

Comportement des sols gonflants lors de l'humidification et du séchage

Behavior of swelling soil under cyclic wetting and drying

Ejjaaouani H., Shakhirev V.

Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes, Casablanca. Maroc

Magnan J.-P.

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, Paris. France

Bensallam S.

École Mohammadia d'ingénieurs, UM5 Agdal, Rabat. Maroc

RÉSUMÉ : Cet article présente les résultats de l'étude en laboratoire de l'humidification et du séchage d'un sol gonflant. Il décrit les mécanismes de gonflement de l'argile lors de l'humidification et de son retrait lors du séchage. Les résultats montrent que les courbes de gonflement et de retrait ne sont pas superposables. Cette différence est imputée à la dissipation irréversible d'énergie due au frottement interne du sol. Les points caractéristiques et la forme des courbes de gonflement et de retrait sont expliqués qualitativement.

ABSTRACT: This article presents the results of wetting and drying laboratory tests conducted on expansive soil. It describes the clays swelling behavior in the wetting process and its shrinkage in the drying process. The results show that the swelling and the shrinking curves do not follow the same path. The characteristic points and shape of the swelling and shrinking curves are qualitatively discussed in the text.

MOTS-CLÉS: gonflement, retrait, adsorption, désadsorption, couche hydratée, diffuse, libre.

KEYWORDS : swelling, shrinkage, adsorption, disadsorption, hydrated layer, diffuse, free.

1 INTRODUCTION

Pour décrire le mécanisme de gonflement et retrait du sol, il est important de connaître et de comprendre la nature et la répartition quantitative de l'eau dans le sol, entre :

- la couche hydratée, qui regroupe les molécules orientées entourant la particule et constitue la frontière avec le reste de l'eau. Suivant la composition chimique de la particule solide et de l'eau, cette couche peut comporter jusqu'à quelques dizaines de couches de molécules dont chacune a une épaisseur de l'ordre de 10^{-8} m ;
- la couche diffuse, dans laquelle les cations en solution et la surface chargée négativement des particules solides forment ce que l'on appelle la double couche électrique. La couche diffuse comprend l'eau hygroscopique adsorbée sur la surface des particules solides à partir de l'air du milieu environnant. Sa quantité dépend de l'humidité de l'air et peut varier sensiblement en fonction des conditions atmosphériques ;
- l'eau libre, qui se trouve à l'extérieur de la sphère d'action des forces moléculaires et n'exerce pas d'influence sur le gonflement du sol, mais peut alimenter le gonflement intracrystallin. Elle se divise en eau gravitaire et eau capillaire. L'eau gravitaire possède des propriétés classiques et se déplace dans les pores du sol sous l'action de la pesanteur et des différences de pression. L'eau capillaire se déplace sous l'influence de la pesanteur et de la tension superficielle si elle ne remplit que partiellement les pores du sol, c'est-à-dire quand le sol est un système à trois composants. Lorsque le sol est saturé, il n'y a plus d'eau capillaire et toute l'eau libre se comporte comme l'eau gravitaire.

L'épaisseur de la couche diffuse est variable. Les molécules de la couche diffuse peuvent s'intégrer dans la couche hydratée si

le potentiel thermodynamique de la surface de la particule dispersée est supérieure au potentiel électrocinétique de la couche diffuse. Pour les mêmes raisons, la couche diffuse peut absorber une partie des molécules de l'eau libre.

Le déplacement de l'eau liée est impossible quand la teneur en eau du sol est dépassée la capacité maximale d'adsorption du sol. Dans ce cas, chaque particule retient la quantité maximale d'eau, le potentiel à la surface des enveloppes diffuses des particules est nul et il ne se produit pas de migration d'eau. Dès qu'une partie des molécules d'eau de la couche superficielle du massif de sol commence à s'évaporer, l'équilibre thermodynamique est rompu et il se produit une migration d'eau vers la zone où les couches diffuses sont plus minces jusqu'à que l'équilibre soit rétabli dans toute la couche de sol. Les expériences et observations présentées ci-après illustrent les ordres de grandeur de ces phénomènes.

2 VARIATIONS DE LA TENEUR EN EAU D'UN SOL GONFLANT EN LABORATOIRE ET IN-SITU.

Afin de déterminer les relations qualitatives entre les couches hydratée et diffuse et l'eau libre, nous avons réalisé quelques séries d'essais sur des éprouvettes de sol argileux, à l'air libre, dans une cloche en verre contenant un récipient d'eau et à l'étuve. De plus, nous avons observé les variations de la teneur en eau dans un massif de sol, lors de son assèchement par aération dans des conditions naturelles.

2.1 Étude en laboratoire

Procédure d'essai :

Cinq échantillons intacts de sols prélevés sur le site expérimental de Moul El Bergui (région de Safi) ont été testés selon la procédure suivante :

- mesure de la masse initiale de l'échantillon,

- saturation totale ;
- séchage à l'étuve à une température de 105°C ;
- conservation pendant 24 jours à la température constante de 22°C et en atmosphère contrôlée (humidité de l'air 55%) ;
- conservation sous cloche à la température de 20°C avec un récipient contenant de l'eau, jusqu'à la stabilisation de la masse totale de chaque échantillon. L'humidité dans la cloche est passée progressivement de 55 à 100%. La stabilisation a été obtenue au bout de 58 jours ;
- séchage à l'étuve à 105°C pendant 120 heures (5 jours) ;
- séchage à l'étuve à 220°C pendant 72 heures (3 jours).

La masse de l'échantillon a été mesurée à chacune de ces étapes de la procédure d'essai.

Leur teneur en eau a atteint 38%

Interprétation :

Nous avons admis que la masse de l'échantillon après séchage à 220 degrés est la masse du sol totalement sec. Cette hypothèse permet de calculer les teneurs en eau successive de l'échantillon au cours du temps (Figure 1). Le sol a une teneur en eau initiale voisine de 20%. La teneur en eau à saturation vaut 38%. Après séchage à l'étuve (105°C), la teneur en eau tombe à 1,2 à 2%. L'aération en atmosphère contrôlée produit une teneur en eau finale de 6 à 8%. La réhumidification sous cloche en présence d'eau libre fait remonter la teneur en eau à 15%. Le nouveau passage à l'étuve redonne une teneur en eau de 1,2 à 2%. Nous avons admis que la teneur en eau est nulle après le séchage à 220°C.

Ces données et les informations issues de la littérature nous ont conduits à admettre que la couche hydratée, évaporée entre

105°C et 200°C, correspond à 1,2 à 2% de teneur en eau. Ces données ne permettent pas de distinguer la couche diffuse de l'eau libre.

2.2 Observations faites sur le terrain :

Sur le site expérimental d'Ouarzazate (Magnan et al., 2008), lors de l'assèchement du massif de sol saturé (teneur en eau de saturation 35%), il a fallu 35 jours pour l'évaporation de l'eau libre et l'obtention d'un tassement d'environ 4mm. La teneur en eau valait alors 27%. À ce moment, la diminution de la teneur en eau et le retrait du sol s'arrêtèrent et la teneur en eau resta constante et égale à 27% pendant 240 jours. Ceci indique que l'équilibre de la quantité d'eau évaporée et de l'eau adsorbée dans les couches plus profondes s'était établi.

Cet équilibre est celui des couches diffuses. Par conséquent, la teneur en eau libre dans les conditions de cette expérience valait $w_{el} = 35 - 27 = 8\%$.

On a déterminé ensuite le volume d'eau évaporé lorsque l'on maintient des éprouvettes de sol durablement à l'air libre à une température élevée (40-43°C). La teneur en eau est tombée à 4%.

Nous avons supposé dans ce cas que la couche hygroscopique liée à la couche hydratée a une épaisseur minimale. La comparaison de ces données avec les résultats présentés plus haut permet de supposer que la couche hydratée correspond à une teneur en eau de 2%. La teneur en eau associée à la couche diffuse est donc égale à 25% et celle de l'eau libre 8%.

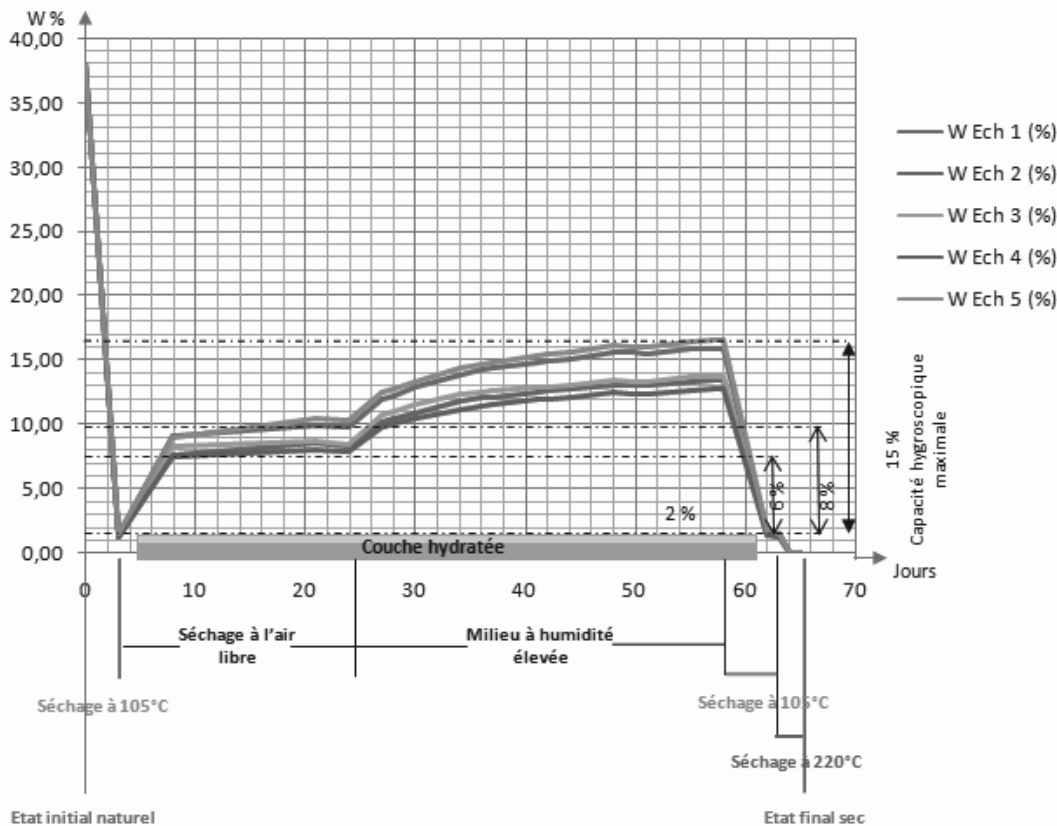


Figure 1. Variation de la teneur en eau en fonction du temps

3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU RETRAIT ET DU GONFLEMENT

L'étude du mécanisme de gonflement et de retrait du sol argileux lors de l'humidification et de l'aération a été réalisée

au moyen de l'appareil de mesure du retrait linéaire développé par le LCPC sur une éprouvette du même sol du site expérimental de Moul El Bergui. (Figure 2).

Procédure d'essai

L'anneau rigide contenant l'éprouvette de sol à l'état naturel est placé sur une balance électronique pour mesurer la teneur en eau à chaque étape de l'humidification. Pour éviter l'évaporation de l'eau lors de l'essai, l'éprouvette est recouverte d'une mince pellicule imperméable à l'eau. De plus, une plaque métallique rigide perforée est placée à la surface de l'éprouvette pour appuyer l'extrémité de la tige du comparateur.

L'humidification est effectuée par injection à la seringue de 2g d'eau à chaque étape, avec mesure du poids total de l'appareil et de l'amplitude du gonflement au cours du temps jusqu'à la stabilisation totale du gonflement.

Ensuite, on effectue l'injection d'eau suivante et ainsi de suite jusqu'à la saturation totale du sol et la stabilisation complète du gonflement à la dernière étape.

À la fin du processus de gonflement, l'injection d'eau a été stoppée et l'éprouvette a été soumise à une aération naturelle à l'air libre dans le même appareil. Des mesures de masse et de déformation de retrait ont été effectuées pendant cette phase.

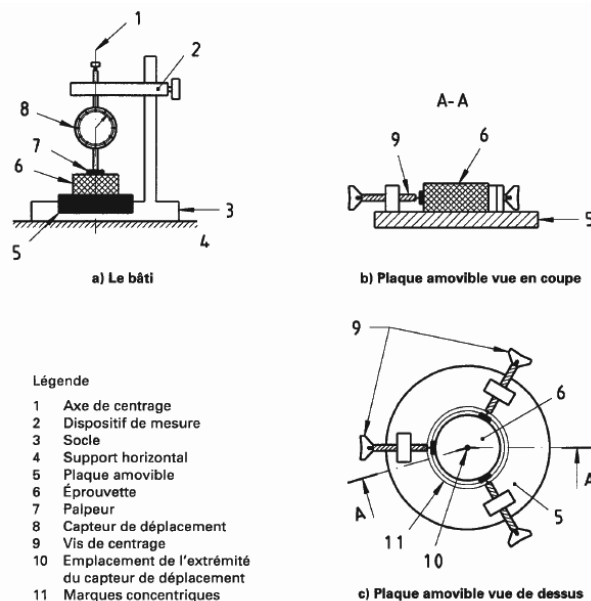


Figure 2. Appareil pour mesurer la limite de retrait linéaire (fabrication LCPC).

Résultats des essais et interprétation :

Les résultats de ces essais de gonflement et retrait du sol sont présentés sur la figure 3.

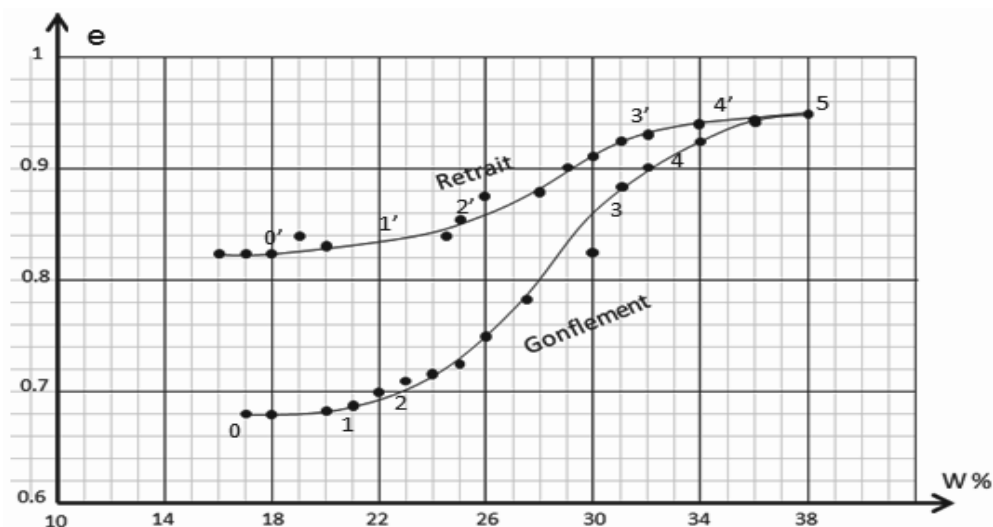


Figure 3. Essais œdométriques de gonflement et de retrait d'un sol argileux

L'examen des courbes de la figure 3 permet de constater la conformité des deux courbes avec les comportements décrits par Rebinder (1978), Florin (1959) et Goldshtejn (1971).

La pression de gonflement créée par la formation des couches diffuses ne peut provoquer instantanément des déformations de gonflement car les liaisons structurelles dans le sol s'y opposent :

- les liaisons rigides (de cimentation, de cristallisation et de condensation) ;
- les liaisons plastiques (van-der-Waals, de coagulation, colloïdales, intermoléculaires).

Sur la courbe de gonflement de la figure 3, on peut définir les points et sections caractéristiques suivantes :

- section 0-1 : début de l'adsorption d'eau par la macrostructure du sol, dépassement des forces de van-der-Waals, rupture des liaisons rigides ;
- section 1-2 : début de l'adsorption d'eau par la microstructure du réseau cristallin des particules, dépassement de la résistance des liaisons plastiques entre les particules, intensification de la formation des couches diffuses autour des particules et du gonflement du sol ;
- section 2-3 : formation intensive des couches diffuses, gonflement libre du sol. Au point 3, fin de la formation des couches diffuses, apparition d'eau libre, poursuite de l'adsorption d'eau par la microstructure du réseau cristallin des particules. Saturation complète de la macrostructure du sol ;

- section 3-4 : décroissance de l'intensité d'adsorption de l'eau par la microstructure du réseau cristallin des particules ;
- section 4-5 : saturation des couches internes de séparation des phases dans le réseau cristallin des particules. Le point 5 marque la fin de l'adsorption d'eau due à la saturation des surfaces internes du réseau cristallin.

Sur la courbe de retrait à l'air de la figure 3, on peut définir les points et sections caractéristiques suivantes :

- section 5-4' : début de l'évaporation de l'eau libre dans les macropores sans modification des couches diffuses, avec un retrait d'ampleur limitée ;
- section 4'-3' : début de la désadsorption dans la macrostructure du sol et sur les surfaces de séparation des phases dans le système discret. Début de la désadsorption dans les microstructures du réseau cristallin des particules, retrait du sol ;
- section 3'-2' : désadsorption intense dans la macrostructure et la microstructure, retrait intense du sol par suite de la diminution de l'épaisseur des enveloppes diffuses, augmentation de la concentration des sels dans la solution interstitielle ;
- section 2'-1' : apparition de liaisons moléculaires empêchant le retrait du sol ;
- section 1'-0' : apparition de liaisons rigides accompagnant la diminution continue de la teneur en eau du sol. Fin du retrait.

Sur la figure 3, on note la différence des isothermes d'adsorption et de désadsorption, car l'adsorbant retient fortement les substances adsorbées.

L'énergie dépensée pour le gonflement direct du sol n'est pas égale à l'énergie produite par la déformation inverse (retrait). Pendant le processus de retrait, se produit une certaine dissipation irréversible d'énergie liée au frottement interne dans le matériau.

La dissipation de l'énergie se produit tant lors des déformations plastiques que lors des déformations visqueuses. Dans le premier cas le frottement interne est supposé proportionnel à l'amplitude de la déformation et est appelé frottement sec ou de Coulomb. Dans le second cas, la dissipation est appelée viscosité et est proportionnelle à la vitesse de déformation (frottement liquide). Habituellement, dans les milieux réels, la dissipation d'énergie existe sous ces deux formes.

La partie de l'énergie de déformation dissipée par viscosité provoque dans le sol deux processus conduisant à la diminution de la résistance du matériau à la déformation :

- une réorganisation irréversible de la structure du sol ;
- le réchauffement du milieu, qui conduit, en règle générale, à la diminution de sa résistance à la rupture (Goldshtejn, 1971).

Du point de vue de la thermodynamique, au cours de l'écoulement, toute l'énergie est pratiquement dépensée pour le réchauffement du matériau. Si le processus est lent, la chaleur obtenue est dissipée dans le milieu et l'augmentation de la température peut être imperceptible. Le processus peut alors être considéré comme isotherme.

4. CONCLUSION

Les expériences réalisées permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Les processus de gonflement et de retrait du sol doivent toujours être analysés conjointement.
2. Les déformations de gonflement et de retrait des sols sont deux aspects opposés d'un même processus qui se déroule dans le sol au cours du temps en fonction du degré d'humidification ou d'assèchement, ainsi que de la charge appliquée.
3. Lorsque les particules d'argiles sont mises en contact avec de l'eau, qui possède son propre champ de force, il se produit une concentration et adsorption des molécules d'eau sur la couche superficielle des particules sous l'action des forces d'attraction moléculaires.
4. Dans la nature, l'adsorption n'est pas réversible car le milieu dispersé retient solidement l'eau, par exemple du fait des modifications chimiques qui se produisent lors de l'adsorption. Le phénomène de retenue de la substance adsorbée par l'adsorbant lors de la désadsorption provoque une hystérésis d'adsorption et traduit la non coïncidence des isothermes d'adsorption et de désadsorption.
5. La structure des systèmes dispersés des sols argileux doit être divisée en deux types principaux :
 - les structures thixotropes de coagulation,
 - les structures cristallisées par condensation.
6. La couche diffuse joue le rôle principal dans le processus de gonflement et de retrait des sols.
7. Les molécules d'eau de la couche diffuse peuvent se mêler à la couche hydratée et adsorber une partie des molécules de l'eau libre.
8. Les études réalisées en laboratoire et in situ ont permis d'établir les pourcentages d'eau de la couche hydratée et de la couche diffuse ainsi que de l'eau libre.
9. L'étude du mécanisme de gonflement et de retrait du sol a démontré la non coïncidence des isothermes d'adsorption et de désadsorption. L'énergie absorbée lors du gonflement du sol n'est pas égale à l'énergie dégagée lors du retrait du même sol.
10. Pendant le retrait du sol se produit un dégagement d'énergie irréversible, dû au frottement interne du matériau.
11. Dans tous les processus d'humidification et de séchage d'échantillons de sols, pour des variations importantes de la teneur en eau, la formation de la couche diffuse, la déformation de gonflement et la déformation de retrait ont approximativement un caractère linéaire. Ces déformations sont non linéaires dans les parties initiale et finale des courbes qui représentent les déformations de gonflement et de retrait en fonction de la teneur en eau.

5 RÉFÉRENCES

- Florin V.A. (1959). Bases de la mécanique des sols (En russe : Osnovy mekhaniki gruntov). Strojizdat, Moscou, 380 pages.
- Goldshtejn M.N. (1971). Propriétés mécaniques des sols (En russe : Mekhanicheskie svoystva gruntov). Strojizdat, Moscou, 362 pages.
- Magnan J.P., Ejjaaouani H., Shakhirev V. (2008). Comportement des fondations superficielles sur sol gonflant lors de l'humidification et du séchage. Éditions du LCPC, Paris, pp. 273-278.
- Rebinder P.A. (1978). Recueil de travaux : Phénomènes de surface dans les systèmes dispersés (En russe : Izbrannye trudy : Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh). Nauka, Moscou.