

---

# Techniques d'expérimentales pour l'étude des sols non saturés

**Feth-Ellah Mounir Derfouf\*** — **Said Taibi\*\*** — **Nabil Abou-Bekr\***  
— **Mohammed Amine Allal\*** — **Huaqing Wang\*\***

\* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie, Der\_mounir@yahoo.fr, aboubekrnabil@yahoo.fr, aminallal@yahoo.fr*

\*\* *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE CNRS 1302, Université du Havre, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre, France, Said.Taibi@univ-lehavre.fr, Huaqing.Wang@univ-lehavre.fr*

---

*RÉSUMÉ. Dans cet article, on présente les différentes techniques de contrôle de la succion à savoir la méthode de translation d'axes, la méthode osmotique et la méthode de contrôle par phase vapeur. Les avantages de chaque méthode et ses inconvénients sont discutés, ainsi que leurs adaptations aux appareils standards de la mécanique des sols à savoir : le triaxial ; l'oedomètre et la boîte de cisaillement.*

*ABSTRACT. In this paper, experimental techniques used to control suction are presented. Are considered the axis translation technique, the osmotic technique and the vapour equilibrium technique. The advantages and the drawbacks of each technique are discussed, as well as its adaptation to standard soil mechanics devices, such as the triaxial, the oedometer, and the shear box apparatuses.*

*MOTS-CLÉS : succion, non saturés, technique de translation d'axes, technique osmotique, technique de contrôle par phase vapeur, appareil triaxial, oedomètre, boîte de cisaillement direct*

*KEYWORDS: suction, unsaturated, axis translation technique, osmotic technique, vapour equilibrium technique, triaxial device, oedometer, shear box device.*

---

## 1. Introduction

L'étude en laboratoire du comportement des sols non saturés a été permise avec le développement depuis les années 1960, d'appareils à succion contrôlée permettant l'étude des aspects volumiques du comportement, ainsi que ceux liés à la résistance au cisaillement. Ces travaux ont été réalisés à l'aide de cellules de compression oedométrique et isotrope, de boîtes de cisaillement et de cellules triaxiale. Le système de contrôle de succion le plus utilisé est basé sur la technique dite de « translation d'axes », mais certains appareils utilisent aussi la technique osmotique, ou la technique de contrôle par phase vapeur.

Dans cet article, nous allons, faire une présentation de ces différentes techniques. Les avantages de chaque méthode et ses inconvénients sont discutés, ainsi que leurs adaptations aux appareils standards de mécanique des sols à savoir : le triaxial ; l'oedomètre et la boîte de cisaillement.

## 2. Méthode de translation d'axes

La méthode de translation d'axes, consiste à imposer au sol une succion, en appliquant une pression d'air  $u_a$  et une pression d'eau  $u_w$ , de façon à avoir une valeur de succion  $S=u_a-u_w$ . Dans cette méthode, la pression d'air est contrôlée à travers une pierre poreuse standard, tandis que la pression de l'eau est contrôlée ou mesurée à travers un disque céramique à haute pression d'entrée d'air (*high air entry disc* : HAED). Ce type de disques permet le passage de l'eau mais pas de l'air, son choix dépend généralement de la succion du sol à imposer ou à mesurer, de sa rigidité ainsi que de sa perméabilité. Certains auteurs préfèrent l'utilisation de membranes semi-perméables appropriées du fait des avantages qu'elles offrent par rapport aux HAED (saturation par capillarité, haute perméabilité à l'eau du fait de leurs faibles épaisseurs, étanchéité à l'air jusqu'à une pression  $u_a=14\text{MPa}$ , Villar, 1995).

Le choix de cette méthode induit la possibilité qu'il y ait des fuites d'air, qui, contrairement aux fuites d'eau, sont difficilement détectables. Les pertes d'air qui peuvent se produire au cours d'un essai sont de différentes origines. On peut citer par exemple : la diffusion de l'air à travers les membranes qui entourent l'échantillon (essai triaxial), fuites d'air dues à la mauvaise fixation de la HAED, fuites d'air à travers les connections et les flexibles, et diffusion de l'air à travers la HAED.

Cet air diffusé s'accumule derrière la HAED, et introduit une erreur soit dans la mesure de la pression d'eau (associée avec les tests non drainés), soit dans la mesure du volume d'eau (associés avec les tests drainés). Il est d'autant plus important que les pressions d'air imposées sont élevées. Cette quantité d'air diffusée, doit être mesurée, afin de suivre les variations du volume d'eau dans l'échantillon, et de faire des corrections de la pression d'eau mesurée ou imposée ; et à long terme il doit être purgé.

La méthode de translation d'axes, est supposée être valable pour des cas où la phase d'air est continue (généralement pour  $S_r \leq 80\%$ ). Dans le cas contraire, une surpression d'air induit une déformation volumique due à la compression des bulles d'air. En plus la manipulation de haute pression d'air, nécessite un équipement très lourd est des mesures de sécurité à prendre en compte.

### **2.1. Appareil triaxial à translation d'axes**

La figure 1 montre un des premiers appareils de mécanique des sols à succion contrôlée, qui est la cellule triaxiale mise au point par Bishop et Donald, 1961, basée sur cette technique. L'éprouvette repose sur un HAED, déjà saturé, fixé au piédestal de la cellule, et la succion est imposée en appliquant en haut de l'échantillon une surpression d'air  $u_a$ . Par l'intermédiaire de ce disque, l'eau de l'échantillon est maintenue à la pression atmosphérique et on a  $u_w = 0$ . Comme les membranes en latex usuelles ne sont pas à long terme étanches à l'air, un dispositif permet d'immerger l'échantillon dans un bain de mercure, qui sert également pour la mesure des variations de volume, par suivi du déplacement d'une bille flottante par un cathétomètre; cette mesure de volume n'est en effet pas possible par le biais des échanges d'eau interstitielle, puisque le sol n'est pas saturé. Le suivi en parallèle des volumes d'eau et d'air échangés est délicat car, d'une part, les volumes d'eau sont faibles et, d'autre part, l'air est compressible et son volume est sensible aux variations de température. Ce système triaxial, qui s'adapte assez facilement sur une cellule classique, a été utilisé par différents auteurs : Lagny, 1996, Sharma, 1998, Rampino, 1999, Ng *et al.* 2002, etc., avec diverses techniques de mesure de volume.

Durant ces dernières années, les systèmes à double drainage, où la succion est imposée en haut et en bas de l'échantillon sont de plus en plus utilisés, notamment pour les sols à faible perméabilité. Ce système réduit considérablement le temps des essais et permet d'homogénéiser la succion sur toute la hauteur de l'échantillon. La figure 2 représente un exemple de modification de l'embase supérieure et inférieure d'une cellule triaxiale réalisé par Romero, 1999, où le couple  $u_a, u_w$ , est imposé par les deux extrémités de l'échantillon. Sharma, 1998, propose d'imposer  $u_w$  à travers les deux cotés et  $u_a$  d'un seul coté, alors que Maâtouk, 1995, propose d'imposer  $u_a$  au milieu de l'échantillon.

### **2.2. Oedomètre à translation d'axes**

La méthode de translation d'axes a été adaptée assez tôt sur des oedomètres pour l'étude du gonflement à succion contrôlée par Escario, 1969 et pour les premiers travaux sur les effets de la succion sur les propriétés de changement de volume des sols non saturés par Barden *et al.*, 1969 (cité dans Delage et Cui, 2000). La nécessité d'appliquer une pression d'air à l'éprouvette nécessite d'inclure l'anneau oedométrique dans une chambre supportant les pressions d'air. La figure 3 montre la cellule développée par Escario et Saez, 1973. L'application de la contrainte se fait à l'aide d'un piston, ce qui exige des précautions particulières au niveau de

l'étanchéité entre la tige du piston et la cellule de confinement de l'air. Une membrane semi-perméable placée sur une pierre poreuse remplace la HAED. Parmi les améliorations apportées à ce type d'oedomètre, on peut citer la mise en œuvre de la mesure des contraintes horizontales par Habib *et al*, 1995, et le contrôle simultané de la succion et la température par Romero, 1999. Villar, 1995 a réussi à imposer une succion maximale de 14 MPa, et ceci en utilisant à la place de l'air de l'azote sous pression et une membrane semi-perméable. Plus récemment, Hofmann *et al*, 2005, a pu développer un oedomètre hybride permettant l'imposition de la succion par la méthode de translation d'axes et la méthode par phase vapeur (Figure 10). Le système de la chambre incluant l'éprouvette du sol été remplacée par un circuit branché sous la HAED, permettant l'application de  $u_a$ .

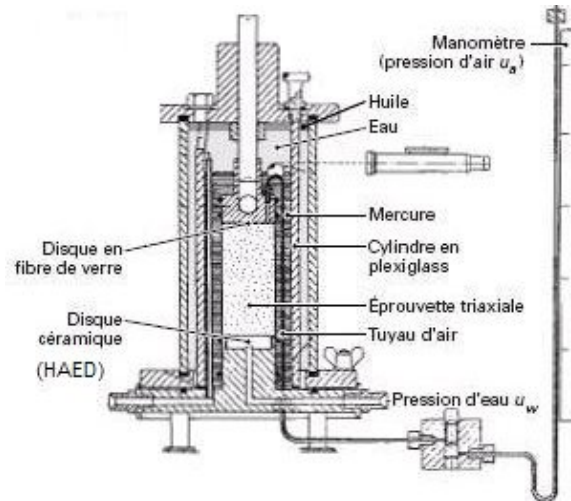


Figure 1. Triaxial à translation d'axes, Bishop et Donald, 1961.

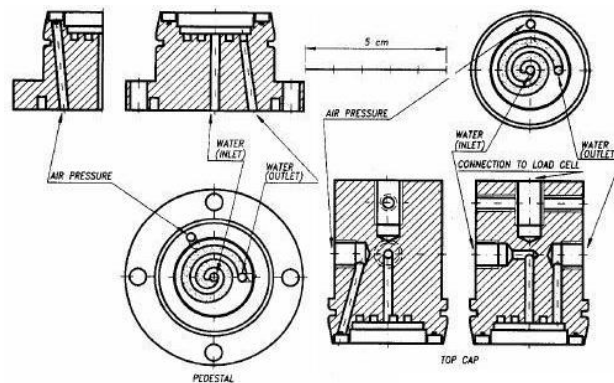


Figure 2. Modifications de l'embase supérieure et inférieure, Romero, 1999

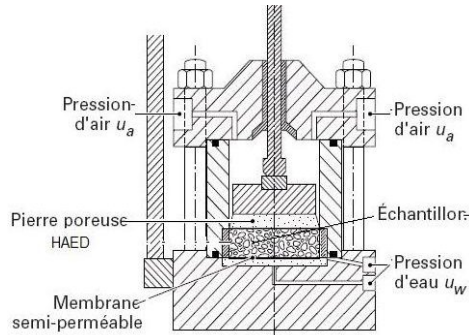


Figure 3. Odomètre à translation d'axes, Escario et Saez, 1973.

### 2.3. Appareil de cisaillement à translation d'axes

La méthode de translation d'axes, a aussi été adaptée aux appareils de cisaillement à la boîte, par plusieurs chercheurs. On trouve par exemple les travaux d'Escario, 1980 et Gan *et al.* 1988 etc. La figure 4 montre un exemple d'adaptation de cette méthode à la boîte de cisaillement proposée par Gan *et al.* 1988. Le principe reste le même, la demi boîte inferieure est usinée afin de loger la HAED, et permettre d'imposer  $u_w$ . L'ensemble des deux demi boîtes est placé dans une chambre de confinement à pression  $u_a$ , et qui peut se déplacer à l'intérieur lors du cisaillement au moyen des roulements placés sous la demi-boîte inferieure. Une tige verticale permet d'appliquer la contrainte verticale tandis que l'effort tangentiel est appliqué au moyen d'une tige horizontale comme dans les boîtes de cisaillement classiques. L'étanchéité du système est assurée par des joints toriques.

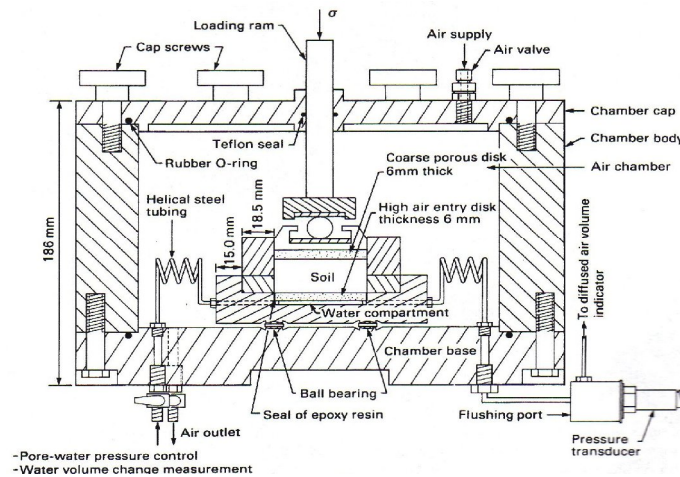


Figure 4. Appareil de cisaillement à translation d'axes, Gan *et al.*, 1988.

### 3. Méthode Osmotique

Elle est basée sur l'utilisation de membranes semi-perméables (membranes cellulosique reconstituées de fibres de coton) et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG) de grande taille, constituées de longues chaînes de radicaux éthyle ( $C_2H_4$ ), ce qui leur confère une masse molaire considérable, pouvant aller de 1000 à 20000. Comme l'eau peut traverser la membrane alors que les molécules de PEG en solution ne le peuvent pas du fait de leur grande taille, un échantillon mis au contact d'une membrane semi-perméable derrière laquelle circule une solution de PEG est soumis à une succion osmotique, d'autant plus forte que la concentration en PEG est élevée. Une membrane est définie avec son seuil de coupure de masse molaire (molecular weight cut off:MWCO)), et chaque type de PEG devra être utilisé avec le MWCO correspondant.

La relation entre la concentration du PEG notamment PEG6000 et PEG20000, a été établie par plusieurs auteurs, ensuite rassemblée par Wiliam et Shaykewich, 1969, Figure 5. Ces courbes d'étalonnages ont été obtenues par mesure de l'humidité relative au dessus de la solution PEG en utilisant la méthode psychrométrique. Les résultats montrent que la relation succion/concentration PEG est indépendante du type du PEG, et permet d'atteindre une succion de 1500KPa. Cette limite a pût être repoussée par Delage *et al*, 1998 à 10MPa.

Il existe dans la littérature d'autres courbes d'étalonnage du PEG, établies en utilisant : un tensiomètre osmotique (Peck et Rabbidge, 1969), un tensiomètre à succion élevée (Dineen et Burland, 1995), ou une cellule à pression osmotique (Slatter *et al*. 2000). Toutes ces méthodes ont montré que la membrane a un effet sur la valeur de la succion imposée, résultant à une valeur inférieure à celle obtenue par la méthode psychrométrique (Figure 5). L'examen de l'efficacité de trois types de membranes utilisée avec du PEG 20000 faite par Tarantino et Mangiovi, 2000, a montré que la membrane subit une dégradation chimique en dépassant un seuil de succion, ce qui cause la migration des molécules du PEG dans l'échantillon, résultant en une chute de la valeur de la succion imposée.

Aussi, l'un des problèmes majeurs rencontrés dans l'utilisation de cette méthode est la fragilité de la membrane cellulosique aux sollicitations mécaniques notamment au cisaillement et aux attaques de bactéries. La sensibilité aux bactéries peut être corrigée en ajoutant des gouttes de pénicilline dans la solution du PEG préparée (Kasiff et Ben Shalom, 1971). Cuisinier, 2002, affirme avoir atteint deux mois et demi sans constatation de dégradation de la membrane tandis que plus de trois mois ont été atteints par Monroy, (2006), en utilisant un autre type de membrane nommée PES-UF : Poly-Ether Sulphonate Ultra-Filtration avec du PEG 3500.

Ainsi, malgré ces inconvénients, la méthode osmotique se rapproche davantage des conditions réelles dans lesquelles se déroulent les écoulements non saturés

puisque la succion n'est pas imposée artificiellement par une surpression d'air, mais par une succion de l'eau, et qui peut atteindre une valeur de 10MPa, avec un simple matériel et sans danger de manipulation des hautes pressions. De plus, avec cette méthode, il est possible d'imposer, comme c'est le cas dans la nature, des variations de succion douces et progressives. Enfin, on n'impose par artificiellement et prématurément la continuité de la phase gazeuse.

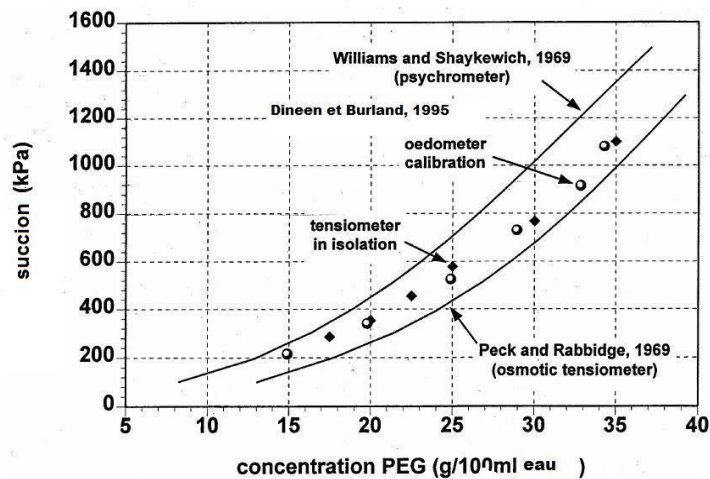


Figure 5. Courbes d'étalonnage du PEG, Dineen et Burland, 1995.

### 3.1. Triaxial osmotique

La première application du principe osmotique au triaxial a été réalisée par Komornik *et al.* 1980, (cité dans Delage et Cui, 2000), pour l'étude du gonflement des sols. Une adaptation plus simple au triaxial a été réalisée par Delage *et al.*, 1987 et Cui et Delage, 1996, Figure 6. L'échantillon de sol est mis en contact en haut et en bas avec la membrane semi-perméable par le biais d'embases concentriques rainurées assurant la circulation de la solution de PEG. La fixation de la membrane avec les deux embases est assurée par collage (Araldite), améliorée ensuite par l'ajout des joints toriques. Un tamis fin est placé entre la membrane semi-perméable et les rainures, afin de protéger la membrane. Un orifice d'air est usiné sur l'embase inférieure afin d'assurer la pression atmosphérique dans le sol.

Les variations de volume sont suivies à l'aide d'un système similaire à celui de Bishop et Donald, 1961, dans lequel le mercure est remplacé par de l'eau colorée recouverte d'une mince couche d'huile. Le confinement dans la cellule est réalisé par l'air, pour améliorer la précision optique. Les variations du volume d'eau, sont suivies au moyen d'un tube capillaire placé au niveau du réservoir de la solution de PEG.

Une autre adaptation plus récente est celle de Ghembaza, 2004, où il a réussi à développer un triaxial osmotique avec contrôle de la température. Le piédestal est usiné de façon à créer une chambre dans laquelle circule le PEG, et qui est mis en contact avec la base de l'échantillon au moyen d'une plaque perforée sur laquelle est placée la membrane. L'étanchéité du système a été améliorée en utilisant des joints toriques appropriés fixés sur un écrou, qui viennent serrer la membrane contre le piédestal, au moyen d'un filetage usiné sur son périmètre extérieur (Figure 7a).

### **3.2. Oedomètre osmotique**

En ce qui concerne l'oedomètre ; le mérite revient à Kassif et Ben Shalom, 1971, d'avoir réalisé le premier oedomètre osmotique, où les pierres poreuses inférieures et supérieures sont remplacées par des membranes posées sur des tamis fins. La solution de PEG était mise en circulation, entre le tamis et le métal de la cellule et la membrane, par un système de burettes. Ce système a été repris et amélioré par Delage *et al.* 1992, et ceci par l'adjonction d'un circuit fermé activé par une pompe péristaltique contenant la solution, la cellule osmotique et un réservoir contenant la solution du PEG (Figure 7b). Le système de mesure de variation de volume d'eau est similaire à celui du triaxial osmotique décrit plus haut. Dineen et Burland, 1995, ont repris le même principe, avec un contrôle des échanges d'eau par pesée continue du réservoir de la solution, et mesure de la succion dans l'échantillon à l'aide d'un tensiomètre fixé sur le piston de chargement. Ce dispositif a été récemment amélioré par Monroy, 2006, en permettant la mesure des contraintes latérales.

### **3.3. Appareil de cisaillement osmotique**

La seule adaptation connue de notre part de la boîte de cisaillement à la technique osmotique, est celle réalisée par Boso *et al.* 2005 (Figure 8). Un réservoir de 6x6cm<sup>2</sup>, usiné à la demi-boîte inférieure, vient loger une plaque perforée de 3mm d'épaisseur, qui sert comme support rigide à l'échantillon. Cette plaque est surélevée de 1mm du fond du réservoir afin de permettre la circulation de la solution de PEG. Une plaque de 4mm vient plaquer la membrane à l'aide de joints toriques, assurant ainsi une étanchéité parfaite du système. Cet appareil est muni aussi de deux tensiomètres placés sur le piston du chargement, permettant la mesure continue de la succion durant les essais. Les Auteurs ont adapté le même système de mesure des variations de volume d'eau que celui de Dineen et Burland, 1995.



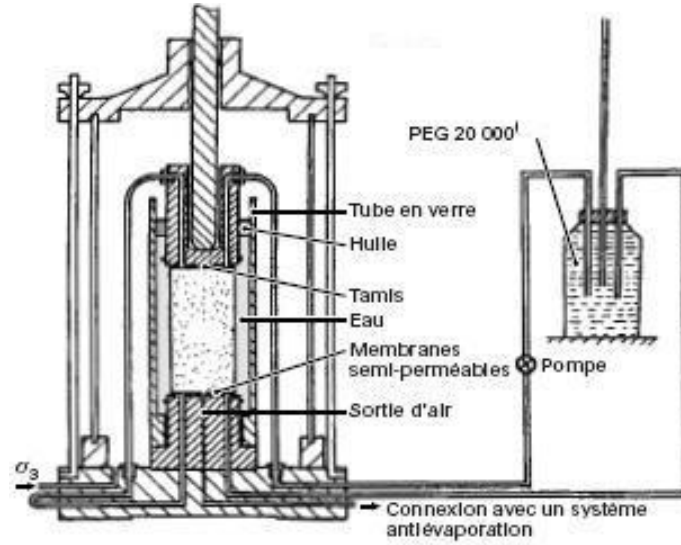


Figure 6. Triaxial osmotique, Delage et al, 1987.

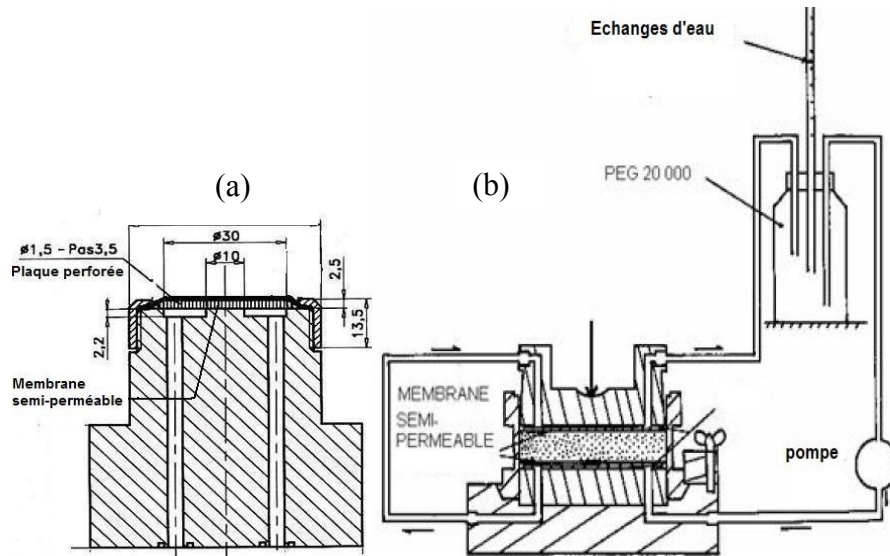
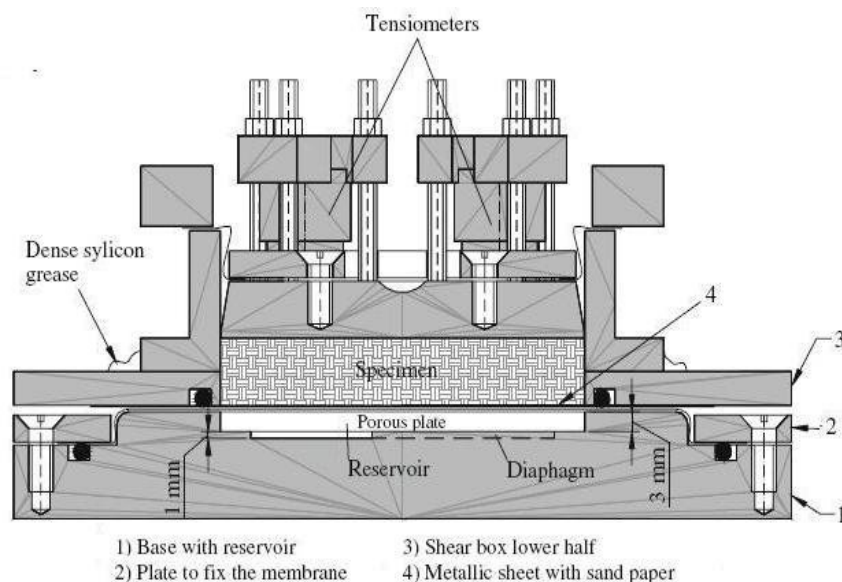


Figure 7. (a) Piédestal modifié, Ghembaza, (b) Oedomètre osmotique, Delage et al, 1992



**Figure 8.** Appareil de cisaillement osmotique, Boso *et al.*, 2005.

#### 4. Méthode de contrôle par phase vapeur

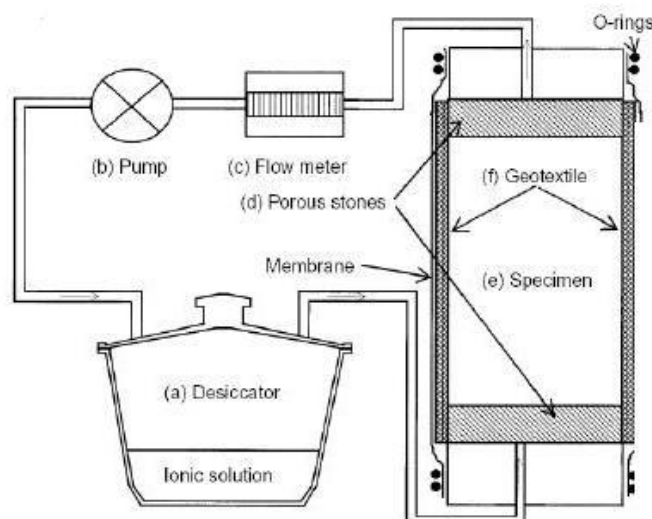
Cette technique est basée sur la loi de Kelvin, qui permet de relier la succion totale imposée à l'humidité relative. Elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée où le taux d'humidité relative est contrôlé par des solutions salines. Les transferts d'eau s'effectuent sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est assez long. Cette technique permet d'imposer des succions totales allant de quelques mégapascals à 1000MPa. Deux types de solutions sont utilisés : les solutions salines saturées, et les solutions acides non saturées.

Les solutions salines saturées ont l'avantage de garder leur potentiel osmotique malgré les échanges sol/humidité, au contraire des solutions acides non saturées, ce qui permet de garder une succion constante durant l'essai. L'utilisation de ce type de solution permet d'imposer des succions comprises entre 0 et 10 MPa. Pour l'imposition de succions plus élevées, il est préférable d'utiliser les solutions acides non saturées, et ceci avec un contrôle rigoureux de leur concentration, du fait qu'au-delà d'une succion de 150MPa, la relation succion concentration est fortement non linéaire, causant ainsi des variations importantes de succion dues au moindre changement de leur concentration (Blatz *et al.*, 2008). A noter aussi que cette méthode est fortement influencée par les fluctuations de température, c'est pour cela qu'elle doit être menée en conditions isothermes. Delage *et al.*, 1998, affirment qu'une incertitude de 1% dans la valeur de l'humidité relative conduit à une erreur absolue dans la valeur de succion de 1.38MPa, ce qui est tolérable pour des valeurs

de succions supérieures à 10MPa. Cette méthode a pu être implémentée dans les essais mécaniques, notamment l'essai triaxial et l'oedomètre, et ceci pour l'étude des argiles très plastiques utilisées dans les barrières ouvragées, et les centres de stockage des déchets nucléaires, où des succions très élevées sont rencontrées.

#### 4.1. Triaxial à contrôle par phase vapeur

La figure 9 représente un appareil triaxial utilisant la technique d'imposition de succion par phase vapeur développé par Blatz et Graham, 2000. La circulation de l'humidité à travers l'échantillon est améliorée par l'emplacement d'un géotextile entourant l'échantillon, réduisant ainsi la longueur du drainage et le temps d'équilibre. Deux psychromètres sont ajoutés (en haut et au milieu), pour donner des mesures directes de la succion durant le cisaillement. Un autre triaxial a été développé par Chavez *et al*, 2005, pour l'étude des enrochements de barrages. Cet appareil permet l'étude des échantillons de 250mm de diamètre et de 500mm de hauteur, sous contrôle de succion par phase vapeur.

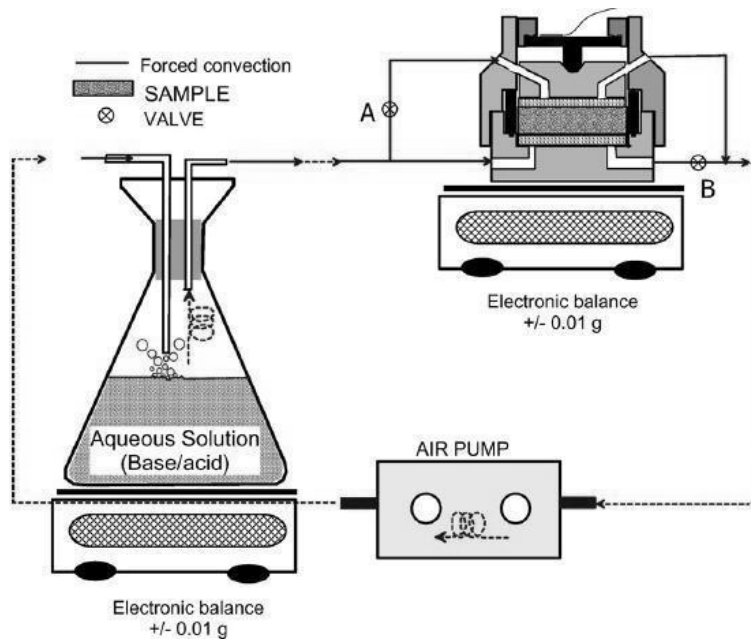


**Figure 9.** Triaxial à contrôle par phase vapeur Blatz et Graham, 2000.

#### 4.2. Oedomètre à contrôle par phase vapeur

Il est possible de classer les oedomètres utilisant la technique d'imposition de la succion par phase vapeur en deux catégories. La première est celle qui se rapproche le plus du principe du dessiccateur: une cellule oedométrique est placée dans une enceinte close dont l'humidité relative est maintenue constante. La solution saline est disposée dans un réservoir à l'intérieur de l'enceinte (Villar et Martín, 1996; Bélanteur *et al.* 1997, Cuisinier, 2002, Al-Mukhtar *et al.* 1999).

La deuxième catégorie est celle où une circulation d'air est assurée en permanence au niveau de l'éprouvette (Robinet *et al.* 1997, Alonso et Oldecop, 2003, Hoffman *et al.*, 2005). Dans ce cas, l'air mis en circulation est préalablement porté à une humidité relative déterminée dans un échangeur qui contient la solution saline. Un exemple d'appareil utilisant ce principe est donné sur la figure 10. Ce système a permis de réduire le temps d'équilibre de quelques semaines à une seule dans la majorité des cas.



**Figure 10.** Oedomètre à contrôle par phase vapeur, osmotique, Hoffman, 2005.

## 5. Conclusion

Cet article a permis de présenter les particularités des techniques expérimentales d'imposition de succion, ainsi que leurs adaptations aux appareils standards de mécanique des sols, notamment l'appareil triaxial, œdomètre et la boîte de cisaillement direct.

La méthode de translation d'axe, est la méthode d'imposition de succion la plus utilisée par les chercheurs, cependant la majorité des résultats obtenus par cette méthode couvrent un domaine de succion qui ne dépasse pas quelque centaine de kilopascal. La manipulation de grandes valeurs de succion avec cette méthode, nécessite un matériel très lourd, et des mesures de sécurité. Toutefois, cette méthode reste applicable pour des degrés de saturations inférieurs pour lesquelles la phase air

reste discontinue. La deuxième méthode présentée est la méthode osmotique. Cette méthode contrairement à la méthode de translation d'axes, se rapproche davantage des conditions réelles dans lesquelles se déroulent les écoulements non saturés, et permet d'atteindre des succions de 10 MPa sans difficultés. L'inconvénient majeur est la dégradation de la membrane résultant en application de succion moins que celle ciblée, et sa fragilité vis à vis des sollicitations mécanique notamment au cisaillement. Cette méthode peut être aussi une alternative à la méthode de contrôle de succion par phase vapeur, dans la gamme de succion inférieure à 10MPa. Au delà de cette valeur, l'utilisation de solutions salines saturées ou solutions acides non saturées, apparaît être la solution idéale pour atteindre des valeurs de succions très élevées. Son inconvénient est quelle nécessite un temps d'équilibre plus long que les autres méthodes, et elle est fortement influencée par les fluctuations de température.

## 6. Bibliographie

- AL-Mukhtar M., QI, Y., Alcover J.F. Bergaya F., « Oedometric and water retention behavior of highly compacted unsaturated smectites », Canadian Geotechnical journal, vol. 36, 1999, pp. 675-684.
- Alonso A., Oldecop L., « Behaviour of rockfill embankments », Revue française de Géotechnique, no102, 2003, pp. 3-19.
- Barden L., Madedor A.O., Sides G.R., « Volume change characteristics of unsaturated clay », ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation. Div., 95 SM1, 1969, pp. 35-52.
- Belanteur N., Tacherifet S., Pakzad M., « Etude des comportements mécanique, thermomécanique et hydromécanique des argiles gonflantes et non gonflantes fortement compactées », Revue Française de Géotechnique, vol 78, 1997 pp. 31-50.
- Bishop AW, Donald IB., « The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus », *Proceedings 5th ICSMFE*, Paris, vol 1, 1961, p. 13-21.
- Blatz J. Cui Y.J, Oldecop L., « Vapour Equilibrium and Osmotic Technique for Suction control », Geotechnical and Geological Engineering ; vol 26, n°6, 2008, pp. 661-673.
- Blatz JA, Graham J., « A system for controlled suction in triaxial tests », Géotechnique, vol 50, n°4, 2000, pp. 465-478.
- Boso M, Tarantino A, Mongiovi L., « A direct shear box improved with the osmotic technique », *Proceedings of advanced experimental unsaturated soil mechanics*, Trento, 2005, pp. 85-91.
- Chavez C., Romero E. Alonso E.E., « Volume change measurement of partially saturated rockfill in triaxial tests », *Proceedings of advanced experimental unsaturated soil mechanics*, Trento, 2005, pp. 92-98.
- Cui Y.J ; Delage P., « Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted sil ». Géotechnique, vol 46, n°2, 1996, pp. 291-311.
- Cuisinier. O., Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, France, 2002.

- Delage P., Suraji De Silva G.P.R, De Laure E., « Un nouvel appareil triaxial pour les sols non-saturés», Proc. 9th ECSMFE, Dublin, vol 1, 1987, pp.25-28.
- Delage P., Suraj de Silva G.P.R. and Vicol T., « Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer», 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, 1992, Texas, pp. 206-211.
- Delage P., Howat M.D. Cui Y.J., « The relationship between suction and swelling properties in a heavily compactes unsaturated clay». *Engineering Geology*, vol 50, 1998, pp, 31-48.
- Delage P., Cui Y.J., Comportement mécanique des sols non saturés. C302, Techniques de l'ingénieur Traité Construction, vol. c2, 2000.
- Dineen K. Burland J.B., « A new approach to osmotically controlled oedometer testing». Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Unsaturated Soils, Alonso & Delage, , Paris, vol. 2, 1995, pp. 459-465.
- Escario V, « Swelling of soils in contact with water at a negative pressure». *Proceeding. 2nd Int. Conference. on Engineering and Research on Expansive Clays*, Texas, 1969, pp. 207-217.
- Escario V. and Saez J., « Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction », *Proceeding 3rd Int. Conf. on Expansive Soils*, Haifa, 1973, pp. 195-200.
- Escario V., « Suction controlled penetration and shear tests », *Proceedings of the 4th International Conference. Exp. Soils*, Denver, CO, ASCE, Vol. 2, 1980, pp. 781-797.
- Fredlund DG, Rahardjo H., « Soil mechanics for unsaturated soils » Wiley, New York, 1993.
- Gan, J.K.M., Fredlund D.G., Rahardjo H., « Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using direct shear test», *Canadian Geotechnical journal*, vol 25, 1988, pp.500-510.
- Ghembaza M.S., Etude du comportement thermo-hydro-mécanique des sols argileux soumis à une pression interstitielle négative. Thèse Doctorat, Univ. du Havre, France, 2004.
- Habib S.A., Kato T. Karub D., « Suction controlled one dimensional swelling and consolidation behaviour of expansive soils», *Proceedings. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils Unsat'95*, vol. 1, 1995, pp. 101-107.
- Hilf JW., An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph. D. Thesis. Technical Memorandum No. 654, United State Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado, USA, 1956.
- Hoffmann C, Romero E, Alonso EE., « Combining different controlled-suction techniques to study expansive clays», *International symposium advanced experimental unsaturated soil mechanics*, Trento, June 27-29, 2005.
- Kassiff G., Ben Shalom A., « Experimental relationship between swell pressure and suction». *Geotechnique* vol. 21, 1971, pp.245-255.
- Komornik A. Livneh M. Smucha S., « Shear strength and swelling of clays under suction». Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils Denver, 1980.

- Lagny C., Comportement mécanique des sols fins sous fortes contraintes et fortes pressions négatives, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Paris, 1996.
- Maâtouk A, Leroueil S, La Rochelle P., « Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil », *Geotechnique*, vol. 45, n° 3, 1995, pp. 465–477.
- Monroy, R., The influence of load and suction changes on the volumetric behaviour of compacted London Clay. Ph.D. thesis, University of London. 2006, London.
- Ng CWW, Zhan LT, Cui YJ., « A new simple system measuring volume changes in unsaturated soils », *Canadian Geotechnical journal*, vol. 39, n 3, 2002, pp.757–764.
- Peck A.J. Rabbidge R.M. 1969., « Design and performance of an osmotic tensiometer for measuring capillary potential », *Soil Science Society American Proceedings*, vol 33, 1969, pp.196-202.
- Rampino C, Mancuso C, Vinale F., « Laboratory testing on an unsaturated soil: equipment, procedures, and first experimental results », *Canadian Geotechnical journal*, vol. 36, n 1, 1999, pp. 1–12.
- Robinet J.C., Pasquiou A., Jullien A., Bélanteur, N. Plas, F., « Expériences de laboratoire sur le comportement thermo-hydro-mécanique de matériaux argileux remaniés gonflants et non gonflants », *Revue Française de Géotechnique*, vol 81, 1997, pp. 53-80.
- Romero E. Characterisation and thermo-hydrmechanial behavior of unsaturated Boom clay: an experimental study, Ph. D. thesis. Universitat Politecnica de Catalunya, 1999.
- Sharma R.S. Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays. Ph.D. Thesis, University of Oxford, UK., 1998.
- Slatter E.E., Allman A.A. Smith D.W., « Suction controlled testing of unsaturated soils with an osmotic oedometer », *Proc. Int. Conf. Geo-Eng, 2000, Melbourne, Australia*.
- Tarantino A. Mongioví L., « A study of the efficiency of semi-permeable membranes in controlling soil matric suction using the osmotic technique », *Unsaturated Soils for Asia, Rahardjo, Toll & Leongn, Balkema, Rotterdam, 2000*, pp., 303-308.
- Vilar, O.M., « Suction controlled oedometer tests on a compacted clay », *Proceedings. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils Unsat'95*, vol. 1, 1995, pp. 201-206.
- Villar M.V. Martin, P., « Suction-controlled oedometer tests in montmorillonite clay: preliminary results », *Engineering Geology of Waste Disposal*, vol. 11, 1996, pp.309-312.
- Williams J. Shaykewich C. F., « An evaluation of polyethylene glycol PEG 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matrix potential », *Can. J. Soil Science*, vol. 102; n 6, 1968, pp. 394-398.

## 8. Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet PAI CMEP TASSILI (réf. 06/MDU/690) entre l'Université A. Belkaid, Tlemcen et l'Université du Havre.