

Gestion adaptative progressive

**Ingénierie de conception et évaluation de la sûreté
post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en
roche cristalline**

Rapport pré-projet

NWMO TR-2012-16

Décembre 2012

Préparé par :
Société de gestion des déchets nucléaires

RÉSUMÉ

La Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) est responsable de la mise en œuvre de la Gestion adaptative progressive (GAP), le plan approuvé par le gouvernement fédéral pour la gestion à long terme du combustible nucléaire irradié canadien. En vertu de ce plan, le combustible nucléaire irradié sera stocké dans un dépôt géologique en profondeur construit au sein d'une formation rocheuse appropriée.

Le dépôt et son milieu composeront un système conçu pour protéger la population et l'environnement par le biais de multiples barrières. Ces barrières incluent le combustible irradié de constitution céramique, les conteneurs de longue durée résistants à la corrosion, les matériaux synthétiques de scellement et la géosphère locale.

La sûreté constitue un objectif prioritaire de la mise en œuvre du programme de la GAP. Afin d'atteindre cet objectif, la SGDN mène un large éventail d'activités complémentaires, dont des activités de recherche, de conception technique, de démonstration technologique et d'évaluation de la sûreté, lesquelles sont requises pour évaluer la performance du concept de dépôt à barrières multiples selon l'échelle de temps nécessaire pour démontrer la sûreté à long terme de l'installation.

Un processus de sélection d'un site est en cours pour trouver un site sûr au sein d'une collectivité informée et consentante. Le processus de sélection d'un site s'étendra sur plusieurs années. À mesure que des sites potentiellement propices seront identifiés en collaboration avec les collectivités intéressées, des études détaillées sur le terrain et des activités de caractérisation géoscientifique seront menées pour déterminer si le concept de dépôt à barrières multiples de la GAP peut être mis en œuvre de manière sûre de façon à répondre aux exigences rigoureuses en vigueur.

À ce stade peu avancé du processus, avant que des sites aient été précisément délimités en vue d'études sur le terrain, il est utile de réaliser des études génériques pour illustrer la performance et la sûreté à long terme du système à barrières multiples en fonction de divers milieux géologiques.

Ce rapport décrit une étude de cas illustrative de la conception multi-barrières actuelle et de la sûreté post-fermeture d'un dépôt géologique en profondeur au sein d'une formation hypothétique de roche cristalline du Bouclier canadien. L'objet de cette étude de cas consiste à présenter une méthodologie d'évaluation de la sûreté post-fermeture afin d'illustrer les moyens pris pour satisfaire aux exigences établies par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) dans le Guide G-320, *Évaluation de la sûreté à long terme de la gestion des déchets radioactifs*. Dans le cadre d'une demande de permis pour un site candidat, une étude de cas exhaustive sera préparée. Celle-ci inclura des informations plus complètes sur la conception et la sûreté post-fermeture du dépôt, ainsi qu'une description détaillée de la géosphère locale, une évaluation environnementale et une évaluation de la sûreté d'exploitation du dépôt.

Géosphère

Un modèle de géosphère hypothétique a été défini en partie d'après les données du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire. Il a été défini pour les besoins de cette étude de cas illustrative réalisée dans le cadre de la mise en œuvre par la SGDN du processus de sélection d'un site pour la GAP, dont le but est de trouver un site propice au sein d'une collectivité informée et consentante. Alors que ce site hypothétique offre un exemple d'environnement de roche cristalline, un éventail de caractéristiques sont décrites pour divers

autres environnements considérés dans le cadre de l'évaluation de la sûreté afin d'illustrer à la fois une approche de sûreté à long terme et la fonction des diverses barrières du système.

La sûreté à long terme et la performance d'un dépôt de combustible irradié dépendront en partie de l'environnement géologique qui entoure le dépôt. La géosphère procurera un environnement aux propriétés géomécaniques et géochimiques stables. La stabilité géomécanique garantira la sûreté des travaux d'excavation, de stockage des conteneurs et de construction du système de barrières et isolera les conteneurs d'un large éventail d'événements humains et naturels envisageables. La stabilité géochimique favorisera la durabilité des conteneurs et inhibera le transport des radionucléides. La capacité de la géosphère à soutenir ces attributs dépendra des conditions propres au site du dépôt.

Pour les besoins de cette évaluation illustrative, la géosphère hypothétique a été divisée en trois systèmes d'eaux souterraines, dont les caractéristiques suivantes sont présumées :

1. Le système des eaux souterraines peu profondes, situé de 0 à 150 m sous la surface, est principalement régi par des changements topographiques locaux et infrarégionaux. Les vitesses des eaux souterraines dans la zone peu profonde sont suffisamment élevées que le transport des matières se fait principalement par advection. Les eaux souterraines à cette profondeur sont douces et abondamment oxygénées et leur teneur totale en solides dissous est faible.
2. Le système des eaux souterraines intermédiaires situé de 150 à 700 m sous la surface constitue une zone de transition entre les eaux douces abondantes en oxygène et les eaux plus minéralisées et aux propriétés chimiques plus réductrices des eaux profondes. Dans le cas du site hypothétique, la transition entre les conditions oxydantes et les conditions réductrices se produit à une profondeur d'approximativement 150 m. Dans le système des eaux souterraines intermédiaires, les plus grands domaines de roche peu perméable tendent à diminuer le taux de transport des matières.
3. Contrairement aux eaux souterraines du système peu profond et du système intermédiaire, le système à grande profondeur, situé à 700 m sous terre, comprend des eaux qui présentent une plus grande teneur totale en solides dissous, des densités de fluides plus élevées et des conditions chimiques réductrices. La vitesse des eaux souterraines dans la masse rocheuse est très faible.

Conception technique

Le modèle conceptuel actuel pour un environnement de roche cristalline consiste en un dépôt construit à une profondeur approximative de 500 m. Le dépôt comprend un réseau de salles de stockage dont les planchers sont percés d'alvéoles pouvant contenir l'inventaire de 4,6 millions de grappes de combustible irradié du scénario de base, encapsulées dans approximativement 12 800 conteneurs de longue durée. Les conteneurs sont constitués d'une coque extérieure en cuivre qui contient une coque interne en acier. Le cuivre de la coque externe confère au conteneur une résistance efficace à la corrosion dans les conditions géologiques existant à grande profondeur, alors que la coque externe procure la rigidité nécessaire pour résister aux charges hydrauliques et mécaniques prévues, y compris aux charges sismiques et glaciaires.

Chaque alvéole forée dans le plancher le long de la ligne médiane des salles de stockage contient un conteneur de combustible irradié entouré d'un ensemble de scellement composé de disques tampons, d'anneaux et de pastilles bouche-trou en bentonite hautement compactée. La salle de stockage au-dessus des alvéoles est remplie de matériaux de remblayage comprenant un mélange de bentonite et de sable et d'autres matériaux de scellement. La bentonite et le sable sont des matières naturelles durables qui devraient conserver leurs propriétés sur de grandes

périodes. La bentonite est un type d'argile qui se gonfle au contact de l'eau, ce qui lui confère un pouvoir de scellement naturel.

Évaluation post-fermeture

Le premier objectif de sûreté du dépôt géologique en profondeur est le confinement et l'isolement à long terme du combustible nucléaire irradié. La sûreté du dépôt serait le résultat de la géologie locale, de l'ingénierie de conception ainsi que des méthodes d'exploitation et des procédures d'assurance de la qualité utilisées, y compris l'examen et la surveillance. L'évaluation de la sûreté procure une évaluation quantitative de la performance globale du système du dépôt et de son incidence sur la santé humaine et sur l'environnement. À ce titre, elle permet de relever les caractéristiques ou processus qui permettent de mieux comprendre la sûreté à long terme du dépôt et d'établir la confiance voulue à son égard.

L'étude de cas illustrative porte sur la sûreté à long terme, ou post-fermeture. La période post-fermeture commencera lorsque tout le combustible aura été placé dans le dépôt et que celui-ci aura été scellé et fermé. Conformément au Guide G-320 de la CCSN, l'étude définit des scénarios, des modèles et des méthodes qui permettent d'évaluer la sûreté, de déterminer les incidences radiologiques et de chiffrer les incertitudes. Les résultats de ces études sont comparés à des critères d'acceptation provisoires se rapportant à la protection de la population et de l'environnement. L'évaluation ne tente pas de prédire l'avenir, mais plutôt d'examiner les conséquences d'un éventail de scénarios probables, de scénarios improbables et de scénarios « Et si ». Les scénarios probables sont regroupés dans la section « Scénario d'évolution normale ».

Scénario d'évolution normale

Le scénario d'évolution normale décrit dans ce rapport est basé sur une extrapolation rationnelle dans le temps des caractéristiques du site et du dépôt du cas de référence, en conformité avec les exigences du Guide G-320 de la CCSN. Ce rapport explique pourquoi les conteneurs de combustible irradié en cuivre devraient demeurer intacts au cours de la période concernée. Pour les besoins de l'étude du scénario d'évolution normale du cas de référence, il est présumé qu'un petit nombre de conteneurs dont la coque de cuivre présente des défauts non décelés sont stockés dans le dépôt. Pour parvenir à des estimations prudentes, il est présumé que ces conteneurs sont placés dans une stalle de stockage associée à la plus courte trajectoire entre la géosphère et la biosphère en surface. Les effets anticipés des glaciations sur les évaluations sont également décrits.

L'évaluation de la sûreté post-fermeture adopte des hypothèses basées sur les connaissances scientifiques et réalistes sur le plan physique pour les processus et les données qui sont compris et qui peuvent être justifiés d'après les résultats des recherches et/ou des investigations futures sur le terrain. Lorsque des processus ou des données sont associés à des niveaux d'incertitude élevés, des hypothèses prudentes sont adoptées et décrites afin de limiter les incidences liées aux incertitudes.

Pour l'évaluation de la sûreté du cas de référence, le principal facteur contribuant à la dose publique à long terme se rapportant à un petit nombre présumé de conteneurs de combustible irradié défectueux est la fraction de rejet instantané d'iode-129, un radionucléide à longue vie contenu dans le combustible irradié qui n'est pas absorbé par la géosphère. La pointe de dose calculée pour le cas de référence est approximativement 910 fois inférieure au critère d'acceptation provisoire de 0,3 mSv par année pour le scénario d'évolution normale et survient approximativement 100 000 ans après la fermeture du dépôt. La longue période menant à cette pointe est en partie le résultat de la performance combinée des systèmes barrières du dépôt, y

compris de la robustesse des conteneurs de longue durée, de l'intégrité des systèmes de scellement ouvragés et des formations de roches entourant le dépôt en champ proche.

Analyses de sensibilité et évaluations limitatives

Reconnaissant que l'évolution future d'un dépôt comporte des incertitudes, la SGDN a fait varier un certain nombre d'hypothèses et de paramètres importants, a réalisé des évaluations limitatives et a construit un certain nombre de scénarios hypothétiques « Et si » dans le but d'examiner l'influence des incertitudes liées aux paramètres et aux scénarios sur l'évaluation de la sûreté à long terme. Cette approche est conforme au Guide G-320 de la CCSN qui recommande l'utilisation de différentes stratégies d'évaluation.

Les principaux paramètres qui pourraient potentiellement avoir une influence sur la sûreté à long terme sont variés d'un scénario de sensibilité à l'autre pour mieux comprendre l'influence des incertitudes liées à ces paramètres :

- Multiplication par 10 du taux de dissolution du combustible;
- Augmentation des fractions de rejets instantanés à 10 %;
- Gamme des taux de conductivité hydraulique de la masse rocheuse qui couvrent un facteur de 1 000;
- Diminution de la distance entre le dépôt et une fracture transmissive hypothétique de 25 m à 10 m;
- Augmentation de la dégradation des conteneurs en multipliant par 10 la dimension de la zone de déféctuosité non décelée présumée des conteneurs;
- Diminution du taux de sorption par la géosphère combinée à une augmentation des limites de solubilité des radionucléides.

Dans des évaluations limitatives, certains paramètres sont également poussés au-delà des plages de variation raisonnables applicables. Dans ces cas, les paramètres sont complètement ignorés en fixant leur valeur à zéro ou en retirant les limites physiques des façons suivantes :

- Augmentation de la solubilité des radionucléides dans les eaux souterraines en ignorant les limites de solubilité;
- Diminution de la sorption des radionucléides par la géosphère en ignorant la sorption;
- Diminution de la sorption des radionucléides en champ proche en ignorant la sorption.

La figure E1 présente les résultats de l'analyse de sensibilité et des évaluations limitatives réalisées dans le cadre de l'étude de cas illustrative.

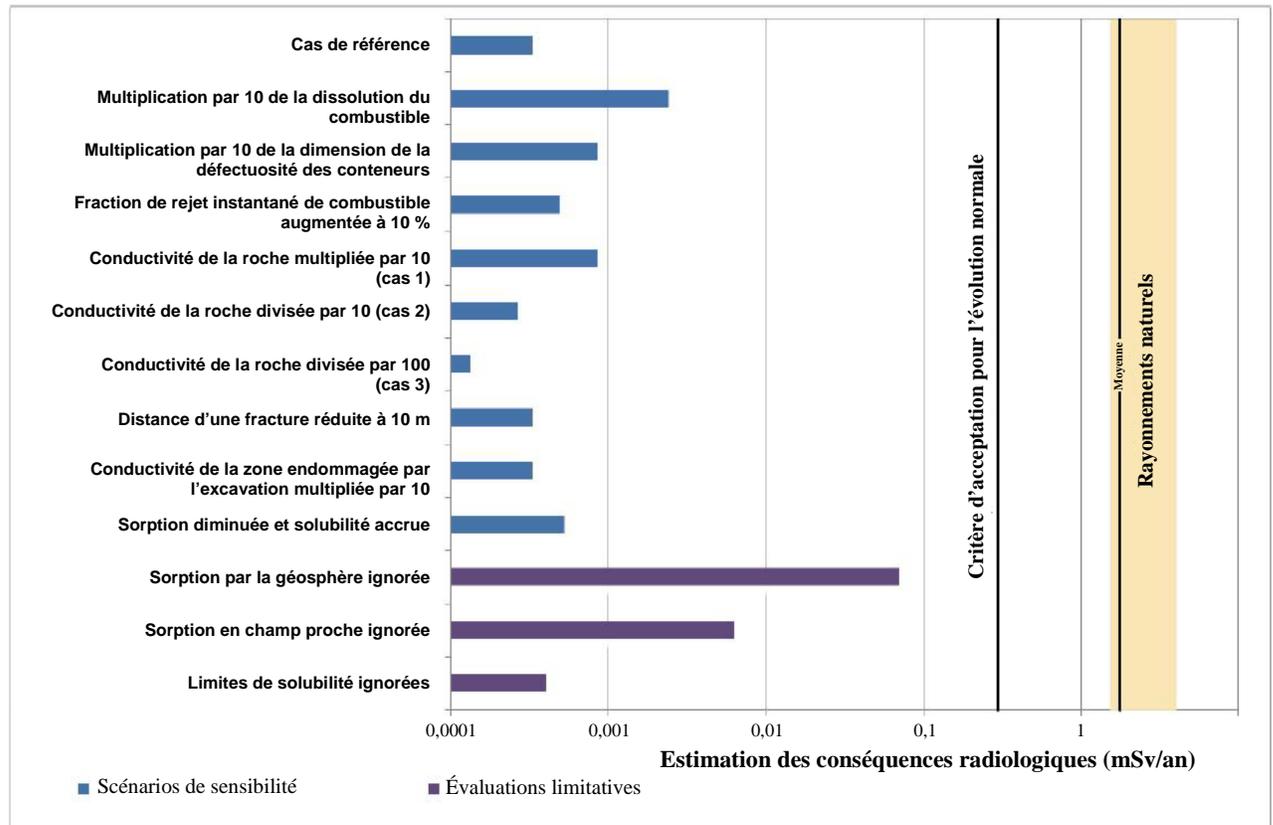


Figure E1: Résultats de l'analyse de sensibilité et des évaluations limitatives

Les analyses de sensibilité montrent que l'incidence sur les doses radiologiques est faible lorsque les principaux paramètres sont variés. Comme nous le voyons à la figure E1, le paramètre exerçant la plus grande influence sur les doses radiologiques est la dissolution de la céramique du combustible irradié. Cela résulte du fait que la majeure partie des radionucléides est confinée dans le combustible irradié, qui est un solide à faible solubilité. Les conséquences radiologiques liées à la multiplication par 10 du taux de dissolution du combustible sont estimées être 7,3 fois plus importantes que la valeur associée au cas de référence.

Les analyses limitatives révèlent que les doses radiologiques augmentent de façon notable lorsque la sorption par la géosphère est ignorée, ainsi que lorsque la sorption en champ proche est ignorée (voir la figure E1). Lorsque la sorption par la géosphère est ignorée, la dose de pointe par rapport à la valeur du cas de référence est multipliée par 210 et survient ~48 000 ans après la fermeture (comparativement à 100 000 ans pour le cas de référence).

Reconnaissant l'importance de paramètres tels que la dissolution du combustible irradié et la sorption que révèle cette étude de cas, la SGDN mène des programmes de recherche dans ces domaines afin d'améliorer sa compréhension de ces processus. Cependant, le débit de dose maximal pour un membre du public est toujours estimé être 130 fois inférieur au critère d'acceptation provisoire de 0,3 mSv par année.

Tous les résultats antérieurs ont été obtenus par le biais d'analyses déterministes. Les incertitudes peuvent être approfondies au moyen de la modélisation probabiliste. Dans le cas de la présente étude de cas, une analyse probabiliste des paramètres de rejet et de transport des contaminants a été réalisée. Au total, 120 000 simulations ont été examinées pour obtenir un

intervalle de confiance de 95 % relatif au débit de dose maximal. L'incidence radiologique dans ce cas est estimée être 4 fois plus importante que celle du cas de référence. Ce débit de dose plus important est tout de même 230 fois inférieur au critère d'acceptation provisoire de 0,3 mSv par année.

Scénarios d'événements perturbateurs

Un certain nombre de scénarios d'événements perturbateurs, ou scénarios « Et si », sont considérés en examinant des mécanismes possibles de défaillance. Ces scénarios sont examinés pour évaluer l'incidence potentielle sur la sûreté de la défaillance des principales barrières, conformément aux exigences du Guide G-320. Les scénarios d'événements perturbateurs considérés dans cette étude de cas illustrative incluent :

- La défaillance des conteneurs au bout de 60 000 ans;
- La défaillance des conteneurs au bout de 10 000 ans;
- La défaillance des conteneurs au bout de 10 000 ans accompagnée d'une variation de la conductivité hydraulique;
- La défaillance des éléments de scellement.

Les scénarios de défaillance des conteneurs (c.-à-d., tous les conteneurs connaissent des défaillances au bout de 60 000 ans, et une variation où tous les conteneurs connaissent des défaillances au bout de 10 000 ans en raison d'effets non anticipés de glaciations, tels que des charges mécaniques ou des changements dans les propriétés chimiques des eaux souterraines non prévus par la conception) révèlent une augmentation non négligeable des résultats liés au débit de dose maximal. Toutefois, les débits de dose maximaux demeurent inférieurs au critère d'acceptation provisoire de 1 mSv par année dans le cas des scénarios d'événements perturbateurs.

Les résultats révèlent également une faible sensibilité du débit de dose de pointe au moment présumé de défaillance de l'ensemble des conteneurs dans le cas de la géosphère de référence. Cela résulte du fait que le temps de défaillance présumé des conteneurs est plus long que le temps de désintégration des produits de fission à vie courte. Les autres actinides et la plupart des produits de fission à vie longue sont absorbés par les barrières ouvragées argileuses et les barrières naturelles de la masse rocheuse hôte de sorte que le débit de dose maximal ne diffère pas substantiellement dans ces deux cas.

Les résultats maximaux se révèlent être plus sensibles à des variations de la conductivité hydraulique de la géosphère survenant simultanément à la défaillance commune de tous les conteneurs au bout de 10 000 ans. Lorsque la conductivité hydraulique est multipliée par 10, le débit de dose maximal est 1,7 fois supérieur au critère d'acceptation provisoire de 1 mSv par année pour les événements perturbateurs et survient au bout de 17 000 années. Ce résultat indique qu'un site candidat dont la conductivité hydraulique de la masse rocheuse est de l'ordre de 4×10^{-10} m/s ou plus serait susceptible de permettre le dépassement du critère d'acceptation provisoire relatif au débit de dose en cas de scénarios perturbateurs.

Finalement, l'intrusion humaine par inadvertance a fait l'objet d'une analyse stylisée. Ce scénario constitue un cas spécial, selon le Guide G-320 de la CCSN, puisqu'il contourne toutes les barrières érigées et, par conséquent, les conséquences radiologiques associées pourraient dépasser la limite réglementaire. Les résultats montrent que les doses potentielles reçues par un membre d'une équipe de forage et par une personne résidant à proximité du site liées à une intrusion précoce dépasseraient la limite réglementaire. Cependant, la probabilité qu'un tel événement survienne est très faible en raison du stockage à grande profondeur des conteneurs

de combustible irradié dans un lieu assujéti à des mesures de surveillance institutionnelles pendant une période prolongée, de l'absence de ressources minérales économiquement exploitables et de l'absence de ressources en eau potable souterraine. Les pratiques normales de forage en profondeur (par exemple, le contrôle des fluides de forage, l'utilisation de la diagraphie gamma, etc.) tendraient également à réduire les conséquences estimées dans ce rapport. Bien que la probabilité d'une intrusion humaine ne puisse être déterminée avec précision, elle serait très faible. Le risque annuel d'effets sur la santé liés à une intrusion humaine est estimé être inférieur à 1 sur 100 000 par année.

Conclusion

Ce rapport décrit la conception de référence d'un dépôt géologique en profondeur en roche cristalline et présente une approche illustrative d'évaluation de la sûreté post-fermeture qui est structurée, systématique et conforme aux exigences du Guide G-320 de la CCSN. Cette évaluation illustrative comprend une description du système du dépôt, définit systématiquement les scénarios, les modèles et les méthodes utilisés pour l'évaluation de la sûreté, emploie différentes stratégies d'évaluation, aborde la question de l'incertitude et compare les résultats obtenus aux critères d'acceptation provisoires.

L'évaluation de la sûreté post-fermeture démontre, dans le cas du scénario d'évolution normale et des scénarios de sensibilité associés, que tous les critères radiologiques et non radiologiques d'acceptation provisoires sont aisément respectés au cours de la période post-fermeture. Ce résultat est conforme aux évaluations réalisées antérieurement au Canada pour un dépôt géologique en profondeur, ainsi qu'aux évaluations de la sûreté réalisées par d'autres organisations nationales de gestion des déchets radioactifs.