

MODÉLISATION DES EFFETS CHIMIQUES DANS LES ARGILES PARTIELLEMENT SATURÉES

Nathalie Boukpeti¹, Zejia Liu², Robert Charlier¹

¹ Université de Liège, Belgique

² Dalian University of Technology, China

RÉSUMÉ - Un modèle constitutif combinant les effets chimiques et les effets de saturation partielle est présenté. Les capacités du modèle à représenter le comportement chemo-hydro-mécanique des argiles sont examinées à travers des simulations numériques de problèmes aux conditions limites. Le premier problème est un test de mouillage d'une argile avec un liquide organique et le deuxième problème est une excavation dans une argile gonflante.

1. Introduction

La présence de certains composés chimiques dans le fluide contenu dans les sols argileux influencent leur comportement hydro-mécanique, et un changement de ce fluide peut induire une déformation. La compréhension des phénomènes chimiques dans les argiles est essentielle pour la conception des barrières argileuses, ainsi que pour la conception des ouvrages fondés sur des sols pollués. En général, les sols de fondations et les argiles compactées utilisées pour les barrières argileuses sont partiellement saturés. Les variations du degré de saturation de ces sols peuvent entraîner des déformations ainsi que des changements dans leur comportement.

Des expériences d'infiltration de liquides organiques dans des échantillons d'argiles ont permis de mesurer des déformations d'extension ou de contraction, en fonction de la concentration de contaminant et du niveau de contrainte (Fernandez and Quigley 1991). La compaction d'échantillons d'argile suite à la mise en contact avec des solutions contenant des sels solubles a également été observée, et expliquée par l'effet osmotique (Di Maio 1996). Il a également été montré qu'une partie de cette compaction est irréversible. Dans le cas où le gonflement est empêché, une pression de gonflement se développe.

Plusieurs modèles constitutifs ont été suggérés pour décrire le comportement chemo-mécanique des argiles dans diverses circonstances environnementales (p.ex., Guimaraes et al., 2001 ; Nova et al., 2003). La formulation employée dans ce papier est basée sur la théorie de chemo-plasticité proposée par Hueckel (1992, 1997). On fait l'hypothèse que lorsque la concentration massique d'une espèce chimique augmente dans le fluide contenu dans le sol, le domaine élastique et par conséquent la surface limite diminuent (adoucissement chimique). Le même concept a été utilisé dans le modèle présenté par Boukpeti et al. (2003). Le modèle présenté ici prend en compte également les effets chimiques sur les propriétés de résistance du sol, et en particulier, sur le paramètre de cohésion.

Dans ce papier, les effets chimiques sont combinés avec les effets de saturation partielle du sol. Ceci est réalisé en incorporant le modèle chemo-mécanique dans le modèle de comportement des sols non saturés dérivé par Collin (2003) and Collin et. al (2002). Ce dernier modèle suit la formulation du Modèle de Barcelone (Alonso et al. 1990, Gens and Alonso 1992), qui considère les effets de succion (différence entre pression d'air et d'eau) sur la réponse mécanique.

Le modèle chemo-hydro-mécanique couple les équations d'équilibre et les équations constitutives, avec les équations d'écoulement et les équations de transport de contaminant. Le modèle d'écoulement prend en compte la condition de non saturation comme décrit par Collin (2003). Le modèle de transport de contaminant représente les phénomènes principaux de transport, à savoir, l'advection, la diffusion et la dispersion. Une description complète du modèle de transport de polluant est donnée par Radu et al. (1994).

Dans la section suivante, les équations pour le comportement chemo-hydro-mécanique des argiles non saturées sont présentées. Ensuite, deux exemples numériques sont discutés. Le premier problème consiste en un test de mouillage d'une argile avec un contaminant organique. Le second problème représente une excavation dans une argile gonflante. Les simulations numériques sont effectuées à l'aide du code de calcul éléments finis LAGAMINE (Charlier, 1987).

2. Modèle Constitutif

2.1 Formulation générale

Les équations constitutives incrémentales relient le tenseur des déformations $\dot{\varepsilon}_{ij}$ au tenseur des contraintes σ_{ij} , à la succion s , et à la concentration massique de contaminant c . La compaction est supposée positive. La succion est définie par la différence entre la pression d'air et la pression d'eau ($s \geq 0$). La concentration massique est le ratio de la masse de contaminant et de la masse totale de fluide, normalisé par une valeur de référence ($c \leq 1$). Dans la formulation exposée ci-dessous, le tenseur des contraintes désigne alternativement la contrainte nette (différence entre contrainte totale et pression d'air), dans le cas de conditions non saturées, ou la contrainte effective dans le cas d'une saturation totale. Le taux de déformation se décompose en une partie élastique (réversible) et une partie plastique (irréversible). La partie élastique peut également être décomposée en des contributions mécanique, de succion, et chimique, c'est-à-dire

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^{e,m} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{e,s} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{e,c} + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

La déformation plastique se produit quand la condition de plasticité exprimée en fonction des contraintes est vérifiée. Cependant, cette déformation plastique peut être générée par des variations de succion ou de concentration pour un état de contrainte constant. La loi mécanique élastique reliant les contraintes aux déformations est donnée par

$$\dot{\sigma}_{kl} = C_{klji}^e \dot{\varepsilon}_{ij}^{m,e} \quad (2)$$

avec le tenseur élastique C_{klji}^e défini par

$$C_{klji}^e = 2G\delta_{ik}\delta_{jl} + \left[\frac{(1+e)}{3\kappa} \sigma_{mm} - \frac{2}{3}G \right] \delta_{ij}\delta_{kl} \quad (3)$$

où G est le module de cisaillement élastique, e est le ratio des vides, et κ est le coefficient élastique volumique.

La déformation élastique induite par une variation de succion est définie par

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{s,e} = \frac{1}{3(1+e)} \frac{\dot{s}}{(s + p_{at})} \delta_{ij} = h_{ij}^e \dot{s} \quad (4)$$

où p_{at} est la pression atmosphérique et κ_s est le paramètre de rigidité élastique défini dans le modèle d' Alonso-Gens. Cette déformation isotrope est contractante pour une augmentation de succion s (séchage) et dilatante pour une diminution de la succion (mouillage).

La déformation chimique élastique est également isotrope

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{c,e} = -\frac{1}{3} \beta \dot{c} \delta_{ij} = l_{ij}^e \dot{c} \quad (5)$$

Le coefficient β est le coefficient d'expansion chimique défini par Hueckel

$$\beta = -F_0 \beta_0 \exp[\beta_0(1-c + \ln c)] \left(\frac{1}{c} - 1 \right) \quad (6)$$

où F_0 et β_0 sont des constantes du matériau fonction du sol et du type de contaminant.

La déformation plastique est décrite suivant la théorie de la plasticité avec durcissement/adoucissement. Le critère de plasticité s'écrit

$$f(\sigma_{ij}, \theta) \leq 0 \quad (7)$$

où θ est une variable interne dépendant de la déformation plastique, de la succion et de la concentration de contaminant. Pendant un chargement plastique, la fonction de plasticité f vérifie la condition de cohérence

L'évolution de la variable interne θ est décrite par la loi générale de durcissement/adoucissement

$$\dot{\theta} = \frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon^p} \dot{\varepsilon}^p + \frac{\partial \theta}{\partial s} \dot{s} + \frac{\partial \theta}{\partial c} \dot{c} \quad (8)$$

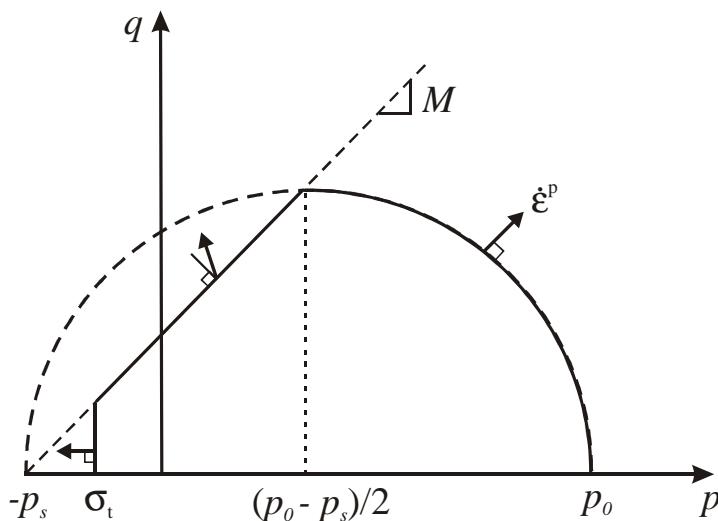


Figure 1. Surface de plasticité dans le plan de contraintes (q, p)

En particulier, dans le modèle plastique décrit dans la section suivante, la composante volumétrique du taux de déformation plastique est considérée dans la loi de durcissement/adoucissement. De manière générale, le vecteur du taux de déformation plastique est défini par une loi d'écoulement non-associée

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\Lambda}^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (9)$$

où g est le potentiel plastique et $\dot{\Lambda}^p$ est le multiplicateur plastique.

2.2 Comportement Plastique

On considère trois mécanismes plastiques: effondrement des pores (pore collapse) ou compaction plastique, rupture par frottement avec dilatation éventuelle, et rupture en traction. Ces trois mécanismes sont représentés par trois modèles plastiques avec les critères de plasticité suivants

$$f_1 = q^2 + M^2(p + p_s)(p - p_0) = 0 ; \quad p > (p_0 - p_s)/2 \quad (10)$$

$$f_2 = q - M(p + p_s) = 0 ; \quad \sigma_t < p < (p_0 - p_s)/2 \quad (11)$$

$$f_3 = p + \sigma_t = 0 \quad (12)$$

où p_0 est la pression de pré-consolidation, p_s est une mesure de la cohésion ($p_s \geq 0$), σ_t est la résistance à la traction, et M est un paramètre relié à l'angle de frottement et fonction de l'angle de Lode comme décrit par Van Eekelen (1980). Les invariants des contraintes p et q sont définis comme suit : $p = \sigma_{kk}/3$ et $q = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}}$, où s_{ij} est la partie déviatrice du tenseur de contrainte. Dans le plan des contraintes (q , p) f_1 est représentée par une ellipse qui intercepte l'axe p en $-p_s$ et p_0 (voir Fig. 1). La fonction de plasticité f_2 est représentée par une ligne droite de pente M et d'intercepte sur l'axe p , $-p_s$. Le critère de rupture en traction $f_3 = 0$ est représenté par une ligne verticale sur la figure 1. Le modèle de rupture en traction est un modèle de plasticité parfaite avec une loi d'écoulement associée.

Dans le cas d'une rupture de type cohésive-frottante, les déformations plastiques se développent selon une loi d'écoulement non-associée. Le potentiel plastique a la même forme que l'équation (12) avec M remplacé par M' , ce dernier paramètre représentant la dilatance. La variable interne p_s de l'équation (12), qui est reliée à la cohésion, varie selon une loi linéaire en fonction de la succion et de la concentration

$$p_s = p_s^* + k_s s + k_c c \quad (13)$$

où k_s ($k_s \geq 0$) et k_c ($k_c \leq 0$) sont des constantes, et p_s^* est la valeur du paramètre p_s en condition saturée ($s = 0$) et pour un état chimique neutre ($c = 0$). La loi de durcissement/adoucissement (13) est illustrée sur la figure 2.

La loi de durcissement/adoucissement pour le modèle d'effondrement des pores est présentée ci-dessous.

2.3 Loi de durcissement/adoucissement pour le modèle d'effondrement des pores (pore collapse)

Le modèle d'effondrement des pores est basé sur le modèle de Cam clay. La surface de plasticité f_1 est elliptique, la loi d'écoulement est associée, et la variable interne p_0 varie en fonction de la composante volumétrique de la déformation plastique. Les effets de succion et de concentration chimique sur la variable interne p_0 sont décrits par

$$p_0(s, c) = p_c S(c) \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\lambda(0)-\lambda(s)} \quad (14)$$

où p_c est une pression de référence, p_0^* est la pression de pré-consolidation pour $s = 0$ et $c = 0$, et $\lambda(0)$ est le coefficient de compression à zéro succion. Le coefficient de compression $\lambda(s)$ est une fonction décroissante de la succion s

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta's) + r] \quad (15)$$

où r est une constante qui représente la rigidité maximum de l'argile (à grande succion), et β' est une constante qui contrôle l'augmentation de rigidité avec une augmentation de succion, comme défini dans le modèle d' Alonso-Gens. Pour une valeur de concentration nulle, l'équation (15) définit la courbe Chargement-Effondrement (Loading-Collapse, LC) représentée sur la figure 2a.

La fonction d'adoucissement chimique est de la forme suivante (Hueckel, 1997)

$$S(c) = \exp(-ac) \quad (16)$$

où a est une constante représentant l'intensité d'adoucissement chimique. La ligne d'adoucissement chimique (Chemical Softening, CHS) est tracée sur la figure 2b.

Le paramètre p_0^* obéit à la loi de durcissement volumique

$$\dot{p}_0^* = \frac{1+e}{\lambda - \kappa} p_0^* \dot{\epsilon}_v^p \quad (17)$$

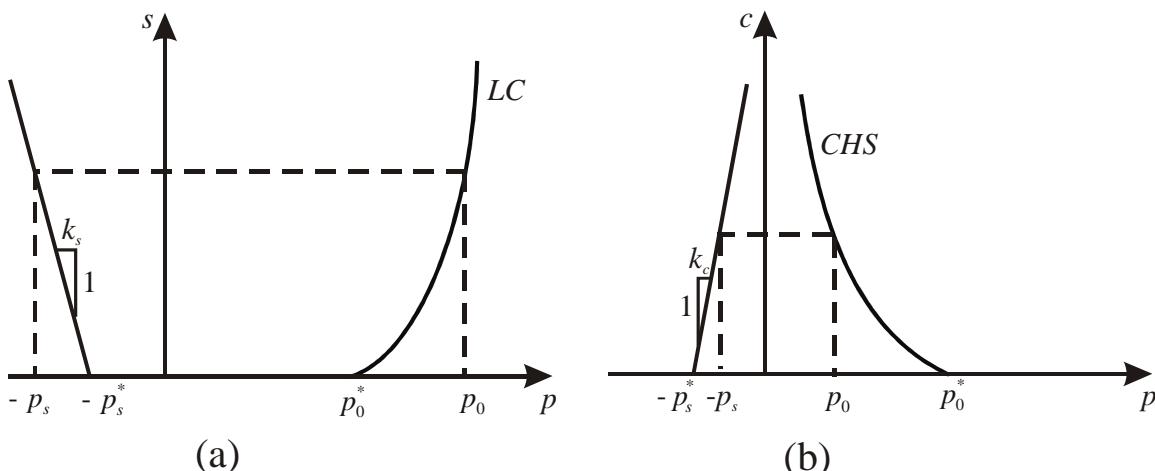


Figure 2: Surface de plasticité: a) dans le plan (s, p); b) dans le plan (c, p)

3. Exemples Numériques

3.1 Effets chimiques sur le comportement d'une argile lors du mouillage par un contaminant

Pour investiguer les effets combinés de la chimie et de la succion sur le comportement d'une argile, un test de mouillage représentatif est modélisé, pour lequel le liquide mouillant est contaminé par un liquide organique. Dans ce test, un échantillon d'argile cylindrique de 2 cm d'épaisseur est placé dans un oedomètre à parois rigides, dans lequel il se déforme verticalement uniquement. Une contrainte externe verticale de 133 kPa est appliquée à l'échantillon, et l'on suppose que la contrainte horizontale vaut 83 kPa ($K_0 = 0.625$). La pression d'air est égale à la pression atmosphérique et l'on fait l'hypothèse qu'elle reste constante pendant le test. La succion vaut initialement 78.6 MPa ce qui corresponds à un degré de saturation de 0.49. La concentration massique initiale de contaminant vaut zéro. Pour modéliser le test de mouillage, on applique simultanément à l'extrémité supérieure de l'échantillon une diminution de succion jusqu'à la valeur $s = 28.6$ MPa, et une augmentation de concentration de contaminant jusqu'à la valeur $c = 0.6$. A l'extrémité inférieure la succion reste fixe et la concentration varie librement.

Le comportement de l'argile est représenté par des paramètres typiques, provenant de la littérature, et listés dans le tableau 1 ($k_{w,int}$ est la perméabilité intrinsèque, d_m est le coefficient de diffusion moléculaire). En particulier, les paramètres de succion sont les mêmes que ceux utilisés par Collin (2003) pour représenter le comportement d'une bentonite. Les paramètres chimiques sont choisis dans un intervalle de valeurs proches de celles déterminées par Hueckel (1997) pour modéliser l'interaction d'une argile avec des liquides organiques (éthanol et dioxine), sur base des résultats expérimentaux de Fernandez et Quigley (1991). Deux valeurs de la pression de pré-consolidation p_0^* sont considérées afin de mettre en valeur les différentes réponses possibles du modèle.

Considérons comme référence la solution du test de mouillage sans contaminant. La diminution de la succion à partir de sa valeur initiale jusqu'à la distribution finale représentée sur la figure 3a entraîne une expansion de l'échantillon, comme indiqué sur la figure 3b (cercles). Les réponses obtenues pour les deux valeurs de la pression de pré-consolidation sont identiques et restent dans le domaine élastique.

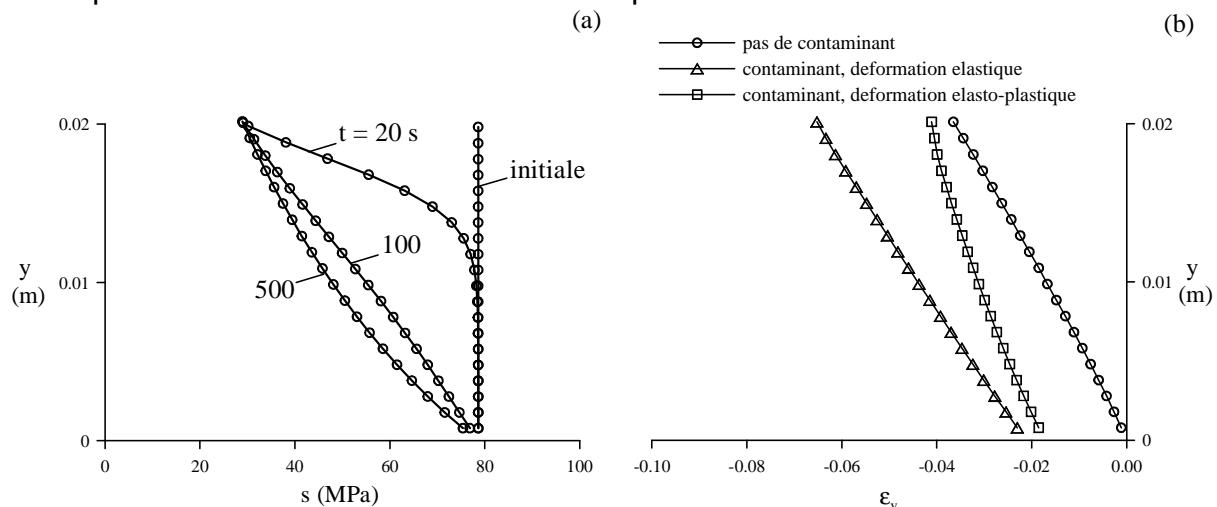


Figure 3: Réponse au test de mouillage: a) distribution de la succion; b) distribution de la déformation volumique

Tableau I. Paramètres typiques pour une argile en contact avec un liquide organique utilisés dans le modèle du test de mouillage.

	κ	$\lambda(0)$	e	G	M	M'	p_s	p_0^{*1}	p_0^{*2}
Mécanique				MPa			MPa	MPa	MPa
	0.02	0.1	1.0	10	1.2	0.18	24.25	2000	0.2
Chimique	F_0	β_0	a	k_c		Transport	$k_{w,int}$	d_m	
	-0.04	1.32	3.45	MPa			m^2	m^2/s	
				-5.0			$4.7 \cdot 10^{-18}$	10^{-9}	
Succion	κ_s	r	β'	k_s					
	0.11	0.3	MPa^{-1}	0.002					

¹ argile fortement sur-consolidée; ² argile légèrement sur-consolidée

L'influence du contaminant sur la réponse volumique est démontrée sur la figure 3b. Les graphes se réfèrent à la fin du processus au temps $t = 11000$ s, lorsque la concentration est devenue uniforme dans l'échantillon. Pour la plus grande valeur de p_0^* , $p_0^* = 1000$ MPa, le

modèle prédit une expansion chimique presque uniforme, en plus du gonflement due à la diminution de succion (triangles, Fig. 3b). Pour la plus petite valeur de p_0^* , $p_0^* = 0.2 \text{ MPa}$, les effets chimiques ne sont pas uniformes (carrés, Fig. 3b). Dans ce cas, la limite plastique est atteinte du fait de l'adoucissement chimique (diminution de p_0). En conséquence, une compaction chimique se produit. Notons que le choix des paramètres conduit à une valeur de compaction plastique inférieure à l'expansion chimique élastique. La déformation plastique est plus grande dans la région de faible succion, dans la partie supérieure de l'échantillon. Ce résultat démontre clairement la possibilité de modéliser le couplage entre les effets de succion et de contamination, ainsi que l'influence de l'historique du chargement.

3.3 Effets chimiques lors d'une excavation dans une argile

Dans le second problème aux limites, nous analysons les effets chimiques sur le comportement d'un tunnel creusé dans une argile. Nous considérons un tunnel circulaire de 5 m de diamètre à 220 m de profondeur dans une argile partiellement saturée. Les effets chimiques que nous tentons de modéliser se produisent lors de venues d'eau ayant un degré de salinité inférieur à celui du fluide contenu dans l'argile, qui est relativement ionisé. Le problème est formulé en tenant compte de la symétrie, comme indiqué sur la figure 4. Une zone de 100 m sur 100 m est discrétisée avec un maillage plus fin près du tunnel. En considérant une densité apparente initiale de 1816 kg/m^3 et l'accélération de la gravité égale à 10 m/s^2 , la contrainte nette dans le sol à la profondeur du tunnel vaut 3.89 MPa . On considère que les contraintes horizontales et verticales sont égales ($K_0 = 1$). La distribution de pression de pore initiale est en équilibre sous l'effet de la gravité, avec $p_w = -78.5 \text{ MPa}$ à la frontière supérieure du modèle (cela correspond à un degré de saturation de 0.49). La pression d'air est fixée à 100 kPa .

Les conditions aux frontières sont représentées sur la figure 4. Des contraintes normales sont appliquées à la frontière supérieure et à la frontière gauche, et un déplacement nul est imposé dans la direction horizontale pour la frontière droite et dans la direction verticale pour la frontière inférieure. La frontière du tunnel est considérée non drainée ainsi que l'axe de symétrie, tandis que les autres frontières sont drainées. Le creusement du tunnel est modélisé par une réduction de la contrainte normale appliquée au tunnel de sa valeur initiale jusqu'à la pression atmosphérique en 5 pas de 1000 s . Une concentration de contaminant $c = 0.6$ est alors imposée sur le pourtour du tunnel à un taux de $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

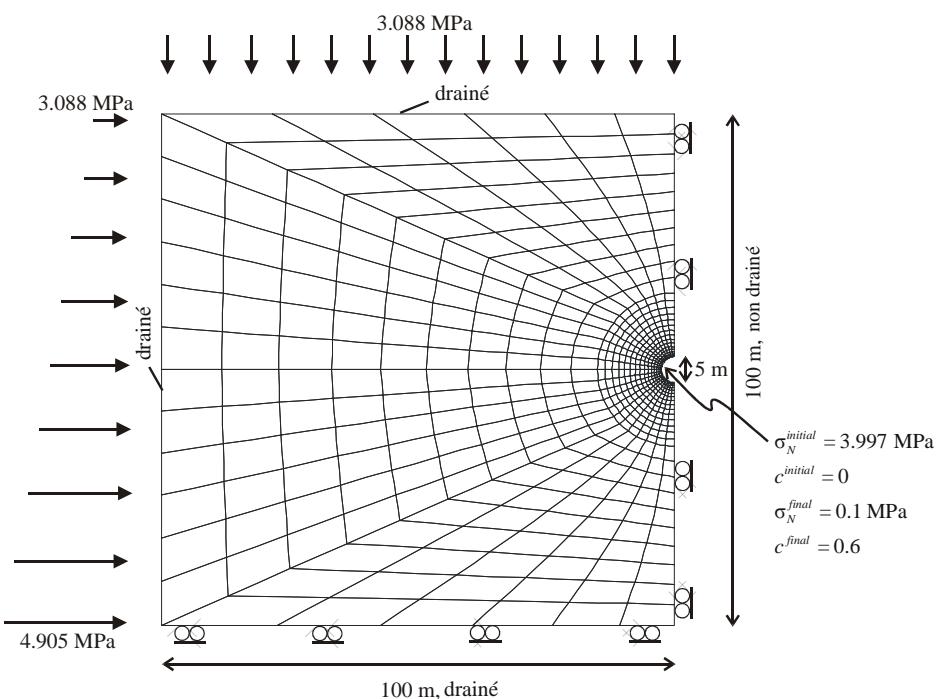


Figure 4: Modèle d'une excavation dans une argile gonflante

Les paramètres du modèle sont similaires à ceux listés dans le tableau 1 excepté : $G = 200$ MPa, $e = 0.66$, $p_0^{*1} = 1000$ MPa, $p_0^{*2} = 2$ MPa, $k_{w,int} = 4.7 \cdot 10^{-14}$ m², et $d_m = 3 \cdot 10^{-8}$ m²/s. Notons que les paramètres chemo-mécaniques déterminés dans le cas d'interactions argile-liquide organique sont utilisés, à défaut de paramètres adéquates pour représenter les interactions de l'eau faiblement ionisée avec l'argile. Deux cas sont analysés. Dans le premier cas le comportement est chemo-élastique ($p_0^* = 1000$ MPa), et dans le deuxième cas la réponse est élasto-plastique dans une zone proche du tunnel ($p_0^* = 2$ MPa).

Considérons le comportement chemo-mécanique de l'argile après un temps $t = 3 \cdot 10^8$ s. A cet instant, le contaminant (eau faiblement ionisée) a pénétré dans le sol sur une distance d'environ 10 m, grâce au processus de diffusion moléculaire. Ceci est visible sur la figure 5, où r représente la distance radiale à la frontière du tunnel. Le comportement volumique est représenté sur la figure 6. La figure 6a montre que les effets chimiques induisent un gonflement dans l'argile. Pour comparaison, le creusement du tunnel en l'absence d'effets chimiques se produit à volume constant, en accord avec la solution élastique du problème. La composante de compaction chemo-plastique qui apparaît dans le cas où $p_0^* = 2$ MPa, peut être mesurée par la différence entre la courbe correspondant à une déformation élasto-plastique, et la courbe correspondant à une déformation entièrement élastique. Pour cet exemple particulier, la partie plastique de compaction est inférieure à la partie d'expansion chemo-élastique. La tendance du sol à gonfler sous les effets chimiques induits par le contact avec l'eau, résulte en une augmentation de la contrainte isotrope p (voir Fig. 6b). Dans le cas plastique, l'augmentation de p est moins importante, et la valeur maximum est atteinte à une certaine distance de la frontière du tunnel.

En ce qui concerne le comportement en cisaillement, les effets chimiques induisent une augmentation significative des déformations et des contraintes de cisaillement. Notons que le choix d'une cohésion très grande ($p_s = 24.25$ MPa) empêche la rupture par frottement, et entraîne des déformations plastiques de type effondrement des pores (pore collapse).

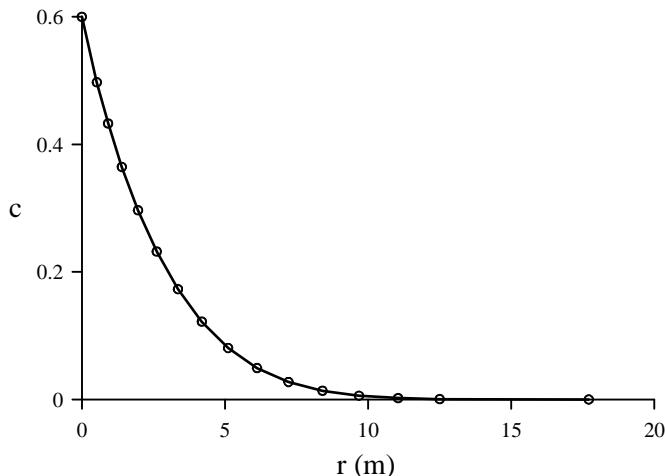


Figure 5: Distribution de la concentration de contaminant.

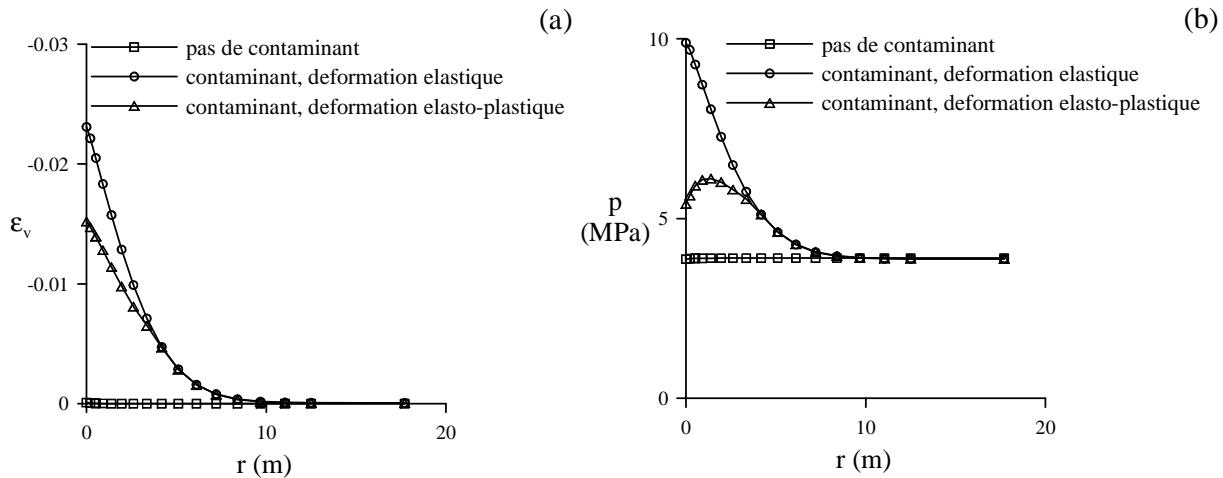


Figure 6: Effets chimiques sur le comportement volumique : a) distribution de la déformation volumique; b) distribution de la contrainte isotope.

Les effets chimiques sur la convergence du tunnel sont représentés sur la figure 7. La convergence est calculée comme le déplacement relatif entre le point le plus haut et le point le plus bas de la frontière du tunnel. Dans le cas d'un comportement purement mécanique élastique, la convergence calculée coïncide avec la solution de Lamé (cercles, Fig. 7). Dans le cas d'un comportement chemo-élastique expansif, les effets chimiques résultent en une très faible diminution de la convergence. Dans le cas où les effets chimiques entraînent des déformations plastiques de compaction, la convergence du tunnel est nettement plus importante. Notons que la différence entre la convergence verticale et horizontale est négligeable.

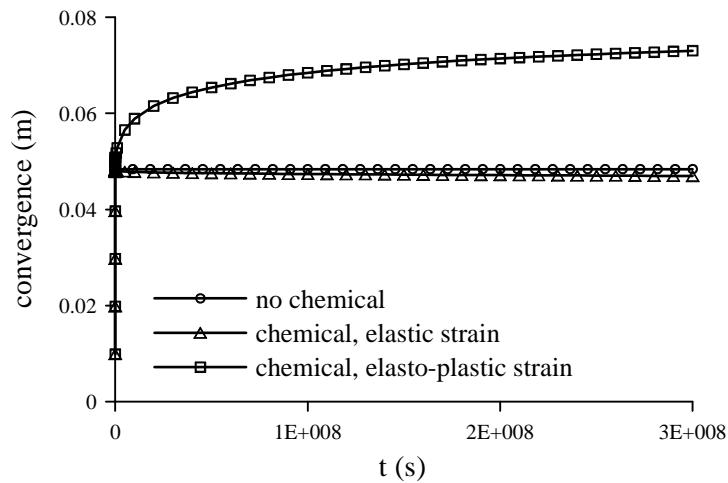


Figure 7: Effets chimiques sur la convergence du tunnel.

4. Remarques finales

Un modèle chemo-hydro-mécanique pour sols partiellement saturés a été présenté, qui se base sur la formulation de Collin (2003) et sur le concept d'adoucissement chimique proposé par Hueckel (1997). Pour modéliser la dégradation chimique des propriétés de résistance, un mécanisme d'adoucissement chimique est introduit sous forme d'une loi de décroissance linéaire de la cohésion en fonction de la concentration de contaminant. Cependant, l'effet de ce mécanisme n'a pas été considéré dans les exemples présentés dans ce papier. Les deux exemples numériques discutés démontrent les capacités du modèle. Il apparaît clairement que les deux types de sollicitations environnementales, variation de succion et variation des

propriétés chimiques du fluide contenu dans le sol, jouent un rôle important vis-à-vis de l'apparition de déformations significatives dans le sol, ou bien, dans le cas où ces déformations sont empêchées, de contraintes de l'ordre de celles généralement imposée lors de sollicitations mécaniques.

D'après les auteurs, des expériences visant à étudier les effets combinés des variations de succion et de concentration de contaminant n'ont pas encore été reportées dans la littérature. Le modèle proposé peut être utilisé pour concevoir ce type d'expérience en laboratoire, ou à fortiori, des expériences de terrain. L'influence des propriétés chimique du fluide sur la succion doit également être investigué.

Remerciements

Ce travail est sponsorisé par le Ministère Belge de l'Education dans le cadre du projet de recherche commun: *Qualité et durabilité de la protection des nappes aquifères sous sites d'enfouissement technique avec barrières argileuses d'étanchéité* et par la Fondation Nationale des Sciences Naturelles de Chine dans le cadre du projet No.59878009. Nous remercions ces différents organismes pour leur soutien.

5. Références bibliographiques

- Alonso EE, Gens A, Josa A (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique* 40(3): 405-430.
- Boukpeti N, Charlier R, Hueckel T (2003) Modelling contamination of clays, VII International conference on Computational Plasticity(COMPLAS 2003), Barcelona.
- Charlier R. Approche unifiée de quelques problèmes non-linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. *Thèse de doctorat de l'Université de Liège*, 1987.
- Collin F (2003) Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les sols et les roches tendres partiellement saturés. *Thèse de doctorat de l'Université de Liège*.
- Collin F, Cui YJ, Schroeder C, Charlier R (2002) Mechanical Behavior of Lixhe chalk partly saturated by oil and water: experiment and modelling. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 26: 897-924.
- Di Maio C (1996) Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Geotechnique* 46(4): 695-707.
- Hueckel T (1997) Chemo-plasticity of clays subjected to stress and flow of a single contaminant. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 21: 43-72.
- Fernandez F and Quigley RM (1991) Controlling the destructive effect of clay-organic liquid interactions by application of effective stresses. *Canadian Geotechnical Journal* 28: 388-398.
- Guimaraes L do N, Gens A, Sanchez M, Olivella S (2001) Chemo-mechanical modelling of expansive clays. *6th International Workshop on Key Issues on Waste Isolation Research, Paris*.
- Nova R, Castellanza R, Tamagnini C. A constitutive model for bonded geomaterials subject to mechanical and/or chemical degradation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003; 27:705-732.
- Radu JP, Biver P, Charlier R, Cescotto S (1994) 2 and 3D finite element modelling of miscible pollutant transport in groundwater, below the unsaturated zone. *International Conference on Hydrodynamics, Wuxi, China*.
- Van Eekelen H A M (1980) Isotropic yield surfaces in three dimensions for use in soil mechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 4: 98-101.