

## LE PROJET DECOVALEX : COUPLAGE THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE ET ÉVACUATION DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE USÉ

T. S. Nguyen, Commission Canadienne de la Sûreté Nucléaire (CCSN), Ottawa, Canada  
Tin Chan, Énergie Atomique du Canada Ltée (EACL), Laboratoires Whiteshell, Pinawa, Manitoba, Canada  
Mark R. Jensen, Ontario Power Generation (OPG), Toronto, Ontario, Canada

### ABSTRACT

The DECOVALEX project is an international cooperative research project to assess the effects of Thermal-Hydro-Mechanical coupling on the performance of geological repositories for nuclear fuel wastes. This paper summarizes the Canadian contributions to DECOVALEX.

### RÉSUMÉ

Le projet DECOVALEX est un projet international de collaboration scientifique pour évaluer l'effet du couplage Thermo-Hydro-Mécanique sur la performance de systèmes géologiques d'évacuation du combustible nucléaire usé. Cet article résume la contribution canadienne au projet DECOVALEX.

#### 1. INTRODUCTION – DESCRIPTION DU CONCEPT CANADIEN DE L'ÉVACUATION GÉOLOGIQUE DU COMBUSTIBLE USÉ

Le Canada, comme d'autres pays utilisant l'énergie nucléaire pour la production d'électricité, considère l'évacuation dans une formation géologique profonde comme une des options de gestion à long terme du combustible usé. Selon cette option, l'eau souterraine devrait être l'agent principal du transport de contaminants radiologiques à partir du combustible jusqu'à la biosphère. L'évacuation en profondeur se fie sur le principe des barrières multiples pour contrer cette migration : la barrière naturelle qui est la roche, et les barrières artificielles que constituent les conteneurs et les remblais à base de bentonite qui entourent ces conteneurs.

En particulier, le concept canadien (McMurry et al. 2003) considère qu'un massif granitique du Bouclier Canadien serait l'endroit le plus favorable pour une installation d'évacuation du combustible usé. Le dépôt de combustible usé serait construit à une profondeur se situant entre 500 et 1000 m, et consisterait en un réseau de galeries d'emplacement occupant une aire de 2 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Présentement, plusieurs configurations géométriques sont envisagées pour les galeries (Fig. 2).

Pour assurer la protection du public et de l'environnement, le système se fie sur des barrières multiples :

1. Le conteneur. Les réacteurs CANDU au Canada utilisent comme combustible des pastilles de bioxyde d'uranium. Ces pastilles sont placées à l'intérieur de gaines soudées ensemble pour former une grappe de combustible. Les grappes de combustible usé sont retirées du cœur du réacteur et stockées et isolées à l'intérieur des centrales nucléaires. Selon le concept d'évacuation géologique, ces grappes seraient éventuellement placées dans des conteneurs spéciaux. Le type de conteneur présentement étudié est de conception similaire aux

conteneurs suédois ou finlandais. Le conteneur renfermerait 324 grappes de combustible usé. La paroi extérieure en cuivre de 25-30 mm d'épaisseur fournit une barrière contre la corrosion. La paroi interne en acier de 80-100 mm fournit une résistance mécanique contre une pression externe de 15 MPa en situation normale, due à la pression hydrostatique et à la pression de gonflement du matériau tampon, en plus d'une pression supplémentaire de 30 MPa provenant d'une calotte glaciaire qui couvrirait dans le futur le Canada d'ici 50 000 à 100 000 ans.

2. Le matériau tampon. Le matériau tampon est une matière argileuse, obtenue soit en utilisant de la bentonite pure, soit en mélangeant de la bentonite avec du sable. Le matériau tampon entoure le conteneur et a une perméabilité très petite. Il est placé dans un état non saturé. Le minéral responsable de la propriété de gonflement à la saturation de la bentonite est la montmorillonite. Lors de la saturation, le volume de la bentonite augmente de plusieurs fois si elle n'est pas confinée. Dans des conditions de confinement, une pression de gonflement se développe. Les fonctions principales du matériau tampon sont donc : de limiter la vitesse de corrosion du conteneur en retardant la re-saturation par l'eau souterraine et en modifiant sa composition chimique; de dissiper la chaleur radiogénique du conteneur par conduction thermique; de garder le conteneur en place; de fournir un tampon mécanique entre le conteneur et la roche; et de réduire le potentiel d'activité bactérienne. Normalement, la corrosion du conteneur devrait prendre des milliers d'années. Les radionucléides commenceraient seulement à s'échapper à ce moment là. Le matériau tampon, avec sa faible perméabilité et sa capacité élevée d'adsorption retarderait le mouvement des contaminants.

3. La géosphère. La géosphère est une masse rocheuse du Bouclier Canadien. Ce dernier est formé de grandes unités de roche ignée appelée pluton, qui se sont cristallisées il y a plus de deux milliards d'années. Les rôles de la géosphères sont de : protéger le dépôt souterrain contre les événements naturels (séismes, glaciation) et l'intrusion humaine; et de limiter le transport des contaminants et radionucléides vers la biosphère. Le relief topographique du Bouclier Canadien est très faible, résultant en un gradient hydraulique moyen de l'ordre de 0.1%. La perméabilité de la masse rocheuse dépend de la profondeur. Le degré de fracturation diminue avec la profondeur; à plus de 500 m, les fractures sont rares, et la masse rocheuse a une perméabilité de l'ordre de  $10^{-18}$  à  $10^{-21}$  m<sup>2</sup>. A plus de 500 m, l'eau souterraine qu'on trouve est stagnante et son âge est de l'ordre de millions d'années. Cette eau a eu très peu d'échange avec l'eau de surface.

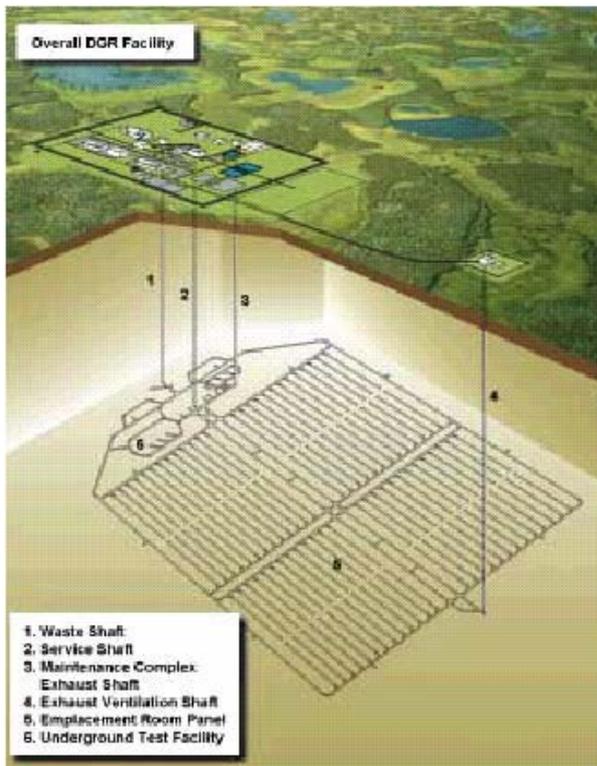


Figure 1. Configuration d'un dépôt géologique de gestion du combustible usé (d'après McMurry et al. 2003)

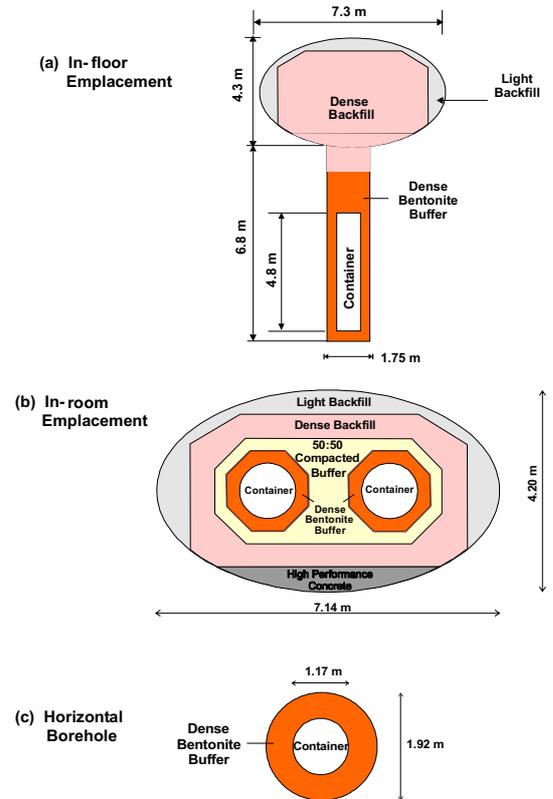


Figure 2. Configuration géométrique des galeries d'emplacement (d'après McMurry et al. 2003)

En se fiant sur les opinions des experts, l'étude des analogies naturelles et la modélisation mathématique, Murray et al. (2003) considèrent que pour une période allant jusqu'à 10 000 ans, il serait peu probable qu'il y ait une fuite de contaminant à travers les barrières naturelles et artificielles du système. Cependant, à cause des perturbations dues à l'excavation des galeries et à la génération thermique du combustible utilisé, le système devrait évoluer selon le scénario suivant :

1. 0 à 100 ans : Pendant les 30 premières années, 11 000 conteneurs seraient progressivement placés dans les galeries qui seraient remblayées au fur et à mesure. Pendant les prochaines 70 années, les galeries seraient gardées accessibles pour la surveillance. La charge thermique initiale de 13 MW décroîtrait par un facteur de 4 au bout de cent ans, et la radioactivité par un facteur de 10. La température maximale devrait être inférieure à 100 °C à la surface extérieure des conteneurs. Le matériau tampon se saturerait de nouveau à l'interface de la roche. À côté du conteneur il se dessècherait et pourrait se fissurer. À cause de l'excavation et des effets thermiques, des microfissures pourraient se former et se propager dans la roche adjacente aux galeries,

résultant en une modification de la perméabilité et des propriétés mécaniques.

2. 100 à 1000 ans : Au début de cette période, toutes les galeries et puits d'accès seraient fermés et colmatés et des gradients thermiques et hydrauliques élevés existeraient entre les différentes composantes du système. À 1000 ans, la radioactivité décroîtrait d'un facteur additionnel de 30, et la charge thermique diminuerait à 1.3 MW. Les remblais, matériau de colmatage, matériau tampon seraient complètement saturés à la fin de cette période. La bentonite au retour de la saturation exercerait une pression de gonflement qui s'ajouterait à la pression hydrostatique sur les conteneurs
3. 1000 à 10 000 ans : Un état d'équilibre s'établirait graduellement entre les différentes composantes du système.
4. Après 10 000 ans : des phénomènes géologiques comme une future époque glaciaire pourraient perturber le régime THM du système.

## 2. DECOVALEX

Les phénomènes thermiques, hydrauliques et mécaniques (THM) qui sont cités dans le scénario précédent sont couplés. Pour améliorer nos connaissances de ce couplage THM, un projet de recherche impliquant une douzaine d'équipes provenant de différents pays a été lancé en 1992 par SKI, l'agence suédoise de la réglementation nucléaire. La stratégie adoptée est la suivante :

1. Développer des modèles mathématiques pour simuler le couplage THM en relation avec les concepts d'évacuation géologique du combustible usé
2. Valider ces modèles en les utilisant dans la prédiction d'essais à grande échelle conduits dans différents laboratoires souterrains.
3. Utiliser ces modèles pour simuler des systèmes d'évacuation hypothétiques et évaluer la sûreté et la performance à long terme (milliers d'années) de ces systèmes.

Le projet DECOVALEX (Jing et al. 2004) a terminé sa troisième phase en Octobre 2003 et a commencé une quatrième phase en Mars 2004. Les équipes canadiennes de la CCSN, d'ÉACL et OPG ont participé et participent encore à toutes les phases du projet. Les modèles mathématiques développés par les équipes canadiennes sont intégrés dans deux logiciels majeurs, MOTIF (Guvanasen et Chan, 2000; Chan et al. 2003-b) et FRACON (Nguyen, et al. 2003-a). Ces logiciels ont été utilisés dans les simulations suivantes :

1. Calculs exploratoires du comportement THM du champ proche avec fractures multiples (Chan et al. 1995)
2. Effets de la glaciation sur un dépôt hypothétique (Selvadurai and Nguyen, 1995 ; Chan et al. 2003a; Boulton et al. 2003)

3. Validation de logiciel sur un essai en laboratoire du comportement hydromécanique d'un joint rocheux (Makurat et al. 1995).
4. Relations constitutives des joints rocheux (Onishi et al. 1996; Nguyen et Selvadurai, 1998).
5. Effets du couplage THM sur le régime hydraulique et mécanique d'un dépôt hypothétique (Selvadurai et Nguyen, 1996)
6. Calibration d'un essai de pompage dans une fracture horizontale (Rutqvist et al. 1996)
7. Prédiction d'un essai THM à la mine de Kamaishi au Japon (Nguyen et al. 2001, Borgesson et al. 2001, Rutqvist et al. 2001)
8. Prédiction de l'essai THM de la galerie FEBEX, à Grimsel en Suisse (Nguyen et al. 2003a, b)
9. Calculs exploratoires pour déterminer l'influence du couplage THM sur la performance et la sûreté d'un dépôt hypothétique (Nguyen et al. 2003; Millard et al. 2003; Rutqvist et al. 2003).
10. Homogénéisation des propriétés THM de masses rocheuses fracturées (Guvanasen et Chan, 2003)

## 3. MODÈLES MATHÉMATIQUES DU COUPLAGE THM

Les modèles mathématiques implantés dans les logiciels MOTIF et FRACON sont formulés dans le cadre théorique de la poro-élasticité de Biot (1941). Cette théorie a été généralisée par l'inclusion des effets thermiques, et en plus, dans le cas du logiciel FRACON, par l'inclusion du comportement hydraulique et mécanique du matériau non saturé. Pour fins d'illustration, nous présentons ici les équations du modèle mathématique de FRACON qui sont décrites en détail par Nguyen et al. (2003-a). Les équations du logiciel MOTIF sont similaires, avec quelques variantes (Guvanasen et Chan, 2000). Les équations du modèle implémenté dans FRACON ont pour inconnues primaires la température (T), le vecteur des déplacements du squelette poreux ( $u_i$ ), et la pression interstitielle p :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\rho_f k_{ij} K_r}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_f g_j \right) \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ & + \rho_f \left[ \frac{-nS}{K_f} + G_s(1-n) \frac{dw}{dp} + S \left( S - \frac{G_s w}{n} \right) \frac{n-\alpha}{K_s} \right] \frac{\partial p}{\partial t} \\ & + \rho_f (S\alpha) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \rho_f S \left( (1-\alpha)\beta - n\beta_f - (1-n)\beta_s \right) \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (G + \lambda) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \alpha S \frac{\partial dp}{\partial x_i} - \beta K_D \frac{\partial dT}{\partial x_i} + dF_i = 0 \quad (3)$$

L'équation (1) exprime la conservation de l'énergie. On a fait l'hypothèse que la conduction thermique est le seul mécanisme de transfert de chaleur. En effet dans un milieu peu perméable comme le granite ou la bentonite, le transfert de chaleur par convection est négligeable (Selvadurai et Nguyen, 1996). Dans l'équation (1),  $\kappa_{ij}$  est le tenseur de conductivité thermique ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ),  $\rho$  est la densité du milieu poreux ( $kg/m^3$ ),  $C$  est la chaleur spécifique de ce milieu ( $J/kg/^\circ C$ ) et  $q$  représente toute source thermique par unité de volume présente dans le milieu ( $W/m^3$ ).

L'équation (2) exprime l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux partiellement saturé et a été dérivée en utilisant le principe de la conservation de masse :

1. Le premier terme de l'équation découle de la loi généralisée de Darcy.  $k_{ij}$  est le tenseur de perméabilité saturée ( $m^2$ );  $K_r$  ( adimensionnel) est la perméabilité relative du milieu lorsqu'il est non saturé et est fonction du degré de saturation  $S$  (Pour  $S=1$ ,  $K_r=1$ );  $\mu$  ( $kg/m/s$ ) est la viscosité et  $\rho_w$  est la densité de l'eau, toutes deux étant fonctions de la température.
2. Le second terme représente la diffusion de la vapeur d'eau par gradient thermique.  $D_T$  ( $m^2/s$ ) est le coefficient de diffusion de vapeur par gradient thermique.
3. Le troisième terme représente l'emmagasinement dû à l'état non saturé du milieu.  $w$  est la teneur en eau,  $n$  est la porosité et  $G_s$  est la densité spécifique des solides.
4. Le quatrième terme représente l'emmagasinement dû à la compressibilité de l'eau et du matériau solide.  $1/K_w$  est le coefficient de compressibilité de l'eau ( $Pa^{-1}$ ) et  $1/K_s$  est celui du matériau solide ( $Pa^{-1}$ )
5. Le cinquième terme représente l'emmagasinement dû à la consolidation du squelette.
6. Le sixième terme représente l'écoulement d'eau sous l'influence de la dilatation thermique.  $\beta_w$  et  $\beta_s$  ( $1/^\circ C$ ) sont respectivement les coefficients de dilatation thermiques de l'eau et du solide. Comme le premier est plus grand que le dernier, il se produit une surpression de l'eau interstitielle dans les zones à plus haute température, qui résulte en un gradient hydraulique des zones plus chaudes vers les zones plus froides

L'équation (3) est l'équation d'équilibre du milieu poreux. Cette équation est écrite sous forme incrémentielle afin de pouvoir simuler la non-linéarité prononcée du comportement mécanique de la bentonite non saturée.  $G$  ( $Pa$ ) et  $\lambda$  ( $Pa$ ) sont les constantes de Lamé et  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique du squelette.  $\alpha$  est le coefficient de Biot. Les coefficients de Lamé et le coefficient de Biot peuvent être exprimés en fonction de la succion et de l'indice des vides en utilisant la surface d'état qui caractérise un milieu non saturé (Nguyen, et al. 2003-a).

#### 4. MODÉLISATION DE L'ESSAI FEBEX À GRIMSEL (SUISSE)

Pour répliquer le comportement THM du matériau tampon et de la roche au voisinage des conteneurs, un essai à échelle réelle a été effectué au laboratoire souterrain de Grimsel en Suisse. Une galerie horizontale de 70.4 m de long, de section circulaire de 2.28 m de diamètre a été creusée à 450 m de profondeur dans un massif granitique. À l'extrémité de la galerie, on a inséré deux cylindres chauffants à l'intérieur de blocs de bentonite préfabriqués. L'assemblage cylindres-bentonite forme une section de 17.4 m isolée du reste de la galerie par un bouchon de béton (Fig. 3). La bentonite et les cylindres ont été installés entre le 1<sup>er</sup> juillet et le 15 octobre 1996. Le chauffage des cylindres a débuté le 27 février, 1997 et comprend trois phases différentes :

1. Une phase d'une durée de 20 jours à puissance constante de 1200 W par cylindre.
2. Une phase d'une durée de 33 jours à puissance constante de 2000 W par cylindre.
3. Une phase finale où la température à la surface des cylindres est contrôlée à une valeur de 95-100  $^\circ C$ .

Nguyen et al. (2003-b) ont prédit les résultats de l'essai FEBEX avec le logiciel FRACON en faisant une analyse transitoire qui reproduit toutes les phases de l'essai. Nous rapportons ici les résultats principaux et comparons les prédictions aux résultats expérimentaux.

L'humidité relative est fonction de la succion et de la température et est définie par l'équation de Kelvin. L'évolution de l'humidité relative est montrée à la figure 4 pour trois points situés radialement par rapport à un cylindre chauffant. Le temps  $t=0$  correspond au temps où le chauffage est amorcé. Le point E1G près de la roche se sature presque complètement en une période de 100 jours. Le point E1H à côté du cylindre se dessèche à cause du gradient thermique qui entraîne la vapeur vers l'extérieur par diffusion. Cet assèchement persiste jusqu'à 1000 jours et semble continuer au-delà de cette période. Au point E1C, jusqu'à  $t=20$  jours, l'humidité relative augmente à cause de la condensation de la vapeur provenant des zones adjacentes du cylindre. On observe ensuite une diminution de l'humidité relative, due au gradient thermique qui, ayant atteint ce point, amorce le processus d'assèchement. A un temps approximatif de  $t=100$  jours, l'humidité relative augmente de nouveau, à cause du front de saturation provenant de la roche. La concordance entre les prédictions et les résultats expérimentaux est très bonne comme on peut le constater à la figure 4.

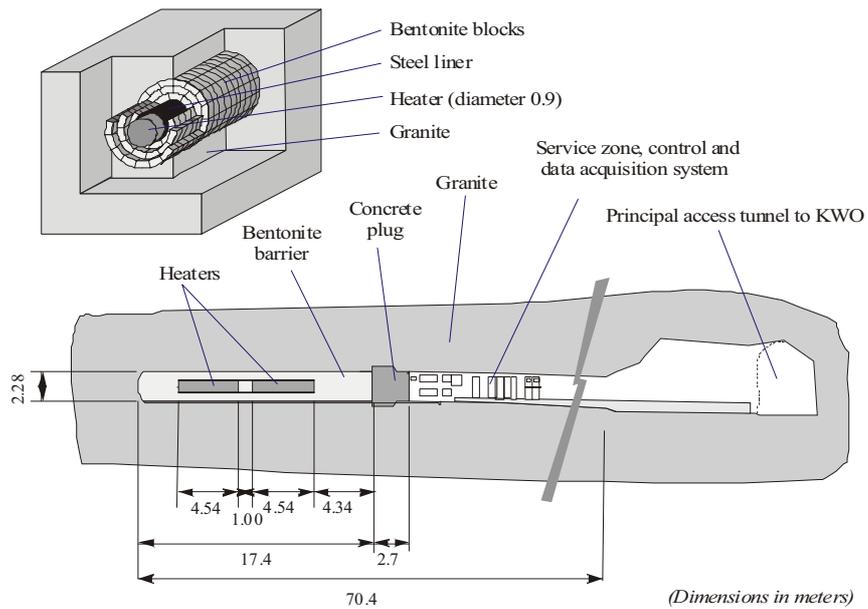


Figure 3 L'essai THM FEBEX à Grimsel (Suisse)

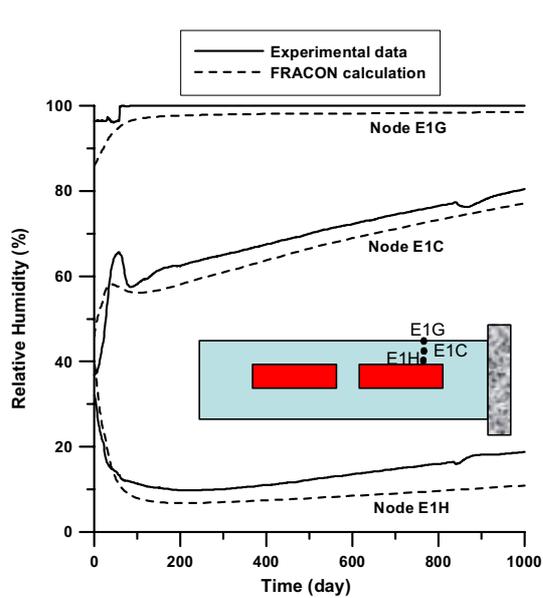


Figure 4. Évolution de l'humidité relative

La distribution de température ainsi que son évolution sont adéquatement prédites par le modèle, avec une sous-estimation de quelques degrés (C) dû aux contraintes numériques.

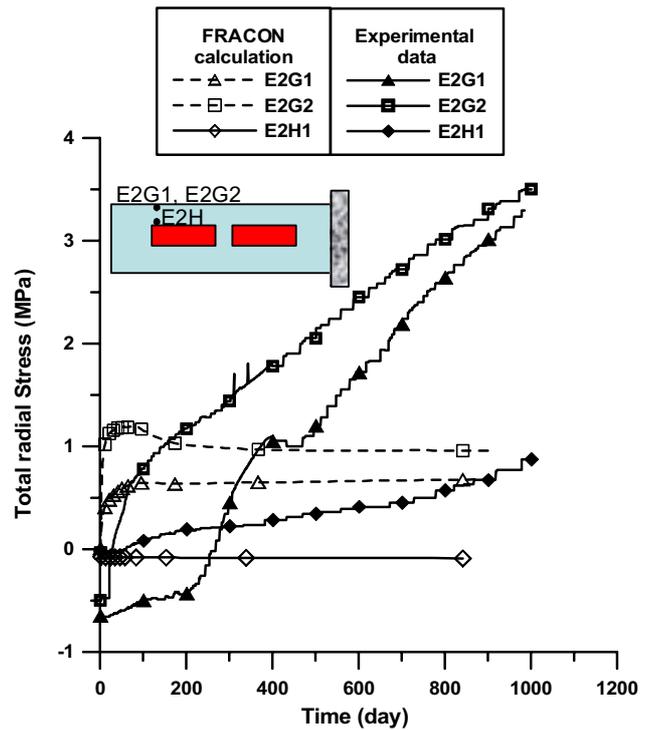


Figure 5. Evolution des contraintes radiales

L'évolution des contraintes totales aux points E2G1 et E2G2 (à côté de la roche) et au point E2H1 (à côté d'un cylindre) est montrée à la figure 5. Le modèle prédit une contrainte de l'ordre de 1.4 MPa à côté de la roche qui est due à la tendance de gonflement de la bentonite lors du retour de la saturation. Le plateau de cette valeur est

atteint très rapidement selon le modèle. Les résultats expérimentaux démontrent que ces contraintes augmentent toujours, même à 1000 jours. Ceci provient sans doute de la suppression de l'eau interstitielle dans la roche due à l'effet thermique (6<sup>e</sup> terme de l'équation 2). Dans le modèle conceptuel courant, on a imposé une pression constante nulle dans la roche, donc on a pas tenu compte de cet effet.

## 5. EFFETS DE LA GLACIATION SUR UNE FORMATION GRANITIQUE

L'Hémisphère Nord, aux latitudes élevées et moyennes, a subi de nombreux cycles de glaciation-déglaciation dans son histoire géologique. Il est probable que dans 50 000 à 100 000 ans une autre période de glaciation se reproduise. Dans le cadre du projet DECOVALEX, l'exercice appelé BMT3 consiste à déterminer par modélisation numérique l'effet d'un futur cycle de glaciation-déglaciation sur la performance d'un dépôt géologique de combustible usé. Quoique cet exercice soit de nature générique, on a utilisé les caractéristiques géologiques simplifiées du Site de Recherche de Whiteshell (Whiteshell Research Area – WRA) au Manitoba afin de donner plus de réalisme dans les simulations. Le WRA est situé sur la frontière Ouest du Bouclier Canadien.

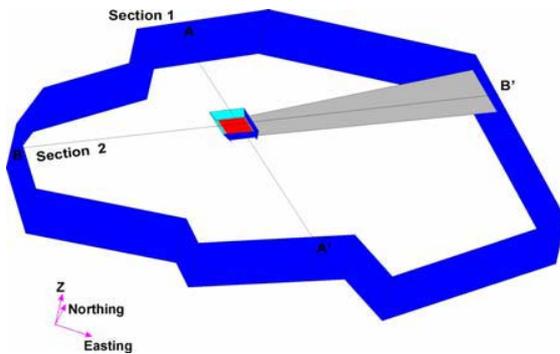


Figure 6. Le système de failles du WRA. Au milieu se trouve le dépôt hypothétique

Le modèle conceptuel est basé sur une représentation tridimensionnelle du WRA et occupe un volume approximatif de 37km x 25km x 4km (profondeur). Le relief topographique est peu accentué, avec des élévations variant entre 255 et 290 m. La masse rocheuse a un degré de fracturation variable avec la profondeur. On l'a représentée comme un milieu poreux stratifié, avec une perméabilité décroissante de  $10^{-13} \text{ m}^2$  à la surface jusqu'à  $10^{-20} \text{ m}^2$  à une profondeur de 500 m où le dépôt est situé. Un système de failles interconnectées coupe la masse rocheuse telle que montré à la Figure 6. Le poids

de la calotte glaciaire imposerait une pression pouvant atteindre 30 MPa sur la surface du massif rocheux. De plus, la calotte modifie profondément les conditions hydrauliques à cette surface. Chan et al. (2003a) ont utilisé les conditions transitoires hydro-mécaniques (HM) aux frontières dictées par le modèle de la calotte glaciaire de Boulton et al. (2003) pour calculer avec le logiciel MOTIF la réponse HM du massif rocheux.

Les résultats de la modélisation indiquent les effets suivants dus à la glaciation :

- La réponse hydraulique du système est profondément influencée par la géométrie, la connectivité et la perméabilité du système de failles.
- Lors de la glaciation, le couplage HM résulte en une augmentation immédiate de la charge hydraulique dans la roche de moindre perméabilité et de moindre capacité d'emmagasinement. Cette pression est équivalente au tiers de la pression exercée par la calotte glaciaire.
- Des charges hydrauliques élevées sont transmises rapidement en dessous de la calotte le long des failles jusqu'à une profondeur de 500m. Durant l'avancée de la calotte en surface, les valeurs de la charge hydraulique peuvent atteindre des valeurs de 400-500 m de plus par rapport à celles dans la roche peu perméable ou autour du dépôt (Figure 7).
- Des gradients hydrauliques très élevés (jusqu'à une valeur de 10) orientés vers le bas se développe à la profondeur du dépôt pendant l'avance de la calotte. Lors de la déglaciation, la direction de ces gradients est inversée.
- La réponse hydraulique du système due à la glaciation est nettement plus importante que celle due au gradient gravitationnel dicté par la topographie.
- L'eau de surface s'infiltré à plus grande profondeur lors de la glaciation. Cependant cette infiltration ne va pas jusqu'à 500 m.
- À la profondeur du dépôt, les pressions interstitielles résiduelles subsistent des dizaines de milliers d'années après la disparition de la calotte à cause de la faible diffusion hydraulique de la roche (Figure 8). Ce phénomène est confirmé par les observations faites aux puits de reconnaissance du WRA.
- Le poids de la calotte résulte en une augmentation de la contrainte totale mais aussi de la pression interstitielle. Par conséquent, les contraintes effectives ne changent pas beaucoup. Les contraintes effectives principales mineures dans la faille horizontale de la Figure 7 sont en compression et de l'ordre de quelques MPa. Ni le claquage hydraulique ni le glissement par cisaillement ne sont prévus pour cette faille.
- Les effets thermiques et la salinité devront être considérés dans le futur

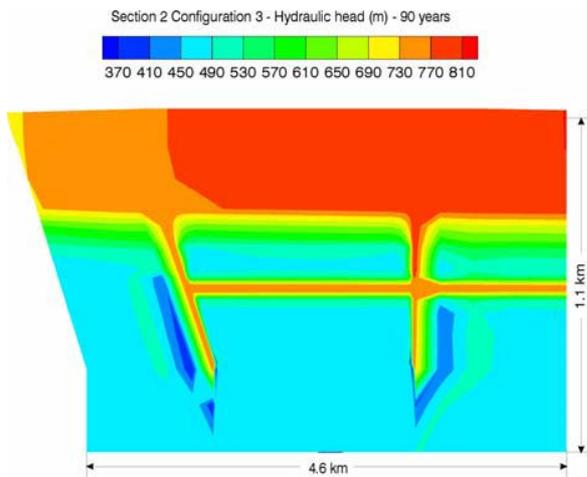


Figure 7. Contours des charges hydrauliques prédites par MOTIF 90 ans après le commencement de la glaciation.

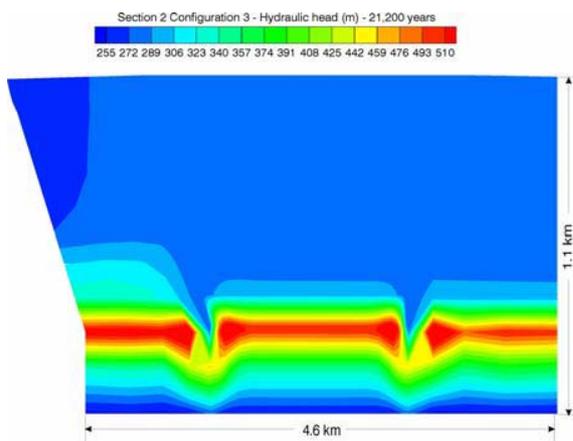


Figure 8. Contours des charges hydrauliques prédites par MOTIF 9500 ans après la déglaciation

## 6. CONCLUSIONS

L'évacuation géologique est une des options considérée dans de nombreux pays comme le Canada, pour la gestion à long terme du combustible irradié. Les barrières multiples du système de gestion du combustible irradié devraient assurer la protection de l'environnement et du public pour des dizaines voire des centaines de milliers d'années, jusqu'à ce que la radioactivité se réduise à des niveaux inoffensifs. Le projet DECOVALEX est un projet de collaboration scientifique entre une douzaine de pays pour développer, valider et mettre en application des modèles mathématiques du couplage THM. Ce phénomène est susceptible d'influencer l'évolution et potentiellement l'efficacité des barrières. La contribution canadienne au projet pendant les douze dernières années

a apporté une amélioration substantielle dans la compréhension du couplage THM dans les milieux géologiques. Les retombées scientifiques secondaires portent sur des domaines comme la mécanique des sols non saturés, la mécanique des roches et des joints rocheux et les méthodes numériques, résultant en un nombre important de publications dans les revues scientifiques et comptes-rendus de congrès spécialisés dans ces domaines.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la CCSN, OPG et l'EACL pour leur contribution financière, et les co-participants au projet DECOVALEX pour leur collaboration. Les opinions exprimées dans cette communication ne reflètent pas nécessairement celles de la CCSN, OPG ou de l'EACL.

## RÉFÉRENCES

- Borgesson, L., Chijimatsu, M., Fujita, T., Nguyen, T.S., Rutqvist, J. and L. Jing, 2001. Thermo-hydro-mechanical characterisation of a bentonite-based buffer material by laboratory tests and numerical back analyses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38(1): pp 95-104.
- Boulton, G., T. Chan, R. Christiansson, L. Ericsson, J. Hartikainen, M. R. Jensen, F. W. Stanchell and T. Wallroth. 2003. Thermo-Hydro-Mechanical (T-H-M) Impacts Of Glaciation And Implications For Deep Geologic Disposal Of Nuclear Waste. In *Proceedings, GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications*, p. 289-294, KTH Press, Stockholm, Sweden, 2003 October.
- Chan, T., K. Khair, L. Jing, M. Ahola, J. Noorishad and E. Vuillod. 1995. International comparison of coupled thermo-hydro-mechanical models of a multiple-fracture benchmark problem: DECOVALEX Phase I, bench mark test 2. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 32(5): pp 435-452.
- Chan, T., F.W. Stanchell, T. Wallroth, J. Hernelind and J. Boulton. 2003-a. A Finite-Element Study of Potential Coupled Hydrochemical Effects of Glaciation on a Crystalline Rock Mass. In *Proceedings, GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications*, p. 277-282, KTH, Stockholm, Sweden, 2003 October.
- Chan, T., V. Guvanasen and F.W. Stanchell. 2003-b. Verification and Validation of a Three-Dimensional Finite-Element Code for Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Salinity (T-H-M-C) Modelling in Fractured Rock Mass. *Proc. GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications*, p. 447-452, KTH, Stockholm, Sweden.
- Guvanasen, V. and T. Chan. 2000. A Three-Dimensional Numerical Model for Thermo-hydro-mechanical Deformation with Hysteresis in a Fractured Rock

- Mass. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37: pp 89-106
- Guvanasen, V. and T. Chan. 2003. Upscaling the Thermohydrromechanical Properties of a Fractured Rock Mass Using a Modified Crack Tensor Theory. Proc. GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications, p. 239-244, KTH Press, Stockholm, Sweden.
- Jing, L., Tsang C.F. and O. Stephansson (eds.), 2004. DECOVALEX III, mathematical models of coupled THM processes for Nuclear waste repositories, Executive summary, rapport du SKI (sous presse), SE-106 58 Stockholm, Suède.
- Makurat, A., M. Ahola, K. Khair, J. Noorishad, L. Rosengren and J. Rutqvist. 1995. The DECOVALEX test case one. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 32(5): pp 399-408.
- Millard, A., Rejeb, A., Chijimatsu, M., Jing, L., De Jonge, J., Kohlmeier, M., Nguyen, T.S., Rutqvist, J., Souley, M and Sugita, Y. 2003. Evaluation of THM coupling on the safety assessment of a nuclear fuel waste repository in a homogeneous hard rock. Proc. GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications, p. 447-452, KTH, Stockholm, Sweden.
- McMurry, J., D.A. Dixon, J.D. Garroni, B.M. Ikeda, S. Stroes-Gascoyne, P. Baumgartner and T.W. Melnyk (2003). EVOLUTION OF A CANADIAN DEEP GEOLOGIC REPOSITORY: BASE SCENATIO. OPG report 06819-REP-01200-10092-R00, OPG, NWMD, 700 University Avenues, Toronto, Ont. Canada M5G 1X6.
- Nguyen, T.S. and Selvadurai, A.P.S. 1998. A model for coupled mechanical and hydraulic behaviour of a rock joint. Int. J. Num. An. Meth. Geomechanics, 22; pp 29-48.
- Nguyen, T.S., Borgesson, L., Chijimatsu, M., Rutqvist, J., Fujita, T., Hernelind, J., Kobayashi, A., Onishi, Y., Tanaka, M. and Jing, L. 2001. Hydro-mechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit- the Kamaishi Mine experiment in Japan. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38(1): pp 79-94.
- Nguyen, T.S., Selvadurai, A.P.S. and Armand, G. 2003-a. Thermo-poro-elastic modeling of buffer materials considered for nuclear fuel waste disposal endeavours. Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg.
- Nguyen, T.S., Selvadurai, A.P.S. and Armand, G. 2003-b. Computational predictions of the buffer response in an in situ heater test conducted at the Grimsel Site, Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg.
- Nguyen, T.S., Chijimatsu, M., De Jonge, J., Jing, L., Kohlmeier, M., Millard, A., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. 2003-c. Implications of coupled Thermo-hydro-mechanical processes on the safety of a hypothetical nuclear fuel waste repository. Proc. GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications, p. 447-452, KTH, Stockholm, Sweden.
- Ohnishi, Y., T. Chan and L. Jing. 1996. Constitutive models for rock joints. In O Stephansson, L. Jing and C.F. Tsang (eds), *Developments in Geotechnical Engineering, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media*, Amsterdam : Elsevier, 57-92.
- Rutqvist, J., Follin, S. Khair, K., Nguyen, S. and Wilcock, P. 1996. Experimental investigation and mathematical simulation of a borehole injection test in deformable rocks. In O Stephansson, L. Jing and C.F. Tsang (eds), *Developments in Geotechnical Engineering, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media*, Amsterdam : Elsevier.
- Rutqvist, J., Borgesson, L., Chijimatsu, M., Jing, L., Nguyen, T.S., Noorishad, J. and Tsang, C.-F., 2001. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine – comparison of field results to predictions of four finite element codes. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38(1): pp 129-142.
- Rutqvist, L., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A. and Tsang, C.-F., 2003. Evaluation of the impact of thermal-hydrological-mechanical couplings in bentonite and near-field rock barriers of a nuclear waste repository in sparsely fractured hard rock. Proc. GeoProc 2003 International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications, p. 447-452, KTH, Stockholm, Sweden.
- Selvadurai, A.P.S. and Nguyen, T.S. 1996. Scoping analyses of the coupled thermal-hydrological-mechanical behaviour of the rock mass around a nuclear fuel waste repository. Eng. Geology, 47.: pp 379-400.