



Modélisations poroélastiques non linéaires des perturbations hydromécaniques dues à la ventilation des galeries dans les argilites de l'est

A. Giraud, F. Homand et M. Souley

LAEGO-ENSG, rue du Doyen Marcel Roubault, - 54 501 Vandoeuvre-Les-Nancy, France.

Des variations d'hygrométrie dans les ouvrages souterrains mettent en jeu des couplages hydrique-mécanique dans le massif rocheux. Une diminution d'humidité relative de l'air ambiant dans une cavité profonde se traduit par exemple par une dessaturation du massif proche qui peut éventuellement s'accompagner, dans des roches telles que des argilites, d'une fissuration au voisinage de la paroi. Une approche couplée hydrique-mécanique est alors nécessaire pour analyser l'effet d'un chargement hydrique sur le comportement mécanique. Le cadre conceptuel choisi dans cette étude est celui de la mécanique des milieux poreux partiellement saturés (Coussy, 1995) et le modèle de comportement de référence est le modèle poroélastique non linéaire (Lassabatère 1994). De nombreux coefficients caractérisant les modèles de comportement couplés sont actuellement mal connus dans des roches telles que les argilites, de ce fait on présente une étude numérique paramétrique de l'impact de la ventilation d'une galerie profonde sur l'état hydrique et mécanique du massif proche. La géométrie du problème est simplifiée : on considère une galerie de section circulaire isolée de longueur infinie dans un massif infini (problème unidimensionnel). La méthodologie suivie pour mener cette étude de sensibilité est basée sur un enrichissement progressif de la description des transferts hydriques. Les lois de Darcy généralisée et de Fick qui décrivent les transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés s'expriment à l'aide de trois paramètres physiques, les perméabilités au liquide et au gaz, le coefficient de Fick, actuellement mal connus dans des matériaux tels que les argilites. Ces paramètres sont ainsi introduits dans la description des transferts hydriques et analysés de manière paramétrique. L'irréversibilité de comportement, qui peut éventuellement se traduire par une fissuration au voisinage de la paroi de la galerie, n'est donc pas prise en compte et on souligne le caractère préliminaire des résultats présentés, relativement à cette hypothèse.

1 Modèle de référence

Le modèle de référence considéré pour les argiles de l'Est est le modèle poroélastique non linéaire de Lassabatère-Coussy avec deux pressions (pression de liquide et pression de mélange gazeux) incluant le changement de phase liquide-vapeur et les deux non linéarités essentielles :

- non linéarité due à la prise en compte de la courbe de saturation pression capillaire $S_{lq}(p_{cp})$ et de sa dérivée $\frac{dS_{lq}(p_{cp})}{dp_{cp}}$ dans le modèle de comportement poroélastique non linéaire,
- non linéarité due à des perméabilités relatives à l'eau liquide et au gaz variables en fonction de la saturation.

La première non-linéarité a été caractérisée expérimentalement (Homand 1998, figure 1), la seconde a été estimée à l'aide de la bibliographie. Les valeurs des paramètres du modèle de référence ont été établies en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique de Lille.

L'expression analytique de la courbe saturation – pression capillaire choisie est de la forme (loi de Vachaud et Vauclin) :

$$S_{lq}(p_{cp}) = \frac{a}{a + (100 \times p_{cp})^b} \quad a = 2842, b = 0.906$$

et celles des lois de perméabilités relatives au liquide et au gaz :

$$K_{lq}^{rel}(S_{lq}) = \frac{1}{1 + (a(1 - S_{lq}))^b} \quad , \quad a = 35, b = 1.5 \quad ; \quad K_{gz}^{rel}(S_{lq}) = \frac{1}{1 + (aS_{lq})^b} \quad , \quad a = 3, b = 2.7$$

2 Méthodologie de l'étude de sensibilité

La méthodologie suivie pour mener l'étude de sensibilité est basée sur un enrichissement progressif de la description des transferts hydriques. Les lois de Darcy généralisée et de Fick qui décrivent les transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés s'expriment à l'aide de trois paramètres physiques, les perméabilités au liquide et au gaz, le coefficient de Fick, actuellement mal connus dans des matériaux tels que les argilites et siltites.

Ces paramètres sont ainsi introduits progressivement dans la description des transferts hydriques. On suppose dans un premier temps que la perméabilité au gaz est " infinie ", c'est le modèle avec un seul pression, c'est à dire qu'à tout instant et en tout point du massif la perméabilité au gaz est constante et égale à la pression atmosphérique. Le modèle avec une seule pression est abordé en supposant tout d'abord la perméabilité au liquide constante, c'est à dire sa perméabilité relative égale à 1, en quel cas la seule non linéarité du modèle est due à l'isotherme de sorption, puis variable en fonction de la saturation. Deux valeurs de perméabilité intrinsèque sont prises en compte : la valeur de référence $k^{int\ nio} = 10^{-19}$ m² et une valeur 100 fois plus faible $k^{int\ nio} = 10^{-21}$ m² certainement plus proche de celle du massif "sain" loin de l'excavation. Les conductivités hydrauliques de chaque phase sont calculée à l'aide de la perméabilité intrinsèque et des viscosités et perméabilités relatives respectives du liquide et de l'air .

3 Position du problème et modélisation

On présente une modélisation unidimensionnelle simplifiée de la ventilation d'une galerie profonde. On considère une galerie isolée (pas d'interaction avec d'autres galeries), de longueur infinie et de rayon r_i égal à 5.5 m. La variable d'espace unique du problème est le rayon r_i . L'hypothèse de simplification géométrique permet d'utiliser le code de calcul aux éléments finis PARSAT, développé au LAEGO.

On ne s'intéresse tout d'abord qu'à des variations de contrainte, pression ... autour d'un état d'équilibre initial. Le creusement n'est pas pris en compte dans une première approche, les variations calculées donneront l'ordre de grandeur des variations de contrainte, pressions etc. liées à une ventilation de galerie. On considère un état initial saturé, les champs de pression de liquide, de pression de gaz et de contrainte sont homogènes

$$p_{lq} = p_{gz} = p_{atm} = 101325 \text{ Pa}, \quad \underline{\underline{\sigma}}_0 = -p_{atm} \underline{\underline{1}}.$$

On impose en paroi de la galerie une humidité relative constante :

$$p_{gz} = p_{atm} ; p_{lq} = p_{lq}^i \text{ telle que } h_r(r_i) = 0.8.$$

La prise en compte du creusement de la galerie est ensuite commentée. Le maillage pris en compte est constitué de 200 éléments Lagrange quadratique à trois nœuds équidistants et la discrétisation temporelle est réalisée à l'aide d'un schéma semi-implicite de type Crank-Nicholson (on choisit en fait $\theta=1$, ce qui correspond au schéma implicite). A chaque incrément de temps, le champ inconnu du problème discrétisé est le champ d'accroissement $\Delta_n X = X_{n+1} - X_n$.

Les critères de convergence sont définis indépendamment pour chaque inconnue nodale, à savoir le déplacement (radial) u , la pression de liquide P_{lq} , la pression de mélange gazeux p_{gz} . L'erreur relative maximale tolérée est de 10^{-5} , un algorithme itératif de type point fixe permet de résoudre à chaquee incrément le problème non linéaire. Les calculs transitoires menés sur une durée de 200 ans ont été réalisés avec environ 1000 pas de temps entre 0 et 10 ans, et 2000 pas de temps entre 10 et 200 ans. Les pas de temps considérés sont très petits, bien plus que ne l'exige la méthode d'intégration implicite du point de vue de la précision. La grande finesse de discrétisation temporelle est possible du fait de la géométrie 1D qui se traduit par un petit nombre de nœuds.