Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
© 2005–2006 Millpress Science Publishers/IOS Press.
Published with Open Access under the Creative Commons BY-NC Licence by IOS Press.
doi:10.3233/978-1-61499-656-9-495

Sur la susceptibilité à l'effondrement des loess du Nord de la France

On the collapse susceptibility of the loess of Northern France

Y.J. Cui & P. Delage
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Institut Navier, Paris, France
D. Marcial
Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela
J-M. Terpereau & G. Marchadier
Société Nationale des Chemins de Fer Français, Paris, France

RÉSUMÉ

Afin de mieux comprendre les problèmes de stabilité observés le long de la Ligne à Grande Vitesse entre Paris et Lille (LGV Nord), une caractérisation géotechnique d'un profil de loess a été effectuée. La caractérisation, qui inclut aussi les investigations de la microstructure, a été réalisée sur quatre échantillons de bonne qualité prélevés à différentes profondeurs, à 140 km de Paris le long de la ligne de TGV. Une attention particulière a été portée sur la susceptibilité qui a été étudiée en utilisant les méthodes du simple et double oedomètre. Les effets de la teneur en eau sur l'effondrement ont été aussi examinés, et la pertinence de différents critères d'effondrement est discutée. Il est confirmé que la susceptibilité à l'effondrement est liée à la densité, la teneur en eau initiale et la teneur en carbonate des loess.

ABSTRACT

In order to better understand some stability problems observed along the TGV (high speed train) line between Paris and Lille, a geotechnical characterisation of a loess profile was carried out. The characterisation, that also included microstructure investigations, was performed on four good quality block samples carefully extracted at various depths, at 140 km from Paris along the TGV line. Special attention has been paid to collapse susceptibility which was investigated using the simple and the double oedometer methods. The effects of water content on the magnitude of collapse were also examined and the relevance of various collapse criteria is discussed. It is confirmed that the collapsibility is related to the density, the initial water content and the carbonate content of the loess.

1 INTRODUCTION

Durant la période pluvieuse entre l'hiver 2001 et le printemps 2002, on a détecté la présence de nombreuses cavités d'effondrement dans les régions le long de la ligne de TGV nord. En parallèle à l'implémentation des mesures de stabilisation in situ, et afin de bien appréhender l'origine de ces effondrement, différentes investigations ont été réalisées, incluant la sensibilité du sol de fondation aux vibrations ferroviaires. Cette étude a été menée conjointement par la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) et l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) pour le compte de RFF (Réseau Ferré de France).

On présente ici une étude de caractérisation de susceptibilité à l'effondrement des loess intacts prélevés le long de la Ligne à Grande Vitesse Nord (LGV Nord), à 140 km de Paris. Afin de prévoir les effets de la variation de la teneur en eau due aux changements climatiques saisonniers, les effets de la teneur en eau initiale ont été étudiés. La pertinence de différents critères d'effondrement a été aussi examinée.

2 IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE

Les blocs de loess ont été prélevés en septembre 2002 à quatre différentes profondeurs (1,2 ; 2,2 ; 3,5 et 4,9 m) sur un site situé à 140 km de Paris, et à une distance de 25 m de la ligne de TGV. Le prélèvement a été fait selon la norme NF XP 94-202 dans une tranchée d'une largeur de 1,5 m et d'une longueur de 9 m. L'observation visuelle a montré que les sols sont marrons (1,2 et 4,9 m), ou marrons clairs (2,2 et 3,5 m). La diffraction aux rayons X a montré que les sols sont principalement constitués de quartz, feldspath, et d'une faible quantité d'argiles. L'analyse réalisée sur la fraction argileuse (< 2 µm) a identifié la présence de kaolinite, d'illite, et d'interstratifiés illite-smectite. La Figure 1 présente les courbes granulométriques des quatre sols. On observe que les fractions argileuses des sols à 1,2 et 4,9 m sont légèrement supérieures (20 et 18%) à celle des deux autres sols (16%).

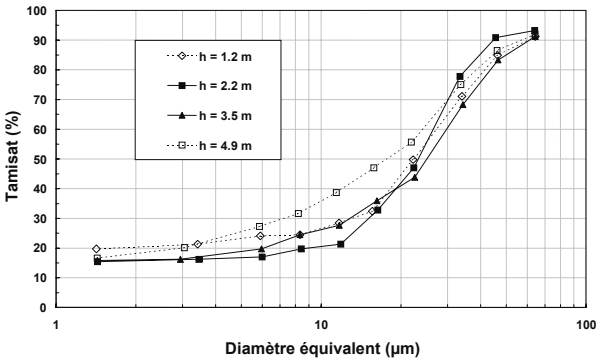

Figure 1. Courbes granulométriques des quatre sols

Tableau 1: Propriétés géotechniques des quatre sols

z (m)	%< 2µm	w_L (%)	I_p	ρ_d (Mg/m^3)	w_{nat} (%)	S_{rnat} (%)	%Ca	succion (kPa)
1,2	20	30	9	1,52	18,9	66	10	20
2,2	16	28	9	1,39	18,1	53	12	34
3,5	16	26	6	1,54	16,6	55	11	27
4,9	18	18	9	1,55	23,7	82	16	14

Les caractéristiques géotechniques des quatre sols sont données dans le tableau 1, incluant le degré de saturation naturel S_{rnat} et la succion naturelle déterminée avec la méthode du papier filtre (Fawcett et Collis-George, 1967). Il est observé que l'indice de plasticité I_p est petit, compris entre 6 et 9, que la masse volumique sèche est également faible variant de 1,39 à 1,55 Mg/m^3, que le degré de saturation est faible (inférieur à 66%) pour les sols à 1,2 ; 2,2 et 3,5 m, et que la succion est

faible comprise entre 14 et 34 kPa. Le sol à 2,2 m a la plus faible fraction argileuse, le plus petit indice de plasticité, la plus faible densité et degré de saturation et la plus forte succion. Ce sol est probablement le plus effondrable.

L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) a été réalisée sur des échantillons lyophilisés. La Figure 2 montre une photo prise sur le sol à 2,2 m. Un grand agrégat d'un diamètre de 200 µm environ est observé, avec de grands pores inter-agrégats de plus de 30 µm de diamètre. Les agrégats sont composés de grains de silt de diamètre compris entre 15 et 30 µm, ce qui est concordant avec la courbe granulométrique. La forme sub-angulaire des grains est typique des loess (Barden et al., 1973 ; Grabowska-Olszewska, 1975 ; Osipov et Sokolov, 1995). Les argiles sont observées sur et entre les grains de silt, contribuant probablement aux liaisons entre grains ou entre agrégats.

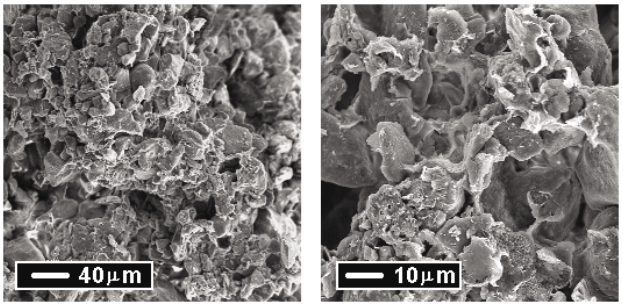

Figure 2. Observation au MEB du sol à 2,2 m

3 EFFONDREMENT À LA TENEUR EN EAU NATURELLE

La susceptibilité à l'effondrement des sols a été d'abord identifiée à la teneur en eau naturelle en utilisant la méthode du simple oedomètre de Knight (1963). La méthode consiste à charger l'échantillon à teneur en eau naturelle jusqu'à 200 kPa de contrainte verticale, et inonder l'échantillon sous contrainte constante. Pour chaque profondeur, un échantillon de 20 mm de haut et de 70 mm de diamètre a été préparé en utilisant un carottier annulaire. Les résultats présentés sur la Figure 3 montrent clairement que l'échantillon à 2,2 m a un effondrement assez important (2,41%), alors que les autres échantillons ont un effondrement négligeable (0,23% pour 1,2 m ; 0,72% pour 3,5 m et 0,28% pour 4,9 m). Dans la classification de Knight (voir Tableau 2), 2,41% correspond à un sol légèrement effondrable.

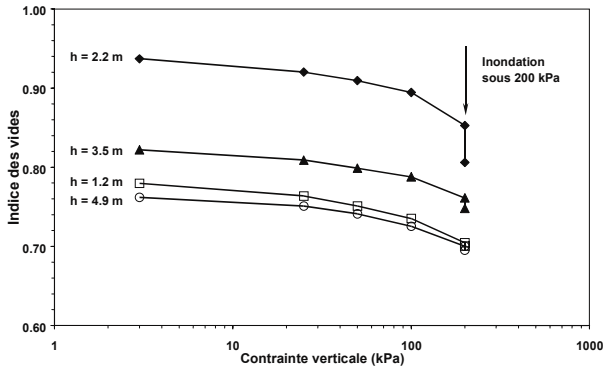

Figure 3. Effondrement à teneur en eau naturelle, identifié par la méthode du simple oedomètre (Knight, 1963)

La modification de la microstructure due à l'inondation a été étudiée en utilisant la technique de porosimétrie par intrusion de mercure. Sur la Figure 4 sont présentées les courbes porosimétriques du sol à 2,2 m avant et après l'effondrement à l'oedomètre sous 200 kPa de contrainte verticale. On observe une modification significative de la courbe due à l'effondrement, ce qui confirme le résultat d'effondrement obtenu à l'oedomètre. Sur cette figure, l'axe des coordonnées représente le volume de pore exprimé en terme d'indice des vides occupés par du mercure, alors que l'axe des abscisses représente le rayon d'accès des pores, déduit de la pression appliquée (Diamond, 1970).

On observe sur la Figure 4 que l'effondrement dû au remouillage correspond à la diminution des pores de rayon supérieur à 7,5 µm, et la diminution des pores entre 0,7 et 7,5 µm. Les pores inférieurs à 0,7 µm n'ont pas été affectés. Si l'on se réfère à la Figure 2, on voit que l'effondrement a apparemment affecté les pores inter-agrégats, en engendrant la déformation des grands agrégats.

Les observations réalisées sur les échantillons inondés n'ont pas montré un changement significatif de la microstructure, même pour le sol à 2,2 m. Ceci n'est pas étonnant car un effondrement de 2,41% ne représente qu'une petite variation de volume de pores. Une petite différence a tout de même été aperçue sur l'apparence de la fraction argileuse, avec une forme plus lisse des feuillets d'argile hydratés par rapport aux feuillets plus secs avant hydratation. Cette observation est en bon accord avec celle réalisée par Delage et al. (1996) sur le limon de Jossigny.

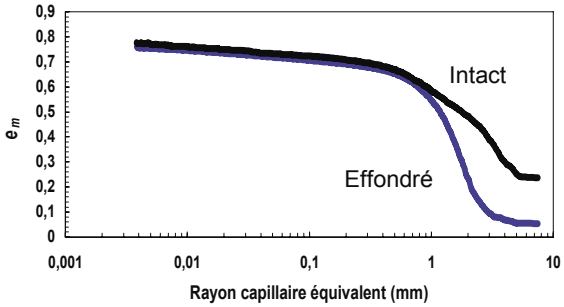

Figure 4. Courbes porosimétriques du sol à 2,2 m, avant et après l'effondrement sous 200 kPa de contrainte

4 EFFETS DE LA TENEUR EN EAU SUR L'EFFONDREMENT

Etant donné que la teneur en eau dans le profil de loess peut varier avec les effets saisonniers, il est apparu important d'étudier l'effet de la teneur en eau initiale sur la susceptibilité à l'effondrement. Ceci a été mené sur le sol à 2,2 m à 6 différentes teneurs en eau : 0, 4, 14, 18 (teneur en eau naturelle) et 23%. Les états hydriques initiaux ont été obtenus soit en séchant le sol dans l'atmosphère pendant un certain temps ($w < 18\%$), soit en humidifiant le sol avec du papier filtre humide ($w > 18\%$).

La méthode du simple oedomètre et la méthode du double oedomètre (Jennings et Knight, 1957) ont été utilisées. Dans la méthode du double oedomètre, deux essais oedométriques ont été réalisés en parallèle : un essai de compression à teneur en eau constante jusqu'à une contrainte verticale de 800 kPa et un autre essai de compression jusqu'à 800 kPa de contrainte sur un échantillon saturé au préalable sous une faible contrainte de 3 kPa. Selon Jennings et Knight, l'effondrement sous une contrainte donnée est défini par la différence entre les deux courbes de compression. La Figure 5 présente les résultats obtenus avec w = 4, 14 et 23%. Pour tous les essais, une bonne correspondance a été observée entre les deux méthodes, confirmant la validité de la méthode du double oedomètre. Il est apparu clairement que la susceptibilité à l'effondrement augmente avec la diminution de la teneur en eau initiale, comme le montre la Figure 6 où sont reportés aussi les résultats des essais à des teneurs en eau de 0, 10 et 18%. La bonne correspondance entre les deux méthodes a été obtenue pour toutes les teneurs en eau, et la diminution de l'effondrement avec l'augmentation de la te-

neur en eau apparaît importante et pratiquement linéaire. La sensibilité de l'effondrement à la variation de la teneur en eau montre bien qu'en pratique, il est important de suivre la variation de cette dernière afin de prévoir des problèmes d'instabilité.

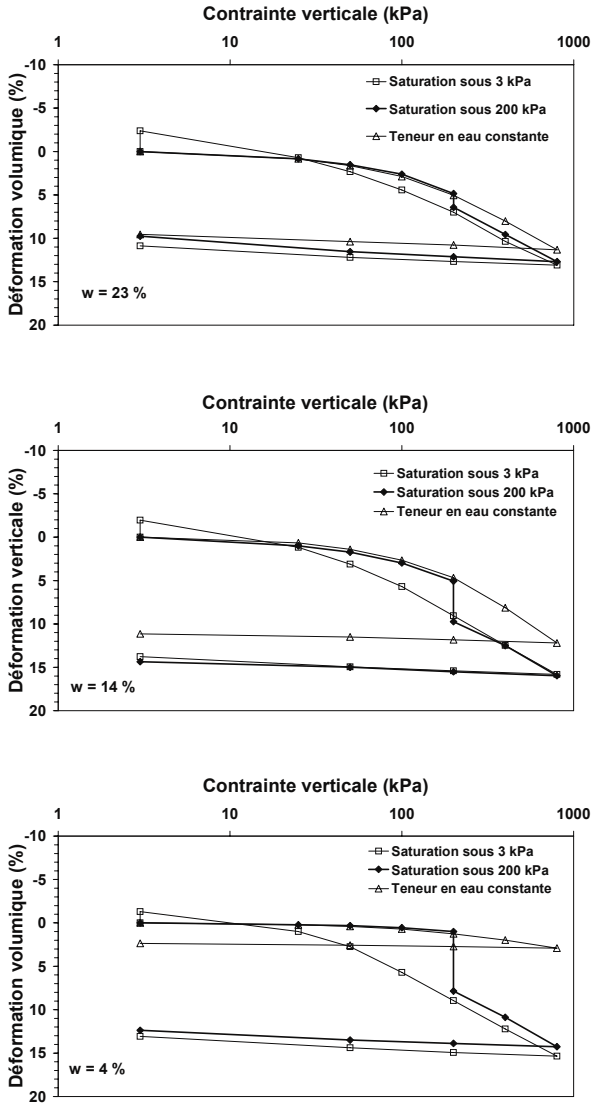

Figure 5. Détermination de l'effondrement du sol à 2,2 m avec les méthodes du simple et double oedomètre, w = 23, 14 et 4%

5 ÉVALUATION DE DIFFÉRENTS CRITÈRES D'EFFONDREMENT

On a vu précédemment qu'on peut déterminer aisément la susceptibilité à l'effondrement d'un sol en utilisant les méthodes du simple et double oedomètre. Néanmoins, une détermination simple basée sur les caractéristiques géotechniques de base semble être plus prometteuse, surtout pour des infrastructures linéaires longues. Un certain nombre de critères ont été proposés à cette fin, et on les a examiné en utilisant les données obtenues à la teneur en eau naturelle.

Le Tableau 2 présente le résultat obtenu avec le critère de Knight (1963) qui est basé sur l'effondrement identifié à l'oedomètre sous 200 kPa de contrainte. D'après ce critère, seul le sol à 2,2 m est considéré comme légèrement effondrable.

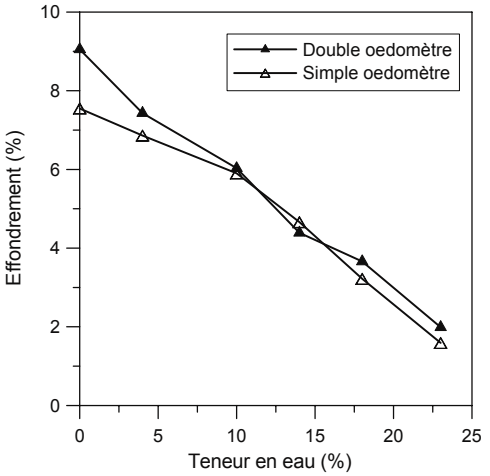

Figure 6. Effondrement du sol à 2,2 m à différentes teneurs en eau initiales, identifié par les méthodes du simple et double oedomètre

Tableau 2 : Critère de Knight (1963)

Effondrement (%)	Susceptibilité	Evaluation
0-1	non effondrable	sols à 1,2 ; 3,5 et 4,9 m
1-5	légèrement effondrable	sol à 2,2 m
5-10	effondrable	
10-20	très effondrable	

Gibbs et Bara (1962) ont proposé un critère basé sur les valeurs de la masse volumique sèche et de la limite de liquidité du sol. La Figure 7 présente l'évaluation de la susceptibilité des sols à l'aide de ce critère. On observe que les sols à 2,2 et 3,5 m sont considérés comme effondrables alors que les deux autres sont non effondrables.

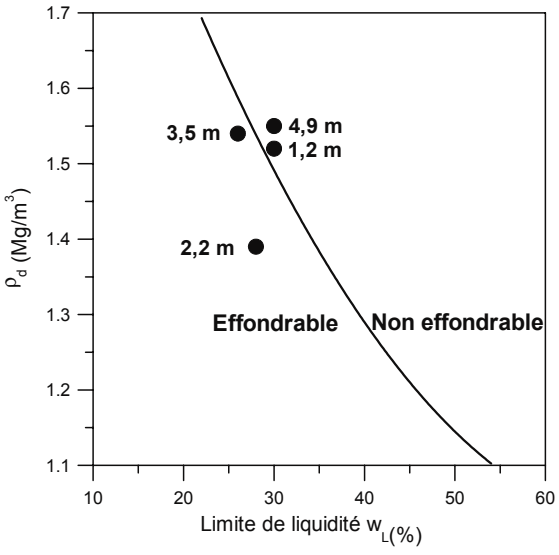

Figure 7. Evaluation avec le critère de Gibbs et Bara (1962)

La pertinence d'autres critères moins connus a été également examinée. Les paramètres utilisés dans ces critères sont présentés dans les Tableaux 3 et 4. Le critère de Denisov (1951) est basé sur un paramètre K_e obtenu en comparant l'indice des vides correspondant à la limite de liquidité et celui à l'état naturel : $K_e = e(w_L)/e_{nat}$. Un sol est considéré comme effondrable si $K_e < 0,75$. L'observation du Tableau 3 montre qu'aucun sol n'est effondrable selon ce critère. Selon Priklonskij (1952, d'après Huergo et al., 1989), un sol est effondrable si sa teneur en eau naturelle est supérieure à sa limite de plasticité, c'est-à-dire $w_p - w_{nat} < 0$. Les données dans le Tableau 3 montrent que

c'est seulement le cas pour le sol à 4,9 m. Feda (1966) a proposé un critère basé sur un paramètre qui est fonction de la teneur en eau naturelle, du degré de saturation, de la limite de plasticité et de l'indice de plasticité : $K_L = \left[\left(w_{nat} / S_{rnat}\right) - w_p\right] / I_p$. Selon Feda, un sol est effondrable si $K_L > 0{,}85$ et $S_{rnat} > 60\%$. Le Tableau 3 montre que tous les quatre sols (voir Tableau 1) sont effondrables selon ce critère. L'approche de Stephanoff et Kremakov (1960) est plus ambitieuse puisqu'elle permet une estimation quantitative de l'effondrement. Le critère est basé sur la porosité naturelle n et la teneur en eau naturelle w_{nat}, avec un coefficient K qui tient compte du type de sol (K = 0,08 pour un loess argileux et 0,05 pour un loess). L'effondrement est estimé avec la relation suivante : $\delta = K(n-40)(30-w_{nat})$. Les valeurs de δ montrées dans le Tableau 4 ont été obtenues avec K = 0,08 pour les sols à 1,2 et 4,9 m et K = 0,05 pour les sols à 2,2 et 3,5 m. La comparaison entre le calcul et les mesures montre que ce critère surestime de façon importante l'effondrement des sols.

Les résultats de l'évaluation de différents critères montre que seul le critère de Gibbs et Bara donne une estimation raisonnable de la susceptibilité des loess étudiés. De plus, il ne semble pas possible d'obtenir une estimation quantitative de l'effondrement en se basant sur des paramètres géotechniques classiques.

Tableau 3 : Résultats avec différents critères d'effondrement

z (m)	e_0	$e(w_L)$	K_e Denisov	w_p-w_{nat} Priklonskij	K_L Feda
1,2	0,78	0,815	1,04	2,1	0,85
2,2	0,937	0,76	0,81	3,9	2,03
3,5	0,822	0,705	0,86	3,4	1,7
4,9	0,762	0,814	1,07	-2,7	0,88

Tableau 4 : Résultats avec le critère de Stephanoff et Kremakov (1960)

z (m)	δ (%) estimé	δ (%) mesuré
1,2	3,37	0,23
2,2	5	2,41
3,5	3,48	0,72
4,9	1,66	0,28

6 CONCLUSION

La susceptibilité à l'effondrement d'un profil de loess situé à 140 km de Paris le long de la ligne LGV Nord a été étudiée. L'observation au MEB a montré la présence de gros agrégats dans ces sols. La plupart des grains de silt ont un diamètre de 15 à 30 µm, et la microstructure a un aspect typique des loess. Les argiles entre grains de silt ont été également observées. L'observation au MEB est en bonne correspondance avec l'analyse granulométrique.

Les résultats d'une identification géotechnique extensive ont confirmé les observations de Cui et al. (1995, 1999) : un loess est un sol limoneux avec une faible fraction argileuse (< 20%), un petit indice de plasticité (< 10), une faible densité, un faible degré de saturation, une forte teneur en carbonate (> 10%) et une faible succion. C'est probablement la forte teneur en carbonate qui a contribué à la stabilité de la microstructure très lâche du loess étudié.

La susceptibilité à l'effondrement déterminée avec les méthodes du simple et double oedomètre a montré que le sol à 2,2 m, qui a le plus petit indice de plasticité, la plus faible densité et le plus petit degré de saturation, est le plus effondrable. La porosimétrie au mercure a permis la mise en évidence du changement de la microstructure dû à l'effondrement ; l'effondrement macroscopique observé correspond à l'effondrement microscopique des gros pores de diamètre supérieur à 0,7 µm.

Les effets de la variation de teneur en eau sur l'effondrement sont importants ; l'effondrement est d'autant plus grand que la teneur en eau initiale est faible.

Les résultats d'évaluation de différents critères d'effondrement ont montré que seul le critère de Gibbs et Bara (1962) donne des estimations raisonnables, en bon accord avec les résultats obtenus à l'oedomètre.

L'effondrement maximal du sol à 2,20 m identifié à partir d'un état sec est de 9% ; cette amplitude est insuffisante pour expliquer les fontis observés en place qui peuvent atteindre plusieurs mètres de profondeur. Autrement dit, le mécanisme d'effondrement ne peut expliquer l'apparition des fontis observés le long de la LGV Nord. Des recherches complémentaires sont menées parallèlement pour étudier les autres mécanismes d'instabilité pouvant être à l'origine de ces phénomènes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude au Réseau Ferré de France (RFF) pour son soutien financier.

RÉFÉRENCES

Barden L., Mc Gown A. and Collins K. 1973. The collapse mechanism in partly saturated soil. *Eng. Geol.* 7, 49-60.

Cui Y.J., Schlosser F., Delage P., Wojnarowicz M. et Durand F. 1995. Comportement mécanique des loess sur le tracé du TGV Nord. *Proc. 11th Eur. CSMFE*, 11 : 45-50.

Cui Y.J., Delage P., Schlosser F. et Wojnarowitz M. 1999. Etude du comportement volumique d'un loess du Nord de la France. *XIIème Congrès Européen de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, Amsterdam, vol. 1, pp. 337-342.

Denisov N. Y. 1951. *Mechanical properties of loess and loams* (in Russian), Gosstroiizdat, Moscou, 136 p.

Delage P., Audiguier M., Cui Y.J. and Howat M.D. 1996. Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, **33** (1), 150-158.

Diamond S. 1970. Pore size distribution in clays. *Clays Clay Miner.* 18, 7-23.

Fawcett R.G. and Collis-George N. 1967. A filtre paper method for determining the moisture characteristics of soil. *Austr. J. Exp. Agric. and Animal Husbandry* 7, 162-167.

Feda, J. 1966. Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice, *Engineering Geology* 1(3) : 201-219.

Gibbs H. J. and Bara J. P. 1962. Predicting surface subsidence from basic soil tests. *ASTM STP 322* : 277-283.

Grabowska-Olszewska B. 1975. SEM analysis of microstructures of loess deposits. *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.* 11, 45-48.

Huergo P.J., Verbrugge J.C. et Nuyens J. 1989. Tassement d'un massif de fondation à intercalations de sols effondrables. *Proc. 12th ICSMFE*, 1 : 611-614, Rio de Janeiro.

Jennings J.E. and Knight K. 1957. The additional settlement of foundation due to collapse of sandy soils on wetting. *Proc. 4th ICSMFE*, 1 : 316-319.

Knight K. 1963. The origin and occurrence of collapsing soils. *Proc. 3rd Reg. African CSMFE* (1) : 127-130.

Osipov V. I. and Sokolov V. N. 1995. Factors and mechanism of loess collapsibility. In *Genesis and Properties of Collapsible Soils,* 49-63, E. Derbyshire et al. eds, Kluwer Academic Publishers.

Stephanoff G. and Kremakov B. 1960. *Building properties of Bulgarian loess soils*. Publishing office techniika, Sofia, 220 p.