



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Mecanique 332 (2004) 153–159



Sur le caractère thermo-extensif de la surface de charge d'un sol non saturé

Frédéric Jamin, Moulay Saïd El Youssoufi, Christian Saix *

Laboratoire de mécanique et génie civil, UMR UMII-CNRS 5508, Université Montpellier II, cc 048, place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France

Reçu le 18 juin 2003 ; accepté après révision le 14 octobre 2003

Présenté par Michel Combarous

Résumé

On présente une étude de l'influence de la température sur la surface de charge d'un sol non saturé à succion constante. Des essais de consolidation mécanique sont réalisés à différentes températures sur un sable limoneux argileux. On utilise un appareil triaxial spécifique aux sols non saturés avec des températures comprises entre 30 °C et 60 °C. Les résultats expérimentaux montrent sans ambiguïté un caractère thermo-extensif de la surface de charge. L'interprétation physique proposée fait appel à des considérations microscopiques sur l'évolution des ménisques capillaires en fonction de la température et de la succion.

Pour citer cet article : *F. Jamin et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

On the thermo-extensive nature of the yield surface for an unsaturated soil. A study of temperature influence on the yield surface for one unsaturated soil at constant suction is presented. Mechanical consolidation tests are realized at different temperatures on clayey silty sand. A specific triaxial apparatus for unsaturated soils with temperatures included between 30 °C and 60 °C is used. Experimental results show without ambiguity a thermo-extensive nature of the yield surface. The physical interpretation proposed calls for microscopic considerations on the menisci capillary evolution according to temperature and suction. **To cite this article :** *F. Jamin et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Milieux granulaires ; Sols ; Surface de charge ; Consolidation ; Température ; Succion

Keywords : Granular media; Soils; Yield surface; Consolidation; Temperature; Suction

Abridged English version

Oedometric tests on saturated soils at different temperatures [1,2] show a decrease in preconsolidation stress when the temperature increases. Other results [3–6] in triaxial conditions have pointed out the thermo-shrinking

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : saix@imgc.univ-montp2.fr (C. Saix).

nature of the yield surface. In the case of unsaturated Boom clay, the study of suction and temperature influence carried out by Romero [7] shows that the yield surface keeps a thermo-shrinking nature. This seems to be intimately connected to the clayey nature of the soils studied. We are interested here in an unsaturated soil with a low clayey fraction. Mechanical consolidation tests completed at different temperatures ($T = 30, 40, 50$ and 60°C) and at constant suction ($s = 5$ kPa) have been used to study the yield surface evolution according to temperature.

The soil studied is clayey silty sand (Fig. 1). Samples are prepared with a void ratio $e = 0.77$ and a moisture content $w = 18\%$. The experimental device is a thermal triaxial apparatus [8] which allows to reach the soil sample volume changes of very slight slenderness for various thermo-hydro-mechanical loading paths (Fig. 2). This device allows to reach void ratio e and moisture content variation Δw of the sample. The consolidation tests follow mechanical loading paths defined by ratio $\eta = q/p$ included between 0 (isotropic loading path) and $3/2$, q is the deviatoric stress and p is the net mean stress defined in axisymmetric triaxial conditions (relation (1)).

Isotropic thermo-mechanical consolidation tests on the saturated clayey silty sand have shown the thermo-shrinking nature of the yield surface which is in keeping with most experimental results [3–6] in the case of clayey soils. On the other hand, in the unsaturated case at constant suction $s = 5$ kPa, we note an increase in limit total vertical stress $(\sigma_z - p_g^*)_L$ according to temperature whatever the loading path (Figs. 3(a) and 4(a)). Relation (2) provides the couples of preconsolidation total stress $(p_\eta, q_\eta)_L$ represented in the stress plan (p, q) (Figs. 3(b) and 4(b)). This representation clearly shows the thermo-extensive nature of the yield surface. This yield surface can be approximated with Barcelona model [9]. The modelling of the yield surface, thanks to relation (3), allows to take into account constant values of $M = 1.3$ and $p_s = -5$ kPa as well as values of preconsolidation total stress p_0 , given in the Table 1, which increases along with the temperature. This increase is illustrated by relation (4) and by Fig. 5 where reference temperature T_0 is equal to 30°C . This relation is similar to that proposed by Laloui et al. [6], but with an opposite sign slope, which once again goes counter to the recent works concerning clayey soils.

Mechanical consolidation tests on unsaturated soils at ambient temperature [9,11] show an increase in preconsolidation total stress according to suction. In the case of clayey silty sand at constant suction, we have shown an increase in preconsolidation total stress according to temperature. This reciprocal evolution of the preconsolidation stress according to variable suction and temperature can be interpreted using Jurin's Law (relation (5)). Indeed, an increase in suction at constant temperature or in temperature at constant suction leads to a decrease in the menisci radius. This decrease results in an increase in cohesion forces due to capillarity between grains, which limits their rearrangements. These rearrangements are the main factors of irreversibility in soil behaviour. This interpretation does not seem to be in keeping with the recent experimental results obtained by Romero [7] on Boom clay. In this case, the liquid–solid interactions of adsorbed water saturating the interlayer space become greater than those of capillary water acting at the menisci level. Indeed, the viscosity of the water decreases along with the temperature which favours rearrangements within clayey aggregates. Then, this phenomenon leads to a contraction of the yield surface, result which is comparable to the tests obtained in the saturated case.

In conclusion, this paper has presented a study of the temperature influence on the yield surface for an unsaturated soil at constant suction. The mechanical consolidation tests have shown without ambiguity the thermo-extensive nature of this surface for the type of soil studied. A physical interpretation was proposed by essentially taking into account the evolution of the capillary menisci according to temperature and suction provided by Jurin's Law.

1. Introduction

Des essais œdométriques à différentes températures sur des sols saturés [1,2] montrent une diminution de la contrainte de préconsolidation avec l'augmentation de la température. D'autres résultats [3–6], en conditions triaxiales, mettent en évidence un caractère thermo-rétrécissant de la surface de charge (surface frontière entre les domaines élastique et plastique).

Dans le cas de l'argile de Boom non saturée, l'étude de l'influence de la succion et de la température réalisée par Romero [7] montre que la surface de charge conserve un caractère thermo-rétrécissant. Ce caractère semble être intimement lié à la nature argileuse des sols étudiés.

On s'intéresse ici à un sol non saturé dont la fraction argileuse est faible. L'étude de l'évolution de la surface de charge en fonction de la température est faite à partir d'essais de consolidation mécanique réalisés à différentes températures et à succion constante.

Après une brève présentation du sol étudié, du dispositif expérimental et du protocole d'essai, on donne les résultats des essais de consolidation mécanique en conditions triaxiales. L'accent est mis sur l'influence du paramètre température qui conduit sans ambiguïté à un caractère thermo-extensif de la surface de charge.

Ce résultat, analysé à la lumière de travaux récents de la littérature, laisse à penser que le caractère thermo-extensif ou thermo-rétrécissant ne peut pas être dissocié de la nature minéralogique du sol et en particulier de la fraction argileuse. Enfin, on propose une interprétation physique faisant appel à des considérations microscopiques sur l'évolution des ménisques capillaires en fonction de la température et de la succion.

2. Sol étudié, dispositif expérimental et protocole d'essai

2.1. Sol étudié : le sable limoneux argileux

Le sol étudié est un sable limoneux argileux dont la dimension des grains n'excède pas deux millimètres et dont la fraction argileuse ne représente que 10 % de l'ensemble des minéraux (Fig. 1(a)). Les échantillons sont préparés avec un indice des vides $e = 0,77$ et une teneur en eau $w = 18\%$ (degré de saturation $S_r = 62,3\%$). L'intérêt que présente ce type de sol est de permettre d'obtenir un état non saturé pour de faibles valeurs de succion (Fig. 1(b)).

2.2. Dispositif expérimental : l'appareil triaxial thermique

Le dispositif utilisé est un appareil triaxial thermique [8] qui permet d'accéder aux changements de volume d'échantillons de sol de très faible élancement (70 mm de diamètre et 15 mm de hauteur) pour différents chemins de chargement thermo-hydro-mécanique (Fig. 2). Les variables expérimentales imposées sont la contrainte déviatorique $\sigma_z - \sigma_x$, la contrainte principale radiale σ_x , la pression de la phase gazeuse p_g^* , la pression de la phase liquide p_e^* et la température T . Les variables expérimentales mesurées sont les variations de hauteur Δh et de

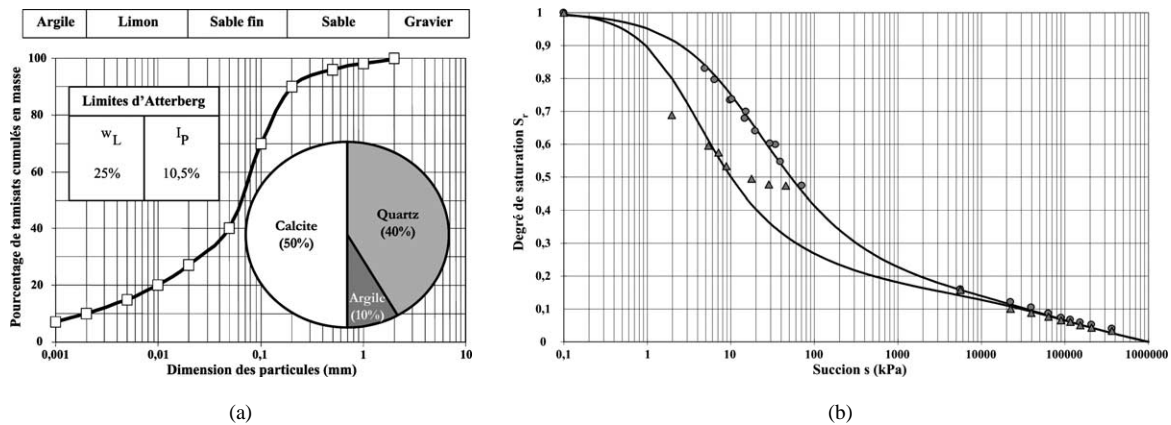


Fig. 1. (a) Courbe granulométrique ; (b) Courbe caractéristique sol/eau.
 Fig. 1. (a) Granulometric curve; (b) Soil/water characteristic curve.

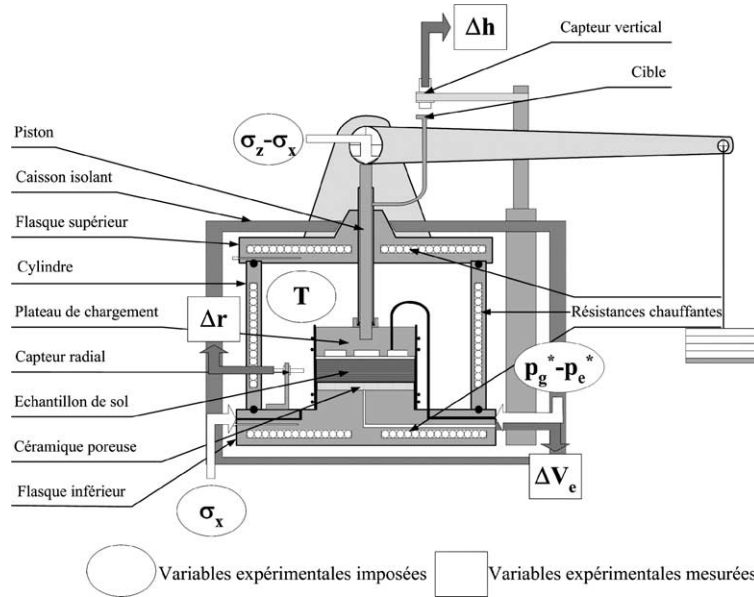


Fig. 2. Appareil triaxial thermique.

Fig. 2. Thermal triaxial apparatus.

rayon Δr ainsi que la variation de volume d'eau ΔV_e entrant ou sortant de l'échantillon. Ces mesures permettent d'accéder à l'indice des vides e et à la variation de teneur en eau massique Δw de l'échantillon de sol étudié.

2.3. Protocole d'essai

Des essais de consolidation mécanique sont réalisés à différentes températures ($T = 30, 40, 50$ et 60°C) et à succion constante ($s = 5$ kPa). Ces essais suivent des chemins de chargement mécanique prédéfinis par le rapport $\eta = q/p$ compris entre 0 (chargement isotrope) et $3/2$, q étant la contrainte déviatorique et p la contrainte totale moyenne définies en conditions triaxiales de révolution par :

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_z + 2\sigma_x) - p_g^*, \quad q = \sigma_z - \sigma_x, \quad s = p_g^* - p_e^* \quad (1)$$

Ces essais donnent accès à la contrainte totale verticale limite $(\sigma_z - p_g^*)_{\eta,L}$ (Fig. 3(a)) qui permet de calculer les couples de contraintes totales de préconsolidation $(p_\eta, q_\eta)_L$ (Fig. 3(b)) en utilisant la relation suivante :

$$(p_\eta, q_\eta)_L = \left(\frac{3}{3 + 2\eta} (\sigma_z - p_g^*)_{\eta,L}, \frac{3\eta}{3 + 2\eta} (\sigma_z - p_g^*)_{\eta,L} \right) \quad (2)$$

3. Résultats des essais

Des essais de consolidation thermo-mécanique isotrope sur le sable limoneux argileux saturé ont montré le caractère thermo-rétrécissant de la surface de charge conforme à la plupart des résultats expérimentaux [3–6] dans le cas de sols argileux. Par contre, dans le cas non saturé à succion constante $s = 5$ kPa, on note une augmentation de la contrainte totale verticale limite $(\sigma_z - p_g^*)_{\eta,L}$ avec la température quel que soit le chemin de chargement η (Fig. 4(a)). La relation (2) donne les couples de contraintes totales de préconsolidation $(p_\eta, q_\eta)_L$ représentés dans le

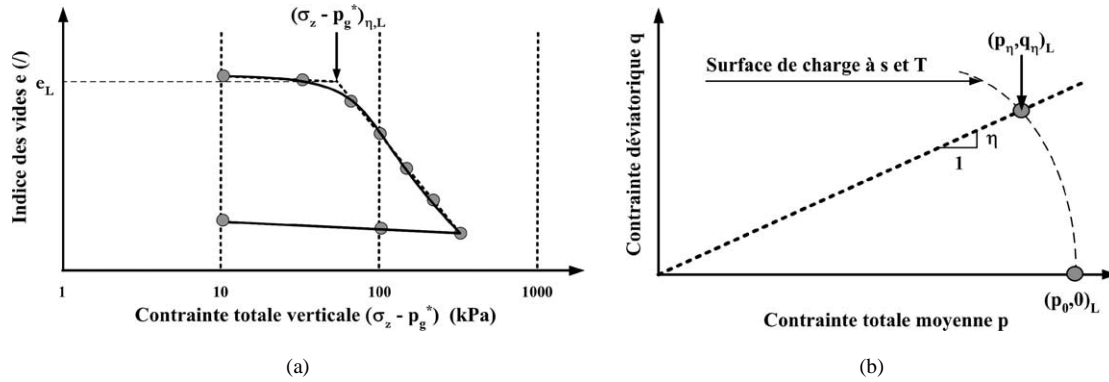


Fig. 3. (a) Exemple de courbe de consolidation ; (b) Surface de charge dans le plan (p, q).

Fig. 3. (a) Consolidation curve example; (b) Yield surface in (p, q) plan.

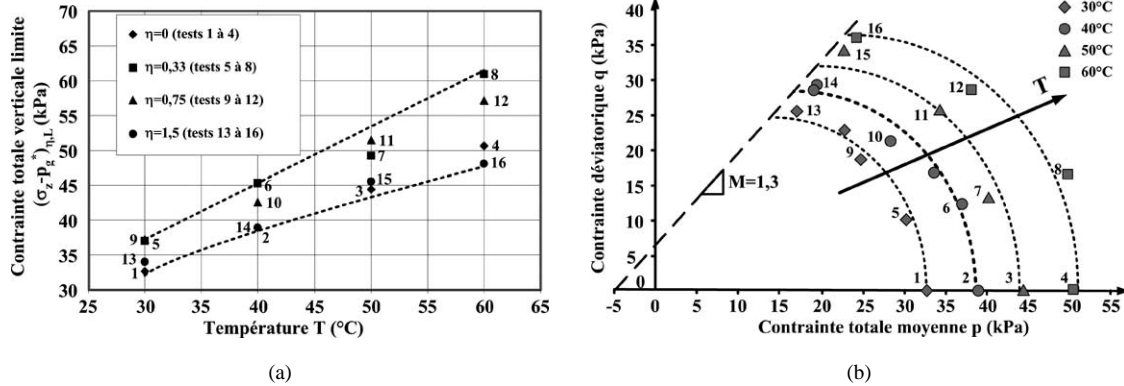


Fig. 4. Variations de la contrainte totale verticale limite (a) et de la surface de charge (b) avec la température.

Fig. 4. Vertical total stress limit (a) and yield surface (b) variations according to temperature.

plan des contraintes (p, q) (Fig. 4(b)). Cette représentation met clairement en évidence le caractère thermo-extensif de la surface de charge.

Cette surface de charge peut être approchée à l'aide du modèle de Barcelone [9] qui utilise une surface de charge de type Cam-Clay Modifié [10] qui s'exprime par :

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \tag{3}$$

où M est la pente de la droite d'état critique, p₀ la contrainte totale isotrope de préconsolidation et p_s un paramètre introduisant l'évolution de la cohésion apparente. Ces deux derniers paramètres dépendent de la succion et de la température. La modélisation de la surface de charge à l'aide de la relation (3) permet de retenir des valeurs constantes pour M = 1,3 et p_s = -5 kPa ainsi que les valeurs, données dans le Tableau 1, de la contrainte totale de préconsolidation p₀ qui augmente avec la température. Cette augmentation est illustrée à la Fig. 5 où la température de référence T₀ est prise égale à 30 °C.

L'évolution de la contrainte totale de préconsolidation peut être écrite sous la forme :

$$\frac{p_0(5, T)}{p_0(5, T_0)} = 1 + \gamma \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \tag{4}$$

Tableau 1
Contrainte totale de préconsolidation en fonction de la température

Table 1 Preconsolidation net stress according to temperature				
T (°C)	30	40	50	60
p_0 (kPa)	33	38,5	44	51

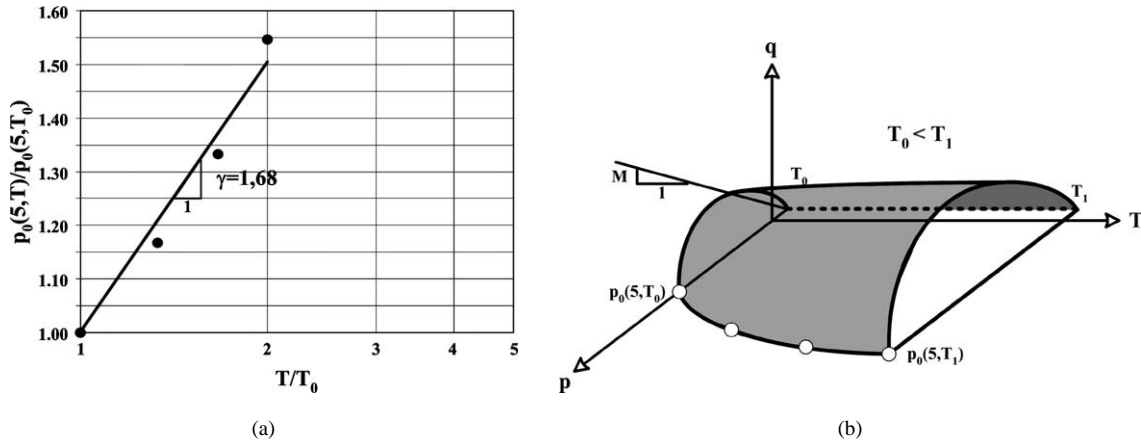


Fig. 5. Evolution de la contrainte totale de préconsolidation (a) et de la surface de charge (b) avec la température.

Fig. 5. Preconsolidation stress (a) and yield surface (b) evolution according to temperature.

où γ représente la pente de la droite en coordonnées semi-logarithmiques. Cette relation est similaire à celle proposée par Laloui et al. [6], mais avec une pente γ de signe opposé. On note, une fois de plus, une inversion de tendance par rapport aux travaux récents de la littérature concernant des sols argileux.

4. Interprétation physique des résultats

Des essais de consolidation mécanique de sols non saturés à température ambiante [9,11] montrent une augmentation de la contrainte totale de préconsolidation en fonction de la succion. Dans le cas du sable limoneux argileux à succion constante, on a montré une augmentation de la contrainte totale de préconsolidation en fonction de la température.

Par ailleurs, des études expérimentales sur le même sol ont été réalisées à partir d'un dispositif de type « plaque de pression » en température, pour établir la courbe caractéristique donnant la relation succion-teneur en eau (ou succion-degré de saturation). Ces études ont été effectuées à 30 °C et 60 °C qui sont les deux températures extrêmes utilisées dans l'étude de la surface de charge. Elles montrent qu'à succion constante (5 kPa dans cette étude), l'effet de la température sur la teneur en eau, ou sur le degré de saturation, reste très limité (variation voisine de 0,5 % pour la teneur en eau et de 0,9 % pour le degré de saturation dans le cas du drainage).

Dans ces conditions, l'interprétation de l'évolution de la contrainte de préconsolidation, en fonction des variables succion et température, peut être envisagée en s'appuyant sur la loi de Jurin :

$$s = \frac{2\Gamma \cos \theta}{r} = \frac{2\Gamma}{R} \quad (5)$$

où Γ est la tension superficielle fonction décroissante de la température, θ l'angle de mouillage supposé indépendant de la température, r le rayon moyen des pores et R le rayon moyen des ménisques. En effet, une

augmentation de la succion à température constante ou une augmentation de la température à succion constante conduisent à une diminution du rayon moyen des ménisques. Cette diminution se traduit par une augmentation des forces de cohésion par capillarité entre les grains, ce qui a pour effet de limiter leurs réarrangements qui sont les principaux facteurs des irréversibilités dans le comportement des sols.

L'interprétation ci-dessus n'apparaît pas en accord avec les récents résultats expérimentaux, obtenus par Romero [7], sur l'argile de Boom. Dans ce cas, les interactions liquide–solide de l'eau adsorbée, saturant l'espace inter-feuillets, deviennent prépondérantes devant celles de l'eau capillaire agissant au niveau des ménisques. En effet, la viscosité de l'eau adsorbée diminue avec la température ce qui a pour effet de favoriser les réarrangements au sein des agrégats argileux. Ce phénomène conduit alors à une contraction de la surface de charge, résultat comparable aux essais effectués dans le cas saturé.

5. Conclusion

Une étude de l'influence de la température sur la surface de charge a été présentée pour un sol non saturé à succion constante. Les essais de consolidation mécanique, réalisés sur l'appareil triaxial thermique à des températures comprises entre 30 °C et 60 °C, ont montré sans ambiguïté le caractère thermo-extensif de la surface de charge pour le sable limoneux argileux étudié.

A partir de résultats de la littérature sur l'influence de la succion sur la surface de charge, une interprétation physique a été proposée faisant appel à des considérations microscopiques. Cette interprétation s'appuie essentiellement sur l'évolution des ménisques capillaires en fonction de la température et de la succion en rapport avec la loi de Jurin.

Références

- [1] L.G. Eriksson, Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays, in: Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 1989, pp. 2087–2090.
- [2] M. Tidfors, G. Sällfors, Temperature effect on preconsolidation pressure, *Geotechn. Testing J.* 12 (1) (1989) 93–97.
- [3] T. Hueckel, G. Baldi, Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitutive study, *J. Geotechn. Engrg.* 116 (12) (1990) 1778–1796.
- [4] Y.J. Cui, N. Sultan, P. Delage, A thermomechanical model for saturated clay, *Canad. Geotechn. J.* 37 (3) (2000) 607–620.
- [5] J. Graham, N. Tanaka, T. Crilly, M. Alfaro, Modified Cam-Clay modeling of temperature effects in clays, *Canad. Geotechn. J.* 38 (3) (2001) 608–621.
- [6] L. Laloui, C. Cekeverac, L. Vulliet, Thermo-plasticity of clays: a simple constitutive approach, in: Vulliet, et al. (Eds.), *Environmental Geomechanics*, EPFL Press, 2002, pp. 45–58.
- [7] E. Romero, Characterisation and thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated Boom clay: an experimental study, Ph.D. Thesis, UPC Barcelona, 1999.
- [8] F. Jamin, M.S. El Youssoufi, C. Saix, Experimentation and modelling of unsaturated soils behaviour in non-isothermal conditions, in: Di Benedetto, et al. (Eds.), *IS-Lyon03, 3^{ème} Congrès International sur le Comportement des Sols et des Roches Tendres*, 22–24 septembre 2003, Lyon, France, Deformation Characteristics of Geomaterials, Balkema, 2003, pp. 1009–1017.
- [9] E.E. Alonso, A. Gens, A. Josa, A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique* 40 (3) (1990) 405–430.
- [10] K.H. Roscoe, J.B. Burland, On the generalized stress-strain behavior of “wet” clay, in: J. Heyman, F.A. Leckie (Eds.), *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, 1968, pp. 535–609.
- [11] Y.J. Cui, P. Delage, Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt, *Geotechnique* 46 (2) (1996) 291–311.