

ANALYSE DU MECANISME DE GONFLEMENT DES ARGILES COMPACTES

Par
Zohra DERRICHE
Institut de Génie Civil, USTHB (*) - Alger

Résumé

Sur la base de résultats puisés dans la littérature, on montre que le gonflement est un phénomène qui trouve son explication dans le comportement des sols non-saturés. On confirme la validité d'une description du phénomène de gonflement et on fait ressortir parmi les nombreux paramètres qui interviennent dans le gonflement deux paramètres de grande importance : la teneur en eau et l'indice des vides du sol. On utilise cette description pour fournir une justification phénoménologique pour quelques résultats expérimentaux.

Mots clés : gonflement • expansion • hydratation
• absorption • argile • succion • potentiel.

1 INTRODUCTION

L'amplitude du gonflement et les pressions qu'il peut engendrer quand il est contrarié, dépendent d'un grand nombre de facteurs tels que la composition minéralogique du sol, sa structure, la nature des cations adsorbés et de ceux présents dans la phase liquide, la teneur en eau, etc. A cause de sa complexité, le gonflement ne peut pas être étudié pratiquement en tenant compte de tous les facteurs qui interviennent dans son mécanisme.

De nombreuses relations empiriques ont été proposées pour caractériser l'expansibilité et la pression de gonflement développées par le sol lors de son hydratation. Ces relations expriment le gonflement sur la base de quelques caractéristiques du sol qui sont en principe simples à déterminer en laboratoire, maintenant tous les autres paramètres constants. Mais jusqu'à présent aucune de ces relations, pourtant nombreuses, ne permet une prédiction adéquate du caractère gonflant des sols expansifs [5].

Dans cette étude, nous tentons d'éclaircir quelques aspects du mécanisme du gonflement en situant le phénomène (de gonflement) dans le contexte général du comportement des sols non-saturés. Nous avançons en particulier quelques justifications phénoménologiques pour certains caractères observés lors des essais de gonflement.

2 POTENTIEL DE GONFLEMENT

On définit le potentiel de gonflement, qu'on appelle aussi gonflement libre, comme le gonflement relatif d'un échantillon de sol inondé et autorisé à gonfler librement sous une charge très faible. De nombreux auteurs avancent que le potentiel de gonflement d'un sol est égal au volume d'eau réellement absorbé par le sol pendant le gonflement [4].

Nous avons représenté sur la figure 1 le pourcentage de gonflement enregistré en fonction du volume relatif d'eau effectivement absorbé par les échantillons lors du processus de gonflement.

Les résultats présentés indiquent une relation presque linéaire entre le gonflement et la teneur en eau volumique d'équilibre.

Les résultats de la figure 1 indiqueraient que le volume d'eau absorbé par les échantillons de sol lors du processus de gonflement est largement supérieur à l'augmentation de volume mesurée. Ou autrement exprimé, le gonflement enregistré est une petite fraction du volume d'eau absorbé par l'échantillon.

Ces résultats ne semblent pas être en accord avec l'observation d'Alonso et al. [2] selon laquelle le gonflement enregistré par les sols expansifs est plus important que le volume d'eau réellement absorbé par

(*) Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène.

l'échantillon. Cette constatation a porté ses auteurs à considérer que lors du gonflement, le processus d'hydratation induit le développement de pores secondaires dont l'adsorption d'eau ne rend pas compte.

Sans tout à fait remettre en question le fait du développement de pores secondaires dans la masse du sol, les résultats de la figure 1 font ressortir qu'une bonne partie du gonflement se fait à l'intérieur des pores existants initialement dans le sol. La variation de volume mesurée ne rend pas compte de cette partie du gonflement. L'absorption d'eau étant une mesure du gonflement total qui se produit réellement. Le gonflement mesuré étant juste la partie apparente de ce gonflement.

Nous avons porté sur la figure 2 le gonflement enregistré à densité constante, pour différentes teneurs en eau initiales. La relation semble être linéaire. La nature de cette relation autorise la définition d'une teneur en eau critique ($\approx 22\%$) qui donnerait lieu à un gonflement apparent nul. Pour ce cas critique, la variation de la teneur en eau volumique fournirait une mesure du gonflement qui se produit dans les pores.

Effet du taux et de la procédure d'hydratation

La figure 1 montre que le gonflement enregistré est proportionnel au volume d'eau absorbé par l'échantillon à l'équilibre pour des essais de gonflement du type saturé. Ce type d'essai ne peut pas simuler la variation des teneurs en eau qui se produit in situ. La figure 1 montre aussi que l'on obtient pratiquement la même relation pour des essais où les échantillons n'ont pas été inondés, mais alimentés avec des quantités variables d'eau.

L'obtention de la même relation pour les cas inondé et non inondé indique que le phénomène d'hydratation du sol est en quelque sorte une succession d'états d'équilibre.

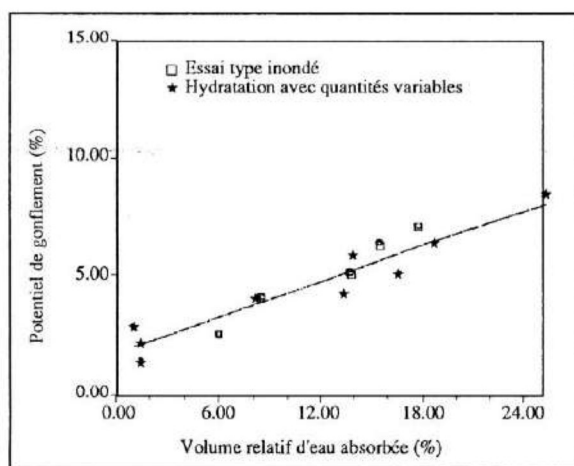


Figure 1 : Potentiel de gonflement en fonction du volume d'eau absorbée.

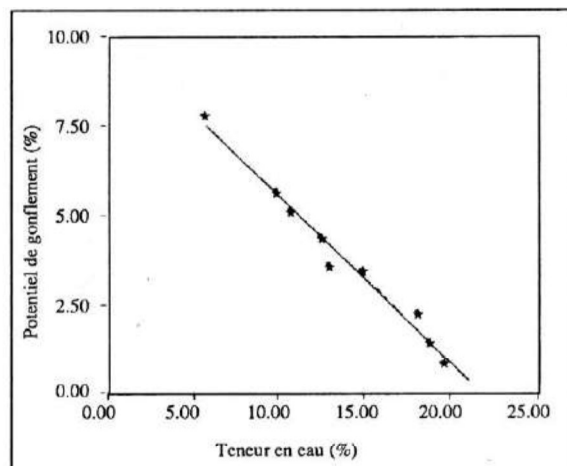


Figure 2 : Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale.

Le rapport entre gonflement et absorption d'eau semble demeurer constant tout au long du gonflement.

Ce résultat a d'ailleurs été confirmé (Figure 3) par des essais de gonflement effectués avec un équipement spécial capable de suivre l'évolution du volume d'eau absorbé en même temps que le gonflement.

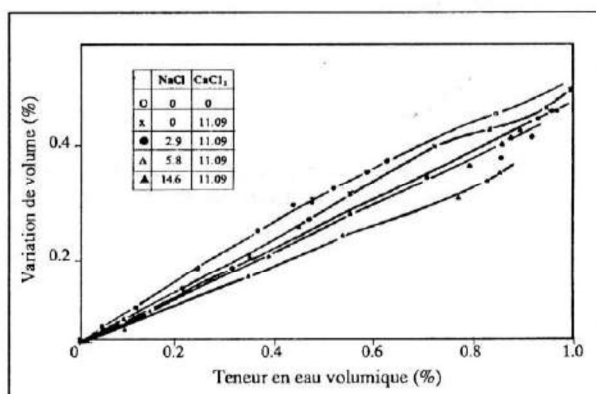


Figure 3 : Relation entre le gonflement et la teneur en eau volumique fonction de la teneur de l'eau en NaCl.

Pas moins important est l'effet de la procédure d'hydratation sur le gonflement du sol. Quelques travaux [7] ont permis de montrer que le gonflement obtenu en inondant l'échantillon en une seule étape est supérieur à celui donné par des échantillons hydratés par plusieurs étapes. Compte tenu des considérations énoncées ci-dessus, l'explication derrière cette différence se résume aux différentes proportions d'air aspiré dans les deux procédures d'hydratation. La présence d'air diminuant la perméabilité du sol, agit directement sur l'écoulement de l'eau à l'intérieur de l'échantillon.

Effet de la densité sur le potentiel de gonflement

La figure 4 affiche les résultats d'essais réalisés sur des échantillons à teneur en eau constante et à diffé-

rentes densités initiales. L'augmentation du potentiel de gonflement avec la densité sèche du sol est un résultat auquel sont parvenus de nombreux auteurs.

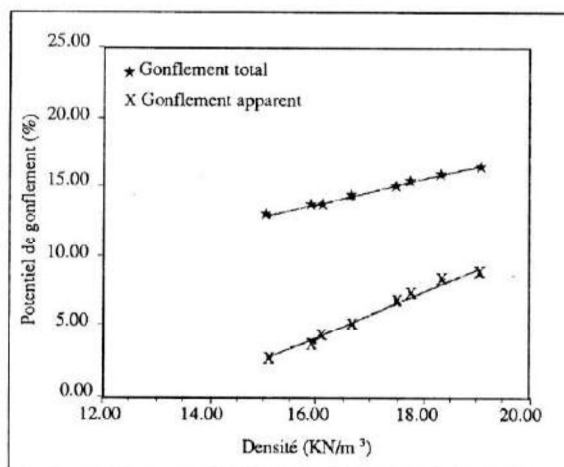


Figure 4 : Potentiel de gonflement en fonction de la densité initiale.

L'explication qui en est donnée est que l'échantillon le plus dense exhibera un gonflement plus élevé parcequ'il possède un nombre plus élevé de particules argileuses.

Les résultats de la figure 4 montrent qu'en gardant tous les autres paramètres constants, et compte tenu de l'observation faite ci-dessus, l'effet de la densité n'est pas uniquement une affaire de plus grand nombre de particules mais aussi une affaire de moins de gonflement qui se produit dans les vides, ceux-ci diminuant avec la densité.

Moyennant cette explication, nous pourrions parler de densité critique ; une densité assez faible pour offrir des vides capables d'encaisser tout le potentiel de gonflement du sol, permettant d'enregistrer zéro gonflement apparent.

C'est d'ailleurs cet aspect qui est mis en application lors de la stabilisation du gonflement par contrôle du compactage.

Certains travaux ont montré que la densité critique ainsi définie serait indépendante de la teneur en eau (Figure 5) [8].

3 ANALYSE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT

Sur la courbe donnant le gonflement sous charge constante en fonction du temps (Figure 6), il est possible de distinguer deux phases [2]. Une phase plutôt rapide qui démarre dès que l'échantillon est inondé et une phase secondaire relativement lente.

Selon bon nombre d'auteurs, la première phase du gonflement serait le résultat d'un relâchement partiel

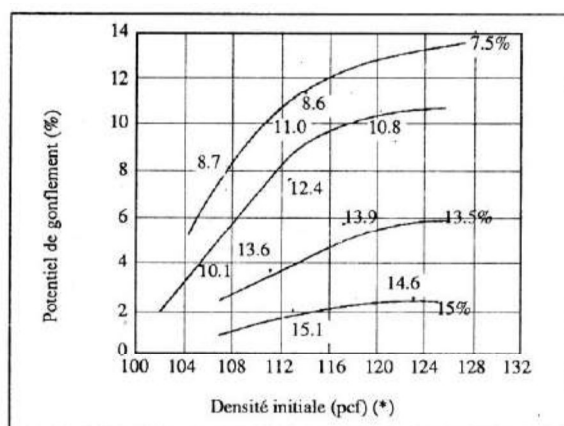


Figure 5 : Variation du potentiel de gonflement en fonction de la densité initiale pour différentes teneurs en eau.

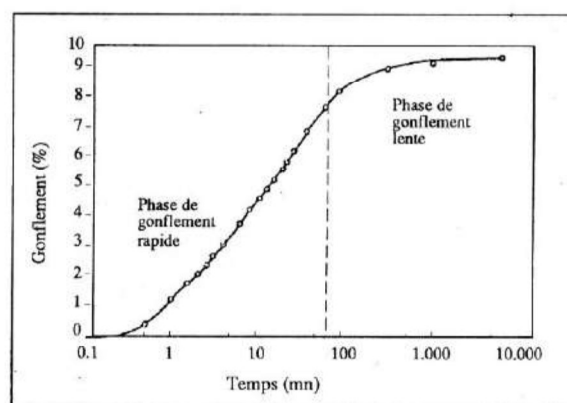


Figure 6 : Evaluation du gonflement dans le temps.

des contraintes dans les vides partiellement saturés.

Cette première phase de gonflement (gonflement macroscopique) peut être assimilée à un écoulement de l'eau au sens de Darcy [9] qui est principalement régi par la perméabilité du milieu et le gradient de succion.

La seconde phase (gonflement microscopique) constituerait le processus d'hydratation progressive des minéraux argileux et des cations adsorbés.

Cette hydratation s'effectuant à partir de l'eau qui est disponible dans les pores.

Même si cette description du gonflement est simplificatrice, parce que pratiquement ces deux phénomènes ont lieu simultanément et interagissent entre eux, elle explique de manière satisfaisante les comportements relevés.

En effet, l'observation de la microstructure du sol a permis de montrer que dans les sols gonflants, les particules d'argile microscopiques tendent à

(*) Pound per cubic foot (livre/pied³).

s'agglomérer pour former des grains macroscopiques (appelés aussi fragments) qui peuvent être aussi gros que les particules de limon ou même de sable.

Dans l'état non saturé, l'eau capillaire qui remplit partiellement les pores entre les grains est soumise à une succion importante. Les pores qui se trouvent à l'intérieur des grains, sont considérablement petits, ce qui laisse supposer que les fragments sont intérieurement dans un état quasi-saturé.

L'eau dans le sol est en équilibre lorsque la succion capillaire dans les pores interfragments est égale au potentiel d'hydratation des particules formant les fragments.

L'eau dans les pores pourra s'écouler à travers les gros pores, elle peut rentrer à l'intérieur des fragments ou en sortir. Elle peut s'écouler entre les pores interfragments en réponse à un gradient de succion capillaire ($P_a - P_w$). L'eau pourra rentrer dans les fragments ou en sortir en réponse à une différence entre la succion capillaire et le potentiel de l'eau à l'intérieur des fragments.

Ces deux mouvements de l'eau changent le potentiel de l'eau dans le sol, ce qui se traduit par des variations de volume : gonflement.

À l'état initial, la teneur en eau dans les pores est un équilibre entre la succion dans les pores interfragments et la succion à l'intérieur des fragments.

Dès que l'échantillon de sol est inondé, l'eau s'écoule d'abord dans les pores interfragments, mue par la succion matricielle, ce qui a pour effet d'augmenter la teneur en eau de l'échantillon et de diminuer la succion entre les fragments.

La nouvelle succion dans les pores n'étant plus en équilibre avec la succion à l'intérieur des fragments, va entraîner l'eau à être absorbée à l'intérieur des paquets, ce qui à son tour va augmenter la succion interfragments qui va appeler un peu plus d'eau de l'extérieur.

Le processus se continuera jusqu'à équilibre entre le potentiel de l'eau à l'extérieur de l'échantillon, la succion capillaire et la succion à l'intérieur des paquets. L'hydratation des paquets provoque d'abord un gonflement qui est encaissé par les pores macroscopiques.

4 PRESSION DE GONFLEMENT

Il existe un grand nombre de définitions possibles pour la pression de gonflement [10] et à chaque définition est associé un mode opératoire pour sa détermination.

De multiples travaux, notamment ceux de Chen, Komornik, Kassif et Baker ont permis de montrer que

la pression de gonflement varie considérablement avec la densité du sol et semble très peu affectée par les autres paramètres qui contrôlent l'amplitude du gonflement.

Des résultats limités [1] ont toutefois établi qu'en fait la teneur en eau initiale exerce un effet négligeable sur la pression de gonflement tant qu'elle est inférieure à la limite de retrait du sol. Pour des teneurs en eau au delà de la limite de retrait, l'effet de la teneur en eau initiale sur la pression de gonflement devient marqué (Figure 7).

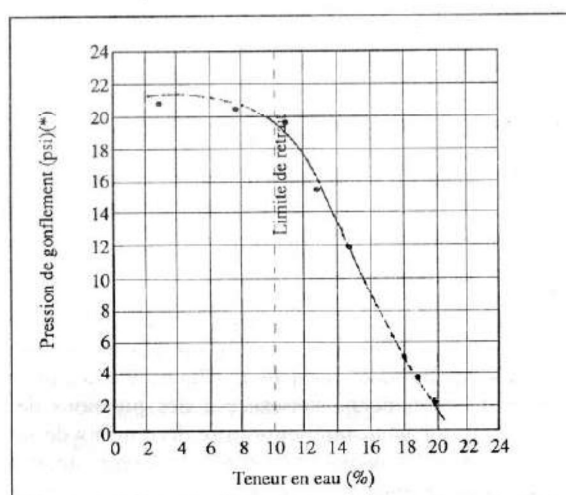


Figure 7 : Variation de la pression de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale [1].

Les pressions développées par le sol diminuent sensiblement lorsque un petit pourcentage de gonflement est autorisé (Figure 8).

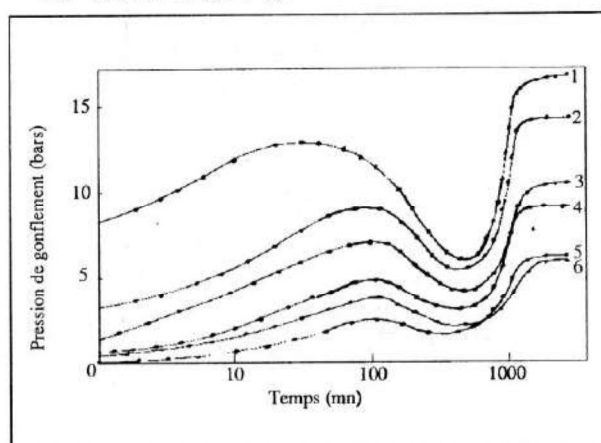


Figure 8 : Evolution de la pression de gonflement en fonction du temps pour différentes valeurs du gonflement autorisé [6].

Kassif et Shalom [12] sont parvenus à montrer que pour des sols au delà de l'optimum, la pression de gonflement développée est égale à la diminution de la succion suite à l'hydratation.

(*) Pound per square inch (livre/pouce²).

D'autres résultats ont toutefois fait ressortir que pour des teneurs en eau en deçà de l'optimum, la pression de gonflement est plutôt égale à une fraction de la variation de la succion.

Ce résultat trouve naturellement son explication dans le fait que, même s'il s'agit d'un essai à volume constant, les macro-particules ou grains de sol gonflent à l'intérieur des pores à la suite de la variation de la succion. Ceci a pour effet de réduire la pression de gonflement.

La pression de gonflement mesurée dans ce cas est en fait la pression de gonflement développée, une fois que les macro-pores sont épuisés, c'est-à-dire sont totalement occupés, et que le sol devient quasi-saturé.

La pression de gonflement serait effectivement égale à la variation de la succion uniquement dans le cas où les macro-grains sont tous maintenus à volume constant.

Ce fait a d'ailleurs été prouvé par des essais de gonflement à succion contrôlée. Dans ces essais, la succion a été diminuée par paliers (Figure 9). Les premiers paliers ont donné naissance à des pressions de gonflement largement inférieures aux décréments de la succion. Les décréments ultérieurs ont montré toutefois une égalité entre le décrément de la succion et la pression de gonflement correspondante développée.

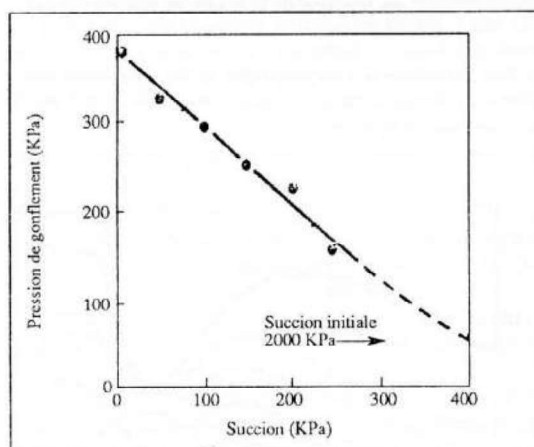


Figure 9 : Variation de la pression de gonflement en fonction de la succion [3].

La courbe 1 de la figure 8 donne l'évolution dans le temps de la pression de gonflement mesurée à volume constant. Cette courbe fait clairement apparaître :

- ♦ une hydratation rapide correspondant à l'écoulement de l'eau dans les macropores de l'échantillon, hydratation à laquelle correspond le développement progressif de la pression de gonflement.
- ♦ une hydratation des macro-particules d'argile ali-

mentée par l'eau disponible dans les pores entraînant le gonflement des particules à l'intérieur des pores ce qui se traduit par le relâchement dans la pression de gonflement. Le minimum de la courbe indique l'instant pour lequel les macro-pores sont totalement occupés.

- ♦ une hydratation relativement lente des particules d'argile.

Les expériences effectuées par Didier [6] ont permis de montrer que le minimum dans la courbe pression de gonflement-temps diminue jusqu'à disparaître avec la finesse des particules (obtenue par broyage) et avec la densité du sol.

5 DISCUSSION

Il ressort des résultats présentés qu'une faible densité conjuguée à une teneur en eau importante (pour laquelle le sol offre quand même une résistance suffisante) peut s'avérer être un procédé de stabilisation du gonflement.

Ce procédé requiert, cependant de grandes quantités d'eau de compactage, et ne peut être économique dans les régions où l'eau est rare (les régions arides).

Dans une publication antérieure [13], il avait été fait constater que l'ajout de sable à des sols gonflants peut s'avérer un procédé de stabilisation du gonflement particulièrement efficace. Un ajout de moins de 20% a permis de réduire la pression de gonflement développée de plus de 60%.

Par les grands vides qu'il apporte dans le sol gonflant, un ajout de sable est capable de réduire les actions du gonflement sans faire de "concessions" sur la résistance.

Pour les argiles surconsolidées, qui abondent dans les régions arides, et qui sont capables de développer de fortes pressions de gonflement (>70 bars), on pense qu'intercaler une couche de sol pulvérulent entre la fondation et l'argile est capable de stabiliser le gonflement. Compte tenu des fortes pressions qui seront développées par l'argile hydratée, le gonflement pourrait se faire à l'intérieur du sol pulvérulent, l'argile pénétrant littéralement dans les vides entre les grains. Ce procédé mérite d'être évalué.

6 CONCLUSION

Le gonflement des sols est un phénomène fort complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants. Sur la base de résultats puisés de la littérature existante sur le sujet ; nous avons montré dans cette étude que le gonflement trouve son explication dans le comportement des sols non-saturés.

En particulier, cette étude a permis de faire res-

tir 2 paramètres de grandes importances :

- la teneur en eau initiale du sol qui est une mesure de l'état de succion initial du sol (Figure 10),
- l'indice des vides, qui fournit une mesure de la quantité de matériau susceptible de gonfler et de la quantité de vides existant au sein du sol.

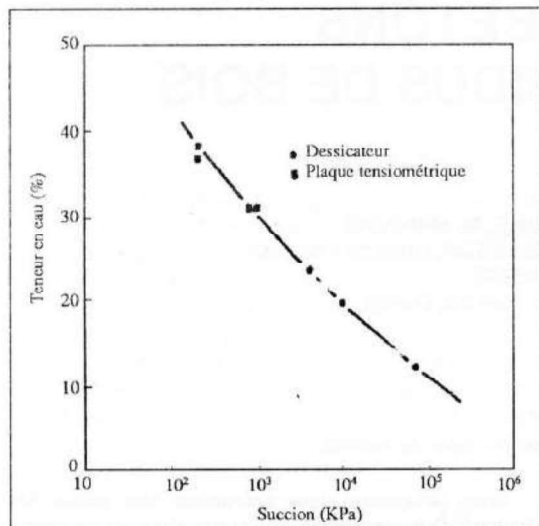


Figure 10 : Relation teneur en eau-succion [3].

Le gonflement est la réponse du sol à un gradient de potentiel de l'eau du sol. Il se manifeste d'abord par un écoulement de l'eau au sens de Darcy, dans les gros pores du sol, ensuite par l'hydratation des particules macroscopiques d'argile. Cette hydratation, qui est alimentée par l'eau contenue dans les pores, provoque un gonflement des particules d'abord à l'intérieur des macro-pores.

Les nombreux paramètres qui interviennent dans le phénomène de gonflement, qu'ils soient liés au sol ou à l'environnement, affectent l'un ou l'autre (ou les deux) paramètres présentés.

Cette description du phénomène a permis de fournir les bases pour une justification phénoménologique pour de nombreux résultats expérimentaux et aussi les bases de réflexions pour la recherche de nouveaux procédés de stabilisation du gonflement ④

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.F. Abouleid : "Measurement of swelling and collapsible soil properties". Foundation Engineering, Vol. 1., Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. pp. 43-54, 1982.
- [2] E.E. Alonso, A. Gens et D.W. Hight : "Special pro-

blem soils". General report (session 5), 9th European Conf. Soil. Mech. & Found. Eng., Dublin, 1987.

- [3] I.J. A. Brackley : "Swell pressure and free swell in a compacted clay". Proc. 6th Regional Conf. Africa Soil Mech. & Found. Eng., Durban, Vol. 1, pp. 65-70, 1975.
- [4] F.H. Chen : "Foundations on expansive soils". Elsevier Ed., 1988.
- [5] Z. Derriche et M. Kebaili : "Swelling potential predicting models, Application to In Amenas soils". 10th Brazilian Congress Soil Mech. & Found. Eng., 1994.
- [6] G. Didier : "Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites". Thèse de Docteur Ingénieur, Univ. Claude Bernard, Lyon, 1972.
- [7] M.A. Drull et S. Gaspar : "Influence du processus de saturation sur le gonflement des éprouvettes soumises à la détermination de leurs courbes de succion". Pédologie XXI, 2, pp.162-169, 1971.
- [8] S.F. Gizienski et L.J. Lee : "Comparison of laboratory swell tests to small scale field tests". Engineering effects of moisture changes in soils, concluding proceedings Int. Research & Eng. Conf. on Expansive clay soils. Texas, A & M Press, Tex, pp. 108-119, 1965.
- [9] Q. Halitim : "Sols des régions arides d'Algérie". OPU, 1984.
- [10] J.L. Justo et A. Delgado : "Stress-strain paths in the collapse-swelling-shrinkage of soils in-situ". 6th Int. Conf. Expansive Soils, India, pp. 69-74, 1987.
- [11] G. Kassif et R. Baker : "Ageing effects on swell potential of compacted clays". Journal Soil Mech. Found. Eng., ASCE, vol. 97, SM3, Proc. paper 7951, pp. 529-540, 1971.
- [12] G. Kassif et A.B. Shalom : "Experimental relationship between pressure and suction". Geotechnique, vol. 21, no. 3., pp. 245-255, 1971.
- [13] F. Kaoua, Z. Derriche et N. Laradi : "Contribution à l'étude de la stabilisation des sols par ajout de sable". Algérie EQUIPEMENT, Sept. 94, pp. 12-15, 1994.
- [14] M.A. Sherif et B.W. Ishibashi : "Swell of Wyoming montmorillonite and sans mixtures". Journal of Geotech. Eng. Div., ASCE, GT1, January, pp. 33-45, 1982.