

Gestion adaptative progressive

Évaluation de la sûreté post-fermeture d'un dépôt de combustible irradié en roche sédimentaire

Rapport pré-projet

NWMO TR-2013-07

Décembre 2013

Préparé par :
Société de gestion des déchets nucléaires

RÉSUMÉ

Depuis des décennies, les Canadiens utilisent l'électricité produite par les réacteurs nucléaires exploités en Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick. Lorsque le combustible nucléaire irradié est retiré d'un réacteur, il est considéré comme un déchet, est radioactif et doit être géré avec soin. Bien que sa radioactivité décroisse avec le temps, sa toxicité chimique persiste, et le combustible irradié présentera un risque de santé pour la population et l'environnement pendant encore plusieurs centaines de milliers d'années. Actuellement, le combustible nucléaire irradié canadien est provisoirement entreposé en toute sûreté dans des installations autorisées situées là où le combustible irradié est généré.

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, en 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 pour un dépôt géologique en profondeur 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 détaillées 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 multibarrières actuelle et de la sûreté post-fermeture d'un dépôt géologique en profondeur au sein d'une formation hypothétique de roche sédimentaire. Cette étude a pour but de présenter et d'illustrer une méthodologie d'évaluation de la sûreté post-fermeture qui respecte les 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 véritable site candidat, une étude de cas exhaustive sera préparée. Celle-ci inclura les résultats des études géoscientifiques propres au site, la conception associée du dépôt géologique en profondeur et une évaluation de la sûreté plus exhaustive que celle qui est décrite dans ce document.

Géosphère

Un modèle de géosphère hypothétique a été défini d'après l'expérience acquise dans le cadre 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. Bien que ce site hypothétique constitue un exemple d'environnement de roche sédimentaire du sud de l'Ontario, d'autres caractéristiques sont considérées dans l'évaluation de la sûreté pour illustrer une approche d'évaluation à la fois de la sûreté à long terme et de l'efficacité de divers systèmes de barrières.

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, hydrogéologiques 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, de concert avec la stabilité hydrogéologique et géochimique, 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 contaminants. 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 215 m sous la surface, est principalement régi par des changements topographiques locaux et infrarégionaux. Le temps moyen pris par les eaux souterraines pour s'alimenter, puis se déverser dans la zone des eaux souterraines peu profondes est généralement inférieur à 1000 ans. Les eaux souterraines de la zone peu profonde sont douces et abondamment oxygénées et leur teneur totale en solides dissous est faible.
2. Le système des eaux souterraines intermédiaires, situé de 215 à 250 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 dans ce système. 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 en-dessous de 250 m sous la surface, comprend des eaux qui présentent une plus grande teneur totale en solides dissous, une densité de fluides plus élevée et qui sont chimiquement réductrices. La densité de fluide plus élevée influencera à la fois les gradients d'énergie du système d'eaux souterraines et le mouvement vertical ascendant des eaux souterraines entre la zone d'eaux souterraines à profondeur faible/intermédiaire et la zone d'eaux souterraines à grande profondeur.

Concept technique

Le modèle conceptuel actuel pour un environnement de roche sédimentaire consiste en un dépôt construit à une profondeur approximative de 500 m. La profondeur a été arbitrairement choisie, et uniquement à titre d'exemple; dans le cas d'un site réel, la profondeur serait choisie en fonction des attributs particuliers du site pour optimiser la sûreté à long terme passive du dépôt en établissant le meilleur dossier de sûreté possible. La roche hôte à 500 m de profondeur de ce site hypothétique est présumée être une formation de calcaire massif surplombée d'une séquence épaisse de schiste se prêtant à la construction et à l'exploitation d'un dépôt géologique en profondeur. Le dépôt comprend un réseau de salles de stockage en tunnels horizontaux 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. Le rapport décrit également certaines observations sur les considérations relatives aux formations de roche sédimentaire examinées par d'autres pays. Une des principales distinctions se rapportant à cette étude de cas réside dans l'utilisation d'un modèle de conteneur à coque en cuivre, par opposition aux modèles en acier étudiés ailleurs dans le monde. La conception de ce conteneur continuera d'être affinée et optimisée en vue de l'obtention des permis requis. Le conteneur de combustible irradié s'appuie sur un piédestal de bentonite hautement compactée dans l'emplacement qui lui est attribué dans la salle de stockage. Des pastilles de bentonite, placées à l'aide de dispositifs pneumatiques, sont utilisées pour remplir tous les interstices restants dans la salle de stockage des conteneurs. La bentonite est un matériau naturel durable qui est censé maintenir ses propriétés à long terme. La bentonite est un type d'argile qui gonfle au contact de l'eau, ce qui fait qu'elle est naturellement auto-scillante.

Évaluation de la sûreté 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 est 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 est axée 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 conséquences 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.

Cette 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 réalisées. 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. Les données recueillies dans le cadre des études sur le terrain permettront de valider davantage les hypothèses et elles seront incorporées aux évaluations de sûreté futures.

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 dose calculée maximale pour le cas de référence est approximativement 150 000 fois inférieure au critère d'acceptation provisoire de 0,3 mSv par année pour le scénario d'évolution normale et survient à la limite de la période de modélisation, soit 10 millions d'années après la fermeture du dépôt. Cette longue période est en partie attribuable au résultat de la performance combinée des systèmes de barrières du dépôt et au temps requis par l'iode-129 pour atteindre la biosphère. Les systèmes de barrières incluent les conteneurs de longue durée, l'intégrité des systèmes de scellement ouvragés et les formations de roches entourant le dépôt en champ proche.

Les incidences radiologiques sur le biote non humain sont traitées dans le rapport et l'évaluation conclut que les effets sont négligeables pour le scénario d'évolution normale.

Le rapport conclut également que les concentrations de contaminants sont inférieures aux critères d'acceptation provisoirement établis aux fins de l'évaluation en vue de protéger la population et l'environnement contre les substances dangereuses, telles que le cuivre et les autres éléments relâchés par le combustible irradié et les conteneurs.

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 de contaminants à 10 %;
- Multiplication par 10 de la conductivité hydraulique de la masse rocheuse et de la zone d'endommagement d'excavation;
- Multiplication par 10 de la diffusivité de la roche;

- Suppression de 158 m dans la formation de Shadow Lake, à une profondeur d'approximativement 675 m sous le site hypothétique;
- Augmentation de la dégradation des conteneurs en multipliant par 10 la dimension de la zone de défaut 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.

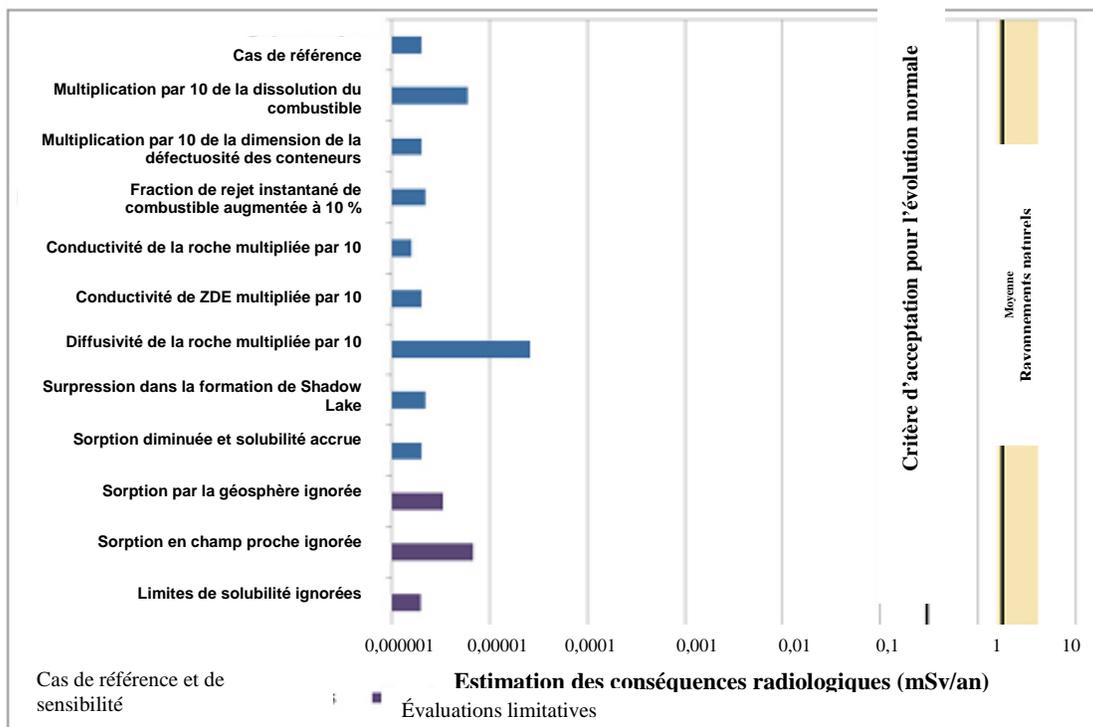


Figure E1: Résultats de l'analyse de sensibilité et des évaluations limitatives

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 diffusivité de la roche. Les conséquences radiologiques liées à la multiplication par 10 du taux de diffusivité de la roche sont estimées être 13 fois plus importantes que la valeur associée au cas de référence.

Les analyses limitatives révèlent que le fait d'ignorer la sorption a une légère influence sur les doses. Lorsque la sorption en champ proche est ignorée, on estime que les doses sont 3,4 fois plus élevées que pour le cas de référence. Lorsque la sorption par la géosphère est ignorée, la dose maximale par rapport à la valeur du cas de référence est multipliée par 1,6 et survient en même temps (limite de temps de la modélisation, soit 10 millions d'années). Aucune incidence sur les doses n'a été observée lorsque les limites de solubilité des radionucléides sont ignorées (voir la figure E1).

Reconnaissant l'importance de processus 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. Néanmoins, même si des hypothèses très prudentes sont retenues lorsqu'il y a des incertitudes, le débit de dose maximal pour un membre du public est toujours estimé être de plusieurs ordres de grandeur 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. La conséquence radiologique de pointe dans ce cas est estimée être 37 fois plus importante que celle du cas de référence. Ce débit de dose plus important est tout de même 4 000 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 de tous les conteneurs au bout de 60 000 ans;
- La défaillance de tous les conteneurs au bout de 10 000 ans;
- La défaillance des éléments de scellement du puits.

Les scénarios de défaillance des conteneurs (c.-à-d., la défaillance de tous les conteneurs au bout de 60 000 ans, et une variation où tous les conteneurs connaissent des défaillances au bout de 10 000 ans) révèlent une augmentation notable des résultats de dose. Toutefois, les débits de dose maximaux demeurent bien 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, ce qui indique que les taux de dissolution du combustible sont considérablement réduits en raison de la décroissance des champs de rayonnements gamma et bêta. De plus, les échéanciers de défaillance sont de beaucoup moindres que les temps de transit des contaminants vers la surface. Les autres actinides et la plupart des produits de fission à vie longue sont retardés principalement par diffusion au sein de la barrière naturelle de la masse rocheuse hôte, de sorte que le débit de dose de pointe, qui est dominé par l'iode 129 à longue vie et non sorbant, ne diffère pas substantiellement.

L'impact des gaz générés dans le dépôt est considéré pour le scénario où tous les conteneurs connaissent une défaillance au bout de 10 000 ans. La possibilité la plus importante sur le plan de la production de gaz (résultat de la corrosion de l'acier à l'intérieur des conteneurs de cuivre) est examinée pour ce scénario et le modèle montre que les gaz pourraient remonter vers la formation perméable de Guelph, où ils se disperseraient et se dilueraient latéralement sous terre. Toutefois, pour établir une estimation de « délimitation », les conséquences associées aux doses de gaz sont évaluées à l'aide d'un ensemble d'hypothèses extrêmement prudentes pour limiter les conséquences éventuelles. Un débit de dose de pointe de 0,17 mSv par année est obtenu lorsque tout le carbone 14 est présumé se libérer dans une maison située au-dessus du dépôt. Ce résultat demeure 6 fois inférieur au critère d'acceptation de dose provisoirement établi de 1 mSv par année. Calculés en fonction d'un scénario plus réaliste de défaillance des conteneurs de cuivre sur de plus longues périodes, les débits de dose seraient considérablement moindres. Par exemple, si l'on considère une défaillance du cuivre au moment de la prochaine période glaciaire ou plus tard, les débits de dose correspondants seraient nettement inférieurs à 0,001 mSv par année en raison de la décroissance radioactive du carbone 14.

L'étude a démontré que le scénario d'une défaillance des éléments de scellement n'aurait qu'un effet négligeable sur les doses prévues en raison de la distance qui séparerait les conteneurs aux défauts non détectés et le système de scellement du puits d'accès.

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 ne tient compte d'aucune barrière ouvragée ou naturelle. 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 présente une évaluation illustrative de la sûreté post-fermeture d'un dépôt géologique en profondeur construit dans une formation hypothétique de roche sédimentaire. L'objectif est de fournir une évaluation partielle de la sûreté post-fermeture démontrant une approche structurée et systématique qui répond aux exigences décrites dans le 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 provisoires d'acceptation. Elle indique quelles analyses additionnelles seraient entreprises dans le cadre d'une évaluation en bonne et due forme de la sûreté d'un site de dépôt réel.

L'évaluation de la sûreté post-fermeture démontre, dans le cas du scénario d'évolution normale et des scénarios de sensibilité associés, que les critères radiologiques et non radiologiques d'acceptation provisoires pourraient être respectés au cours de la période post-fermeture.