

TH-FB2

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE  
— I. N. R. A. —  
STATION de SCIENCE du SOL  
Domaine Saint-Paul  
84140 MONTEFAVET

T H E S E

Présentée  
À la Faculté des Sciences de l'Université  
de Grenoble

Pour obtenir le Grade de Docteur de Spécialité  
(Troisième Cycle Mécanique des Solides)

par

Rémi PINCHAUD  
Ingénieur du Génie Rural

"LES LIAISONS INTERPARTICULAIRES DANS LES MILIEUX ARGILEUX  
APPLICATION AU GORFÈREMENT"

Soutenue le 10 Novembre 1966, devant la Commission d'Examen

|                    |                |
|--------------------|----------------|
| MM. J. KRIVYCHENKO | Président      |
| L. SARTON          | } Examinateurs |
| J. BLARES          |                |
| M. CARLIER         | Invité         |

GRENOBLE

26 FEV. 1976

## CHAPITRE VI

### ETUDE EXPERIMENTALE DU GONFLEMENT

Compte tenu des conclusions auxquelles nous sommes parvenus concernant :

- d'une part, l'impossibilité d'appliquer quantitativement la théorie de la double couche à une masse de matériel argileux
- d'autre part, la nécessité de reprendre la définition et la mesure de certains paramètres classiquement utilisés en mécanique des sols,

les mesures expérimentales réalisées ont pour but de démontrer que le gonflement des argiles, en présence de solutions salines peut cependant être interprété qualitativement en fonction des bases théoriques.

Par ailleurs, nous avons rappelé dans une première partie, les différents critères utilisés pour caractériser les propriétés gonflantes d'un sol naturel.

#### I - CRITERES DE GONFLEMENT D'UN MATERIAU.

##### 1 - Potentiel de gonflement et mesures expérimentales du gonflement.

Dans le chapitre précédent, nous avons mentionné que le gonflement dépend de trois groupes de facteurs :

- les deux premiers représentent des propriétés intrinsèques des phases solide et liquide constituant le matériau,
- le troisième groupe représente les conditions externes

appliquées à l'échantillon.

Les propriétés minéralogiques et physico-chimiques du matériau confèrent au sol "un potentiel de gonflement" qui représente une propriété intrinsèque du matériau. Le gonflement observé expérimentalement sera fonction des conditions expérimentales en particulier de la pression appliquée à l'échantillon (frottement ou non de l'échantillon). Deux tests sont utilisés pour caractériser les propriétés gonflantes d'un sol.

11 - Le gonflement libre.

10 cm<sup>3</sup> de sol sec, tamisé au tamis n° 40, sont versés dans une éprouvette graduée contenant 100 cm<sup>3</sup> d'eau. Le volume du dépôt au fond de l'éprouvette permet de définir l'indice de gonflement libre. I<sub>G</sub>.

$$I_G = \frac{V_f - V_i}{V_s} \times 100$$

V<sub>I</sub> = Volume initial = 10 cm<sup>3</sup>

V<sub>F</sub> = Volume final du dépôt

Cet essai, de nature empirique, doit être interprété avec précaution. En effet, des sols présentant un faible gonflement libre présentent de fortes variations de volume lorsqu'on leur applique une très faible charge.

12 - Mesure à l'œdomètre.

L'échantillon, placé dans un moule œdométrique, est saturé et les variations de volume linéaires correspondant à différentes charges appliquées, sont mesurées. Cette technique de mesure permet de déterminer :

- la pression de gonflement
- les variations du gonflement en fonction

a) de la pression appliquée lors de l'expérience

b) de la pression à laquelle a été préalablement soumis le sol.

En règle générale, le gonflement est réalisé sous charge constante correspondant au poids du piston, soit sensiblement  $50 \text{ g/cm}^2$ .

### 13 - Interprétation des essais de gonflement.

A partir de ces essais normalisés, certains auteurs, SEED, HOLTZ, GIBBS, en particulier, ont recherché s'il n'était pas possible d'établir une corrélation entre les caractéristiques minéralogiques et granulométriques d'un sol argileux et ses aptitudes au gonflement.

Trois paramètres ont été retenus :

- 1°) Le pourcentage d'éléments inférieurs à  $2 \mu$  et leur nature minéralogique.
- 2°) L'indice de plasticité du matériau qui est interprété comme valeur indicative de l'eau adsorbée, constituant les doubles couches.
- 3°) La limite de retrait.

A partir de ces paramètres, SEED, WOODWARD et LUNGREN ont établi expérimentalement la relation suivante :

$$S = KC$$

S = Pourcentage de gonflement d'un échantillon, frotté latéralement lors de la saturation, compacté à l'optimum PROCTOR et soumis à une surcharge de  $50 \text{ g/cm}^2$ .

C = Pourcentage d'éléments  $< 2 \mu$ .

x et K = Coefficients dépendant du type d'argile.

Les auteurs ont été par ailleurs en évidence que :

1°)  $\alpha$  est indépendant du type d'argile présent (Montmorillonite, Illite, Kaolinite) et a pour valeur 3,44.

2°)  $K$  est fonction de l'activité de l'argile  $A$  suivant la relation

$$K = k A^{3,44}$$

avec  $k = 3,6 \times 10^{-5}$

Valeurs de  $K$  pour différents minéraux argileux

| Type d'argile   | Coefficient $K$       | Activité $A$ |
|-----------------|-----------------------|--------------|
| Montmorillonite | $152 \times 10^{-5}$  | 5,2          |
| Illite          | $3,47 \times 10^{-5}$ | 0,95         |
| Kaolinite       | $0,28 \times 10^{-5}$ | 0,40         |

En définitive,  $S$  a pour valeur :

$$S = 3,6 \times 10^{-5} A^{3,44} C^{3,44} \quad (3)$$

Il est important de noter que cette relation s'applique aux minéraux du groupe de la kaolinite et que la différence entre kaolinite et montmorillonite n'intervient que par l'introduction du paramètre "Activité".

A partir de ces résultats, une correspondance a été établie avec les normes U.S.D.R. qui caractérisent les propriétés gonflantes d'un sol saturé à partir de sa teneur en eau après séchage à l'air ambiant.

| Importance du gonflement | % de gonflement Norme U.S.B.R. | % de gonflement d'après SEED |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Faible                   | 0 - 10                         | 0 - 1,5                      |
| Moyen                    | 10 - 20                        | 1,5 - 5                      |
| Fort                     | 20 - 35                        | 5 - 25                       |
| Très fort                | 35                             | 25                           |

Cette méthode a été modifiée par B.V. RANGANATHAN et SATHANARAYANA de façon à faire intervenir non plus l'indice de plasticité, mais l'indice de retrait (IR) et conduit à la relation suivante

$$S = 41,1 \times 10^{-5} IR^{2,67} \quad (4)$$

Ces relations établies à partir d'essais sur des sols artificiels, ne peuvent être appliquées en toute rigueur à des sols naturels pour les raisons suivantes :

- 1°) La détermination de la fraction d'éléments  $< 2 \mu$  par sédimentométrie ne correspond pas à la totalité des éléments argileux "actifs"
- 2°) La présence des minéraux argileux de nature différente et en proportion inconnue rend difficilement applicable cette méthode.

Aussi ce type de relation ne fournit-il qu'un ordre de grandeur du gonflement.

## 2 - Relation entre le gonflement et la pression de gonflement.

Les essais de gonflement, réalisés à l'océomètre mettent en évidence que la pression du gonflement, correspondant à une certaine valeur de l'indice de plasticité,

décroit avec la teneur en eau et tend vers une limite. Donc pour un échantillon donné, cette pression sera fonction du degré de saturation variable dans le temps. La pression de gonflement ne peut donc être définie au cours de la saturation qu'à un instant donné, correspondant à une valeur bien déterminée de la teneur en eau.

Par ailleurs, une variation de hauteur de l'échantillon permettant une expansion du matériau entraîne une diminution de la pression de gonflement.

## II - MEASURES EXPERIMENTALES.

Le nombre important de paramètres intervenant dans le phénomène du gonflement, la difficulté de leur mesure et leur nature différente ne permettent pas d'exprimer quantitativement le gonflement en fonction de ces paramètres.

Les mesures expérimentales réalisées ont pour but de mettre en évidence l'importance de la nature du fluide interstitiel sur le gonflement et d'établir indirectement une corrélation entre la pression osmotique agissant à l'échelle des cristallites d'argile et le gonflement macroscopique de l'échantillon.

Pour juger de l'influence des concentrations ioniques du fluide interstitiel, le gonflement en présence de solutions salines ( $\text{CO}_3\text{Na}_2$  : 0,75 N et  $\text{Cl}_2\text{Mg}$  : 1N) est comparé au gonflement en présence d'eau distillée qui constitue l'état de référence.

### 1 - Caractéristiques des matériaux.

Les essais ont été effectués sur deux kaolinites naturelles qui n'avaient subi préalablement aucun traitement

chimique. Ces deux matériaux désignés dans la suite de l'exposé sous les termes Kaolinite A et Kaolinite B possèdent les propriétés suivantes :

a) Granulométrie.

|             | Pourcentage<br>d'éléments<br>< 2 $\mu$ . |
|-------------|--|
| Kaolinite A | 48 %                                     |
| Kaolinite B | 85 %                                     |

b) Limites d'Atterberg.

|             | $W_L$ | $W_P$ | $W_R$ | IP   |
|-------------|-------|-------|-------|------|
| Kaolinite A | 36,4  | 25,2  | 24,0  | 13,2 |
| Kaolinite B | 69,5  | 44,2  | 36,7  | 25,3 |

2 - Préparation des échantillons.

1 - Humidification du matériau.

Le matériau, humidifié par pulvérisation d'eau et par couches successives, était homogénéisé et conservé en sac plastique pendant un minimum de quatre jours. Ce stockage permettait la diffusion de l'humidité à travers la masse du matériau et les mesures de teneur en eau faites après quatre jours, donnaient des valeurs constantes à  $\pm 0,5 \%$ . Cependant, les manipulations réalisées dans les "boîtes à gâteaux" au degré hygrométrique constant, si ces particulièrement délicat de les amener à une valeur donnée de la teneur en eau, leur explique la disparition des mesures.

2 - Compaction.

L'échantillon est humidifié, puis compacté dans



un moule à différentes énergies de compactage afin de rechercher pour une même teneur en eau différentes densités sèches.

$$E_1 = 75 \text{ T/m}^3$$

$$E_2 = 150 \text{ T/m}^3$$

$$E_3 = 225 \text{ T/m}^3$$

Il est supposé que l'énergie  $E_3$  donne des densités sèches inférieures à celles obtenues avec l'énergie  $E_2$ .

### Caractéristiques du moule.

L'échantillon de sol était directement compacté dans un moule de 90 mm de hauteur et de 40 mm de diamètre. Ce moule était percé sur 6 génératrices de trous de 1 mm de diamètre, distants de 5 mm. Ces orifices avaient pour but de permettre :

- 1°) Une saturation radiale de l'échantillon
- 2°) Un dégazage de l'échantillon en cours de saturation.

Pour éviter un remaniement de l'échantillon, le piston en plexiglas destiné à transmettre les variations de hauteur au comparateur était placé avant compactage à la base du moule.

### 3 - Saturation de l'échantillon - Mesures des variations de hauteur.

L'échantillon placé sur une pierre poreuse était immergé dans la solution saturante. Dans ces conditions, en plus de la succion capillaire, la saturation de l'échantillon s'effectue par la base et radialement. Les variations de hauteur étaient mesurées dans l'axe de l'échantillon par un comparateur supporté par une potence. Les lectures du comparateur étaient effectuées aux temps  $t = 5'$ ,  $10'$ ,  $20'$ , 1 h, 2 h, 5 h et 24 h.

### Solutions saturantes.

Afin de comparer le gonflement en présence d'eau et de solutions salines, les échantillons de kaolinite A étaient immergés dans 3 types de solutions :

- a) Eau distillée.
- b)  $\text{Cl}_2 \text{ Mg} : 1 \text{ N}$
- c)  $\text{CO}_3 \text{ Na}_2 : 0,75 \text{ N}$ .

Compte tenu de la durée d'immersion (48 heures en solution saline) on peut admettre que les réactions d'échange ioniques étaient réalisées puisque pour une solution d'argile dispersée, un contact de 4 heures est une valeur couramment employée.

Pour la kaolinite B, le gonflement n'a été étudié qu'en présence d'eau afin d'étudier les variations du gonflement avec le pourcentage d'éléments inférieurs à  $2 \mu$ .

### 3 - Résultats expérimentaux.

Le gonflement  $G = \frac{\Delta H}{H}$  est exprimé en fonction

- a) des données initiales caractérisant le matériau.
  - Teneur en eau et degré de saturation.
  - Densité sèche.
- b) de la nature de la solution saturante.

Nous avons déterminé les caractéristiques finales du matériel :

- Poids d'eau absorbé
- Teneur en eau et degré de saturation
- Densité sèche.

Pour d'obtenir, les résultats suivants :

1) la saturation complète en règle générale, n'est pas obtenue au bout de 24 heures d'immersion quelles que soient la nature de l'argile et la solution saturante. Des essais réalisés en maintenant 7 et 14 jours les échantillons immergés, n'ont apporté aucune modification sensible.

2) En aucun cas, le matériau n'a atteint la teneur en eau correspondant à la limite de liquidité.

#### 4 - Interprétation des résultats.

##### 4.1 - Paramètres physiques.

###### a) Densité sèche.

A densité sèche donnée, le gonflement diminue quand le degré de saturation croît. Puisque  $\gamma_d$  est constant,  $S\%$  est proportionnel à  $W\%$  et le gonflement diminue si l'on augmente la teneur en eau, ce qui conduira en pratique à compacter du côté humide. Une teneur en eau initiale élevée permettra aux doubles couches de se développer suffisamment avant compactage de telle sorte que le gonflement soit limité.

###### b) Degré de saturation.

Inversement, à degré de saturation donné, le gonflement sera d'autant plus important que la densité sèche initiale sera plus élevée. En effet, si  $S\%$  est une constante et que  $\gamma_{d_1} > \gamma_{d_2}$ , la masse des particules argileuses  $M_{s_1}$  est supérieure à  $M_{s_2}$ . Donc, dans le même volume apparent du sol, le nombre de particules argileuses sera plus grand, d'où des potentialités de développement des doubles couches plus importantes.

Augmenter le degré de saturation initial revient à augmenter le développement des doubles couches sans pour cela, en particulier, aux densités sèches élevées, permettre la croissance complète des doubles couches. Aussi est-

Il est possible de constater un gonflement pour des degrés de saturation tendant vers 100 %. Cet aspect est apparu dans le cas de la kaolinite B pour les essais 15, 16 et 17.

Plus le degré de saturation est élevé, à densité sèche donnée, plus la pente de la courbe est forte. Donc une variation de degré de saturation aura d'autant plus d'influence sur le gonflement que la teneur en eau initiale sera élevée.

#### 42 - Paramètres physico-chimiques.

Le tracé des courbes expérimentales  $G = f(S_s \%)$  pour des essais de gonflement en présence d'eau distillée et en présence de solutions salines, permet de déterminer l'importance relative de la concentration ionique sur le gonflement, mesuré dans les conditions expérimentales précédemment définies.

La lecture des courbes expérimentales met en évidence les résultats suivants, dans le cas de la kaolinite.

1 - Le gonflement, à densité sèche et à degré de saturation donnée, diminue lorsque la concentration ionique de la solution saturante augmente. Cet aspect est en rapport avec la modification de la pression osmotique agissant au niveau de chaque double couche entourant les particules argileuses.

Dans les expériences réalisées, le rapport des 2 valeurs du gonflement  $\frac{G_2}{G_1}$ ,  $G_1$  étant le gonflement en présence d'eau distillée et  $G_2$  en présence de solution saline, est compris entre :

- 45 % et 80 % pour une solution de carbonate de sodium  
0,75 N

- 50 % et 70 % pour une solution de chlorure de magnésium.

2 - La comparaison entre la diminution de gonflement en présence de  $\text{Cl}_2\text{Mg}$  1 N et  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  0,75 N fait ressortir que la diminution de gonflement est plus importante dans le cas où la saturation a lieu en présence de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  que de  $\text{Cl}_2\text{Mg}$ .

Cette conclusion est en contradiction avec la définition théorique de l'épaisseur de la double couche. En effet, le gonflement résultant du développement des doubles couches devrait varier en fonction inverse de la valence du cation et de la concentration ionique de la solution saturante. Or, dans les expériences, le gonflement en présence de  $\text{Cl}_2\text{Mg}$  ( $\gamma_d = 1,65$ ) n'est réduit que d'une valeur moyenne de 30 % alors que par saturation par  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  la diminution est de l'ordre de 45 % pour  $\gamma_d = 1,60$  et  $\gamma_d = 1,70$ .

Si nous cherchons à comparer le gonflement non seulement en fonction de la valence des cations mais en fonction du rapport  $\frac{U}{Z}$  tel qu'il a été défini dans le chapitre "Relations entre les cations et l'eau" nous constatons que le comportement d'une argile en présence de  $\text{Mg}^{2+}$  et de  $\text{Na}^+$  devrait être sensiblement le même puisque les valeurs du rapport  $\frac{U}{Z}$  sont respectivement 122 et 124.

La réduction plus importante du gonflement en présence de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  peut s'interpréter par la réalisation d'un ciment dû à la présence d'ions  $\text{Ca}^{++}$  dans l'argile naturelle et à l'apport de l'anion  $\text{CO}_3\text{H}^-$ . Cet aspect a d'ailleurs souvent été mis en évidence lors du compactage de matériaux naturels avec des eaux riches en carbonates.

3 - La saturation par des solutions salines réduit l'importance relative du paramètre "Degré de saturation initiale". En un point donné de la courbe  $G = f(S_1 \%)$  la pente est plus faible dans le cas de gonflement en présence de solutions salines que dans le cas d'eau distillée.

4 - Application de la formule de SEED.

Dans le cas des deux matériaux utilisés, les valeurs données par la formule

$$S = 3,6 \times 10^{-5} A^{2,44} G^{3,44}$$

sont très éloignées des valeurs expérimentales mesurées. En effet, l'application de cette formule donne un rapport théorique  $\frac{S_1}{S_2}$  de 11,5 % ( $S_1$  étant la valeur relative à la kaolinite A et  $S_2$  la valeur relative à la kaolinite B). Les valeurs expérimentales sont :

Kaolinite A  $\gamma_d = 1,59$   
 $G = 7,37$

Kaolinite B  $\gamma_d = 1,405$   
 $G = 5,78$

Ce qui correspond à  $\frac{S_1}{S_2} = \frac{7,37}{5,78} = 1,275$ .

Cette différence peut provenir en partie de la différence des densités sèches bien que les degrés de saturation initiale soient comparables (72 % et 77,4 %). En effet, pour des densités sèches comparables  $\gamma_d = 1,59$  et  $\gamma_d = 1,50$ , le rapport  $\frac{G_1}{G_2} = 1,275$  correspond à  $G_1 = 7,37$  et  $G_2 = 5,78$ .