

Un modèle de comportement thermo-plastique pour les sols non-saturés. Application aux stockages de déchets nucléaires : XXV^{èmes} Rencontres AUGC – Prix « René HOUPERT »

Bertrand François

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL – Laboratoire de Mécanique des sols
– Station 18 – 1015 Lausanne – Suisse.**

RESUME. Un modèle constitutif thermo-hydro-mécanique dédié aux sols fins a été développé afin de prédire le comportement des géomatériaux intervenant dans la problématique du confinement des déchets nucléaires en couche géologique profonde. Ce modèle considère l'aspect couplé des processus thermique, hydrique et mécanique. Les équations constitutives sont présentées. L'implémentation de cette loi de comportement dans deux logiciels d'éléments finis a permis une étude rigoureuse de plusieurs scénarios rencontrés dans les sols entourant les futurs déchets radioactifs. Les enseignements de chacune de ces études ainsi que l'apport du modèle utilisé sont présentés.

MOTS-CLÉS : thermo-plasticité, sols non-saturés, stockage de déchets nucléaires.

ABSTRACT. A thermo-hydro-mechanical constitutive model for fine-grained soils has been developed in order to predict the behaviour of geomaterial involved in the nuclear waste disposal in deep geological formation. This model considers the thermal, water retention and mechanical behaviours of soils as coupled processes. The constitutive equations are presented. This model has been introduced in two finite element codes. So doing, the study of several scenarios involving thermo-hydro-mechanical processes in soils around radioactive wastes has been performed. The main contributions of the developed model as well as the key findings of those studies are addressed.

KEYWORDS : thermo-plasticity, unsaturated soils, nuclear waste disposal.

1. INTRODUCTION

La réponse mécanique des sols fins saturés et/ou non-saturés soumis à des variations d'humidité, de température et de contraintes est régie par un comportement élasto-plastique complexe. Sous certaines conditions, les déformations irréversibles que subit le matériau peuvent être dommageable pour la stabilité des ouvrages que supporte le sol. Les concepts de thermo-plasticité, c'est-à-dire des contractions irréversibles du sol produites par une augmentation de température, ou d'effondrement sous humidification doivent être considérés dans la modélisation des déformations du sol soumis à des variations simultanées de contraintes mécaniques, de température et d'humidité. La non prise en compte de ces effets irréversibles est dangereuse car elle surestime souvent la sécurité des ouvrages.

Ainsi, pour étudier le comportement de sols soumis à des variations thermo-hydro-mécaniques (THM), les modèles constitutifs qui prédisent habituellement la relation entre contrainte et déformation doivent être étendus aux conditions non-isothermes et non-saturées (entre autres, Khalili et Loret, 2001). Parmi les applications géotechniques incluant ces effets, on compte, entre autres, la

problématique des stockages de déchets nucléaires (Laloui *et al.*, 2008), les structures énergétiques (Laloui *et al.*, 2006), les forages pétroliers (Morgenstern, 1981) ou les câbles à haute tension souterrains (Anders et Radhakrishna, 1988). Dans ce cadre, cet article présente un modèle de comportement THM avancé. Basé sur des évidences expérimentales, les équations constitutives sont détaillées. Ce modèle, implémenté dans deux codes d'éléments finis, est utilisé pour prédire le comportement du sol entourant les futurs stockages de déchets nucléaires en formations profondes.

2. EVIDENCES EXPERIMENTALES

Un modèle constitutif décrivant le comportement des sols en conditions non-isotherme et non-saturée doit considérer les différents couplages existant entre les parties thermique, hydrique et mécanique (Figure 1). Salager et al. (2008) expose une étude expérimentale de ces interactions sur un limon sableux.

2.1. INTERACTIONS THERMO-MECANIKES

Contrairement à la majorité des matériaux, le sol peut subir des contractions irréversibles lorsqu'il est chauffé. Ce phénomène se produisant dans des conditions normalement consolidées ou légèrement surconsolidées est caractéristique de la thermo-plasticité. Au contraire, les sols en état fortement surconsolidé sont soumis à des dilatations réversibles sous augmentation de température (Laloui et Cekerevac, 2003). La température ne semble pas influencer les compressibilités mécaniques du sol entre 0°C et 100°C, par contre elle tend à diminuer la contrainte de préconsolidation.

2.2. INTERACTIONS HYDRO-MECANIKES

Les interactions entre la déformation du squelette solide et le comportement hydrique doivent être considérées dans les deux sens. D'une part, le processus de désaturation qui s'accompagne d'une augmentation de succion, définie comme la différence entre les pressions d'air et d'eau dans les pores, produit un élargissement du domaine élastique, dû aux effets capillaires. La re-saturation peut donner lieu à un gonflement réversible, pour les sols surconsolidés, ou une contraction irréversible, en conditions normalement consolidées (Nuth et Laloui, 2007). D'autre part, l'état du squelette solide influe sur les propriétés de rétention d'eau du matériau. Plus la porosité est faible et plus la degré de saturation sera élevé pour une même succion (Gallipoli *et al.*, 2003).

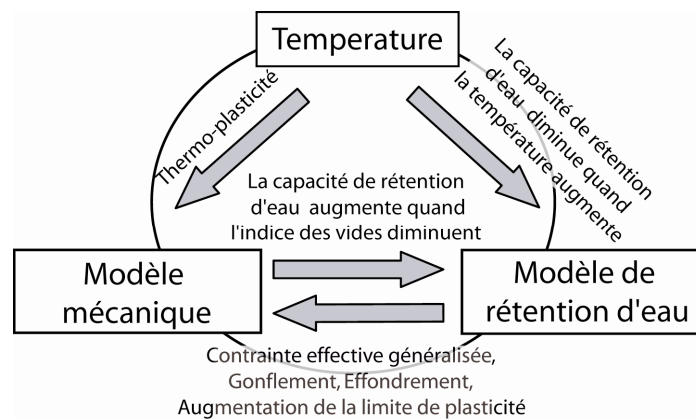


Figure 1 : Vue schématique des interactions entre les parties thermique, mécanique et de rétention d'eau considérées par le modèle de comportement.

2.3. INTERACTIONS THERMO-HYDRIQUES

Dû à la modification de la tension superficielle de l'eau avec la température, la capacité de rétention d'un sol diminue quand la température augmente. Ainsi, pour une succion donnée, le sol contiendra moins d'eau à température élevée qu'à température ambiante (Romero *et al.*, 2001). La succion d'entrée d'air, qui caractérise la limite entre le domaine saturé et non-saturé, est ainsi réduite quand la température augmente.

3. EQUATIONS CONSTITUTIVES

Basé sur les évidences expérimentales exposées ci-dessus, un modèle de comportement thermo-plastique pour sols fins saturés et non-saturés a été développé. Ce modèle est construit à partir de deux schémas constitutifs inter-connectés : la partie mécanique et la partie de rétention d'eau. Ces deux aspects sont couplés grâce aux interactions THM (Section 2) et à la variable unique de contrainte (Section 3.1). Les équations de base du modèle sont présentées ci-dessous. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à François et Laloui (2008).

3.1. ETAT DE CONTRAINTE

En condition non-saturée, la co-existence des phases liquide et gazeuse dans les pores induit une contrainte interne supplémentaire dans le matériau : la succion. Celle-ci doit être prise en compte dans les équations décrivant la réponse mécanique du matériau. Le modèle développé utilise un concept à contrainte unique (Bishop, 1959) appelée contrainte effective généralisée (Nuth et Laloui, 2007) :

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - p_a \delta_{ij}) + S_r (p_a - p_w) \delta_{ij} = (\sigma_{ij} - p_a \delta_{ij}) + S_r s \delta_{ij} \quad [\text{Eq. 1}]$$

où σ_{ij} , p_a , p_w et S_r sont la contrainte totale, la pression d'air, la pression d'eau et le degré de saturation. s est la succion et δ_{ij} le symbole de Kroenecker.

3.2. LE MODELE MECANIQUE

Le modèle mécanique se base sur un concept élasto-plastique où la déformation totale $d\epsilon_{ij}$ est scindée en composante réversible (élastique) $d\epsilon_{ij}^e$ et irréversible (plastique) $d\epsilon_{ij}^p$. Dû aux fortes non-linéarités, la formulation est donnée sous forme incrémentale. La composante élastique est reliée aux variations de contrainte effective $d\sigma'_{ij}$ et de température dT via la matrice d'élasticité E_{ijkl} et le coefficient de dilatation thermique du squelette solide β'_s :

$$d\epsilon_{ij}^e = E_{ijkl}^{-1} d\sigma'_{kl} - \frac{1}{3} \beta'_s dT \delta_{ij} \quad [\text{Eq. 2}]$$

La convention de signe définit la compression comme positive. L'élasticité est non-linéaire car les coefficients d'élasticité et le coefficient de dilatation thermique du sol β'_s dépendent de l'état de contrainte. En plus, β'_s dépend également de la température (François et Laloui, 2008).

La composante plastique de la déformation est déterminée via deux surfaces de charge inter-connectées qui limitent le domaine élastique. Ce concept, connu sous le nom de plasticité à mécanismes multiples (Mandel, 1965), considère deux mécanismes de plasticité unifiés à travers une variable d'écrouissage unique : la déformation volumique plastique ϵ_v^p . L'expression des surfaces de charge isotrope et déviatoire, f_{iso} et f_{dev} respectivement, est la suivante (Figure 2) (Hujeux, 1979) :

$$f_{iso} = p' - p'_c r_{iso} = 0 \quad ; \quad f_{dev} = q - Mp' \left(1 - b \ln \frac{d p'}{p'_c} \right) r_{dev} = 0 \quad [\text{Eq. 3}]$$

où p' est la contrainte effective moyenne et q la contrainte déviatoire. M , b et d sont des paramètres du matériau. L'effet de la déformation plastique, de la température et de la succion intervient à travers la contrainte de préconsolidation p'_c commune aux deux expressions (Figure 2) :

$$p'_c(\varepsilon_v^p, T, s) = \begin{cases} p'_{c0} \exp\{\beta \varepsilon_v^p\} \{1 - \gamma_T \log[T/T_0]\} & \text{if } s \leq s_e \\ p'_{c0} \exp\{\beta \varepsilon_v^p\} \{1 - \gamma_T \log[T/T_0]\} \{1 + \gamma_s \log[s/s_e]\} & \text{if } s \geq s_e \end{cases} \quad [\text{Eq. 4}]$$

où p'_{c0} est la contrainte de préconsolidation initiale du matériau, à température ambiante T_0 et en condition saturée (c'est-à-dire pour une succion inférieure à la succion d'entrée d'air s_e). β , γ_T et γ_s sont des paramètres du matériaux.

r_{iso} et r_{dev} sont les rayons d'écrouissage des mécanismes isotrope et déviatoire, respectivement. Ils permettent une activation progressive de la plasticité depuis un noyau élastique jusqu'à la surface de plasticité externe correspondant à un rayon d'écrouissage unitaire (Hujeux, 1979). Les lois d'écoulement des deux mécanismes sont les suivantes :

$$d\varepsilon_{ii}^{p,iso} = \frac{\lambda_{iso}^p}{3} \quad ; \quad d\varepsilon_{ij}^{p,dev} = \lambda_{dev}^p \frac{1}{Mp'} \left[\frac{\partial q}{\partial \sigma'_{ij}} + \alpha \left(M - \frac{q}{p'} \right) \frac{1}{3} \delta_{ij} \right] \quad [\text{Eq. 5}]$$

Les multiplicateurs plastiques des mécanismes isotrope et déviatoire, λ_{iso}^p et λ_{dev}^p , sont déterminés via l'équation de consistance. α est un paramètre du matériau. L'incrément de déformation volumique plastique totale est la somme des incréments dus aux mécanismes isotrope et déviatoire.

3.3. LE MODELE DE RETENTION D'EAU

La caractérisation de l'état de saturation du matériau en fonction de la succion est essentielle car elle influence l'état de contrainte dans le matériau [Eq. 1]. Le processus de désaturation qui accompagne une augmentation de succion se produit principalement lorsque la succion d'entrée d'air s_e est atteinte. Ainsi, s_e constitue une limite de désaturation qui dépend de la température (Section 2.3) et de la densité du matériau (Section 2.2). Au cours de la re-saturation, un phénomène d'hystérèse hydrique se produit. Pour une même succion, le degré de saturation du sol sur un chemin d'humidification est inférieur à celui observé sur un chemin de séchage. Le modèle de rétention d'eau considère deux mécanismes hydriques, f_{dry} et f_{wet} respectivement, pour représenter successivement la courbe de séchage et d'humidification (Figure 3):

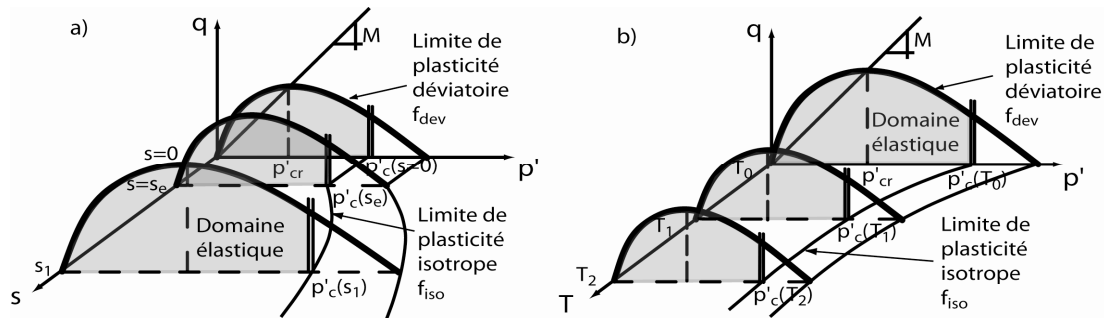


Figure 2 : Effet de la succion (a) et de la température (b) sur la forme des limites de plasticité.

$$f_{dry} = s - s_d = 0 \quad ; \quad f_{wet} = s_d s_{hys} - s = 0 \quad [\text{Eq. 6}]$$

où s_{hys} est un paramètre du matériau définissant l'ouverture de l'hystérèse hydrique. La limite de séchage s_d évolue au cours de la désaturation et dépend de la température et de la déformation volumique ε_v subie par le squelette solide :

$$s_d = s_{d0} \exp(-\beta_h \Delta S_r) \{1 - \theta_T \log[T/T_0] - \theta_e \log[1 - \varepsilon_v]\} \quad [\text{Eq. 7}]$$

β_h , θ_T et θ_e sont des paramètres du matériau. ΔS_r est la variation de saturation par rapport à l'état initial. s_{d0} est la limite de séchage initial (François et Laloui, 2008).

4. APPLICATIONS AUX LIMITES

Après une validation du modèle basée sur des essais de laboratoire de la littérature, cette loi de comportement a été implémentée dans deux logiciels d'éléments finis : la partie saturée dans COMES-GEO (Sanavia *et al.*, 2006) et le modèle dans son ensemble dans LAGAMINE (Charlier *et al.*, 2001). Ces outils numériques performants considèrent le sol comme un milieu tri-phasique non-isothermes au sein duquel des phénomènes de diffusion des phases fluides et de la chaleur se produisent et interagissent avec la déformation du squelette solide. Différentes applications aux limites impliquant des phénomènes thermo-hydro-mécaniques, qui se focalisent principalement sur la problématique du comportement du sol autour des stockages de déchets nucléaires en profondeur, ont ainsi pu être étudiées grâce à ces deux logiciels.

4.1. CONSOLIDATION THERMIQUE

Cette première application qui étudie la consolidation thermique d'une colonne de sol saturé dont la solution analytique est connue (Aboustit *et al.*, 1985) permet de valider l'outil numérique. La colonne de 7 m de haut, drainée en son sommet et ayant un comportement thermo-élastique linéaire, est soumise à une charge de 1kPa et à une augmentation de température de 50°C en surface. Les résultats de simulation de l'évolution des tassements, des pressions d'eau et de la température à différentes hauteurs, obtenus en utilisant COMES-GEO et LAGAMINE, sont comparés avec la solution analytique. Les résultats correspondent parfaitement entre eux et avec la solution analytique ce qui tend à valider les outils numériques utilisés. Une extension du cas de base considérant de la thermo-plasticité a aussi été étudiée (Sanavia *et al.*, 2008).

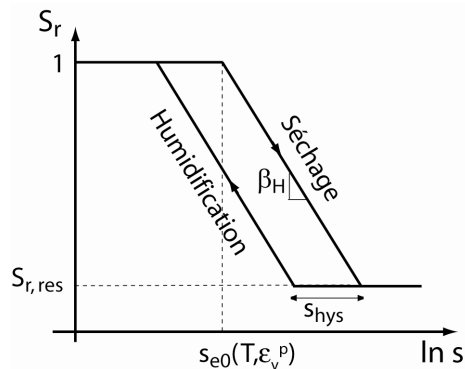


Figure 3 : Modélisation de la courbe de rétention d'eau.

4.2. COMPORTEMENT THM D'UN CYLINDRE CREUX

Dans le cadre du projet Européen TIMODAZ étudiant l'effet de la température sur la zone endommagée entourant les futurs stockages de déchets nucléaires (www.timodaz.eu), il a été proposé de prédire le comportement de cylindres creux constitués d'argile de Boom simulant l'excavation et les premières années d'exploitation des galeries. Les résultats de simulation utilisant la loi thermo-plastique en conditions saturées montrent la naissance de la zone endommagée provoquée par la phase d'excavation et son évolution durant la phase de chauffe. La figure 4a souligne l'aspect dilatant dans la périphérie proche du trou centrale (c'est-à-dire des déformations volumiques plastiques négative) et le comportement contractant dans la partie extérieure (déformations volumiques plastiques positives). La plasticité est principalement générée par le mécanisme déviatoire (Figure 4b).

4.3. EXPERIENCE ATLAS

L'expérience in-situ ATLAS, réalisée dans le laboratoire souterrain à Mol (Belgique) dans l'argile de Boom, est composé d'une résistance chauffante placée dans un forage horizontale à 223 m de profondeur et de deux forages instrumentés de part et d'autres de la résistance dans un même plan horizontal (De Bruyn et Labat, 2002). Les effets de la mise en chauffe de la résistance (successivement 900 Watts et 1800 Watts), sont mesurés au niveau des forages instrumentés en terme de contrainte totale, de température et de pression interstitielle. Les paramètres du matériau ont été déterminés à partir d'une analyse approfondie des résultats de la littérature sur l'argile de Boom. Des simulations numériques rigoureuses de l'expérience in-situ en condition axisymétrique ont été réalisées avec le logiciel LAGAMINE (François *et al.*, 2008). Ces résultats de simulation montrent une bonne corrélation avec les mesures in-situ (Figure 5). De plus, ils soulignent la nécessité d'utiliser un modèle de comportement thermo-plastique. Les déformations irréversibles dans le champ proche de la résistance chauffante provoquent une redistribution des contraintes sur une zone allant jusqu'à 15 m autour du point de chauffe.

4.4. EXPERIENCE FEBEX

Dans le laboratoire souterrain de Grimsel (Suisse) situé dans une formation granitique, une expérience grandeur nature d'une alvéole de stockage de déchets nucléaires reproduisant le concept espagnole a été réalisée. Les déchets ont été remplacés par un canister chauffant jusque 100°C. Ce canister est entouré de bentonite compactée, initialement non-saturée (FEBEX, 2000).

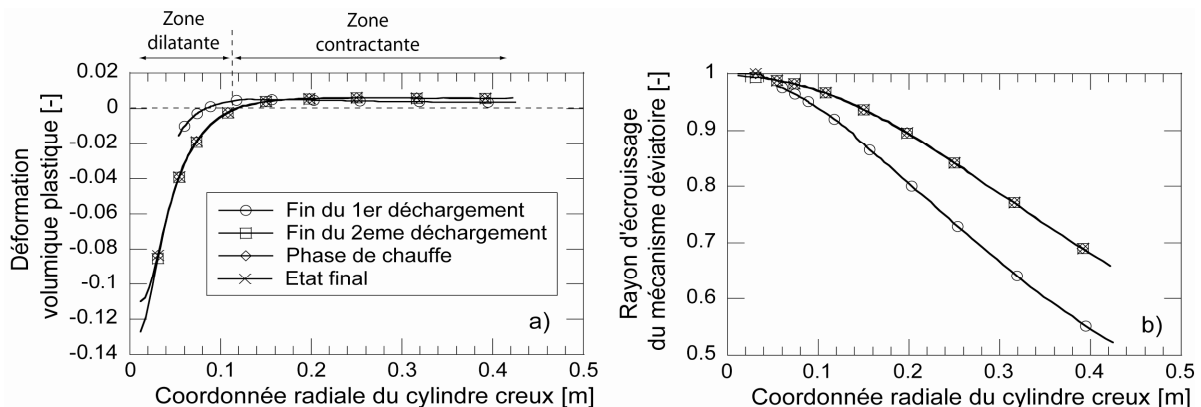


Figure 4 : Cylindre creux : Evolution des déformations volumiques plastiques (a) et du rayon d'écroutissage du mécanisme déviatoire (b) au cours de la sollicitations thermo-mécanique.

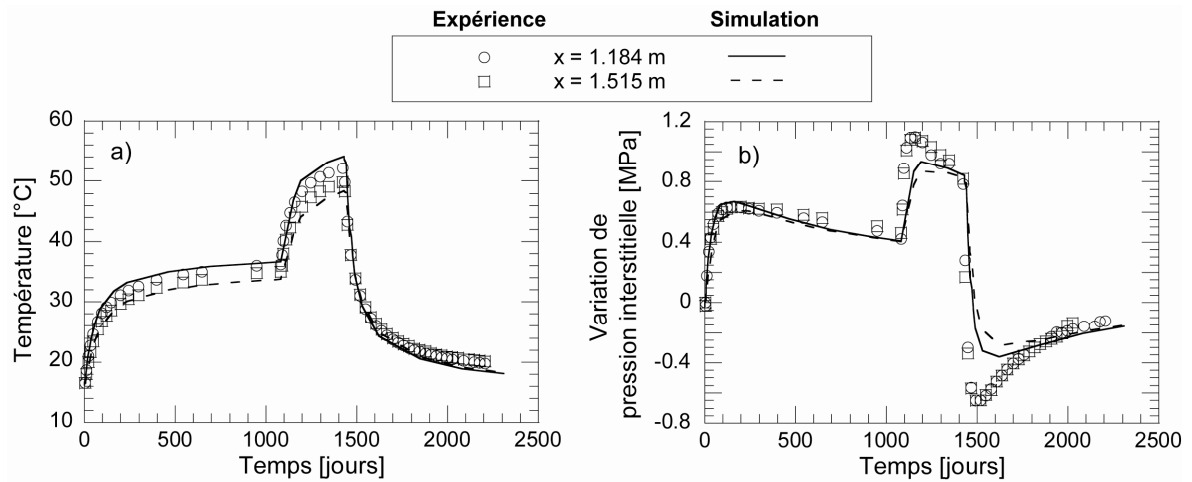


Figure 5 : Expérience ATLAS. Comparaison entre résultats de simulations et mesures in-situ. (a) Température, (b) variation de pression interstitielle. x est la distance à la résistance chauffante.

L'augmentation de température tend à désaturer la bentonite à proximité du canister tandis que le front de pression interstitielle provenant du granite en place se propage dans la bentonite à partir de la surface extérieure de l'alvéole. La phase liquide s'évapore donc à proximité du canister, migre vers les zones plus froides et se condense à proximité de la surface externe de l'alvéole. Ce processus a été modélisé grâce au logiciel LAGAMINE. D'un point de vue mécanique, l'utilisation du modèle développé a apporté un plus dans la prédiction des déformations subies par la bentonite, qui sont pour une grande part irréversibles.

5. CONCLUSIONS

Afin de prédire le comportement des géomatériaux intervenant dans le confinement des déchets nucléaires enfus en profondeur, une loi constitutive, qui combine les aspects de rétention d'eau avec la réponse mécanique en conditions non-isothermes, a été développée. Cette loi se base sur des évidences expérimentales soulignant le caractère couplé des processus THM à considérer. Grâce à la prise en compte de ces couplages dans le modèle développé, l'évolution multi-physique des propriétés des sols impliqués dans le confinement des déchets nucléaires a pu être étudiée grâce à des modélisations par éléments finis. Les résultats obtenus révèlent la nécessité de considérer les phénomènes irréversibles, tels que la thermo-plasticité ou l'effondrement sous humidification, dans la réponse global du massif de sol.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été partiellement financé par le Secrétariat d'Etat Suisse à l'Education et à la Recherche SER (bourse OFES C04.0021). L'auteur souhaite remercier Prof. L. Laloui pour son soutien et ses conseils avisés tout au long de ce travail.

7. BIBLIOGRAPHIE

Aboustit B.L., Advani S.H., Lee J.K. (1985) « Variational principles and finite element simulations for thermo-elastic consolidation » *Int. J. Num. Anal. Methods in Geomechanics*, 9, p. 49-69.

- Anders G., Radhakrishna H. (1988). « Computation of temperature field and moisture content in the vicinity of current carrying underground power cables ». *IEE Proceedings*, 135C(1), p. 51-62.
- Bishop A.W. (1959). « The principle of effective stress » *Tecnisk Ukeblad*, 39, p. 859-863.
- Charlier R., Radu J.P., Collin F. (2001). « Numerical modelling of coupled transient phenomena » *Revue Française de Génie Civil*, 5(6), p. 719-741.
- De Bruyn D., Labat S. (2002). « The second phase of ATLAS: the continuation of a running THM test in the HADES underground research facility at Mol » *Engineering Geology*, 64, p. 309-316.
- FEBEX (2000). « Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock » *Publicación técnica 10/2000*, ENRESA.
- François B., Laloui L. (2008) « ACMEG-TS: A constitutive model for unsaturated soils under non-isothermal conditions » *Int. J. Num. Anal. Methods in Geomechanics*, DOI: 10.1002/nag.712.
- François B., Laloui L., Laurent C. (2008) « Thermo-hydro-mechanical interpretation of the response of Boom Clay undergoing in-situ thermal loading ». *Computers and Geotechnics*. Submitted.
- Gallipoli D., Wheeler S.J., Karstunen M. (2003). « Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil » *Géotechnique*, 53(1), p. 105-112.
- Hujeux J.C. (1979). « Calcul numérique de problèmes de consolidation élastoplastique » *PhD Thesis*, Ecole Centrale de Paris.
- Khalili N., Loret B. (2001). « An elasto-plastic model for non-isothermal analysis of flow and deformation in unsaturated porous media: formulation » *Int. J. of Solids and Structures*, 38, p. 8305-8330.
- Laloui L., Cekerevac C. (2003). « Thermo-plasticity of clays: An isotropic yield mechanism » *Computer and Geotechnics*, 30, p. 649-660.
- Laloui L., François B., Nuth M., Peron H., Koliji A. (2008). « A thermo-hydro-mechanical stress-strain framework for modelling the performance of the clay barriers in deep geological repositories for radioactive waste » *1st European Conference on Unsaturated soils*, Durham, United Kingdom.
- Laloui L., Nuth M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanged pile. *Int. J. Num. Anal. Methods in Geomechanics*, 30, p. 763-781.
- Mandel, W. 1965. « Généralisation de la théorie de Koiter » *Int. J. of Solids and Structures*, 1, p. 273-295.
- Morgenstern N.R. (1981). « Geotechnical engineering and frontier resource development ». Rankine Lecture. *Géotechnique*, 31(3), p. 305-365.
- Nuth M., Laloui L. (2007). « New insight into the unified hydro-mechanical constitutive modeling of unsaturated soils » *3rd Asian Conference on Unsaturated Soils*, Nanjing, China, p. 109-126.
- Romero E., Gens A., Lloret A. (2001). « Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay » *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, p. 311-332.
- Salager S., François B., El Youssofi M.S., Laloui L., Saix C. (2008). « Experimental investigations on temperature and suction effects on mechanical behaviour of a sandy silt » *Soils and Foundations*. Accepted for publication.
- Sanavia L., François B., Bortolotto R., Luison L., Laloui L. (2008). « Finite element modelling of thermo-elasto-plastic water saturated porous materials » *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. In press.
- Sanavia L., Pesavento F., Schrefler B.A. (2006). « Finite element analysis of non-isothermal multiphase geomaterials with application to strain localization simulation » *Computational Mechanics*, 37(4), p. 331-348.