

Novel experimental method to determine clay soil free swelling

Nouvelle méthode expérimentale pour déterminer le gonflement libre des sols argileux

H. Asselman¹, A. Bakkali², M. Ajdour² et M. Essaïdi¹

¹Laboratoire Systèmes de Télécommunication, Equipe d'Optique et Photonique, Faculté des Sciences, Tétouan, Maroc.

²Laboratoire Modélisation et Analyse des Systèmes. Equipe de Modélisation et Simulation des Systèmes Mécaniques.

Abstract. The propose device is based on Michelson interferometer. In fact, we put the a sample of cylindrical shape dry clay of length L and radius R on the mobile mirror, This sample can retain a drop of water on its surface in order to monitor water content. When injecting a volume of distilled water (a few drops) to the surface of the sample, it swells and moves the mirror. Consequently, we see scrolling fringes and we proceed to count their number during the time t during this swelling (about 40 min). We can measure the free displacement of the mirror and to establish the value of swelling expressed in% or g/cm^3 , the swelling under stress σ (to compare with the oedometer) and speed during a time t .

Résumé. Le dispositif est un interféromètre de Michelson modifié. En effet sur le miroir mobile est collé un échantillon d'argile cylindrique, séché, de longueur L , de rayon R et façonnée de manière à retenir les gouttes d'eau à sa surface pour contrôler la teneur en eau. Lorsqu'on injecte un volume d'eau distillée (quelques gouttes) à la surface de l'échantillon, celui-ci se gonfle et le miroir se déplace. On observe le défilement des franges et on procède au comptage de leur nombre durant le temps t que dure le gonflement (environ 40 mn). On peut ainsi mesurer le déplacement libre du miroir et déterminer: la valeur du gonflement exprimé en % ou g/cm^3 , le gonflement sous contrainte σ (pour comparer avec l'œdomètre) et sa vitesse au cours du temps t .

1 Introduction

Les sols argileux sont connus pour leur forte propension à réagir avec l'eau. Une humidification des particules argileuses provoque le gonflement. Ce phénomène est complexe, il est dû d'une part à la saturation des pores du sol qui neutralise les forces capillaires et d'autre part à l'absorption des molécules d'eau sur la surface des particules argileuses avec pénétration d'eau entre les feuillets qui constituent ces particules. En cas d'évaporation de l'eau contenue dans l'échantillon, une diminution de volume se produit, ce qui provoque l'apparition de fissures de retrait. Ces phénomènes de gonflement et de retrait causent de nombreux désordres pour les structures de génie civil fondées en surface des sols gonflants et pour les ouvrages enterrés. Divers désordres ont été répertoriés dans ce domaine [1] et [2].

Par ailleurs, les propriétés des argiles gonflantes associées à la faible perméabilité des sols argileux en ont fait des matériaux utilisés pour la rétention d'eau et la conception de filtres tels que les noyaux de barrages et les barrières d'étanchéité dans les sites de stockage des déchets classiques ou nucléaires. L'étude du comportement des argiles gonflantes est donc un domaine important qui peut aboutir à améliorer la maîtrise de leur utilisation et à la réduction des effets indésirables qu'elles peuvent induire. Le gonflement des argiles met en jeu un couplage entre plusieurs phénomènes physico-chimiques et mécaniques. Le gonflement relève de deux phénomènes principaux : gonflement cristallin par hydratation des espaces inter foliaires et gonflement osmotique par répulsion entre les feuillets des particules. Les modifications de l'état de chargement mécanique et du degré de saturation du sol peuvent influencer considérablement ces deux mécanismes de base. Le phénomène de gonflement se développe à l'échelle microscopique, au niveau des particules. Mais, dans la pratique il est préférable de le caractériser par une approche macroscopique. Des essais peuvent alors servir à quantifier le processus de gonflement en fournissant des paramètres directement exploitables dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil. Dans la pratique les essais peuvent être faits soit in-situ [3], soit en laboratoire [4]. Deux grandeurs sont utilisées pour caractériser le gonflement d'un sol:

- le potentiel de gonflement qui correspond à la variation relative de volume d'un échantillon libre non soumis à des charges mécaniques, [5];

- la pression de gonflement qui peut se définir comme étant la pression induite par l'hydratation d'un échantillon confiné dans des conditions isochores ou bien par la pression qu'il faudrait appliquer à un échantillon ayant gonflé librement pour le ramener à son état initial non déformé [6].

Il faut remarquer que le potentiel de gonflement n'est pas proportionnel à la pression de gonflement et que dans la pratique il faut connaître ces deux grandeurs pour caractériser le gonflement.

L'essai mécanique qui permet de mesurer la pression de gonflement est effectué grâce à un œdomètre. Le gonflement libre pose plus de problèmes au niveau expérimental car il faut être capable de mesurer la déformation d'un échantillon sans le perturber et sans le soumettre à un chargement mécanique important. Ainsi lorsqu'on utilise un œdomètre, une perturbation se produit suite au frottement de l'échantillon sur les parois latérales. La situation est particulièrement délicate lorsque le degré de saturation de l'échantillon est faible, car dans ces conditions la déformation est faible et il faut être capable de la détecter.

Nous proposons dans le cadre de ce travail une nouvelle technique expérimentale basée sur l'interférométrie laser pour mesurer la déformation de gonflement libre et le gonflement sous contrainte. Cette technique admet une précision relativement bonne car on est capable de détecter un déplacement inférieur au micromètre.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental que nous avons développé est une adaptation de l'interféromètre de Michelson. Il a été utilisé auparavant pour mesurer la dilatation thermique des solides [7]. Les applications de cet interféromètre que nous avons rencontré dans la bibliographie sont :

- Magnétostriction: Certains métaux et alliages ferromagnétiques changent de dimensions sous l'action d'un champ magnétique. Pour un barreau d'acier, la variation relative selon le courant I qui traverse la bobine, et donc selon le champ magnétique appliqué est exponentielle.

- Piézoélectricité : Un cristal piézoélectrique se polarise spontanément sous l'action d'un champ électrique. Il se déforme, ce qu'on appelle électrostriction. L'allongement du chemin optique selon la tension appliquée est linéaire.

- Détermination de l'indice de réfraction de l'air.
- Détermination de la longueur d'onde de la source laser.
- Détermination du coefficient de dilatation linéaire α des solides [8].

La différence de marche entre deux franges, brillante- sombre, consécutives varie alors de $\lambda/2$ qui correspond à une variation de l'épaisseur de la lame d'air de $\lambda/4$, inférieur au micromètre (environ $0,2 \mu\text{m}$ pour $\lambda = 632,8 \text{ nm}$) d'où l'intérêt et la sensibilité de notre méthode expérimentale

L'application originale de ce dispositif pour étudier le phénomène de gonflement des argiles a été présentée pour la première fois dans [9].

Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la figure 1 où Le miroir mobile est collé à un échantillon d'argile cylindrique, séché, de longueur L , de masse m , de rayon R et façonné de manière à retenir les gouttes d'eau à sa surface pour contrôler la teneur en eau.

Le système de détection est constitué d'une caméra reliée à l'ordinateur, un logiciel permettant de suivre le défilement des franges d'interférence et leur comptage.

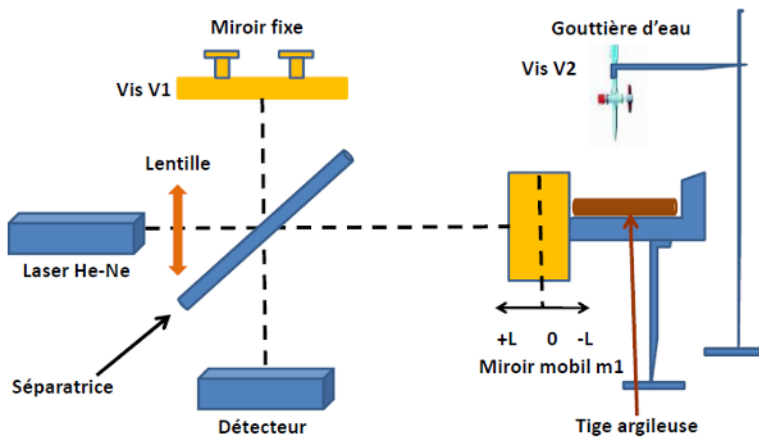


Fig. 1. Schéma du dispositif expérimental.

Lorsqu'on injecte un faible volume d'eau (quelques gouttes) distillée à la surface de l'échantillon, celui-ci gonfle et le miroir se déplace. On observe le défilement des franges d'interférences et on procède au comptage de leur nombre N durant le temps t que dure le gonflement (environ 40 minutes). On peut ainsi mesurer le déplacement absolu du miroir et déterminer la valeur du gonflement.

On peut exprimer le gonflement d'un échantillon pour une humidité, par la différence du volume spécifique apparent (cm^3/g) d'une motte à l'humidité et de celui d'une motte sèche du même échantillon à l'humidité, soit :

$$g(h) = V_h - V_{hs} \quad (1)$$

Dans notre cas, en supposant que le milieu est isotrope les deux expressions du gonflement sont :

$$g(h) = \frac{dV}{m} = \frac{3\pi R^2 N \lambda_0}{2m} \quad (\text{cm}^3/\text{g}) \quad (2)$$

$$g(h) = \frac{dV}{V} = \frac{3dL}{L} = \frac{3N\lambda_0}{2L} \quad (\%) \quad (3)$$

Les déplacements mesurés sont micrométriques et donc relativement faibles.

3 Résultats et discussions

3.1 Gonflement linéaire libre en fonction de la teneur en eau

En tant qu'application de la nouvelle méthode de détermination du potentiel de gonflement des sols argileux, nous avons effectué une étude expérimentale afin de relier la teneur en eau à la dilatation lue.

Dans les conditions ambiantes suivantes : un taux d'humidité de 65% et une température $T=30^\circ\text{C}$, la courbe représentant la variation du déplacement relatif du miroir en fonction de la teneur en eau distillée injectée est représentée sur la figure 2.

La courbe présente trois phases: la première est ascendante, la deuxième est linéaire enfin la troisième décrit la saturation en accord avec les allures des courbes rencontrées dans la littérature [10].

Par régression sur la partie linéaire on obtient le déplacement relatif.

A l'aide d'une balance de précision 10-4g, nous avons pu constater qu'un échantillon d'argile placé dans l'enceinte de la balance durant le temps t subit une diminution de masse due à l'évaporation. Ce qui confirme qu'un échange d'humidité se produit entre l'échantillon et l'air ambiant. D'où la nécessité de corriger la teneur en eau injectée de la quantité évaporée (figure 2).

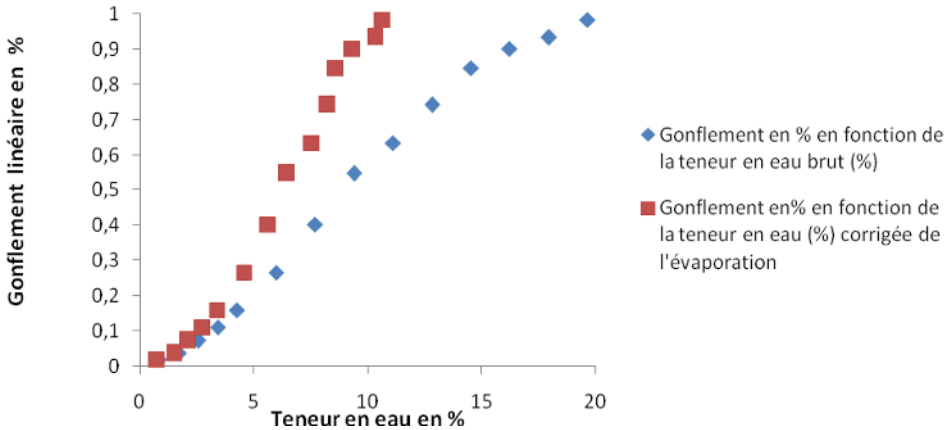


Fig. 2. Déplacement relatif du miroir en fonction de la teneur (humidité de 33% et T= 14.5°C)

Le gonflement libre maximum (à la saturation) est de 0,0154 cm³/g ou 0,843% est de même ordre de grandeur avec celui rencontré dans la référence [10] où les valeurs sont comprises entre 0,02 et 0,16 cm³/g pour des teneurs d’argile comprises entre 25,2 et 44,7%.

3.2 Gonflement linéaire libre en fonction de la profondeur

Cette expérience a été réalisée sur un échantillon de longueur L, de largeur l et de hauteur Z (Figure 3) en accord avec les allures des courbes rencontrées dans la littérature [11].

Nous mesurons le temps que met l’eau pour atteindre une profondeur Z et nous déterminons sa vitesse moyenne (constante) de diffusion : $V \approx 6 \mu\text{m}/\text{sec}$

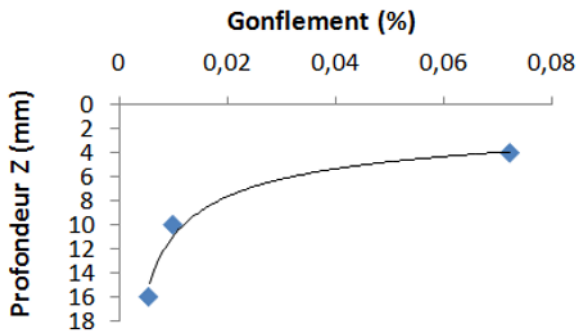


Fig.3. Gonflement (%) en Fonction De La Profondeur Z (mm);pour une teneur en eau de 5,3%

3.3 Gonflement linéaire sous pression extérieur σ (les conditions d’un « œdomètre »)

A l’aide d’une poulie et des masses marquées nous avons exercé sur la face libre de l’échantillon différentes valeurs de contraintes σ (figure 4).

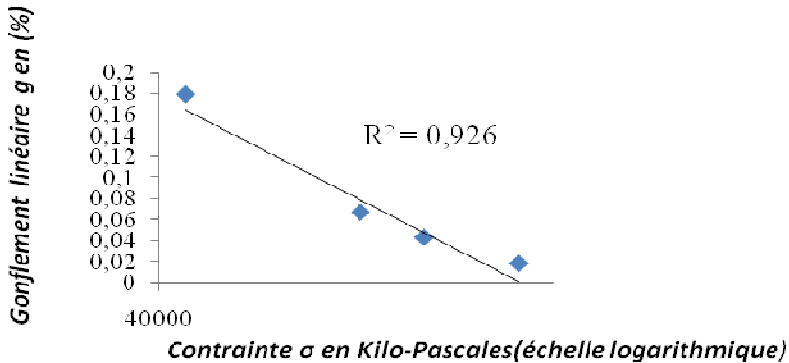


Fig. 4. Gonflement linéaire (%) sous pression en Kilo-Pascales (échelle logarithmique)

Le coefficient de gonflement linéaire sous pression est $g(h)=0,21\%$

Seed H.B. et al. [12] ont montré que le gonflement libre d'un échantillon confiné latéralement peut être relié à l'indice de plasticité I_p du sol par l'expression suivante:

$$g = 21.6 \times 10^{-5} (I_p)^{2.44} \quad (4)$$

avec $I_p = W_L - W_P$: est la quantité d'eau nécessaire pour faire passer un sol de l'état solide ($W < W_P$) à l'état liquide ($W > W_L$). La relation (3) est obtenue par une étude statistique des résultats expérimentaux, s'applique aux matériaux contenant entre 8% et 65% d'argile. La comparaison de cette formule avec les résultats expérimentaux a abouti à une fourchette d'erreur d'environ 33% sur le gonflement libre. Dans le cas de notre échantillon: $I_p = 34\%$ avec $W_L = 53\%$ et $W_P = 19\%$ (valeurs fournies par le bureau d'études géotechniques GEORET à Tétouan-Maroc) on obtient: $g = 1,2\%$.

Komornik et David [13] ont travaillé plus particulièrement sur des sols non remaniés, car la méthode de compactage est un facteur très influent sur les paramètres de gonflement. Les nombreux essais qu'ils ont réalisés ont montré qu'une simple corrélation linéaire est possible entre le gonflement libre g et l'indice de plasticité I_p :

$$g = 0.9 + 2.1 I_p \quad (5)$$

pour l'argile; la fourchette d'erreur obtenue étant d'environ 25 %. Dans notre cas $g = 1,6\%$.

Des modélisations de l'évolution du gonflement en fonction du temps ont été proposées par différents auteurs. D'un point de vue empirique, certains auteurs (Sridharan et al. [14] Didier et al. [15] préconisent de représenter la cinétique du gonflement en terme de déformation volumique v en fonction du temps par une loi hyperbolique de la forme:

$$g = \frac{t}{a+b.t} \quad (6)$$

où a et b désignent des paramètres expérimentaux

Vayassade [16] a, quant à lui, proposé la relation suivante :

$$g = G \frac{t}{B+t} \quad (7)$$

où G désigne le taux de gonflement final obtenu pour un temps infini et B le temps de demi-gonflement (par rapport au gonflement final). En appliquant la formule précédente et la figure 2, on obtient $g = 0,52\%$ pour un temps « infini ». Ces valeurs aux incertitudes près sont en bon accord

avec notre détermination: Tableau1. Dans le cas du gonflement sous pression nous remarquons que l'échantillon de 13 grammes en injectant une teneur en eau de 5,3% se gonfle et peut soulever environs 50 fois son poids! D'où l'intérêt et l'importance de l'étude afin de prévenir d'éventuels problèmes dans les constructions.

Tableau 1. Comparaison des résultats

| Références | Méthode | Valeurs de gonflement Libre en % ou en cm^3/g | Valeurs de gonflement de pression en % |
|---------------------|---|---|--|
| [12] | Statistique des résultats expérimentaux | $1,2 \pm 33\%$ | |
| [13] | Compactage | $1,6 \pm 25\%$ | |
| [16] | Théorie cinétique de gonflement | 0,52 | |
| [10] | Expérimentale | $(0,02-0,16) \text{ cm}^3/\text{g}$ | |
| Notre détermination | Interférométrie laser | $0,84 \text{ ou } 0,015 \text{ cm}^3/\text{g} \pm 3\%$ | $0,21 \pm 3\%$ |

3.4 Cinétique du gonflement et de retrait libres

En mesurant le temps entre deux ordres consécutifs du défilement des franges d'interférences nous pouvons déterminer la vitesse moyenne du déplacement relatif du miroir (figures 5a et 5b).

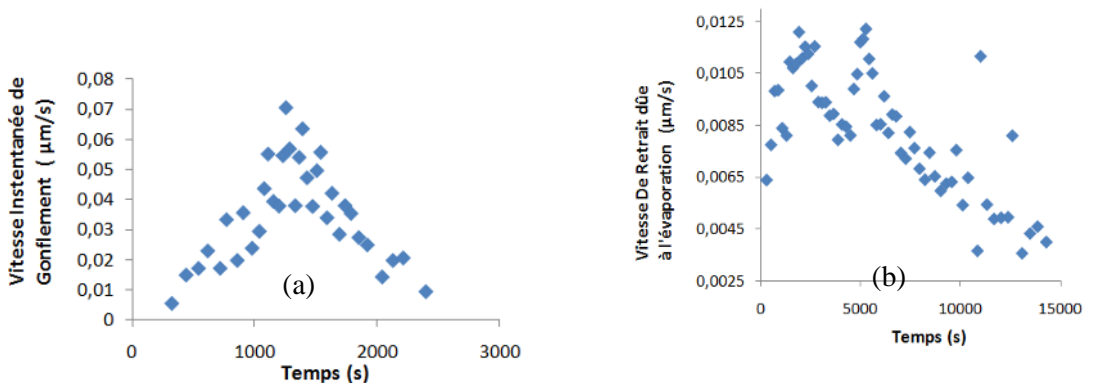


Fig. 5. (a) Variation de la vitesse instantanée du gonflement en Fonction du temps. (b) variation de la vitesse instantanée de Retrait dû à l'évaporation en Fonction du temps.

Nous constatons en particulier que l'évaporation présente des fluctuations, ce qui confirme la nécessité de travailler sur un échantillon stabilisé ce qui implique un conditionnement de l'air. La méthodologie que nous avons mise au point nous a permis de détecter de manière inédite l'influence des conditions hygrométriques sur le phénomène de gonflement des sols argileux. Nous envisageons dans le futur de travailler dans des conditions où la température et le degré d'humidité sont stabilisés afin de mieux rendre compte de l'interaction air-échantillon.

4 Conclusions

Cette réalisation expérimentale, originale, nous a permis de caractériser le phénomène de gonflement. Il se distingue des autres techniques par:

- Ce dispositif permet de mesurer le gonflement des argiles en temps record (environ 40 minutes).
- La sensibilité de l'appareil est remarquable. En effet, quelques gouttes d'eau suffisent pour déceler le phénomène de gonflement.

- C'est une nouvelle méthode expérimentale pour déterminer le potentiel de gonflement libre et sous pression, des sols argileux et trouve son application dans le domaine de génie civil (étude de la stabilité des sols pour la construction)
- Il se distingue des autres dispositifs par sa grande précision (environ 3%) et sensibilité (0.1µm).
- Capable de mesurer la déformation d'un échantillon sans le perturber et sans le soumettre à un chargement mécanique important, contrairement à l'œdomètre.
- Il permet de mettre en évidence l'influence de l'humidité de l'air sur l'argile (transfert de masse). L'une des difficultés majeures est le contrôle de l'humidité de l'échantillon. C'est ce point très important qui conditionne la validité des mesures que nous abordons ici.
- Nos perspectives à l'avenir est d'établir un modèle théorique qui interpréterait tous nos résultats.

Références

1. Chen F.H. (1975). Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 12, 280 p. Amsterdam, Elsevier ISBN : 0-444-41393-6.
2. Derriche Z., Iguechtal L., Tas M. (1999). Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas. Revue Française de Géotechnique, N.89, 55-65.
3. Magnan D. (1993). Caractérisation in situ des sols gonflants: l'essai Expansol. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 190p.
4. Alonso E.E., Gens A., Hight D.W. (1987). General report. Special problem soils. Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol.3, 10987-1146.
5. Guiras-Skandaji H. (1996). Déformabilité des sols argileux non saturés : étude expérimentale et application à la modélisation. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, 315p.
6. Tabani P (1999). Transfert hydrique dans des sols déformables. Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, 17
7. Asselman H (2005). Troisième Semaine de la Science de l'Université Abdelmalek Essaâdi. Organisée à La faculté des Sciences de Tétouan du 21 au 26 mars 2005.
8. Asselman H., El Addad M (2007). Congrès COMPLES'2K7. Energie et Environnement. 19-20 Octobre 2007. P 178-181 ENSA Agadir, Maroc.
9. Asselman H. (2010). Deuxième Journée D'argiles et Développement Durable- Tétouan 26 mai 2010.
10. Vizier, J.F. (1971). Etude des variations du volume spécifique apparent dans les sols hydromorphes au TCHAD. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. IX, n°2, 133-145.
11. Mouroux P., Margron P, Pinte J.C. (1988), La construction économique sur sols gonflants, BRGM Editions, 125 pages.
12. Seed H.B, Woodward R.J, Lundgreen R. (1962) Prediction of swelling potential for compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, vol. 88 SM4, pp.107-131.
13. Komornik A, David D. (1969) Prediction of swelling pressure of clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division ASCE, vol.95 SM1, 209-225.
14. Sridharan A, Sreepada R, Sivapullahia P.V. (1986) Swelling pressure of clays. Geotechnical Testing Journal ASCE, Vol. 9(1), 24-33.
15. Didier G, Soyeux B, Héritier B, Parez L. (1987) Etude à l'œdomètre du gonflement des sols. Comptes rendus du 9ème Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Vol. 5, 549-552.
16. Vayssade B. (1978) Contribution à l'étude du gonflement interparticulaire de sols argileux. Thèse de docteur ingénieur ENSMP Univ. Pierre et Marie Curie. Paris VI.