergie sur les cycles de combustible nucléaire avancés [INL, 2017].

Une étude technique commandée par le gouvernement de l'Ontario [LNC, 2016] examinait divers scénarios de recyclage du combustible irradié des réacteurs CANDU ontariens, y compris la réutilisation du combustible dans les réacteurs CANDU actuels et divers scénarios impliquant des RNR. 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 à vie longue et thermogènes qui devront aussi être stockés un jour dans un dépôt géologique en profondeur. Bien que les options offertes par les cycles de combustible avancés permettent de produire à long terme une quantité appréciable d'électricité de base à faibles émissions de carbone, elles obligent la province à s'engager sur cette voie technologique pour un siècle ou plus.

Hormis le coût, le temps requis pour s'approvisionner en quantités suffisantes de plutonium pour démarrer et exploiter les RNR doit aussi être prise en considération. Dans la plupart des scénarios étudiés (par exemple en France et au Japon), il faudra au moins des décennies pour effectuer la transition entre les réacteurs thermiques et les RNR, et une période supplémentaire de plusieurs centaines d'années, voire davantage, pour consommer le combustible irradié issu des REL actuels, en supposant qu'un parc important de RNR est construit. (Voir par exemple [MIT, 2011], [AEN/OCDE, 2012a, 2013b] et [EASAC, 2014].) Cette longue période de transition permettra aux futures générations d'avoir accès à des quantités importantes d'énergie à faibles émissions de carbone, mais elle leur impose l'obligation d'exploiter et de maintenir un programme d'énergie nucléaire (comprenant le remplacement périodique du parc nucléaire et des installations associées au cycle du combustible).

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. Plus d'un 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.

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 et la disponibilité de faisceaux continus de neutrons de forte puissance constitue actuellement un facteur contraignant clé. 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].

Le point sur le stockage en forages très profonds

Une des solutions de remplacement possibles pour la gestion des déchets que la SGDN surveille est le stockage du combustible irradié dans des forages très profonds. Ce concept a été examiné dans le cadre de dossiers de suivi précédents [Jackson, 2008, 2009, 2010] et le rapport de suivi actuel résume certaines recherches et activités de développement menées récemment au regard de la technologie des forages très profonds.

Le concept consiste 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 les uns sur 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 forés.

Le concept du stockage en forages très profonds a été étudié comme solution de remplacement à un dépôt géologique en profondeur aux États-Unis [Sandia, 2009-2019; U.S. BRC, 2012; U.S. NWTRB, 2016; Deep Isolation, 2020], en Suède [SKB, 1989-2013; KASAM, 2007], au Royaume-Uni [NIREX, 2004] et ailleurs dans le monde [von Hippel et Hayes, 2010; Chapman, 2013]. Le concept des forages très profonds est envisagé pour le stockage souterrain des petits inventaires de déchets de moyenne et de haute activité [AIEA, 2017c, 2020f; 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].

Le Département de l'énergie des États-Unis (U.S. DOE) a entrepris des études en 2009 sur le concept des forages très profonds en vue du stockage des assemblages de combustible irradié des réacteurs de centrales nucléaires américaines. Des études initiales publiées par les Sandia National Laboratories ont présenté une évaluation préliminaire du concept [Sandia, 2009] et une conception de référence [Sandia, 2011]. 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.

Une évaluation préliminaire de l'efficacité du concept a conclu que l'I-129 serait le seul radionucléide à atteindre la biosphère en quantités substantielles. Le débit de dose individuel maximal estimé serait beaucoup moins élevé que 1 nSv/a et surviendrait 8000 ans après la fermeture des forages en profondeur.

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, 2014a,b; U.S. NWTRB, 2016]. Le Deep Borehole Field Test Program devait se poursuivre jusqu'en 2020. Il comprenait la conception, la sélection d'un site et la réalisation d'au moins un forage non radioactif à pleine échelle percé à une profondeur de 5 kilomètres [Sandia, 2012c, 2015a,b]. L'essai visait à mettre à l'épreuve les méthodes de caractérisation des sites, de construction, de mise en place (de colis de déchets factices non radioactifs), de scellement et de surveillance. 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 importante opposition locale et le permis de forage nécessaire n'a pas été accordé. Le projet a été discontinué en 2017 [U.S. DOE, 2017].

Les trois principaux problèmes liés au concept du stockage en forages très profonds sont 1) dans plusieurs des conceptions étudiées, les colis de déchets sont soumis à une pression élevée parce qu'ils sont empilés les uns sur les autres, 2) il est douteux que les colis puissent être récupérés et 3) la surveillance à long terme serait difficile.

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 sédimentaire, ignée ou métamorphique, 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 et a réalisé un essai public de démonstration 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].

Jusqu'ici, un certain nombre d'études ont conclu que des forages très profonds pourraient potentiellement avoir des avantages techniques comparativement à un dépôt géologique excavé pour certains types de déchets de haute activité, comme un meilleur isolement potentiel des déchets et une possible réduction de la mobilité des radionucléides en raison de la plus grande profondeur de stockage. Ce concept serait aussi modulaire et flexible, parce que la capacité de stockage pourrait être facilement accrue simplement en réalisant des forages supplémentaires une fois qu'un emplacement serait trouvé.

Bien que le concept soit considéré comme techniquement faisable, l'approche présente certains défis d'importance :

- » Les connaissances sont limitées sur l'environnement géologique à la profondeur de stockage des déchets;
- » La faisabilité de la réalisation de forages au diamètre et à la profondeur requis n'a pas encore été démontrée;
- » La mise en place contrôlée des colis de déchets (p. ex., les problèmes techniques 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, voire impossible.

Globalement, l'United States Nuclear Waste Technical Review Board [U.S. NWTRB, 2016] a conclu que même si la faisabilité des forages profonds avait été démontrée pour certains types de déchets, ils n'élimineraient pas la nécessité de construire un dépôt géologique excavé. De plus, il a conclu que le temps nécessaire pour développer une installation de forages en profondeur serait comparable au temps requis pour construire un dépôt excavé conventionnel, puisque les étapes de sélection des emplacements, de caractérisation des sites et d'obtention de permis seraient relativement longues.

La SGDN continuera de surveiller les activités de recherche-développement liées au concept des forages très 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 et le concept du forage à très grande profondeur 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 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.
- » 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, 2011. Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation, Rapport n° 6894 préparé par l'AEN de l'OCDE, septembre 2011.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2012a. Homogeneous Versus Heterogeneous Recycling of Transuranics in Fast Nuclear Reactors. Rapport 7077 préparé par l'AEN de l'OCDE, décembre 2012.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2012b. Spent Nuclear Fuel Reprocessing Flowsheet. Rapport NEA/NSC/WPFC/DOC(2012)15 préparé par l'AEN de l'OCDE, juin 2012.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2013a. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. Rapport 7061 préparé par l'AEN de l'OCDE, septembre 2013.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2013b. Transition Towards a Sustainable Nuclear Fuel Cycle. Rapport 7133 préparé par l'AEN de l'OCDE, juillet 2013.
(www.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.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2015b. Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle. Rapport 7224 préparé par l'AEN de l'OCDE, juin 2015.
(www.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.
(www.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.
(www.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.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2019b. Proceedings of the Nuclear Energy Agency International Workshop on Chemical Hazards in Fuel Cycle Facilities Nuclear Processing. Atelier organisé par l'AEN de l'OCDE, 17 au 19 avril 2018, Boulogne-Billancourt, France. NEA/CSNI/R(2019)9 et NEA/CSNI/R(2019)9/ADD1, mai 2019.
(www.oecd-nea.org)
- 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 l'Agence pour l'énergie nucléaire, Comité de sciences nucléaires, février 2019.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2020a. NEA Policy Brief: Final Disposal of Radioactive Waste, juin 2020.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2020. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, Note de synthèse, août 2020.
(www.oecd-nea.org)

- AEN/OCDE, 2021a. Strategies and Considerations for the Back End of the Fuel Cycle, février 2021.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2021b. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, avril 2021.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2021c. Advanced Nuclear Reactor Systems and Future Energy Market Needs, décembre 2021.
(www.oecd-nea.org)
- AIEA, 2012. Status of Fast Reactor Research and Technology Development. Rapport IAEA-TECDOC-1691 préparé par l'AIEA, décembre 2012.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2013. Design Features and Operating Experience of Experimental Fast Reactors. Rapport NP-T-1.9 préparé par l'AIEA, novembre 2013.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2017a. Use of Low Enriched Uranium Fuel in Accelerator Driven Subcritical Systems. Rapport IAEA-TECDOC-1821 préparé par l'AIEA, août 2017.
(www.iaea.org)
- AIEA, 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.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2017c. Selection of Technical Solution for the Management of Radioactive Waste. Rapport IAEA-TECDOC-1817 préparé par l'AIEA, juillet 2017.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2018. Experimental Facilities in Support of Liquid Metal Cooled Fast Reactors. Rapport NP-T-1.15 préparé par l'AIEA, octobre 2018.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2019. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. A Preliminary Study. Rapport NW-T-1.7 préparé par l'AIEA, juillet 2019.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2020a. Understanding and Prediction of Thermohydraulic Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs). Rapport IAEA-TECDOC-1900 préparé par l'AIEA, février 2020.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2020b. Passive Shutdown Systems for Fast Neutron Reactors. Rapport IAEA-NR-T-1.16 préparé par l'AIEA, mars 2020.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2020c. Challenges for Coolants in Fast Neutron Spectrum Systems. Rapport IAEA-TECDOC-1912 préparé par l'AIEA, mai 2020.
(www.iaea.org)
- AIEA, 2020d. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), édition 2020, septembre 2020.
(aris.iaea.org)
- AIEA, 2020e. ARIS – Advanced Reactors Information System. Base de données tenue par l'AIEA, novembre 2020.
(aris.iaea.org)
- AIEA, 2020f. Underground Disposal Concepts for Small Inventories of Intermediate and High Level Radioactive Waste. Rapport IAEA-TECDOC-1934 préparé par l'AIEA, décembre 2020.
(www.iaea.org)

- AIEA, 2021a. International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future, 1 au 5 novembre 2021, Vienne, Autriche.
(www.iaea.org/events/international-conference-on-radioactive-waste-management-2021)
- AIEA, 2021b. Status and Trends in Pyroprocessing of Spent Nuclear Fuels. Rapport IAEA-TECDOC-1967, préparé par l'AIEA, août 2021.
(www.iaea.org)
- ARPANSA, 2008. Predisposal Management of Radioactive Waste. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency Safety Guide, Radiation Protection Series, n° 16, août 2008.
(www.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.
(www.arpansa.gov.au/sites/default/files/7th_national_report_to_the_joint_convention.pdf)
- ASGARD, 2016. Final Report Summary – ASGARD (Advanced Fuels for Generation IV Reactors: Reprocessing and Dissolution), Suède.
(www.asgardproject.eu)
- Bruce Power, 2018a. « Bruce Power signs \$1 million MOU for sustainable energy research group », communiqué de presse de Bruce Power, 6 avril 2018.
(www.brucepower.com)
- Bruce Power, 2018b. « Bruce and NuScale collaborate on Canadian SMR business case », communiqué de presse de Bruce Power, 27 novembre 2018.
(www.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.
(www.brucepower.com)
- CCSN, 2021. Examens de la conception de fournisseurs préalables à l'autorisation.
(www.nuclearsafety.gc.ca/fra/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm)
- 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 le CEA, juin 2015.
(www.cea.fr)
- Chapman, 2013. Deep Borehole Disposal of Spent Fuel and Other Radioactive Wastes. Rapport préparé pour le Nautilus Institute par Neil A. Chapman, juillet 2013.
(www.nautilus.org)
- Cheng et coll., 2018. Phenomena Important in Liquid Metal Reactor Simulations. Rapport préparé pour la U.S. Nuclear Regulatory Commission par Lap-Yan Cheng, Michael Todosow et David Diamond, BNL-207816-2018-INRE, août 2018.
(www.nrc.gov/docs/ML1829/ML18291B305.pdf)
- CSA, 2021. The Role of Standards in Facilitating Deployment of SMRs in Canada. Rapport produit par Hatch Ltd. pour le Groupe CSA, août 2021.
(www.csagroup.org)
- CVŘ, 2021. The 10th International Symposium on Supercritical-Water-Cooled Reactors (ISSCWR-10), 15 au 18 mars 2021, Prague, République tchèque.
(www.isscwr2021.com)
- Deep Isolation, 2019. « Private company successfully demonstrates deep geologic disposal of prototype nuclear waste canister », communiqué de presse de Deep Isolation, 16 janvier 2019.
(www.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.
(www.deepisolation.com/technology/safety-calculations)
- EASAC, 2014. Management of Spent Nuclear Fuel and its Waste. Rapport d'orientation n° 23 de l'EASAC préparé par le Comité consultatif scientifique des Académies européennes, juillet 2014.
(www.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.
(www.nbpower.com)
- ENS, 2021. TopFuel 2021, 24 au 28 octobre 2021, Santander, Espagne.
(ens.eventsair.com/topfuel-2021)
- EPRI, 2015. Program on Technology Innovation: Technology Assessment of a Molten Salt Reactor Design. Rapport 3002005460 de l'Electric Power Research Institute, octobre 2015.
(www.epri.com)
- EPRI, 2016. Program on Technology Innovation: Assessment of Nuclear Fuel Cycle Simulation Tools. Rapport 3002008044 de l'Electric Power Research Institute, novembre 2016.
(www.epri.com)
- EPRI, 2017. Program on Technology Innovation: Dynamic Nuclear Fuel Cycle Modeling for Evaluating Liquid-Fueled Molten Salt Reactor Designs. Rapport 3002010474 de l'Electric Power Research Institute, septembre 2017.
(www.epri.com)
- GENIORS, 2017. Gen IV Integrated Oxide Fuels Recycling Strategies.
(www.geniors.eu)
- GFP, 2019a. Demande initiale de permis de préparation d'un emplacement : Centrale nucléaire à MRM à Chalk River. Rapport CRP-LIC-01-002 de Global First Energy. Document CRP-LIC-01-001 de Global First Energy, juin 2019.
(www.globalfirstpower.com)
- GFP, 2019b. Description du projet de microréacteur modulaire^{MC} à Chalk River. Document CRP-LIC-01-001 de Global First Energy, juillet 2019.
(www.globalfirstpower.com)
- GFP, 2020a. « GFP, USNC and OPG form joint venture to own, operate Micro Modular Reactor Project at Chalk River », communiqué de presse de GFP, 9 juin 2020.
(www.globalfirstpower.com)
- GFP, 2020b. « Canada's first Small Modular Reactor Project achieves new milestone. Signing of project host agreement cements Global First Power as leading SMR project in Canada », communiqué de presse de GFP, 18 novembre 2020.
(www.globalfirstpower.com)
- GIF, 2018. Generation IV International Forum.
(www.gen-4.org)
- Gobien, 2016. Some Implications of Recycling Used CANDU Fuel in Fast Reactors, article préparé par M. Gobien, SGDN, présenté à la 14^e Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, réunion organisée par l'AEN de l'OCDE, 6 au 9 septembre 2016, San Diego, États-Unis.
(www.oecd-nea.org/pt/iempt14)
- Gouvernement de l'Australie du Sud, 2016. Royal Commission Report into the Nuclear Fuel Cycle, mai 2016.
(yoursay.sa.gov.au/pages/nuclear-fuel-cycle-royal-commission-report-release)

- ICAPP, 2021. 2021 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, 16 au 20 octobre 2021, EAU. Événement virtuel.
(www.icapp2021.org)
- ICONE, 2021. 28th International Conference on Nuclear Engineering. Événement organisé par l'American Society of Mechanical Engineers, la Société japonaise des ingénieurs mécaniques et la Société nucléaire chinoise, 4 au 6 août 2021. Événement virtuel.
(event.asme.org/ICONE-2021)
- INL, 2017. Advanced Fuel Cycle Cost Basis – édition 2017. Rapport INL/EXT-17-43826, NTRD-FCO-2017-000265 préparé par l'Idaho National Laboratory pour la campagne du Département américain de l'énergie sur les options liées au cycle du combustible, septembre 2017.
(www.inl.gov)
- Ion, 2016. Some Implications of Recycling Used CANDU Fuel in Fast Reactors. Exposé préparé par M. Ion, SGDN, présenté dans le cadre de la 3^e conférence canadienne sur la gestion des déchets nucléaires, le déclasserment et la restauration environnementale, organisé par la Société nucléaire canadienne, 11 au 14 septembre 2016, Ottawa, Canada.
(www.nwmdcr2016.org)
- Jackson, 2008. Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation and Alternative Waste Management Technology – Annual Report 2008. Rapport préparé pour la SGDN par David P. Jackson & Associates, NWMO TR-2008-22, décembre 2008.
(www.nwmo.ca)
- Jackson, 2009. Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation (RP&T) and Alternative Waste Management Technology – Annual Report 2009. Rapport préparé pour la SGDN par David P. Jackson & Associates, NWMO TR-2009-32, décembre 2009.
(www.nwmo.ca)
- Jackson, 2010. Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation (RP&T) and Alternative Waste Management Technology – Annual Report 2010. Rapport préparé pour la SGDN par David P. Jackson & Associates, NWMO TR-2010-24, décembre 2010.
(www.nwmo.ca)
- KASAM, 2007. Deep boreholes: An alternative for final disposal of spent nuclear fuel? Rapport 2007:6e du Conseil national suédois pour les déchets nucléaires, décembre 2007.
(www.karnavfallsradet.se)
- Kessler et coll., 2012. "Radiotoxicity Index": An Inappropriate Discriminator for Advanced Fuel Cycle Technology Selection. Document 12276 présenté par John Kessler, Michael Apted, Matthew Kozak, Mark Nutt, Andrew Sowder et Peter Swift dans le cadre de la Conférence 2012 sur la gestion des déchets. 26 février au 1^{er} mars 2012, Phoenix, Arizona, États-Unis.
(www.wmsym.org)
- LNC, 2016. A Feasibility Study on the Recycling of Used CANDU Fuel, rapport n° 153-124900-REPT-002. Préparé par les LNC, avril 2016.
(www.ontarioenergyreport.ca)
- LNC, 2017. Petits réacteurs modulaires.
(www.cnl.ca/fr/home/installations-et-expertise/prm/default.aspx)
- LNC, 2019. « Technology developers advance in CNL's process to site a small modular reactor », communiqué de presse des LNC, 29 juillet 2019.
(www.cnl.ca)
- LNC, 2020a. « CNL & USNC partner on SMR fuel research », communiqué de presse des LNC, 26 février 2020.
(www.cnl.ca)

- LNC, 2020b. « Canadian Nuclear Laboratories and NB Power sign collaboration agreement to advance small modular reactors », communiqué de presse des LNC, 27 février 2020.
(www.cnl.ca)
- LNC, 2020c. « CNL & Moltex Energy partner on SMR fuel research », communiqué de presse des LNC, 23 avril 2020.
(www.cnl.ca)
- LNC, 2020d. « CNL and Terrestrial Energy partner on SMR fuel research », communiqué de presse des LNC, 15 septembre 2020.
(www.cnl.ca)
- LNC, 2021. « Les LNC lancent un appel de propositions pour l'initiative canadienne de recherche nucléaire », communiqué de presse des LNC, 29 septembre 2021.
(www.cnl.ca)
- MIIS, 2013. The Bigger Picture: Rethinking Spent Fuel Management in South Korea. James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey Institute of International Studies, Rapport ponctuel n° 16, mars 2013.
(cns.miis.edu/opapers/pdfs/130301_korean_alternatives_report.pdf)
- MIT, 2011. The Future of the Nuclear Fuel Cycle – An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology, avril 2011.
(energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/04/MITEI-The-Future-of-the-Nuclear-Fuel-Cycle.pdf)
- NIREX, 2004. A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste. Rapport préparé par Safety Assessment Management Ltd. pour le Nirex britannique. Rapport du Nirex N/108, juin 2004.
(www.nda.gov.uk)
- OPG, 2020. « OPG resumes planning activities for Darlington New Nuclear », communiqué de presse d'OPG, 13 novembre 2020.
(www.opg.com)
- OPG, 2021. « OPG advances clean energy generation project », communiqué de presse d'OPG, 2 décembre 2021.
(www.opg.com)
- OPG, Bruce Power, Énergie NB et SaskPower, 2021. Feasibility of Small Modular Reactor Development and Deployment in Canada, mars 2021.
(www.opg.com)
- Plan d'action pour les PRM, 2020. Plan d'action canadien des petits réacteurs modulaires (PRM).
(smractionplan.ca)
- Posiva, 2013. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Biosphere Assessment 2012. Rapport préparé par Posiva Oy. POSIVA 2012-10, septembre 2013.
(www.posiva.fi)
- RED-IMPACT, 2008. RED-IMPACT: Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal – Synthesis Report. N° de contrat FP6 : FI6W-CR-2004-002408. Forschungszentrum Jülich GmbH, septembre 2007.
- RWM, 2017. Review of Alternative Radioactive Waste Management Options. Rapport NDA/RWM/146 préparé par la Radioactive Waste Management Ltd., Royaume-Uni, mars 2017.
(www.gov.uk/government/organisations/radioactive-waste-management)
- Sandia, 2009. Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2009-4401, juillet 2009.
(www.sandia.gov)

- Sandia, 2011a. Generic Repository Design Concepts and Thermal Analysis (FY11). Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2011-6202, août 2011.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2011b. Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2011-6749, octobre 2011.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2012a. Influence of Nuclear Fuel Cycles on Uncertainty of Geologic Disposal. Rapport FCRD-UFD-2012-000088, préparé pour la Campagne d'évacuation du combustible irradié du département américain de l'Énergie par Sandia National Laboratories, juillet 2012.
(www.energy.gov)
- Sandia, 2012b. Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2012-7789, septembre 2012.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2012c. Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. FCRD-USED-2012-000269, SAND2012-8527P, août 2012.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2012d. Site Characterization Methodology for Deep Borehole Disposal. SAND2012-7981, septembre 2012.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2013. Deep Borehole Disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and RD&D Needs. SAND2013-9490P, octobre 2013.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2014a. Deep Borehole Disposal Research: Geological Data Evaluation, Alternative Waste Forms, and Borehole Seals. SAND2014-17430R, septembre 2014.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2014b. Project Plan: Deep Borehole Field Test. SAND2014-18559R, septembre 2014.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2015a. Handling and Emplacement Options for Deep Borehole Disposal Conceptual Design. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2015-6218, juillet 2015.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2015b. Deep Borehole Field Test: Characterization Borehole Science Objectives. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2015-4424R, juin 2015.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2015c. Conceptual Waste Packaging Options for Deep Borehole Disposal. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2015-6335, juillet 2015.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2015d. Active Suppression of Drilling System Vibrations for Deep Drilling. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2015-9432, septembre 2015.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2015e. Deep Borehole Field Test Requirements and Controlled Assumptions. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2015-6009, juillet 2015.
(www.sandia.gov)
- Sandia, 2016. Deep Borehole Disposal Safety Analysis. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2016-10949R, septembre 2016.
(www.sandia.gov)

- Sandia, 2019. Deep Borehole Disposal Safety Case. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. SAND2019-1915, février 2019.
(www.sandia.gov)
- SGDN, 2015a. Some Implications of Recycling CANDU Used Fuel in Fast Reactors, Rapport technique de la SGDN NWMO- TR-2015-11, décembre 2015.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2015b. Preliminary Hazard Assessment of Waste from an Advanced Fuel Cycle. Rapport technique de la SGDN NWMO-TR-2015-22, décembre 2015.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2017. Postclosure Safety Assessment in a Used Fuel Repository in Crystalline Rock. Rapport technique de la SGDN NWMO TR-2017-02, décembre 2017.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2018. Postclosure Safety Assessment in a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock. Rapport technique de la SGDN NWMO-TR-2018-08, décembre 2018.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2020. Rapport de suivi sur les cycles de combustible avancés et les technologies de remplacement pour la gestion des déchets – Mise à jour 2020.
(www.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 technique 89-39 de SKB, décembre 1989.
(www.skb.se)
- SKB, 1998. The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. Rapport technique 98-05 de SKB, juin 1998.
(www.skb.se)
- SKB, 2000. Very deep borehole: Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. Rapport R-00-35 de SKB, mai 2000.
(www.skb.se)
- SKB, 2004. Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. Rapport R-04-09 de SKB, janvier 2004.
(www.skb.se)
- SKB, 2013a. Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock. Rapport P-13-12 de SKB, septembre 2013.
(www.skb.se)
- SKB, 2013b. Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. Rapport P-13-13 de SKB, juillet 2013.
(www.skb.se)
- SKB, 2013c. Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes. Rapport P-13-10 de SKB, septembre 2013.
(www.skb.se)
- SNC, 2020. G4SR-2 Virtual Summit – Enabling Early Movers in SMR Deployment, 18 et 19 novembre 2020, Canada.
(g4sr.org)
- SNC, 2021. G4SR-3 Virtual Summit – Harnessing Global Support to Address Challenges in the Implementation of Canada's Small Modular Reactor Action Plan, and Creating Opportunities for SMRs on the Path to Net Zero, 12 et 15 au 17 novembre 2021, Canada.
(g4sr.org)

- SNETP, 2012. The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – Strategic Research Agenda – Molten Salt Reactors.
(www.snetp.eu)
- SNETP, 2015. The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – Deployment Strategy.
(www.snetp.eu)
- SNETP, 2018. The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator (ALFRED Project).
(www.snetp.eu)
- Triplett et coll., 2012. PRISM: A Competitive Small Modular Sodium-Cooled Reactor. Article de Brian S. Triplett, Eric P. Loewen et Brett J. Dooies, publié dans Nuclear Technology, vol. 178, mai 2012.
(www.gehitachiprism.com)
- U.S. BRC, 2012. Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future: Report to the Secretary of Energy, janvier 2012.
(www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf)
- U.S. DOE, 2014a. Project Plan: Deep Borehole Field Test. Rapport préparé par Sandia National Laboratories. FCRD-UFD-2014-000592, septembre 2014.
(www.doe.gov)
- U.S. DOE, 2014b. Assessment of Disposal Options for DOE-Managed High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel, octobre 2014.
(www.doe.gov)
- U.S. DOE, 2016. « Energy Department selects Battelle team for a deep borehole field test in North Dakota », communiqué de presse, 5 janvier 2016.
(www.energy.gov/articles/energy-department-selects-battelle-team-deep-borehole-field-test-north-dakota)
- U.S. DOE, 2017. « Studying the feasibility of deep boreholes », communiqué de presse, 23 mai 2017.
(www.energy.gov/articles/studying-feasibility-deep-boreholes)
- U.S. NRC, 2012. Environmental Topical Report for Potential Commercial Spent Nuclear Fuel Reprocessing Facilities in the United States – Final Report, septembre 2012.
(www.nrc.gov)
- U.S. NWTRB, 2016. Technical Evaluation of the US Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. Préparé par le United States Nuclear Waste Technical Review Board, janvier 2016.
(www.nwtrb.gov)
- von Hippel et Hayes, 2010. Deep Borehole Disposal of Nuclear Spent Fuel and High Level Waste as a Focus of Regional East Asia Nuclear Fuel Cycle Cooperation. Rapport préparé pour le Nautilus Institute par David von Hippel et Peter Hayes, décembre 2010.
(www.nautilus.org)
- WNA, 2021. World Nuclear Association Symposium 2021, 8 au 10 septembre 2021 (événement virtuel).
(www.wna-symposium.org)
- WNN, 2021a. Estonia's geology suitable for deep borehole repository, 1^{er} février 2021.
(www.world-nuclear-news.org/Articles/Estonias-geology-suitable-for-deep-borehole-reposi)
- WNN, 2021b. Slovenia considers deep borehole disposal, 31 août 2021.
(www.world-nuclear-news.org/Articles/Slovenia-considers-deep-borehole-disposal)

Pour plus de renseignements,
veuillez contacter :

Société de gestion des déchets nucléaires

22, avenue St. Clair Est, 4^e étage
Toronto (Ontario) M4T 2S3, Canada
Tél. : 416.934.9814 Sans frais : 1.866.249.6966
Courriel : contactus@nwmocanada.ca
Site Web : www.nwmocanada.ca

   @LaSGDN

 /company/nwmocanada

© 2022 Société de gestion des déchets nucléaires

