

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*



## INFLUENCE DE LA SUCCION SUR LA COMPRESSIBILITE D'UN LIMON NON SATURE

### EFFECT OF THE SUCCION ON THE COMPRESSIBILITY OF AN UNSATURATED SILT

P. Delage<sup>1</sup> G.P.R. De Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CERMES, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France

<sup>2</sup>Kiso-Jibang Consultants, Singapore

**Résumé :** L'influence de la succion sur la compressibilité d'un limon non saturé est étudiée au moyen d'un oedomètre à succion contrôlée par un système osmotique, permettant d'appliquer des succions pouvant atteindre 2000 kPa. Pour cela, un programme d'essais est réalisé sur le limon initialement saturé à l'état de boue, consolidé puis désaturé à des valeurs de contrainte et de succion données; différents chemins parcourus dans le plan contrainte-succion sont décrits: une première série d'essais permet d'étudier les effets comparés de contraintes et de succions de même ordre de grandeur; une seconde série est destinée à discuter la validité du concept de surface d'état pour ce type de matériau non saturé. L'effet de raidissement de la structure du matériau par la désaturation est ainsi quantifié, et on montre qu'avec l'augmentation de contrainte, l'effet d'une application de succion est de moins en moins important; enfin, le concept de surface d'état est discuté pour ce type de matériau.

#### INTRODUCTION

Le comportement des sols fins non saturés est mal connu du fait d'une part des difficultés expérimentales liées à la mesure et au contrôle de la succion engendrée au sein du sol par les ménisques eau-air et l'adsorption de l'eau par les particules argileuses, et d'autre part par la mise en défaut de la notion de contrainte effective élargie aux sols non saturés, mise en évidence il y a une trentaine d'années par les premiers travaux dans ce domaine. La pratique de la géotechnique se trouve ainsi assez démunie pour traiter de problèmes aussi importants que celui du comportement des ouvrages en remblai (barrages, remblais routiers), ou celui des fondations sur sols gonflants, rétractables, ou effondrables. Dans ces domaines, les approches découlant de la mécanique des sols (saturés) classique se révèlent insuffisantes. De plus l'importance croissante des problèmes liés à l'environnement, et plus précisément à la mise en œuvre de couches compactées (liners) devant contenir des déchets ménagers, industriels ou nucléaires renforce l'intérêt porté à la compréhension avancée du comportement de ce type de matériau, tant sur le plan mécanique qu'hydraulique.

Les mesures de succion au-delà de la gamme tensiométrique (0-80 kPa) sont des mesures délicates, c'est la raison pour laquelle l'approche expérimentale la plus souvent adoptée consiste à imposer la succion, et à identifier ses effets sur le comportement du sol non saturé. De tels résultats expérimentaux à succion contrôlée sont cependant rares, et il est actuellement nécessaire de combler une telle lacune.

Généralement la méthode utilisée pour imposer à une éprouvette une succion  $s = u_a - u_w$  positive consiste à lui appliquer, à l'aide de pierres poreuses à haute valeur de pression d'entrée d'air, une contrepression d'air  $u_a$  ( $u_a > 0$ , la pression atmosphérique étant prise égale à zéro), en maintenant une pression d'eau nulle ( $u_w = 0$ ). Depuis le travail de Bishop et Donald (1961), où ce système était adapté à une cellule triaxiale, la méthode a été appliquée sur des cellules permettant l'étude des variations de volume sous état de contraintes isotrope (Matyas et Radhakrishna 1968), et sur des oedomètres (Barden et al. 1969, Escario 1969). Cette méthode est pour ainsi dire la seule utilisée actuellement dans l'étude du comportement des sols non saturés.

Il existe une autre méthode pour contrôler la succion, basée sur un principe osmotique; elle repose sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable, et d'une solution aqueuse de molécules (polyéthylène glycol, PEG) ne pouvant traverser la membrane, qui est perméable à l'eau; il s'ensuit que

tout matériau mis au contact d'une telle membrane derrière laquelle circule la solution de PEG se trouve soumis à une succion de nature osmotique, fonction de la concentration de la solution. Ce système permet d'atteindre des succions de l'ordre de 2000 kPa, par la seule action osmotique, et sans avoir recours aux lourds dispositifs indispensables pour imposer des pressions d'air du même ordre de grandeur. Développée initialement par des biologistes (Lagerwerff et al. 1961), elle a été appliquée aux sols pour la première fois par des agronomes (Peck et Rabbidge 1966, Zur 1966). La première utilisation en géotechnique est due à Kassiff et Benshalom (1971), qui l'appliquèrent à un oedomètre, pour l'étude de l'effet de la succion sur le gonflement des sols. Des applications furent ensuite développées pour un appareil triaxial à cylindre creux (Komornik et al. 1980), et pour un triaxial normal (Delage et al. 1987).

Un des avantages de cette technique est de permettre une reproduction plus fidèle des conditions naturelles, où c'est réellement l'eau qui est sous succion, et l'air qui est à une valeur de pression proche de la pression atmosphérique, du moins quand il n'y a pas occlusion de la phase gazeuse. On présente dans ce travail certains résultats reliés à l'effet de la succion sur la compressibilité d'un limon non saturé, à l'aide d'un oedomètre osmotique du type Kassiff et Benshalom, auquel ont été apportées un certain nombre de modifications.

#### L'OEDOMETRE OSMOTIQUE

La figure 1 présente l'oedomètre osmotique. Une éprouvette de diamètre 70 mm est utilisée, et mise en contact à sa base et en son sommet avec deux membranes cellululosiques semi-perméables; la circulation de la solution est rendue possible derrière la membrane par l'insertion d'un tamis fin. Afin de pouvoir travailler sous des contraintes plus fortes que Kassiff et Benshalom (dans leur cas,  $\sigma < 16$  kPa), un système de rainures a été usiné sur l'embase et le piston. La principale modification concerne la circulation de la solution: alors que Kassiff et Benshalom utilisaient un système de burettes, on a mis en place ici un circuit fermé de solution comprenant un réservoir tampon, et une pompe permettant la mise en circulation; ainsi, malgré les échanges pouvant intervenir entre le sol et la solution au travers des membranes, la concentration et donc la succion au sol imposée reste constante grâce au réservoir tampon. D'autre part, un tube capillaire placé au niveau de ce réservoir permet le suivi des échanges d'eau intervenant entre le sol et la solution: quand le niveau dans le capillaire monte, de l'eau est

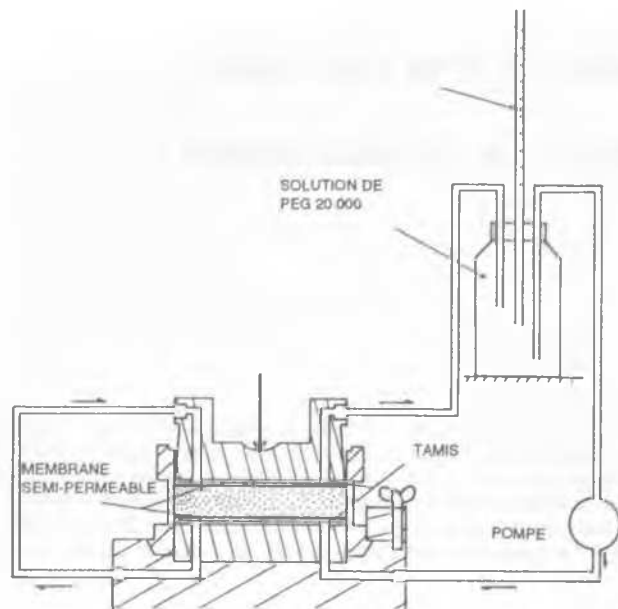


Fig 1 oedomètre osmométrique.

extraite, le sol est séché, sa succion augmente, et vice versa ; quand le niveau se stabilise, l'équilibre est atteint, et on est assuré que la succion de l'échantillon est égale à la succion osmométrique imposée, correspondant à la concentration de la solution. La relation entre ces deux grandeurs a été étalonnée par différents auteurs (Williams et Shaykewich 1969) : des succions de 0 à 1500 kPa sont obtenues avec des concentrations comprises entre 0 et 26 g de PEG 20 000 pour 100 g de solution.

La membrane semi-perméable est une membrane de dialyse de type classique, avec un seuil de coupure correspondant à des poids moléculaires de 12 000 à 14 000, fournissant une bonne étanchéité au PEG 20 000 ; des mesures à charge variable ont donné une valeur de perméabilité de l'ordre de grandeur de celles du limon considéré ( $k=5 \times 10^{-9}$  m/s) ; quand le sol se désature, sa perméabilité diminue, ce qui va dans le bon sens. Les membranes semi perméables sont sensibles aux attaques bactériennes, et il est nécessaire d'ajouter à la solution quelques gouttes d'antibiotique. Le collage des membranes sur les embases est fait à l'aide de résine époxy, à une température de 30°C. Les essais sont réalisés dans une atmosphère à température contrôlée ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) ; il est cependant nécessaire de placer le réservoir tampon dans un bain thermostaté à  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . L'évaporation pouvant se produire dans l'espace annulaire compris entre le piston et l'anneau est empêchée par la mise en place d'un film plastique de type alimentaire entre l'anneau et le piston, et la mise en place d'un récipient plein d'eau dans l'enceinte ainsi délimitée.

#### ETUDE DE LA COMPRESSIBILITE DU LIMON NON SATURE

Les essais ont été réalisés sur un limon éolien des plateaux de l'Est parisien, le limon de Jossigny, peu plastique ( $I_p = 18$ ), et dont le pourcentage d'argile ( $\% < 2\mu\text{m}$ ) est de 26 % ; les grains sont tous de dimension inférieure à 0,1 mm. Afin d'obtenir des résultats reproductibles, on a travaillé sur des échantillons obtenus à partir d'une boue réalisée à une teneur en eau de 1,5  $w_L$ , consolidée à l'oedomètre.

Un oedomètre à succion contrôlée permet de réaliser divers types de chemins, correspondant soit à des variations de contrainte à succion constante, soit à des variations de succion sous contrainte constante. Dans le premier cas, il s'agit d'un chargement analogue à celui de l'essai oedométrique classique ; dans le second cas, la variation de succion est obtenue en remplaçant la bouteille correspondant à la succion initiale par une bouteille remplie de solution à la concentration correspondant à la succion finale souhaitée. Le détail de telles procédures est exposé dans Delage et al. 1992.

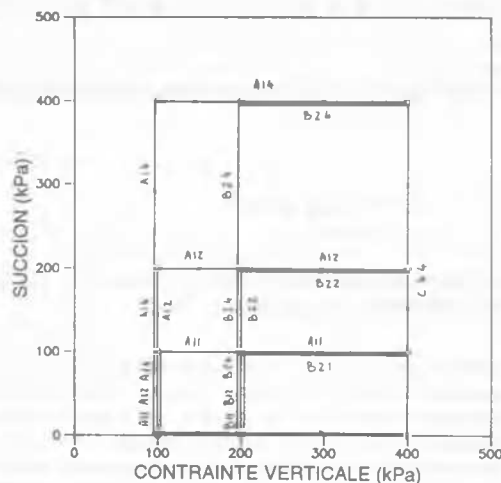


Fig 2 Chemins suivis, essais ABC

Dans le cas des sols fins saturés les coefficients de compressibilité  $C_c$  et  $C_s$  sont des caractéristiques intrinsèques représentatives du comportement du squelette solide du sol, et indépendantes de l'indice des vides ; il n'en va pas de même pour les matériaux non saturés : à densité constante, le matériau devient de plus en plus solide avec le séchage, donc avec l'augmentation de succion ; de même, on sait que le remouillage d'un matériau initialement sec entraîne son ramollissement. Ces tendances ont illustrées Matyas et Radhakrishna (1968) et Barden et al. (1969), ont été synthétisées Alonso et al. (1987). En ce qui concerne la résistance au cisaillement, les résultats décrivant l'influence de la succion sur le module de cisaillement, bien que plus rares (Delage et al. 1987), montrent également un raidissement avec l'augmentation de la succion.

#### Essais de Compressibilité à Succion Contrôlée (chemins A, B et C).

Des essais à succion contrôlée ont été réalisés à des valeurs de succion de 100, 200 et 400 kPa, à partir d'échantillons normalement consolidés jusqu'à une valeur de contrainte de 100 kPa. La première étape de ce type d'essai consiste à les amener de l'état saturé aux succions voulues. Comme on peut le voir sur la figure 2, qui décrit les chemins suivis dans l'espace  $s = u_a - u_w$ ,  $\sigma - u_a$ , ceci a été réalisé sous diverses contraintes : les essais A (A11, A12 et A14) ont été mis, sous une contrainte  $\sigma - u_a = 100$  kPa, à des succions de 100, 200 et 400 kPa respectivement ; les essais B (B21, B22 et B23) ont été mis aux mêmes succions sous une contrainte  $\sigma - u_a = 200$  kPa ; enfin, l'essai C consiste en une augmentation de succion sous une charge constante  $\sigma - u_a = 400$  kPa. Les augmentations de contrainte se sont faites, classiquement, par doublement de la charge.

La figure 3 montre les courbes oedométriques  $e/\log(\sigma - u_a)$  des échantillons sous succion contrôlée désaturés sous  $\sigma - u_a = 100$  kPa, comparées à la courbe de l'échantillon saturé. Lors de l'application de succion sous  $\sigma - u_a = 100$  kPa, on observe une diminution de volume d'autant plus forte que la succion est élevée, ce qui est cohérent. A partir des points ainsi obtenus, les courbes oedométriques mettent en évidence des compressibilités d'autant plus faibles que la succion est élevée. Alors que l'essai à  $s = 100$  kPa revient tangenter la courbe saturée, on note une tendance des courbes à  $s = 200$  et 400 kPa à croiser la courbe saturée, tendance d'autant plus franche que la succion est élevée.

Pour les échantillons mis à succion sous  $\sigma - u_a = 200$  kPa (figure 4), les tendances sont identiques, avec une différenciation nette au niveau des compressibilités, et un croisement net, pour les trois valeurs de succion, de la courbe saturée ; il y a ainsi inversion, lors du chargement, de l'ordre des indices des vides des 3 échantillons. La figure 4 montre également les points de l'essai C, désaturé sous  $\sigma - u_a = 400$  kPa.

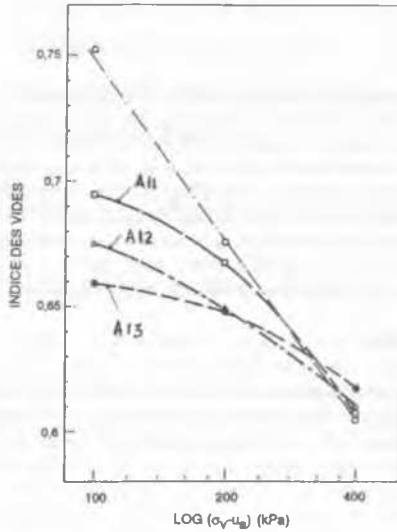


Fig 3 Courbes oedométriques, essais A.

Les résultats précédents sont en accord avec les propriétés de compressibilité caractéristiques des sols non saturés, déjà évoqués. L'observation des différents chemins montre qu'il n'est pas possible de considérer ici, du fait de la désaturation des échantillons, la succion comme une pression négative dont l'action serait équivalente à celle d'une contrainte positive ; on observe en effet une différence importante entre des points correspondant à des valeurs identiques de la somme  $s + (\sigma - u_a)$  : c'est ainsi que par exemple le point ( $\sigma - u_a = 100$  kPa,  $s = 100$  kPa) est caractérisé par un indice des vides supérieur à celui du point ( $\sigma - u_a = 200$  kPa,  $s = 0$  kPa) de la courbe saturée. Cette différence est d'autant plus marquée que les valeurs de contraintes sont élevées, comme le montre la comparaison entre les points ( $\sigma - u_a = 100$  kPa,  $s = 400$  kPa) et ( $\sigma - u_a = 500$  kPa,  $s = 0$  kPa) qu'on identifierait en extrapolant la courbe saturée. Dans le même ordre d'idées, les chargements réalisés juste après l'application de la succion ne sont pas caractérisés par des courbes parallèles à la courbe saturée ; ceci montre bien qu'il n'y a pas additivité entre la contrainte et la succion, pour la description de leur effet respectif sur les changements d'indice des vides lors d'une compression. Ces observations correspondent avec les limitations apportées très tôt à la notion

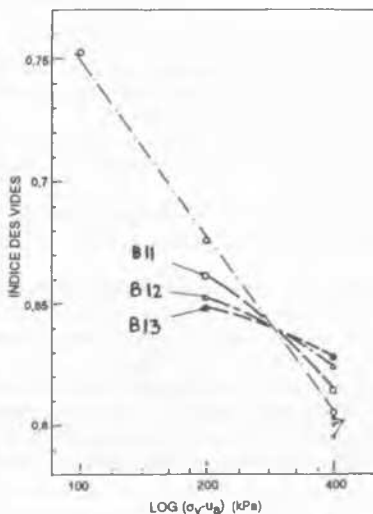


Fig 4 Courbes oedométriques, essais B

de contrainte effective de Bishop (1959) par certains auteurs (Jennings et Burland 1969).

Une autre façon de traiter le problème consiste à évaluer l'importance relative d'incrément de succion ou de contrainte identiques sur l'indice des vides du matériau. Les diverses observations effectuées peuvent s'interpréter en énonçant que l'effet d'une application d'une succion est moindre que celui de l'application d'une contrainte, et ce d'autant plus qu'on se trouve à des niveaux de contraintes plus élevés : c'est ainsi que sous une contrainte de 200 kPa, une même augmentation de succion (100 kPa par exemple) engendre une compression du matériau plus faible que sous une contrainte de 100 kPa ; ceci est particulièrement évident sous  $\sigma - u_a = 400$  kPa (essai C, figure 4) où on observe que l'augmentation à 400 kPa de la succion n'induit que très peu de compression. En d'autres termes, plus les contraintes appliquées sont élevées, et plus l'effet des variations de succion est faible.

### Etude d'une Surface d'Etat

Le concept de surface d'état, Matyas et Radhakrishna (1968), permet de décrire simplement les variations de volume d'un sol non saturé dans des conditions de degré de saturation croissant (diminution de la succion imposée, ou chargement à succion constante). Dans de telles conditions, des essais réalisés en partant d'une valeur de succion initiale ont montré que les divers chemins de resaturation appartenaient à une surface unique définissant les variations de l'indice des vides  $e$  en fonction de la contrainte  $\sigma - u_a$  et de la succion  $s = u_a - u_w$ . Malgré ses limitations, un tel concept permet de prévoir par exemple les variations de volume d'un matériau compacté lors de la construction ou de la mise en eau d'un ouvrage en remblai (barrages,...).

Afin d'examiner la validité de ce concept sur le limon de Jossigny désaturé, on a suivi plusieurs chemins de resaturation, à partir d'une échantillon initialement désaturé à une succion de 400 kPa sous une contrainte verticale de 100 kPa. A partir de ce point, les différents chemins ont été suivis jusqu'à des valeurs finales de contrainte de 400 kPa et de succion de 100 kPa. Ces chemins sont décrits en figure 5. Par rapport aux essais précédemment décrits, un nouveau type de chemin est rencontré dans les segments AHG, BIF et CDE : le remouillage sous charge constante. Le chargement après un cycle de séchage (pour atteindre la succion de 400 kPa initiale) et de remouillage (HID et GFE) est également un chemin nouveau.

L'ensemble des résultats obtenus lors des essais LL est représenté sur la figure 6 dans un diagramme tridimensionnel. Afin de pouvoir comparer les courbes, on a ici représenté les variations de hauteur relative des échantillons, les courbes partant toutes du même point. On réalise immédiatement que les points finaux des courbes ne coïncident pas, ce qui n'est pas conforme au concept de surface d'état.

Les chemins de remouillage (AHG, BIF et CDE) présentent de faibles variations volumiques ; un léger gonflement est observé sous une contrainte de 100 kPa, et un léger tassement sous les contraintes de 200 et 400 kPa,

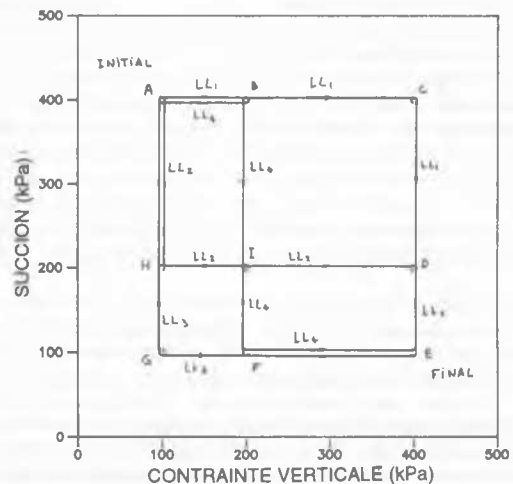


Fig 5 Chemins suivis, essais LL

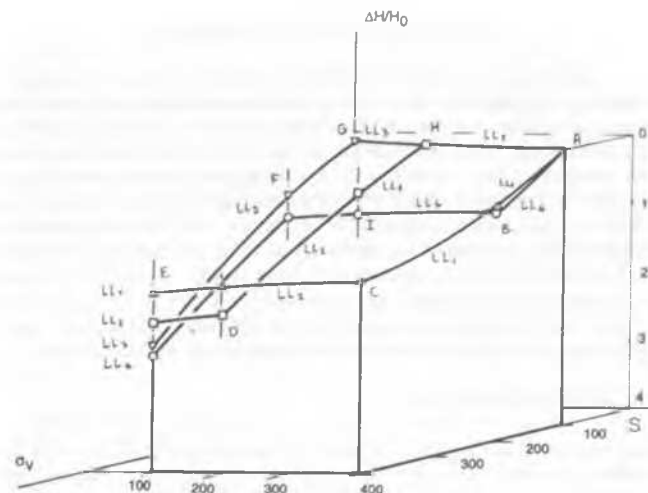


Fig 6 Représentation 3D, essais LL

supérieur dans ce dernier cas. Ceci est cohérent avec ce qu'on sait des propriétés de gonflement-effondrement des sols non saturés au remouillage. Les faibles effondrements observés à 200 et 400 kPa de suction montrent que la structure du matériau, obtenu après consolidation à 100 kPa et mise à suction de 400 kPa, est devenue suffisamment dense et peu susceptible à l'effondrement.

Dans un diagramme linéaire tel que celui de la figure 6, les courbes de compression présentent différentes formes. La section ABC présente une courbe positive classique, de même nature que celle observée sur les sols saturés, et également sur les sols compactés sous suction contrôlée (Matyas et Radhakrishna 1968). En revanche, les segments HID et GFE présentent une courbure négative, plus inhabituelle. Dès les premières phases de chargement aux points I et F par exemple, on note qu'il n'y a pas coïncidence des courbes. Géométriquement, ceci s'explique par une faible différenciation des compressibilités en fonction de leur suction. Ainsi, la tendance au léger gonflement du chemin AHG, et au léger tassement du chemin BIF, jointe à des compressibilités peu différenciées, expliquent la non correspondance des 3 essais LL2, LL3 et LL4 en I et F, la courbe LL4, passant nettement en dessous des deux autres. Pour la gamme de contrainte supérieure, entre 200 et 400 kPa, les compressibilités sont bien ordonnées en fonction des succions, mais cette fois-ci le tassement au remouillage en CE et DE qui est insuffisant pour une coïncidence des points finaux des essais, qui n'est observée que pour LL3 et LL4. Ces constatations engendrent une certaine discussion du concept de surface d'état, identifié initialement sur des sols compactés.

Des éléments de réflexion sont fournis par les travaux et le modèle élasto-plastique pour sols non saturés à écrouissage couplé suction-contrainte proposé par l'équipe de Barcelone (Alonso et al 1987 et 1990). Dans ce modèle, les variations volumiques d'un sol non saturé soumis à des variations de contrainte moyenne et de suction sont décrites au moyen de deux types d'écrouissage ; à côté de l'écrouissage en contrainte classique correspondant aux effets de préconsolidation, on définit un écrouissage en suction, fonction également de la plus forte suction connue par le sol. Dans un diagramme  $s = u_a - u_w / p = \sigma - u_a$  (tel que celui de la figure 5), on définit ainsi un domaine élastique limité par une courbe LC (loading collapse) et une droite SI (suction increase), définie par la plus grande suction connue par le sol.

Dans notre cas, la ligne de suction maximum étant fixée à  $s = 400$  kPa, il en résulte que les chargements HI et GF se retrouvent situés dans une zone élastique, avec une compressibilité quasi-indépendante de la suction ; d'où une allure surconsolidée des courbes pour les plus faibles contraintes (100 - 200 kPa). Pour de plus fortes contraintes, l'indépendance de la compressibilité par rapport à la suction n'est plus observée, c'est à dire que l'effet de surconsolidation dû à la suction initiale de 400 kPa est dissipé, et que les courbes suivent des chemins "normalement consolidés", où l'effet de la suction est manifeste, après avoir passé un niveau de contrainte

correspondant à la préconsolidation due à la suction. Par rapport à l'existence d'une surface d'état, un autre problème est le faible effondrement observé sous une contrainte de 400 kPa quand la suction est ramenée à 100 kPa.

## CONCLUSION

L'utilisation d'un oedomètre à suction contrôlée d'un type nouveau a permis de préciser un certain nombre de points concernant les propriétés de compressibilité d'un limon non saturé: l'effet de raidissement du matériau a pu être observé quantitativement en fonction de la suction appliquée, et on a pu identifier les effets respectifs de l'application d'une contrainte et d'une suction en montrant en particulier qu'avec l'augmentation de contrainte, l'effet d'une application de suction est de moins en moins important. Enfin, il semble que le concept de surface d'état, développé sur les matériaux compactés, soit discutable sur un tel matériau consolidé désaturé.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants au GRECO Géomatériaux (structure de coordination de recherches du CNRS) pour les échanges scientifiques et le soutien financier qui ont aidé au développement de ces travaux.

## REFERENCES

- Alonso E.E., Gens A. & Josa A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40(3), pp. 405-430.
- Alonso E.E., Gens A. & Hight D.W. 1987. Special problems soils. General report. *Comptes Rendus de la 9e Conférence Européenne de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, 3, pp. 1087-1146, Dublin.
- Barden R.J., Mador A.O. & Sides G.R. 1969. Volume change characteristics of unsaturated clays. *ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 95(1), pp. 33-51.
- Bishop A.W. 1959. The principle of effective stress. *Tecknisk Ukeblad* 106(39), pp. 859-863.
- Bishop A.W. & Donald I.B. 1961. The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, pp. 13-21, Paris.
- Delage P., Suraj De Silva G.P.R. & Vicol T. 1992. Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer. *7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas, Texas.
- Delage P., Suraj De Silva G.P.R. & De Laure E. 1987. Un nouvel appareil triaxial pour les sols non saturés. *Comptes Rendus de la 9ème Conférence Européenne de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, 1, pp. 26-28, Dublin.
- Escario V. 1969. Swelling of soils in contact with water at a negative pressure. *International Conference on Expansive soils*, pp. 207-217, Texas AM, College Station.
- Jennings J.E.B & Burland J.B. 1962. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique* 12(2), pp. 125-144.
- Kassif G. & Benshalom A. 1971. Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique* 21(3), pp. 245-255.
- Komornik A., Livneh M. & Smucha S. 1980. Shear strength and swelling of clays under suction. *4th International Conference on Engineering Science*, 1, pp. 206-226, Denver.
- Lagerweff J.V., Ogata G. & Eagle H.E. 1961. Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol. *Science* 133, pp. 1486-1487.
- Matyas E.L. & Radhakrishna H.S. 1968. Volume change characteristics of partially saturated soil. *Géotechnique* 18(4), pp. 432-448.
- Peck A.J. & Rabbidge R.M. 1966. Soil water potential. Direct measurement by a new technique. *Science* 151, pp. 1325-1326.
- Williams J. & Shaykewich C.F. 1969. An evaluation of polyethylene glycol (PEG) 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matric potential. *Canadian Journal of Soil Science* 102(6), pp. 394-398.
- Zur B. 1966. Osmotic control the matric soil water potential. *Soil Science* 102, pp. 394-398.