
Mesure de la pression négative d'un sol Application au calcul de la pression de préconsolidation

Hocine Bendadouche* — Salah Lazizi**

* Université de Bejaia, département génie civil Bejaia, Terga Ouzemour Bejaia
06000 Algérie, bendadouche@yahoo.fr

** Laboratoire National de l'Habitat et la Construction, Edimco, BP 117 RP
Bejaia 6000, salahlazizi@yahoo.fr

RESUME : Le géotechnicien est confronté dans les régions arides et semi arides au phénomène de retrait gonflement, ce phénomène est tributaire de la capacité d'absorption ou succion du sol en place d'où l'importance de sa mesure. Une autre application de la succion qui est un paramètre physique difficile à mesurer est le calcul de tassement des argiles raides qui sont caractérisées par une courbure oedométrique continue et qu'il est difficile par les méthodes habituelles de déterminer la contrainte de préconsolidation (très élevée). La méthode de Smith permet de la déterminer si on connaît le coefficient de Skempton A_f et la pression négative qu'on a déterminée avec deux méthodes expérimentales.

Pour obtenir la pression interstitielle négative des échantillons surconsolidés, nous avons employé deux méthodes couramment utilisées dans les sols non saturés.

Dans cet article, nous expliquerons enfin, la divergence des résultats obtenus par les méthodes du papier filtre et du psychromètre.

ABSTRACT: The geotechnical faces in arid and semi arid to shrinkage swelling, this phenomenon is dependent on the absorption capacity or soil suction up the importance of its measurement. Another application of suction which is a physical parameter difficult to measure is the calculation of settlement of stiff clays that are characterized by a continuous curve oedometer and difficult by the usual methods of determining the preconsolidation stress (very high) . The method allows Smith to determine if one knows the Skempton coefficient A_f and the negative pressure that was determined with two experimental methods.

In this article, we finally explain the divergent results obtained by the methods of filter paper and psychrometer.

MOTS CLES : contrainte de préconsolidation, pression négative, papier filtre, psychromètre

KEY WORDS: preconsolidation stress, negative pressure, filter paper, psychrometer

1. Introduction

Ce travail réalisé au laboratoire de l'Ecole Centrale de Paris a pour objectif de :

- Présenter les différentes méthodes pour déterminer la pression de préconsolidation
- Déterminer la valeur de la pression négative avec la méthode du papier filtre et du psychromètre et évaluer la valeur de la pression de préconsolidation

Il s'agit d'un travail expérimental effectué sur une marne très raide extraite d'un sondage à une profondeur de 11.4 m au niveau du site de la centrale de Cattenom (Moselle France). La détermination de la contrainte de préconsolidation est relativement aisée quand il s'agit d'une argile remaniée où la détermination du point de courbure maximale est facile. On pourra dans ce cas appliquer la méthode de Casagrande ou la méthode de Schemertemann si les éprouvettes ont été chargées sous des pressions assez fortes pour atteindre la valeur de $0.42 e_0$. Dans le cas d'une argile raide, il est nécessaire de faire appel à d'autres méthodes.

2. Applications pour la détermination de la contrainte de préconsolidation

Pour déterminer les paramètres nécessaires au calcul de la contrainte de préconsolidation, nous avons effectué différents essais oedométriques avec cycles de chargement et déchargement sur des échantillons prélevés à 8.5m, 11.2m, 22.4m. Les résultats sont consignés dans le tableau 1. Les échantillons prélevés à une profondeur de 11 et 22m sont d'une grande raideur. Ce sont des matériaux très durs et très fragiles. On y observe de nombreuses fissures.

N°Essai	Profondeur (m)	σ'_{max} MPa	σ'_{vo} MPa	Ip %	Cu MPa	Méthodes de calcul		
						Approchée de Som (MPa)	Skempton (MPa)	J. et Al (MPa)
3	8.5	10	0.17	28	0.21	0.8	0.99	1.37
24	11.2	55	0.22	16	1.38	15	8.31	13.55
15	22.4	25	0.45	20	1.78	4	9.7	15.76

Tableau 1. Evaluation des contraintes de préconsolidation

3. Expression de la pression négative

Avant d'étudier l'expression de la pression négative, on a voulu rappeler quelques notations employées dans la suite de ce chapitre.

u : pression interstitielle

σ_3 : contrainte horizontale totale

σ_1 : contrainte verticale totale

σ_o : contrainte verticale effective in-situ

k_o : rapport de contraintes principales σ'_3/σ'_1

k_{on} : valeur du rapport σ'_h/σ'_v pour un sol normalement consolidé.

k_{oc} : valeur du rapport σ_h/σ'_v pour un sol surconsolidé

OCR : valeur du rapport σ'_{vmax}/σ'_v , c'est le rapport de surconsolidation

Le prélèvement non remanié d'un sol fin s'effectue à volume constant. En effet, du fait de l'annulation des contraintes totales, l'échantillon a tendance à dilater, mais sans apport d'eau, le volume du sol reste constant et par conséquent la pression interstitielle devient négative. Cette pression interstitielle est donnée par les relations suivantes:

$$u = u_o + \Delta u \quad [1]$$

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

A et B sont les coefficients de Skempton avec $B=1$ pour les sols saturés. A dépend de plusieurs paramètres notamment l'état de consolidation et l'amplitude des déformations.

In situ le sol saturé où règne une pression interstitielle u , est soumis aux contraintes totales suivantes :

$$\sigma_1 = \sigma'_o + u_o$$

$$\sigma_3 = k_o \cdot \sigma'_o + u_o$$

Pour l'essai triaxial de révolution ici considéré, (cas d'un sol saturé $B=1$), on a

$\Delta\sigma = 0$, Après prélèvement, les variations de celles-ci sont les suivantes :

$$\Delta\sigma'_1 = 0 - (\sigma'_o + u_o)$$

$$\Delta\sigma'_3 = 0 - (k_o \cdot \sigma'_o + u_o)$$

$$\Delta u = -(k_o \cdot \sigma'_o + u_o) + A[(-\sigma'_o - u_o) + k_o \cdot \sigma'_o + u_o] \quad [2]$$

En combinant les expressions [1] et [2], on obtient :

$$u = -\sigma'_o [k_o(1-A) + A] \quad [3]$$

Le nouvel état de contrainte est le suivant :

$$\sigma_1 = \sigma'_3 = -u = \sigma'_o [k_o(1-A) + A] \quad [4]$$

Pour un sol isotrope $A = 1/3$

$$u = -\sigma'_o \left[\frac{1 + 2.k_o}{3} \right] \quad [5]$$

Ces formules ont été établies dans le cas des essais de chargement au triaxial de révolution.

4. Evolution du coefficient de Skempton

Les valeurs du coefficient A ont été calculées dans l'hypothèse d'une saturation complète du sol ($B=1$) à partir de l'expression :

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad [6]$$

4.1. Argile normalement consolidée (NC)

Zervoyannis a regroupé les valeurs de A_f (A_f étant la valeur de A à la rupture) en fonction de l'indice de plasticité (I_p) à partir des essais non drainés (CU) recueillis dans la littérature. Le nuage des données est assez dispersé, avec un coefficient de corrélation de 0.65. Il obtient la relation suivante :

$$A_f = 1.25 \cdot \frac{I_p (\%)}{140} \quad [7]$$

4.2. Argile surconsolidée

Le comportement des argiles est caractérisé par une évaluation de la pression interstitielle moins importante que pour l'argile NC. Pour des valeurs de $OCR < 4$, il est même possible de mesurer des pressions négatives comme le montre Henkel dans la figure 1b. A partir des données sur l'argile verte de Romainville, on a tracé la variation de A_f en fonction du degré de consolidation comme le montre la figure 1(a).

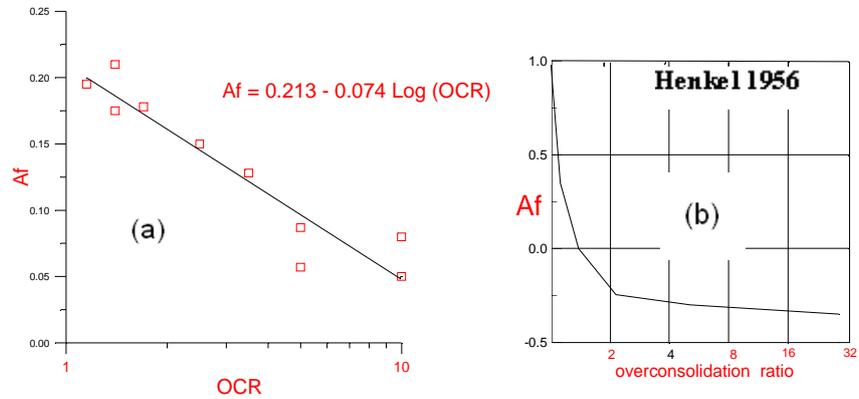


Figure 1. Variation de A_f en fonction de OCR

5. Mesure de la de la pression négative

L'élément essentiel qui caractérise les propriétés des sols non saturés est l'existence d'une pression interstitielle négative appelée aussi pression de succion. Cette pression peut être reliée à la teneur en eau.

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la pression de succion.

- La méthode utilisant le papier filtre
- La méthode des psychromètres thermocouples

5.1. Identification du matériau

Le matériau utilisé est une marne très raide extraite du sondage SC9 du chantier de la centrale de Cattenom (Moselle France). Elle a été prélevée à une profondeur de 11.4 m. Les prélèvements ont été effectués au moyen d'un carottier triple 131K2. Après extraction du carottier, les échantillons ont été placés dans des conteneurs en plastique puis paraffinés. Les propriétés physiques de ce matériau sont consignées dans le tableau 2.

Matériaux	Wl %	Wp (%)	w	e	Sr	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³
Marne de Cattenom (-11.4m)	51	24	0.753	0.17	1.23	2.7	23.28

Tableau 2. *Propriétés physiques du matériau*

5.2. Méthode du papier filtre

C'est une méthode indirecte de mesure de pression. Son principe repose sur la mesure de la teneur en eau d'un échantillon de papier filtre, en équilibre avec l'échantillon de sol. D'après GARDNER, la méthode du papier filtre peut être utilisée pour mesurer des pressions interstitielles allant de 30 KPa à 100000 KPa.

- Mise en place du papier filtre

La première méthode consiste à disposer le papier filtre entre deux éprouvettes en forme de galette soigneusement aplanie sur une face. C'est une argile très raide qui s'apprête très bien à l'usinage au tour mais sa fragilité excessive la rend très sensible à la rupture à cause de la présence de nombreuses micro-fissures généralement horizontales.

L'ensemble, enveloppé avec du plastique puis mis en présence d'un papier humide pour éviter toute modification de la teneur en eau, le complexe échantillon-papier est mis dans un sac étanche et laissé dans un endroit humide pendant un mois.

Au bout d'un mois, on détermine la teneur en eau du papier filtre. On obtient une teneur en eau moyenne de 16.8 %. A l'aide de la courbe d'étalonnage du papier filtre (Figure 3) paramétrée en pF, on obtient une valeur en pF comprise entre 5 et 5.5

- Résultats des essais au papier filtre

Teneur en eau (w) :

Echantillon $w_1 = 0.0749$ $w_2 = 0.0797$

Papier filtre $w_1 = 0.1743$ $w_2 = 0.1617$

Pression interstitielle négative $10\text{MPa} < u < 31.6\text{MPa}$

$$u(\text{MPa}) = e^{pF}/10000 \quad (\text{Schofield 1935}) \quad [8]$$

Cette méthode est une approche proposée par ASTM Standard Test Method for Measurement of Soil Potential, utilisant le filtre (ASTM D 5298).

5.3. Méthode du psychromètre à thermocouple

La psychrométrie permet grâce à la mesure de température, de déterminer l'humidité relative d'une enceinte fermée. Cette technique consiste à mesurer l'humidité relative en utilisant deux thermomètres : l'un est sec et mesure la température T_0 de l'enceinte (température ambiante). L'autre est maintenu constamment humide, il mesure la température " T_e " d'évaporation de l'eau dans l'atmosphère de l'enceinte. L'échantillon muni de sondes est connecté au psychromètre type Wescor HP115 (Figure 4).

- Mise en place des sondes

Cette méthode consiste à disposer des psychromètres thermocouples à l'intérieur de l'échantillon dans des trous de 5mm de diamètre et de 12mm de profondeur. On enveloppe ensuite l'échantillon avec du papier aluminium, sur la partie latérale, on place une capote autour de l'échantillon maintenant ainsi le papier aluminium. Cette membrane est recouverte de papier aluminium, l'ensemble est recouvert de paraffine.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 3.

N° de la sonde	8	9	10	moyenne
Pression négative (MPa)	2.86	2.77	2.98	2.87

Tableau 3. Résultats des essais au psychromètre

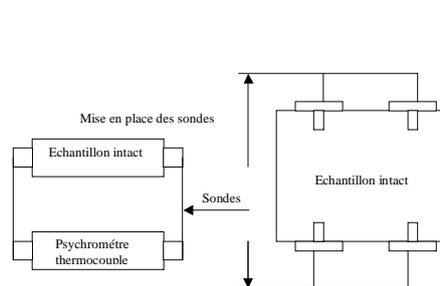


Figure 2. Schéma de montage de sondes psychrométriques

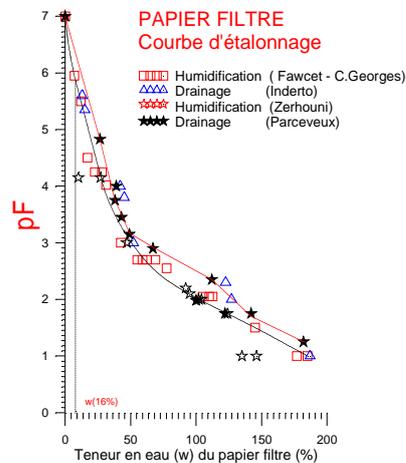


Figure 3. Courbe d'étalonnage du papier filtre

6. Détermination de la contrainte préconsolidation (σ'_c)

On peut estimer la contrainte de préconsolidation à partir de la formule de Smith (1966). Cette méthode nécessite la connaissance du coefficient de Skempton A et de la pression négative qu'on détermine à l'aide du psychromètre et du papier filtre.

$$k_{oc} = k_{on} \cdot [\sigma'_c / \sigma'_v]^m \quad \text{d'où} \quad [9]$$

$$\sigma'_c = \sigma'_v \cdot e^{[\text{Log}(k_{oc}/k_{on})]/m} \quad [10]$$

m = coefficient compris entre 0.4 et 0.5

6.1. Détermination de k_{om} , m

- Description de l'appareil de mesure de k_o

Nous avons développé à l'Ecole Centrale de Paris, notre propre appareil de mesure de k_o . La cellule oedométrique avec mesure de la déformation latérale, conçue au laboratoire, est composée principalement d'un anneau en laiton 0.4 mm d'épaisseur et de 76.4 mm de diamètre. Cet appareil permet la mesure de la déformation relative de l'anneau grâce à deux jauges de contraintes diamétralement opposées et collées à l'anneau. Ces deux jauges sont reliées à un pont d'extensométrie (Figures 1 et 2) où le résultat est donné sous forme de déformation relative en 10^{-6} , en outre deux autres jauges de compensation de température ont été utilisées pour minimiser la déformation apparente produite par les variations de température. Les jauges employées sont du type flat 6 dont la déformation limite est de 3 %. Les essais sont réalisés à vitesse de déformation constante ($1 \mu\text{m}/\text{mn}$) pour éviter toute surpression.

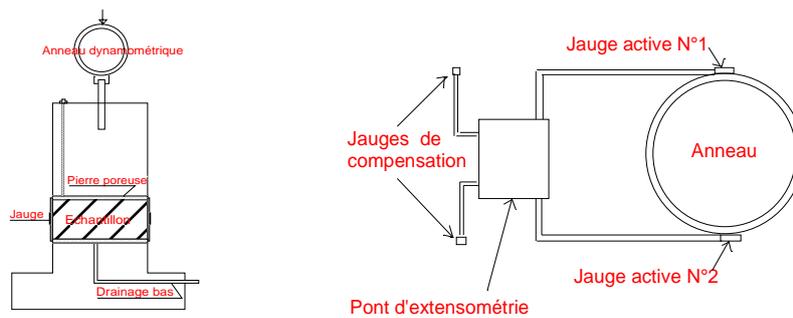


Figure 4. Schéma de l'appareil de mesure k_o

- Résultats des mesures de k_o

La figure 5a montre qu'en déchargement, pour un OCR égal à 40, la courbe devient asymptotique à l'enveloppe limite et pour des contraintes inférieures, elle quitte l'enveloppe limite et coupe l'axe des contraintes horizontales.

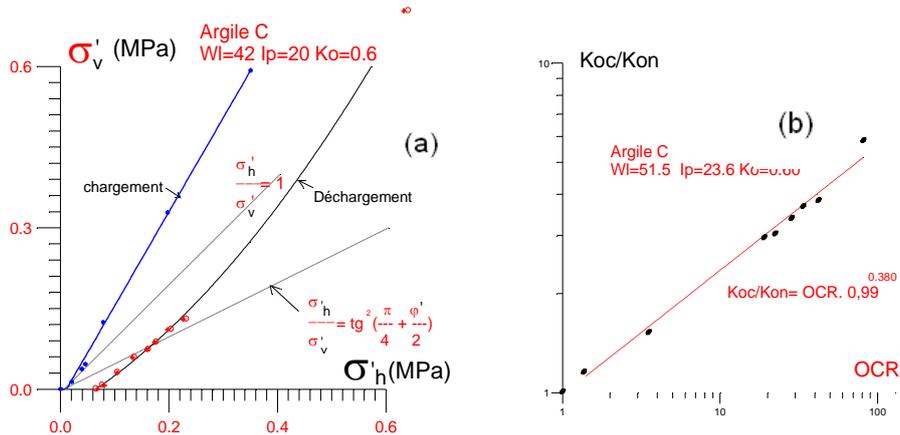


Figure 5 a) *Mesure de la contrainte latérale Argile C.* b) *Variation de OCR en fonction K_{oc}/K_{on} . Argile C.*

Les valeurs de k_{on} et m ont été déterminées par notre essai oedométrique avec mesure de la contrainte latérale (Essai k_o). On trouve :

$$m = 0.38 \quad k_{on} = 0.60 \text{ (Figure 5b)}$$

6.2. Détermination de k_{oc}

La valeur de k_{oc} est déterminée à partir de la pression négative u qu'on a obtenue à l'aide du papier filtre et du psychromètre.

A partir de la formule (3) ci-dessous, on tire la valeur de k_{oc} :

$$-u = \sigma'_v [k_o (1-A) + A] \tag{11}$$

$$\text{d'où } k_{oc} = [u + \sigma'_v \cdot A] / [\sigma'_v \cdot (A-1)] \tag{12}$$

En absence de la valeur exacte de A , la corrélation de Henkel donne la valeur du coefficient de Skempton A en fonction de OCR. On a pris une valeur de -0.5

La valeur de OCR est déterminée par la formule préconisée (12) par Paul W. Mayne et recommandée par Jamiolkowski et Al.

Cette formule donne une valeur OCR de 61.9 ($Cu=1.38MPa, \sigma'_{vo}=0.22 MPa$).

$$Cu/\sigma'_{vo} = (0.23 \pm 0.04)OCR^{0.8} \quad [13]$$

En absence de la valeur exacte de A, la corrélation de Henkel donne la valeur du coefficient de Skempton A en fonction de OCR. Pour une valeur de OCR égale 61.9, On a pris une valeur de -0.5 (Figure 1b).

6.3. Détermination la contrainte de préconsolidation

Les résultats des essais :

- méthode papier filtre :

Af=-0.5 u = 10 MPa $k_{oc}=30$ $\sigma'c=7220$ MPa
 u =310 MPa $k_{oc}=87$ $\sigma'c=>>>$ MPa

- méthode du psychromètre :

Af=-0.5 u = 2.87 MPa $k_{oc}=8.3$ $\sigma'c=231$ MPa

7. Conclusion

Les argiles raides sont caractérisées par une courbure oedométrique continue où il est difficile de déterminer par les méthodes habituelles la contrainte de préconsolidation (très élevées). La méthode de Smith permet de la déterminer si on connaît la pression négative et le coefficient de Skempton Af.

Pour obtenir la pression interstitielle négative des échantillons surconsolidés, nous avons employé deux méthodes couramment utilisées dans les sols non saturés.

- méthodes du papier filtre

- méthode du psychromètre

Ces méthodes qui s'appuient sur le calcul de la teneur en eau, nous ont montré l'influence du remaniement, du vieillissement et l'assèchement du matériau. La grande dispersion des résultats des 2 méthodes en ait une conséquence. En effet les valeurs de la contrainte de consolidation sont excessivement élevées et en contradiction avec les résultats graphiques. La valeur de k_o dépasse largement le coefficient de butée.

8. Bibliographie

- Bendadouche H., « Les modules en mécanique des sols », Thèse Docteur ECP.1993.
- Henkel D.J., « The effet of overconsolidation on the behaviour of clay during shear », *Geotechnique*, vol. VI, 1956.
- Gardner R., « A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range », *Soil Sci.*, 43:277-283, 1937.
- Magnan J.P. Mehmet P., « Paramètres d'élasticité anisotrope de l'argile molle organique de Cubzac-les -Ponts à l'état surconsolidé », *Rapport de recherche LCPC N°131*, 1984.
- Skempton A.W., « The pore coefficient A et B.», *Geotechnique*, Vol 4, 1954, pp, 143-147.
- Schofield, R. K., «The pF of the Water in Soil», *Transactions, 3rd International Congress of Soil Science*, Vol. 2, pp. 37-48, 1935.
- Takla M., « Contribution à l'étude des argiles saturées et non saturées : Analogie avec les matériaux carbonés », Thèse Docteur ECP 1989.
- Zerhouni M.I., « Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols. Applications au calcul des routes », Thèse Docteur ECP. 1991.
- Zervoyannis C., « Etude synthétique des propriétés mécaniques des argiles saturées et des sables sur chemin oedométrique et triaxial de révolution », Thèse Docteur ECP, 1982.