

New empirical model of free swelling clay soils

Nouveau modèle empirique du gonflement libre des sols argileux

A. EL YAAKOUBI¹, A. ASSELMAN¹, H. ASSELMAN¹ et S. AHYOUD¹

¹ Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté des Science, Equipe d'Optique et Photonique, Tétouan, Maroc.

Résumé. Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe et fortement influencé par les propriétés chimiques, minéralogiques et hydriques. Ce phénomène provoque l'instabilité des fondations construites sur ce type de sols, en provoquant par la suite leur détérioration. La modélisation permet une meilleure compréhension du comportement hydromécanique de ces sols argileux lorsqu'ils sont soumis à différents paramètres (teneur en eau, succion, degré de saturation, humidité etc...). Différents modèles, reposant essentiellement sur des concepts hydro-thermomécanique et la théorie double couche diffuse, sont proposées dans les littératures [1-4]. Dans le présent travail nous proposerons un modèle simplifié du gonflement des sols argileux dans un milieu non saturé en fonction du temps. Pour le valider, nous allons comparer ses résultats avec les résultats expérimentaux obtenus dans notre laboratoire par la nouvelle technique optique basée sur l'interférométrie laser ainsi qu'avec ceux obtenue par le modèle de Vayassade [5].

Abstract. Swelling clay soils is a very complex phenomenon and strongly influenced by the chemical, mineralogical and water properties. This phenomenon causes instability foundations built on these clay minerals, causing subsequent deterioration. The modeling allows a good understanding of the hydromechanical behavior of these clay soils when subjected to various parameters (water content, suction, saturation, humidity etc ...). Different models, mainly based on hydro-thermo-mechanical concepts and diffuse double layer theory, proposed in the literatures [1-4]. In this paper we propose a simplified model of swelling clay soils in an unsaturated environment over time. To validate it, we will compare the results with the experimental results obtained in our laboratory by new optical technique based on laser interferometry and with those obtained by the Vayassade model [5].

1. Introduction

En génie civil, les sols étaient toujours l'objet d'interrogations et de recherches. Ils sont utilisés pour la construction des ouvrages en terre, notamment les remblais, les soutiens et les barrages en terre [6].

Les sols sont constitués de minéraux d'origines variées où ils présentent une forte interaction avec l'eau. Ils comportent une grande proportion de particules argileuses telle que la montmorlonite, l'illite, la smectite, ...etc.[7]. Lors de l'humidification de ces sols argileux, l'eau occupe des pores, ce qui provoque une

augmentation de leur volume. Ce phénomène s'appelle gonflement. En outre lorsque l'eau entre dans un échantillon du sol, la pression de l'eau augmente dans l'échantillon qui aura tendance à gonfler. Et l'inverse lors du séchage du sol, le phénomène de retrait se produit. Ces phénomènes de gonflement-retrait sont à l'origine de nombreux désordres sur des structures proprement dit. Pour identifier ces phénomènes gonflement-retrait libre; deux paramètres sont utilisés [7,8]:

- Potentiel de gonflement, qui est la variation relative du volume d'un échantillon soumis à des charges mécaniques
- Pression de gonflement, qui est la pression mécanique qu'il faut appliquer à un échantillon donné pour empêcher son gonflement lorsqu'il est soumis à des variations de son état hydrique susceptibles de le provoquer [1].

On parle de gonflement/retrait libre d'un échantillon lorsque celui-ci, toujours soumis à des variations de son état hydrique, est libre de se déformer (autrement dit lorsqu'aucune contrainte mécanique n'est appliquée autre que la pression de la solution extérieure).

Différents modèles ont été utilisés pour décrire ces phénomènes tels qu'ils sont cités dans la littérature [2-4]. Tous ces modèles estiment le taux de gonflement et la pression de gonflement en fonction et /ou de ces paramètres: limite de liquidité, poids volumique sec, la teneur en eau et l'indice de retrait. D'autres modèles comme celui de Vayassade estiment le taux ou le potentiel de gonflement par une loi de forme hyperbolique en fonction du temps [1].

La complexité du phénomène de gonflement et la diversité des situations rencontrées résident dans la détermination des paramètres précédents (limites de liquidité, limite de plasticité, poids volumique sec,...), ainsi que les paramètres des modèles de comportement. Nombreuses méthodes sont utilisées pour déterminer ces paramètres, la plupart reposent sur l'essai œdométrique [7].

Dans le cadre du présent travail, nous avons déterminé ces paramètres par la nouvelle méthode élaborée par H. Asselman [1] dans notre laboratoire basée sur la technique d'interféromètre laser et ceux obtenus du bureau d'études géotechniques GEORET à Tétouan-Maroc. On s'est intéressé à la modélisation du taux de gonflement en fonction du temps, puisque celui-ci caractérise l'efficacité des essais expérimentaux utilisés (notre essai expérimentale donne des résultats sur une durée très courte et le modèle que nous venons de proposer s'engage dans la voie de valider cette proposition).

Notre travail s'intéresse à la prévision de tout désordre affectant les structures construites en surface (bâtiments, ouvrages de soutènement, remblais, routes...etc.) ou qui sont en relation avec ce phénomène qui constitue un risque qui peut provoquer une détérioration des structures voire même des catastrophes liées au glissement naturelle des sols argileux. Le principal objectif à atteindre est d'atténuer l'impact de tels désordres sur les ouvrages de génie civil en général.

2. Matériel et méthode

2.1 Description du phénomène de gonflement libre

La mécanique des milieux poreux non saturés constitue la branche la plus difficile de la mécanique des sols, cette difficulté réside dans la complexité de

milieux. Le milieu poreux non saturé est constitué de trois phases: phase solide (le squelette du sol), phase liquide (le fluide interstitiel) et la phase gazeuse ou vapeur d'eau. Donc le phénomène de gonflement résulte de la déformation mécanique des trois phases constituantes du milieu.

Dans le présent travail, on cherche à prévoir le comportement hydromécanique de l'argile de la région de Tétouan, qui est un matériau non saturé. On va utiliser le concept taux de gonflement qui permet une meilleure caractérisation du comportement.

En mécanique des milieux continus le taux de gonflement ε d'un matériau argileux est défini comme la variation de son volume Δv soumis à des variations de son état hydrique divisé par son volume initial V_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta v}{V_0} = \frac{\Delta v_s + \Delta v_w + \Delta v_a}{V_0} \quad (1)$$

Avec Δv_s , Δv_w et Δv_a sont les variations du volume respectivement du squelette du sol, de la phase liquide et de la phase gazeuse.

En mécanique des milieux poreux le taux de gonflement ε est donné par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{e - e_0}{1 + e_0} \quad (2), \text{ avec } e \text{ est l'indice des vides du milieu et } e_0 \text{ l'indice initial des vides. L'indice des vides est donné}$$

par la relation suivante: $e = \frac{\rho^s}{\rho^w} \cdot \frac{\omega}{s} \quad (3),$

Les paramètres : ω, s, ρ^w sont respectivement: la teneur en eau volumique, le degré de saturation, la masse volumique de l'eau. [8]

2.2 Description du modèle de comportement

D'un point de vue empirique certains auteurs, tel que de Vayassade, définissent le taux de gonflement libre en fonction du temps par une loi hyperbolique de la forme :

$$\varepsilon(t) = A \cdot \frac{t}{t + B} \quad (4),$$

Où A désigne le taux de gonflement final obtenu pour un temps infini et B le temps de demi-gonflement (par rapport au gonflement final) [5].

En se basant sur l'évolution des lois de cette forme et nos résultats expérimentaux du taux de gonflement libre en fonction du temps nous avons élaboré un modèle qui décrit ce phénomène.

Nous avons assimilé notre échantillon de sol argileux comme un milieu globale, c'est-à-dire que nous nous n'intéresserons pas à la structure interne. D'une vue globale ou macroscopique le chargement du milieu par le fluide interstitiel produit donc une déformation volumique. Ce gonflement correspond seulement au remplissage des pores de l'échantillon sans entrer dans les interactions physico-chimiques ou tout autre phénomène. En partant de nos résultats

expérimentaux, le chargement de notre milieu argileux par le fluide interstitiel suit une loi de forme exponentielle. Donc l'évolution du taux de gonflement ε en fonction du temps d'un échantillon de sol argileux soumis à l'hydratation peut être décrit par ce modèle :

$$\varepsilon(t) = G(1 - e^{-t/\tau}) \quad (5).$$

Les paramètres du modèle sont définis comme suit : G c'est le taux de gonflement observé après un temps de saturation ou un temps infini et égale au même paramètre A du modèle de l'auteur [5], τ est une constante de dimension le temps, sa valeur est la pente de la partie linéaire de la courbe expérimental. Cette constante est inversement proportionnelle à la vitesse d'infiltration, en effet, si la pente est petite c'est à dire que l'échantillon a atteint la saturation plus vite sa vitesse d'infiltration devra être plus grande.

3. Résultats et discussions

Sur la figure 1, on porte des résultats de l'évolution du taux de gonflement de l'échantillon du sol argileux donné par notre modèle et celui cité dans [5], on distingue trois phases de fonctionnement:

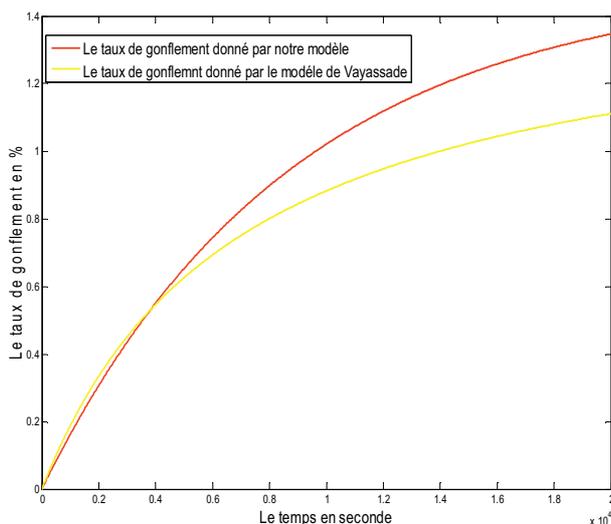


Fig.1. Simulation du gonflement en fonction du temps

La première phase se situe entre zéro et huit-mille seconde. Cette phase se caractérise par une augmentation importante du taux de gonflement en fonction du temps. Cette augmentation rapide du taux de gonflement au début de phase s'explique par l'occupation de l'eau interstitielle des pores vides contenue dans l'échantillon. Cette augmentation est moins importante à la fin de la phase et cela se confirme par le remplissage entier des pores vides et la tendance vers un nouvel processus ou le début d'une nouvelle phase.

La deuxième phase commence à partir de huit-mille et termine en dix-huit-mille seconde. Elle montre une augmentation progressive du taux de gonflement libre en fonction du temps. Le fluide interstitielle occupe

successivement la place de l'eau gazeux existe dans l'échantillon. L'air quitte l'échantillon progressivement sous l'effet des forces de la pesanteur de l'eau jusqu'à son élimination définitive de l'échantillon, et cela permet bien d'expliquer l'évolution progressif de la courbe et la tendance de stabilité à la fin de la phase.

Dans la dernière phase qui se situe au-delà de dix-huit mille seconde, les pores sont entièrement remplis d'eau et l'air quitte définitivement le milieu. L'échantillon d'argile se sature relativement même si on augmente la teneur en eau. Dans cette phase on rentre dans le processus des grains solide et l'apparition de nouveaux phénomènes physico-chimiques, et donc une nouvelle forme de gonflement. Cela justifie le décalage qui existe entre les deux courbes, qui est de l'ordre 17,14% et cette valeur dépend certainement des types d'argiles étudiés.

La figure 2 représente la comparaison du résultat théorique de notre modèle et des résultats expérimentaux obtenus dans notre laboratoire. Cette comparaison permet d'aboutir aux explications et constatations suivantes:

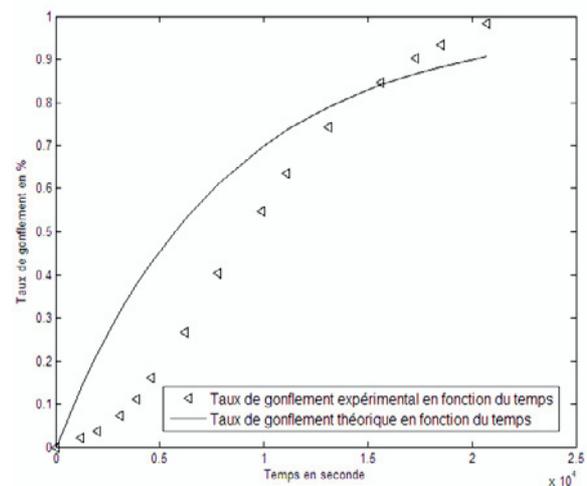


Fig.2. Comparaison des résultats expérimentaux et ceux obtenus avec notre modèle

Dans la première phase, il ya une divergence entre le résultat théorique et expérimental mais une bonne concordance entre les deux. Cela est dû certainement aux autres phénomènes d'origines chimiques et que le modèle ne prend pas en compte.

Dans la deuxième phase il ya une bonne correspondance entre les deux résultats et donc la confirmation de la constatations de l'augmentation progressif du taux de gonflement en fonction du temps.

La dernière phase présente une concordance entre les deux résultats, et une stabilisation des deux courbes à partir du temps dix-huit-mille seconde à une valeur de taux de gonflement environ de 0,9%. Cette phase correspond à la saturation complète de l'échantillon, et la valeur du taux de gonflement dans cette phase est le taux de gonflement de saturation noté G .

4. Conclusion

Dans ce travail nous avons élaboré un modèle empirique de gonflement des sols argileux en fonction du temps que nous avons appliqué ensuite au potentiel du gonflement des matériaux argileux de la région de Tétouan. Ce modèle est simple en comparaison avec le modèle de Vayassade et des autres auteurs. Il est en accord avec les résultats expérimentaux. Néanmoins ce modèle demande plus d'amélioration pour que ses résultats concordent mieux avec les résultats expérimentaux.

En perspective, le modèle proposé pourrait nous permettre de modéliser ce phénomène de gonflement en fonction d'autres paramètres hydriques. Le processus à suivre devient un peu plus complexe, pour cela la modélisation numérique de ce phénomène est une bonne démarche pour résoudre cette problématique et obtenir de meilleurs résultats.

5. Référence

1. H. Asselman , A. Bakkali , M. Ajdour et M. Essaïdi, Novel experimental method to determine clay soil free swelling. MATEC Web of Conferences 2, (2012)
2. Ranganatham, Stynarana A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. Proceedings of the 6th international conference of soil mechanics and foundation engineering, Montral, pp. 92-96. (1965).
3. Vijayvergiya V.N., Ghazzaly O.I. Prediction of swelling potential for natural clays. Proceeding of the 3rd international conference of expansive soils, vol. 1, Haïfa, pp. 277-236. (1973)
4. David D., Komornik A. Field behaviour of unloaded piles in swelling clays. Proceeding of the 4th international conference on expansive soils, Denver, pp. 43-49, (1980).
5. Vayssade B. Contribution à l'étude du gonflement interparticulaire de sols argileux. Thèse de docteur ingénieur ENSMP Univ. Pierre et Marie Curie. Paris VI. (1978).
6. M. Mrad, Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie polytechnique I.N.P.Lorraine, (2005.).
7. T. Kormi, Modélisation numérique du gonflement des argiles non saturées. Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, France, (2003).
8. J. Gaombalet, Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage. Thèse de doctorat en Mécanique, Ecole polytechnique, (2004).