

RÉSUMÉ

Titre : DECOVALEX THMC TÂCHE E – Effet des glaciations et des processus thermo-hydro-mécaniques (THM) couplés sur l'évolution et l'évaluation de la performance d'un système d'écoulement du Bouclier canadien

Rapport n° : NWMO TR-2008-03

Auteurs : T. Chan et F.W. Stanchell

Société : Énergie atomique du Canada limitée

Date : Août 2008

Résumé

Un dépôt géologique en profondeur (DGP) situé dans le Bouclier canadien sera soumis à des changements climatiques à long terme qui modifieront de façon importante les conditions de surface sous l'effet des glaciations et de la pénétration du pergélisol. La Tâche E de DECOVALEX THMC¹ est une étude de cas numérique systématique des processus et mécanismes THM souterrains résultant des changements climatiques à long terme. L'étude de cas vise à prédire la magnitude et le rythme de l'évolution du débit d'écoulement des eaux souterraines et des contraintes causées par des conditions variant dans le temps aux limites glaciaires agissant à une profondeur de 1,6 km, à une échelle sous-régionale ($\approx 100 \text{ km}^2$), sur un système d'écoulement en milieu fracturé du Bouclier canadien d'après Sykes et coll. (2004) et comprend une version simplifiée du modèle stochastique en milieu fracturé (MRF) de Srivastava (2002). Des simulations de processus THM couplés souterrains transitoires, bidimensionnelles et tridimensionnelles, intégrant le code d'éléments finis MOTIF, ont été réalisées. La salinité des fluides variant en fonction de la profondeur et leur densité et viscosité variant en fonction de la température ont été intégrées, ainsi que les conditions thermiques, hydrauliques et mécaniques initiales et transitoires des limites glaciaires développées d'après deux scénarios de glaciation de 120 000 années se rapportant à l'Inlandsis laurentidien du modèle de systèmes glaciaires Glacial Systems Model (GSM) de l'Université de Toronto (Peltier, 2003). Le modèle GSM tient compte de la magnitude et du rythme d'évolution changeants des contraintes basales normales, de la température, des débits des eaux de fonte et de l'évolution du pergélisol.

Les conclusions principales de la modélisation THM couplée de la Tâche E incluent ce qui suit :

- i) pour ce modèle conceptuel particulier, l'écoulement semble être peu lié aux cycles glaciaires antérieurs si l'on considère les effets thermiques et hydrauliques;
- ii) l'augmentation de la charge hydraulique sous le poids de la glace, principalement due aux effets de consolidation, n'est pas égale à la contrainte totale imposée au substrat rocheux par le glacier, mais équivaut approximativement à 1/3 de la contrainte glaciaire basale normale, en partie en raison du rapport entre les compressibilités de la roche et de l'eau;
- iii) les valeurs incrémentales de la charge hydraulique résultant du poids de la glace et le couplage HM sont relativement uniformes à travers la sous-région modélisée, tant horizontalement que verticalement, par opposition à ce qui surviendrait en utilisant une condition limite de charge hydraulique équivalant à l'épaisseur de la calotte glaciaire à l'intérieur d'un modèle d'écoulement non couplé;
- iv) les valeurs de charge en zones fracturées (ZF) diffèrent des valeurs observées dans la masse rocheuse (MR) adjacente de quelques mètres;
- v) les analyses de sensibilité démontrent que la combinaison de la température du glacier, d'une perméabilité rocheuse très faible ($\sim 10^{-20} \text{ m}^2$) et d'une connectivité limitée des zones fracturées (ZF) est nécessaire pour que les charges

hydrauliques anormales résiduelles persistent en profondeur pendant des milliers d'années après une déglaciation; vi) pendant un cycle glaciaire, les flux de Darcy (vélocités) dans les ZF et la masse rocheuse (MR) hautement perméable à proximité de la surface sont de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} m/a et varient de 10^{-7} à 10^{-5} m/a dans les MR situées à plus de 350 m sous terre; vii) en utilisant des simulations 2D et, par conséquent, en retirant presque toute l'interdépendance des ZF, les vélocités des eaux souterraines des ZF ont diminué par un facteur de 100; viii) l'analyse prudente du traçage des particules indique que 72 % des particules en solution dans les eaux de fonte glaciaires n'ont pas pénétré à plus de 70 m sous la surface et que seulement 6 % des particules ont pénétré à 500 m ou plus² sous la surface; ix) la profondeur de pénétration des eaux de fonte augmente légèrement suivant les effets thermiques, diminue légèrement suivant les effets de densité de la salinité qui varie en fonction de la profondeur, augmente légèrement en simulant un relief glaciaire plat, est à peine influencée par le scénario glaciaire (dans les deux scénarios simulés), mais est gravement sous-évaluée en utilisant un modèle 2D qui tronque presque toute l'interdépendance des ZF; x) pendant les avancées/régressions glaciaires, les contraintes effectives principales sont réorientées, le facteur de sûreté est légèrement augmenté dans la MR et diminué dans les ZF.

Une simulation numérique 2D des forces dynamiques d'écoulement des eaux souterraines d'une sous-région du Bouclier canadien en conditions de pergélisol a été réalisée. Une couche de roche qui ne varie pas dans le temps, d'une épaisseur uniforme de 350 m à faible perméabilité ($\sim 10^{-19}$ m²), a été utilisée pour modéliser le pergélisol. Les résultats des simulations HM couplées avec la salinité sont résumés principalement en comparant les tendances des flux de Darcy selon la profondeur, avec ou sans pergélisol.

La Tâche E de DECOVALEX THMC contribue à mieux comprendre les effets des glaciations sur la géosphère, y compris sur les comportements des réseaux d'écoulement en profondeur et sur la stabilité géomécanique. En particulier, l'application de la modélisation thermo-hydro-mécanique couplée à l'étude de l'effet des glaciations a été démontrée et les réponses de la géosphère pertinentes à l'évaluation de la performance d'un DGP sont soulignées.

¹ An International Project for DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation involving coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical processes (Projet international pour le DÉveloppement de modèles COuplés et leur VALidation par des EXpérimentations dans le domaine de l'isolement des déchets nucléaires intégrant des processus Thermo-Hydro-Mécano-Chimiques couplés), 2004-2007.

² La profondeur de pénétration des eaux de fonte peut avoir été surévaluée parce que la simplification du MRF original a conduit à prédire des vélocités d'eaux souterraines plus élevées en ZF.