
Contribution a la modélisation du gonflement des argiles compactées

Souhila Rehab Bekkouche*

** Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université du 20 Août, Skikda 21000, Algérie, solrehab@yahoo.fr*

RÉSUMÉ. L'eau joue un rôle majeur dans le comportement des sols non saturés. Sa cohabitation avec l'air dans les pores prend des formes variées, selon que l'eau domine et l'air ne peut se déplacer librement, ou au contraire que l'air occupe l'essentiel des pores et l'eau est bloquée aux contacts des particules, ou encore que l'eau et l'air peuvent se déplacer tous les deux. Ce travail décrit les différents états de l'eau dans une argile gonflante compactée. Les phénomènes physico-chimiques, qui déterminent l'interaction de l'eau et des minéraux et les lois de déplacement de l'eau dans les argiles compactées sont décrits. Une formulation a été établie, permettant de mettre en évidence tout les paramètres physiques et mécaniques responsables à la déformation par gonflement.

ABSTRACT. Water plays a major role for unsaturated soils behavior. Its cohabitation with air within pores takes different forms, according that water is dominant and air can't move freely, or contrary that air occupies the most of poral spac and water is blocked in contact with particles or that water and air can move together.

This work describes the different water states within a compacted swelling clay. The physico-chemical phenomena which determinate the interaction of water and minerals and draining laws of water and compacted clays are described.

A formulation was established, allowing to evidence all physics and mechanics parameters, responsible of the deformation by inflation of a inflated and compacted clay.

MOTS-CLÉS : Gonflement, Argile, Eau, Compactage.

KEYWORDS: swelling, Clay, Water, Compaction.

1. Introduction

Lorsqu'on étudie les problèmes de gonflement rencontrés sur des ouvrages, on s'aperçoit que le gonflement du terrain est étroitement lié aux apports d'eau du milieu extérieur ou environnant et que ce phénomène dépend fortement du type de terrain rencontré.

Au contact de l'eau, certaines argiles (à base de montmorillonite notamment) sont l'objet d'un gonflement. La modélisation du gonflement présuppose d'en connaître les caractéristiques hydriques sans négliger les effets mécaniques liés au gonflement.

Par suite d'une modification de leur teneur en eau, les terrains superficiels argileux varient de volume : retrait lors d'une période d'assèchement, gonflement lorsqu'il y a apport d'eau. Cette variation de volume est accompagnée d'une modification des caractéristiques mécaniques de ces sols (Figure 1).

e : indice des vides

$\Delta e > 0$ pour une augmentation de volume

$\Delta e < 0$ pour une diminution de volume.

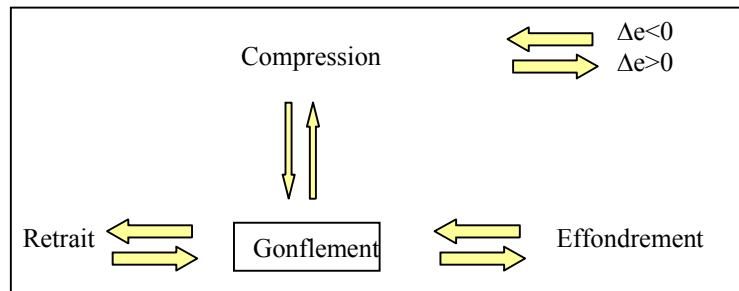


Figure 1. Le gonflement ou augmentation de volume d'un élément de sol ou de roche et les mécanismes opposés

Le taux de changement du volume, ainsi que la profondeur de terrain affectée par ces mouvements de « retrait- gonflement» dépendent essentiellement :

- des caractéristiques du sol (nature, géométrie, hétérogénéité) ;
- de l'épaisseur de sol concernée par des variations de teneurs en eau : plus la couche de sol concernée par ces variations est épaisse, plus les mouvements en surface seront importants. L'amplitude des déformations s'amortit cependant assez rapidement avec la profondeur et on considère généralement qu'au-delà de 3 à 5 m, le phénomène s'atténue, car les variations saisonnières de teneurs en eau deviennent négligeables ;

- de l'intensité des facteurs climatiques (amplitude et surtout durée des périodes de déficit pluviométrique) ;
- de facteurs d'environnement tels que :
 - La végétation ;
 - La topographie (pente) ;
 - La présence d'eaux souterraines (nappe, source...) ;
 - L'exposition (influence sur l'amplitude des phénomènes d'évaporation).

Le gonflement, tout comme le retrait, se limite généralement à la portion superficielle des dépôts de sol, par conséquent, le gonflement endommage surtout les petites constructions, les pavages routiers et les parois des canaux (Hillel, 1984), aussi le gonflement peut résulter de la diminution des contraintes en places après une excavation, d'un déchargement ou de l'imbibition du sol sous un état de contrainte constatant (Serratrice, 1998).

Actuellement les expériences de mesure de perméabilité ou de diffusivité des argiles sont encore peu nombreuses, tant pour les études in situ que celles en laboratoire. De plus, leur interprétation soulève de nombreuses questions précisément en raison des effets du couplage hydromécanique.

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude du comportement des matériaux compactés. Ces travaux touchent aux problèmes du compactage, du transfert de fluides dans les matériaux compactés et, d'une manière générale, au comportement de ces matériaux en tant que milieux non saturés et gonflants.

Les argiles compactées sont utilisées comme matériaux constitutifs des ouvrages (sols fins compactés en remblais routiers ou en barrage, barrières ouvragées, ...). Une meilleure maîtrise de leur comportement hydro- mécanique est nécessaire pour réduire les risques de dysfonctionnement (tassement, développement de pression interstitielle...)

La déformabilité de l'argile compactée dépend de son état de teneur en eau et de compacité, de l'état des contraintes totales initiales et de la direction du chargement.

L'imbibition a une grande influence sur la résistance des sols compactes en la diminuant due à une réduction de la succion.

Le premier volet de ce travail est consacré à la description et la présentation des différents écoulements dans les argiles et les argiles compactées.

Le deuxième volet est une présentation de la modélisation proposée. L'étude et l'analyse des différentes équations de continuité et d'équilibre dans le cas des sols non saturés sont traitées.

2. Les écoulements dans un sol non saturé

Les transfères d'eau au sein des argiles et des sols non saturés dépendent de la courbe de rétention d'eau, et de la perméabilité en non saturé, qui est fonction du degré de saturation (Gueguen *et al.*, 1992), (Grolier *et al.*, 1991), (Billaut *et al.*, 1989).

Dans les argiles il y a en général un couplage non négligeable entre les écoulements et le comportement physico- mécanique et chimique, cela revient à dire que les écoulements, en modifiant les caractéristiques du massif, engendrent un changement de l'état de contraintes.

Dans la pratique, une meilleure connaissance de l'état de l'eau et ces propriétés de rétention et de transfert à travers les argiles permet de mieux comprendre le comportement d'ouvrages bâtis en sol non saturé tels que les ouvrages en sol compacté (remblai routier, barrage en terre, barrières géologiques d'étanchéité de centre de stockage de déchets) (Delage *et al.*, 1999), (Verdeyen *et al.*, 1968).

3. Modélisation du gonflement des argiles compactées

3.1. Hypothèses physiques de la modélisation

a) Le milieu est supposé homogène et continu

3.2. Équations de continuité et équations d'équilibre

3.2.1. Phase solide

La densité moyenne sèche ρ_s est définie à partir de la densité des constituants solides γ_s :

$$\rho_s = (1 - n)\gamma_s \quad [1]$$

n: porosité.

La vitesse moyenne homogénéisée \vec{V}_s est définie à partir de la vitesse des constituants solides \vec{U}_s .

$$\vec{V}_s = (1 - n)\vec{U}_s \quad [2]$$

La conservation de la masse $\dot{M}_s = 0$ s'écrit:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \text{div} \rho_s \vec{U}_s = 0 \quad [3]$$

Où

$$\frac{\partial(1-n)\gamma_s}{\partial t} + \frac{div[(1-n)\gamma_s \vec{V}_s]}{1-n} = 0 \quad [4]$$

Avec $\gamma_s = cst$:

$$\frac{-\partial n}{\partial t} + div \vec{V}_s = 0 \quad [5]$$

3.2.2. Phase fluide

La densité moyenne du fluide ρ_f est déterminée à partir de la densité de l'eau et le degré de saturation S:

$$\rho_f = n\gamma_f \text{ Avec } \gamma_f = S\gamma_w \quad [6]$$

La vitesse apparente du fluide homogénéisé:

$$\vec{V}_f = n\vec{U}_f \quad [7]$$

La conservation de la masse du fluide homogénéisé $\dot{M}_f = 0$ est:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + div(\rho_f \vec{U}_f) = 0 \text{ Ou } \frac{\partial(n.S.\gamma_w)}{\partial t} + div\left(n.S.\gamma_w \cdot \frac{\vec{V}_f}{n}\right) = 0 \quad [8]$$

Avec $\gamma_w = cst$:

$$\frac{\partial(n.S)}{\partial t} + div(S.\vec{V}_f) = 0 \quad [9]$$

La combinaison entre les équations [4] et [8] nous permet d'écrire:

$$div(S.\vec{U}_s) + div[S.n(\vec{U}_f - \vec{U}_s)] + n \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad [10]$$

La vitesse de darcy V_D est définie par:

$$\vec{V}_D = n(\vec{U}_f - \vec{U}_s) \quad [11]$$

En introduisant (5) dans l'équation (4) on obtient:

$$\operatorname{div}(S.\vec{U}_s) + \operatorname{div}(S.\vec{V}_D) + n \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad [12]$$

L'élimination de \vec{U}_s entre les équations [12] et [5] permet de définir l'équation de continuité:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + (1-n)\operatorname{div}\vec{V}_D + \frac{\partial S}{\partial t} \cdot \frac{n}{S} \cdot (1-n) = 0 \quad [13]$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + (1-n)\operatorname{div}\vec{V}_D + (1-n) \frac{\partial S}{\partial t} \cdot \frac{n}{S} = 0 \quad [14]$$

Dans le cas d'un sol partiellement saturé on utilise la vitesse de Darcy et la relation entre la pression de succion U et le degré de saturation $U(s)$:

$$\vec{V}_D = -\frac{K}{\gamma_w} \operatorname{grad}\bar{U} \quad \text{Avec} \quad \operatorname{grad}\bar{U} = \frac{\partial U}{\partial t} \cdot \operatorname{grad}\bar{S} \quad [15]$$

$$\text{Soit } \vec{V}_D = -\frac{D}{\gamma_w} \operatorname{grad}\bar{S} \quad \text{avec} \quad D = K \frac{\partial U}{\partial S} \quad [16]$$

D'où:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - \frac{1}{\gamma_w} (1-n)\operatorname{div}(D.\operatorname{grad}\bar{S}) + (1-n) \frac{n}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad [17]$$

La relation de comportement liant les contraintes, les déformations s'écrit:

$$\{\sigma'\} = [C]\{\varepsilon\} \quad [18]$$

En considérant les forces aux limites b_s ainsi que les opérateurs $[\partial]$, $\{\varepsilon\}$ et le vecteur contrainte $[\sigma']$:

b_s : force sur la phase solide

$$[\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \quad [19]$$

$$\{\sigma'\}^T = (\sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z \sigma'_{yz} \sigma'_{xz} \sigma'_{xy})^T$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx} \varepsilon_{xy}\}^T$$

Dans le cas de sollicitation unidimensionnelle, la relation contrainte déformation se réduit à une relation de proportionnalité dont la constante est un module de déformation.

On a:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad [20]$$

Où λ est la constante de lamé et G le module de cisaillement. Ils peuvent s'exprimer en fonction de E et ν par:

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$\{\varepsilon\} = [\partial]^T \{W\}$$

Avec $\{W\}$ le vecteur déplacement

$[\partial]^T$ la transposée de $[\partial]$.

On peut alors écrire l'équation d'équilibre:

$$[\partial][C][\partial]^T \{W\} = \frac{1}{1+e} \{b_s\} \quad [21]$$

En utilisant l'opérateur $\{\nabla\}^T = \left(\frac{\partial}{\partial x} / \frac{\partial}{\partial y} / \frac{\partial}{\partial z} \right)$ on peut écrire l'équation de continuité (7) sous la forme:

$$\{\nabla\}^T \frac{\partial}{\partial t} \{W\} - \frac{1}{\gamma_w} (1-n) \{\nabla\}^T [D] \{\nabla\} \cdot S + (1-n) \frac{n}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad [22]$$

$$\text{Avec } [K] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

4. Conclusion

Le compactage et l'humification changent profondément l'organisation du système à tous les niveaux, de sorte que dans la modélisation de son comportement il convient de tenir compte de l'histoire des contraintes hydriques et mécaniques (Grolier *et al.*, 1991).

Examinons plus particulièrement l'équation 14:

Si on considère la variation de la déformation volumique relative $\left(\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \right)$ avec la variation du degré de saturation dans le temps, cette relation est d'autant plus importante que le rapport $\frac{n}{S}$ est important.

Dans cette étude, on pourra considérer que ce rapport est un facteur multiplicateur du gonflement est on pourra l'appeler: facteur d'accélération de gonflement (F.A.G).

5. Bibliographie

- Billaut C., *Le rôle épurateur du sol, tome I, le sol, l'eau, et les polluants*, O.I.E, Paris, 1989.
- Delage P, YU- JUN CUI., *L'eau dans les sols non saturés*, technique de l'ingénieur, traité de construction, Paris, 1999.
- Grolier J., Fernandez A., Hucher M., Riss J., *Les propriétés physiques des roches théorie et modèles*, Masson, Paris, 1991.
- Gueguen Y., Palciauskas V., *Introduction à la physique des roches*, Hermann, Paris, 1992.

Hillel daniel., *L'eau dans le sol: principes et processus physiques*, Cabay, 1984.

Serratrice Jean Francois et Bertrand Soyez. "Les essais de gonflement", bulletin de laboratoire des ponts et chaussées N° 204, juillet- août 1996.

Verdeyen J., Roisin V., Nuyens J., *Mécanique des sols*, Dunod, Paris, 1968.