



Compendium de recherche, de développement et de démonstration – Résultats d'un laboratoire de recherche souterrain canadien

Grant Su, spécialiste technique en géoscience

Réunion technique sur le compendium des résultats d'activités de recherche, de développement et de démonstration réalisées dans des installations de recherche souterraines sur les dépôts de déchets dans des formations géologiques profondes

Gyeongju, République de Corée

Du 11 au 15 septembre 2017

e-Doc : 5342467



suretenucleaire.gc.ca



CANADA 150

Contenu

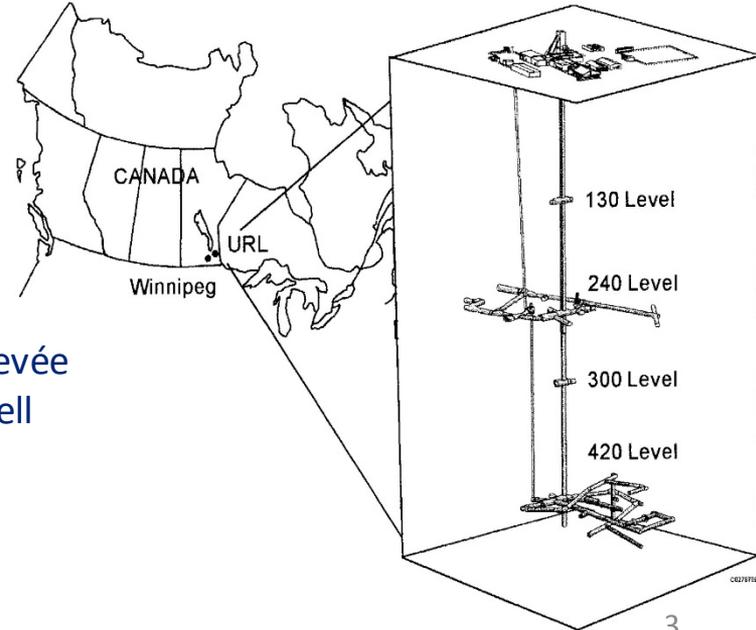


- Aperçu du laboratoire de recherche souterrain (LRS) d'Énergie atomique du Canada Limitée (EACL)
- Conditions géologiques du LRS
- Principales activités de recherche, développement et démonstration (RDD) réalisées au LRS
- Principaux résultats et leçons apprises de la RDD



Aperçu du LRS d'EACL

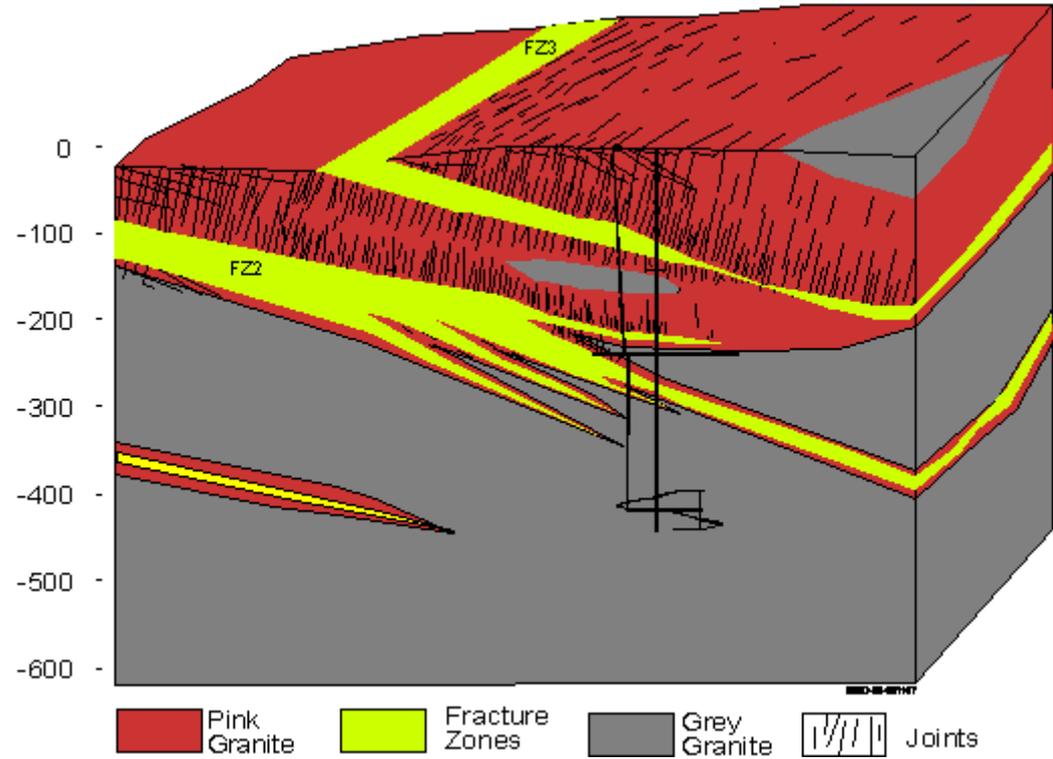
- 1963 – EACL construit l'institut de recherche nucléaire du laboratoire de Whiteshell
- 1980 – EACL obtient l'approbation de construire le LRS
- 1983 – La construction du LRS débute
- 1985 – Le puits d'accès principal est excavé jusqu'à une profondeur de 255 m
- 1987 – L'aménagement du niveau 240 débute
- 1988 – Le puits d'accès principal est excavé jusqu'à une profondeur de 443 m
- 1989 – Le tunnel d'accès au niveau 420 est excavé
- 1990 – La construction du puits de ventilation montant est achevée
- 1998 – Les travaux de déclassement du laboratoire de Whiteshell débutent
- 2003 – La fermeture du LRS est annoncée
- 2006 – Les travaux de fermeture du LRS débutent
- 2010 – Le LRS est fermé de façon permanente



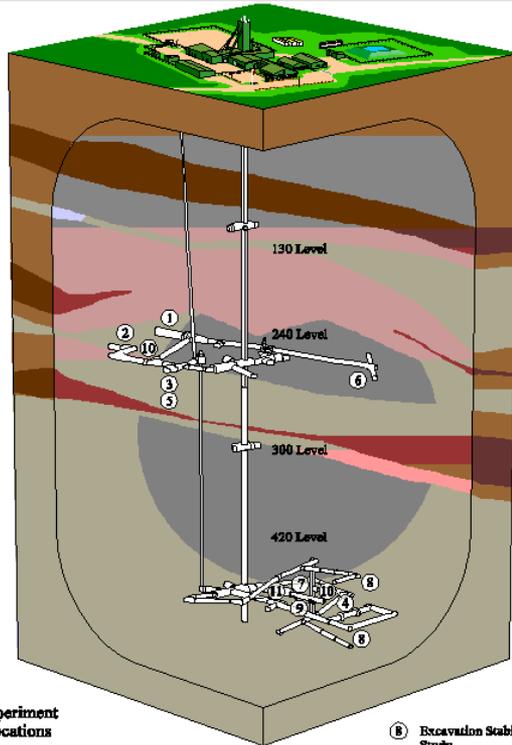
Conditions géologiques et hydrogéologiques



- Le LRS est situé sur le batholite du lac du Bonnet, une vaste formation plutonique de granite
- Trois grandes zones de fracture peu inclinées dirigent la trajectoire à grande échelle d'écoulement des eaux souterraines ainsi que sa composition chimique
- Le massif rocheux situé à plus de 300 m sous la surface présentait relativement peu de fractures; ces dernières étaient plus prononcées près de la surface
- Distribution spatiale complexe de la conductivité hydraulique dans chaque zone de fracture



Principales activités de RDD réalisées au LRS



- Experiment Locations**
- | | | |
|---|---|---|
| ① Buffer/Container | ⑤ Solute Transport in Highly Fractured Rock | ⑧ Excavation Stability Study |
| ② Quarried Block Radionuclide Migration | ⑥ Solute Transport in Moderately Fractured Rock | ⑨ Solute Transport Excavation Damage Zone |
| ③ Grouting | ⑦ Mine-by | ⑩ Connected Permeability Tests |
| ④ Tunnel Sealing | | ⑪ Heated Failure Tests |

LMO-02-0110

- Caractérisation souterraine et à la surface
- Écoulement souterrain et transport de soluté
- Conditions de contrainte *in situ*
- Déformation en fonction de la température et du temps et caractéristiques de fissuration rocheuse
- Techniques d'excavation visant à minimiser les dommages causés à la roche environnante et à garantir des conditions de travail sécuritaires
- Essais visant la zone tampon et les contenants
- Essais visant le scellement des puits



Principaux résultats et leçons apprises de la recherche, du développement et de la démonstration (RDD)

Validation de la modélisation de l'écoulement d'eaux souterraines



- Objectif : Déterminer si les réactions du système d'eaux souterraines dans la roche entourant le puits peuvent être prédites avec exactitude au moyen du modèle d'éléments finis en trois dimensions MOTIF et d'un code en différences finies SWIFT, en fonction du modèle conceptuel hydrogéologique du site, et calibrées en fonction des données hydrologiques tirées d'essais et de mesures du système de surveillance avant le fonçage des puits
- Ces modèles servent à prédire les réactions des eaux souterraines dans 171 emplacements dans la masse rocheuse environnante en raison de la construction du puits jusqu'à une profondeur de 255 m
- Principales constatations : Le modèle MOTIF avait légèrement surestimé le taux d'infiltration des eaux souterraines dans le puits, mais correspondait bien à la tendance du débit d'écoulement au fil du temps, alors que le modèle SWIFT prédisait des taux d'infiltration moins élevés que ceux mesurés et ne correspondait pas bien au débit d'écoulement mesuré au fil du temps

Essai de contrainte *in situ* (1)



- Objectif : Évaluer les techniques permettant de déterminer les contraintes *in situ* de la roche et examiner les facteurs qui influencent l'ampleur et la variabilité des contraintes
- Contexte des essais
 - 350 essais de surcarottage en zone éloignée et environ 80 mesures de fracturation hydraulique réalisés au site du LRS
 - Observations de la fissuration des murs des puits, recherche de la source des microséismes, mesures de la convergence des puits, analyse de la réouverture des fractures hydrauliques, surcarottage selon la méthode Doorstopper et détermination de la contrainte sous la zone d'excavation

Essai de contrainte *in situ* (2)

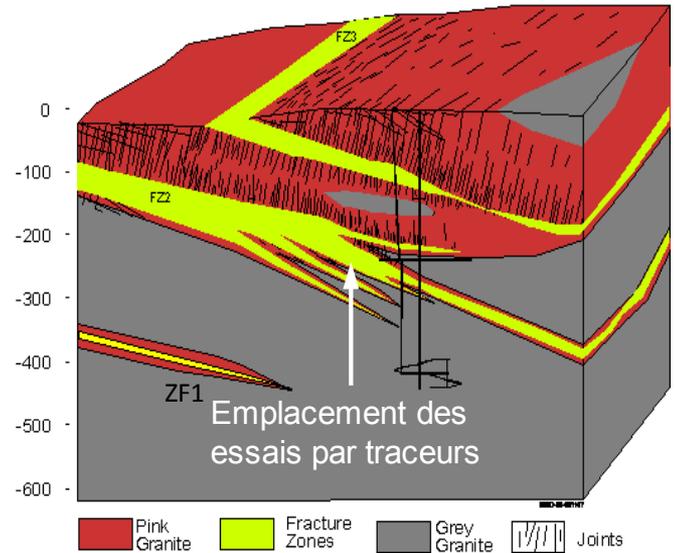


- Principaux résultats
 - Les méthodes de détermination des contraintes par fracturation hydraulique et par surcarottage peuvent générer des données acceptables dans des conditions de contraintes faibles et modérées
 - Ces méthodes conventionnelles ne peuvent pas être utilisées dans les zones de contraintes horizontales élevées en profondeur
- Principaux points d'apprentissage
 - La détermination d'un tenseur de contrainte dans la roche constitue un processus itératif qui s'appuie sur des étapes successives de collecte de renseignements sur les contraintes
 - La confiance à l'égard des tenseurs de contrainte *in situ* calculés ne s'obtient pas à partir d'une seule technique, mais plutôt en examinant les résultats de diverses mesures et observations

Essai de transport de solutés dans la roche fortement fracturée (1)



- Objectif : Mettre au point et éprouver des méthodes d'estimation des propriétés de transport de solutés dans les zones de fracture à des échelles locales et régionales sous diverses conditions d'essais en vue de l'élaboration de modèles d'écoulement des eaux souterraines et de transport de solutés



Essai de transport de solutés dans la roche fortement fracturée (2)



➤ Contexte des essais

- Phase 1 : Sept essais par traceur dans les eaux souterraines, à des échelles allant de 17 m à 209 m, ont été réalisés dans la zone de fracture 2 afin d'examiner l'influence de l'échelle et de l'orientation sur les propriétés de transport de solutés
- Phase 2 : Une série de six essais par traceur a été réalisée dans la zone de fracture 2 à une échelle réduite d'environ 20 m
- Phase 3 : Des essais à grande échelle ont été réalisés afin d'aider à déterminer si les propriétés de transport de solutés dans les zones de roche intensément fracturée dépendent de l'échelle ou de l'orientation
- Les essais visaient à étudier différentes méthodes, à examiner les effets de l'orientation et du débit de l'écoulement ainsi qu'à comparer le comportement de transport de divers traceurs

Essai de transport de solutés dans la roche fortement fracturée (3)



➤ Principaux résultats

- À l'échelle de transport la plus grande, les propriétés de transport de solutés dans la zone de fracture atteignent une moyenne, et les effets des variations de la perméabilité à grande échelle revêtent une importance
- Les résultats ventilés des différentes méthodes d'essais par traceurs se sont avérés différents
- Les résultats ventilés de l'une des paires d'essais par traceurs sur des puits doubles ont démontré que le débit de transport du traceur ne dépendait pas de l'orientation entre ces deux puits
- Deux essais continus par traceur recirculé montrent que le débit d'écoulement n'avait aucune influence sur les propriétés de transport du milieu entre les deux trous de forage mis à l'essai

Essai de transport de solutés dans la roche fortement fracturée (4)



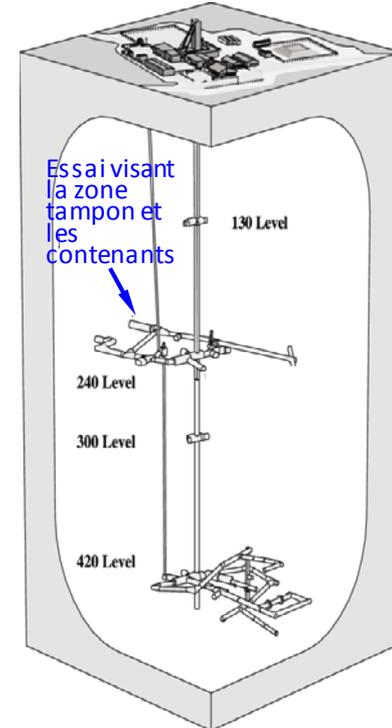
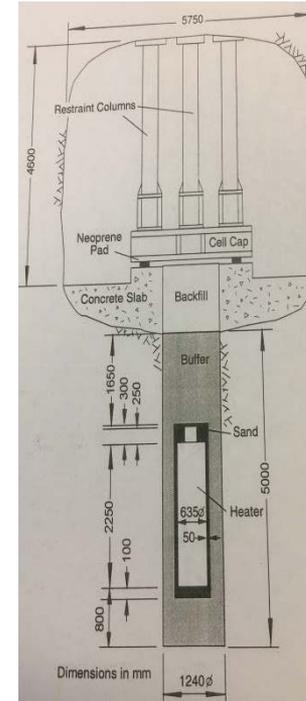
- Principaux points d'apprentissage
 - L'approche fondée sur un milieu poreux équivalent est probablement acceptable pour la modélisation de l'écoulement des fluides et du transport de solutés dans les grandes zones de fracture
 - L'élaboration d'un modèle de transport adéquat capable de prédire tous les essais s'est avérée difficile
 - Les traceurs colloïdaux et conservateurs dans les eaux souterraines se comportaient de manière très semblable durant ces essais

Essai visant la zone tampon et les contenants (1)



➤ Objectif

- Évaluer et documenter le rendement *in situ* à pleine échelle du matériau de référence de la zone tampon dans des conditions géologiques réalistes et sous l'effet de la chaleur
- Évaluer la survie de la flore microbienne naturellement présente dans le matériau de la zone tampon, y compris dans des conditions d'essais



Essai visant la zone tampon et les contenants (2)



Installation expérimentale

- Un appareil de chauffage électrique de 2 m de haut et de 0,6 m de diamètre a été positionné dans un trou de forage de 1,24 m de diamètre et de 5 m de profondeur creusé dans le granite et complètement entouré d'un matériau de la zone tampon fait de sable et de bentonite (50:50 en poids) et compacté *in situ*. L'anneau de matériau de la zone tampon entre l'appareil de chauffage et la roche avait une épaisseur de 26 cm.
- L'appareil de chauffage a été mis en marche à un réglage d'intensité constant afin de maintenir la température de la surface de l'appareil à environ 85 °C.
- L'appareil de chauffage a été éteint deux ans et demi plus tard, et l'appareil ainsi que le matériau de la zone tampon ont été retirés.

Essai visant la zone tampon et les contenants (3)



➤ Principaux résultats

- La baisse de la température dans l'ensemble de l'anneau a été de 30 °C.
- Le matériau de la zone tampon adjacent à la roche était saturé, alors qu'un assèchement considérable de la zone tampon s'était produit à proximité de l'appareil de chauffage. Après l'enlèvement de la zone tampon, on a pu observer un rétrécissement manifeste signalé par la présence de fissures radiales pénétrant jusqu'à 10 cm à l'intérieur de l'anneau, sans qu'il y ait de fissuration au-delà.
- Une fois saturé à nouveau, le matériau fissuré a retrouvé la faible conductivité hydraulique de la zone tampon n'ayant jamais été asséchée sous l'effet de la chaleur, démontrant la capacité de régénération du matériau.
- La disparition presque universelle de tous les microorganismes cultivables dans les échantillons de la zone tampon présentant une faible (<15 %) teneur en humidité (correspondant à une activité de l'eau a_w d'environ 0,96) et une température élevée (50 °C à 60 °C).
- La teneur en humidité constituait le principal facteur déterminant la présence d'organismes viables dans le matériau de la zone tampon.

Essai visant la zone tampon et les contenants (4)

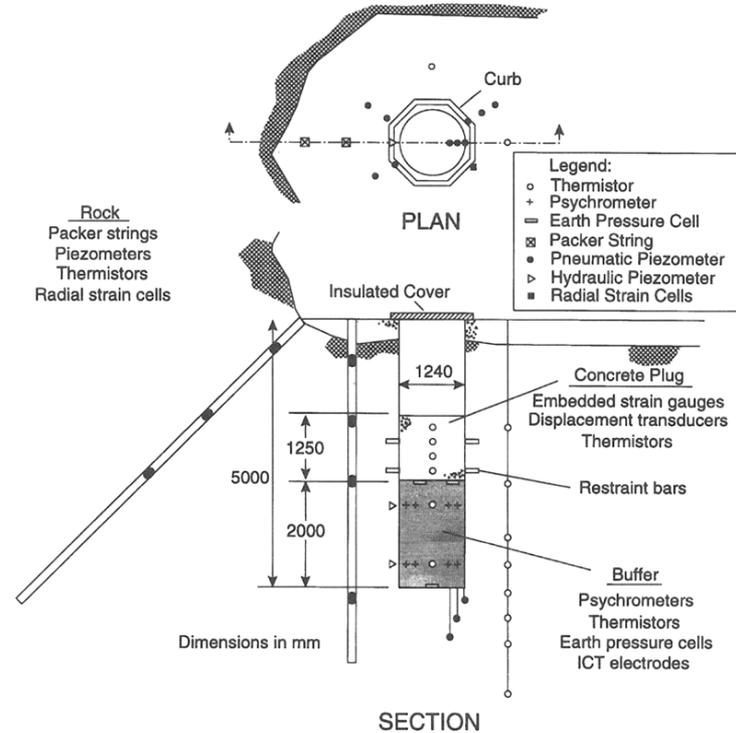


- Principaux points d'apprentissage
 - Le mélange de référence de sable et de bentonite compacté *in situ* jusqu'à une densité sèche efficace minimale de l'argile de $1,21 \text{ mg/m}^3$ pourrait fournir des propriétés thermiques, hydrauliques et mécaniques adéquates pour le dépôt proposé
 - Quelque temps après l'élimination des contenants de déchets, l'activité microbienne serait vraisemblablement éliminée de la zone entourant ces contenants (c'est-à-dire la partie de la zone tampon directement adjacente à ces derniers) en raison de la redistribution de l'humidité due aux températures élevées associées aux contenants

Essai isothermique (1)



- Objectif : Examiner l'absorption d'eau par le matériau de la zone tampon en l'absence de gradients thermiques
- Contexte des essais
 - Une couche de 2 m de matériau de la zone tampon a été placée au fond d'un trou de forage de 5 m de profondeur et d'un diamètre de 1,24 m surmonté d'un bouchon de béton de 1,25 m d'épaisseur visant à restreindre le matériau de la zone tampon
 - Des instruments des mêmes types que ceux ayant servi à l'essai visant la zone tampon et les contenants ont été installés dans le cadre de l'essai isothermique afin de surveiller l'absorption d'eau transitoire du matériau de la zone tampon



Essai isothermique (2)



➤ Principaux résultats

- Une bonne corrélation a été obtenue entre les données tirées des différents types d'instruments installés
- Les variations systématiques de la succion et de la teneur en humidité dans la zone tampon ont été surveillées
- La partie de la zone tampon située la plus près de la roche a présenté une succion moindre ou une teneur en humidité plus élevée que la partie centrale
- Les changements les plus importants sur le plan de la succion et de la teneur en humidité ont été observés dans la partie inférieure du puits d'essai en raison d'une plus grande disponibilité de l'humidité de la roche, tant sur le plan vertical qu'horizontal

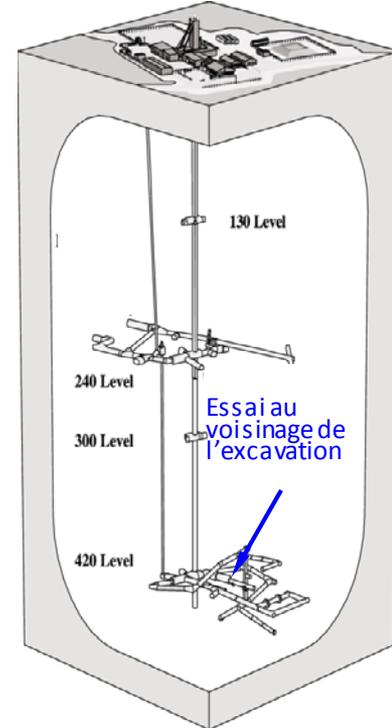
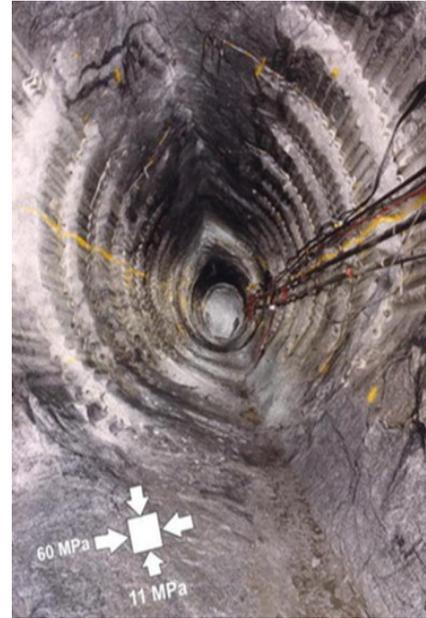
➤ Principaux points d'apprentissage : L'absorption d'eau par le matériau de la zone tampon est immédiate et le changement sur le plan de la succion totale au fil du temps se fait de manière graduelle et systématique

Essai au voisinage de l'excavation (1)



➤ Objectif

- Étudier la fissuration progressive et l'évolution des dommages causés par l'excavation autour d'un tunnel circulaire de 3,5 m de diamètre



Essai au voisinage de l'excavation (2)



Contexte des essais

- Atteignant le niveau le plus bas (420) du LRS, le tunnel expérimental 415 fait 46 m de long, a été construit parallèlement en dessous de σ_2 et a été excavé mécaniquement; le ratio de contraintes *in situ* dans le plan perpendiculaire au tunnel au voisinage de l'excavation dépassait 5 pour 1
- Les instruments utilisés incluaient des extensomètres et des réseaux de convergence pour mesurer la déformation, des cellules de contraintes triaxiales pour mesurer les contraintes et des thermistances pour mesurer la température ainsi que des appareils d'émission acoustique/de surveillance microsismique (EA/SM) pour surveiller l'évolution de la zone endommagée
- Plus de 500 canaux de données ont été surveillés au fil de l'excavation

Essai au voisinage de l'excavation (3)



➤ Principaux résultats

- L'amorce de fissures *in situ* s'est produite à environ 0,3 de la solidité en laboratoire dans des conditions non perturbées σ_c , et l'éclatement est d'abord survenu lorsque la contrainte tangentielle autour du tunnel a atteint 0,5 à 0,6 de σ_c
- Une fois la fissuration débutée près de la surface du tunnel, il s'est graduellement formé autour de celui-ci une fissuration en V semblable à celles observées lors de l'ovalisation de trous de forage
- La profondeur de la fissuration intense à la pointe de l'encoche était de moins de 30 cm
- Il n'y a eu pratiquement aucune fissuration au-delà du périmètre stable du tunnel à une distance de 50 cm de chaque côté de la pointe de l'encoche

Essai au voisinage de l'excavation (4)



- Principaux points d'apprentissage
 - L'orientation des principales contraintes par rapport à l'axe du tunnel peut avoir une incidence sur la trajectoire des dommages dus à l'excavation observés *in situ*
 - La solidité de la roche adjacente au tunnel d'essai est considérablement réduite même à des niveaux de dommages très faibles
 - Selon les observations des dommages et les résultats de l'EA/SM, la roche très concassée à la pointe de l'encoche et les fractures se formant dans les couches minces le long des flancs de l'encoche en V constitueraient les emplacements les plus susceptibles de contribuer au transport de contaminants

Essais de perméabilité des zones interreliées (1)



- Objectif : Évaluer les propriétés hydrauliques de la zone de roche endommagée dans le plancher de l'excavation au LRS
- Contexte des essais
 - Un essai a été réalisé dans un tunnel excavé au moyen d'une technique de forage-abattage au niveau 240, et un autre, au voisinage du tunnel excavé mécaniquement
 - Des essais de conduction hydraulique de l'écoulement d'eau ont été réalisés afin d'évaluer la connectivité des fractures

Essais de perméabilité des zones interreliées (2)



- Principaux résultats
 - Les dommages causés par les explosions sous le plancher de l'excavation étaient d'une profondeur de moins de 0,4 m et, en général, ne présentaient pas de lien d'une explosion à l'autre.
 - Les concentrations de contraintes autour du tunnel au voisinage de l'excavation mécanique présentaient une modeste zone de fracture reliée hydrauliquement qui aurait pu s'étendre sur toute la longueur de l'excavation. Le volume de cette zone endommagée représente environ 1 % du volume excavé total, mais sa conductivité hydraulique s'était accrue de 6 ou 7 ordres de grandeur.
- Principaux points d'apprentissage : Le circuit hydraulique pourrait être interrompu en installant une cloison présentant une faible perméabilité dans la zone de roche endommagée jusqu'à la roche intacte.

Essai par traceur de la zone endommagée par l'excavation (ZEE) (1)

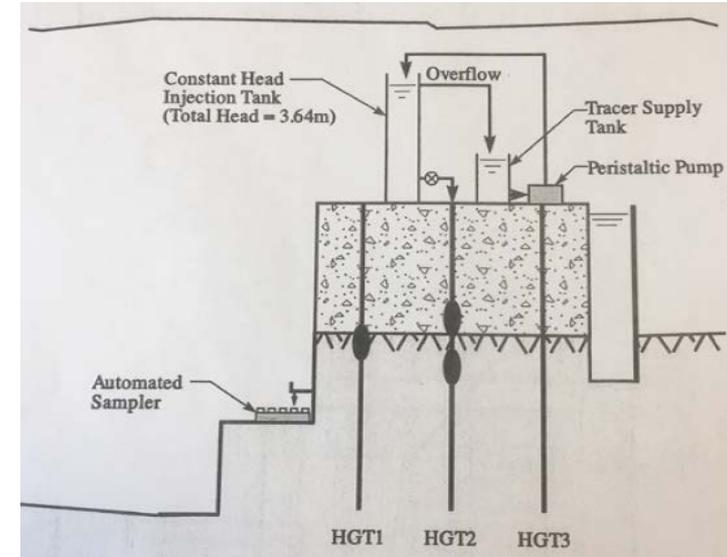


➤ Objectif

- Caractériser les propriétés physiques du transport de solutés (perméabilité, porosité durant le transport et dispersivité) de la ZEE du tunnel au voisinage de l'excavation

➤ Contexte des essais

- Un essai par injection d'une source continue/à charge constante a été réalisé à une échelle de 1,5 m dans une partie de la ZEE caractérisée précédemment à l'occasion de l'essai de perméabilité des zones interreliées





Essai par traceur de la ZEE (2)

➤ Principaux résultats

- Les mesures de la perméabilité dans l'ensemble de la ZEE correspondent à celles de l'essai de perméabilité des zones interreliées
- La conductivité hydraulique, la porosité durant le transport et la dispersivité ont été estimées à partir des résultats des essais

➤ Principaux points d'apprentissage

- La principale trajectoire d'écoulement dans la ZEE du plancher du tunnel se trouvait dans la zone très endommagée à la pointe de l'encoche d'ovalisation

Essais de défaillance due à la chaleur (1)



- Objectif : Examiner les effets des charges thermiques sur l'expansion des dommages dus à l'excavation dans la roche faiblement fracturée et fortement contrainte
- Contexte des essais
 - Les essais ont été réalisés dans une partie bien caractérisée du plancher du tunnel au voisinage de l'excavation (salle 415) au niveau 420
 - La roche entourant un trou de forage de 600 mm de diamètre a été chauffée jusqu'à environ 85 °C

Essais de défaillance due à la chaleur (2)



➤ Principaux résultats

- La roche s'est fissurée presque exactement à la limite de la solidité *in situ* de la roche non endommagée, selon des changements calculés sur le plan des contraintes dues aux charges thermiques
- L'ampleur radiale des ovalisations existantes n'a augmenté que de façon minime sous l'effet de la chaleur

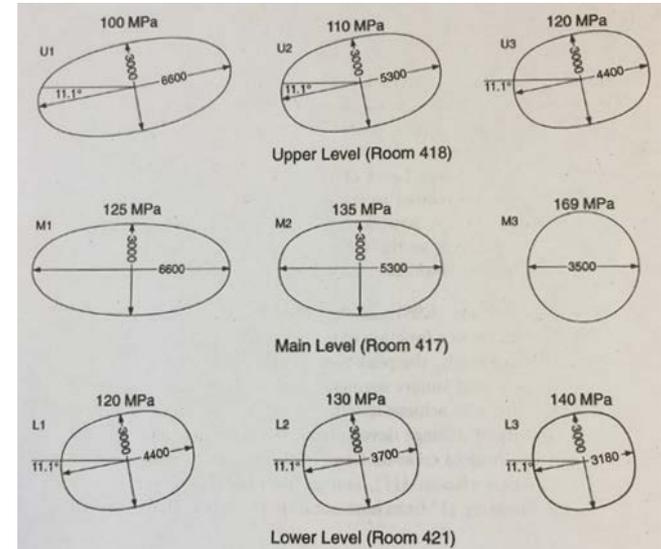
➤ Principaux points d'apprentissage

- La solidité de la roche sous l'effet de charges thermiques correspond aux observations de la solidité de la roche *in situ* dans le cadre de l'essai au voisinage de l'excavation
- La ZEE formée ne s'étendra pas sous l'effet du réchauffement de la roche dans un milieu exigu
- L'utilisation de scellant permettra de réduire la possibilité d'instabilité et empêchera la progression de la ZEE

Étude de la stabilité de l'excavation (1)



- Objectif : Évaluer la stabilité du tunnel et l'ampleur des dommages causés par l'excavation dans les tunnels en fonction de la géométrie et de l'orientation du tunnel, de la géologie et de la méthode d'excavation



Étude de la stabilité de l'excavation (2)



- Contexte des essais
 - Neuf ouvertures ovales ou circulaires ont été percées au niveau 420 afin de générer différentes concentrations de contraintes par compression au périmètre et distributions des contraintes dans la zone rapprochée
 - Chaque tronçon de tunnel a été excavé dans la direction de la contrainte principale modérée (c'est-à-dire, parallèlement au tunnel au voisinage de l'excavation et en dessous de celui-ci) au moyen d'explosions contrôlées et d'excavations mécaniques

Étude de la stabilité de l'excavation (3)

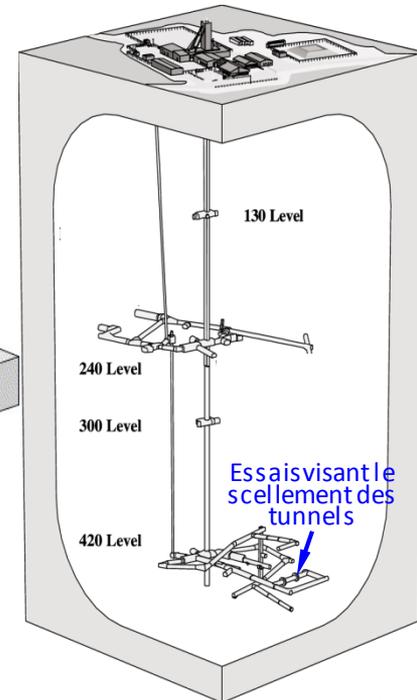
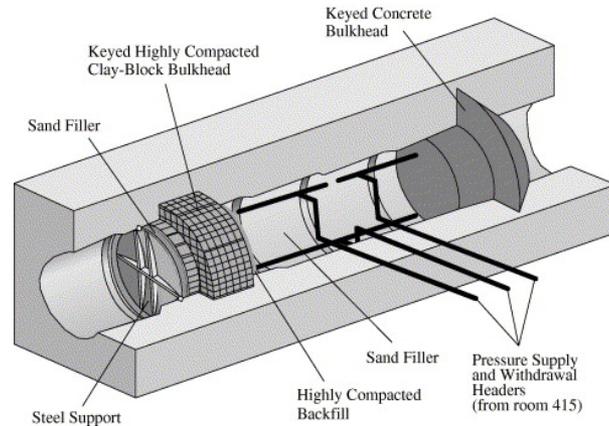


- Principaux résultats
 - Des ouvertures mécaniquement stables causant une ZEE minimale peuvent être excavées dans les pires conditions de contraintes au niveau 420 du LRS
 - La stabilité du tunnel dépend de sa forme, de la variation géologique et, dans une certaine mesure, de la méthode d'excavation
 - La profondeur observée des dommages visibles (c'est-à-dire, la ZEE) s'établissait entre 0 et 80 mm dans le plafond et les murs ainsi qu'à au plus 120 mm de profondeur dans le plancher
- Principaux points d'apprentissage : La conception géométrique des excavations pourrait constituer la façon la plus efficace de minimiser l'ampleur de la ZEE autour des tunnels dans la roche fortement contrainte et avoir une plus grande influence que le choix de la méthode d'excavation (c'est-à-dire, excavation mécanique ou forage et explosion)

Essais visant le scellement des tunnels (1)



- Objectif : Éprouver des technologies visant la construction de cloisons en bentonite et en béton, évaluer le rendement de chaque cloison et cerner les facteurs ayant une influence sur le rendement



Essais visant le scellement des tunnels (2)



➤ Contexte des essais

- L'une des cloisons était faite de béton de haute performance et l'autre, de sable et de bentonite fortement comprimés
- La pièce entre les deux cloisons a été pressurisée à environ 4 MPa, représentant la pression ambiante de l'eau interstitielle de la roche à une profondeur de 420 m
- On a surveillé l'infiltration par l'intermédiaire et autour de chaque cloison, les changements sur le plan de la pression de l'eau interstitielle et de l'orientation de l'écoulement dans la roche intacte ainsi que les contraintes et les déformations de chaque cloison
- À la deuxième étape des essais, l'eau se trouvant dans la pièce entre les deux cloisons a été chauffée à environ 85 °C, et les effets de la hausse de la température sur les divers éléments des systèmes de scellement ont été examinés

Essais visant le scellement des tunnels (3)



➤ Principaux résultats

- L'évolution de la ZEE a été freinée en appliquant une pression de confinement, soit en injectant un matériau, soit par pression hydraulique
- Les joints installés permettent d'éliminer ou de réduire l'écoulement dans la ZEE et les circuits primaires où se rencontrent le béton et l'argile projeté
- La charge thermique appliquée dans la cloison d'argile n'a pas eu d'influence sur le débit d'écoulement
- Le réchauffement n'a pas causé l'expansion du béton qui bloquait l'ouverture et réduisait le débit d'écoulement
- La cloison d'argile a démontré sa capacité de régénération et d'adaptation aux déformations différentielles
- La cloison de béton a été en mesure de tolérer la charge imposée par la pression hydraulique tout en présentant une déformation minimale

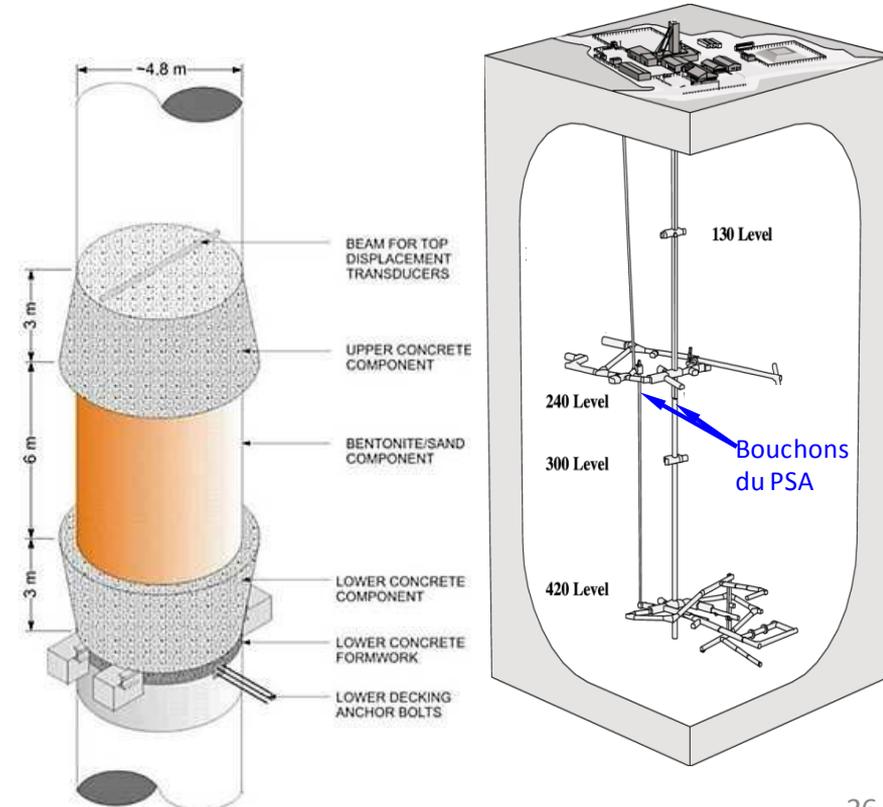
➤ Principaux points d'apprentissage

- Il est possible de construire des cloisons fonctionnelles en argile et en béton afin de sceller les tunnels et de restreindre l'écoulement axial, même sous l'effet de gradients hydrauliques élevés

Projet de scellement amélioré (PSA) (1)



- Objectif : Évaluer la capacité de fabriquer un joint pour le puits à l'emplacement d'une fracture contenant de l'eau, surveiller l'absorption d'eau par la composante d'argile bentonitique, surveiller l'évolution des contraintes dans le joint et autour de celui-ci et évaluer la capacité du joint de restreindre l'écoulement de l'eau



Projet de scellement amélioré (PSA) (2)



➤ Contexte des essais

- Le joint est situé à une profondeur d'environ 275 m, où le puits principal et le puits de ventilation montant croisent l'ancienne faille de chevauchement aquifère dont l'angle est peu prononcé
- Cent capteurs ont été installés dans le bouchon du puits principal de 4,8 m sur 6 m
- Des capteurs de surveillance à long terme étaient liés à des terminaux de collecte de données situés environ 300 m plus haut
- Le déclassement du LRS a été achevé en 2010, mais on continue de surveiller un joint de puits à pleine échelle dans le cadre du PSA entrepris en 2009

Projet de scellement amélioré (PSA) (3)



- Principaux résultats/observations
 - Les puits continuent de se remplir, et l'équilibre n'a pas encore été atteint
 - Le dernier 0,5 m du remplissage en argile était saturé au milieu de 2014
 - L'échantillon a été considérablement humidifié en 2015 et 2016
 - La pression enregistrée à divers endroits du joint en argile présente une différence considérable, ce qui témoigne de son efficacité (très faible perméabilité)
 - Le joint de béton et de bentonite du PSA résiste à l'écoulement de l'eau entre la partie supérieure et la partie inférieure du puits
- Principaux points d'apprentissage
 - La surveillance des installations souterraines à grande distance est difficile et peut être très coûteuse



Canadian Nuclear
Safety Commission

Commission canadienne
de sûreté nucléaire

Des questions?

Merci!

Canada

Participez et contribuez!



CANADA 150



Consultez notre site Web



Suivez-nous sur Facebook



Suivez-nous sur Twitter



Regardez notre chaîne YouTube



Abonnez-vous aux mises à jour



Communiquez avec nous