

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

PREVISION DU POTENTIEL ET DE LA PRESSION DE GONFLEMENT DES SOLS

PREDICTION OF POTENTIAL AND SWELLING PRESSURES OF SOILS

ПОТЕНЦИАЛ И ДАВЛЕНИЕ НАБУХАНИЯ В ГРУНТАХ

G. DIDIER, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon

P. LAREAL, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon

J. GIELLY, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon (France)

RESUME.— L'étude de l'influence de certains paramètres (nature du fluide hydratant, pourcentage de particules non argileuses...) sur les mesures de gonflement libre d'une montmorillonite a permis de montrer que pour prédire le potentiel de gonflement d'un sol il semble impossible de ne pas tenir compte de la composition chimique de l'aquifère avec lequel le sol est en contact. Une cellule de mesure de pression de gonflement a été mise au point. La variation relative de volume de l'échantillon est inférieure à 10^{-3} pour toute l'étendue des pressions mesurées. A l'aide de cette cellule nous avons montré qu'il était possible de prévoir la pression de gonflement d'une argile à partir de sa densité sèche ou du pourcentage d'éléments inférieurs à 2 μ et de la densité sèche partielle de l'argile au sein d'un échantillon contenant un certain pourcentage d'éléments inertes.

INTRODUCTION

L'amplitude du gonflement et les pressions qu'il engendre quand il est contenu, dépendent d'un grand nombre de facteurs tels que : la composition minéralogique du sol, sa structure, la nature des cations fixés sur l'argile et de ceux présents dans la phase liquide, la teneur en eau initiale etc...

Dans le but de prévoir le gonflement d'un sol, certaines relations empiriques ont été proposées. Ces relations, appliquées à des sols naturels, ne permettent pas toujours de prévoir avec suffisamment de précision le comportement du sol.

Ceci s'explique par l'impossibilité d'étudier le gonflement en tenant compte de tous les facteurs qui interviennent dans son mécanisme. En maintenant constants certains de ces facteurs, on limite fatalement la portée d'une étude prévisionnelle.

Les méthodes de prévision du potentiel de gonflement d'un sol ne tiennent en général pas compte de la composition ionique du fluide hydratant. Nous avons donc recherché si les relations empiriques proposées par certains auteurs, pouvaient s'appliquer à une argile d'un type minéralogique donné (montmorillonite) hydratée par diverses solutions électrolytiques.

Nous avons également recherché l'importance d'un certain nombre de paramètres physiques et structuraux (densité sèche, présence d'impuretés), sur l'amplitude et

la cinétique de la pression de gonflement d'une montmorillonite lors de son hydratation.

LE MATERIAU ETUDIE

Le minéral utilisé pour nos expérimentations est une montmorillonite extraite de gisements du Sub-Appenin pouillais en Italie et d'appellation commerciale Bentonite 7 C. Des analyses, diffractométrique, thermique différentielle, chimique, dilatométrique ont montré que le matériau étudié appartenait bien au groupe des montmorillonites (Didier 1972).

Une analyse granulométrique réalisée par sédimentométrie classique sur le minéral à l'état brut (livré broyé par le fabricant) a montré que le pourcentage d'éléments inférieurs à deux microns était de 65 %.

Ce pourcentage varie largement lorsqu'on modifie par exemple la concentration en NaCl du liquide dispersif. Ainsi, une concentration de NaCl 0,5 N a le pouvoir de peptiser l'argile (88 % $< 2 \mu$) alors qu'une concentration à 0,3 N la flocule (47 % $< 2 \mu$).

L'étude prévisionnelle du potentiel de gonflement a été conduite sur l'argile naturelle alors que les mesures de pression de gonflement furent réalisées sur la fraction inférieure à deux microns obtenue par sédimentation dans de l'eau déminéralisée puis broyage du broyeur à boulets.

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Mesure du gonflement libre.

Les mesures de la composante verticale du gonflement libre s'est faite dans une cellule identique dans son principe à un oedomètre classique. La mise en place des échantillons (75 g) préalablement séchés à 105° C se fait par compactage statique à vitesse lente directement dans la cellule de mesure et ce, jusqu'à obtenir la densité sèche désirée ($d_s/\gamma_w = 1,11$).

L'hydratation des échantillons se fait par le bas. On suit dans le temps et jusqu'à stabilisation, la variation de hauteur de l'échantillon (donc sa variation de volume) à l'aide d'un comparateur au centième de millimètre.

- Mesure de la pression de gonflement.

La cellule de mesure de pression de gonflement que nous avons mis au point pour l'étude de sols ou d'autres matériaux pouvant être placés en contact d'eau vapeur ou de liquides, est schématisée figure 1. L'échantillon (A) est fretté latéralement dans la matrice porte-échantillon (B) fermée à l'une de ses extrémités par une plaque mince déformable sous l'effet d'une pression. Le piston (P) est percé en son axe par un orifice pouvant véhiculer une vapeur ou un liquide, qu'une pierre poreuse (D) de faible porosité permet de répartir à la surface de l'échantillon. Un joint torique (J) assure l'étanchéité de l'ensemble à l'eau et au vide, et l'écrou (E), le blocage du piston en une position déterminée.

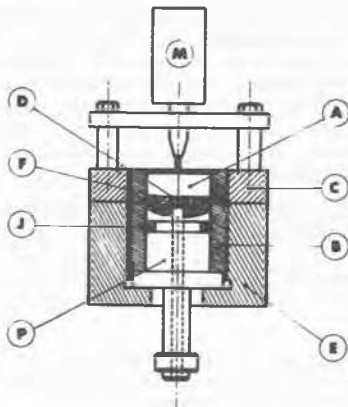


Fig. 1 - SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURE DE PRESSION DE GONFLEMENT.

L'échantillon occupe un volume parfaitement défini. Son diamètre est de 25 mm et sa hauteur peut être modifiée à volonté par interposition de cales calibrées entre la matrice porte-échantillon (B) et le piston (P). La mesure de la déformée au centre de la plaque (donc de la pression de gonflement) se fait à l'aide d'un capteur inductif

de déplacement (M). La variation relative de volume permise est inférieure à 10^{-3} , quelle que soit la pression mesurée. Pour cette étude nous avons utilisé une plaque de 1,42 mm d'épaisseur. Avec une variation relative de volume égale à 10^{-3} et un échantillon de 10 mm d'épaisseur nous pouvons mesurer à $\pm 0,018$ bar des pressions d'expansion pouvant aller jusqu'à 19 bar. La flèche au centre de la plaque est alors de 21,2 .

L'argile, préalablement séchée à 105° C est compactée directement dans la matrice (B) jusqu'à obtenir la hauteur désirée pour l'échantillon. La cellule -munie du dispositif de mesure (M)- est ensuite placée dans une enceinte thermostatée à $20 \pm 0,1$ ° C puis reliée à un vide poussé. Après désaération (24 heures), l'échantillon est placé au contact de la solution hydratante (dans le cas présent, eau déminéralisée) elle-même préalablement désaérée. On enregistre la variation de la déformée au centre de la plaque jusqu'à stabilisation

PREVISION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT

Depuis quelques années de nombreuses études ont été conduites dans le but d'approfondir et de prédire les mécanismes du gonflement.

Holtz et Gibbs, en 1956, ont recommandé une méthode empirique, se proposant de relier le gonflement d'un sol (de l'état séché à l'air jusqu'à saturation) au pourcentage d'éléments argileux qu'il contient et à son indice de plasticité. Les études qui ont suivi utilisent, toutes, les limites d'Atterberg pour prévoir le potentiel de gonflement d'un sol.

Seed, Woodward et Lungren (1962) ont établi expérimentalement la relation suivante:

$$G = KC^x \quad (1)$$

G = pourcentage de gonflement V/V d'un échantillon fretté latéralement, compacté

à l'optimum Proctor et hydraté jusqu'à saturation sous une surcharge de 50 g/cm².

C = pourcentage d'éléments inférieurs à 2 microns.

Les auteurs ont montré que l'exposant x est indépendant du type d'argile et égal à 3,44 et que le coefficient K serait fonction de l'activité de gonflement de l'argile :

$$K = \alpha AY \quad (2)$$

A : activité de gonflement définie comme la pente de la droite trouvée lorsque l'on porte l'indice de plasticité I_p en fonction du pourcentage d'éléments inférieurs à 2μ - ($A = \Delta I_p / \Delta C$).

D'après ces auteurs les coefficients α et γ seraient des constantes respectivement égales à $3,6 \cdot 10^{-5}$ et 2,44.

Ranganatham et Satyanarayana (1965) proposent de définir l'activité de gonflement comme étant la pente de la droite trouvée lorsque l'on porte l'indice de retrait I_r en fonction du pourcentage d'éléments inférieurs

à 2μ . ($A = \Delta I_r / \Delta C$). Les coefficients α et γ sont alors respectivement égaux à 4,57. 10^{-5} et 2,67.

Les auteurs proposent même une relation permettant de relier directement le potentiel de gonflement à l'indice de retrait:

$$G = . I_r^p \quad (3)$$

Les coefficients β et p seraient des constantes respectivement égales à 41,13. 10^{-5} et 2,67 pour des sols naturels.

Il nous a semblé intéressant d'appliquer ces méthodes de prévision à une argile d'un type donné (montmorillonite) en faisant varier le contenu ionique du fluide hydratant, ceci afin de vérifier si les coefficients K , α , γ , β et p restaient bien constants.

Nous étudierons également l'influence sur les coefficients K et α de la granulométrie des sables utilisés en mélange par la montmorillonite.

Nous avons choisi comme cations présents dans la solution hydratante deux monovalents (Na, K) et deux bivalents (Ca, Mg). Ces quatre cations - les plus fréquemment rencontrés dans la nature - sont associés à l'anion Cl afin d'éviter l'influence parasite de l'anion. Pour faire varier le pourcentage d'éléments argileux actifs nous ajouterons à la montmorillonite naturelle une silice fine (coefficient d'uniformité $C_u = d_{60}/d_{10} = 1,8$; coefficient de courbure $C_c = d_{30}^2/d_{10}$. $d_{60} =$ Surface spécifique $400 \text{ cm}^2/\text{g}$.)

- Limites de consistance.

Nous obtenons bien une relation linéaire lorsque nous portons la limite de liquidité (W_L) ou l'indice de retrait (I_r) en fonction du pourcentage théorique C d'éléments inférieurs à 2μ (figures 2 et 3).

Nous avons donc les relations suivantes :

$$W_L = a C + b \quad (4)$$

$$I_r = A C + q \quad (5)$$

Comme le montre le tableau I les coefficients a , b , q et A (activité de gonflement) sont fonction du contenu ionique du fluide hydratant. Ces résultats permettent de conclure que l'activité de gonflement A d'un sol ne dépend pas uniquement de la nature minéralogique des éléments argileux qu'il contient. L'activité de gonflement diminue avec l'augmentation de la concentration des solutions de NaCl ou de KCl. Pour les quatre cations à 1 N, il semble que l'activité de gonflement soit liée au rayon de l'ion hydraté.

- Potentiel de gonflement.

Nous trouvons bien une droite lorsque nous portons en coordonnées bilogarithmiques le potentiel de gonflement en fonction du pourcentage d'éléments inférieurs à deux microns. Le tableau I donne les valeurs des coefficients K et α calculés à partir des droites représentées figure 4.

Si l'on exclut le cas de l'eau déminéralisée, α semblerait bien sensiblement cons-

tant et de valeur moyenne égale à 0,37. Mais nous avons montré par ailleurs que ce coefficient semble varier proportionnellement à la perméabilité de ces éléments (Didier 1972).

Quant au coefficient K il n'est pas constant pour notre montmorillonite et dépend bien de la nature du fluide hydratant. Ce coefficient ne semble d'ailleurs pas suivre le même sens de variation que A . Nous ne pouvons donc pas trouver une relation du type 2 permettant de relier ce coefficient K à l'activité de gonflement A .

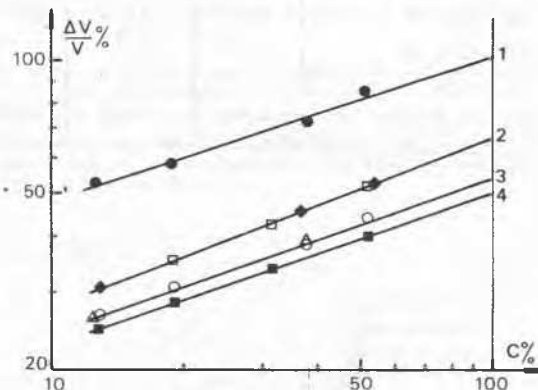


Fig. 4 - GONFLEMENT LIBRE $\Delta V/V$ EN FONCTION DU POURCENTAGE THEORIQUE D'ELEMENTS $< 2\mu$ POUR DIVERS FLUIDES HYDRATANTS.

(1. NaCl 0,3 N ; 2. NaCl 1 N; CaCl_2 Mg Cl_2 1N; 3. NaCl 0,2 N ; 4. NaCl - 0,5 N)

Comme l'avaient montré Ranganatham et Satyanarayana nous obtenons bien une droite lorsque nous portons en coordonnées bilogarithmiques le potentiel de gonflement en fonction de l'indice de retrait. En fait, pour une même argile on obtient un faisceau de droites lorsque l'on fait varier la nature du fluide hydratant. Les coefficients β et p (voir tableau I) ne sont donc pas constants mais bien dépendants - pour une argile donnée - de la nature ou de la concentration des ions présents en solution.

Nous avons précédemment trouvé que l'eau déminéralisée donnait la plus forte activité de gonflement ($A = 2,2$). Or, contre toute attente, l'eau déminéralisée donne les plus faibles gonflements, donc les plus faibles valeurs des coefficients β , p , K et α .

Le fait d'étudier un sol au laboratoire avec de l'eau déminéralisée conduit ainsi à surestimer l'activité de gonflement déterminée à partir des limites de consistance et par contre, à sous-estimer son potentiel de gonflement.

NATURE DU FLUIDE HYDRATANT	a	b	A	q	K	x	β	P
Eau déminéralisée	1,93	7,5	2,2	- 20,9	0,33	0,064	0,315	0,04
Ca Cl ₂ 1 N	1,37	16,5	1,61	- 9,66	0,65	0,374	0,54	0,326
Mg Cl ₂ 1 N	1,46	16,5	1,68	- 9,23	0,65	0,374	0,54	0,326
K Cl 1 N	1,25	16,5	1,37	- 11,64	0,45	0,353	0,435	0,321
K Cl 0,2 N	1,52	16,5	1,68	- 9,24				
Na Cl 0,2 N	1,71	12,5	1,92	- 13,43	0,535	0,408	0,405	0,21
Na Cl 0,5 N	1,71	12,5	1,92	- 13,43	0,49	0,329	0,405	0,21
Na Cl 1 N	1,37	16,5	1,62	- 12,15	0,65	0,374	0,56	0,31
Na Cl 3 N	0,91	18,5	0,825	- 1,65	0,535	0,408	0,56	0,31

TABLEAU I

1150

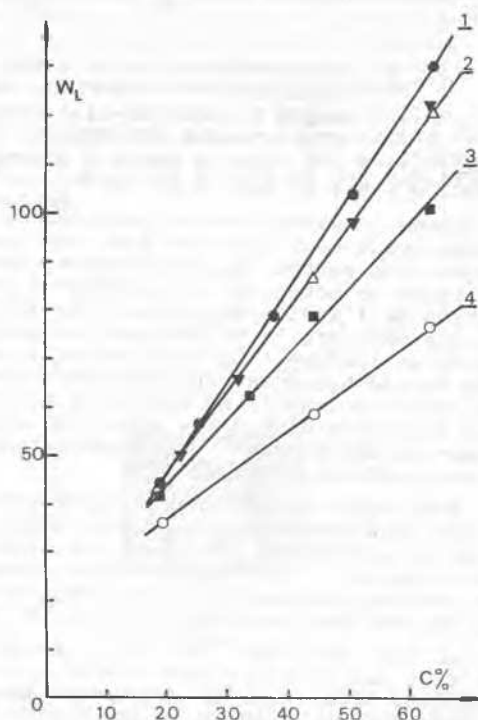


Fig. 2 - VARIATION DE W_L EN FONCTION DE $C\% < 2\mu$ pour diverses concentrations en Na Cl.

1 - Eau déminéralisée ; 2 - Na Cl 0,2 et 0,5 N ;
3 - Na Cl 1 N ; 4 - Na Cl 3 N ;

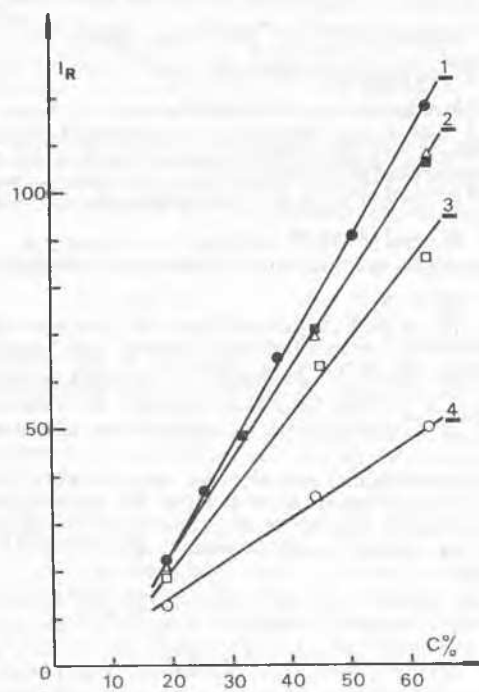


Fig. 3 - VARIATION DE I_R EN FONCTION DE $C\% < 2\mu$ pour diverses concentrations en Na Cl.

1 - Eau déminéralisée ; 2 - Na Cl 0,2 et 0,5 N ;
3 - Na Cl 1 N ; 4 - Na Cl 3 N ;

PREVISION DE LA PRESSION DE GONFLEMENT.

En 1969, Komornik et David ont trouvé une relation permettant de prédire la pression de gonflement (PG) d'une argile à partir de la relation :

$$\log PG = u W_L + v. \gamma_d - tW + Cste \quad (6)$$

où u , v et t sont des constantes et W la teneur en eau initiale de l'échantillon.

Pour étudier l'influence de la densité sèche (γ_d/γ_w), des échantillons d'une même argile seront mis en place pour chaque essai à la même teneur en eau initiale (dans notre cas $W = 0$), mais à des compacités différentes. Tous les échantillons étant hydratés par le même fluide (eau déminéralisée), la limite de liquidité W_L est alors constante.

Dans ces conditions, l'équation (6) devient :

$$\log PG = v. \gamma_d + Cste \quad (7)$$

La droite 1 de la figure 5 confirme cette relation. Pour le domaine des densités sèches explorées, nous obtenons la droite d'équation :

$$\log PG = 2,55 \gamma_d/\gamma_w - 1,705 \quad (8)$$

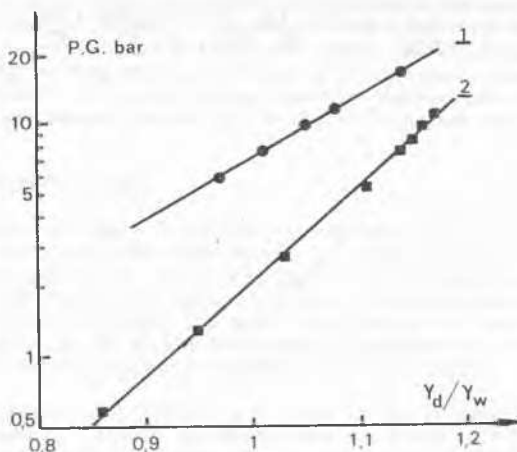


Fig. 5 - PRESSION DE GONFLEMENT (PG) EN FONCTION DE LA DENSITE SECHE (γ_d/γ_w).

Si l'on conserve maintenant une teneur en eau initiale constante ($W = 0$) et une densité sèche en place constante ($\gamma_d/\gamma_w = 1,17$) et que l'on fasse varier d'un essai à l'autre la limite de liquidité W_L en modifiant le pourcentage d'éléments argileux actifs, nous aurons, en combinant les relations (4) et (6) :

$$\log PG = n C + Cste \quad (9)$$

Nous avons fait varier le pourcentage C en ajoutant à l'argile des quantités connues d'une silice fine identique à celle utilisée pour l'étude du potentiel de gonflement.

La figure 6 donne la variation de la pression de gonflement dans le temps pour divers pourcentages de silice (% Si). Nous avons donné en 1969 (Didier et Murat) une interprétation sur l'évolution de la pression de gonflement dans le temps.

La figure 7 confirme la relation (9). Nous obtenons la droite d'équation :

$$\log PG = 0,0294 C - 1,923 \quad (10)$$

Nous constatons que pour la densité sèche en place utilisée (1,17) un faible pourcentage d'impuretés réduit considérablement la pression de gonflement (10 % de silice suffisent à réduire la pression de gonflement de 50 % environ).

Il est possible de déterminer le volume occupé réellement par l'argile, ce qui permet de calculer la densité sèche de l'argile seule au sein du mélange. La droite 2 de la figure 5 représente la variation de PG en fonction de γ_d/γ_w .

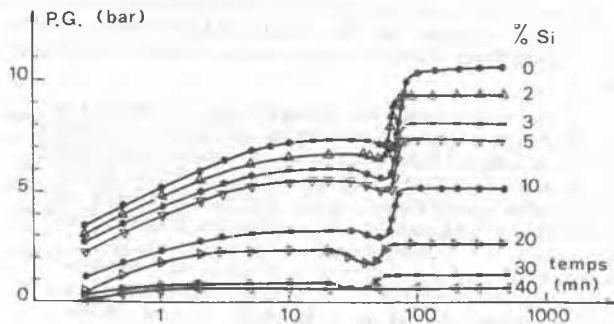


Fig. 6 - VARIATION DE LA PRESSION DE GONFLEMENT EN FONCTION DU TEMPS POUR DIVERS POURCENTAGES DE SILICE.

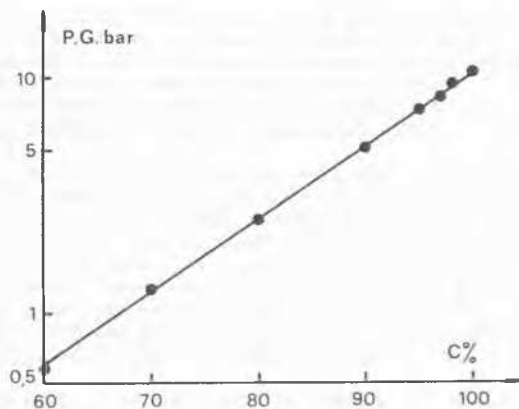


Fig. 7 - PRESSION DE GONFLEMENT (PG) EN FONCTION DU POURCENTAGE (C) D'ELEMENTS INFERIEURS A 2 μ

Nous obtenons la relation suivante :

$$\log PG = 4,08 (\gamma_d/\gamma_w) - 3,764 \quad (11)$$

On pourrait s'attendre à obtenir la même valeur de la pression de gonflement

lorsque l'on remplace γ_d/γ_w par 1,17 dans les équations (8) et (11). L'application de l'équation (8) donne $P_G = 19$ bar, alors qu'avec l'équation (11) nous obtenons $P_G = 10,5$ bar. Cette différence vient du fait que les échantillons n'ont pas été préparés de la même façon, les temps de broyage au broyeur à boulets étant respectivement de 8 heures et de 5 heures. Or, nous avons montré par ailleurs (Didier 1972) que le temps de broyage a une grande influence sur les valeurs des pressions de gonflement finales mesurées ainsi que sur la variation de la pression de gonflement dans le temps.

CONCLUSIONS

Cette étude a permis notamment de montrer que l'activité et le potentiel de gonflement d'une montmorillonite naturelle varient en fonction de la nature et de la concentration des ions présents dans le fluide hydratant.

Pour prédire le potentiel de gonflement d'un sol, il semble donc impossible de ne pas tenir compte de la composition chimique de l'aquifère avec lequel le sol est en contact.

L'appareillage de mesure de la pression de gonflement qui a été mis au point permettra l'étude d'échantillons de sols gonflants non remaniés. Dans cette étude, faite sur une argile purifiée, nous avons déjà mis en évidence l'influence de certains paramètres physiques et structuraux (densité sèche, concentration en éléments argileux, dimension des particules). L'étude est actuellement poursuivie afin d'étudier l'influence de la nature du fluide hydratant sur les pressions de gonflement mesurées.

REFERENCES.

- DIDIER, G. (1972) - Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites, sa prévision. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Claude Bernard LYON.
- DIDIER, G., MURAT, M. (1969) - Variation de la pression de gonflement lors de l'hydratation d'une montmorillonite. Compte-rendu Académie des Sciences Paris, t. 268, p. 3009 - 3012.
- HOLTZ, W.G. et GIBBS, H.J. (1956) - Engineering properties of expansive clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol. 121, p. 641 - 677.
- KOMORNIK, A., et DAVID, D. (1969) - Prediction of swelling pressure of clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol. 95, SMI p. 209 - 225.
- RANGANATHAM, B.V. et SATYANARAYANA, B. (1965) - A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montréal. Vol. I, Div. 1 - 2 p. 92 - 96.
- SEED, H.B. "et all" (1962) - Prediction of swelling potential for compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol. 88, SM3, p. 53 - 87.

- - -