
Modélisation numérique d'un essai de ventilation in situ

Benoît Pardoën^{*} ^{*} — Jean Talandier^{**} — Robert Charlier^{*} — Frédéric Collin^{*} — Jean-Pol Radu^{*}**

^{*} *Université de Liège, Département ArGEnCo
Chemin des Chevreuils 1, B-4000 Liège, Sart Tilman, Belgique
b.pardoen@ulg.ac.be*

^{**} *ANDRA
Rue Jean Monnet 1-7, F-92298 Châtenay-Malabry cedex, France*

^{***} *Boursier FRIA, FRS-FNRS Fonds National de la Recherche Scientifique*

RÉSUMÉ : Des modélisations numériques en écoulements fluides et hydromécaniques sont réalisées en vue d'acquérir une meilleure compréhension du comportement des roches argileuses et des transferts qui se produisent pendant un essai de ventilation in situ. L'essai est effectué dans une galerie expérimentale qui fait partie d'un laboratoire de recherche souterrain. Un modèle d'écoulement biphasique dans les sols non saturés et une loi constitutive élasto-plastique sont utilisés pour la roche hôte. Les modèles incluent une condition limite d'échange de masse fluide, l'anisotropie et une zone endommagée située autour de la galerie. Finalement, le test de ventilation est reproduit et le modèle est calibré sur base de correspondances entre les résultats numériques et les mesures expérimentales.

ABSTRACT. Hydro and hydro-mechanical numerical modellings are performed in order to acquire a better understanding of clayey rock behaviour and transfers occurring during an in situ ventilation test. The test is performed in an experimental gallery that is part of an underground research laboratory. A biphasic flow model in unsaturated soil and an elasto-plastic constitutive law are used for the host formation. The models include exchange condition of fluid mass, anisotropy and the excavation damaged zone around the gallery. Finally, the ventilation test is reproduced and the model is calibrated based on the matching between numerical results and experimental measurements.

MOTS-CLÉS : sols non saturés, zone endommagée, modélisation numérique, déchets radioactifs, modèle d'écoulement biphasique.

KEYWORDS: unsaturated soil, excavation damaged zone, numerical modelling, radioactive waste, biphasic flow model.

1. Introduction

La gestion à long terme des déchets radioactifs de moyenne et haute activité à longue durée de vie est envisagée par enfouissement dans des couches géologiques profondes et très peu perméables. Ce stockage nécessite une bonne compréhension du comportement de la formation hôte. Des laboratoires de recherche souterrains ont été développés en Europe (Delay *et al.*, 2007, Neerdael *et al.*, 1997) et en Amérique (Rutqvist *et al.*, 2005) pour étudier la stabilité à long terme de la roche hôte et la faisabilité des solutions de stockage. Des expériences *in situ* y sont réalisées afin de caractériser le comportement de la roche argileuse et les différents couplages qui y ont lieu.

Lors de l'excavation des galeries qui composent les ouvrages de stockage souterrains et les laboratoires de recherche, il est inévitable d'endommager la roche située à proximité de la paroi. Il s'agit d'une fracturation mécanique. Une fracturation due au processus de désaturation est également possible suite à l'interaction entre la roche et l'atmosphère. Cette zone endommagée présente une perméabilité hydraulique globale supérieure à celle de la roche hôte. Cette augmentation de perméabilité pourrait altérer l'étanchéité du dispositif de stockage. Dès lors le comportement de la zone endommagée est un enjeu majeur (Blümling *et al.*, 2007).

2. Essai de ventilation *in situ*

La ventilation des galeries et le drainage en paroi peuvent influencer la structure et la taille de la zone endommagée. Une expérience de ventilation *in situ*, SDZ, est réalisée par l'agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA). Elle est réalisée dans une galerie expérimentale du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne creusé dans l'argilite du Callovo-Oxfordien (Cruchaudet *et al.*, 2010). L'objectif est de caractériser, suite à une ventilation contrôlée en galerie, la désaturation et resaturation éventuelle de la zone endommagée.

La zone expérimentale est située à la fin d'une galerie expérimentale (GED) et est composée d'un sas, d'une zone d'essai sans revêtement en paroi et, à la fin, d'une zone d'essai avec revêtement. Une dalle de béton et un revêtement en paroi sont présents dans la galerie. La géométrie de la zone expérimentale est exposée à la Figure 1. Pendant l'essai, une ventilation est réalisée dans celle-ci. Après 230 jours de ventilation, le sas est fermé, la ventilation est arrêtée dans la zone expérimentale et les échanges entre cette zone et la galerie se produisent à travers la zone endommagée. Plusieurs mesures expérimentales *in situ* ont été réalisées au cours de l'essai et indiquent un comportement hydromécanique de la roche autour de la galerie. Des modélisations numériques de cette expérience sont réalisées en vue de reproduire les résultats expérimentaux et d'acquérir une meilleure compréhension des transferts ayant lieu durant l'expérience.

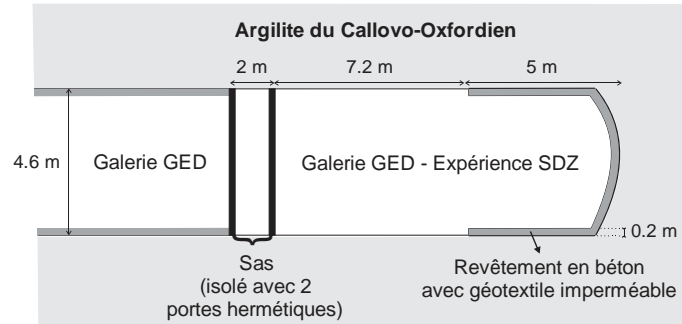


Figure 1. Géométrie de la zone expérimentale de ventilation in situ SDZ

3. Modèles mécanique et d'écoulement biphasique

Un modèle d'écoulement biphasique est utilisé pour reproduire les transferts eau-air en milieu poreux partiellement saturé (Collin *et al.*, 2002). Ce modèle est constitué d'une phase liquide composée d'eau liquide et d'air dissous et d'une phase gazeuse qui est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Il prend en compte les phénomènes suivants : l'advection de la phase liquide modélisée par l'écoulement de Darcy, la diffusion dans la phase gazeuse et la diffusion de l'air dissous dans l'eau régies par la loi de Fick. La densité de l'air dissous est proportionnelle à la densité de l'air sec par la loi de Henry. Plus de détails sur le modèle d'écoulement biphasique sont disponibles dans (Collin *et al.*, 2002, Gerard *et al.*, 2008a). Les courbes de rétention et de perméabilité relative à l'eau sont données par le modèle de van Genuchten (van Genuchten, 1984). Les paramètres hydrauliques pour l'argilite et le béton sont présentés dans le Tableau 1.

		Argilite	Béton
k_{hor}	Perméabilité intrinsèque horizontale (m ²)	4×10^{-20}	1×10^{-18}
k_{vert}	Perméabilité intrinsèque verticale (m ²)	1.33×10^{-20}	1×10^{-18}
Φ	Porosité (-)	0.18	0.2
m	Coefficient de Van Genuchten (-)	0.55	0.35065
n	Coefficient de Van Genuchten (-)	1.49	1.54
P_r	Paramètre de Van Genuchten (MPa)	15	2
S_{max}	Saturation maximale (-)	1	1
S_{res}	Saturation résiduelle (-)	0.01	0.01
τ	Tortuosité (-)	0.25	0.25

Tableau 1. Paramètres hydrauliques de l'argilite et du béton

Le modèle de comportement mécanique du béton est un modèle élastique linéaire. La loi constitutive mécanique de l'argilite est un modèle élastique linéaire-

parfaitement plastique non-associé avec une surface de plasticité de Van-Eekelen. Ce modèle est écrit en termes de contraintes effectives définies par Bishop (Nuth *et al.*, 2008). Le tableau 2 présente les paramètres mécaniques de l'argilite et du béton.

		Argilite	Béton
E_0	Module de Young drainé (MPa)	4000	30000
ν_0	Coefficient de Poisson drainé (-)	0.3	0.3
c	Cohésion (MPa)	3	-
φ	Angle de frottement (°)	20	-
b	Coefficient de Biot (-)	0.6	1
ρ	Densité (kg/m ³)	2300	2300

Tableau 2. Paramètres mécaniques de l'argilite et du béton

4. Condition limite hydraulique d'échange en paroi

Une condition limite non conventionnelle combinant des échanges d'eau et de vapeur a été développée afin de modéliser les échanges entre la cavité et la roche (Gerard *et al.*, 2008b). Cette condition implique que deux modes d'échange peuvent se produire dans les cavités ventilées (Ghezzehei *et al.*, 2004). Le flux total \bar{E} est la combinaison d'un flux de suintement \bar{S} et d'un flux d'échange de vapeur \bar{q} :

$$\bar{E} = \bar{S} + \bar{q} \quad [1]$$

Il y a suintement si la pression d'eau interstitielle de la roche en paroi de galerie est plus importante que la pression d'air dans la cavité. Le suintement est introduit dans un code éléments finis par la fonction :

$$\begin{cases} \bar{S} = K(p_w^\Gamma - p_{atm})^2 & \text{si } p_w^\Gamma \geq p_w^{air} \text{ et } p_w^\Gamma \geq p_{atm} \\ \bar{S} = 0 & \text{si } p_w^\Gamma < p_w^{air} \text{ ou } p_w^\Gamma < p_{atm} \end{cases} \quad [2]$$

avec p_w^Γ la pression d'eau dans la roche en paroi de galerie, p_w^{air} la pression d'eau correspondant à l'humidité relative de l'air dans la cavité, p_{atm} la pression atmosphérique et K un coefficient de pénalisation pour le suintement.

L'échange de vapeur est basé sur l'existence d'une couche limite localisée sur la surface poreuse de la cavité (Ghezzehei *et al.*, 2004). Il se produit si une différence de densité de vapeur existe entre la roche et l'air de la cavité (Ben Nasrallah *et al.*, 1988) :

$$\bar{q} = \alpha(\rho_v^\Gamma - \rho_v^{air}) \quad [3]$$

avec ρ_v^Γ et ρ_v^{air} la masse volumique de la vapeur respectivement dans la roche en paroi de galerie et dans la cavité et α un coefficient de transfert de masse pour l'évaporation.

5. Résultats numériques

Afin de mettre en évidence l'effet de la ventilation des galeries sur la roche argileuse et sur la zone endommagée, deux types de modélisation sont considérés. Premièrement, seuls les écoulements fluides sont modélisés, ensuite un couplage hydromécanique est réalisé. Pendant la ventilation, la température et l'humidité relative sont mesurées dans la galerie. Elles sont imposées sur la paroi de la galerie par la loi de Kelvin et par la condition limite.

Des modèles à deux dimensions en état plan de déformation, à deux dimensions axisymétrique et à trois dimensions sont réalisés. La zone endommagée est définie *a priori* avec une perméabilité intrinsèque plus élevée que la roche argileuse. Le premier modèle permet une bonne représentation de la zone endommagée et de l'anisotropie. Le second fournit une bonne représentation des échanges longitudinaux entre la zone expérimentale SDZ, la galerie et la zone endommagée. Le troisième permet de prendre en compte tous les aspects. Les modèles sont implémentés dans le code aux éléments finis Lagamine en condition isotherme $T = 293^{\circ}\text{K}$, à pression de gaz constante égale à la pression atmosphérique et pour une pression d'eau interstitielle initiale de 4.5MPa.

5.1. *Écoulement fluide*

Plusieurs paramètres ont été calibrés pour que les résultats numériques correspondent aux mesures expérimentales : le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation α , l'extension de la zone endommagée et la perméabilité intrinsèque de l'argilite. Il apparaît, pour les trois modèles prenant en compte uniquement les transferts fluides, que le coefficient de transfert de masse pour l'évaporation a une influence importante sur la reproduction de mesures expérimentales de pression d'eau interstitielle de l'expérience de ventilation SDZ. Ces mesures ont été effectuées dans des forages situés autour de la zone expérimentale à différentes distances de la paroi de la galerie, avec une première mesure qui correspond à 160 jours de calcul. Une valeur élevée de ce coefficient implique des échanges importants entre la masse rocheuse et l'air de la cavité. Dans ce cas, le drainage est surestimé dans la roche et la zone endommagée est fortement désaturée. Une valeur faible implique de faibles échanges entre la roche et la cavité, une très faible désaturation de la zone endommagée et offre une bonne adéquation avec les mesures expérimentales. La désaturation de la roche en paroi de galerie pour une valeur élevée et faible de ce coefficient est exposée à la Figure 2. La perméabilité à l'eau de la zone endommagée étant élevée, le niveau de saturation au sein de celle-ci est similaire à celui de la paroi de la galerie.

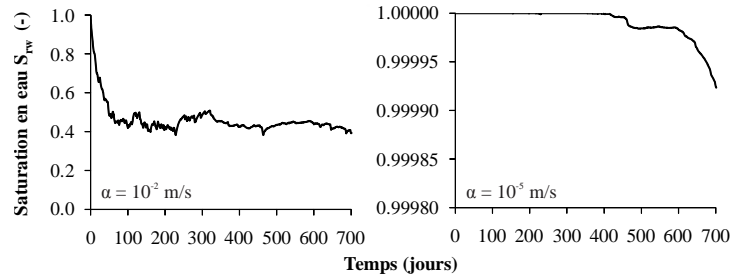


Figure 2. Désaturation de la roche en paroi de galerie pour une valeur élevée et faible du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation (modélisation 2D, écoulement fluide)

Pour le modèle à trois dimensions, la meilleure correspondance est obtenue avec $K = 10^{-13} \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\alpha = 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, une extension elliptique de la zone endommagée basée sur des mesures de fractures *in situ* (2.7 m horizontalement et 3.7 m verticalement) et dont les perméabilités intrinsèques valent $k_{\text{hor}} = 4 \times 10^{-17} \text{m}^2$ et $k_{\text{vert}} = 1.33 \times 10^{-17} \text{m}^2$. La correspondance entre les résultats numériques et expérimentaux est présentée à la Figure 3.

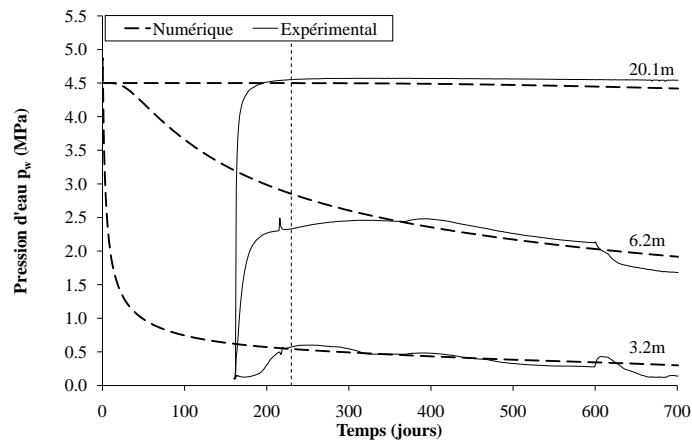


Figure 3. Correspondance entre les résultats numériques et expérimentaux pour une faible valeur du coefficient de transfert de masse pour l'évaporation et pour différentes distances à la paroi de la galerie dans le forage SDZ1244 (modélisation 3D, écoulement fluide)

La valeur retenue du coefficient de transfert de masse implique de faibles transferts, l'échange de vapeur d'eau en paroi n'est pas le mécanisme de transport

prépondérant. La ventilation a une faible influence sur la distribution des pressions d'eau interstitielle dans la formation rocheuse. Ceci remet en question l'imposition par condition limite classique en paroi de la succion correspondant à l'humidité relative de l'air dans la cavité. Cette imposition implique une transmission brutale de l'humidité au massif et une désaturation importante de la zone endommagée.

Cependant, le coefficient de transfert retenu est plus faible, de plusieurs ordres de grandeur, que celui déterminé expérimentalement lors d'essais de séchage convectif réalisés sur des échantillons de petite taille (Gerard *et al.*, 2010). Un facteur d'échelle pourrait expliquer cette différence et devrait faire l'objet d'une étude particulière.

Pour la valeur retenue de coefficient de transfert de masse, le modèle axisymétrique prenant en compte uniquement les écoulements fluides met en évidence que des transferts fluides s'effectuent dans la zone endommagée durant l'essai. Les transferts d'eau autour de la galerie sont dirigés radialement vers la cavité SDZ et longitudinalement vers la galerie expérimentale après la fermeture du sas. En ce qui concerne les flux radiaux à travers la paroi de la galerie en zone expérimentale non revêtue et dirigés vers la cavité : à court terme le suintement est prédominant et diminue rapidement, à long terme les échanges de vapeur restent constants. Ces résultats sont présentés à la Figure 4.

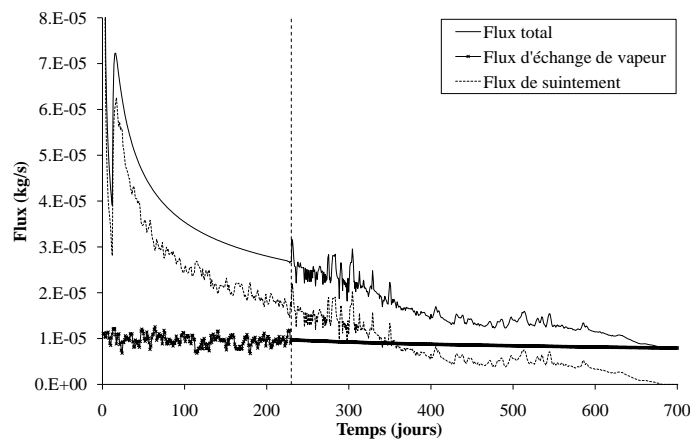


Figure 4. Evolution des flux radiaux à travers la paroi de la galerie en zone expérimentale non revêtue et dirigés vers la cavité (modélisation 2D axisymétrique, écoulement fluide)

5.2. Couplage hydromécanique

Le modèle à deux dimensions en état plan de déformation est également réalisé en couplage hydromécanique prenant en compte l'excavation et l'anisotropie de l'état de contrainte initial : $\sigma_{hor,0} = 15.6\text{MPa}$, $\sigma_{vert,0} = 12\text{MPa}$. La zone endommagée reste définie *a priori*. L'objectif est de comparer la zone plastique obtenue numériquement avec la zone endommagée mesurée *in situ*.

En utilisant les paramètres détaillés précédemment, l'évolution de l'extension de la zone plastique se produit lors de l'excavation et ses dimensions finales sont d'environ 0.4m horizontalement, 1.3m et 1.7m verticalement respectivement dans la direction ascendante et descendante. L'extension de la zone endommagée mesurée et composée de fractures mixtes en tension et en cisaillement est de 0.5m horizontalement, 1.7m et 2.0m verticalement respectivement dans la direction ascendante et descendante. L'extension de la zone endommagée basée sur des mesures de perméabilité élevée est de 0.5m horizontalement, 1.1m verticalement dans la direction ascendante et descendante. Les détails concernant ces mesures expérimentales, effectuées par l'ANDRA, sont disponibles dans (Cruchaudet *et al.*, 2010b). La zone plastique obtenue numériquement correspond relativement bien aux mesures expérimentales d'extension de la zone endommagée (Figure 5).

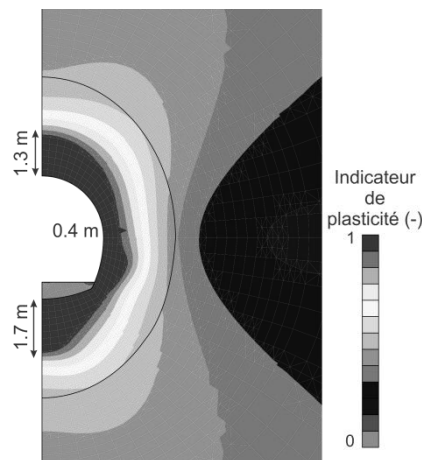


Figure 5. Extension de la zone plastique obtenue numériquement en fin de calcul, Indicateur de plasticité = 1 : domaine plastique, Indicateur de plasticité < 1 : domaine élastique (modélisation 2D état plan de déformation, couplage hydromécanique)

6. Conclusion

Les résultats numériques montrent qu'il est possible de calibrer les modèles pour obtenir une reproduction satisfaisante des mesures expérimentales *in situ*. Parmi les différents paramètres qui ont dû être calibrés, le coefficient de transfert de masse régissant la condition limite non conventionnelle utilisée pour les échanges de fluides en paroi de galerie a une influence significative sur les résultats. Il doit être calibré sur base des mesures expérimentales *in situ* afin de les reproduire correctement. La valeur retenue est faible ce qui correspond à de faibles transferts, remettant en question l'imposition classique en paroi. Le développement d'une condition limite non conventionnelle est important pour représenter correctement les mesures expérimentales. Des modélisations numériques d'essais de séchage convectif en condition non isotherme ont été réalisées (Gerard *et al.*, 2010) dès lors une extension au cas non isotherme pourrait être envisagée pour les ouvrages de stockage de déchets radioactifs.

Les résultats fournissent également une meilleure compréhension des écoulements fluides autour de la galerie et dans la zone endommagée durant l'essai de ventilation.

Concernant la zone endommagée, le modèle hydromécanique fournit une extension de la zone plastique similaire aux mesures *in situ* effectuées par l'ANDRA. Si l'étendue de la zone plastique peut être calculée avec le modèle actuel, les modélisations n'apportent toutefois pas de réponses sur l'état de la roche au sein de cette zone. Il serait nécessaire de valider les résultats en modélisant plus finement la zone endommagée et le couplage hydromécanique en son sein (Levasseur *et al.*, 2009). La perméabilité n'est probablement pas homogène dans la zone endommagée et est probablement dépendante d'un paramètre mécanique tel que la déformation plastique (Levasseur *et al.*, 2010).

7. Bibliographie

- Ben Nasrallah S., Pere P., « Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media », *International Journal of Heat and Mass*, vol. 31, n° 5, 1988, p. 957-967.
- Blümling P., Bernier F., Lebon P., Derek Martin C., « The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment », *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 32, 2007, p. 588-599.
- Collin F., Li X.L., Radu J.P., Charlier R., « Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers », *Engineering Geology*, vol. 64, 2002, p. 179-193.
- Cruchaudet M., Noiret A., Talandier J., Armand G., Expérimentation SDZ – Bilan de la mise en place de l'instrumentation et des premières mesures à fin mars 2010 – Centre de Meuse/Haute-Marne, rapport interne n° D.RP.AMFS.09.0087, 2010a, ANDRA.

- Cruchaudet M., Noiret A., Talandier J., Gatmiri B., Armand G., OHZ en GED : EDZ initiale et évolution, rapport interne n° D.RP.AMFS.11.0016, 2010b, ANDRA.
- Delay J., Vinsot A., Krieguer J.M., Rebours H., Armand G., « Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, north eastern France », *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 32, n° 2-18, 2007.
- Gerard P., Charlier R., Barnichon J.D., Su K., Shao J.F., Duveau G., Giot R., Chavant C., Collin F., « Numerical modelling of coupled mechanics and gas transfer around radioactive waste in long-term storage », *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 38, n° 1-2, 2008a, p. 25-44.
- Gerard P., Charlier R., Chambon R., Collin F., « Influence of evaporation and seepage on the convergence of a ventilated cavity », *Water Resources Research*, vol. 44, n° W00C02, doi : 10.1029/2007WR006500, 2008b.
- Gerard P., Léonard A., Masekanya J.P., Charlier R., Collin F., « Study of the soil-atmosphere moisture exchanges through convective drying tests in non-isothermal conditions », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics vol. 34*, 2010, p. 1297-1320.
- Ghezzehei T.A., Trautz R.C., Finsterle S., Cook P.J., Ahlers C.F., « Modeling coupled evaporation and seepage in ventilated cavities », *Vadose Zone Journal*, vol. 3, 2004, p. 806-818.
- Levasseur S., Bésuelle P., Collin F., Chambon R., Charlier R., Viggiani C., « EDZ in clayey rocks : which effect on permeability? », *Proceedings of European Commission – Timodaz-Teresa THMC conference*, Luxembourg, 29 septembre - 01 octobre 2009.
- Levasseur S., Charlier R., Frieg B., Collin F., « Hydro-mechanical modelling of the excavation damaged zone around an underground excavation at Mont Terri Rock Laboratory », *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, vol. 47, n° 3, 2010, p. 414-425.
- Neerdael B., Boyazis J.P., « The Belgium underground research facility : Status on the demonstration issues for radioactive waste disposal in clay », *Nuclear Engineering and Design*, vol. 176, 1997, p. 89-96.
- Nuth M., Laloui L., « Effective stress concept in unsaturated soils : clarification and validation of a unified framework », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 32, 2008, p. 771-801.
- Rutqvist J., Barr D., Datta R., Gens A., Millard A., Olivella S., Tsang C.F., Tsang Y., « Coupled thermal-hydrological-mechanical analyses of the Yucca Mountain drift scale test-Comparison of field measurements to predictions of four different numerical models », *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, vol. 42, 2005, p. 680-697.
- van Genuchten M.T., « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, 1984, p. 892-898.