

# 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.*

# Liaisons Structurelles des Argiles Gonflantes pendant l'Humidification

H. Ejjaouani

Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes, Casablanca, Maroc  
ejjaouani@lpee.ma

## RESUME

Cet article présente l'analyse du processus géologique d'une formation de structures argileuses, de leurs propriétés et des liaisons structurelles entre les particules solides du sol.

## ABSTRACT

In this paper, we present the geological process of the structural formation of clay, its properties, and the liaisons structurals between particles of solid soils.

Les propriétés de gonflement des sols argileux dépendent fortement, d'après de nombreux chercheurs, de leur composition minéralogique, des pourcentages des différents minéraux ou des types de minéraux dominants, et de leur caractère dispersé. La structure du réseau cristallin des minéraux et leur capacité d'échange ionique joue également un rôle important.

La structure initiale des sols argileux se forme, en règle générale, lors de la sédimentation en milieu aqueux des produits de l'altération des massifs rocheux contenant des quantités importantes de petites particules de minéraux secondaires. Par la suite, des processus lents et variés de diagenèse peuvent modifier sensiblement la structure initiale de ces argiles.

La combinaison de particules isolées et d'agrégats conduit à la formation d'un système structurel, c'est-à-dire à une disposition ordonnée des particules et agrégats dans le sol indépendante de l'influence des parties gazeuses ou liquides du sol, qui se forme dans les processus de sédimentation, de diagenèse et de post-genèse. Si la sédimentation des particules assez grosses (>0.25 m) se produit sans coagulation (c'est-à-dire sans réunion préalable des particules en micro-agrégats sous l'effet des forces électro-moléculaires), l'argile acquiert une structure en nid d'abeille (figure 1a).

La coagulation préalable des particules sous l'action des forces électro-moléculaires conduit à la formation d'une structure en flocons (figure 1b). Assez souvent lors de la sédimentation des argiles, les particules argileuses orientées s'appuyant les unes sur les autres, format une structure dispersée et dense, figure 1c. Plus les dépôts argileux sont récents, plus leur structure est voisine des formes en nid d'abeille ou en flocons et plus leur porosité est grande, pouvant atteindre 80% et plus, et leur résistance est faible.

Il se produit souvent lors de la formation des sols sédimentaires, une sédimentation simultanée de particules argileuses, limoneuses et sableuses. Si ce processus se prolonge sans interruption pendant une période assez longue, indépendamment des différences de vitesses de sédimentation dans l'eau des particules minérales en fonction de leur dimension, les particules les plus grosses et les particules les plus petites se déposent simultanément au fond des réservoirs. Il se forme alors une structure hétérogène en nid d'abeille dans laquelle les particules les plus fines se disposent entre les particules de sable et de

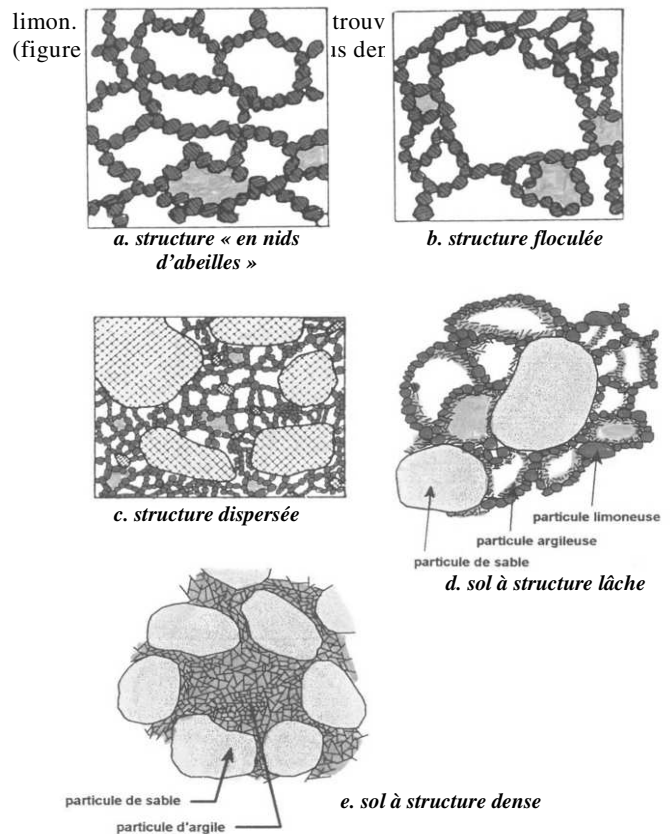


Figure 1. Différentes structures d'argile d'après Terzaghi

Les propriétés mécaniques des sols dispersés sont principalement déterminées par la nature des liaisons structurelles entre les particules dans la mesure où la résistance des particules minérales est très grande et leur compressibilité très faible.

Les liaisons structurelles entre les particules des sols argileux peuvent résister à la traction et au cisaillement. La

résistance au cisaillement due aux liaisons structurelles est appelée « cohésion »

La propriété de cohésion est tellement caractéristique des sols argileux que, par opposition aux sols pulvérulents (non cohérents), on les appelle « sols cohérents ».

Entre les particules d'argile voisine, situées à une très petite distance l'une de l'autre, se développent des forces d'attraction moléculaire directe, les forces de van-der Waals. La cohésion créée par l'action de ces forces est appelée cohésion moléculaire. Plus la distance moyenne entre les particules est faible, c'est-à-dire plus le sol est dense, et plus la cohésion moléculaire est grande. Ces forces sont plus fortes lorsque les particules solides sont séparées de moins de deux fois l'épaisseur de la couche diffuse (Goldshajn, 1952 ; Florin, 1959).

Cependant l'attraction moléculaire n'est pas la seule source de cohésion des sols argileux. Les forces d'attraction superficielle agissant entre les parois capillaires et l'eau forment des ménisques d'eau courbes qui attirent les molécules l'une sur l'autre et tournent leur concavité vers les capillaires et dans le liquide même se développe une pression capillaire négative qui augmente la cohésion du sol.

Les forces capillaires permettent de diminuer le volume du sol à cause de la pression de compression capillaire, ce qui se produit dans le sol argileux lorsque les pores ne sont pas remplis d'eau, et lorsque l'humidité du sol se concentre dans les pores capillaires et maintient les particules en état d'attraction mutuelle.

Lorsque le sol n'est pas saturé, entre les particules se développent non seulement des forces capillaires, qui agissent entre les parois capillaires et la vapeur d'eau sur les ménisques concaves de l'eau dans les capillaires, mais aussi des forces osmotiques et d'adsorption, qui agissent dans les autres pores du sol.

Dans ce dernier cas se forment des liaisons électro-colloïdales. Les cations et les dipôles des molécules d'eau qui se trouvent dans l'enveloppe diffuse des particules en contact interagissent entre eux et avec la surface des particules et, étant en moyenne orientés, forment un réseau hydro-colloïdal qui lie les particules. Lorsque les sols argileux naturels existent depuis longtemps, quelques millions d'années par exemple, les liaisons hydro-colloïdales peuvent avoir évolué en liaison de cristallisation. La formation de liaisons de cristallisation sur les surfaces de contact des particules se produit du fait de la précipitation progressive de différents sels de la solution interstitielle concentrée (carbonate de calcium, gypse, etc.) (Berezantsev et al, 1961).

Les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux et leur genèse sont liées par la lithogenèse c'est-à-dire par les processus de dessiccation et de densification qui se produisent de façon continue et par phases. Dans ces conditions, on observe des variations régulières de la densité, de la teneur en eau et de la déformabilité avec la profondeur, et les processus dominant la déformabilité sont la dessiccation et la densification.

A côté du compactage dû à la déshydratation des sols par les forces de pesanteur, il peut se produire dans les sols des transformations géochimiques qui conduisent à la consolidation des sols, en augmentant leur résistance et diminuant leur perméabilité et leur déformabilité.

Les liaisons de cristallisation sont des liaisons rigides. Lorsque la distance entre les particules varie, du fait de l'application de contraintes de cisaillement, de traction ou même de compression, leur résistance limite est dépassée et ces liaisons sont détruites de façon irréversible.

Les liaisons hydro-colloïdales, à la différence des liaisons structurales, sont plastiques par nature. En cas d'application lente de la charge, elles peuvent se déformer sans rupture. L'application rapide d'une charge, en particulier d'une charge

alternée (vibration), peut détruire les liaisons hydro-colloïdales par suite de la rupture de l'orientation des cations et des dipôles de l'eau.

Il ressort de ce qui a été exposé que l'eau qui se trouve dans le sol joue un rôle très important tant dans la formation des propriétés que dans le comportement du sol sous l'action de différents facteurs internes et externes.

Dans les sols on distingue l'eau de cristallisation, l'eau liée et l'eau libre.

L'eau de cristallisation entre dans la composition des réseaux cristallins.

L'eau liée se divise en eau fortement liée de la couche de molécules orientées fixées à la surface des particules minérales et eau faiblement liée des enveloppes diffuses, dont les molécules sont orientées autour des couches d'eau fortement liée.

Le comportement de l'eau libre, qui se trouve dans les pores du sol hors de portée des forces moléculaires, est déterminé principalement par l'action des forces de pesanteur.

Dans l'eau libre, il est indispensable de distinguer l'eau capillaire, qui est maintenue par les forces de tension des ménisques, qui est due à l'énergie d'activation de la surface des particules minérales, et l'eau libre proprement dite, qui est soumise à l'influence des seules forces de gravité et est appelée eau gravitaire.

Lytton (1970, 1971) attire l'attention sur la nécessité de tenir compte du processus d'aspiration de la vapeur d'eau et sur l'existence de relations entre la teneur en eau du sol et l'augmentation de son volume, les variations des caractéristiques de déformabilité du sol et sa capacité d'interaction avec les ouvrages. Cela étant, il faut noter que l'humidification du sol à différents stades peut provoquer soit un renforcement de la résistance structurelle de l'argile, soit sa diminution.

Du point de vue de la théorie capillaire de Terzaghi, la première cause du gonflement du sol est constituée par les forces d'aspiration (suction) de l'eau qui apparaissent lors de la suppression de la pression capillaire due à l'augmentation de la teneur en eau, forces qui sont dirigées vers l'intérieur du sol argileux et sont égales à la pression hydrostatique extérieure.

D'après les travaux de Sorochan (1989), lors du gonflement des sols argileux, il se produit un phénomène d'attraction des molécules d'eau par les surfaces externe et interne des particules, ainsi qu'une décompression des molécules de gaz adsorbées et lors de la formation d'un monocouche adsorbé, apparaissent des pressions écartant les particules et des pressions capillaires.

A mesure de l'humidification du sol et de l'hydratation des particules, la pression capillaire diminue tandis que l'hydratation des cations d'échange développe la pression osmotique, en exerçant le même effet que la pression qui écarte les enveloppes aqueuses.

La valeur de l'amplitude du gonflement du sol dépend du degré de rupture des liaisons structurelles à l'intérieur du sol. Les liaisons structurelles comprennent :

- Les forces d'attraction moléculaire ou « forces de van-derWaals »,
- Les forces capillaires qui permettent de réduire le volume du sol sous l'effet de la pression capillaire qui le comprime. Ceci se produit dans les sols argileux lorsqu'ils ne sont pas complètement saturés et que l'eau interstitielle est en contact avec de l'air dans les pores capillaires;
- Les forces colloïdales, qui se développent par suite de l'interaction des cations et des dipôles des molécules d'eau avec la surface des particules du sol. Les liaisons colloïdales sont par nature plastiques. Lorsque le chargement est appliqué de manière progressive, elles peuvent se déformer sans se rompre. L'application rapide de la charge ou son enlèvement

rompent l'orientation des cations et des dipôles d'eau et conduisent à la rupture des liaisons colloïdales. Lorsque l'on cesse d'appliquer la charge à l'éprouvette et que la vitesse de chargement ou déchargement diminue sensiblement, les forces d'interaction entre la surface des particules, les cations et les dipôles d'eau peuvent commencer à reconstituer l'organisation des particules dans l'espace et à former de nouveau des liaisons colloïdales.

- Les forces de cristallisation, qui se forment par suite de la précipitation dans le spores du sol de sels variés contenus dans l'eau interstitielle (carbonates de calcium, gypse, etc...). Ces liaisons sont des liaisons rigides. Lors de la déformation du sol, ces liaisons sont détruites de façon irréversible.

Lors du gonflement libre du sol, la pression capillaire négative dans les pores empêche le gonflement du sol jusqu'à ce que la pression hydrostatique de la colonne de liquide équilibre la pression capillaire.

Les liaisons de cristallisation, notamment celles qui sont solubles, se rompent sous l'effet de l'eau et de la pression de gonflement et cessent aussi de s'opposer au processus de gonflement. Il reste seulement les liaisons intermoléculaires et colloïdales, qui en cas de pénétration rapide et libre de l'eau, ne sont pas en état d'entretenir le processus de formation des doubles couches diffuses, exercent une action de séparation des particules et provoquent le gonflement du sol.

Ainsi lors du gonflement libre, on observe la valeur maximale du gonflement du sol. Lors du chargement d'une éprouvette de sols saturés sous une charge statique appliquée par paliers avec stabilisation des déformations sous chaque palier, le système « charge-sol » possède sous chaque nouvelle charge un potentiel d'énergie d'interaction des particules du sol excédentaire. L'énergie potentielle, qui se transforme progressivement en énergie cinétique de rapprochement des particules, conduit le système à un nouvel état d'équilibre qui possède des liaisons moléculaires et colloïdales renforcées.

Dans ce cas, une partie de l'eau liée des enveloppes diffuses se transforme en eau libre par suite du rapprochement des particules. Il peut se produire simultanément un processus de division des particules du sol, avec formation de nouveaux éléments structurels ayant une énergie superficielle supplémentaire et de nouvelles liaisons.

En cas de déchargement lent de l'éprouvette de sol, avec stabilisation des déformations à chaque étape du déchargement, les forces intermoléculaires et colloïdales renforcées se combinent avec la charge extérieure pour empêcher le gonflement du sol. Pour cette raison, la restauration de l'épaisseur de la couche diffuse n'est que partielle, ce qui influe sur l'amplitude du gonflement du sol, Ejjaouani et al (2005).

Lorsque l'humidification du sol est modératrice des liaisons structurelles sur le développement du gonflement du sol, on obtient aussi des pressions de gonflement différentes lors du chargement et du déchargement du sol.

Nous avons observé que la réalisation de paliers de déchargement permet de limiter l'amplitude du soulèvement du sol. Cette observation montre que les déformations du sol sont assez lentes dans ce cas pour que les liaisons interparticulaires se rétablissent partiellement ou totalement pendant le processus de déformation.

Lorsque l'humidification du sol est permanente et une couche diffuse se forme autour des particules minérales du sol, le sol devient plus lâche et les liaisons structurelles entre les particules minérales sont rompues, ce qui produit une dégradation des propriétés mécaniques du sol. Ce fait a été noté par de nombreux auteurs, comme Mustafaev (1989) et SoroChan (1989).

Dans le cas général, tous les types de liaisons structurelles empêche le gonflement du sol. Ainsi, la pression de gonflement est la différence entre la pression d'écartement des pellicules d'eau hydratées et la résistance structurelle du sol.

Si les liaisons structurelles entre les particules du sol sont solubles ou sont trop peu résistantes pour s'opposer à l'effet d'écartement des pellicules aqueuses, alors le séjour d'une éprouvette de sol dans l'eau se termine par sa rupture totale, due à son effondrement en agrégats indépendants : le sol désagrège.

## CONCLUSIONS

Les propriétés de gonflement des sols argileux dépendent fortement de leur composition minéralogique, des pourcentages des différents

minéraux ou des types de minéraux dominants, et de leur caractère dispersé. La structure du réseau cristallin des minéraux et leur capacité d'échange ionique joue également un rôle important.

Des minéraux différents possèdent une capacité d'adsorption d'eau différente. Les minéraux primaires, comme le quartz, ont une capacité d'adsorption peu importante. Les minéraux secondaires, comme les argiles, sont capables d'adsorber des quantités très variables d'eau et des substances qui y sont dissoutes.

La plus grande capacité d'adsorption est celle de la montmorillonite, la plus faible celle de la kaolinite. Si la sédimentation des particules assez grosses (> 0.25 m) se produit sans coagulation (c'est-à-dire sans réunion préalable des particules en micro agrégats dans l'effet des forces électromoléculaires), l'argile acquiert une structure en nid d'abeille.

En principe, le phénomène d'aspiration de l'eau par le sol est la combinaison d'effets osmotiques, capillaires et l'hydratation.

Il faut noter que l'humidification du sol à différents stades peut provoquer soit un renforcement de la résistance structurelle de l'argile, soit sa diminution.

Dans le cas général, tous les types de liaisons structurelles empêche le gonflement du sol. Ainsi, la pression de gonflement est la différence entre la pression d'écartement des pellicules d'eau hydratées et la résistance structurelle du sol.

Si les liaisons structurelles entre les particules du sol sont solubles ou sont trop peu résistantes pour s'opposer à l'effet d'écartement des pellicules aqueuses, alors le séjour d'une éprouvette de sol dans l'eau se termine par sa rupture totale, due à son effondrement en agrégats indépendants : le sol désagrège.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Berezantsev. V.G, Kcenofontov, AI., Platonov, EV, Sidorov. N, N, Yaroshenko V.A (1961). Mécanique des sols et fondations (en russe : Mekaninka gruntov, osnovaniya i fundamenty), Moscou, Strojizdat, 340 pages.
- Ejjaouani H. Magnan J.P, Shakhirev V. Evolution des propriétés physiques et mécaniques des argiles gonflantes pendant l'humidification, 16<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Japan, Osaka, 2005.
- Florin, V.A (1959). Bases de la mécanique des sols (en russe : Osnovy mekhaniki gruntov). Strojizdat, Moscou. 380 pages.
- Goldshstein M.N. (1952). Propriétés mécaniques des sols (en russe : Mekanicheskie svoystva gruntov) Strojizdat, Moscou, 320 pages..

- Lytton R.L (1970). Analysis for design of foundation on expansive clay. Geomechanics journal, Institution of Engineers, Australia, 18-27 pages.
- Lytton, R.I. (1971). Risk design of stiffened mats on clay. Proceedings, conference on application of statistics and probability to soil and structural engineering, Hong Kong. 151-171 pages.
- Mustafaev A.A. (1989). Les fondations sur sols affaissables et gonflants. (En russe ; Fundamenty na prosadochnykh i nabukhayuschikh gruntakh). Vyshaya Shkola, Moscou, 578 pages,
- Sorochan E.A. (1989). Construction d'ouvrages sur les sols gonflants (en Russe : Stroitelstvo sooruzhenij na nabukhayushchikh gruntakh), Moscou, Strojizdat, 310 pages.
- Terzaghi K. (1943). Teoretical soil mechanics. John Wiley and Sons. New York. 510 pages