



## ENQUÊTE ET AUDIENCES PUBLIQUES DU BAPE Les enjeux de la filière uranifère au Québec

### DEMANDE D'INFORMATION No. 18

#### DEMANDE D'INFORMATION :

Tableau des trois sites où est effectué l'entreposage des résidus miniers en fosse, incluant :

- les dates de mise en place
- les résultats
- les problèmes rencontrés
- les prévisions de la performance à long terme
- les projets de recherche de géochimie pour valider les concepts et modèles d'entreposage des résidus miniers en fosse
- les hypothèses et évidences sur lesquelles les prévisions sont basées
- les objectifs de performance pour le taux de consolidation et conductivité hydraulique des résidus miniers de fosse

#### RÉPONSE :

##### Installations de gestion des résidus en fosse — Généralités

Les installations de gestion des résidus (IGR) en fosse sont conçues pour l'élimination sûre et écologique des résidus en période d'exploitation active et à long terme par la suite, après le déclassement de l'IGR. Les trois IGR en fosse dans le nord de la Saskatchewan sont gérées d'après la même méthode de base, c'est-à-dire que les fosses à ciel ouvert, épuisées après la fin des activités d'extraction minière, sont converties en systèmes aménagés d'élimination des résidus. Voici les deux principaux modèles d'installations :

- Le modèle de la ceinture perméable prévoit l'installation de matériaux géologiques poreux dans le fond et sur les parois des fosses à ciel ouvert. L'eau interstitielle est captée pendant les travaux d'installation par un drain au fond de la fosse. Cela permet de consolider les résidus en réduisant la pression de l'eau interstitielle et d'établir des chemins d'écoulement préférentiel des eaux souterraines qui contournent les résidus plutôt que de les traverser.
- Dans les endroits où le profil géologique naturel environnant offre un chemin d'écoulement préférentiel des eaux souterraines (p. ex., morts-terrains de sable et grès très perméables), il n'est pas nécessaire d'y aménager une couche poreuse. Il faut alors contrôler la ségrégation granulométrique des résidus pour s'assurer



d'une différence suffisante de conductivité hydraulique entre les résidus et la roche environnante.

On peut aussi adopter une solution similaire qui consiste à déposer sous couverture d'eau des résidus épais afin d'empêcher l'accumulation de lentilles de glace d'entraver le drainage de l'eau interstitielle et la compaction des résidus pendant les travaux d'installation. Ces systèmes en fosse sont recouverts en surface de remblai propre au moment de leur fermeture. Dans toutes les activités touchant l'uranium, les effluents de toutes les composantes minières sont captés et traités.

### Période d'exploitation

Pendant les activités d'exploitation, le confinement hydraulique ainsi que la capture et le traitement des eaux contaminées des IGR en fosse empêchent que les contaminants migrent dans l'environnement. Le confinement hydraulique se fait grâce à l'utilisation combinée de puits de pompage, de drains de fond, et de la régulation du niveau d'eau du bassin de l'IGR. Ces solutions sont utilisées dans des proportions différentes, selon le profil hydrogéologique du site. Par exemple, dans le cas de l'IGR de l'usine de concentration JEB, on a maintenu le niveau d'eau du bassin à un niveau inférieur à celui des eaux souterraines environnantes afin de préserver le confinement hydrodynamique. Pour réguler le niveau d'eau de l'IGR, on a eu recours à des puits d'assèchement du périmètre qui bloquent les eaux souterraines s'écoulant vers la fosse, à des puits verticaux qui pompent l'eau à partir du drain de fond de l'IGR et à un conduit de récupération suspendu à la surface de l'eau de l'IGR.

Dans tous les IGR, à mesure que la hauteur des résidus augmente, le pompage nécessaire diminue. Cela s'est traduit par le rétablissement partiel du niveau des eaux souterraines autour de chacun des sites. Le tableau 1.0 décrit les conditions d'exploitation dans chaque site. Dans tous les sites, le confinement hydraulique a bien fonctionné. Les résultats du contrôle de la qualité de l'eau indiquent qu'il n'y a eu aucune contamination des eaux souterraines et des eaux de surface provenant des IGR en fosse actuellement exploitées. De plus, dans des sites comme celui de McClean Lake, où l'on a fait dévier l'eau propre pour qu'elle évite la fosse, il y a eu diminution du besoin de traiter l'eau sur le site.

**Tableau 1.0 : Description des installations de gestion des résidus en fosse en Saskatchewan**

Mine d'uranium	Historique	Période d'exploitation	Après le déclassé
Rabbit Lake	En exploitation depuis 1974  L'installation de gestion des résidus en fosse de Rabbit Lake a commencé	Le <u>confinement hydraulique</u> est maintenu grâce à l'utilisation d'une ceinture perméable aménagée, munie d'un drain de fond et de pompes verticales. Il n'est	Les eaux souterraines continueront de contourner les résidus à faible perméabilité par la ceinture perméable en présence d'un faible gradient hydraulique. La



	<p>ses activités en 1984-1985 dans une fosse minière épuisée à ciel ouvert à Rabbit Lake</p>	<p>pas nécessaire d'installer des puits de pompage d'interception ou de périmètre pour réguler les niveaux d'eau.</p> <p>Les <u>résidus déposés</u> respectaient la proportion de solides de 35 % avec une teneur moyenne de 37,6 % de matières solides. Depuis le début de l'exploitation de l'installation, le dépôt des résidus a été réalisé par méthode subaérienne, par submersion et par injection.</p> <p><u>Problèmes et mesures d'atténuation</u> : La formation de lentilles de glace dans les résidus entrave la consolidation des résidus. Différentes méthodes sont à l'étude et des essais sur le terrain sont en cours pour faire dégeler ces lentilles de glace dans les résidus.</p>	<p>couverture technique végétalisée qui sera mise en place n'aura pas d'eau stagnante ou accumulée.</p> <p>Pendant le déclassement, on continuera à faire dégeler les résidus (pompage continu de l'eau recueillie dans la ceinture perméable et le drain de sol) pour en favoriser la consolidation. Les teneurs dans l'eau interstitielle sont comparables aux prévisions.</p>
<p>Key Lake</p>	<p>En exploitation depuis 1981</p> <p>La mine à ciel ouvert Deilmann a commencé ses activités en 1989</p> <p>En 1996, mise en service de l'installation de gestion de résidus Deilmann dans une fosse minière épuisée</p>	<p>On maintient le <u>confinement hydraulique</u> en pompant l'eau qui se trouve sous les résidus et dans des puits entourant l'IGR Deilmann, ce qui comprend l'eau de l'IGR Deilmann et les eaux souterraines qui l'entourent.</p> <p>Les <u>résidus sont déposés</u> par méthode subaquatique (pour empêcher la formation de lentilles de glace) à une densité cible de 35 %, laquelle a varié entre 34,5 et 43,1 % en 2013. Le dépôt des résidus se fait à l'aide de tuyaux</p>	<p>Déviation des eaux souterraines pour qu'elles évitent les résidus à faible perméabilité. La consolidation des résidus avance comme prévu et, au moment du déclassement, une couverture de deux mètres de sable y sera ajoutée. On s'attend à ce que le pompage et le traitement de l'eau de l'installation se poursuivent pendant 11 ans. On atteindra les normes de protection de la vie aquatique des objectifs de qualité de l'eau de la Saskatchewan avant la fin</p>



		<p>installés à plusieurs endroits sur les côtés, afin de répartir les résidus de manière égale autour de l'installation. L'été, pendant les périodes sans glace, le dépôt se fait à partir d'un tuyau fixé sous une barge mobile, lequel peut aussi servir à combler les vides détectés pendant un levé de la surface des résidus. Ces levés sont effectués régulièrement.</p> <p><i><u>Problèmes et mesures d'atténuation</u></i> : Il y a eu un problème de glissement de pentes de sable dans les résidus, ce qui aurait pu compromettre le déclassement. L'adoucissement des pentes et l'installation d'un contrefort de pied en pierre dans ces zones problématiques ont été achevés en 2013. Les pentes sont maintenant stables.</p>	<p>de la période de déclassement.</p> <p>Les résidus sont en train de se consolider et la conductivité hydraulique est conforme à la cible de déclassement, soit moins de <math>1 \times 10^{-7}</math> m/s. Les teneurs en As, en Ra et en Ni de l'eau interstitielle sont comparables aux prévisions.</p>
McClellan Lake	<p>En exploitation depuis 1994</p> <p>En 1999, mise en service de l'installation de gestion de résidus JEB dans une fosse minière épuisée</p>	<p>Pour assurer le <u>maintien du confinement</u> hydraulique, on pompe l'eau à partir de la barge de récupération et du drain de fond à l'aide de puits verticaux. Un revêtement autour de la partie supérieure de l'installation réduit davantage l'écoulement.</p> <p>Le <u>dépôt des résidus</u> se fait à l'aide de tuyaux qui longent la rampe d'accès de l'IGR ainsi qu'une passerelle flottante qui mène à la barge de dépôt.</p>	<p>L'écoulement des eaux souterraines doit être dévié pour qu'il contourne les résidus à faible perméabilité. Pour y parvenir : production de résidus dont la conductivité est inférieure à celle de la roche hôte environnante (plus faible de deux ordres de grandeur) et en régulant la teneur du terme source. Une couche de till recouvrira les résidus et il n'y aura ni eau stagnante, ni accumulation d'eau.</p>



		<p>La canalisation de déversement se trouve sous la barge. Les résidus sont mis en place à l'aide d'une méthode d'injection sous l'eau et à faible profondeur. Cette méthode de dépôt a réduit au minimum la ségrégation et l'apparition de chemins perméables.</p>	<p>Initialement, les résidus sont déposés à des densités plus élevées que celle à laquelle on s'attendait au départ, et la hauteur moyenne de la surface des résidus se situe à l'intérieur des valeurs prévues. Des essais soutiennent la conclusion selon laquelle la conductivité hydraulique cible de moins de <math>1 \times 10^{-8}</math> m/s sera atteinte (vraisemblablement <math>1 \times 10^{-9}</math> à certains endroits).</p>
--	--	---	---

### Après le déclassé

La protection de l'environnement pendant la période qui suit le déclassé repose sur des techniques passives établies pendant la période d'exploitation active du site pour réduire au minimum le rejet à long terme de contaminants. Les principales solutions pour assurer le confinement à long terme des résidus sont : (1) le faible gradient hydraulique et la faible conductivité hydraulique des résidus par rapport à la roche environnante et (2) la maîtrise de la chimie du terme source des contaminants. L'atteinte de ces objectifs passe par la maîtrise de la chimie des résidus, de leurs caractéristiques géotechniques et de leur mise en place. De plus, puisque les résidus sont déposés sous la surface du sol, ils sont moins sujets à la dégradation naturelle, par exemple l'érosion, le gel, l'activité sismique, etc. Par conséquent, la nécessité d'un entretien à long terme et de contrôles institutionnels est réduite.

Les résidus sont épaissis et déposés de manière à tenter de limiter leur ségrégation et à favoriser leur consolidation tout en abaissant leur conductivité hydraulique. Pour favoriser davantage la consolidation, on pompe de l'eau qui se trouve sous les résidus. De plus, les résidus sont traités chimiquement afin de favoriser la précipitation de métaux et, dans certains cas, les résidus sont neutralisés. Le titulaire de permis doit surveiller toutes les matières dangereuses de l'IGR et vérifier que l'IGR fonctionne selon les prévisions de l'évaluation environnementale. Les conditions de permis ainsi que les seuils d'intervention et les seuils administratifs établissent les procédures d'exploitation à suivre (p. ex., pour les niveaux d'eau) et les teneurs maximales des matières constituantes (p. ex., la teneur en arsenic dans l'eau interstitielle).

Tous les titulaires de permis ont des programmes d'évaluation continue de la chimie des résidus et de leurs propriétés géotechniques, ainsi que des caractéristiques hydrogéologiques à proximité des IGR. Par exemple, à la demande de la CCSN, la société AREVA Ressources a développé un programme appelé TOVP (Tailings and Optimization Validation Program) pour l'installation de gestion des résidus en fosse JEB



de McClean Lake. Les résultats servent à mettre à jour et à améliorer les modèles de prévisions à long terme. Si on soupçonnait que des prévisions risquent de ne pas se concrétiser, on pourrait analyser la méthode de prétraitement et la modifier par gestion adaptative.

## Recherche

La conception et l'exploitation des IGR en fosse sont fondées sur des recherches poussées qui ont été menées par l'industrie de l'uranium et le gouvernement. Les principaux éléments permettant de contrôler le rejet et le transport de contaminants provenant des résidus sont entre autres les propriétés chimiques et physiques des résidus et le régime des eaux souterraines à proximité de l'IGR. Par conséquent, la recherche porte sur trois grands domaines : (1) la géochimie des résidus, (2) les propriétés géotechniques des résidus, dont la conductivité hydraulique et la consolidation, et (3) la modélisation du transport des contaminants. Voici un résumé de chacun de ces domaines de recherche :

- (1) Géochimie des résidus : Les résidus sont traités chimiquement avant d'être déposés dans la fosse pour produire des résidus qui ne transmettront qu'une faible teneur en contaminants à l'eau interstitielle. La teneur de contaminants dans l'eau interstitielle dépend de la forme solide des résidus (p. ex., les minéraux) et de l'évolution des conditions environnementales (p. ex., changement du taux de pH). Avant le début des activités, les résidus sont testés en laboratoire afin qu'on puisse déterminer quelle est la quantité idéale de réactif à ajouter aux contaminants à précipiter afin que les teneurs dans l'eau interstitielle soient faibles. Par exemple, on ajoute du fer aux résidus afin de précipiter le nickel et l'arsenic. Les résidus traités sont assujettis à des essais de vieillissement en laboratoire, qui consistent à exposer les résidus à certaines conditions afin d'imiter le processus de vieillissement. On étudie les propriétés physiques et chimiques des résidus vieillissants afin de mieux prévoir comment les résidus se comporteront à long terme dans la réalité.

Après le dépôt, des carottes sont prélevées dans les résidus de l'IGR à intervalles précis (p. ex., tous les cinq ans). Les teneurs de l'eau interstitielle et la géochimie des résidus sont mesurées. De nombreuses recherches ont été menées afin de déterminer quels sont les minéraux qui se sont formés à l'intérieur des résidus et la façon dont les contaminants sont retenus par ces minéraux. Par exemple, si l'arsenic se lie à un minéral stable, il sera sans doute plus immobile que s'il était sorbé à la surface d'un minéral. Ainsi, Cameco a procédé à des analyses au DR et au MEB en laboratoire sur des échantillons de résidus provenant de Key Lake pour évaluer sous quelle forme l'arsenic se trouve dans les résidus. Dernièrement, des chercheurs sont passés à des méthodes d'analyse plus poussées, comme l'analyse au synchrotron pour caractériser comment les contaminants se comportent dans les résidus miniers d'uranium (p. ex., rapport d'AREVA sur le comportement des résidus à McClean Lake en 2012; spectroscopie de structure fine d'absorption des rayons X (XAFS) au synchrotron pour les résidus de Rabbit



Lake en 2003). La CCSN participe également à des recherches par synchrotron sur les résidus miniers d'uranium.

- (2) Propriétés géotechniques : Les recherches menées sur la stabilisation physique des résidus portent surtout sur la conductivité hydraulique, la taille des particules et la consolidation des résidus. La conductivité hydraulique des résidus (et la granulométrie correspondante) a été mesurée grâce à des méthodes en laboratoire sous diverses contraintes de confinement et dans la masse de résidus comme telle (in situ). On effectue des essais de consolidation en laboratoire sur les résidus afin de prédire leur comportement en matière de consolidation. On connaît la masse des résidus et on ajoute cette donnée aux résultats des levés de la surface des résidus pour obtenir de l'information à l'appui de ces essais.
- (3) Modélisation des eaux souterraines : La modélisation des eaux souterraines de divers sites s'est améliorée au cours des dernières décennies, apportant des améliorations en matière de caractérisation des sites et de modélisation informatique. La CCSN a financé une série d'études de modélisation expérimentale et numérique sur le concept de la ceinture perméable d'une IGR en fosse afin d'illustrer les répercussions de la ceinture et la façon dont les contaminants sont maîtrisés et diffusés à l'extérieur de la masse des résidus avec le temps (West et coll. 2003, Lange et Van Geel 2011). De plus, des recherches ont été menées sur les paramètres utilisés dans le modèle, par exemple, l'évaluation des coefficients d'adsorption de contaminants dans l'environnement (p. ex., rapport d'AREVA sur le comportement des résidus à McClean Lake, 2012).

### **Leçons apprises et améliorations**

- L'existence de lentilles de glace à l'installation de gestion de résidus de Rabbit Lake entrave le processus de consolidation. Actuellement, on compte faire dégeler les résidus gelés et ajouter du remblai minier pour compenser, en espérant que la consolidation se produira après le dégel. On a étudié diverses technologies afin de faire dégeler les résidus, et des essais sur le terrain sont en cours. Au départ, on comptait faire dégeler les résidus pendant l'exploitation du site. Cependant, cette intention a changé depuis, et les résidus seront dégelés après la fermeture de l'installation de gestion de résidus en fosse de Rabbit Lake. Grâce aux leçons apprises de cette expérience, les rejets d'autres sites d'IGR en fosse ont pu s'améliorer.
- À Key Lake, il y a eu un problème de glissement de pentes de sable dans les résidus. Les pentes ont été adoucies et un contrefort de pied en pierre a été installé à ces endroits en 2013. Les pentes sont maintenant stables.
- À McClean Lake, de petits ajustements ont dû être apportés aux activités de traitement des résidus lorsque le type de minerai a changé et que les teneurs de



contaminants dans l'eau interstitielle sont devenues élevées. Après ces ajustements, les teneurs dans l'eau interstitielle sont devenues faibles.

### Performance globale

- Pendant les activités d'exploitation, la qualité des eaux souterraines à proximité des IGR en fosse n'a pas été touchée et le confinement hydraulique a bien fonctionné.
- Les teneurs dans l'eau interstitielle dans les résidus sont faibles, et la modélisation du transport des contaminants montre qu'à long terme, les teneurs dans les eaux de surface en aval demeureront inférieures à celles des critères sur la qualité de l'eau.
- Dans les IGR en fosse à Key Lake et à McClean Lake, les cibles de conductivité hydraulique fixées à moins de  $1 \times 10^{-7}$  m/s sont en voie d'être atteintes, et les résidus se consolident comme prévu. À Rabbit Lake, des lentilles de glace sont présentes dans les résidus et elles doivent disparaître afin d'éviter des problèmes de dégel à long terme. Cependant, des mesures d'atténuation sont actuellement à l'étude.
- Les titulaires de permis poursuivent leurs recherches sur les résidus pour mieux maîtriser les contaminants dans les résidus et améliorer les prévisions à long terme. La recherche sur les résidus miniers d'uranium au Canada a donné lieu à la parution d'un certain nombre d'articles scientifiques dans des revues spécialisées examinées par des pairs.

### Revues publiées

Les programmes de recherche portant sur les installations de gestion des résidus miniers d'uranium au Canada ont donné lieu à de nombreux articles dans des revues spécialisées réputées. En voici quelques exemples :

1. Joseph Essilfie-Dughan, Ingrid J. Pickering, M. Jim Hendry, Graham N. George et Tom Kotzer 2011; "Molybdenum Speciation in Uranium Mine Tailings Using X-Ray Absorption Spectroscopy" in *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45 (2), p. 455–460.
2. D. Langmuir, J. Mahoney et J. Rowson 2006; "Solubility products of amorphous ferric arsenate and crystalline scorodite ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and their application to arsenic behavior in buried mine tailings." *Geochemica et Cosmochimica Acta* 70, 2006, p. 2942-2956.
3. J. Mahoney, M. Slaughter, D. Langmuir et J. Rowson, 2007; "Control of As and Ni releases from a uranium mill tailings neutralization circuit: Solution chemistry, mineralogy and geochemical modeling of laboratory study results." *Applied Geochemistry* 22, 2007, p. 2758-2776.
4. N. Chen, D.T. Jiang, J. Cutler, T. Kotzer, Y.F. Jia, G.P Demopoulos et J. Rowson, 2009; "Structural characterization of poorly-crystalline scorodite, iron (III)-arsenate co-precipitates and uranium mill neutralized raffinate solids using X-Ray





- absorption fine structure spectroscopy." *Geochemica et Cosmochimica Acta* 73, 2009, p. 3260-3276.
5. B.J. Moldovan et J.M Hendry, 2008; *Fate and Transport of Arsenic in Uranium Mine Tailings: Rabbit Lake Mine* VDM Verlag — ISBN 978-3-639-00534-0, 2007.
  6. M. A. Gomez, M. J. Hendry, J. Koshinsky, J. Essilfie-Dughan, S. Paikaray et J. Chen. 2013. "Mineralogical Controls on Aluminum and Magnesium in Uranium Mill Tailings: Key Lake, Saskatchewan, Canada." *Environ. Sci. Technol.*, 2013, 47 (14), p. 7883–7891.
  7. A. West, P.J. Van Geel, K. Raven, T.S. Nguyen, M.B. Belfadhel et P. Flavelle. 2003, "Groundwater Flow and Solute Transport in a Laboratory Scale Analogue of a Decommissioned In-Pit Tailings Management Facility", *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), p. 326-341.
  8. R. Donahue et J. Hendry, 2003; "Geochemistry of arsenic in uranium mine mill tailings, Saskatchewan, Canada" *Applied Geochemistry*. Volume 18, numéro 11. p. 1733-1750
  9. K. Lange et P. Van Geel, 2011; "Physical and numerical modelling of a dual-porosity fractured rock surrounding an in-pit uranium tailings management facility." *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(3): p. 365-374