

Rapport de suivi sur les cycles de combustible avancés

La Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) a élaboré l'approche de la Gestion adaptative progressive (GAP) en s'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 leurs 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 qu'il leur faut pour 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 à 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 actuellement travaillent à la mise en oeuvre ou préconisent diverses formes de recyclage prévoient construire des dépôts géologiques en profondeur pour gérer les déchets à longue vie qui en résulteront.

Au cours de l'étude menée à l'échelle nationale, les Canadiens ont exprimé le souhait d'en savoir plus sur la possibilité de recycler ou de réutiliser le combustible nucléaire irradié. À ce moment, le retraitement du combustible irradié était très peu probable pour le Canada, selon l'analyse qu'en avait faite la SGDN. Toutefois, nous avons recommandé de maintenir un dossier de suivi sur l'état de la technologie dans le monde et sur les changements qui pourraient se produire dans le cycle du combustible au Canada.

La SGDN maintient et publie ce rapport de suivi depuis 2008. Le présent rapport de suivi fournit un aperçu des faits récents qui sont survenus dans le monde en matière de recherche-développement sur les cycles de combustible nucléaire et examine l'application qui pourrait être faite, dans le contexte canadien. Les principales conclusions sont que :

- » Les nouveaux cycles de combustible continuent de susciter de l'intérêt dans le monde et de faire l'objet de recherches, mais il n'y a eu aucune percée technologique qui modifierait la précédente conclusion concernant l'approche de la GAP pour la gestion de l'inventaire actuel de combustible nucléaire irradié canadien.
- » L'exploitation éventuelle de petits réacteurs modulaires (PRM) au Canada aurait pour conséquence la nécessité de gérer de petites quantités de nouveaux types de déchets de combustible. Les répercussions de ces possibles nouveaux déchets sur le programme de la SGDN devront être évaluées si l'utilisation des technologies liées aux PRM est envisagée.
- » Les déchets associés aux cycles de combustible avancés seraient gérés par la SGDN de manière sécuritaire, socialement acceptable, techniquement sûre, écologiquement responsable et économiquement viable.
- » La SGDN continuera d'assurer un suivi des développements liés aux cycles de combustible avancés qui pourraient avoir une incidence sur les exigences canadiennes futures en matière de gestion des déchets.

Introduction

La SGDN tient un dossier de suivi sur les faits nouveaux survenus dans le monde relativement aux cycles de combustible avancés, notamment sur les technologies de retraitement et de recyclage. Les précédents rapports techniques détaillés [Jackson, 2008, 2009, 2010] et rapports abrégés sur le dossier de suivi [p. ex., SGDN, 2018a] sont disponibles sur le site Web de la SGDN.

En 2019, plusieurs pays et programmes basés sur des collaborations internationales ont poursuivi des travaux visant à examiner et à évaluer la technologie et les tenants et aboutissants des cycles de combustible avancés, y compris les cycles fermés fondés sur le retraitement, la séparation et la transmutation (RST). Les constats de ces travaux ont été présentés dans le cadre de plusieurs conférences internationales et rencontres techniques.

Cycles de combustible actuels

Il existe trois types de cycles du combustible nucléaire :

- » Le cycle « ouvert », ou « à passage unique », où le combustible est irradié dans le réacteur pour ensuite être considéré comme un déchet au moment de son retrait;
- » Le « recyclage partiel », ou « cycle à deux passages », où le combustible irradié est retraité pour en récupérer le plutonium et l'uranium fissile résiduel, puis converti en combustible d'oxyde mixte (MOX) et réutilisé une fois de plus dans un réacteur actuel;
- » 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 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 la configuration du 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.

Un scénario particulier de « recyclage partiel » consiste à recycler l'uranium du combustible irradié des réacteurs à eau légère (LWR, pour light water reactor) dans des réacteurs, après quoi le combustible serait considéré comme un déchet. La Chine, qui possède à la fois des LWR et des réacteurs CANDU, prévoit actuellement utiliser cette approche pour une partie de son combustible.

D'autres variantes peuvent inclure diverses combinaisons de réacteurs, comme des combinaisons de réacteurs thermiques conventionnels, des RNR et/ou des systèmes assistés par accélérateur (SAA).

Comme l'illustre le tableau 1, le Canada, comme la plupart des pays exploitant l'énergie nucléaire, utilise actuellement le cycle de combustible ouvert. Quelques pays, notamment la France, le Royaume-Uni, la Russie et l'Inde, retraitent une partie de leur combustible et utilisent une partie du combustible irradié 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 (la Belgique, l'Allemagne et la Suisse); leur combustible retraité est traité comme un déchet.

Le tableau 2 présente un résumé de la capacité mondiale actuelle de retraitement des combustibles commerciaux. Ce résumé ne tient pas compte des installations qui ne sont exploitées qu'à des fins militaires.

Un cycle de combustible « fermé » efficace doit comprendre des RNR. Presque tous les réacteurs électrogènes commerciaux actuellement exploités sont des réacteurs à neutrons thermiques; la technologie RNR est plus complexe. Le tableau 3 énumère les RNR électrogènes actuellement exploités ou projetés.

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

(1) Le Royaume-Uni cessera toutes ses opérations de retraitement au terme des contrats en vigueur, soit d'ici 2020. La première installation a été fermée en 2018 aux fins de déclassement.

(2) La France fournit 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 ainsi que pour les besoins 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 LWR dans ses réacteurs CANDU.

(5) Combustible irradié envoyé en France pour y être retraité. Le contrat initial était pour 350 tonnes métriques de métal lourd. Le contrat a été prolongé en 2015 pour couvrir la durée de vie des réacteurs actuels.

(6) Une installation commerciale a été construite à Rokkasho-mura et est actuellement mise à l'essai (on prévoit commencer à l'exploiter commercialement en 2021), mais les politiques à son égard sont en cours de révision.

(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 90.

Tableau 2 : Résumé de la capacité mondiale actuelle de retraitement des combustibles commerciaux

| Pays | Installation | Capacité (tonnes par an) | Situation |
|----------------------|--|--------------------------|---|
| Chine | Gansu | 200 | En construction (achèvement prévu vers 2030) |
| France | UP1, Marcoule UP2-400, La Hague UP2-800, La Hague UP3, La Hague | 600 400 800 800 | Fermée/en déclassé Fermée/en déclassé En exploitation En exploitation |
| Inde | (4 installations) | ~330 (total) | En exploitation |
| Japon | Tokai Rokkasho | 90 800 | Fermée/en déclassé En cours de mise en service (démarrage prévu vers 2021) |
| Fédération de Russie | RT-1, Mayak MCC, Zheleznogorsk RT-2, Zheleznogorsk | 400 60 700 + 800 | En exploitation (fermeture prévue en 2030) En exploitation En construction (achèvement prévu vers 2020) |
| Royaume-Uni | MAGNOX, Sellafield THORP, Sellafield | 1500 900 | En exploitation (fermeture prévue en 2020) Fermée en 2018 |
| États-Unis | West Valley | 300 | Exploitée de 1966 à 1972, déclassée |

Tableau 3 : Sommaire des réacteurs à neutrons rapides en exploitation ou en construction

| Pays | Installation | Puissance (MWé) | État |
|----------------------|------------------|-----------------|--|
| Fédération de Russie | BN-600 BN-800 | 560 880 | En exploitation depuis 1980 – au sodium liquide En exploitation depuis 2016 – au sodium liquide |
| Inde | PFBR | 500 | En construction – au sodium liquide |
| Chine | CFR-600 | 600 | En construction – au sodium liquide |

Les 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. Toutefois, plusieurs difficultés scientifiques et techniques (comme la mise au point de matériaux adaptés et la transposition à échelle réelle de réacteurs expérimentaux, ainsi que des difficultés d'ordre sociopolitique et économique devront être surmontées avant que ces cycles puissent être exploités industriellement.

Outre le principal avantage de la sécurité énergétique que procurent ces systèmes, les cycles de combustible avancés présentent un second intérêt : celui d'une réduction probable de la quantité d'actinides présents dans les déchets et d'une réduction possible de l'espace requis pour loger les déchets de haute activité au sein d'un dépôt. Toutefois, diminuer la quantité d'actinides n'éliminera pas la nécessité d'une gestion à long terme des déchets et tout gain en espace ne pourra être réalisé que si les déchets de produits de fission séparés sont entreposés pendant des centaines d'années en surface pour permettre à la chaleur de désintégration de se dissiper. Autrement, les cycles avancés ne permettront pas de réduire la taille ou d'améliorer la sûreté d'un dépôt géologique en profondeur pour déchets résiduels à longue vie.

Cette constatation transparait dans divers rapports nationaux, qui continuent de soutenir la nécessité d'un dépôt géologique en profondeur. En particulier :

- » Aux États-Unis, après que la décision eût été prise d'arrêter le processus de demande de permis pour le dépôt de Yucca Mountain, la Blue Ribbon Commission sur l'avenir du nucléaire aux États-Unis (BRC) a mené en 2010 et 2011 une étude exhaustive des options et des technologies disponibles pour la gestion de l'aval du cycle du combustible nucléaire aux États-Unis. Dans son rapport final [U.S. BRC, 2012], la BRC a affirmé ceci : « *L'évacuation est nécessaire et l'évacuation en couches géologiques profondes constitue l'approche la plus optimale sur le plan scientifique, selon 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 ST comme option de rechange à l'évacuation géologique directe. Aucune donnée ne permet de penser que les systèmes de ST 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* » [MII, 2013].
- » L'Australian Royal Commission into the Nuclear Fuel Cycle (Commission royale australienne sur le cycle de combustible nucléaire) a déclaré qu'un « *consensus international a été établi sur le fait que l'évacuation en couche géologique profonde constitue la meilleure approche possible de gestion à long terme du combustible irradié* » [Gouvernement de l'Australie du Sud, 2016].

État de la situation concernant la technologie des cycles de combustibles avancés

Des recherches sur les cycles de combustible avancés se poursuivent dans le monde. Les constats les plus récents de ces recherches ont été présentés en 2019 dans le cadre de plusieurs conférences internationales et rencontres techniques, y compris les suivantes :

- » Le 9^e Symposium international sur les réacteurs refroidis à l'eau supercritique, ISSCWR-9 (mars 2019, Vancouver, Canada) [SNC, 2019];
- » Le 9^e Sommet international sur les PRM et les réacteurs avancés (avril 2019, Atlanta, États-Unis) [NEI, 2019];
- » La Conférence annuelle mondiale sur le cycle du combustible nucléaire (avril 2019, Miami, États-Unis) [WNA, 2019];
- » L'International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP 2019 (mai 2019, Juan-les-Pins, France) [ICAPP, 2019];
- » La 27^e Conférence internationale sur le génie nucléaire, ICON27 (mai 2019, Tsukuba, Japon) [ICONE, 2019];
- » La Conférence internationale sur la gestion du combustible irradié des réacteurs nucléaires de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) (juin 2019, Vienne, Autriche) [AIEA, 2019a];
- » La conférence Global/TopFuel 2019 (septembre 2019, Seattle, États-Unis) [ANS, 2019];
- » La 19^e Conférence internationale sur les systèmes d'énergie nucléaire émergents, ICENES 2019 (octobre 2019, Bali, Indonésie) [ICENES, 2019];
- » Le 4^e Atelier international sur la technologie et les composants des systèmes pilotés par accélérateur, TCADS-4, de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN OCDE) (octobre 2019, Belgique) [AEN/OCDE, 2019a];
- » Le Symposium EN17 de la Materials Research Society, Structure-Property Processing Performance Relationships in Materials for Nuclear Technologies (décembre 2019, Boston, États-Unis) [MRS, 2019].

Les articles présentés dans le cadre de ces conférences ainsi que les rapports techniques publiés par l'AEN de l'OCDE [par exemple, AEN/OCDE, 2011-2019], l'AIEA [par exemple, AIEA, 2012-2019], le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA, France) [par exemple, CEA, 2015], la Nuclear Regulatory Commission des États-Unis [U.S. NRC, 2012], l'Electric Power Research Institute [par exemple, EPRI, 2015-2017], la Radioactive Waste Management Agency du Royaume-Uni [RWM, 2017] et divers projets de collaboration internationale (par exemple, la Plateforme technologique européenne pour une énergie nucléaire durable [SNETP, 2012-2018], le projet Combustibles avancés pour réacteurs de 4^e génération – Retraitement et dissolution [ASGARD, 2016] et GEN IV Integrated Oxide Fuels Recycling Strategies [GENIORS, 2017]) ont été surveillés par la SGDN dans le cadre de ce dossier de suivi.

Ces conférences ont montré que les cycles de combustible avancés suscitent toujours de l'intérêt à l'échelle internationale et que des progrès sont réalisés relativement aux bases scientifiques et technologiques qui sous-tendent le RST et les cycles de combustible avancés.

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

Certains des concepts et des options de cycles de combustible avancés envisagés sont décrits ci-dessous.

Bien que quelques RNR expérimentaux ou de démonstration soient en exploitation ou en cours de construction en Chine, en Inde et en Russie, tous les réacteurs nucléaires commerciaux actuellement exploités ou en cours de construction dans le monde sont basés sur les neutrons thermiques (« à faible énergie »). Ces réacteurs utilisent actuellement des substances modératrices pour ralentir les neutrons de haute énergie produits par les réactions de fission – ces modérateurs sont habituellement l'eau normale, ou légère, (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 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 du combustible à plus forte concentration d'U-235 fissile (généralement 3 à 5 pour cent). Le processus 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, comme il est mentionné plus bas, l'uranium appauvri issu du processus d'enrichissement constitue une source potentielle de combustible pour certains cycles de combustible avancés.

Un cycle de combustible avancé pourrait être mis en oeuvre principalement pour deux raisons techniques :

- » Pour améliorer la sécurité énergétique nationale (par exemple, pour récupérer une énergie additionnelle du combustible nucléaire irradié et diminuer la nécessité d'un approvisionnement en uranium d'extraction); et/ou
- » Pour alléger le fardeau imposé à un dépôt géologique en profondeur (par exemple, pour permettre à un dépôt d'une taille donnée de stocker les déchets résultant d'une production supérieure d'énergie nucléaire ou pour réduire la radioactivité des déchets dans le dépôt).

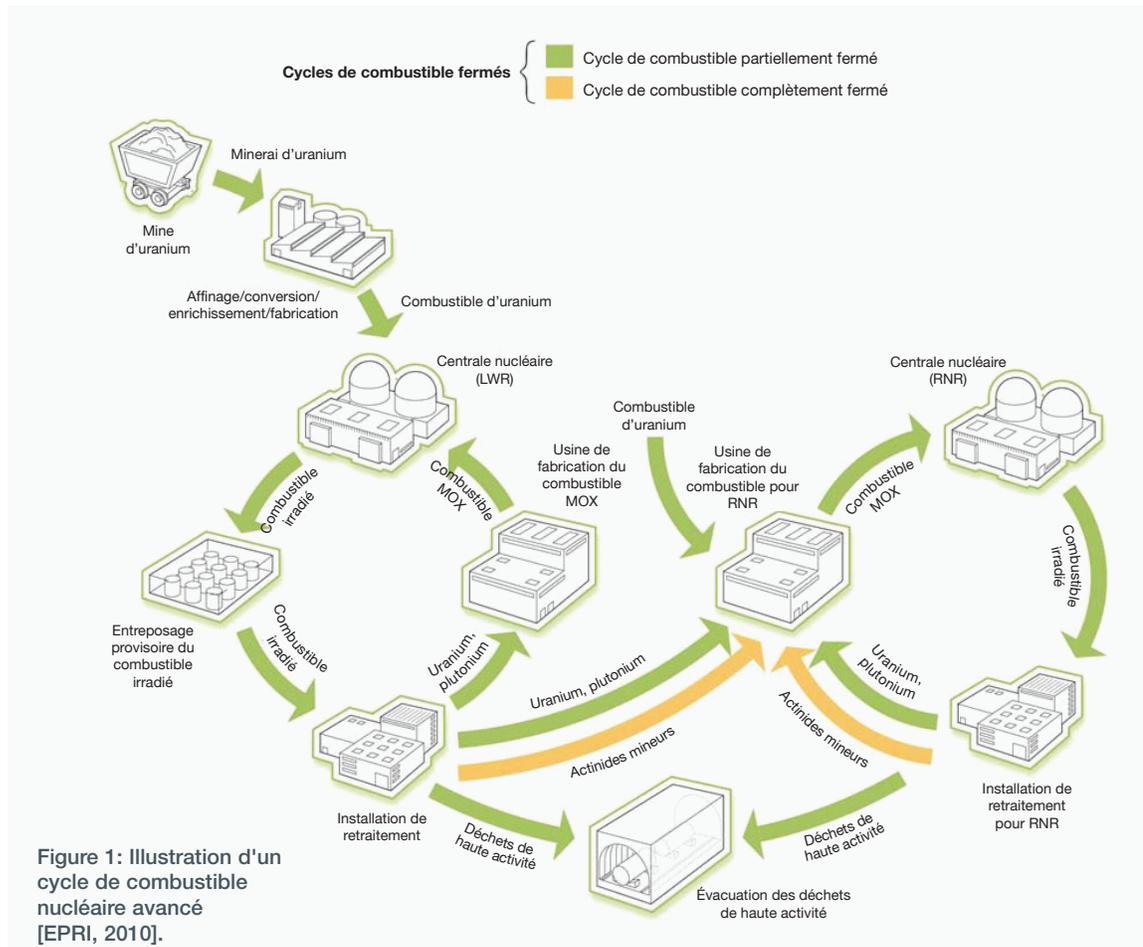
La première raison est basée sur une prémisse qui voudrait que l'uranium soit trop peu abondant ou trop coûteux pour être utilisé dans un cycle à passage unique, ou selon laquelle les provisions nationales seraient limitées et l'accès à un approvisionnement étranger serait incertain. La seconde est basée sur la prémisse voulant que l'espace disponible dans un dépôt pour gérer les déchets résultants soit limité. Ces deux raisons s'appuient également sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie nucléaire continuera de représenter une approche intéressante sur le plan économique pour un pays donné.

Il faut aussi souligner que, bien que recycler le combustible irradié dans des RNR puisse diminuer le volume de déchets de haute activité généré par mégawatt d'électricité produit, cela ne diminue pas toujours considérablement l'empreinte nécessaire d'un dépôt. La raison en est que l'empreinte est déterminée par la charge thermique totale des déchets et non par leur volume total, et que la charge thermique des déchets est principalement influencée par la quantité d'énergie qui a été produite, quel que soit le cycle de combustible utilisé. Ce n'est que dans le cas des cycles de combustible très avancés, où la séparation et la transmutation complètes de tous les actinides sont maintenues pendant de très longues périodes et pour lesquels un espace important de stockage doit être prévu pour confiner les produits de fission générant de la chaleur, que l'espace requis pour le stockage des déchets de haute activité diminue de façon importante. Même dans ce cas, la diminution de l'espace de stockage des déchets de haute activité est atténuée par l'augmentation de la quantité de déchets de moyenne activité à longue vie générés par ces cycles de combustible (lesquels doivent aussi être stockés à long terme dans un dépôt en profondeur).

Une troisième raison est aussi parfois évoquée : la séparation et la transmutation réduisent la « radio-toxicité » des déchets en transmutant les éléments transuraniens. Toutefois, bien que la transmutation puisse permettre effectivement d'éliminer les éléments transuraniens à plus longue vie du combustible irradié, elle n'améliore pas considérablement la sûreté globale d'un dépôt parce que les éléments transuraniens ont une mobilité très faible dans l'environnement du dépôt. Les produits de fission mobiles à très longue vie, tels que l'I-129 (qui ne sont pas éliminés par les cycles de combustible avancés), sont généralement les principaux radionucléides visés par les évaluations de la sûreté à long terme d'un dépôt [Kessler et coll., 2012; Sandia, 2012; EASAC, 2014; SGGN, 2017, 2018b].

Quoi qu'il en soit, la mise en oeuvre complète du RST nécessite le déploiement à l'échelle commerciale de systèmes avancés, tels que les RNR, comme le montre la figure 1, ou les SAA, de même que de 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 par exemple [AIEA, 2012, 2013] pour une description de divers prototypes de RNR et pour un historique de leur exploitation.

Les RNR n'emploient pas de modérateur. Ils peuvent être utilisés pour extraire de l'énergie de l'U-238, ainsi que d'autres actinides créés dans un réacteur (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'utilisation de l'uranium appauvri est généralement considérée comme la meilleure option, puisque cette matière est largement accessible, présente une très faible radioactivité spécifique et peut être manipulée plus aisément, alors que l'uranium et autres actinides retraités tendent à être très radioactifs en raison de l'accumulation d'isotopes plus radioactifs (par exemple, les produits de filiation de la chaîne de désintégration de l'U-232, qui émettent des rayons gamma).



Les modèles actuels de réacteurs avancés fonctionnent à des températures très élevées (typiquement à 400 °C ou plus) et utilisent des métaux liquides (par exemple, le sodium ou le plomb), des sels en fusion (tels que des mélanges à base de fluorure de sodium) ou des gaz (par exemple, l'hélium) comme réfrigérants plutôt que l'eau ou l'eau lourde. Un certain nombre de prototypes et/ou de modèles sont proposés par divers pays dans le cadre du projet de collaboration internationale GEN-IV et par plusieurs entreprises commerciales. On peut trouver ailleurs des informations supplémentaires sur ces concepts, par exemple [AIEA, 2018b, 2018c, 2019b], [GIF, 2018].

Bien que certains concepts soient susceptibles de pouvoir réutiliser les matières fissiles et fertiles séparées des formes de combustible nucléaire irradié actuelles pour produire de l'énergie supplémentaire, les températures et les flux neutroniques élevés combinés à la réactivité chimique des réfrigérants métalliques ou salins liquides créent des conditions difficiles pour les matériaux composant le réacteur. La recherche de matériaux capables de résister à ces conditions pendant les décennies d'exploitation d'un réacteur est un des domaines actuels d'étude.

Selon les détails de la conception, les systèmes de RNR peuvent fonctionner suivant trois modes :

- » **Incinérateur**, où le réacteur consomme plus de matière fissile (c.-à-d., d'actinides) qu'il en produit;
- » **Auto-entretenu**, où le réacteur est en équilibre et consomme toute la matière fissile qu'il produit;
- » **Surgénérateur**, où le réacteur produit plus de matière fissile qu'il en consomme (ce qui peut alimenter en combustible un programme nucléaire en expansion).

Ces trois modes de fonctionnement nécessitent un chargement initial du cœur en U-235 hautement enrichi ou en Pu-239 pour le démarrage du réacteur. L'U-235 serait obtenu en enrichissant l'uranium d'extraction à des taux beaucoup plus élevés que ce qui se fait actuellement pour les réacteurs nucléaires commerciaux (c.-à-d., à des taux supérieurs à 20 pour cent d'U-235 par rapport aux taux de 3 à 5 pour cent pour les LWR). Le Pu-239 proviendrait du retraitement et de la séparation du combustible irradié actuel des LWR. Les capacités de retraitement qui existent actuellement dans le monde sont résumées au tableau 2. Une fois démarré, le réacteur peut créer *in situ* sa propre matière fissile à partir de l'U-238 et des autres actinides contenus dans le combustible.

Certains concepts de réacteurs, tels que les modèles à sel fondu, doivent recourir à une alimentation d'appoint en combustible neuf légèrement enrichi à très enrichi, ce qui les rend impropres à utiliser directement du combustible irradié CANDU (bien qu'ils pourraient peut-être fonctionner avec du combustible irradié de LWR). Dans ce cas, il faudrait combiner le combustible irradié CANDU avec de l'uranium enrichi pour obtenir un taux d'enrichissement approprié d'au moins 2 pour cent. Plusieurs modèles à sel fondu utilisent aussi des combustibles liquides (par exemple, des sels de fluorure), plutôt que les combustibles solides utilisés dans les réacteurs actuels. Les concepteurs prétendent que ces types de systèmes de combustible ont plusieurs avantages par rapport aux combustibles solides, tels qu'un meilleur contrôle de la réactivité, une « combustion » plus complète des actinides et l'impossibilité d'un accident de fusion (le combustible étant déjà sous forme liquide). Toutefois, le cycle du combustible liquide est plus complexe et n'est pas encore totalement au point, et même les concepts ayant précédemment fait l'objet d'analyses poussées (par exemple, le réacteur surgénérateur à sel fondu de l'Oak Ridge National Laboratory) n'ont pas résolu certaines incertitudes liées au cycle du combustible [EPRI, 2017].

Le coût constitue également une considération importante. Pour que ces cycles avancés puissent être déployés avec succès sur une base commerciale, le coût du cycle de vie entier de la production d'électricité à partir de réacteurs et de cycles de combustible avancés doit être inférieur au coût associé à d'autres moyens de production d'électricité, y compris les centrales nucléaires classiques et les 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 demeurait 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 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 Library en 2017, a fourni l'ensemble exhaustif des données liées aux coûts, ainsi que les processus et les structures qui 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 [CNL, 2016] examinait précisément 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, que ces options nécessitaient un investissement initial important et qu'elles posaient des défis sociaux et techniques considérables. En outre, ces options de recyclage généreraient des quantités importantes de déchets radioactifs à longue vie 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 sobre en carbone, elles engageraient la province dans cette voie technologique pour un siècle ou plus.

Outre 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. La plupart des scénarios étudiés (par exemple en France et au Japon) nécessitent une période d'au moins 50 à 100 ans 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 LWR actuels, en supposant qu'un parc important de RNR soit 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 des centrales nucléaires et des installations du cycle de combustible associées).

Plusieurs de ces études soulignent que comme option de recharge au combustible nucléaire irradié des réacteurs actuels, il y aurait suffisamment d'uranium appauvri (issu de l'enrichissement du combustible utilisé dans les RNR) pour soutenir un tel système à l'échelle mondiale pendant plusieurs siècles, voire des millénaires. En fait, l'uranium appauvri existant constitue souvent le meilleur combustible, puisqu'il est abondant et relativement propre sur le plan radiologique (faible débit de dose) et isotopique (exempt de produits de fission et d'autres contaminants). Plus d'un million de tonnes d'uranium appauvri sont actuellement stockées dans le monde.

Pour mettre en perspective l'utilisation possible par les RNR du combustible CANDU irradié actuel, si chaque RNR consommait 500 kilogrammes de combustible par année, l'inventaire actuel d'approximativement 57 000 tonnes de combustible irradié au Canada [SGDN, 2019] pourrait être consommé comme combustible pour les RNR pendant quelque 100 000 années réacteur d'exploitation (p. ex., un parc de 100 réacteurs exploités pendant 1000 ans). D'après leur durée de vie de conception, qui est d'approximativement 60 ans, 16 générations de RNR seraient requises pendant 1000 ans, soit un total de 1600 réacteurs construits, exploités et déclassés.

En théorie, le temps requis pour que la plus grande partie des éléments transuraniens (c.-à-d., le plutonium et les actinides mineurs) du combustible irradié soit utilisée pourrait être réduit à quelques centaines d'années, si ces éléments pouvaient être complètement extraits de l'U-238 du combustible irradié et si suffisamment de RNR étaient mis en service en temps voulu. Ces éléments transuraniens seraient ensuite consommés par les RNR, alors que l'U-238 appauvri serait stocké pour servir de combustible futur. En pratique, toutefois, il n'a pas été possible d'atteindre à une échelle industrielle le taux de séparation élevé voulu, en raison des limites des procédés de séparation, le résultat étant un flux de déchets (U-238) qui doit aussi faire l'objet d'une gestion à long terme sûre.

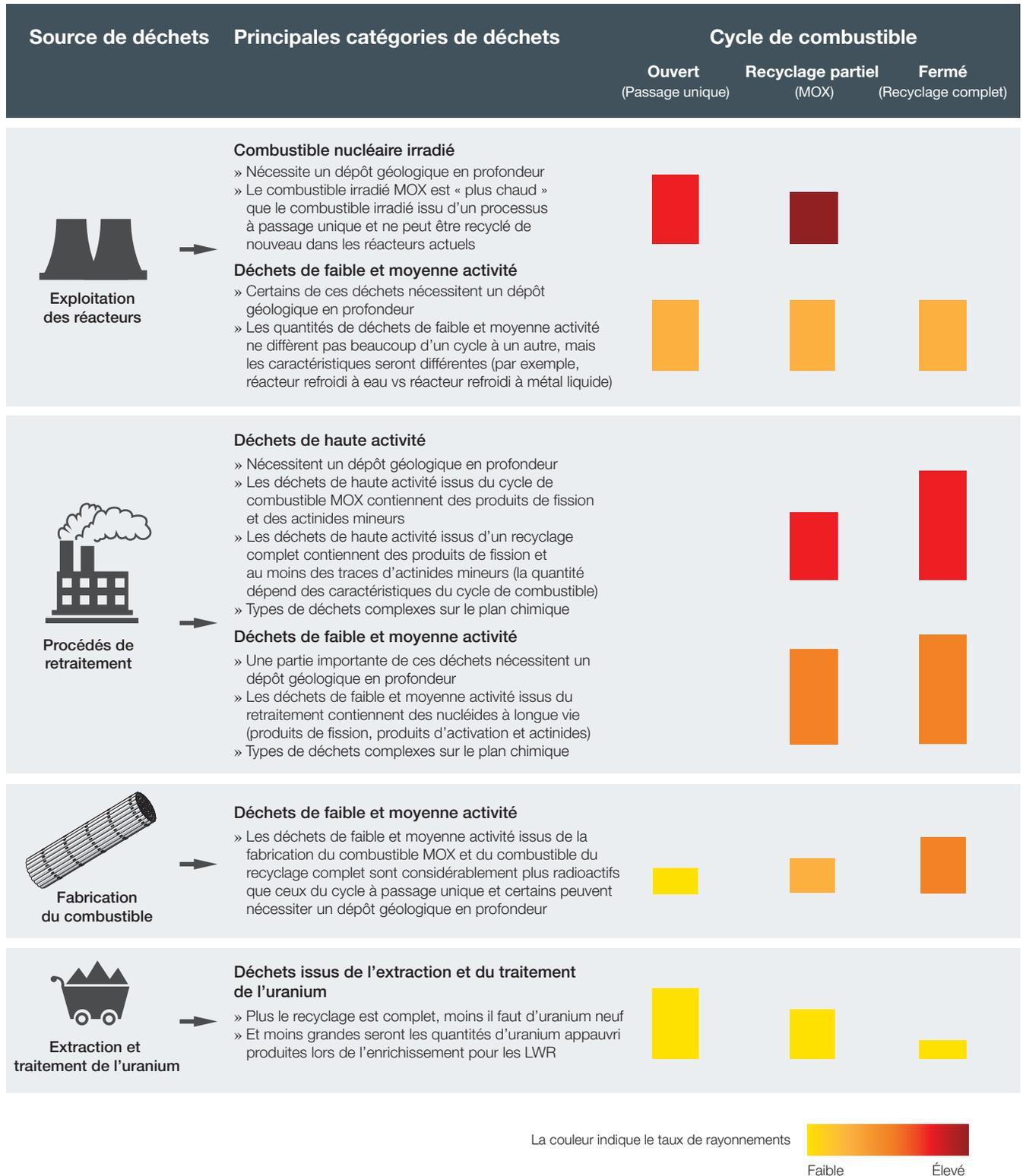


Figure 2 : Déchets produits selon le cycle de combustible employé.

Les cycles de combustible produiront chacun un éventail de déchets radioactifs de caractéristiques et de volumes divers, comme on peut le constater à la figure 2. Il faut noter que cette figure n'est fournie qu'à titre indicatif et qu'elle n'a pas pour but de présenter les quantités précises qui seraient associées à chaque type de déchet ou cycle de combustible. Ces relations dépendront de la conception et de l'exploitation exactes qui seront faites des installations. Dans tous les cas, chaque cycle de combustible produira au moins un flux de déchets qui devra être stocké dans un dépôt géologique en profondeur en raison de sa teneur en radionucléides à longue vie et/ou de la chaleur de décroissance qu'il générera.

Un autre domaine de recherche concerne le retraitement et la séparation du combustible irradié. La technologie actuelle de retraitement est basée sur la chimie humide. 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. Des descriptions des divers procédés utilisés peuvent être trouvées dans la littérature technique, par exemple dans [AEN/OCDE, 2012b]. Puisque le combustible nucléaire irradié et les produits résultants sont hautement radioactifs, tout ce processus doit s'effectuer 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 processus, mais la plupart d'entre elles deviendront des déchets radioactifs qui devront être stabilisés avant d'être entreposés, puis finalement stockés dans un dépôt [MIT, 2011; MIIS, 2013].

La plupart des scénarios basés sur des RNR s'appuient sur des types de combustible différents de ceux actuellement utilisés, par exemple les combustibles métalliques, les sels fondus ou les particules de combustible enrobées de carbure de silicium/graphite. Ces types de combustibles seraient retraités à l'aide d'une technologie différente de la technologie actuelle de traitement chimique humide. Une nouvelle technologie non aqueuse (« traitement pyrolytique ») est en cours de développement pour certains de ces combustibles. Toutefois, bien que cette technologie ait été employée dans le passé dans des prototypes de RNR (notamment dans le cadre du programme expérimental américain de réacteur surgénérateur qui a eu cours des années 50 aux années 80 [AIEA, 2012]) et qu'elle ait été proposée pour d'autres systèmes, comme les réacteurs intégrés à neutrons rapides et les réacteurs PRISM [Triplett et coll., 2012], le traitement pyrolytique n'a pas encore été exploité à une échelle commerciale. (Voir, par exemple, Iizuka et coll. dans [AEN/OCDE, 2012a].) Le recyclage du combustible à l'aide de ces technologies de remplacement demeurera compliqué puisqu'il suppose l'utilisation de matières hautement radioactives à des températures élevées. Cette complexité sera aussi influencée par la nécessité ou non d'effectuer une séparation à degré élevé de certains actinides et produits de fission indésirables présents dans le combustible.

Une option possible de cycle de combustible pour les pays qui exploitent à la fois des réacteurs de type CANDU alimentés à l'uranium naturel et des LWR alimentés à l'uranium enrichi consiste aussi de mettre au point des cycles de combustibles synergétiques permettant la gestion du combustible irradié généré par leurs LWR. Cela est considéré comme le DUPIC (utilisation directe du combustible de réacteur à eau sous pression dans un réacteur CANDU) et son combustible « l'équivalent d'uranium naturel. » Après un traitement mécanique, thermique et/ou chimique pour modifier la taille des pastilles de combustible et pour retirer les produits de fission volatils, leur combustible de LWR irradié est reconfiguré en grappes de combustible CANDU et introduit dans leurs réacteurs CANDU pour en extraire une quantité supplémentaire d'énergie. Il faut souligner que ces technologies sont conçues pour gérer les combustibles de LWR et qu'elles ne s'appliquent pas au contexte canadien, puisque les sociétés d'électricité canadiennes n'exploitent pas de LWR et que ces technologies ne peuvent être utilisées pour recycler le combustible irradié CANDU dans d'autres réacteurs CANDU. La Chine, qui possède à la fois des LWR et des réacteurs CANDU, envisage actuellement ce cycle de combustible pour alimenter en partie ses LWR.

La transmutation des actinides peut également se faire dans un SAA, 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 fissionnable. Contrairement à un réacteur nucléaire classique ou à un RNR, il s'agit d'un système sous-critique : la réaction nucléaire s'arrête lorsque l'accélérateur est éteint. Une quantité importante d'électricité est nécessaire pour générer les neutrons. Des recherches sont en cours en Europe, au Japon et ailleurs pour utiliser un SAA pour transmuter les radionucléides à longue vie dans des systèmes dédiés. L'assemblage de couverture des SAA pourra potentiellement accepter un large éventail de combinaisons d'isotopes, fournissant ainsi des actinides de transmutation très efficaces et certains autres radionucléides à longue vie. Toutefois, la technologie n'a pas encore progressé bien 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 menées dans ce domaine sont présentés dans des conférences et rencontres scientifiques telles que le 4^e Atelier international de l'AEN de l'OCDE sur la technologie et les composants des systèmes pilotés par accélérateur [AEN/OCDE, 2019a].

Petits réacteurs modulaires

D'autres propositions incluent la construction de PRM. Il est proposé d'utiliser des PRM d'une capacité de jusqu'à quelques dizaines de mégawatts dans des collectivités éloignées (hors réseau) et sur des sites d'extraction de ressources, qui sont actuellement alimentés en chaleur et/ou en électricité par de petites centrales à combustible diesel [HATCH, 2016]. Des PRM allant jusqu'à quelques centaines de mégawatts pourraient être intégrés à de petits réseaux. Ces réacteurs sont basés sur diverses technologies, y compris des modèles refroidis à partir de métaux liquides, de sels fondus ou d'eau légère. On peut trouver des descriptions détaillées ailleurs, comme dans [AIEA, 2018b, 2018c, 2019b] et [EPRI, 2015].

Ressources naturelles Canada a lancé, en collaboration avec les provinces, territoires et sociétés d'énergie intéressés, le projet de feuille de route des PRM, qui a pour but de déterminer les possibilités d'utilisation en réseau et hors réseau des PRM au Canada. Le rapport sur la feuille de route publié en novembre 2018 contenait plus de 50 recommandations liées à des domaines tels que la gestion des déchets, la préparation réglementaire et la mobilisation internationale [PRM, 2018].

Certaines sociétés d'électricité ont exprimé l'intention de soutenir le développement de technologies de PRM; par exemple, Énergie Nouveau-Brunswick s'est récemment engagée à aider Moltex Energy et Advanced Reactor Concepts Nuclear à mettre au point et à démontrer une grappe de recherche sur l'énergie nucléaire axée sur les PRM avancés [Énergie NB, 2019]. Bruce Power s'est également engagée à développer la technologie des PRM, signant des protocoles d'entente avec NuScale Power ainsi qu'avec MIRARCO Mining Innovation et l'Université Laurentienne [Bruce Power, 2018a, 2018b]. Aucune activité liée à l'obtention d'un permis n'a été entreprise pour le moment.

En décembre 2019, un protocole d'entente a été conclu entre les gouvernements de l'Ontario, de la Saskatchewan et du Nouveau-Brunswick relativement à une collaboration au développement de PRM et à leur déploiement dans ces provinces.

La Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a terminé la Phase 1 et a entrepris la Phase 2 de son examen préalable à l'autorisation d'un réacteur refroidi aux sels fondus de conception canadienne proposé par la société Terrestrial Energy [CCSN, 2017, 2019a]. La CCSN a également terminé la Phase 1 de son examen d'un réacteur refroidi au gaz proposé par Ultra Safe Nuclear Corporation [CCSN, 2019b] et d'un réacteur refroidi au sodium proposé par Advanced Reactor Concepts Ltd. [CCSN, 2019c]. Deux autres concepts de PRM font actuellement l'objet d'un examen de Phase 1 de la CCSN : un réacteur à sels fondus proposé par Moltex Energy et un réacteur refroidi à l'eau légère proposé par SMR, LLC. (une entreprise du groupe Holtec International). La Phase 1 d'examen de la CCSN d'un réacteur refroidi au

plomb proposé par la société LeadCold Nuclear a été suspendue à la demande du fabricant. Plusieurs autres fabricants ont indiqué qu'ils allaient présenter des demandes d'examen en vue de l'obtention d'un permis dans un avenir rapproché [CCSN, 2019a].

Les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) cherche à établir des partenariats avec des fournisseurs de technologie 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 d'un examen des LNC [LNC, 2019]. Global First Power en est à la troisième étape d'examen pour un microréacteur modulaire (MRM^{MC}) (réacteur à haute température refroidi au gaz) de 5 MWé. Trois autres promoteurs ont terminé la phase de préqualification des LNC et ont été invités à entreprendre la phase suivante de l'examen détaillé; il s'agit d'U-Battery Canada Ltd. (réacteur à haute température refroidi au gaz de 4 MWé), de StarCore Nuclear (réacteur à haute température refroidi au gaz de 14 MWé) et de Terrestrial Energy (réacteur intégral à sels fondus de 190 MWé).

Global First Power a présenté à la CCSN une demande initiale de permis de préparation d'un emplacement [GFP, 2019a, 2019b]. Global First Power, Ultra Safe Nuclear Corporation et Ontario Power Generation proposent de construire et d'exploiter un MRM^{MC} de 5 MWé sur le site des Laboratoires de Chalk River appartenant à Énergie atomique du Canada limitée. En juillet 2019, le gouvernement fédéral a émis un avis de lancement d'une évaluation environnementale pour ce projet de PRM situé aux Laboratoires de Chalk River [CCSN, 2019d].

La SGDN continuera, dans le cadre de son examen continu de l'approche de la GAP, de surveiller les activités de développement des PRM et les conséquences de la construction de nouveaux réacteurs sur le combustible nucléaire irradié à gérer.

Observations et conclusions

Plusieurs examens techniques et stratégiques des cycles de combustibles avancés ont été réalisés au cours des dernières années par des organisations nationales et internationales. La SGDN surveille les faits nouveaux liés à ces études dans le cadre de son dossier de suivi des technologies liées aux cycles de combustible avancés. Conformément aux précédents rapports, les principales observations tirées de l'examen récent de la recherche internationale sont les suivantes :

- » Quel que soit le cycle de combustible, des déchets radioactifs à longue vie seront produits. On convient généralement dans le monde que les dépôts géologiques en profondeur constituent la meilleure solution pour la gestion à long terme sûre des déchets à longue vie issus de tout cycle de combustible.
- » Bien que le RST puisse potentiellement permettre de réduire le volume de combustible nucléaire irradié et de déchets de haute activité devant être stockés dans un dépôt géologique en profondeur, il accroît considérablement la quantité de déchets de moyenne activité à longue vie produits (qui doivent également être gérés à long terme dans un dépôt géologique en profondeur) et ne réduit pas de façon importante l'empreinte souterraine du dépôt. (La taille d'un dépôt de combustible irradié ou de déchets de haute activité dépend principalement du taux de génération de chaleur et non du volume de déchets à stocker. Ce taux est fonction de la quantité d'énergie extraite du combustible et, par conséquent, demeure relativement constant par unité d'énergie produite, quel que soit le cycle de combustible utilisé.)
- » Les cycles de combustible avancés basés à la fois sur le RST et les réacteurs avancés (à neutrons rapides) ne sont pas prêts à être commercialisés à grande échelle, étant donné le temps requis pour réaliser les recherches techniques et mettre au point et à l'essai les technologies avancées liées à ces réacteurs. Les questions liées aux coûts élevés et à l'obtention d'un large appui public qui peuvent

accompagner le retraitement du combustible irradié ou les nouveaux concepts de réacteurs sont également susceptibles de nuire à leur démonstration et à leur déploiement à court terme. Une fois qu'une décision aura été prise de déployer de tels cycles de combustible, plusieurs décennies seront encore nécessaires pour effectuer la transition complète des cycles actuels aux cycles nouveaux, et il faudra ensuite des siècles pour tirer de leur mise en oeuvre quelque avantage sur le plan de la gestion des déchets.

- » La mise au point des PRM continue de susciter un certain intérêt au Canada et à l'étranger. Les PRM utilisent des cycles de combustible autres que CANDU, certains basés sur des combustibles liquides, lesquels créeront probablement de nouveaux types de déchets de combustible qu'il faudra gérer. Pour un de ces concepts, l'option du recyclage du combustible CANDU irradié est envisagée. Plusieurs concepts font actuellement l'objet d'examen préliminaires ou d'examen d'homologation de la conception dans quelques pays, dont le Canada. Une demande de Permis de préparation d'un emplacement a été présentée en 2019 à la CCSN pour l'établissement d'une centrale à microréacteur modulaire (MRM^{MC}) de 5 MWé sur le site des Laboratoires de Chalk River.
- » Si l'on s'en remet au prix actuel de l'uranium, le coût total du cycle de vie des cycles de combustible avancés est supérieur à celui du cycle à passage unique en raison des coûts élevés que représente la mise au point et la construction de réacteurs de nouvelle génération, d'installations de retraitement et d'usines de fabrication du combustible.
- » Le Royaume-Uni mettra un terme à ses activités de retraitement de combustible en raison du coût élevé de remplacer les installations vieillissantes de retraitement comparativement au coût de stocker directement le combustible irradié dans un dépôt géologique en profondeur.
- » Certains pays, notamment la Chine, la Russie et l'Inde, continuent de mettre au point ou de construire des prototypes de réacteurs avancés et les installations connexes associées au cycle du combustible. La Chine et l'Inde planifient également la construction de dépôts géologiques en profondeur pour gérer les déchets de haute activité générés par leurs programmes. La Russie planifie de mettre au point un cycle de combustible fermé qui comprendrait le retraitement obligatoire du combustible nucléaire irradié, lequel serait réutilisé dans les réacteurs actuels ou dans des réacteurs avancés.

Les principales conclusions de la SGDN sont que :

- » Les nouveaux cycles de combustible continuent de susciter de l'intérêt dans le monde et de faire l'objet de recherches, mais il n'y a eu aucune percée technologique qui modifierait la précédente conclusion concernant l'approche de la GAP pour la gestion de l'inventaire actuel de combustible nucléaire irradié canadien.
- » L'exploitation éventuelle de PRM au Canada aurait pour conséquence la nécessité de gérer de petites quantités de nouveaux types de déchets de combustible. Les répercussions de ces possibles nouveaux déchets sur le programme de la SGDN devront être évaluées si l'utilisation des technologies liées aux PRM est envisagée.
- » Les déchets associés aux cycles de combustible avancés seraient gérés par la SGDN de manière sécuritaire, socialement acceptable, techniquement sûre, écologiquement responsable et économiquement viable.
- » La SGDN continuera d'assurer un suivi des développements liés aux cycles de combustible avancés 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 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. 4^e Atelier international sur la technologie et les composants des systèmes pilotés par accélérateur (TCADS-4), 14 au 17 octobre 2019, Anvers, Belgique.
(www.oecd-nea.org)
- AEN/OCDE, 2019b. Actes de l'Atelier international sur les dangers chimiques dans les processus nucléaires des installations du cycle du combustible de l'Agence pour l'énergie nucléaire. Atelier organisé par l'AEN de l'OCDE, 17 au 19 avril 2018, Boulogne-Billancourt, France. AEN/CSNI/R(2019)9 et AEN/CSNI/R(2019)9/ADD1, mai 2019.
(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. 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, 2017b. 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, 2018a. 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, 2018b. ARIS – Advanced Reactors Information System. Base de données tenue par l'AIEA, novembre 2018.
(aris.iaea.org)
- AIEA, 2018c. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), édition 2018, septembre 2018.
(aris.iaea.org)
- AIEA, 2019a. Conférence internationale sur la gestion du combustible irradié des réacteurs nucléaires : Tirer des leçons du passé, préparer l'avenir, 24 au 28 juin 2019, Vienne, Autriche.
(event.do/iaea/a/#/events/3293)
- AIEA, 2019b. 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)
- ANS, 2019. Global/TopFuel 2019, réunion organisée par l'American Nuclear Society, 22 au 26 septembre 2019, Seattle, États-Unis.
(globaltopfuel.ans.org)
- 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)
- CCSN, 2017. Sommaire de la phase 1 – Examen préalable de la conception du réacteur intégral à sels fondus - 400 de Terrestrial Energy Inc., novembre 2017.
(www.nuclearsafety.gc.ca/fra/pdfs/Pre-Project_Design_Review/Terrestrial-Energy-Pre-Project-Design-Review-Exec-Summary-fra.pdf)
- CCSN, 2019a. 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)
- CCSN, 2019b. Sommaire de la phase 1 d'un examen de la conception d'un fournisseur préalable à l'autorisation : Ultra Safe Nuclear Corporation, février 2019.
(www.nuclearsafety.gc.ca/fra/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/executive-summary-ultra-safe-nuclear-corporation.cfm)
- CCSN, 2019c. Sommaire de la phase 1 d'un examen de la conception d'un fournisseur préalable à l'autorisation : ARC Nuclear Canada Inc., octobre 2019.
(www.nuclearsafety.gc.ca/fra/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/arc-nuclear-canada-executive-summary.cfm)
- CCSN, 2019d. Projet de microréacteur modulaire.
(www.nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/environmental-assessments/ongoing/ontario/EA_80182.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)
- EASAC, 2014. Management of Spent Nuclear Fuel and its Waste. Rapport d'orientation 23 de l'EASAC, préparé par le Comité consultatif scientifique des Académies européennes, juillet 2014.
(www.easac.eu)

- Énergie NB, 2019. « Énergie NB est heureuse des progrès réalisés sur les petits réacteurs modulaires », communiqué de presse d'Énergie Nouveau-Brunswick, 25 juillet 2019.
(www.nbpower.com)
- EPRI, 2010. Advanced Nuclear Fuel Cycles – Main Challenges and Strategic Choices. Rapport 1020307 de l'Electric Power Research Institute, septembre 2010. États-Unis.
(www.epri.com)
- EPRI, 2015. Program on Technology Innovation: Technology Assessment of a Molten Salt Reactor Design. Rapport 3002005460 de l'Electric Power Research Institute, octobre 2015. États-Unis.
(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. États-Unis.
(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. États-Unis.
(www.epri.com)
- GENIORS, 2017. Gen IV Integrated Oxide Fuels Recycling Strategies.
(www.geniors.eu)
- GIF, 2018. Generation IV International Forum.
(www.gen-4.org)
- 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)
- Gobien, 2016. Some Implications of Recycling Used CANDU Fuel in Fast Reactors. Article préparé par M. Gobien, SGDN, présenté dans le cadre 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, 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)
- HATCH, 2016. SMR Deployment Feasibility Study – Feasibility of the Potential Deployment of Small Modular Reactors (SMRs) in Ontario. Rapport H350381-00000-162-066-0001, préparé par Hatch Ltd., juin 2016.
(www.ontarioenergyreport.ca)
- ICAPP, 2019. 2019 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, 12 au 15 mai 2019, Juan-les-Pins, France.
(www.sfen-icapp2019.org)
- ICENES, 2019. 19^e Conférence internationale sur les systèmes d'énergie nucléaire émergents, 6 au 8 octobre 2019, Bali, Indonésie.
(icenes2019.fmipa-itb.org)
- ICONE, 2019. 27^e Conférence internationale sur le génie nucléaire, organisée par l'American Society of Mechanical Engineers, 19 au 24 mai 2019, Tsukuba, Japon.
(www.icone27.org)

- 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 déclassé et la restauration environnementale, organisée par la Société nucléaire canadienne, 11 au 14 septembre 2016, Ottawa, Canada.
(www.nwmdr2016.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 Ltd., 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 Ltd., 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 Ltd., NWMO TR-2010-24, décembre 2010.
(www.nwmo.ca)
- Kessler et coll., 2012. “Radiotoxicity Index”: An Inappropriate Discriminator for Advanced Fuel Cycle Technology Selection. Document n° 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.
(www.wmsym.org)
- LNC, 2016. A Feasibility Study on the Recycling of Used CANDU Fuel. Rapport 153-124900-REPT-002. Préparé par les LNC, avril 2016.
(www.ontarioenergyreport.ca)
- LNC, 2017. Technologie de petits réacteurs modulaires.
(www.cnl.ca/fr/home/installations-et-expertise/prm/default.aspx)
- LNC, 2019. « Les concepteurs franchissent les étapes du processus entrepris pour l'implantation d'un petit réacteur modulaire », communiqué de presse des LNC, 29 juillet 2019.
(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)
- MRS, 2019. Symposium EN17 de la Materials Research Society – Structure-Property Processing Performance Relationships in Materials for Nuclear Technologies, 2 au 5 décembre 2019, Boston, États-Unis.
(www.mrs.org/fall2019/symposium-sessions)
- NEI, 2019. 9^e Sommet international annuel sur les PRM et les réacteurs avancés, 2 et 3 avril 2019, Atlanta, États-Unis.
(www.nuclearenergyinsider.com/international-smr-advanced-reactor)
- PRM (Comité directeur canadien de la Feuille de route des petits réacteurs modulaires), 2018. Appel à l'action : Feuille de route des petits réacteurs modulaires.
(smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_FR_nov6_Web.pdf)

- RWM, 2017. Review of Alternative Radioactive Waste Management Options. Rapport NDA/RWM/146, préparé par la Radioactive Waste Management Ltd., au Royaume-Uni, mars 2017.
(www.gov.uk/government/organisations/radioactive-waste-management)
- Sandia, 2012. Influence of Nuclear Fuel Cycles on Uncertainty of Geologic Disposal. Rapport FCRD-UFD-2012-000088, préparé pour la Used Fuel Disposition Campaign du Département américain de l'énergie par Sandia National Laboratories, juillet 2012.
(www.energy.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 NWMO TR-2017-02 de la SGDN, décembre 2017.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2018a. Watching brief on advanced fuel cycles – 2018 update.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2018b. Postclosure Safety Assessment in a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock. Rapport technique NWMO-TR-2018-08 de la SGDN, décembre 2018.
(www.nwmo.ca)
- SGDN, 2019. Nuclear Fuel Waste Projections in Canada – 2019 Update. Rapport technique de la SGDN NWMO-TR-2019-14, septembre 2019.
(www.nwmo.ca)
- SNC, 2019. 9^e Symposium international sur les réacteurs refroidis à l'eau supercritique (ISSCWR-9), 10 au 14 mars 2019, Vancouver, Canada.
(www.cns-snc.ca/events/isscwr9)
- 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 (Project ALFRED).
(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. NRC, 2012. Environmental Topical Report for Potential Commercial Spent Nuclear Fuel Reprocessing Facilities in the United States – Final Report, septembre 2012.
(www.nrc.gov)
- WNA, 2019. World Nuclear Fuel Cycle Conference. Conférence organisée par la World Nuclear Association et le Nuclear Energy Institute, 9 au 11 avril 2019, Miami, États-Unis.
(www.wnfc.info)

Pour plus de renseignements, veuillez contacter :

Société de gestion des déchets nucléaires

22, avenue St. Clair Est, 6^e étage
Toronto (Ontario) M4T 2S3, Canada
Tél. : 416.934.9814 Sans frais : 1.866.249.6966
Courriel : contactus@nwmocanada
Site Web : www.nwmocanada

 [@nwmocanada](https://www.facebook.com/nwmocanada)

 [@LaSGDN](https://www.instagram.com/LaSGDN)

 [/company/nwmocanada](https://www.linkedin.com/company/nwmocanada)

© 2020 Société de gestion des déchets nucléaires

