

RÉSUMÉ

Les Canadiens utilisent depuis des décennies l'électricité produite par les réacteurs nucléaires exploités en Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick. Lorsque le combustible nucléaire irradié, ou usé, est retiré de ces réacteurs, il constitue un déchet hautement radioactif qui doit être géré avec soin, à court comme à long terme. Même si sa radioactivité décroît avec le temps, le combustible continuera de poser un risque pour la santé pendant des centaines de milliers d'années. Actuellement, le combustible nucléaire irradié est entreposé en toute sûreté, mais de manière provisoire, dans des installations autorisées situées là où il est produit.

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 sûre du combustible nucléaire irradié canadien. En vertu de ce plan, le combustible nucléaire irradié sera à terme stocké dans un dépôt géologique en profondeur construit au sein d'une formation rocheuse appropriée.

Un dépôt géologique en profondeur est un système à barrières multiples conçu pour protéger à long terme les personnes et l'environnement. Les barrières de ce système sont la forme durable des déchets, les conteneurs de longue durée résistants à la corrosion, les matériaux ouvragés de scellement et la géosphère environnante.

Un processus de sélection est en cours pour choisir, au sein d'une collectivité hôte informée et consentante, un site sûr qui pourra accueillir un dépôt géologique en profondeur. Ce processus de sélection d'un site durera plusieurs années. Lorsque des sites potentiellement propices auront été identifiés en collaboration avec les collectivités intéressées, des études détaillées sur le terrain et des activités de caractérisation géoscientifiques y seront menées pour déterminer si le concept du dépôt à barrières multiples pourra y être mis en œuvre en toute sûreté, conformément aux rigoureuses exigences réglementaires établies.

À ce stade précoce du processus, c'est-à-dire avant que des sites précis aient été identifiés en vue d'un examen plus détaillé, des études génériques ont été réalisées pour comprendre et illustrer l'efficacité et la sûreté à long terme du système à barrières multiples du dépôt relativement à divers contextes géologiques.

Le présent rapport présente une étude de cas type de la sûreté post-fermeture d'un dépôt géologique en profondeur construit dans une formation rocheuse sédimentaire hypothétique du sud de l'Ontario. L'objectif de l'étude est de fournir un exemple d'une évaluation de la sûreté post-fermeture réalisée conformément au document de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) REGDOC-2.11.1, *Gestion des déchets, tome III : Dossier de sûreté pour la gestion à long terme des déchets radioactifs* (CCSN 2018). Pour présenter une demande de permis pour un site candidat réel, un

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : ii

dossier de sûreté complet serait préparé. Ce dossier comprendrait les résultats des études géoscientifiques menées sur le site candidat, une conception technique du dépôt géologique en profondeur adaptée au site et une évaluation de la sûreté qui serait plus exhaustive que celle qui est décrite dans le présent document.

Modèle conceptuel

Le concept actuellement proposé pour un milieu de roche sédimentaire est un dépôt construit à une profondeur nominale de 500 m. Ce dépôt comprendrait un réseau de salles de stockage pouvant accueillir un volume de déchets évalué à environ 5,2 millions de grappes de combustible irradié encapsulées dans approximativement 109 000 conteneurs de combustible irradié de longue durée. Le modèle de conteneur proposé est composé d'un matériau externe résistant à la corrosion (cuivre) et d'un matériau interne offrant un soutien structural (acier). Le cuivre permettra au conteneur de résister à la corrosion dans les conditions géologiques profondes du dépôt, tout en lui conférant la robustesse nécessaire pour supporter les charges hydrauliques et mécaniques anticipées, y compris les charges imposées par les glaciations.

Des conteneurs de combustible irradié enchâssés dans des boîtes tampons en argile de bentonite seront placés dans chaque salle de stockage et seront séparés des conteneurs adjacents par des blocs d'espacement en argile de bentonite. Les conteneurs seront empilés en échiquier en deux rangées décalées et les interstices seront comblés par un matériau de remplissage à base de bentonite.

La bentonite est un matériau argileux naturel durable qui se gonfle au contact de l'eau, ce qui lui confère une capacité d'auto-scellement qui la rend essentiellement imperméable à l'eau.

Géosphère

Pour ce rapport, un modèle de géosphère de référence a été défini, en partie, d'après l'expérience acquise dans le cadre du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire. Il n'est pas basé sur un site particulier et il constitue un exemple d'environnement possible de roche sédimentaire. Ce rapport et les autres études de cas canadiennes réalisées pour d'autres environnements géologiques visent ensemble à illustrer les fondements de la sûreté à long terme d'un dépôt géologique en profondeur construit dans un éventail d'environnements.

La géosphère représente un élément important du système à barrières multiples. Elle constitue une barrière naturelle qui procurera au dépôt la stabilité hydrogéologique, géomécanique et géochimique nécessaire pendant toute la période où la sûreté doit être assurée. La géosphère isole le dépôt des conditions de surface et lui fournit un environnement qui favorise la durabilité des conteneurs.

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : iii

Évaluation de la sûreté post-fermeture

Le premier objectif de sûreté d'un dépôt géologique en profondeur est le confinement et l'isolement à long terme du combustible nucléaire irradié. La sûreté du dépôt sera assurée par la géologie locale, les propriétés des déchets, la conception technique, une exploitation prudente et les procédures d'assurance de la qualité utilisées, y compris les procédures d'examen et de surveillance.

L'évaluation de la sûreté post-fermeture a pour but de déterminer les effets que pourrait avoir le dépôt sur la santé et la sécurité des personnes et de l'environnement au cours de la période suivant sa fermeture. La période couverte par l'évaluation est d'un million d'années et est basée sur le temps qu'il faut à la radioactivité du combustible irradié pour décroître essentiellement au même niveau que celui d'une quantité équivalente d'uranium naturel. Il s'agit aussi d'une période qui se trouve à l'intérieur des limites d'une extrapolation raisonnable de la stabilité géologique des roches environnantes.

L'évaluation de la sûreté post-fermeture adopte des hypothèses quant aux processus et aux données qui sont fondées sur les connaissances scientifiques, qui sont réalistes sur le plan physique, et qui sont comprises et peuvent être justifiées d'après les résultats des recherches déjà réalisées et/ou de l'étude future des sites. Lorsque des processus ou des données sont associés à des niveaux d'incertitude élevés, des hypothèses prudentes sont adoptées et décrites afin de limiter l'incidence des incertitudes.

Portée de l'évaluation de la sûreté post-fermeture

Cette évaluation a pour but de démontrer l'efficacité du concept de dépôt géologique en profondeur relativement à ce milieu rocheux, conformément aux exigences décrites dans le document de la CCSN *REGDOC-2.11.1, Gestion des déchets, tome III : Dossier de sûreté pour la gestion à long terme des déchets radioactifs* (CCSN 2018). Par conséquent, les cas analysés se limitent à ceux qui permettent de démontrer la sûreté de l'approche globale et à ceux qui permettent de parvenir à des conclusions possibles relativement au site hypothétique. Les éléments exclus de la portée de l'évaluation, mais qui pourraient être pris en compte dans une demande de permis dans le cadre d'une évaluation plus exhaustive, sont également abordés.

La sûreté du dépôt est évaluée selon que les résultats répondent ou non aux critères d'acceptation provisoires qui ont été établis pour garantir la protection des personnes et de l'environnement contre les risques radiologiques et non radiologiques associés au dépôt.

Conformément aux exigences du document de la Commission canadienne de sûreté nucléaire document de la CCSN *REGDOC-2.11.1, tome III* (CCSN 2018), ce rapport prend en considération à la fois un scénario d'évolution normale et des scénarios d'événements perturbateurs.

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : iv

Le scénario d'une Évolution normale

Le scénario d'une Évolution normale est basé sur une extrapolation raisonnable des caractéristiques du site et des modes de vie des récepteurs tels qu'ils sont aujourd'hui. Il couvre l'évolution prévue du site et la détérioration prévue du système de dépôt à mesure qu'il vieillit. Il vise à illustrer les incidences que le dépôt aura sur les personnes et sur l'environnement.

Dans ce rapport, le scénario d'une Évolution normale est décrit en termes de « Cas de référence », d'une étude de sensibilité « Cas de base » et d'une série d'études de sensibilité supplémentaires liées au « Cas de base ».

Cas de référence

Le Cas de référence représente la situation où tous les composants du dépôt répondent à leur norme de conception et fonctionnent comme prévu. Dans ce cas, les conteneurs de combustible irradié demeurent intacts de manière essentiellement indéfinie et aucun rejet de contaminant ne survient au cours de la période pertinente d'un million d'années. Les doses radiologiques reçues par le public et l'environnement sont par conséquent nulles.

Cas de base

Les études de sensibilité illustrent l'efficacité du dépôt relativement à une gamme d'écart raisonnablement prévisibles par rapport aux hypothèses du Cas de référence. Ces écarts sont le résultat de composants placés dans le dépôt qui (a) ne répondraient pas à leurs normes de conception ou (b) ne fonctionneraient pas complètement comme prévu.

La probabilité de tels écarts sera très faible. Un soin particulier est apporté à la conception, à la mise au point et à la mise à l'épreuve de la technologie de fabrication et de mise en place qui sera utilisée dans le cadre d'un programme exhaustif d'assurance de la qualité. Le programme d'assurance de la qualité comptera comme élément essentiel un processus d'inspection conçu pour faire en sorte que tous les composants placés répondent aux normes de conception. De même, la performance des composants est soutenue par un programme exhaustif de recherche et d'essais, qui fera en sorte que le comportement de tous les matériaux placés dans le dépôt sera également bien cerné.

Néanmoins, compte tenu du grand nombre de conteneurs à stocker, il n'est pas déraisonnable de prévoir que certaines défaillances surviennent. Pour illustrer la performance du dépôt en cas de défaillance de conteneurs, l'étude de sensibilité « Cas de base » présume que le revêtement de cuivre d'un petit nombre de conteneurs aura des défauts notables et qu'un plus petit nombre de ces conteneurs non conformes échapperont à la détection du programme d'assurance de la qualité et seront inconsciemment placés dans le dépôt.

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : v

Des études ont été entreprises pour déterminer la probabilité que de telles déficiences surviennent et le nombre de conteneurs non conformes qui pourraient être présents; toutefois, les résultats de ces études ne sont pas encore connus. En attendant, on présume la présence de 10 conteneurs dont le revêtement de cuivre comporte des déficiences non décelées importantes. Les études post-fermeture qui présumant la présence de 10 conteneurs défectueux sont suffisantes pour illustrer l'efficacité du dépôt et pour fournir une mesure des incidences qui pourraient être attendues dans le cas d'un tel événement ou d'un événement similaire.

L'importance des déficiences est présumée suffisante pour entraîner la défaillance des 10 conteneurs à l'intérieur d'un délai d'un million d'années. Comme la nature (taille, emplacement) réelle de chaque déficience variera, il est hautement improbable que les 10 conteneurs flanchent simultanément. Il est présumé que les défaillances se répartiront de manière uniforme au cours de la période d'un million d'années couverte par l'évaluation, la première défaillance survenant au bout de 1000 ans et les défaillances subséquentes survenant à intervalles de 100 000 années.

Des défaillances des systèmes de fabrication, de mise en place et d'assurance de la qualité pourraient également avoir des incidences sur d'autres composants du dépôt. Par exemple, des matériaux non conformes pourraient inconsciemment être utilisés dans la fabrication de la bentonite des boîtes tampons, des blocs d'espacement des salles de stockage ou des pastilles de bentonite. Des matériaux non conformes pourraient aussi être inconsciemment utilisés lors de la construction des sceaux des tunnels et des puits du dépôt. Les salles de stockage et les tunnels d'accès pourraient outrepasser leurs dimensions de conception si le dynamitage retirait trop de roche à certains endroits, ce qui entraînerait une utilisation accrue des pastilles de bentonite et l'établissement potentiel de conditions plus favorables à la prolifération microbienne.

Le résultat final principal de telles défaillances pourrait être : (a) l'absence de toute conséquence néfaste ou (b) la défaillance précoce d'un ou de plusieurs conteneurs. Des études sont en cours pour calculer la probabilité que des composants du dépôt ne répondent pas à leurs normes de conception et déterminer le nombre possible de ces composants; toutefois, les résultats de ces travaux ne sont pas encore connus. En attendant, pour les besoins de cette évaluation de la sûreté post-fermeture, les autres défaillances du système de fabrication et d'assurance de la qualité qui pourraient entraîner la défaillance de conteneurs sont présumées être couvertes par le Cas de base et les cas de sensibilité associés.

Quelques d'hypothèses limitatives sont utilisées pour traiter un certain nombre d'incertitudes. Une « hypothèse limitative » est une hypothèse qui entraînerait des incidences plus importantes que ne pourrait avoir la situation d'incertitude examinée, même en prenant en considération toutes les éventualités possibles. À des fins d'illustration, le Cas de base remplace l'incertitude associée à l'emplacement et au mode de vie des personnes qui résideront dans le futur à proximité du dépôt par une hypothèse

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : vi

selon laquelle des personnes vivraient sans le savoir au-dessus du dépôt et tireraient toute leur eau potable et d'irrigation agricole d'un puits profond situé à un endroit qui maximiserait l'absorption de tout contaminant rejeté.

L'adoption d'hypothèses limitatives est une technique communément employée dans les évaluations de sûreté. Elle permet de simplifier des problèmes complexes, l'inconvénient étant que le cas résultant n'est plus le plus réaliste qui soit. Bien que cette technique soit acceptable dans le cadre d'un processus d'obtention de permis (pourvu que les résultats répondent aux critères d'acceptation), elle peut faire apparaître l'efficacité du dépôt bien pire qu'elle ne l'est en réalité. En guise de mise en contexte, la section Portée du chapitre 7 comprend un exposé des principales hypothèses utilisées et les compare à ce qui serait plus susceptible de se produire dans la réalité.

Études de sensibilité pour le Cas de base

Un dépôt géologique en profondeur est un système à barrières multiples. Les cas de sensibilité déterministes suivants sont examinés pour illustrer les incidences qu'auraient certains écarts par rapport à l'efficacité prévue des barrières sur les résultats du Cas de base :

La barrière que constitue le combustible :

- le taux de dissolution du combustible est accru par un facteur de 10;
- la fraction instantanément rejetée pour tous les radionucléides est établie à 0,10 (10 % du volume complet est instantanément rejeté).

La barrière que constitue la gaine en zircaloy :

Aucune contribution n'est accordée dans l'évaluation de la sûreté post-fermeture à la gaine de combustible en zircaloy comme barrière contre le rejet de contaminants par le combustible. Toutefois, comme la gaine contient elle-même des contaminants et comme l'analyse préalable a déterminé que certains de ces contaminants étaient potentiellement importants, les cas de sensibilité suivants ont été simulés pour le zircaloy :

- le taux de dissolution du zircaloy est accru par un facteur de 10;
- la fraction instantanément rejetée pour tous les contaminants contenus dans la gaine de zircaloy est établie à 0,10.

La barrière que constitue le conteneur :

- les 10 conteneurs connaissent une défaillance au bout de 1000 ans;
- 50 conteneurs connaissent une défaillance au bout de 1000 ans;
- 50 et 1000 conteneurs connaissent une défaillance au bout de 10 000 ans;

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : vii

- une faible sorption des matériaux des barrières ouvragées combinée à une limite de solubilité élevée du conteneur;
- la solubilité du conteneur n'a aucune limite.

La barrière que constituent la boîte-tampon, le remblayage et les éléments de scellement :

- la conductivité hydraulique de tous les matériaux des barrières ouvragées scellant le dépôt et les puits est accrue par un facteur de 10;
- une faible sorption des matériaux des barrières ouvragées combinée à une limite de solubilité élevée du conteneur;
- les taux de diffusion dans la bentonite et la géosphère sont accrus par un facteur de 10 et de 100;
- une capacité de sorption de l'I-129 est accordée à la bentonite et à la géosphère;
- aucune sorption dans les matériaux ouvragés de scellement.

La barrière que constitue la géosphère :

- les conductivités hydrauliques sont accrues par un facteur de 10;
- la conductivité hydraulique dans les zones endommagées par l'excavation (ZEE) est accrue par un facteur de 10;
- les taux de diffusion dans la bentonite et la géosphère sont accrus par un facteur de 10 et de 100;
- 100 m d'érosion à la surface dans un million d'années;
- une capacité de sorption de l'I-129 est accordée à la bentonite et à la géosphère;
- 150 m de surpression dans la formation de Shadow Lake;
- les paramètres de sorption sont fixés à deux écarts-types en deçà de la moyenne.

D'autres cas (non énumérés ici, mais décrits dans la section *Portée* du chapitre 7) sont également examinés pour illustrer les incidences de certaines hypothèses sur les puits (en particulier, l'absence d'un puits et la collecte d'eau depuis les eaux de surface) et les incidences des hypothèses liées aux paramètres de modélisation (par exemple, le pas de temps et la taille du maillage).

Pour fournir une indication du comportement du dépôt qui tiendrait compte de l'incertitude associée à plusieurs paramètres, deux types d'études de sensibilité probabilistes ont également été réalisées. Pour ces simulations, un échantillonnage aléatoire est employé pour moduler simultanément plusieurs paramètres d'entrée dont les fonctions de densité sont connues. Les paramètres de rejet et de transport des radionucléides sont modulés pour une même géosphère de référence.

Les cas particuliers qui ont fait l'objet d'une analyse probabiliste sont les suivants :

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : viii

- le nombre, l'emplacement et le moment de défaillance des conteneurs défectueux sont maintenus aux valeurs du Cas de base et les autres paramètres disponibles sont modulés;
- tous les paramètres à distribution de probabilité sont modulés, y compris le nombre, l'emplacement et le moment de défaillance des conteneurs défectueux.

Le débit de dose reçu par les gens constitue un indicateur important de l'efficacité d'un dépôt; toutefois, la pertinence des données sur les débits de dose tend à diminuer à mesure qu'augmentent, au fil du temps, les incertitudes qui entourent les hypothèses qui ont trait à la biosphère (ex. : le climat), aux modes de vie des humains (ex. : les caractéristiques importantes des groupes) et à l'écoulement de l'eau dans l'environnement près de la surface. Par conséquent, deux indicateurs à long terme complémentaires fondés sur des caractéristiques du système qui sont moins sensibles à ces hypothèses sont également évalués. Ces indicateurs sont :

- la concentration de la radiotoxicité dans une étendue d'eau pour des échelles de temps moyennes;
- le transport de la radiotoxicité hors de la géosphère pour des échelles de temps plus longues.

Enfin, tous les cas de sensibilité sont basés sur l'hypothèse d'un climat tempéré constant; toutefois, au cours du dernier million d'années, une grande partie du Canada a été recouverte par des nappes glaciaires d'une épaisseur d'un kilomètre. Les principaux facteurs qui ont déclenché ces cycles (c.-à-d., les variations d'insolation résultant de la dynamique orbitale de la Terre et l'emplacement et la taille des continents) sont toujours présents. Les niveaux actuels de gaz à effet de serre dans l'atmosphère pourraient retarder la prochaine glaciation, mais on prévoit que des cycles glaciaires réapparaîtront au cours de la période couverte par cette évaluation de la sûreté post-fermeture. Les incidences des glaciations sont traitées dans un exposé basé sur l'analyse d'un scénario glaciaire réalisée dans le cadre de travaux menés antérieurement pour la même géosphère, mais un différent modèle de dépôt. Les caractéristiques importantes de cette étude glaciaire sont décrites et son applicabilité à la présente étude est également abordée au chapitre 7.

Scénarios d'événements perturbateurs

Les scénarios d'événements perturbateurs postulent des événements improbables pouvant entraîner une pénétration des barrières et une perte de confinement anormale.

Les scénarios de perturbations suivants sont applicables au modèle conceptuel et à la géosphère hypothétique évalués dans cette étude. Ils sont relevés au chapitre 6, en prenant en considération les caractéristiques, les événements et les processus qui sont importants pour le système du dépôt ainsi que les principales barrières :

- une intrusion humaine fortuite;
- la défaillance de tous les conteneurs;
- la défaillance des éléments de scellement du dépôt;
- une faille non décelée;
- une érosion très importante;
- un trou de sonde mal scellé;
- la défaillance de certains conteneurs;
- un dépôt partiellement scellé.

Les quatre premiers scénarios sont analysés dans le cadre de cette évaluation type de la sûreté. On reconnaît que pour un véritable site, tous les scénarios de perturbations devraient être évalués.

*Le scénario d'une **Intrusion humaine fortuite** prend en considération l'éventualité où un trou serait foré en profondeur dans le futur sur le site du dépôt. Ce scénario constitue un cas spécial, selon le document de la CCSN REGDOC-2.11.1, tome III, puisqu'il implique un contournement du système des barrières multiples. La probabilité qu'un tel événement survienne est très faible en raison des contrôles institutionnels qui seront mis en œuvre et des balises placées qui seront sur le site, et parce que les conteneurs de combustible irradié seront stockés à grande profondeur dans le sol, dans un lieu ne comptant pas de ressources minérales actuellement exploitables sur le plan économique ou de ressources souterraines d'eau potable. De plus, les pratiques normales de forage (par exemple, le contrôle des fluides de forage, l'utilisation de la radiographie à rayons gamma, etc.) diminueraient les conséquences réelles comparativement à celles qui sont estimées ici.*

Le scénario d'une **Défaillance de tous les conteneurs** prend en considération le cas improbable et hypothétique d'une défaillance simultanée de tous les conteneurs (où l'eau pénètre dans tous les conteneurs et entre en contact avec le combustible) au bout de 60 000 ans. Cette période correspond à une échelle de temps au cours de laquelle il est présumé que les cycles glaciaires auront repris et qu'une nappe glaciaire aura recouvert le site. Un scénario de sensibilité d'une défaillance de tous les conteneurs au bout de 10 000 ans est également évalué.

Le scénario d'une **Défaillance des éléments de scellement du dépôt** prend en considération les conséquences d'une efficacité moins bonne que prévu des éléments de scellement des tunnels et des puits.

En ce qui a trait au scénario d'une **Faille non décelée**, on prévoit que toute fracture importante croisant le dépôt et qui ne serait pas décelée lors de la caractérisation du site serait découverte lors de sa construction, et que des mesures palliatives appropriées pourraient alors être prises. Ces mesures pourraient comprendre une modification du plan du dépôt qui permettrait d'éviter les voies de transmission importantes. Ce scénario, cependant, présume qu'une faille dans la roche environnante n'aurait pas été décelée.

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : x

Concernant les scénarios exclus :

- Le scénario d'une **Très importante érosion** prend en considération les incidences d'une érosion glaciaire très importante sur l'efficacité du dépôt de combustible irradié.
- Le scénario d'un **Trou de sonde mal scellé** constitue également un scénario de perturbation, puisqu'il crée une brèche dans la géosphère à faible perméabilité. Cependant, si les trous de sonde sont forés suffisamment loin des structures souterraines du dépôt, il est improbable qu'ils deviennent une voie de passage importante, compte tenu de leur petite taille et des limites du transport diffusif. Ce scénario sera analysé dans le cas d'un site véritable, lorsque l'éloignement des trous de sonde sera connu; ses conséquences devraient cependant être faibles.
- Le scénario d'une **Défaillance de certains conteneurs** prend en considération la défaillance de certains conteneurs due à des conditions *in situ* imprévues. Il diffère du Cas de base représenté par le scénario d'une Évolution normale, où une défectuosité non décelée de certains conteneurs constitue l'événement déclencheur. Bien qu'une analyse détaillée du scénario de la Défaillance de certains conteneurs ne soit pas incluse dans cette étude, on prévoit que la dose maximale attribuable à un tel événement serait considérablement moindre que la dose associée au scénario d'une Défaillance de tous les conteneurs du fait du nombre beaucoup plus petit de conteneurs touchés.
- Le scénario du **Dépôt partiellement scellé** prend en considération les conséquences d'un abandon du dépôt alors que les puits ne seraient pas scellés, ce qui impliquerait une perte de société dans un avenir rapproché.

Tous les scénarios d'événements perturbateurs sont analysés à l'aide de méthodes déterministes, puisque les paramètres fondamentaux qui définissent les scénarios sont choisis de manière conservatrice.

Résultats du scénario d'une Évolution normale

Les résultats des cas mesurés en fonction des critères d'acceptation provisoires établis pour la protection radiologique des personnes sont présentés ci-dessous. Des détails supplémentaires sont fournis au chapitre 7.

Résultats des analyses déterministes

Le débit de dose est nul pour le Cas de référence.

Pour tous les autres cas, les taux de transport sont extrêmement faibles en raison de la faible conductivité hydraulique de la roche hôte, de l'absence de fractures et de l'importance prédominante du transport diffusif. Ainsi, les débits de dose au bout d'un million d'années sont, dans tous les cas sauf dans celui où les taux de diffusion sont

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : xi

accrus par un facteur de 100, en deçà de 0,000001 mSv/a, ou 300 000 fois inférieurs au critère d'acceptation provisoire du débit de dose. Ces débits de dose sont si faibles qu'ils peuvent être considérés comme nuls.

Le cas aux taux de diffusion accrus par un facteur de 100 est un cas extrême, mais il prend en considération l'importance de la barrière rocheuse diffusive. Dans ce cas, la valeur maximale est essentiellement atteinte au cours de la période d'un million d'années couverte considérée. Le débit de dose est de 0,00004 mSv/a, ou 7 500 fois inférieur au critère provisoire établi pour le débit de dose.

Les résultats montrent que l'I-129 est le seul contributeur notable au débit de dose. Cela s'explique par le fait que le volume initial d'I-129 est considérable, que sa fraction de rejet instantané est non nulle, que sa période radioactive est très longue, que sa solubilité n'est pas limitée, qu'il n'est pas sorbé par la boîte tampon, le remblayage ou la géosphère, et qu'il a un effet radiologique sur les humains. Tous les autres produits de fission et actinides se désintègrent à un niveau acceptable ou sont rejetés très lentement à mesure que le combustible se dissout, et sont subséquentement sorbés dans les barrières ouvragées et la géosphère.

Dans la réalité, le débit de dose réel pourrait être encore plus faible. Il dépendrait de l'endroit où sont situés les conteneurs défectueux, du fait qu'un puits soit présent ou non et de l'emplacement d'un tel puits par rapport aux conteneurs défectueux. Les résultats à cet effet sont présentés au chapitre 7.

La Sensibilité glaciaire montre que la dose pourrait être multipliée par 100 si un puits était foré en profondeur au-dessus du dépôt après le retrait des glaces. Cette augmentation serait attribuable à une accumulation des radionucléides au cours de la période glaciaire découlant d'un arrêt éventuel de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères pertinents en raison du gel. Les doses résultantes seraient toutefois inférieures au critère de dose établi.

Résultats des analyses probabilistes

Les analyses probabilistes de cas examinent les effets d'une modulation simultanée de plusieurs paramètres.

Le premier cas probabiliste, où le nombre, l'emplacement et le moment de défaillance des 10 conteneurs défectueux sont les mêmes que dans le Cas de base, mais où tous les autres paramètres disponibles sont modulés, permet d'évaluer dans une certaine mesure l'incertitude globale associée au Cas de base. Le débit de dose estimé au 95^e centile pour la période d'un million d'années serait inférieur au critère provisoire d'acceptation du débit de dose de 0,3 mSv/a. Si l'on étend la portée de la simulation au-delà d'une période d'un million d'années, la valeur maximale s'élève à $3,4 \times 10^5$ mSv/a, une valeur de beaucoup inférieure au critère provisoire d'acceptation du débit de dose.

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : xii

Le second cas probabiliste, où tous les paramètres, y compris le nombre, l'emplacement et le moment de défaillance des conteneurs défectueux sont modulés, produit comme résultat un débit de dose au 95^e centile pour la période d'un million d'années de $9,3 \times 10^{-8}$ mSv/a, soit une valeur 3 200 000 fois inférieure au critère provisoire d'acceptation du débit de dose. Ce résultat est inférieur à celui du cas précédent parce qu'il y a un grand nombre de cas probabilistes où aucune défaillance de conteneur ne survient. Si l'on étend la durée de la simulation au-delà de la période d'un million d'années, la valeur maximale s'élève à $1,45 \times 10^{-5}$ mSv/a, une valeur de beaucoup inférieure au critère provisoire d'acceptation du débit de dose.

Résultats des scénarios d'événements perturbateurs

Les principaux résultats de l'analyse des scénarios d'événements perturbateurs de la Défaillance de tous les conteneurs, de la Défaillance des éléments de scellement du dépôt et d'une Défectuosité non décelée sont :

- La défaillance de tous les conteneurs au bout de 60 000 ans et la défaillance de tous les conteneurs au bout de 10 000 ans occasionneraient tous deux un débit de dose maximal de 0,01 mSv/a. Ces résultats sont inférieurs au critère provisoire d'acceptation du débit de dose.
- Le scénario d'une défaillance des éléments de scellement du dépôt a un léger effet (une augmentation par un facteur de 1,4) sur l'incidence maximale du transport de l'I129 comparativement au Cas de base et la conséquence radiologique estimée serait bien inférieure au critère d'acceptation.
- L'incidence maximale associée aux scénarios de failles non décelées augmente, le taux de transport de l'I-129 dans le cas d'un éloignement de 100 m étant 22 fois supérieur à celui du Cas de base. Même dans le cas de cette augmentation, le débit de dose résultant déduit serait toujours bien inférieur au critère provisoire d'acceptation du débit de dose. Dans la réalité, cela dépendrait de l'emplacement de la faille éventuelle par rapport au puits et du nombre et de l'emplacement des conteneurs défectueux éventuels.

Dans le scénario d'une intrusion humaine fortuite, toutes les barrières sont déjouées et des matières composant le combustible irradié sont ramenées directement à la surface le long d'un trou de forage. Les conséquences pour le cas où l'intrusion est rapidement reconnue seraient la réception d'une dose de 90 mSv par l'équipe de forage et aucune dose reçue par le public, puisque le site serait remis en état. Si l'intrusion n'était pas reconnue, si des matières composant le combustible irradié étaient laissées en surface sur le site et si une personne vivait sur le site, cette personne recevrait alors une dose de plusieurs centaines de mSv par année jusqu'à ce que l'activité radiologique ait substantiellement diminué. Toutefois, le dépôt est situé en profondeur dans le substratum rocheux, loin des ressources naturelles, et ce fait, en combinaison avec la mise en place

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire			
Numéro de document : NWMO-TR-2018-08	Révision : 000	Classification : public	Page : xiii

de mesures de contrôle sur l'utilisation du sol ou de balises d'identification, rendrait une telle éventualité très improbable.

Autres incidences potentielles

Comportement des gaz

Les gaz revêtent un intérêt particulier dans cette étude parce que la conductivité hydraulique extrêmement faible de la roche hôte ne favorise pas un transport important des gaz hors du dépôt. Par conséquent, les gaz pourraient être confinés et faire monter la pression le dépôt.

Des études détaillées sur le comportement des gaz sont présentées au chapitre 8 pour le Case de base et pour le scénario de l'événement perturbateur d'une défaillance de tous les conteneurs au bout de 10 000 ans. L'évaluation adopte des hypothèses extrêmement prudentes, où aucune contribution n'est accordée à la barrière que constitue le cuivre ou à la possibilité que la corrosion soit limitée par l'apport en carbonates.

Pour le Case de base, les résultats ne révèlent aucune conséquence néfaste; la possibilité que la pression exercée par les gaz entraîne des fractures peut être exclue et les radionucléides issus des gaz ne peuvent atteindre la surface.

Pour le scénario d'une défaillance de tous les conteneurs, l'utilisation d'hypothèses extrêmement prudentes a comme résultat une quantité suffisante de gaz générés par la corrosion pour qu'il y ait transport régi par l'effet de dilatation. La modélisation limitée effectuée montre que les pressions interstitielles au sein de la roche intacte demeurent faibles alors que les gaz dans le dépôt se dissipent à travers les matériaux de scellement à base de bentonite grâce à l'effet de dilatation. Les gaz générés par la corrosion dans le scénario d'une défaillance de tous les conteneurs pourraient transporter des radionucléides volatils (notamment le C-14) à travers le dépôt. Dans l'éventualité improbable où des gaz générés par la corrosion atteindraient les puits du dépôt, toute radioactivité d'origine gazeuse serait dispersée au sein de la formation de Guelph. Une évaluation prudente des doses montre que toute dose hypothétique conséquente serait bien inférieure à la radioactivité naturelle de fond.

Autres critères de protection

Les résultats pour les cas où sont examinées la protection des gens contre les substances dangereuses, la radioprotection de l'environnement et la protection de l'environnement contre les substances dangereuses sont tous aussi en deçà des critères d'acceptation provisoires associés. Ces résultats sont présentés au chapitre 7.

Conclusion

Ce rapport décrit la conception de référence d'un dépôt géologique en profondeur construit dans une formation de roche sédimentaire et fournit un exemple d'approche structurée, systématique et conforme au document de la CCSN *REGDOC-2.11.1, tome III (CCSN 2018)* qui pourrait être utilisée pour évaluer la sûreté post-fermeture du dépôt. Cet exemple d'évaluation comprend une description du système de dépôt, présente systématiquement les scénarios, les modèles et les méthodes utilisés pour évaluer la sûreté, s'appuie sur différentes stratégies d'évaluation, tient compte des incertitudes et compare les résultats obtenus avec des critères d'acceptation provisoires.

L'évaluation de la sûreté post-fermeture montre, pour le scénario d'une évolution normale et les cas de sensibilité associés, que tous les critères d'acceptation provisoires radiologiques et non radiologiques seraient remplis au cours de la période post-fermeture avec une marge de sûreté substantielle. Ce résultat est conforme à ceux d'évaluations réalisées précédemment pour un dépôt géologique en profondeur au Canada ainsi qu'à ceux d'études d'évaluation de la sûreté réalisées par des organismes nationaux de gestion des déchets radioactifs d'autres pays.