

Geotechnical problems due to the collapse of unsaturated soils: the case of loess from northern France

Problèmes géotechniques liés à l'effondrement des sols non saturés : le cas des loëss du Nord de la France

Pierre Delage

Ecole des Ponts ParisTech, Navier-CERMES, France

The present paper was presented at the 'Workshop CMG14, Caractérisation et Modélisation des Géomatériaux' Biskra, 25-26 February 2014
Published online: 27 June 2014

Keywords

Unsaturated soils
Loess
Collapse
Laboratory
Oedometer

Abstract: Some periglacial loess deposits from Northern France are partially saturated thanks to the protection provided by an upper surface layer with higher clay content. When excavated and exposed to climatic changes, the loess deposit may exhibit collapse if their clay fraction is small enough and carbonate content high enough. These conditions allow for the stability of a loose porous microstructure with bonding links that are destroyed by water infiltration. In the paper, the origin and the properties of loess deposits from Northern France are described, together with the laboratory method of characterising collapse. Some practical conclusions are afterwards drawn.

© 2014 The author. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Résumé : Certains dépôts de loëss éoliens périglaciaires du Nord de la France se trouvent dans un état de saturation partielle car ils sont protégés des précipitations par une couche de surface contenant une plus grande proportion d'argile. Quand ils sont mis à nu et exposés aux variations climatiques, ils peuvent, si leur proportion d'argile est suffisamment faible et leur teneur en carbone suffisamment élevée, présenter le phénomène d'effondrement. Ces conditions permettent la stabilité d'une structure poreuse lâche dont les liens de cimentation sont détruits par infiltration d'eau. On décrit l'origine et les caractéristiques de ces loëss et la méthode d'identification de l'effondrement en laboratoire pour en tirer ensuite quelques conclusions pratiques.

Mots clés : Sols non saturés, Loess, effondrement, Laboratoire, oedomètre.

1. Introduction

L'effondrement est un phénomène typique des sols non saturés qui intervient par infiltration d'eau dans un massif de sol sous contrainte, il engendre une augmentation de la densité du sol par effondrement de sa structure du fait de l'affaiblissement des liens existant à l'état non saturé. L'effondrement caractérise les sols naturels non saturés que sont les loëss, il concerne aussi les ouvrages en terre constitués de sol compacté dans des conditions non optimale soit en termes de densité, soit en termes de teneur en eau.

Après une présentation des aspects microstructuraux et théoriques caractérisant ce phénomène, on présente quelques exemples d'effondrement observé soit sur des sols naturels, soit sur des ouvrages en sol compacté.

2. le phénomène d'effondrement des sols non saturés

2.1. Constitution des sols non saturés

La Figure 1 présente une schématisation de la structure d'un sol non saturé dans le cas d'un sol granulaire (Figure 1a) et d'un sol fin (Figure 1b). Ces sols sont le siège d'un phénomène de succion lié, dans le cas des sols granulaires, à l'action des ménisques capillaires situés aux contacts inter-granulaires, dans la porosité fine de l'assemblage. Les actions capillaires sont telles que la pression du côté convexe du ménisque (dans l'eau, fluide mouillant, pression u_w) est inférieure à celle du côté concave (dans l'air, fluide non mouillant, u_a). Cette différence de pression définit la succion s selon l'expression suivante :

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

Comme la pression de l'air est supérieure à celle de l'eau, la succion a une valeur positive. On voit que si l'on prend pour nulle la pression atmosphérique, on a $u_a = 0$ et u_w se retrouve donc avoir une valeur négative, on parle donc aussi de pression d'eau négative dans les sols non saturés. La succion est liée aux rayons caractéristiques de l'interface selon la loi de Laplace que l'on exprime ci-dessous dans le cas plus simple de pores cylindriques :

Corresponding author. Tel.: +33164153542; fax: +33164153562

E-mail address: delage@cermes.enpc.fr

URL: <http://www.enpc.fr>

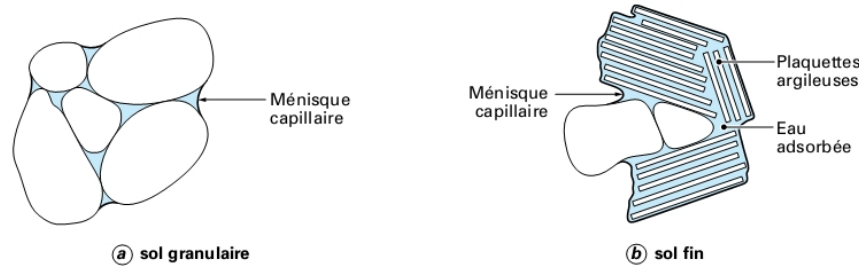


Fig. 1. Représentation schématique des sols non saturés (Delage et Cui 2000).

$$s = u_a - u_w = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

où γ est la tension de surface eau-air et θ l'angle de raccordement entre le ménisque et la phase solide. On a pour l'interface eau-air $\gamma = 72,75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ et $\cos \theta = 1$ (raccordement tangentiel de l'eau sur le grain comme indiqué sur la Figure 1).

Ces ménisques accolent les grains les uns contre les autres et peuvent conférer une certaine stabilité à un assemblage assez lâche de grains. Une infiltration d'eau, en annulant ce lien capillaire par inondation de la structure, provoque une annulation de ce lien capillaire et un effondrement de la structure initiale avec finalement un assemblage plus dense.

La Figure 1.b présente une schématisation de la situation de l'eau dans un sol fin, où les molécules d'eau sont également attirées sur la surface des minéraux argileux par des actions physico-chimiques liées au déficit de charge typique des minéraux argileux (voir Delage et Cui 2000) pour plus de détails. Cette attraction de l'eau sur les plaquettes argileuses peut être très forte et correspondre à des valeurs de succion très élevées, plus fortes que celle de nature capillaire.

3. Les loëss du nord de la France

3.1. Caractéristiques du dépôt de loëss

La Figure 2 (Antoine 2002) montre les dépôts de loëss du nord de la France, qui s'étendent depuis la Normandie jusqu'aux confins de la Belgique. Elle représente également le tracé de la ligne à grande vitesse (LGV) nord, qui relie Paris à Londres et à Bruxelles. La direction des vents dominants à l'origine de ces dépôts éoliens lors de la dernière glaciation (il y a 20 000 ans) est également représentée.

La Figure 3 montre des dégâts typiques observés sur une excavation qui a mis à nu et exposé à la pluie une couche de limon effondrable. Cette couche est normalement protégée de la pluie par une couche de surface plus argileuse qui permet à la couche de limon sensible de rester à l'état non saturé même lors des saisons humides.

Les caractéristiques d'un niveau effondrable sont présentées au Tableau 1. On y observe, pour une teneur en argile de 16%, un indice de plasticité assez faible (6) et une teneur en carbonate significative (12%). En plus de la non-saturation naturelle significative du sol ($S_r = 53\%$ avec une succion de 34 kPa), c'est cette teneur en carbonate qui est typique des niveaux effondrables, elle permet, en permettant une cimentation des grains de limon, l'obtention d'une masse volumique sèche assez faible ($1,39 \text{ Mg/m}^3$) et d'une structure métastable. Cette cimentation résulte du phénomène de loëssification, c'est-à-dire de la reprécipitation, à partir des particules de calcite primaire transportées par le vent, de carbonate intervenant comme agent de cimentation aux contacts des grains.

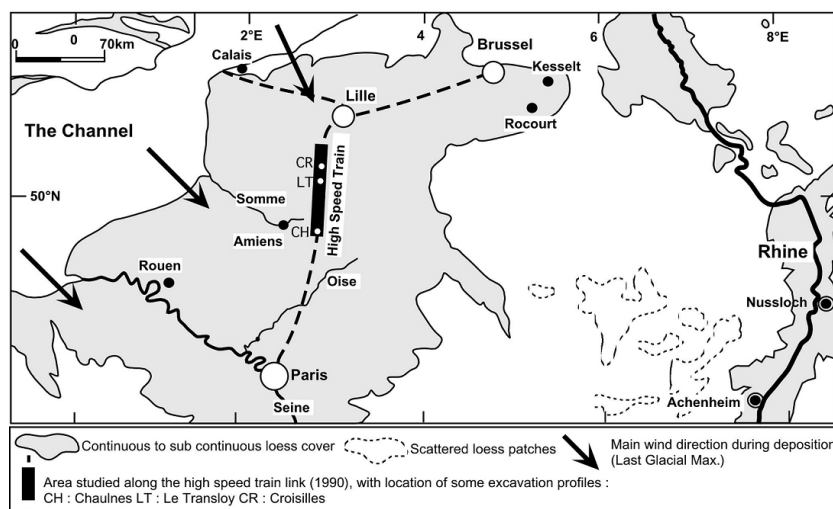


Fig. 2. Dépôts de loëss du nord de la France (Antoine 2002).



Fig. 3. Troubles rencontrés lors d'excavation soumises aux précipitations.

Tableau 1. Caractéristiques d'un niveau effondrable.

Profondeur	2.2 m
Teneur en eau naturelle w (%)	18.1
Masse volumique sèche ρ_d (Mg/m^3)	1.39
Degré de saturation naturel S_r	53%
Succion à l'état naturel (kPa)	34
Fraction argileuse ($\% < 2 \mu m$)	16
Limite de plasticité w_p	22
Limite de liquidité w_l	28
Indice de plasticité I_p	6
Teneur en carbonate (%)	12

La Figure 4 montre une photo du loëss en microscopie électronique à balayage. On y observe les particules granulaires de taille caractéristique de plusieurs dizaines de microns, ainsi que des agrégations de grains par des plaquettes argileuses. On observe également des pores inter-agrégats de grande dimension, qui seront ceux s'effondrant préférentiellement lors d'un remouillage.

Les courbes granulométriques d'échantillons de loëss de diverses profondeurs de la Figure 5 montrent que la plupart des grains sont compris entre 10 et 40 μm .

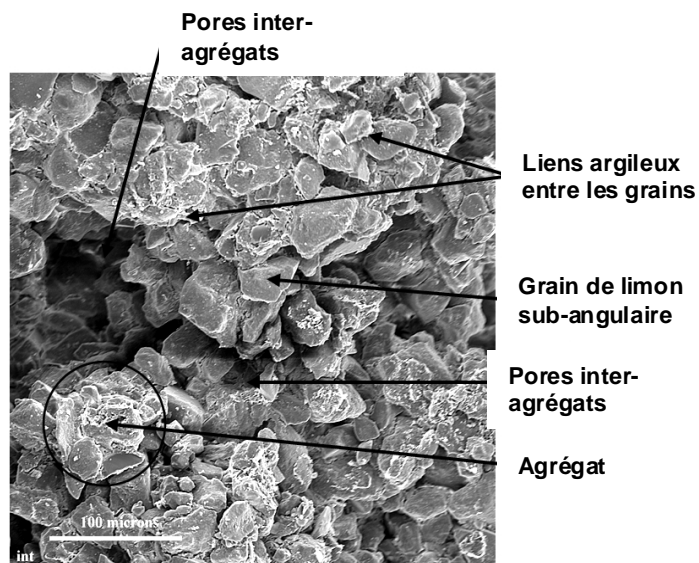


Fig. 4. Microstructure du loëss.

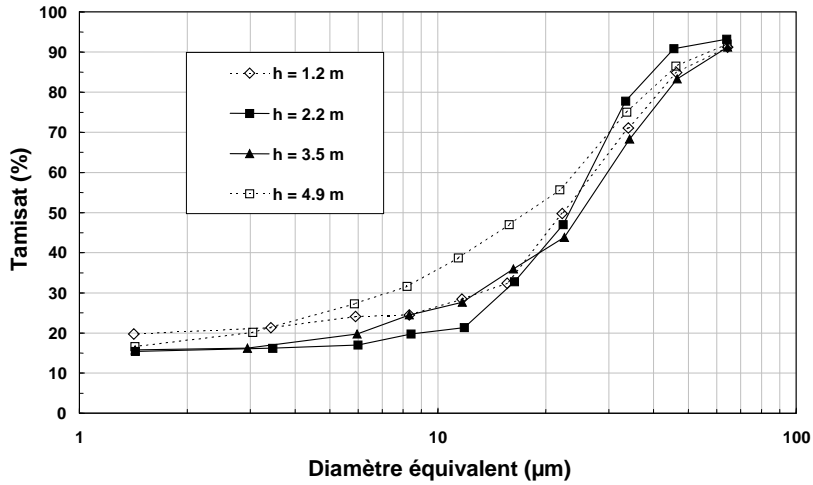
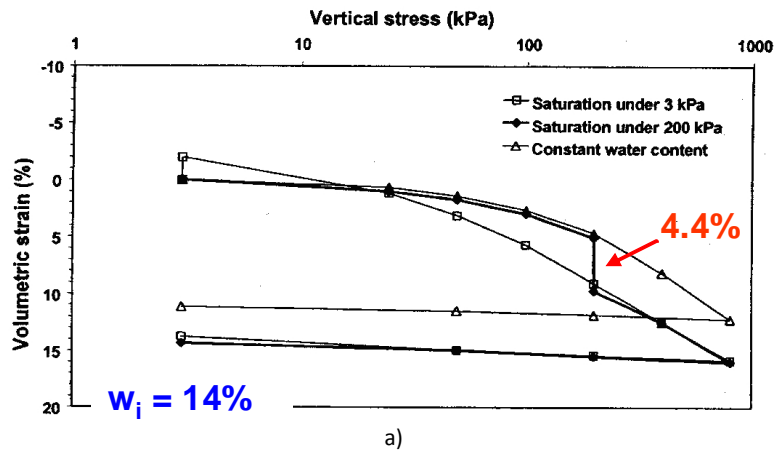


Fig. 5. Courbes granulométriques.

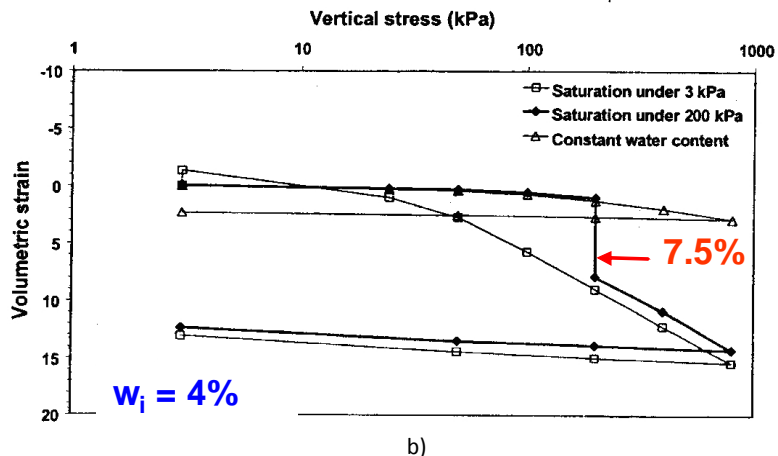
3.2. Identification de l'effondrement en laboratoire

Il est assez simple d'identifier l'effondrement d'un sol non saturé au laboratoire en soumettant une éprouvette de sol dans un œdomètre (avec des pierres poreuses sèches) à une contrainte donnée et à le soumettre à une infiltration. On observe alors une diminution de hauteur de l'échantillon jusqu'à une valeur stable.

La Figure 6 présente deux séries d'essais d'effondrement réalisés sur un limon non saturé naturel du nord de la France dont la teneur en eau naturelle est égale à 14%. L'essai d'effondrement consiste à comprimer l'échantillon à teneur en eau constante jusqu'à une contrainte de 200 kPa sous laquelle est ensuite réalisée l'infiltration d'eau qui se traduit, dans le cas de la teneur en eau naturelle (Fig. 6.a) par un tassement de 4.4%. La Figure comprend trois essais :



a)



b)

Fig. 6. Essais d'effondrement sur un limon du nord de la France.

Tableau 2. Critère de Knight (1963).

Effondrement sous 200 kPa (%)	Susceptibilité
0-1	non effondrable
1-5	légèrement effondrable
5-10	Effondrable
10-20	très effondrable

- *L'essai d'effondrement décrit ci-dessus ;*
- *Un essai à teneur en eau constante jusqu'à 800 kPa ;*
- *Un essai initialement saturé sous 3 kPa (ce qui crée un léger gonflement) qui caractérise la réponse en compression de l'éprouvette à l'état saturé.*

On retrouve sur le diagramme une caractéristique des sols non saturés, à savoir que le sol non saturé est moins compressible que celui à l'état saturé, qui est l'état qui présente la plus grande compressibilité. On observe également que l'effondrement de 4,4% fait passer le point caractéristique de la courbe de compression à teneur en eau constante ($w = 14\%$) à la courbe de compression saturée. Cette propriété caractéristique est à la base de l'essai du double œdomètre (Jennings and Knight 1957) et qui consiste à n'effectuer que les compressions à l'état saturé et à l'état non saturé à teneur en eau constante. L'effondrement est obtenu à partir de la différence observée à une contrainte donnée entre les deux courbes.

La Figure 6.b présente les résultats d'effondrement sur un échantillon du même loess dont la teneur en eau a été réduite par séchage de 14 à 4%. On observe que l'effondrement atteint une valeur supérieure de 7,5%. Cette plus forte valeur est due au fait que la compression du même sol dans un état plus sec est plus faible, une autre caractéristique des sols non saturés qui sont d'autant plus raides qu'ils sont plus secs. Un effondrement plus fort est donc obtenu avec un sol plus sec. Ceci peut expliquer la nature des désordres observés en Figure 3, du fait que ces niveaux effondrables une fois excavés ont été soumis à l'évaporation puis à un effondrement plus fort suite à des précipitations.

La susceptibilité des sols non saturés à l'effondrement a fait l'objet de plusieurs critères dont celui très utilisé de Knight (1963) qui quantifie cette susceptibilité en fonction de l'effondrement observé sous inondation sous 200 kPa, représenté au Tableau 2. On y observe que le loess étudié en Figure 6 passe d'un état légèrement effondrable à l'état naturel ($w_i = 14\%$) à un état effondrable une fois séché à $w_i = 4\%$.

3.3. Mesures de prévention et de correction

La pratique de la reconnaissance des dépôts effondrables est plus développée dans les régions du monde où ces dépôts sont répandus et bien connus, comme la Chine, la vallée du Danube en Europe de l'est ou le nord de l'Argentine. Elle n'est pas toujours évidente en pratique usuelle car ces sols peuvent présenter des caractéristiques de résistance correctes aux essais courants de reconnaissance de sols (pénétrömètre, pressiomètre) du fait de la cohésion conférée par leur nature non saturée (effet de la succion) et la cimentation de loessification. Ils sont, dans le Nord de la France, recouverts d'une couche illuviée plus argileuse qui les protège de l'infiltration et maintient leur état de non-saturation. Le décapage de la couche de protection et l'exposition aux intempéries des niveaux effondrables peut donc entraîner les problèmes illustrés en Figure 3.

La principale mesure de protection une fois les couches identifiées est donc la protection vis-à-vis des infiltrations, en phase de chantier comme en phase définitive. Cette protection par des couches compactées suffisamment imperméables doit aussi les protéger de fuites accidentelles comme celle pouvant émaner des systèmes d'évacuation des eaux pluviales mis en œuvre le long des tracés linéaires. Il est en revanche difficile de corriger les instabilités une fois qu'elles sont déclenchées, car la porosité des ces sols (voir Figure 4) est trop fine pour que les méthodes classiques d'injection soient efficaces. On cite en Roumanie le cas spectaculaire d'un immeuble fondé superficiellement sur les loess de la vallée du Danube effondré d'une côté par infiltration accidentelle du réseau d'eau potable. L'immeuble a pu être redressé par infiltration contrôlée réalisée de l'autre côté, sa structure longitudinale a résisté et son horizontalité a pu être recouvrée. Il est clair que de tels problèmes auraient été évités par la réalisation de fondations profondes adéquates.

4. Conclusions

Les loess effondrables posent des problèmes de stabilité et de sensibilité aux infiltrations d'eau qui se traduisent par des tassements assez subits du fait de la déstructuration d'une structure métastable, par la destruction des liens dus à la succion et des liens calcaires résultant du processus de loessification. Leur reconnaissance in-situ nécessite une bonne connaissance de la géologie locale, sachant qu'ils sont souvent, dans les pays tempérés, d'origine périglaciaire, issus du transport par les vents constants créés par la différence de température entre les zones plus froides situées au-dessus de la calotte glaciaire et celles plus chaudes en aval.

Alors que leur identification in-situ n'est pas toujours évidente car ils peuvent présenter, du fait de leurs liens structuraux naturels, des caractéristiques a-priori acceptables, l'identification de l'effondrement en laboratoire est assez simple et permet d'identifier leur susceptibilité à l'effondrement selon un certain nombre de critères dont celui de Knight (1963).

Une fois ces dépôts sensibles identifiés, il est indispensable de les protéger des infiltrations susceptibles de les affecter, qu'elles soient naturelles (pluies) ou artificielles (rupture de canalisations), en particulier dans le cas des ouvrages linéaires d'infrastructures de transport particulièrement sensibles aux tassements comme les lignes ferroviaires.

Le phénomène d'effondrement peut aussi se produire dans les ouvrages en remblai mal compactés, comme dans le cas de remblais compactés trop secs où la densité obtenue est trop faible, ce qui peut entraîner des désordres dus à l'infiltration d'eau.

Références

Antoine, P. (2002) Les loëss en France et dans le Nord-Ouest européen. *Revue Française de Géotechnique* 99: 3-21.

Delage, P., Y. J. Cui (2000) L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'Ingénieur*, art. C 301.

Jennings, J.E., K. Knight (1957) The additional settlement of foundation due to collapse of sandy soils on wetting. *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 1, pp. 316-319.

Knight, K. (1963) The origin and occurrence of collapsing soils. *Proc. 3rd Regional African Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 1, pp. 127-130.