



La mine LaRonde est localisée en Abitibi près de la ville de Cadillac à environ 50 km de la ville de Val d'Or. Cette mine exploite un gisement polymétallique (or, argent, cuivre et zinc) depuis 1988 et emploie présentement environ 700 personnes. Depuis ses débuts, la capacité de traitement du minerai a été augmentée de 1 810 t/jour pour atteindre aujourd'hui 7 200 t/jour. Les réserves quant à elles ont augmenté de 4,97 M tonnes à 29,1 M tonnes.

Suite à l'augmentation des réserves et d'une décision clé de Agnico-Eagle concernant la protection de l'environnement, le parc à résidus de la mine LaRonde a été confronté à une augmentation progressive des volumes de l'eau et de résidus à traiter et/ou à emmagasiner. En 2002, Golder Associés a entrepris une première étude d'augmentation de la capacité du parc à résidus, s'échelonnant jusqu'en 2010, pour aider la mine à accommoder les résidus provenant des nouvelles réserves dans l'aire du parc initial et de son extension. Le choix de demeurer à l'intérieur de l'empreinte existante a été principalement dicté par des considérations environnementales. En effet, il semblait alors préférable de maximiser l'utilisation de l'aire existante en rehaussant le parc jusqu'à son élévation ultime de 352,0 m, élévation qui a été déterminée à partir de considérations d'intégration dans le paysage environnant. L'augmentation de la capacité de cette aire d'entreposage comportait plusieurs défis techniques puisqu'il s'agissait d'une superficie limitée avec des contraintes importantes aux niveaux de la stabilité des structures de confinement. Un mode de rehaussement amont a donc été préconisé, tout en reconnaissant, dès le départ, que cette approche présentait des enjeux techniques significatifs, en particulier au niveau du potentiel de liquéfaction des résidus.

Dans le cadre de cette première étape, Golder a réalisé des projets comportant plusieurs défis de taille :

- La réévaluation du potentiel de liquéfaction des résidus en se basant sur les résultats des essais au piézocône a confirmé leur nature liquéfiable. L'analyse a été réalisée en suivant la méthodologie du rapport NCEER de 1996 et de 1998. Il a été établi que la liquéfaction est le phénomène qui contrôle la conception.
- Les études d'écoulements et de stabilité ont mis en application, plusieurs concepts nouveaux :
  - Analyses de stabilité en conditions de post liquéfaction – les résidus ont été modélisés comme un liquide, mais avec toutefois une résistance résiduelle faible, de l'ordre de  $5^{\circ}$ .
  - La position de la nappe d'eau libre dans les résidus est l'élément le plus critique des analyses. La modélisation hydrogéologique a permis d'établir un profil plausible pour utilisation dans les analyses de stabilité.
  - Dans la zone au-dessus de la nappe d'eau libre, il a été supposé que les résidus, à cause de leur état non-saturé, sont en mesure de développer une certaine résistance attribuable à la succion.
  - De l'instrumentation a été installée, des piézomètres, pour mesurer le niveau de l'eau dans les résidus. En 2010, les retro-analyses réalisées dans le cadre du 4<sup>ème</sup> rehaussement amont ont démontré que le concept d'origine était techniquement viable et ont permis de confirmer les résultats des modélisations de départ.



Figure 1: Vue générale du site du parc à résidus, mine LaRonde



Figure 2: Vue de la construction des rehaussements amont



Figure 3: Installation de l'instrumentation sur la surface des résidus pour retro-analyse



En 2008, une nouvelle revue des réserves a mis en évidence le fait que la capacité du parc à résidus, selon son schéma d'agrandissement, serait insuffisante. Une nouvelle étude a alors été entamée pour évaluer les différentes options d'agrandissement et faire la conception pour l'option choisie dans le respect des critères de la nouvelle Directive 019 du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Deux aspects des études réalisées sont à souligner :

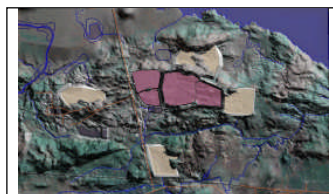


Figure 4: Exemple d'étude de sélection de site

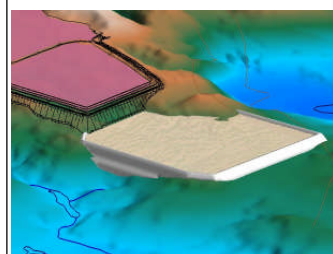


Figure 5: Site sélectionné, l'extension du parc

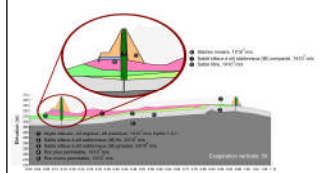


Figure 6: Exemple d'analyse des écoulements

- **Sélection de site** : avant même l'apparition du document « *Guidelines for the Assessment of Alternatives for Mine Waste, March 2011* » d'Environnement Canada, le choix de site a été mené selon un processus rigoureux, incluant :
  - Une présélection basée sur une gamme de critères, tels l'impact sur le secteur selon des critères environnementaux et sociaux clés ainsi que des enjeux technologiques et financiers, tels la faisabilité;
  - Une confirmation de la présélection par une consultation ouverte, dans le cadre d'une réunion formelle, avec la mine LaRonde et des parties prenantes, telles des représentants du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
  - Élaboration d'une liste de critères rigoureux et objectifs, divisés en quatre catégories : environnementaux, sociaux, techniques et économiques.

L'analyse détaillée a permis de déterminer que l'extension du parc vers l'est est le meilleur choix compte tenu de toutes les composantes de l'étude.

- **Modélisation hydrogéologique** : La conception détaillée, réalisée en 2009-2010, a inclus plusieurs étapes et études afin de fournir un produit techniquement solide et répondant aux critères de développement durable du MDDEP. Un des objectifs les plus importants dans cette démarche était de fournir un haut degré de protection des eaux souterraines. Une analyse de l'écoulement de l'eau a été réalisée afin de vérifier que le concept proposé pour la nouvelle extension du parc rencontrait bien les exigences de la Directive 019 du MDDEP en termes d'exfiltration.
  - Dans le cas du nouveau site, nous avons considéré comme débit d'exfiltration maximal, le débit d'exfiltration se rapportant au périmètre de la digue 10. Des mesures de traitement de la fondation de la digue ont donc fait partie intégrante de la conception afin de limiter les exfiltrations à son périmètre et ainsi respecter le débit quotidien maximal établi par la Directive 019.
  - La digue de confinement de l'extension a été construite en 2010 et le bassin est déjà en opération.

Le projet que nous présentons s'échelonne donc sur plusieurs années et est marqué par une très proche collaboration entre Golder Associés et le propriétaire de la mine LaRonde, Agnico-Eagle. En effet, ce projet peut être perçu comme un partenariat visant à trouver les meilleures solutions possibles pour le développement d'un projet d'envergure tout en se conformant aux critères établis en matière de respect de l'environnement.



Mai 2011

PRIX CANADIENS DU GÉNIE-CONSEIL 2011



## DESCRIPTION DU PROJET

# PARC À RÉSIDUS DE LA MINE LaRONDE, PREISSAC- CADILLAC, QUÉBEC





## **Table des matières**

<b>1.0 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Généralités .....	1
1.2 Historique et sommaire des défis .....	2
<b>2.0 PREMIÈRE ÉTAPE .....</b>	<b>3</b>
2.1 Brève description du parc existant selon sa configuration de 2002.....	3
2.2 Augmentation de la capacité .....	5
2.2.1 Méthode préconisée .....	6
2.2.2 Défis et approche d'analyses.....	7
2.2.3 Analyses des écoulements et analyses de stabilité .....	8
2.2.4 Construction.....	10
2.3 Instrumentation, suivi et retro-analyses .....	11
<b>3.0 DEUXIÈME ÉTAPE .....</b>	<b>17</b>
3.1 Introduction.....	17
3.2 Sélection de site .....	17
3.2.1 Processus .....	17
3.2.2 Site choisi .....	19
3.3 Approche de développement préconisée pour répondre aux critères de la Directive 019.....	20
<b>4.0 REMERCIEMENTS .....</b>	<b>23</b>

### **ANNEXES**

**Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.**



## 1.0 INTRODUCTION

### 1.1 Généralités

La mine LaRonde est localisée en Abitibi près de la ville de Cadillac à environ 50 km de la ville de Val d'Or (Figure 1). Cette mine exploite un gisement polymétallique (or, argent, cuivre et zinc) depuis 1988 et emploie présentement environ 700 personnes. Depuis le début de l'exploitation, la mine a traversé plusieurs phases d'expansion tant au niveau de l'exploitation du gisement que du traitement du minerai. D'un gisement de 4,97 M tonnes à un taux de production de 1 810 tonnes/jour à ses débuts, la mine a graduellement augmenté le tonnage total à miner à 29,01 M tonnes en 2010. La capacité de traitement du minerai a également été augmentée depuis le démarrage de l'usine de traitement pour atteindre aujourd'hui 7 200 tonnes/jour.

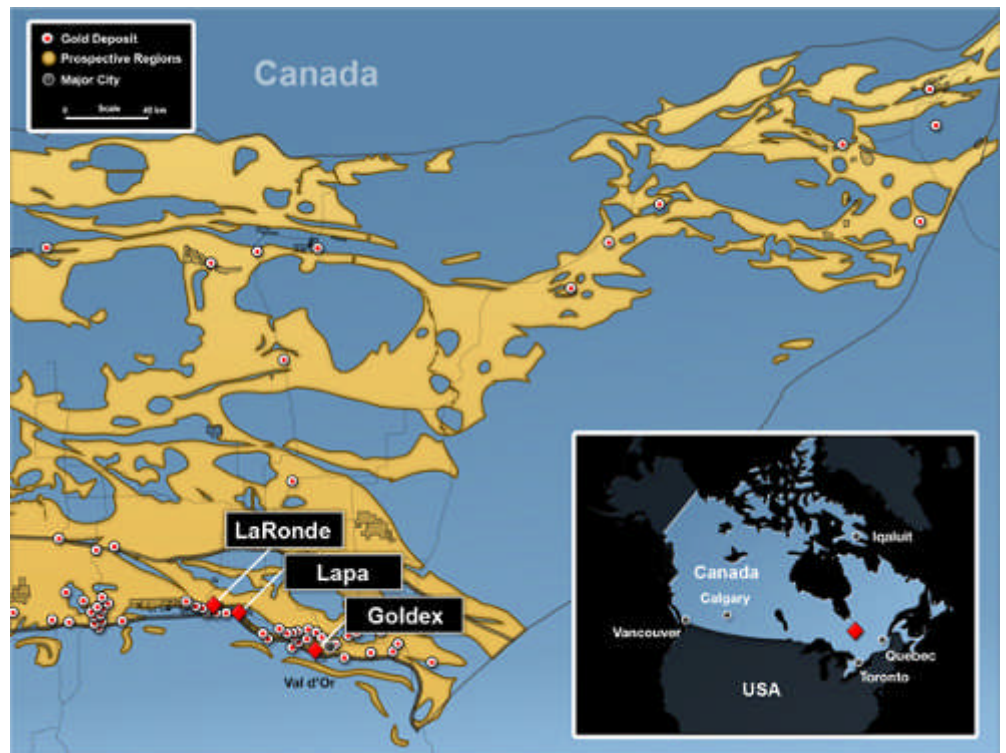


Figure 1: Carte de localisation de la mine LaRonde

L'usine de traitement de LaRonde comprend plusieurs circuits de traitement afin d'extraire le zinc, le cuivre, l'or et l'argent du minerai. À ceci s'ajoute le traitement du concentré de la mine Goldex et le traitement du minerai de la mine Lapa. L'ensemble du minerai traité à l'usine produit une quantité similaire de résidus qui doivent être entreposés en surface dans un parc à résidus miniers. Le parc à résidus de la mine LaRonde s'étend aujourd'hui sur plus de 230 ha et comprend le parc original confiné par la digue 1, son extension confinée par la digue 7 et la nouvelle extension confinée par la digue 10. L'eau déversée avec les résidus dans



le parc, transite par les bassins de polissage 1 et 2 situés directement à l'ouest du parc à résidus, l'usine de traitement des eaux ainsi que par l'usine de traitement biologique prototype, mise en service en 2004, et les bassins de polissage 3A et 3B. L'eau traitée est en partie recirculée vers l'usine de traitement du minerai et en partie retournée à l'environnement.

### 1.2 Historique et sommaire des défis

Depuis 1999, le site du parc à résidus de la mine LaRonde a été confronté à deux problématiques fondamentales relatives à sa capacité d'emmagasinement.

D'une part, la mine LaRonde a vu ses réserves augmenter progressivement nécessitant une augmentation de la capacité d'entreposage disponible en résidus. L'ajout de traitement des résidus du projet Lapa a, de plus, apporté un autre niveau de complexité au développement du parc. Cette augmentation des réserves s'est faite parallèlement à l'augmentation de la capacité de hissage et de traitement de l'usine.

En 2002, une première étude d'augmentation de la capacité du parc à résidus a été réalisée pour aider la mine à accommoder les résidus provenant des nouvelles réserves dans l'aire du parc initial et de son extension. L'augmentation de la capacité de cette aire d'entreposage comportait plusieurs défis techniques puisqu'il s'agissait d'une superficie limitée avec des contraintes importantes au niveau de la stabilité des structures de confinement. Toutefois, le choix de demeurer à l'intérieur de l'empreinte existante a été principalement dicté par des considérations environnementales. En effet, il semblait alors préférable de maximiser l'utilisation de l'aire existante en rehaussant le parc jusqu'à son élévation ultime de 352,0 m, élévation qui a été déterminée à partir de considérations d'intégration dans le paysage environnant.

D'autre part, la gestion de l'eau du site s'est avérée un enjeu important depuis 1999. La mine a accumulé des volumes d'eau significatifs suite à une décision clé prise dans un souci de protection de l'environnement. Cette politique corporative consistait à éviter tout déversement d'effluents ayant un niveau inacceptable de toxicité. En 2004, l'usine de traitement biologique prototype est entrée en opération afin de remédier au problème de toxicité. La construction de l'unité de traitement a permis à la mine LaRonde de viser à long terme le retour vers un bilan d'eau négatif avec une diminution progressive du volume d'eau accumulé dans le parc. La période d'optimisation de ce traitement innovateur a retardé l'atteinte d'un bilan négatif, causant une augmentation des niveaux d'eau dans le parc.

L'augmentation de la capacité d'entreposage du parc devait donc non seulement prendre en compte les nouveaux volumes de résidus à entreposer, mais également le stockage d'eau permettant à la mine de rencontrer ses objectifs environnementaux.



En 2008, une nouvelle revue des réserves a mis en évidence le fait que la capacité du parc à résidus, selon son schéma d'agrandissement, serait insuffisante. Une nouvelle étude a alors été entreprise pour évaluer les différentes options d'agrandissement et faire la conception pour l'option choisie dans le respect des critères de la nouvelle Directive 019 du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP).

Le projet que nous présentons s'échelonne donc sur plusieurs années et est marqué par une très proche collaboration entre Golder Associés et le propriétaire de la mine LaRonde, Agnico-Eagle. En effet, ce projet peut être perçu comme un partenariat visant à trouver les meilleures solutions possibles pour le développement d'un projet d'envergure tout en se conformant aux critères établis en matière de respect de l'environnement.

## 2.0 PREMIÈRE ÉTAPE

### 2.1 Brève description du parc existant selon sa configuration de 2002

Le parc à résidus de la mine LaRonde avait la configuration suivante lors de la première étape de l'étude (Figure 2) :

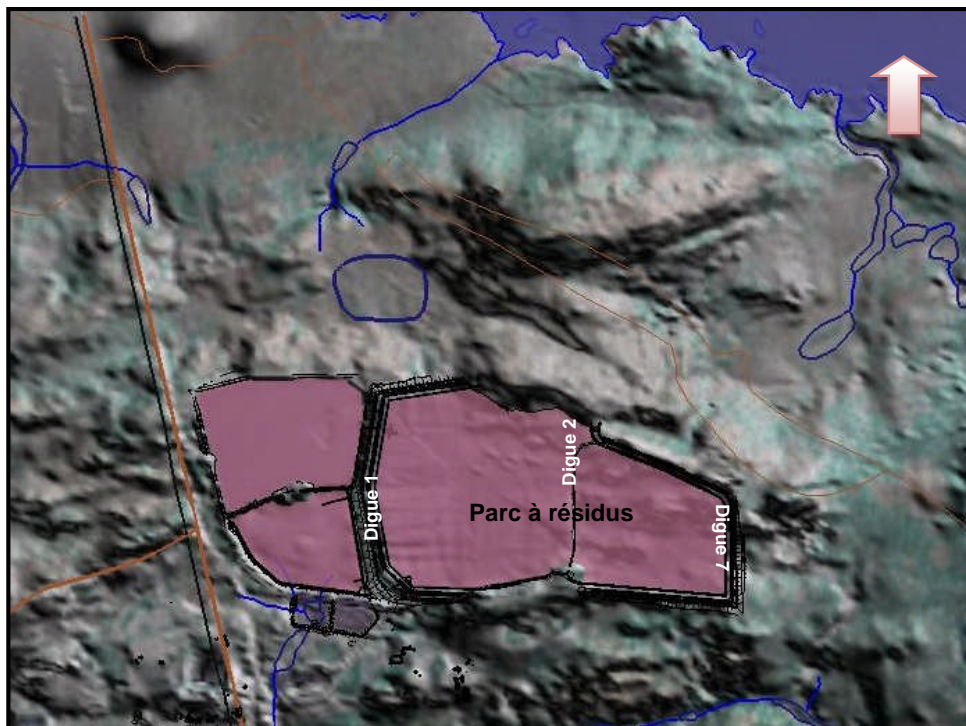


Figure 2: Vue en plan, configuration du parc à résidus de la mine LaRonde lors de la première étape de l'étude



Les digues 1 et 7 confinaient le parc à résidus à l'ouest et à l'est respectivement. L'ancienne digue 2, datant du tout premier parc conçu dans les années 80, séparait le parc à résidus de son extension :

- i) La digue 1, construite à l'élévation approximative de 337,0 m en 1988, est une structure semi-perméable constituée de stériles rocheux générateurs d'acide avec un parement amont (interne au bassin) composé d'un matériau argileux d'une épaisseur d'environ 2,0 m. La digue a été rehaussée à deux reprises selon un schéma permettant de prolonger la zone de faible perméabilité (le noyau) vers le haut. Son élévation finale est de 343,0 m, soit une hauteur de plus de 15 à 20 m à certains endroits.

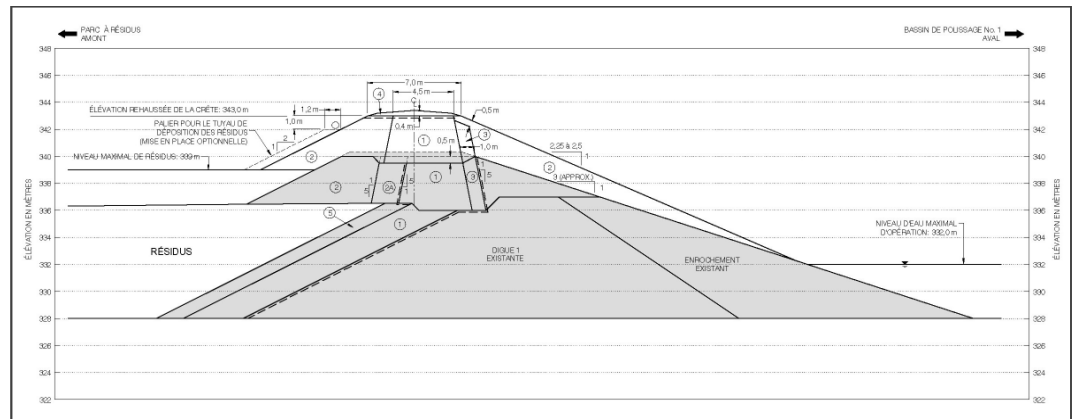


Figure 3: Exemple de coupe typique - digue 1

- ii) Tout comme la digue 1, la digue 7 a été construite en plusieurs étapes. Elle représente la structure de confinement de l'extension du parc mise en place en 1998. La digue possède un noyau central en moraine et est munie d'un drain cheminée continue et de doigts drainants. Elle a été rehaussée à deux reprises pour atteindre l'élévation de 343,0 m.

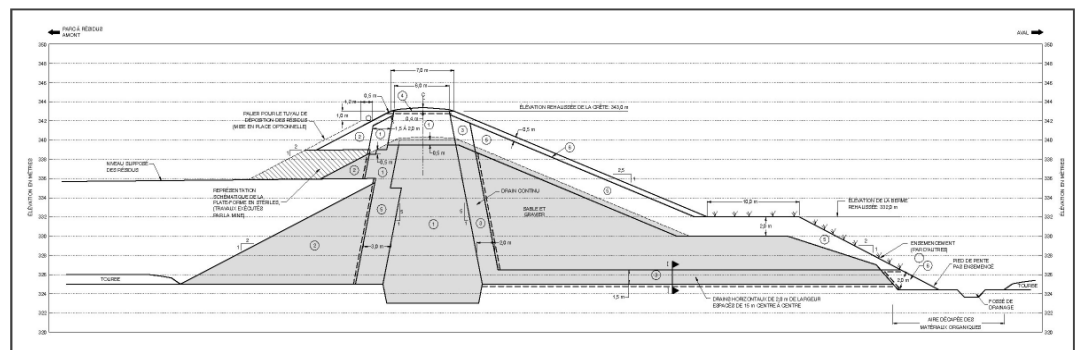


Figure 4: Exemple de coupe typique - digue 7





## 2.2 Augmentation de la capacité

Une évaluation des différentes options s'offrant à la mine pour augmenter les capacités d'entreposage a rapidement mis en évidence qu'il était possible et préférable de maximiser la capacité d'entreposage du parc à résidus existant. Une telle approche permettait de rencontrer certains des objectifs principaux d'opération et de protection de l'environnement :

- Augmenter rapidement la capacité d'entreposage en eau afin de répondre à la problématique complexe du traitement de l'eau;
- Maximiser l'utilisation de l'aire actuelle déjà altérée et retarder dans le temps l'utilisation d'aires additionnelles;
- Permettre d'entamer les travaux de restauration progressive du parc à résidus au fur et à mesure de son exploitation;
- Obtenir une solution économiquement intéressante fournissant un bon compromis entre les coûts de construction et le gain de capacité d'entreposage.

Cette idée s'est développée et a progressivement évolué au point où une étude dite d'élaboration de schémas de remplissage a été commandée. Une telle étude est typiquement une étape importante et consiste à évaluer le volume pouvant être accommodé sur l'empreinte d'un site. Cette étude a permis d'établir que le parc pouvait en effet offrir une capacité importante d'environ 23 Mt de plus, si sa hauteur pouvait atteindre 352,0 m soit, 9,0 m de plus que le niveau des digues 1 et 7 ceinturant le parc (Figure 5).

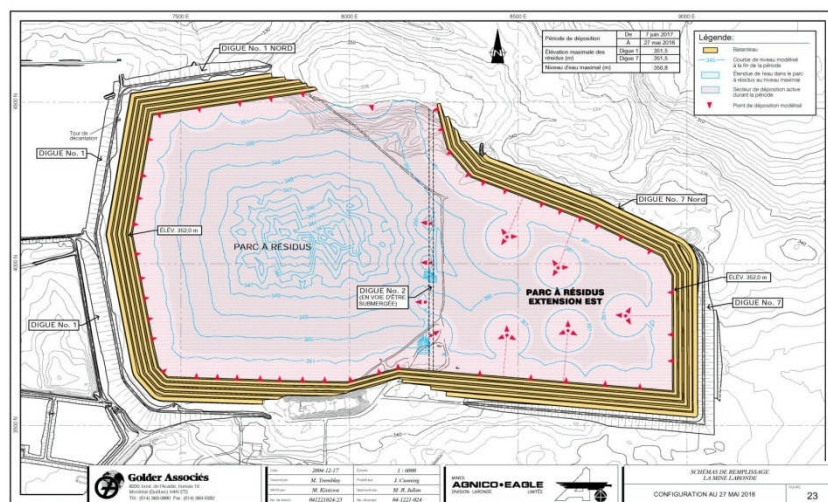


Figure 5: Vue en plan finale, parc à l'élévation de 352,0 m



### 2.2.1 Méthode préconisée

Le développement du schéma de rehaussement proposé a été motivé par des considérations techniques importantes. Plusieurs approches de rehaussements ont été envisagées afin de maximiser l'entreposage du parc en le rehaussant jusqu'à son élévation ultime prévue de 352,0 m, avant de développer le schéma de rehaussement présenté ici.

Il est rapidement apparu qu'un rehaussement de type aval ne pouvait être envisagé compte tenu de l'espace très restreint disponible et des quantités importantes de matériaux requis.

Par ailleurs, l'élément clé des différentes discussions était qu'un rehaussement central ne devait pas être considéré pour la digue 1 puisqu'il risquait de se solder par une augmentation importante des gradients hydrauliques dans les digues. Compte tenu de la nature de la digue 1 et de son comportement au fil des années, les gradients hydrauliques ne devaient pas être augmentés au-delà des niveaux établis lors de l'étude. En effet, la digue 1 avait subi déjà des forts gradients (un terme désignant la différence de pression d'eau entre deux points) qui avaient provoqués l'apparition de cavités dans le noyau et, fort probablement, avaient entraînés la migration des matériaux. Ces phénomènes peuvent se solder par le glissement et la perte d'une partie de la structure de confinement (Figure 6 et Figure 7).



Figure 6: Dépression de surface indicative du développement d'une cavité dans la digue 1



Figure 7: Cavités dans le noyau de la digue suite au développement de gradients excessifs et la migration des matériaux fins dans les matériaux grossiers.

Dans le cas de la digue 7, il était possible d'envisager un rehaussement central. Toutefois, un rehaussement central subséquent aurait comporté à long terme les mêmes risques que dans le cas de la digue 1, c'est-à-dire une augmentation constante des gradients hydrauliques dans le noyau. Afin de réduire les gradients



hydrauliques dans les digues existantes, un mode de rehaussement permettant un rabattement progressif de la nappe devait être envisagé.

Un mode de rehaussement amont a donc été préconisé et ce, dès 2004 (construction des rehaussements sur les plages de résidus). Cette solution était, à notre avis, celle qui présentait le plus d'avantages au niveau hydrogéologique et au niveau des coûts. Toutefois, il a été reconnu dès le départ que cette approche présentait des enjeux techniques significatifs, en particulier au niveau du potentiel de liquéfaction des résidus. Des investigations au piézocône réalisées en 2001 dans le parc ont démontré que les résidus de LaRonde sont liquéfiables (perte de résistance momentanée des résidus sous la nappe d'eau à la suite à un séisme). Une étude détaillée a été réalisée afin d'aborder cette question de front et de permettre le développement d'une approche de conception permettant de réduire les risques liés à cette méthode de construction. Selon nous, les rehaussements sur les plages de résidus pouvaient être faits de façon sécuritaire et les risques techniques pouvaient être mitigés de façon appropriée par la mise en place de systèmes de consolidation ou de dissipation des pressions interstitielles. Les désavantages associés à ce mode de rehaussement ne se comparaient pas aux risques potentiels associés à l'augmentation des gradients hydrauliques dans les structures existantes par la mise en place de rehaussements centrés ou aval.

### 2.2.2 Défis et approche d'analyses

Les défis les plus importants dans la phase de la conception consistaient à proposer une méthode de construction robuste et surtout basée sur des principes d'ingénierie reconnus. En effet, les rehaussements amont avaient eu beaucoup de publicité négative, car des cas de ruptures y étaient associés. Toutefois, les sites où ces incidents ont eu lieu n'ont généralement pas eu recours à un effort d'analyse et d'ingénierie détaillée permettant de développer une confiance élevée dans le mode de construction de rehaussement et de gestion de parc à résidus.

Les principaux défis auxquels nous avons été confrontés :

- La réévaluation du potentiel de liquéfaction des résidus en se basant sur les résultats des essais au piézocône a confirmé leur nature liquéfiable. L'analyse a été réalisée en suivant la méthodologie des rapports NCEER de 1996 et de 1998. Cette méthode compare la résistance estimée des résidus à la liquéfaction lors d'un séisme à la contrainte qui est induite par ce même séisme. Lorsque la contrainte dépasse la résistance, les résidus sont potentiellement en état de liquéfaction (Figure 8), ce qui est le cas pour des séismes importants selon les analyses réalisées.

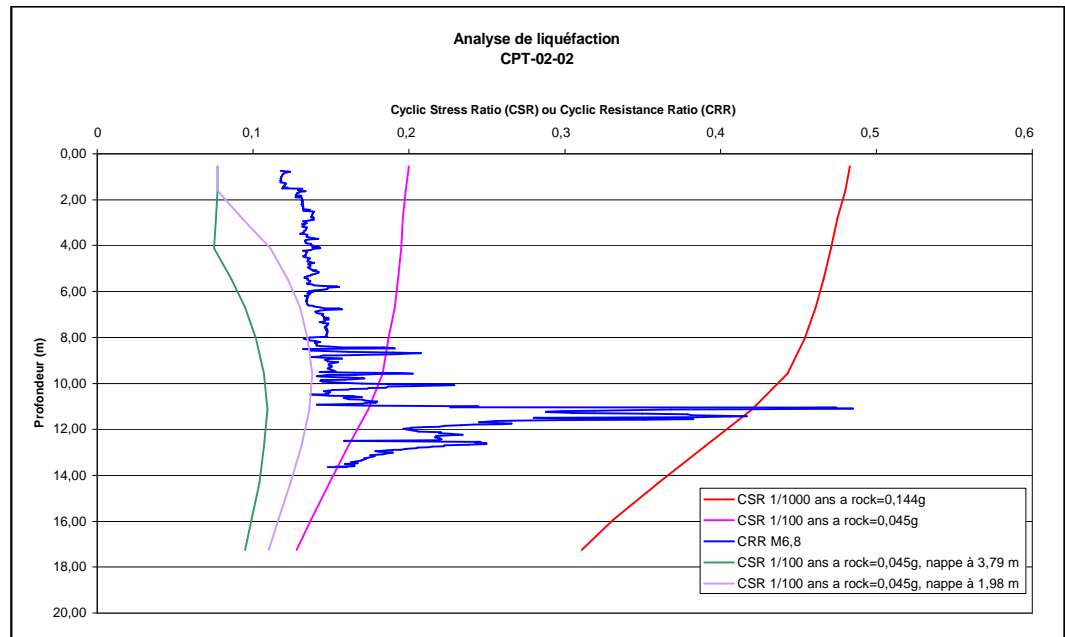


Figure 8: Exemple d'analyse de liquéfaction : le trait bleu représente la réponse des résidus

- Compte tenu de ces résultats, il a été établi que la liquéfaction est le phénomène qui contrôle la conception. La position de la nappe d'eau libre dans les résidus est l'élément le plus critique des analyses.

### 2.2.3 Analyses des écoulements et analyses de stabilité

Afin d'obtenir la configuration optimale répondant aux critères de stabilité requis par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), des modélisations de l'écoulement de l'eau couplées avec des analyses de stabilité en 2D ont été réalisées.

Le but premier était d'établir à quelle distance de recul vers l'intérieur du bassin les rehaussements devaient se faire et aussi, quel type de configuration les rehaussements devaient avoir afin de permettre un rabattement progressif de la nappe vers les digues principales. La configuration finale (ayant des reculs de 15 à 20 m) proposée et adoptée pour la construction est présentée à la Figure 1.

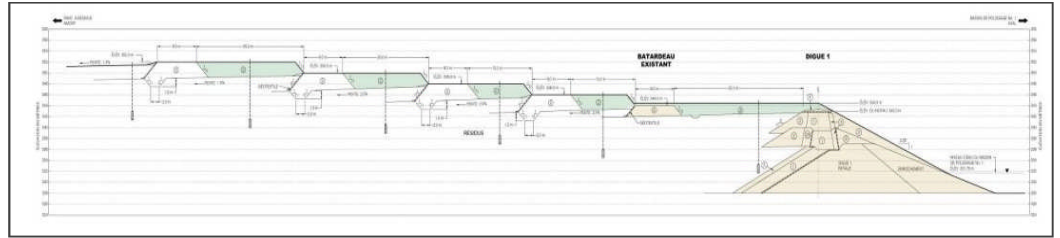


Figure 9: Coupe typique pour le schéma de développement proposé

La configuration proposée a permis d'atteindre les objectifs de conception suivants :

- Maintien ou abaissement du gradient hydraulique dans le corps des digues principales malgré le fait que le niveau d'eau dans le parc augmente considérablement.

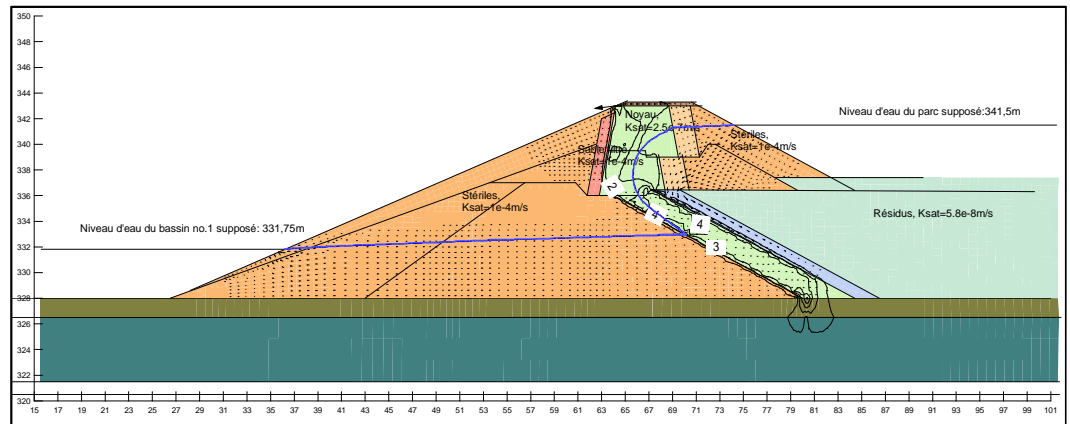


Figure 10: Exemple, digue 1-avant, gradient plus grand que 4 dans le corps de la digue

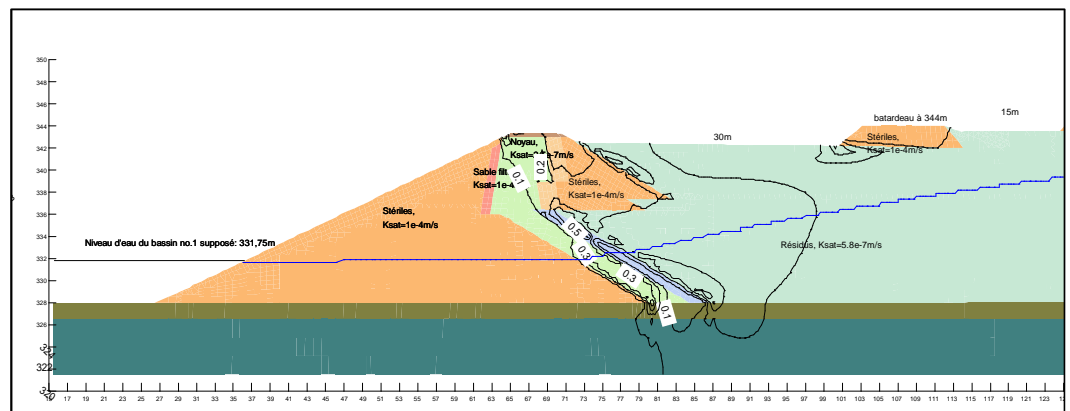


Figure 11: Exemple, digue 1-après, gradient plus faible que 1 dans le corps de la digue malgré la tête d'eau de 9 m plus importante

- À partir de ces résultats de modélisation forts encourageants, une série d'analyses de stabilité ont été réalisées pour confirmer la viabilité du concept. Tout en vérifiant les critères établis pour le comportement en condition



statique (normale) et pseudo-statique (suite à un séisme), la condition la plus critique, celle en post-liquéfaction, a été la plus difficile à rencontrer. Cette condition consiste à supposer que les résidus, sous l'influence d'un séisme, deviennent une masse sans résistance (comme un liquide) qui a le poids d'un solide.

Dans cet exercice, plusieurs concepts nouveaux ont été appliqués :

- Les résidus ont été modélisés comme un liquide, mais avec toutefois une résistance résiduelle faible, de l'ordre de  $5^0$ . Étant donné que c'est un état temporaire, les résidus finissent par se drainer et reprendre leur état normal, le facteur de sécurité minimum recherché est de 1, c'est-à-dire un système temporairement en équilibre.
- De plus, dans la zone au-dessus de la nappe d'eau libre, il a été supposé que les résidus, à cause de leur état non-saturé, sont en mesure de développer une certaine résistance attribuable à la succion. Ils se comporteront comme un sable sur une plage lors du retrait des vagues, c'est-à-dire capables de supporter un poids significatif.

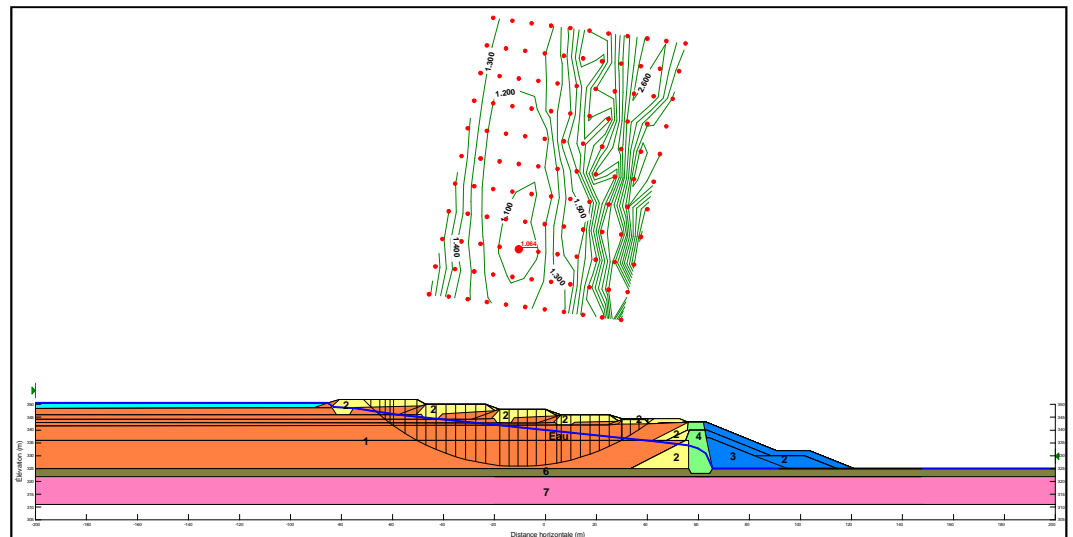


Figure 12: Exemple, digue 7 en poste liquéfaction - facteur de sécurité supérieur à 1, c'est à dire un système temporairement stable

### 2.2.4 Construction

Quelques images de la mise en place et du développement permettent de constater que le projet a été un succès et que les résidus ont exhibé un comportement stable remarquable.



*Figure 13: Rehaussement sur les résidus - construction- géotextile et résidus en amont*



*Figure 14: Rehaussement – construction – géotextile et résidus en amont*

### **2.3 Instrumentation, suivi et retro-analyses**

Suite à la construction des premiers rehaussements successifs, des piézomètres ont été installés dans le parc pour faire un suivi du niveau de l'eau dans les résidus déposés en amont des digues. Une série de trois piézomètres de type Casagrande ont été installés le long de six profils principaux. La Figure 15 présente une vue en plan du site ainsi que la position des piézomètres d'observation. Les niveaux d'eau sont mesurés par le personnel de la mine LaRonde régulièrement dans les piézomètres installés.

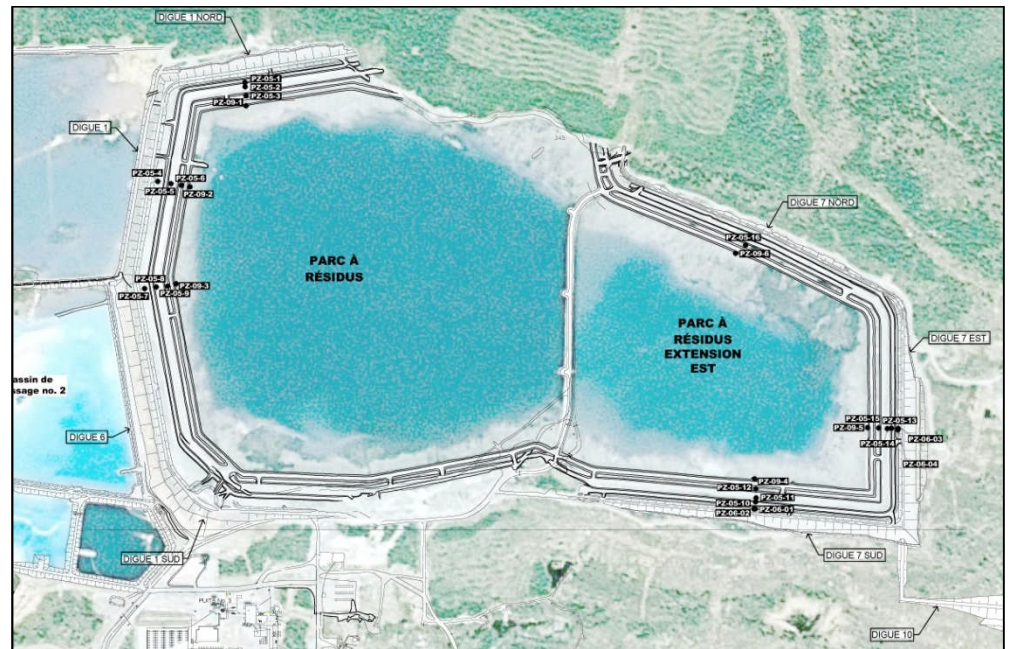


Figure 15: Vue en plan du parc à résidus principal et localisation des piézomètres



Figure 16: Installation d'un piézomètre électrique en amont du troisième batardeau

Les objectifs de ce suivi sont, entre autres, d'observer l'évolution des niveaux piézométriques dans les résidus au fil des rehaussements du parc à résidus et d'utiliser ces données pour effectuer une rétro-analyse de validation de la conception – le maintien d'un gradient à leur niveau d'avant rehaussement.





Le suivi des niveaux piézométriques au fil des ans a permis de constater que malgré l'augmentation progressive du niveau d'eau dans le parc à résidus, il y a un rabattement de la nappe phréatique près des digues principales 1 et 7. La Figure 17 présente un exemple de l'évolution des niveaux piézométriques, du niveau d'eau dans le parc à résidus ainsi que les périodes de mise en place des batardeaux dans le secteur de la digue 1. On observe sur cette figure que les niveaux d'eau mesurés dans les piézomètres PZ-05-01 et PZ-05-02, situés près de la digue 1, augmentent faiblement dans le temps, et ce malgré une augmentation de 4 m du niveau d'eau de l'étang du parc à résidus.

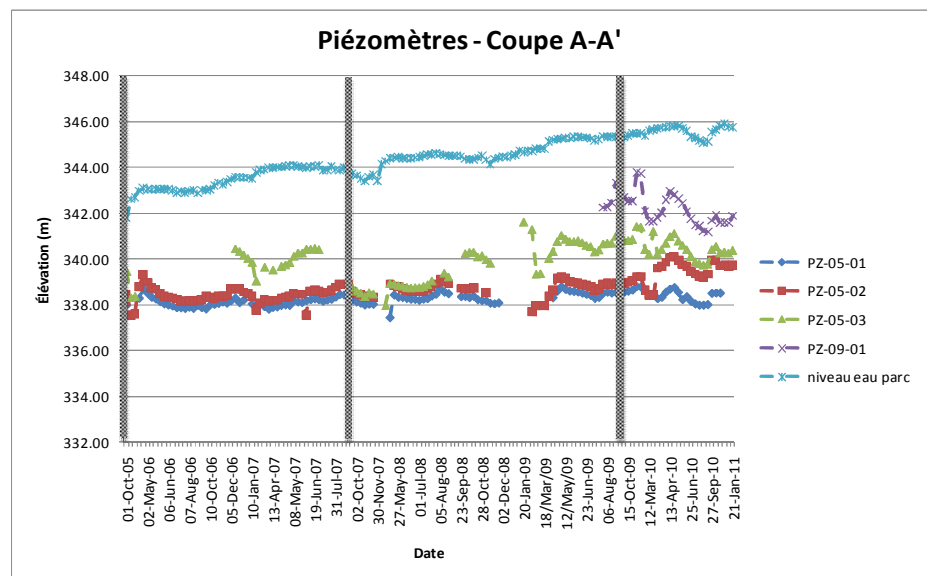


Figure 17: Exemple - évolution des niveaux piézométriques et du niveau d'eau dans le parc

Pour le rehaussement de 2011 (4<sup>ième</sup> de suite), les modèles ayant servi aux analyses d'écoulement antérieures ont été repris et calibrés afin de refléter les conditions récentes observées au parc à résidus.

L'approche retenue lors de la calibration des modèles a consisté à fixer les propriétés hydrauliques des matériaux des fondations et des digues; puis de varier les propriétés des résidus afin de reproduire les conditions piézométriques observées au site. Lors du vrai dépôt, les matériaux les plus grossiers se retrouvent près des points de dépôt sur les digues alors que les matériaux plus fins sont emportés plus loin en amont et vers l'intérieur des bassins. On peut supposer que la conductivité hydraulique des matériaux grossiers près des digues sera plus élevée que celle des matériaux plus fins à l'intérieur du bassin. Des modifications ont été apportées aux modèles au niveau des conductivités hydrauliques des résidus afin d'obtenir une surface phréatique se rapprochant le plus possible des conditions existantes. En effet, une modélisation qui suppose des résidus homogènes est quelque peu idéaliste (figure 18).

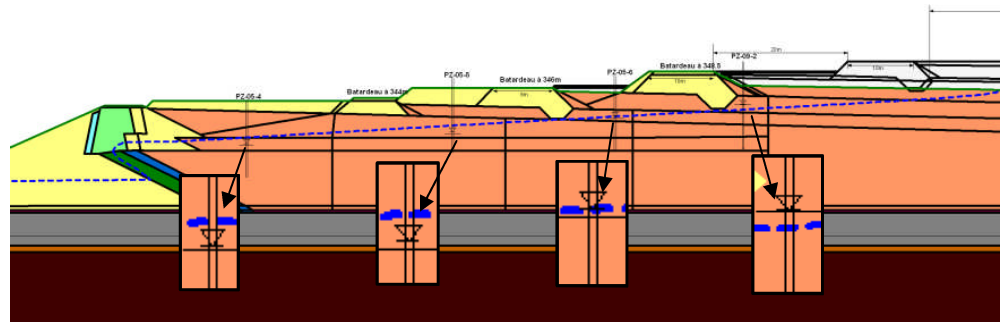


Figure 18: Comparaison du niveau piézométrique mesuré et simulé pour un horizon de résidus homogène

Pour obtenir un résultat plus près de la réalité mesurée, l'horizon représentant les résidus miniers a été divisé en plusieurs secteurs de conductivité hydraulique différente. Selon les coupes modélisées, la conductivité hydraulique des résidus a été variée de  $9 \times 10^{-7}$  m/s à  $5 \times 10^{-5}$  m/s en variant l'anisotropie de 0,1 à 1. La figure 19 présente le résultat obtenu pour la simulation de l'écoulement le long de la même coupe. L'approche choisie permet de mieux représenter les inflexions observées dans les mesures du niveau d'eau dans les résidus.

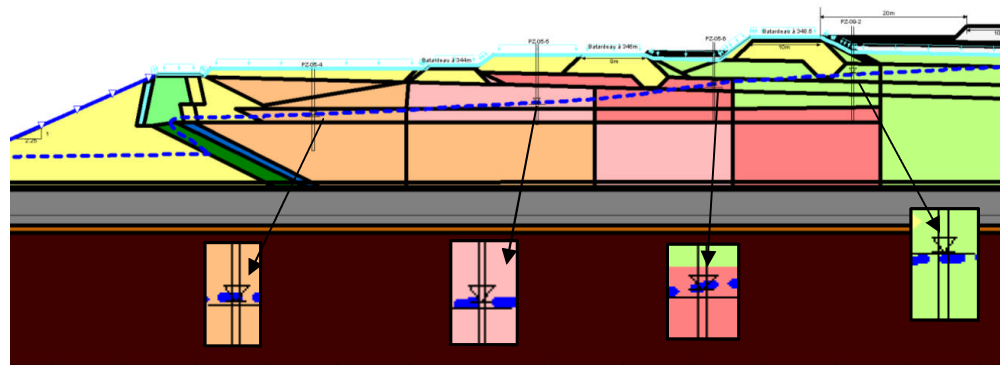


Figure 19: Comparaison du niveau piézométrique mesuré et modélisé pour un horizon de résidus divisé en secteurs de conductivité hydraulique différente

Selon les résultats de calibration obtenus, les niveaux piézométriques modélisés reproduisent ceux mesurés à 0,5 m près. La Figure 20 présente un graphique des niveaux piézométriques modélisés en fonction des niveaux mesurés pour tous les modèles. La comparaison entre les niveaux reproduits et ceux mesurés vient appuyer l'approche choisie d'introduire dans les modèles une variation latérale de la conductivité hydraulique des résidus.

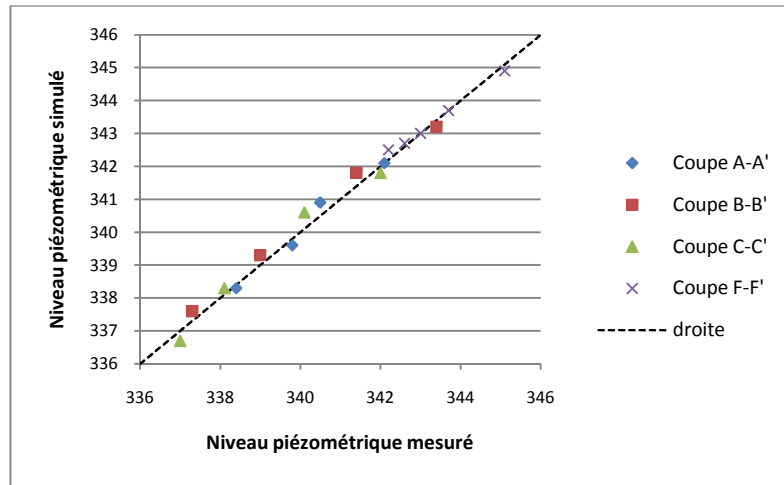


Figure 20: Comparaison du niveau piézométrique mesuré et modélisé

Les Figures 21 et 22 présentent les résultats des gradients obtenus par les rétro-analyses de l'écoulement de l'eau dans les digues 1 et 7 pour les conditions actuelles au site. Selon les résultats de la modélisation, les gradients obtenus pour la digue 1 et la digue 7 demeurent similaires ou inférieurs à ceux prédits lors de l'étude réalisée en 2004 pour une élévation en crête des digues de 343,0 m.

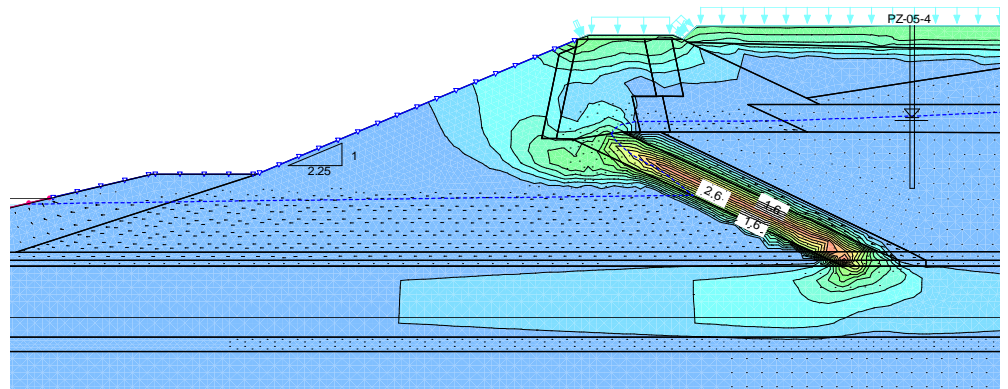


Figure 21: Exemple des résultats des retro-analyse pour la digue 1

Le concept développé pour répondre à la fois aux besoins de capacité de la mine LaRonde et aux défis rencontrés au niveau de la stabilité des digues et de l'environnement est donc vérifié suite au suivi et aux rétro-analyses effectués.

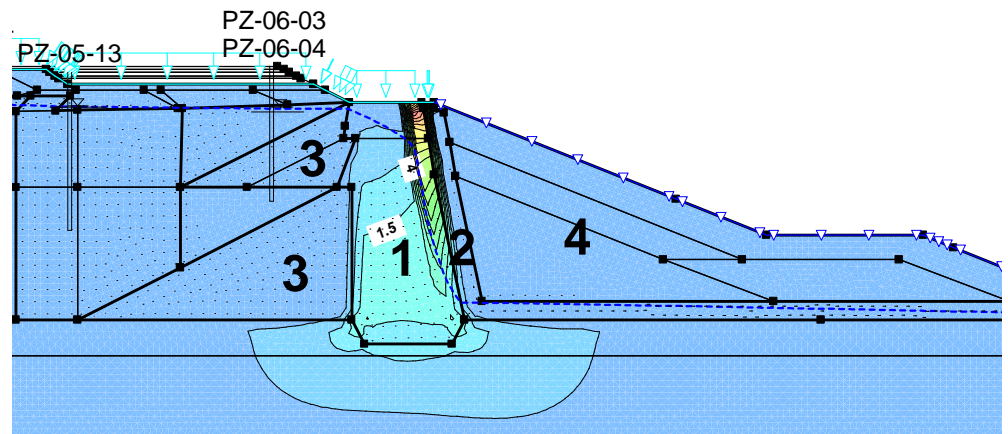


Figure 22: Exemple des résultats des retro-analyses pour la digue 7



## **3.0 DEUXIÈME ÉTAPE**

En 2008, une nouvelle revue des réserves, du passif d'eau et des capacités, compte tenu de l'ajout des résidus du projet Lapa, a mis en évidence le fait que la gestion intégrée des résidus et de l'eau nécessitait une capacité additionnelle d'environ 3,5 Mm<sup>3</sup>. Une augmentation additionnelle de la capacité du parc existant, aussi bien pour les résidus que pour l'eau, était limitée par la faisabilité technique de rehaussements. Le développement d'une nouvelle aire d'entreposage était donc nécessaire.

Simultanément aux étapes de développement du parc existant, Golder a donc été mandaté en 2008 par Agnico-Eagle pour réaliser des études visant la mise en place d'une nouvelle aire d'entreposage intégrée. Ce processus s'est terminé en 2010 avec la construction et la mise en opération du site A4. Les paragraphes suivants présentent un sommaire des étapes les plus importantes et les défis les plus marquants de cette phase du projet.

### **3.1 Introduction**

La démarche de réflexion et de prise de décision s'est échelonnée sur plusieurs étapes dont le but a été d'identifier:

- Les besoins en capacité;
- Les meilleurs sites dans un rayon raisonnable compte tenu de l'utilisation actuelle du territoire et la facilité d'intégration de la nouvelle aire dans le système d'opération du parc existant;
- Les critères d'évaluation applicables à l'étude.

L'analyse de chacun des sites proposés, selon la série de critères, devait conduire à la sélection du meilleur site d'un point de vue environnemental et socio-économique.

### **3.2 Sélection de site**

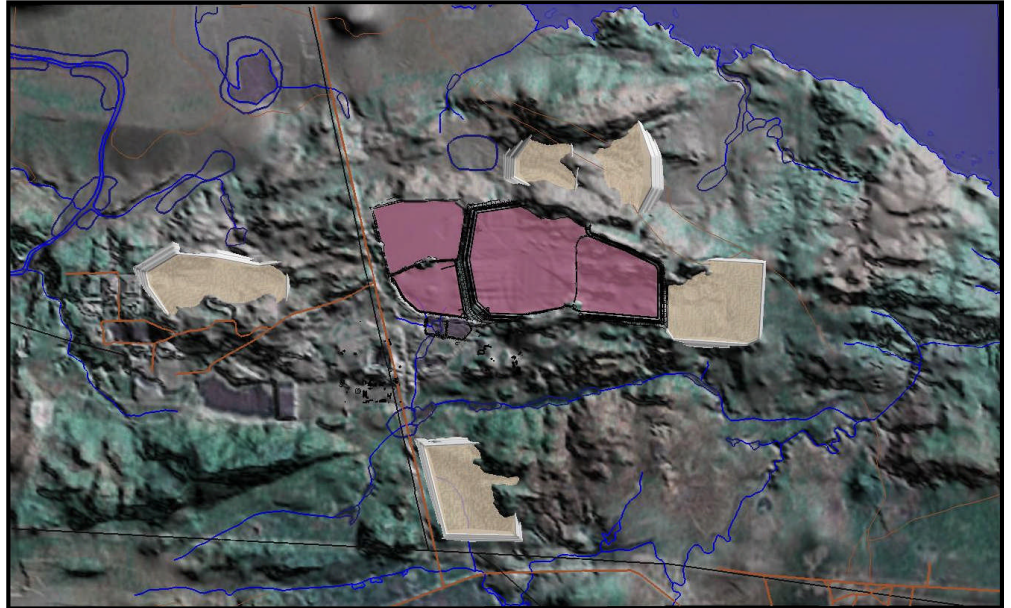
#### **3.2.1 Processus**

Le processus de sélection des sites est, selon nous, une des étapes des plus importantes dans le développement d'un projet d'aménagement des infrastructures de surface minières. Avant même l'apparition du document « *Guidelines for the Assessment of Alternatives for Mine Waste, March 2011* » d'Environnement Canada, le choix de sites a été mené selon un processus exigeant, incluant :

- Une présélection basée sur une gamme de critères :
  - Impact sur le secteur selon des critères environnementaux et sociaux clés;
  - Enjeux technologiques et financiers, tels la faisabilité;



- La présélection a permis d'identifier cinq (5) sites potentiels (Figure 23).



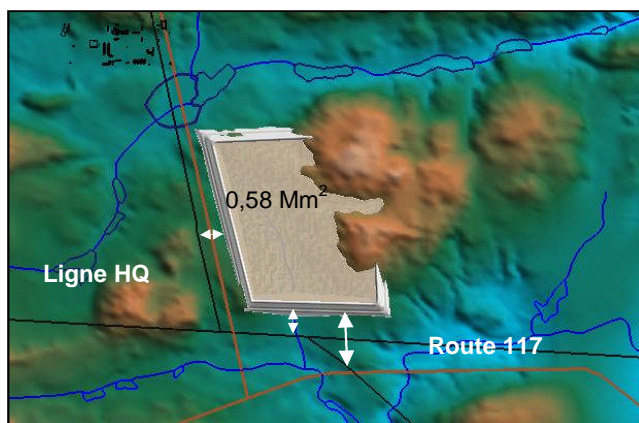
*Figure 23: Exemple, sites retenus pour la nouvelle aire d'entreposage suite à la présélection*

- Une confirmation de la présélection par une consultation ouverte, dans le cadre d'une réunion formelle, avec la mine LaRonde et des parties prenantes, telles des représentants du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.
- Élaboration d'une liste de critères rigoureux et d'objectifs divisés en catégories :
  - Contraintes environnementales : critères caractérisant les impacts potentiels sur les eaux de surface, le régime hydrique dans le secteur du site, la valeur et la qualité des milieux aquatiques, humides, la faune et la flore pouvant être affectés;
  - Contraintes sociales : critères ayant pour objectifs de caractériser les impacts potentiels sur les populations dans la région, sur le développement récréatif, ancestral, culturel;
  - Contraintes techniques : critères mettant en valeur la complexité des ouvrages et l'impact sur l'opération des sites;
  - Contraintes économiques : évaluation préliminaire des coûts de capital, d'opération et de fermeture du site.

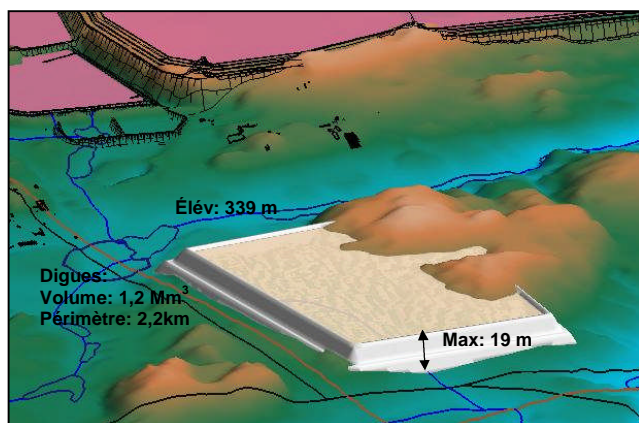
Chacun des sites proposés a été analysé de façon détaillée pour mettre en valeur ses avantages et désavantages. La Figure 24 présente un exemple de l'effort de



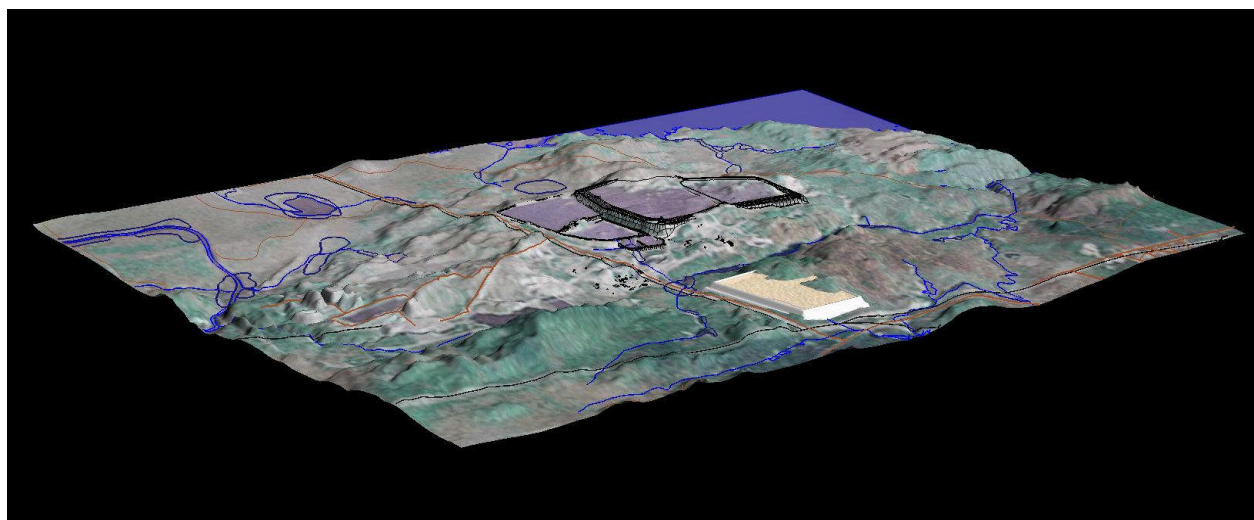
modélisation qui a été réalisé pour chacun des sites afin de pouvoir conduire l'évaluation.



*Vue en plan*



*Vue en perspective (exagération verticale de 5X)*

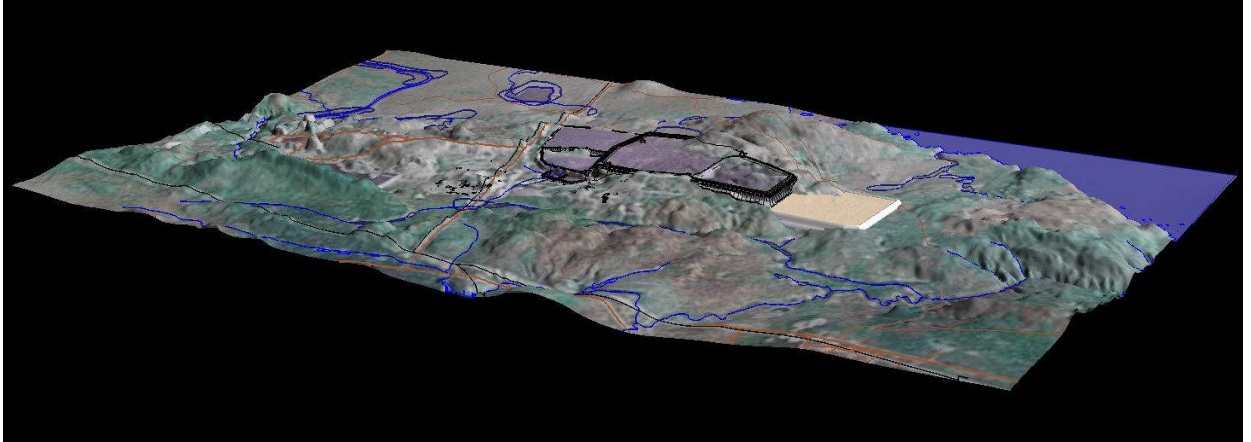


*Vue en 3D globale (exagération verticale de 5X)*

*Figure 24: Exemple du développement fait pour chacun des sites pour la conduite de l'évaluation détaillée*

### **3.2.2 Site choisi**

L'analyse détaillée a permis de déterminer que l'extension du parc vers l'est est le meilleur choix compte tenu de toutes les composantes de l'étude, environnementale, sociale et technico-économique. L'analyse a permis d'identifier ses avantages selon une méthodologie rigoureuse et en consultation continue avec le client et les parties prenantes dans le projet.



*Figure 25: Site sélectionné : extension du parc existant vers l'est*

Le site a été, suite à la finalisation de cette étude, soumis à une investigation géotechnique et hydrogéologique exhaustive et ensuite est entré en phase de conception détaillée.

La conception détaillée, réalisée en 2009-2010, incluait plusieurs étapes et études afin de fournir un produit techniquement solide et répondant aux critères de développement du MDDEP. Un des objectifs les plus importants dans cette démarche était de fournir un haut degré de protection des eaux souterraines.

### **3.3 Approche de développement préconisée pour répondre aux critères de la Directive 019**

Une analyse de l'écoulement de l'eau a été réalisée afin de vérifier que le concept proposé pour la nouvelle extension du parc rencontrait bien les exigences de la Directive 019 du MDDEP en termes d'exfiltration. Selon cette directive, entrée en vigueur en 2005, le mode de gestion des résidus miniers doit être conçu de manière à respecter un débit de percolation quotidien maximal de  $3,3 \text{ l/m}^2$  pour le fond de l'aire d'accumulation de résidus miniers. Ce débit est établi à partir d'un modèle type correspondant à une couche d'argile de 3 mètres d'épaisseur avec une conductivité hydraulique de  $10^{-6} \text{ cm/s}$  soumise à une charge hydraulique correspondante à 10 mètres d'eau.

Dans le cas du nouveau site, nous avons considéré comme débit d'exfiltration maximal, le débit d'exfiltration se rapportant au périmètre de la digue 10. Des mesures de traitement de la fondation de la digue ont donc fait partie intégrante de la conception afin de limiter les exfiltrations à son périmètre et ainsi respecter le débit quotidien maximal établi par la Directive 019.

Le taux d'exfiltration a été estimé à l'aide d'un modèle numérique en deux dimensions simulant l'extension du parc à résidus le long de quatre coupes





typiques différentes présentées à la Figure 26. Les coupes typiques choisies représentaient les différentes conditions observées de la fondation de l'assise de la digue et de l'extension du parc à résidus lors des travaux d'investigation. Elles représentaient aussi les différentes méthodes envisagées pour le traitement des fondations, lorsque requises, dont l'exposition du roc suivi de son injection ainsi que la mise en place d'une paroi sol-bentonite jusqu'au roc. Les simulations, sur chacune des coupes, ont été réalisées pour les trois cas d'opération susceptibles d'être rencontrés durant l'opération de cette extension.

Le débit unitaire a été évalué pour chacun des cas rencontrés de façon à estimer un taux d'exfiltration moyen réparti sur la superficie de l'aire d'accumulation.

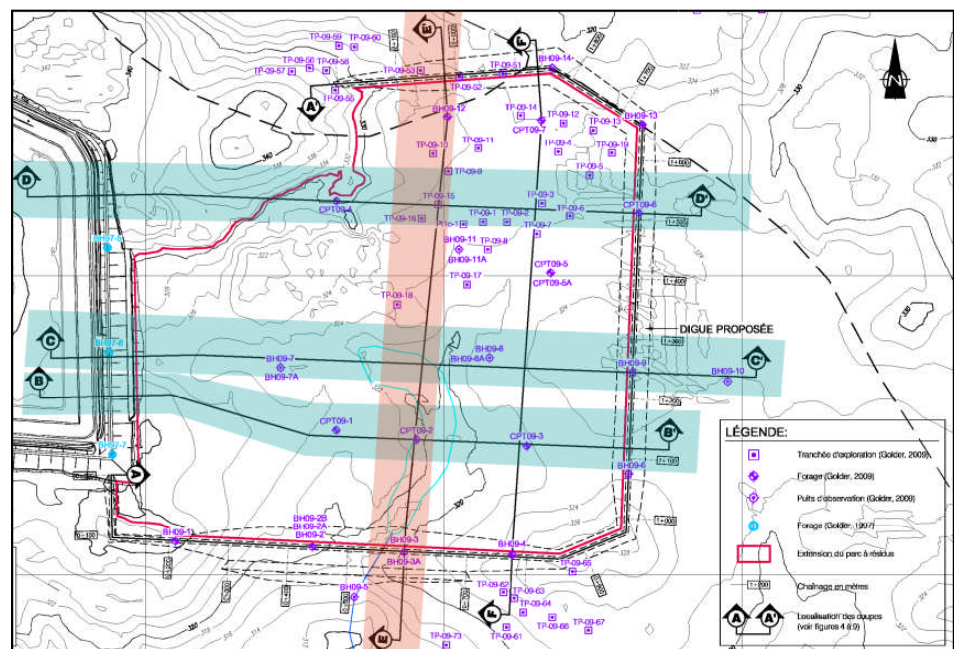


Figure 26: Vue en plan, coupes modélisées pour l'estimation des taux d'exfiltration

En plus d'estimer les débits d'exfiltration à travers la digue 10 et sa fondation, la modélisation avait aussi pour but de déterminer la sensibilité des résultats obtenus aux variations des paramètres du modèle (ex. les variations des valeurs de perméabilité de certains matériaux). La coupe nord-sud E-E', présentée ci-dessous, a servi à la calibration du modèle et à l'analyse de sensibilité. Les propriétés hydrauliques des matériaux entrés dans les modèles étaient basées sur les résultats de la campagne d'investigation détaillée pour le site.

La phase de calibration consistait à comparer la piézométrie modélisée aux niveaux piézométriques mesurés *in situ*. Dans l'ensemble, le modèle est parvenu à reproduire correctement la piézométrie mesurée au nouveau site, ce qui appuyait l'approche choisie de modéliser une couche de roc altéré de 5 m d'épaisseur suivie du roc sain en profondeur.



L'analyse de sensibilité a été effectuée dans le but de déterminer les paramètres dont l'influence est la plus marquée sur l'ensemble du système modélisé. Cette analyse a été conduite uniquement dans le but de cibler les facteurs clés. Les paramètres variés comprenaient : la perméabilité du roc en profondeur, la perméabilité des sols cohérents, la profondeur des mesures de traitement envisagées et les propriétés hydrauliques des mesures envisagées pour le traitement des sols et du roc. Selon cette analyse, les débits d'exfiltration étaient sensibles aux conductivités hydrauliques du roc et de l'argile, ainsi que leur distribution spatiale.

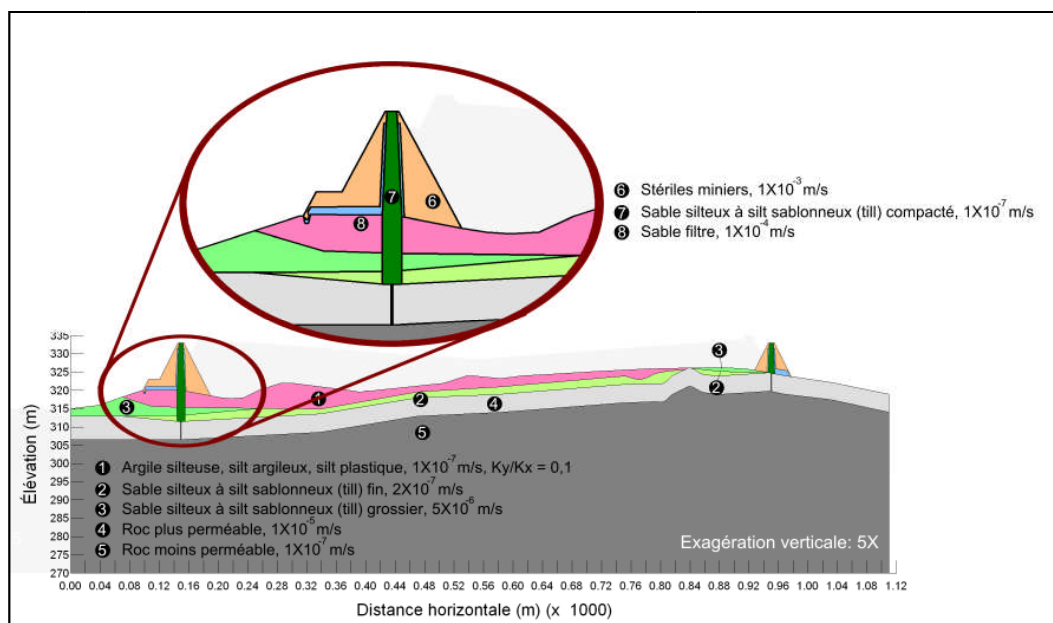


Figure 27: Exemple, représentation du modèle de la coupe E-E' pour les analyses des écoulements

De façon générale, la modélisation a montré que les exfiltrations passaient surtout à travers l'unité de roc altéré et qu'elles pouvaient être réduites jusqu'à 80 %, selon les coupes modélisées, par le traitement de la fondation sous la digue. Les taux d'exfiltration quotidiens estimés pour le concept proposé, incluant le traitement de la fondation, variaient de 0,9 à  $0,56 \text{ L/m}^2$ , selon les cas d'opération étudiés, ce qui respecterait les exigences de la Directive 019.



## **4.0 REMERCIEMENTS**

Nous tenons tout particulièrement à remercier l'équipe de la mine LaRonde qui a eu la vision de développement à long terme d'un projet viable au niveau environnemental. Cette équipe a démontré un leadership éclairé exceptionnel et a permis à l'équipe de professionnels de Golder de mettre en application toutes leurs connaissances et leur imagination pour recourir à des solutions innovatrices.

Chez Golder Associés, nous mettons tout en œuvre pour constituer la firme la plus respectée mondialement pour ses services spécialisés en consultation, en conception et en construction dans les secteurs des sciences de la Terre, de l'environnement et de l'énergie. L'entreprise est la propriété des employés depuis sa création en 1960. Nos objectifs clairs ainsi que le caractère unique de notre culture et de nos façons d'opérer donnent à chacun l'occasion et le pouvoir d'exceller, ce qui attire chez nous les meilleurs spécialistes dans nos domaines d'expertise. Nos professionnels prennent le temps de comprendre les besoins des clients et les contraintes spécifiques rattachées à leurs activités. Nous continuons à étendre notre expertise technique alors que nos effectifs croissent de façon constante, avec des employés qui travaillent à partir de nos nombreux bureaux situés en Afrique, en Asie, en Océanie, en Europe, en Amérique du Nord et en Amérique du Sud.

Afrique	+ 27 11 254 4800
Amérique du Nord	+ 1 800 275 3281
Amérique du Sud	+ 55 21 3095 9500
Asie	+ 86 21 6258 5522
Europe	+ 356 21 42 30 20
Océanie	+ 61 3 8862 3500

[solutions@golder.com](mailto:solutions@golder.com)  
[www.golder.com](http://www.golder.com)

**Golder Associés Ltée**  
**1001, boul. de Maisonneuve Ouest, 7e étage**  
**Montréal (Québec) H3A 3C8**  
**Canada**  
**T: +1 (514) 383-0990**

