



Canadian Nuclear
Safety Commission

Commission canadienne
de sûreté nucléaire

Canada

Recherche en réglementation sur les processus thermo-hydro-mécano-chimiques



**Thanh Son Nguyen, spécialiste technique en
géoscience**

Conférence de l'IACMAG

suretenucleaire.gc.ca

Du 19 au 23 octobre 2017

e-Doc:5573017



CANADA 150



Contenu

- Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN)
- Projets de recherche actuels de la CCSN sur les processus thermo-hydro-mécano-chimiques (THMC) couplés
- Modèle conceptuel et mathématique des processus THMC couplés
- Exemples de processus THMC couplés et de leur modélisation :
 - essai de chauffage au laboratoire souterrain du Mont Terri
 - essai d'injection d'eau et de gaz au Mont Terri
 - glaciation antérieure d'un bassin de roche sédimentaire

Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN)

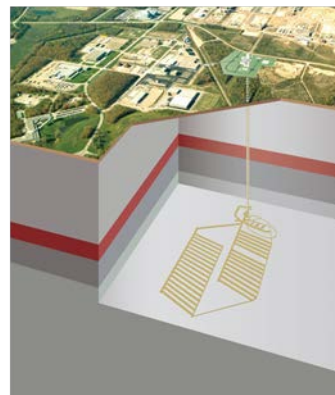


➤ La CCSN :

- réglemente l'utilisation de l'énergie et des matières nucléaires afin de préserver la santé, la sûreté et la sécurité et de protéger l'environnement
- respecte les engagements internationaux du Canada à l'égard de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire
- informe objectivement le public sur les plans scientifique ou technique ou en ce qui concerne la réglementation

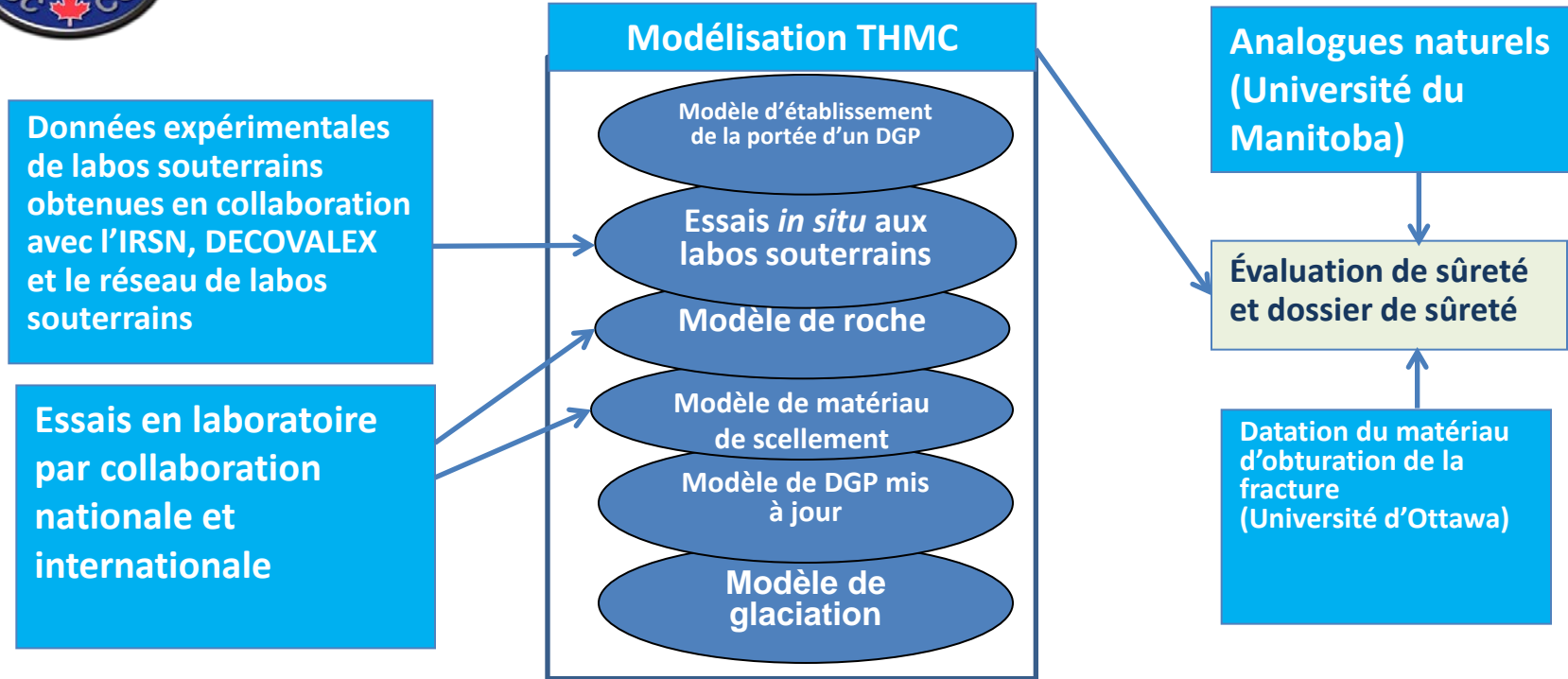
➤ La CCSN réglemente toutes les installations et activités nucléaires au Canada durant tout leur cycle de vie

La CCSN mène des activités de recherche afin d'acquérir une expertise indépendante et de prendre des décisions éclairées en matière de réglementation



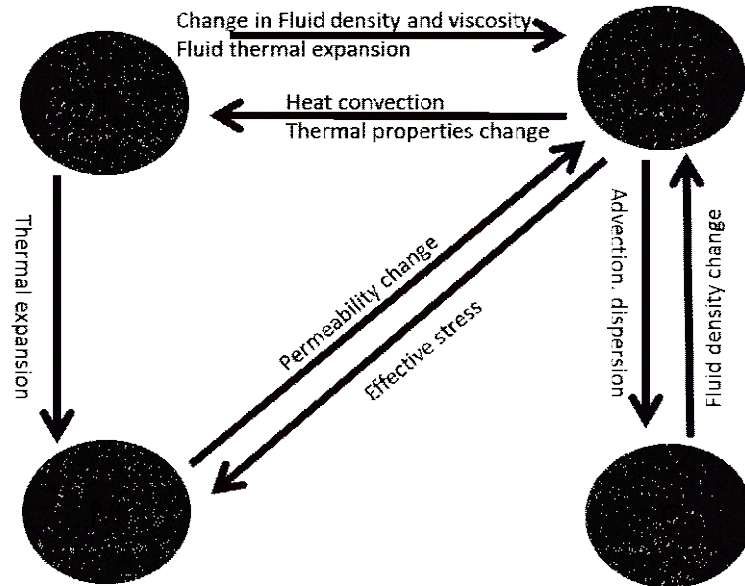


Projets de recherche en cours



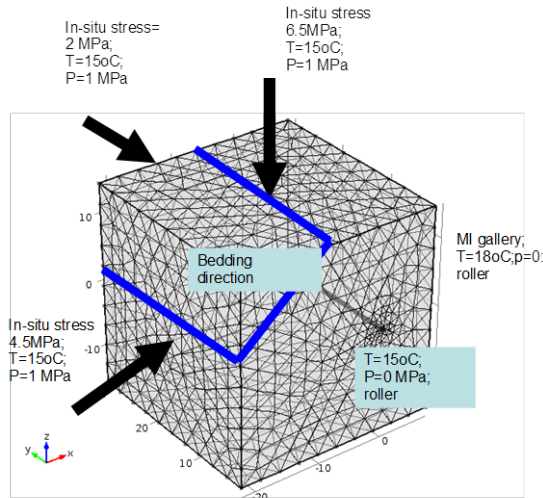
Intégration des essais et de la modélisation en vue de vérifier le dossier de sûreté

Modèle conceptuel et mathématique des processus THMC couplés

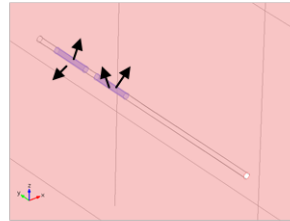


- Équations principales élaborées en fonction des principes de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement pour un milieu poreux
- Adoption du principe des contraintes effectives
- Adoptions d'équations de comportement appropriées pour la relation contrainte-déformation et le transfert de masse et d'énergie

Essai de chauffage au laboratoire souterrain du Mont Terri



Entire model



Radial heat flux from heaters

Équations principales

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho_w k_{ij}}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_w g_j \right) \right) + \rho_w \left[\frac{-n}{K_w} + \frac{n-\alpha}{K_s} \right] \frac{\partial p}{\partial t}$$

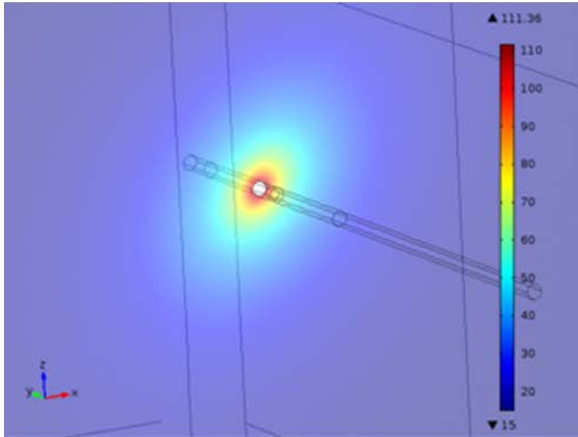
$$+ \rho_w \alpha \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \rho_w \left((1-\alpha)\beta - n\beta_w - (1-n)\beta_s \right) \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$\frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_i \partial x_l} \right) + \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0$$

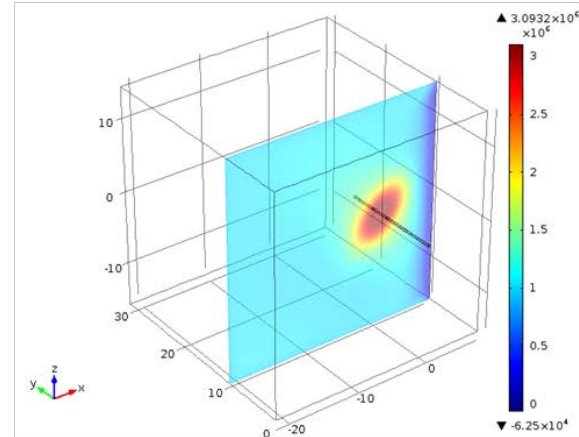


Essai de chauffage : résultats (1)

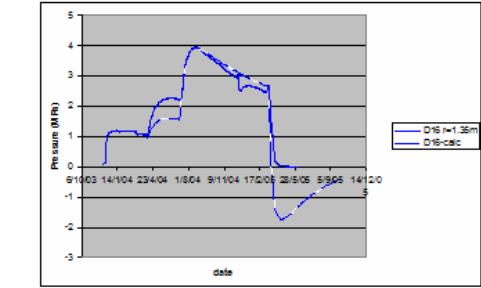
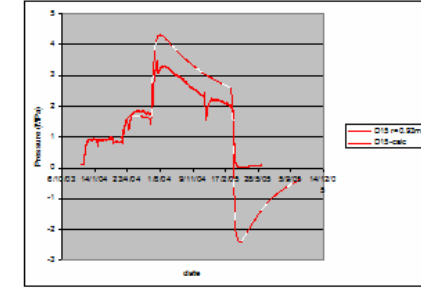
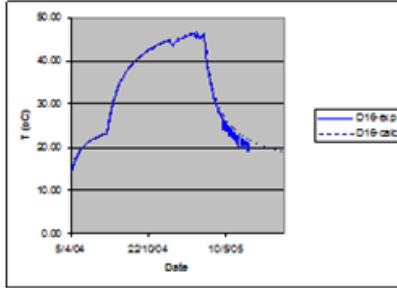
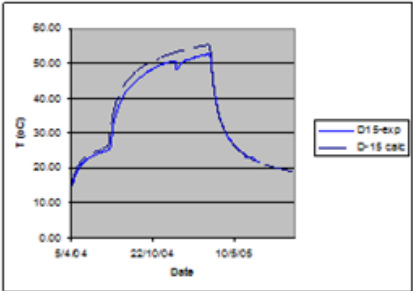
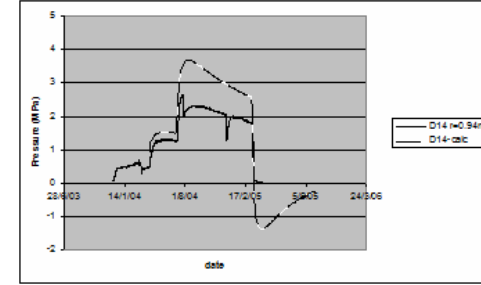
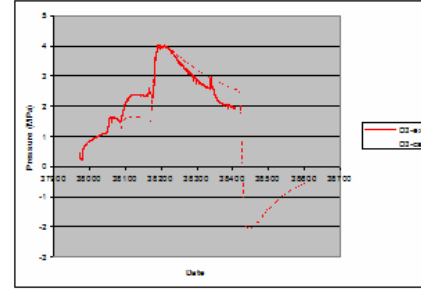
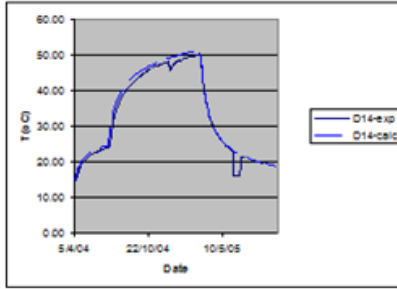
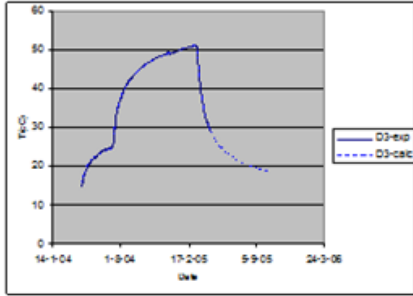
temperature



Pore pressure



Essai de chauffage : résultats (2)



Température

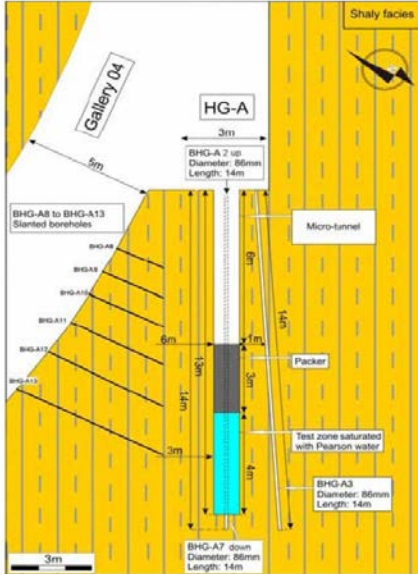
Pression

Essai de chauffage : principales constatations

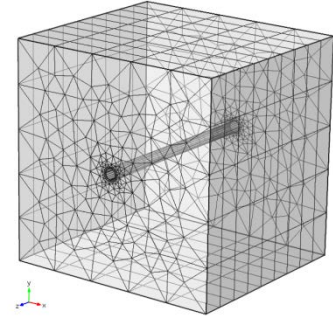
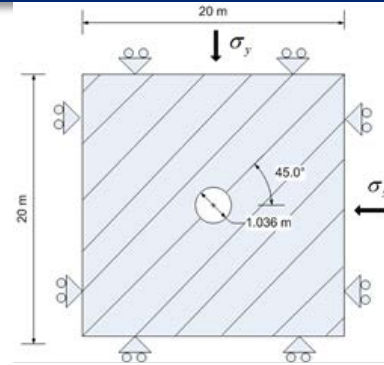


- L'évolution THM de la masse rocheuse à proximité d'un dépôt de déchets doit être comprise afin d'évaluer le rendement de la roche en tant que barrière contre la migration potentielle de radionucléides
- Un modèle mathématique visant à évaluer cette évolution a été mis au point et validé au moyen de données recueillies sur le terrain
- Les données recueillies sur le terrain montrent l'importance de l'anisotropie inhérente dans les formations sédimentaires stratifiées; les effets de l'anisotropie sont bien pris en compte par le modèle

Essai d'injection d'eau et de gaz au Mont Terri



La roche est modélisée en tant que matière poroélastoplastique anisotrope susceptible à l'endommagement



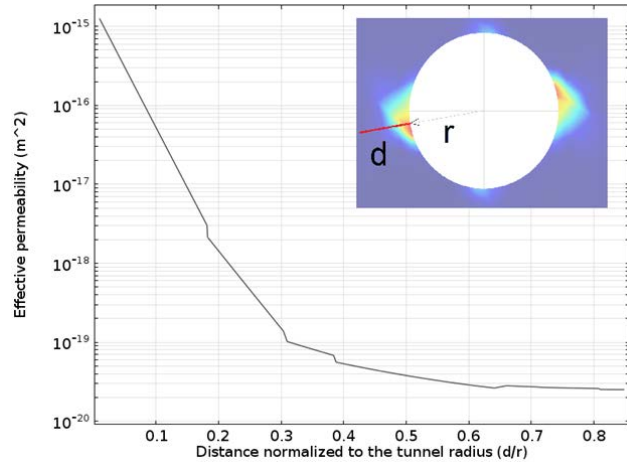
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho_g k_{ij} \left(\frac{k_{rg}}{\mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial x_j} + \rho_g g_j \right) + H \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \rho_w g_j \right) \right) \right] = \rho_g [n(H-1) \left(\frac{dS_w}{dp_c} \right) \frac{\partial p_c}{\partial t} +$$

$$\frac{n(1-S_w+HS_w)}{K_g} \frac{\partial p_g}{\partial t} - (1-S_w+HS_w) \left(\frac{n+\alpha_B}{K_s} \right) \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \alpha_B (1-S_w+HS_w) \frac{\partial^2 u_k}{\partial t \partial x_k}$$

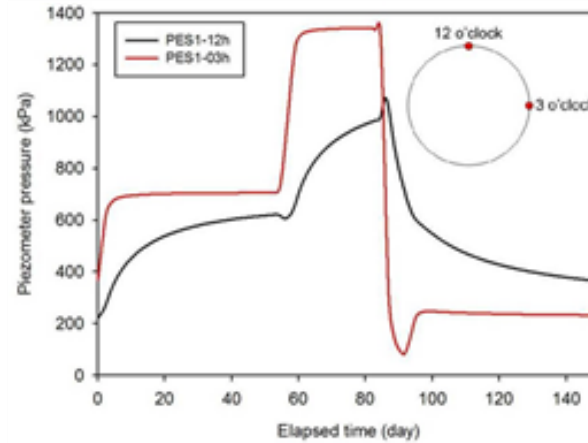
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho_w k_{ij} \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \rho_w g_j \right) \right] = \rho_w \left[n \left(\frac{dS_w}{dp_c} \right) \frac{\partial p_c}{\partial t} + \frac{nS_w}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial t} - S_w \left(\frac{n+\alpha_B}{K_s} \right) \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \alpha_B S_w \frac{\partial^2 u_k}{\partial t \partial x_k} \right]$$

$$\frac{1}{2} C_{ijkl} \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_l \partial x_l} \right) + \alpha_B \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = 0$$

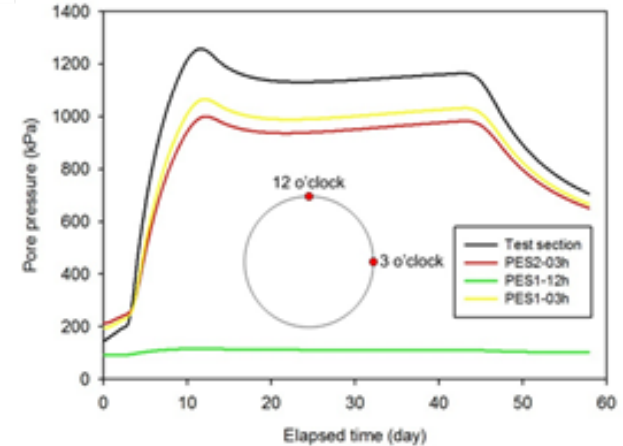
Résultats de modélisation d'injection d'eau et de gaz



Zone endommagée par l'excavation



a) Porewater pressure response to water injection



a) Gas pressure response to gas injection

Migration de l'eau et du gaz après l'injection

Essai d'injection d'eau et de gaz : principales constatations

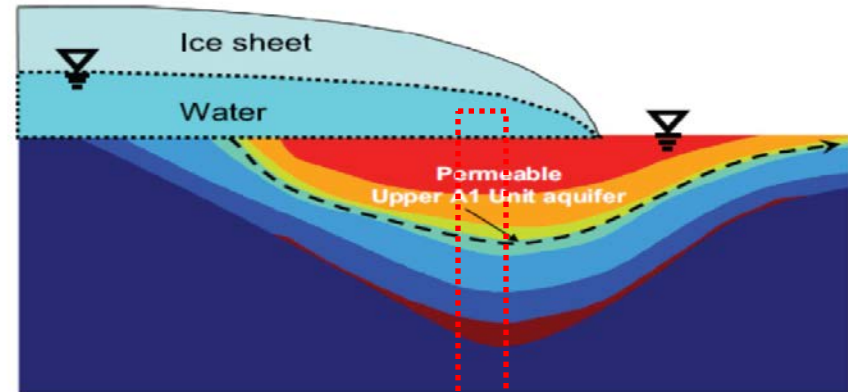


- Un modèle visant le transport simultané d'eau/de gaz dans une matière poroélastoplastique anisotrope susceptible à l'endommagement a été mis au point et validé au moyen d'un essai d'injection sur le terrain
- Le modèle a permis de prédire la forme et l'ampleur de la zone endommagée par l'excavation (ZEE)
- Le modèle a permis de prédire que la ZEE constitue une voie préférentielle pour le transport d'eau et de gaz

Glaciation du bassin de Michigan : conceptualisation



- La masse rocheuse est conceptualisée en tant que milieu poroélastique
- La calotte glaciaire impose une charge en surface de 30 à 40 MPa, ce qui entraîne :
 - une augmentation considérable des gradients hydrauliques
 - la redistribution des traceurs naturels par advection, dispersion et diffusion
- Lors de la déglaciation, il résulte une sous-pression en raison du retrait rapide de la charge de glace



Modèle d'éléments finis

Modèle mathématique de la glaciation



➤ Équations principales

$$\nabla \left[\rho_f \frac{\kappa}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla D) \right] = n\gamma \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_f \alpha' \frac{de_{ff}}{dt} + \rho_f S \frac{dp}{dt}$$

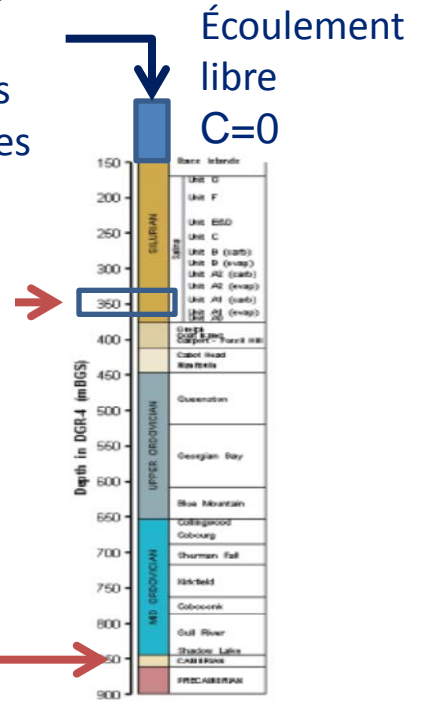
$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-nD_a \nabla C + \mathbf{u}C) = S_c$$

$$G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial y_j} + (G + \lambda) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial y_j} - \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0$$

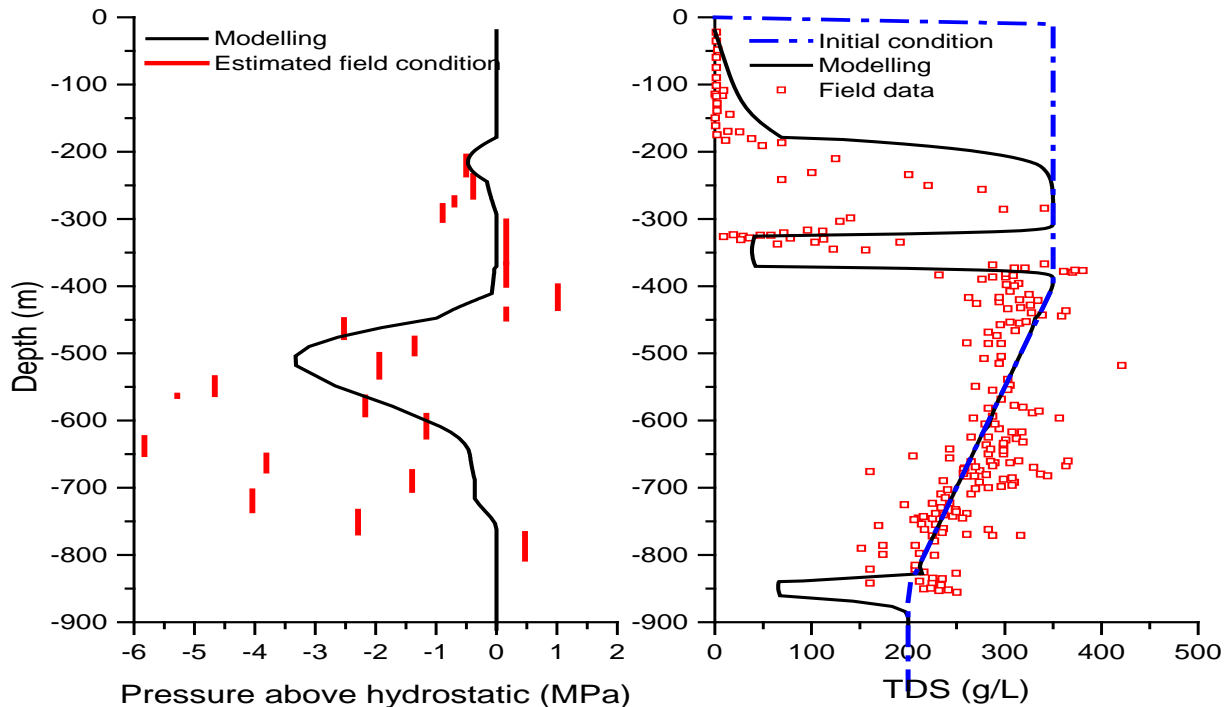
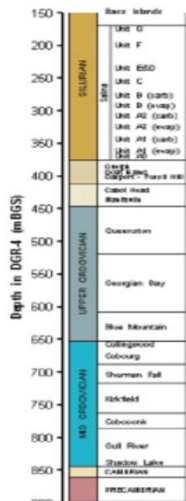
$$\rho_f = \rho_{f0} + \gamma C$$

Charge en surface
des 9 cycles
glaciaires au cours
du million d'années
dernier

Ouverture
hydraulique
latérale par
rapport à la
surface du sol



Distribution de la pression et du total des solides dissous (TSD) après neuf cycles glaciaires



Principales constatations tirées de la modélisation de la glaciation



- La modélisation mathématique et les données recueillies sur le site du projet de DGP destiné aux DFMR fournissent de multiples éléments de preuve qui démontrent que :
 - le réseau d'eau souterraine profonde dans les formations de roche hôte et couverture du site a des centaines de millions d'années et est pratiquement stagnant; le transport de soluté est dominé par la diffusion
 - ces formations rocheuses et leurs eaux souterraines n'ont pas été affectées par neuf cycles glaciaires au cours du million d'années dernier
 - les Grands Lacs sont des entités géographiques découlant des cycles glaciaires quaternaires; les plans d'eau de surface comme les Grands Lacs sont demeurés isolés de l'eau souterraine profonde

Mot de la fin



- Les processus THMC des barrières artificielles et naturelles doivent être compris afin d'évaluer leur capacité à confiner les radionucléides
- Les recherches indépendantes de la CCSN en matière de processus THMC couplés ont débuté au début des années 1990
- La recherche permet d'acquérir une expertise indépendante et de renforcer la crédibilité de la CCSN ainsi que la confiance du public à l'égard des recommandations et des décisions de la CCSN

Recent Publications



- [1] Le D.A. and Nguyen T.S. 2014. Hydromechanical response of a bedded argillaceous rock formation to excavation and water injection, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(1):1-17.
- [2] Nasir O., Fall M., Nguyen T.S. and Evgin E. 2012. Modeling the thermo-hydro-mechanical-chemical response of sedimentary rocks of Ontario to past glaciations, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 64:160-174.
- [3] Nasir O., Nguyen T.S., Barnichon J.D. and Millard A. 2017 (in press). Simulation of the hydro-mechanical behaviour of bentonite seals for the containment of radioactive wastes, *Canadian Geotechnical Journal*.
- [4] Nguyen T.S., Li Z., Barnichon J.D. and Garitte B. 2017. Modelling a heater experiment for radioactive waste disposal, *Environmental Geotechnics* , 4(2).
- [5] Nguyen T.S. and Le D.A. 2014. Simultaneous gas and water flow in a bedded argillaceous rock, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(1):18-32.
- [6] Nguyen T.S. and Le D.A. 2015. Development of a constitutive model for a bedded argillaceous rock from triaxial and true triaxial tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8): 1072-1086.



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