

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.

Etude du gonflement anisotrope de la bentonite

Study of anisotropic swelling of bentonite

J. P. BOEHLER, Professeur de Mécanique des Solides, Institute de Mécanique de Grenoble, Grenoble, France

M. KABBAJ, Chercheur, Institut de Mécanique de Grenoble, Grenoble, France

Affiliation actuelle: Université Laval, Québec, Canada

RESUME Le but de ce travail est de développer une étude expérimentale cohérente sur l'anisotropie du gonflement d'une bentonite compactée. Après avoir déterminé les paramètres de compactage de la bentonite, nous avons caractérisé l'anisotropie des propriétés mécaniques, à partir d'essais en compressions triaxiales orientées. Des essais de gonflement sous charges constantes à l'oedomètre, réalisés pour quatre orientations différentes des échantillons et sous différentes charges appliquées, mettent en évidence le caractère directionnel de ce phénomène. Les pressions de gonflement ont été mesurées à l'aide d'une cellule spécialement conçue ; les résultats révèlent une forte anisotropie de cette pression pour les échantillons partiellement saturés. Des remarques sont présentées sur l'évolution de la structure interne de la bentonite compactée, sous l'effet des charges appliquées et de l'humidification croissante.

INTRODUCTION

Les sols naturels sont généralement caractérisés par une structure interne orientée, due à leur mode de formation et à leur histoire de déformations irréversibles. Cette orientation privilégiée de la structure interne se manifeste sur le plan macroscopique par une variation de la réponse mécanique suivant l'orientation des sollicitations appliquées, c'est à dire par une anisotropie du comportement mécanique. Un comportement particulièrement important dans le domaine du Génie Civil est le gonflement, au contact de l'eau ou de l'air humide, de matériaux naturels comme le gypse ou l'anhydrite et, en général, des sols argileux riches en montmorillonite.

Les données expérimentales actuellement disponibles pour la description et la modélisation des phénomènes liés au gonflement des sols sont peu nombreuses et trop diversifiées. En effet, ces études ont été généralement développées à la suite d'accidents et sont souvent liées à la nature minéralogique particulière du matériau. Les études de l'influence de la structure interne orientée sur le caractère directionnel du gonflement sont très limitées. L'anisotropie de la pression de gonflement des argiles, c'est à dire de la pression nécessaire pour empêcher la variation de volume du matériau soumis à l'humidification, n'a fait l'objet que de rares études (Rogatkina, 1967 ; Komornik et Livneh, 1967 ; Gokhale et Jain, 1972) ; ces analyses expérimentales ont été réalisées pour seulement deux orientations des échantillons (échantillons parallèles et perpendiculaires au plan de compactage ou de consolidation des argiles), ce qui est insuffisant pour caractériser entièrement l'anisotropie du phénomène. Les études sur le gonflement sous charges constantes (Seed et al., 1962 ; Brackley, 1971 ; Yong et Sheeran, 1973) mettent en évidence la diminution du gonflement lorsque la charge appliquée augmente ; cependant, il n'existe pas, à notre connaissance, des

résultats disponibles pour la description de l'anisotropie du gonflement sous charges.

Pour essayer d'apporter des données de base dans l'étude du gonflement anisotrope des sols argileux, nous avons développé un programme expérimental selon le schéma suivant : préparation par compactage dynamique de blocs d'argile gonflante (bentonite), présentant une structure interne orientée ; caractérisation des paramètres quantitatifs définissant l'anisotropie mécanique de la bentonite compactée, à partir d'essais en compressions triaxiales orientées ; étude et réalisation d'une cellule originale pour la mesure des pressions de gonflement ; caractérisation de l'anisotropie de la pression de gonflement au cours du processus d'humidification de la bentonite compactée ; étude de l'évolution de cette anisotropie en fonction du degré de saturation ; mise en évidence de l'importance de l'anisotropie du gonflement sous charges constantes ; étude de l'évolution de l'anisotropie du gonflement, en fonction de la valeur de la charge appliquée.

MATERIAU UTILISE ET COMPACTAGE

Pour la réalisation de nos essais, nous avons choisi une bentonite calcique, fournie par la Société Française des Bentonites (type CV 15). La teneur en montmorillonite est de 90 %. La granulométrie indique : 74 % < 2 μ m. Les limites d'Atterberg sont les suivantes : $W_L = 665$ %,

$W_p = 58$ %, $W_s = 18,7$ %. Nous remarquons la valeur très élevée de la limite de liquidité. Cette bentonite présente des capacités de gonflement très importantes.

Lorsqu'une argile est compactée à une teneur en eau supérieure à l'optimum Proctor, les particules et agrégats s'orientent préférentiellement dans un plan perpendiculaire à la direction du

compactage (Barden, 1972). Cette structure interne orientée a pour conséquence sur le plan macroscopique une anisotropie du comportement mécanique, du type orthotrope de révolution. Nous avons mesuré les teneurs en eau optimales de la bentonite en fonction de l'énergie de compactage, ainsi que les poids volumiques secs correspondants, par des essais de compactage au moule CBR. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau I. Dans ce tableau, nous remarquons que le maximum du poids volumique sec est obtenu pour une énergie de compactage comprise entre 1800 et 2400 kJ/m³, correspondant à une teneur en eau optimale de 27 %. Afin d'obtenir un matériau orthotrope de révolution présentant un degré d'anisotropie élevé, nous avons compacté la bentonite à une teneur en eau initiale de 32 % et à une énergie de 1800 kJ/m³. Après compactage, les teneurs en eau sont de 43 à 45 %.

TABLEAU I
Résultats des essais de compactage

Energie (kJ/m ³)	600	1200	1800	2400
w à l'optimum	38%	32%	27%	27%
Poids sec volumique (kN/m ³)	12,4	13,2	14,1	13,8

ANISOTROPIE DES PROPRIETES MECANIQUES

Afin de pouvoir quantifier l'anisotropie des propriétés mécaniques des blocs compactés, nous avons réalisé une série d'essais non consolidés non drainés en compressions triaxiales de révolution, sous trois pressions de confinement $p = 0, 300$ et 600 kPa, sur des échantillons orientés, prélevés dans quatre directions différentes par rapport à la contrainte de compactage : $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. La vitesse de déplacement appliquée était de $0,4$ mm/mn. Les détails sur les essais et les résultats complets sont présentés dans (Kabbaj, 1981) ; nous donnons ici les résultats les plus caractéristiques.

Pour une pression de confinement donnée, le module de déformation directionnel $E(\theta)$ croît continûment avec l'orientation θ , tandis que la résistance directionnelle $R(\theta)$ décroît. Ceci signifie que la rigidité est minimale et la résistance maximale dans la direction privilégiée du matériau (direction du compactage). Le même phénomène a été observé pour des argiles consolidées (Boehler et Lefevre).

Pour une orientation θ donnée, le module $E(\theta)$ et la résistance $R(\theta)$ croissent avec la pression de confinement p . Cependant, les rapports $E(\theta)/R(0)$ restent constants et les rapports $R(\theta)/R(0)$ décroissent faiblement lorsque p augmente. Les valeurs caractéristiques sont : $E(90)/E(0) = 1,11$ pour tout p ; $R(90)/R(0) = 0,84$ pour $p = 0$, la résistance en compression simple pour $\theta = 0^\circ$ étant 3100 kPa. Ces résultats ont été interprétés dans le cadre d'une théorie générale du comportement plastique des sols et des solides anisotropes (Boehler et Sawczuk, 1977).

GONFLEMENT SOUS CHARGES

Les mesures de gonflement par humidification sous charges constantes ont été réalisées dans des

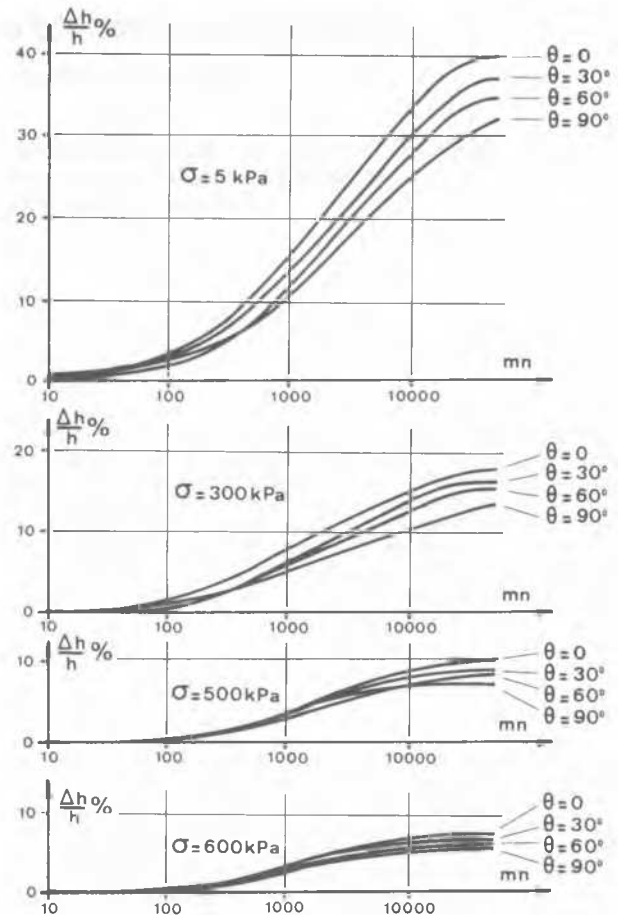


Fig.1 Gonflement sous charge d'une bentonite compactée

cellules oedométriques sur des échantillons de dimensions $\varnothing = 70$ mm, $h = 12$ mm, prélevés dans les blocs compactés suivant quatre orientations θ différentes entre l'axe des échantillons et la normale au plan de compactage : $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Les charges constantes appliquées étaient : $\sigma = 5, 300, 500$ et 600 kPa. Les essais ont été arrêtés lorsque les variations relatives de hauteur $\Delta h/h$ étaient inférieures à $0,08$ % en 24 h.

Courbes de gonflement sous charges

Les courbes de gonflement $(\Delta h/h)\% = f(\lg t)$ obtenues sont présentées sur la figure 1. Chaque diagramme correspond à une charge constante σ appliquée. Les courbes sont paramétrées selon l'orientation θ . Nous observons que la dérivée de la fonction f par rapport à $\lg t$ augmente entre $t = 0$ et $t = 800$ à 1000 mn (suivant l'orientation θ) ; au-delà de cet intervalle de temps, elle se stabilise à des valeurs variables suivant

θ et σ jusqu'à environ $t = 10^4$ mn, puis elle diminue et s'annule lorsque le gonflement final est obtenu. Quelle que soit l'orientation des échantillons, le gonflement final est maximal pour les faibles charges ($\Delta h/h = 32$ % à 40 % pour $\sigma = 5$ kPa) et diminue lorsque la charge constante appliquée augmente ($\Delta h/h = 5$ % à 7 % pour $\sigma = 600$ kPa).

Anisotropie du gonflement sous charges

Une analyse fine des courbes de gonflement montre qu'au début de l'humidification, quelle que soit la charge appliquée, le gonflement pour $\theta = 90^\circ$ est supérieur à celui pour $\theta = 0^\circ$. Lorsque le processus d'humidification croît, le phénomène s'inverse, c'est à dire que l'anisotropie du gonflement final est inverse de celle du gonflement à faible degré de saturation. Ce phénomène peut être interprété de la manière suivante : la bentonite compactée présentant des agrégats orientés préférentiellement dans des plans parallèles au plan de compactage, la pénétration de l'eau en début d'humidification est plus rapide pour les échantillons orientés à $\theta = 90^\circ$; après un temps relativement court, les capacités de gonflement de la bentonite sont totalement mises en oeuvre ; ces capacités étant nettement prépondérantes dans le sens perpendiculaire au plan des particules, le gonflement devient nettement plus important pour les échantillons orientés à $\theta = 0^\circ$. Les valeurs finales du gonflement sont présentées dans le tableau II.

Dans ce tableau, nous observons que, quelle que soit la charge σ , la valeur du gonflement final décroît lorsque l'angle θ augmente. L'anisotropie du gonflement est très importante sous faibles charges, la différence entre les valeurs extrêmes du gonflement (pour $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$) étant de 7 % pour $\sigma = 5$ kPa. Cette différence décroît lorsque la charge appliquée augmente (1,6 % pour $\sigma = 600$ kPa), c'est à dire que l'anisotropie du gonflement diminue pour les charges élevées. Ce phénomène peut être interprété au niveau de la structure interne de la bentonite compactée. Nous présentons ci-dessous quelques suggestions sur l'évolution de cette structure au cours du gonflement sous charges.

Tableau II

Valeurs finales du gonflement sous charges ($\Delta h/h$) %

σ (kPa)	5	300	500	600
$\theta = 0^\circ$	39,5	17,6	9,91	7,00
$\theta = 30^\circ$	37,0	16,0	9,06	6,54
$\theta = 60^\circ$	34,8	15,5	8,60	6,60
$\theta = 90^\circ$	32,4	13,4	7,20	5,40

PRESSION DE GONFLEMENT

Cellule de gonflement

Pour la mesure des pressions de gonflement, nous avons étudié et réalisé une cellule originale, basée sur le principe de l'annulation d'une petite variation de volume par l'application d'une pression, en nous inspirant de réalisations antérieures (Parez et Bachelier, 1979 ; Egger et Mottier, 1979). Le schéma de principe de cette cellule est présenté sur la figure 2.

Dans la partie inférieure de la cellule, l'échantillon de dimensions $\phi = 70$ mm, $h = 12$ mm, est entouré d'une bague en acier et repose sur une pierre poreuse. Un joint torique est placé sur la paroi externe de la bague, afin que l'eau ne puisse pénétrer dans l'échantillon que par sa base. La partie supérieure de la cellule est une chambre d'huile, dont la base est fermée par une capote en néoprène, en contact avec l'échantillon. Un capteur de pression permet de mesurer les

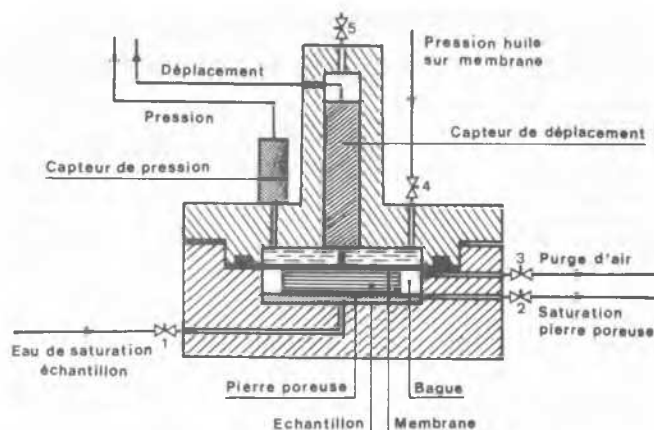


Fig. 2 Schéma de principe de la cellule de gonflement

pressions d'huile appliquées. Le déplacement vertical de l'échantillon est mesuré par un capteur de déplacement à induction, dont le noyau mobile repose sur le centre de la capote. Le processus de mise en route de l'essai est décrit dans (Kabbaj, 1981). Au cours du processus d'humidification (arrivée d'eau par le robinet 1), la mesure consiste à permettre des déplacements axiaux de 0,02 mm, puis à annuler chacun de ces incréments de déplacement par une contre-pression d'huile (robinet 4). La valeur finale P_g de la pression de gonflement est celle obtenue lorsqu'aucun déplacement axial n'est plus mesurable.

Anisotropie de la pression de gonflement

Les mesures des pressions de gonflement ont été réalisées pour quatre orientations différentes des échantillons : $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ et 90° . La courbe expérimentale $P(\theta) = f(lgt)$ pour l'orientation $\theta = 0^\circ$ est présentée sur la figure 3. La pression de gonflement croît continuellement en fonction du temps, c'est à dire en fonction du degré de saturation. La dérivée de la fonction f par rapport à lgt s'annule lorsque la valeur finale P_g est atteinte. Des phénomènes similaires sont observés pour les autres orientations.

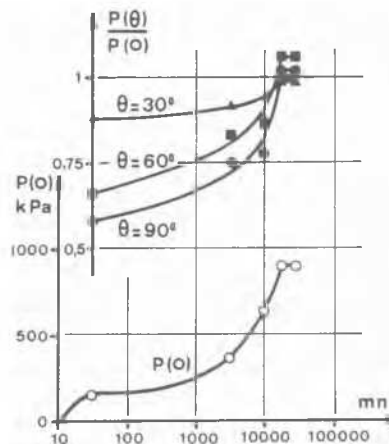


Fig. 3 Pressions de gonflement de la bentonite compactée

Afin de bien mettre en évidence l'anisotropie de la pression de gonflement, nous avons porté sur la figure 3 les variations du rapport $P(\theta)/P(0)$ en fonction de lgt. Nous constatons que cette anisotropie est très élevée en début d'humidification ($P(90)/P(0) = 0,58$ pour $t = 30$ mn), décroît lorsque le degré de saturation augmente et tend à s'annuler à la saturation totale. Les valeurs finales P_g de la pression de gonflement, obtenues à la saturation des échantillons, sont présentées dans le tableau III pour les quatre orientations.

Nous constatons que ces pressions sont très importantes. Les légères variations observées sont dues aux différences des teneurs en eau initiales, c'est à dire celles des blocs compactés, chaque échantillon orienté ayant été prélevé dans un bloc différent. Nous concluons que l'anisotropie initiale de la bentonite compactée n'a pas d'influence sur la valeur de la pression de gonflement à saturation.

Tableau III

Valeurs finales de la pression de gonflement P_g et teneurs en eau initiales correspondantes

Orientations θ	0°	30°	60°	90°
w initiale (%)	43,95	44,53	43,12	43,71
P_g (kPa)	910	893	965	930

EVOLUTION DE LA STRUCTURE DE LA BENTONITE COMPACTEE

Dans notre étude, nous avons observé les phénomènes suivants : l'anisotropie du gonflement sous charge constante est importante pour les charges faibles, diminue lorsque la charge augmente et tend vers son annulation lorsque la charge correspond à la pression de gonflement à saturation. De même, l'anisotropie de la pression de gonflement est très importante pour les faibles degrés de saturation, décroît et s'annule à saturation complète. Ces phénomènes suggèrent une évolution de la structure interne de la bentonite compactée, selon le processus suivant : sous l'effet des charges appliquées, lorsque le degré de saturation augmente, les particules argileuses se réorientent préférentiellement dans un plan perpendiculaire à la direction des charges. Sous charges élevées, la structure de la bentonite compactée acquiert donc une nouvelle orthotropie de révolution, dont l'axe privilégié est parallèle à l'axe des échantillons, quelle que soit l'orientation initiale de la structure. L'apparition de cette nouvelle anisotropie est confirmée par le séchage des échantillons ayant subi les mesures de pression de gonflement, faisant apparaître, quelle que soit la direction du prélèvement, des fissures de retrait perpendiculaires à l'axe des échantillons. C'est cette orientation finale, identique pour tous les échantillons, qui explique que l'orientation initiale n'a pas d'effet sur la pression de gonflement à saturation.

CONCLUSIONS

Le programme expérimental que nous avons développé pour l'étude du gonflement de la bentonite

compactée a clairement mis en évidence le caractère anisotrope de ce phénomène, dont l'importance ne peut être négligée dans les problèmes de Génie Civil. Cette anisotropie se manifeste aussi bien dans le gonflement sous charges constantes, que dans la pression de gonflement pour les échantillons non saturés. Cependant, au cours du processus d'humidification, l'application des charges provoque une réorientation de la structure interne de la bentonite, d'autant plus intense que la charge est élevée. Ce phénomène a pour conséquence une diminution de l'anisotropie des caractéristiques du gonflement sous charges croissantes. En particulier, cette anisotropie disparaît pour la pression de gonflement à saturation.

REFERENCES

- Barden, L. (1972). The influence of structure on deformation and failure in clay soil, *Géotechnique* (22), 1, 159-163.
- Boehler, J.P. and A. Sawczuk (1977). On yielding of oriented solids, *Acta Mechanica* (27), 185-204.
- Boehler, J.P. and F. Lefevre. Ecrouissage anisotrope des argiles consolidées (en prépartion).
- Brackley, I.J.A. (1971). Partial collapse in unsaturated expansive clay, *Proc. 5th Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Engr.* (1), 24-30, Luanda.
- Egger, P. et J. Mottier (1979). Appareil pour la mesure des propriétés de gonflement des roches argileuses. Document de l'I.S.R.F., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Gokhale, K.V.G. et K.K. Jain (1972). Anisotropic swelling in black cotton soil, *Bull. de l'Assoc. Int. de Géol. de l'Ing.* (5), 63-71.
- Kabbaj, M. (1981). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et du gonflement anisotropes d'une bentonite compactée. Thèse, Grenoble.
- Komornik, A. et M. Livneh (1967). The effect of anisotropy on swelling on a compacted clay, *Asian Conference*, 181-185.
- Parez, L. et M. Bachelier (1979). Pression de gonflement - Pression de consolidation, *Fiche technique Sols-Essais*, Paris.
- Rogatkina, Z.L. (1967). Effect of anisotropy of clay soils on their physico-mechanical properties, *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov* (1), 14-15.
- Seed, H.B., Mitchell, J.K. et C.K. Chan (1962). Studies of swell pressure; Characteristics of compacted clays, *Bull. H.B.R.*, 12-39.
- Yong, R.N. et D.E. Sheeran (1973). Fabric unit interaction, *Proc. Int. Symp. Soil Structure*, 176-183, Gothenburg.