



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ORAN MAURICE AUDIN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
LABORATOIRE DE MATÉRIAUX « LABMAT »



ATTESTATION DE PARTICIPATION

*Au Séminaire International de Génie Civil « SIGC 2018 »
ENPO-MA, 27 & 28 Novembre 2018*

Réf : 281

Le président du séminaire SIGC 2018, atteste que :

Mme **BAKIR Nassima**

a présenté une communication intitulée : « ETUDE EXPERIMENTALE DU TRAITEMENT D'UN SOL
AFFAISSABLE PAR LA CHAUX, ENUTILISANT LA METHODE DE LA DOUBLE CONSOLIDATION »

Auteurs : Nassima BAKIR, Khelifa ABBECHE, Meddah abdelaziz



Président du Séminaire

Dr. AYED Kada

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRAITEMENT D'UN SOL AFFAISSABLE PAR LA CHAUX, EN UTILISANT LA METHODE DE LA DOUBLE CONSOLIDATION

Nassima BAKIR¹, Khelifa ABBECHÉ², Meddah abdelaziz¹

¹Laboratoire de Matériaux et de Mécanique de Structure LMMS, Université de M'sila, ALGERIE; e-mail : nassima.bakir@univ-msila.dz

²Departement de Génie Civil, Université de Batna, ALGERIE e-mail : abbechek@yahoo.fr

¹Laboratoire de Matériaux et de Mécanique de Structure LMMS, Université de M'sila, ALGERIE; e-mail : ameddah2004@yahoo.fr

Résumé

L'étude de l'identification ou du traitement des sols affaissables n'a connu un réel développement qu'aux alentours des années 1980. Ces sols sont du genre non saturée, métastable, qui une fois humidifié sous une certaine charge peuvent subir un effondrement provoquant la ruine de toute construction émergeant de ce type de sol. Les sols effondrables sont localisés dans les régions arides ou semi-arides, présentant donc une faible teneur en eau, et caractérisé par une granulométrie qui présente un faible pourcentage d'éléments fins reliant les gros grains favorisant ainsi l'existence d'une structure lâche à grande porosité.

Pour pallier aux problèmes causés par ce type de sol, nous avons proposé une étude expérimentale basée sur l'essai de la double consolidation, et qui présente le traitement du sol à la chaux comme solution afin de diminuer d'une façon considérable le taux d'affaissement, puis nous avons essayé de vérifier, la concordance (si elle existe) des résultats donnés par les deux méthodes d'estimation de l'effondrement celle de la simple et de la double consolidation.

Mots clés : effondrement, traitement, chaux, double consolidation, énergie de compactage.

1 Introduction

Les sols effondrables, collapsibles pour les anglophones, sont généralement localisés dans les régions arides et semi arides, mais Krinitzky et Turnbull (1967), et Delage et al. (2005) affirment que, même dans des régions humides, les lœss sont reconnus comme étant des sols affaissables. Les lœss sont des dépôts éoliens précise Pécsi (1990), ils sont constitués principalement par des particules limoneuses, argileuses ou de sable.

Rogers (1995) propose une classification des sols à risque et de leur mécanisme de formation et révèle que les principales formations de sol effondrables sont les sols résiduels et les lœss. Rogers (1995) affirme que les sols cimentés du Nigeria, les sols gypseux de Russie ou encore les sols salins de Chine sont aussi effondrables.

Le phénomène d'effondrement du sol conduit généralement à une chute soudaine de ses propriétés mécaniques, ceci étant dû à la rupture des forces de liaisons et au réarrangement des grains, qui en contact de l'eau se déplacent par perte d'énergie au cisaillement et donne un nouvel arrangement de l'ossature granulaire du sol. Ce phénomène conduit généralement à l'apparition de déformations importantes et irréversibles dans les constructions.

Les graves conséquences qui peuvent affecter les ouvrages suites aux tassements importants de ce type de sols, ont donné dans ces trois dernières décennies, une impulsion à la recherche, notamment pour les méthodes d'identification et de traitement des sols affaissables.

La reconnaissance des sols effondrables est une étape importante pour le géotechnicien car elle peut l'orienter par rapport aux essais de sols à effectuer au laboratoire, puis vis avis des solutions à adopter lors de la réalisation du projet.

Plusieurs exemples d'effondrement du sol peuvent être énumérés. Nous pouvons citer celui du loess rencontré sur la ligne de LGV Nord en France (Delage et al. 2005), l'effondrement considérable du sol observé lors de la construction du canal de la vallée de San Joaquin en Californie durant les années 50 (Poland et al. 1975), et celui du Koweït qui suite à un faible compactage du sol les infrastructures routières et de bâtiments ont subis des dommages importantes (Ismael et al. 1987).

Plusieurs études d'identification ont mis en évidence que les principaux facteurs intervenant dans le phénomène d'effondrement du sol sont : la teneur en eau initiale, le degré de saturation, la densité sèche, la granulométrie, la nature des agents de cimentation des grains et la charge appliquée (Prikloński, 1952 ; Clevenger, 1958 ; Gibbs et Bara, 1962 ; Fedak, 1964 ; Handi, 1973 ; Kassif et Henkin, 1967 ; Ganachan, 1982 ; Booth 1975 et Lawton 1989).

Après avoir étudié les différentes caractéristiques du sol effondrable, et estimer l'amplitude de l'affaissement provoqué par l'humidification par des essais simples à l'œdomètre, dont l'essai de la simple consolidation et l'essai du double œdomètre, des études de recherche visant à trouver des solutions adaptées à ce type de sol se sont imposées.

Pour résoudre le problème d'effondrement, différentes méthodes de traitement ont été proposées, dont par exemple celle de Lahmadi et al. (2012), dont le sol affaissable a été traité avec du ciment en utilisant la méthode de la double consolidation. Cette étude a montré que pour un compactage minimal, une teneur en ciment de 4% et une teneur en eau de 6%, le sol n'est plus collapsible. Cependant, l'auteur a conclu que l'eau reste élevée compte tenu de la spécificité des zones à traiter. Toutefois, le traitement des sols présentant une faible résistance par le ciment souffré augmente environ trois fois sa résistance à la compression par rapport aux sols stabilisés au ciment Portland affirme Mohamed A.M, et al. (2012).

Une méthode de traitement par la fibre de verre a été récemment abordée, et a montré qu'un taux de 6% de fibre de verre pour un compactage de 60 coup et une teneur en eau de 6% pourrait palier au problème d'effondrement (Bakir.N et al., 2017).

La méthode proposée par Abbeche et al. (2010) consiste en le traitement du sol par des sels (sulfates d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et chlorures de potassium KCl). La méthode de la double consolidation a été réalisée sur des échantillons de sol à différentes concentrations (0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 mol / l) et énergies de compactage, cette étude montre que le taux d'effondrement peut être sensiblement réduit.

Le but de notre travail est d'étudier le traitement par la chaux du sol effondrable par la méthode du double œdomètre, puis de comparer les résultats avec ceux obtenus par la méthode du simple œdomètre afin de comparer nos résultats à ceux obtenus par les travaux antérieurs utilisant la méthode de la double consolidation.

2 Matériaux utilisés

Les principaux matériaux utilisés pour la reconstitution de notre sol au laboratoire sont : le sable qui provient de la région de Oued Maitar de Boussaâda dans la wilaya de M'sila, et le kaolin d'El Milia région de Mila située à Est de l'Algérie. Le sol reconstitué est obtenu en mélangeant 80% de sable ($D < 2 \text{ mm}$), avec 20% l'argile ($D < 0.080 \text{ mm}$). La chaux utilisée pour le traitement est celle hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ramenée directement de l'usine de SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie.

Les différentes caractéristiques géotechniques du sol et de ses constituants sont citées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques géotechnique des constituants et du sol reconstitué

Matériau	Sable	Kaolin	Sol reconstitué
Equivalent de sable E_s %	78.24	-	-
Coefficient d'uniformité C_u	2.15	-	9.12
Coefficient de courbure C_c	0.99	-	1.45
Densité spécifique γ_s (g/cm ³)	2.65	2.55	2.63
Limite de liquidité W_l %	-	48.93	18.53
Limite de plasticité W_p %	-	29.76	13.13
Densité sèche optimale γ_d (g/cm ³)	-	-	1.9
Teneur en eau optimale w_{opt} %	-	-	9.8

3 Programme expérimental

Les essais programmés pour cette étude sont ceux de l'identification des matériaux puis du sol reconstitué. Des essais œdométriques ont été effectués en premier lieu en vue de s'assurer que le sol reconstitué dans les proportions de 20% de sable et 80% de kaolin, a bien les caractéristiques d'effondrement d'un sol affaissable.

Le programme expérimental a comporté donc des essais sur des échantillons de sol compacté à 20, 40 puis 60 coups grâce à une dame de compactage, et humidifié à 2 puis 6% de teneur en eau. Le taux de traitement a été fixé à 3 puis à 6% de chaux. L'étude de l'effet du traitement du sol par la chaux a été exécutée en utilisant la méthode du double œdomètre, cette méthode a été comparée à celle de la simple consolidation menée sur des échantillons sans traitement proposée par Jennings & Knight (1975).

3 1 Essais œdométrique simple :

Deux types d'essais œdométriques ont été utilisés dans cette étude, dont le premier, est celui de la simple consolidation, qui consiste en un essai effectué sur un échantillon confectionné à sa teneur en eau naturelle. L'échantillon étant préparé, il est placé à l'intérieur de la bague annulaire de l'œdomètre en forme de tas, puis on procède au compactage dynamique du sol avec une énergie E_c obtenue par la répétition de la chute d'une masse (132g), à partir d'une certaine hauteur (15cm), le tout assuré par une dame conçue spécialement au laboratoire. L'échantillon est placé ensuite dans l'œdomètre et on procède au chargement progressif jusqu'à atteindre 200KPa (suggérée par Knight 1975), l'échantillon est alors inondé puis laissé 24 heures dans cet état, puis l'essai est conduit à son chargement maximal. La courbe qui en résulte est représentée sur la Figure 3.1.

Le potentiel d'affaissement (C_p) est donné par la formule suivante :

$$C_p (\%) = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot 100$$

e_0 : indice des vides initial

$\Delta e = e_1 - e_2$.

e_1 : indice des vides au début de la saturation.

e_2 : indice des vides à la fin de la saturation.

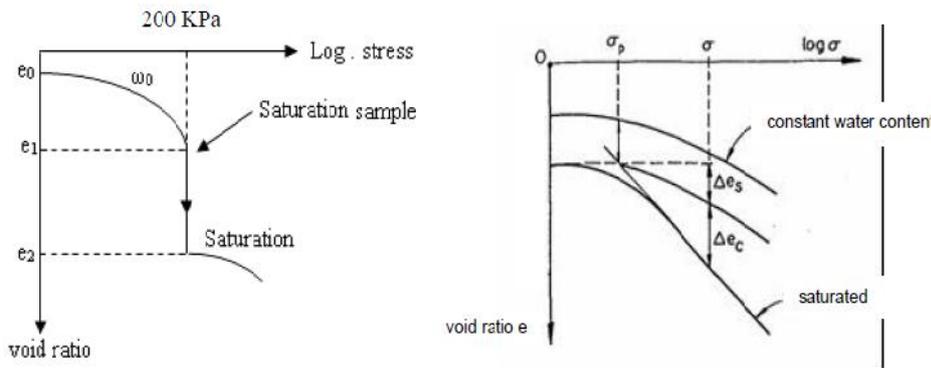


Figure 3.1 essai de la simple consolidation **Figure 3.2** essai au double œdomètre

3.2 Essais du double œdométrique :

L'essai du double œdomètre est conduit comme suit : Deux échantillons de sol sont placés dans deux œdomètres différents. Un chargement de 1 kPa est maintenu pendant 24 heures, puis un échantillon est saturé à l'eau et l'autre est gardé à sa teneur en eau naturelle, les deux essais sont ensuite conduits de manière conventionnelle en doublant la charge toutes les 24 heures, la courbe obtenue est illustrée par la figure 3.2.

Le potentiel d'affaissement (C_p) est calculé dans ce cas à l'aide de la formule suivante :

$$C_p (\%) = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot 100$$

Le potentiel d'affaissement ainsi défini donne une appréciation sur le degré de gravité de l'affaissement du sol. Les valeurs suggérées par Jenning Knight (1975) sont donné au tableau 2.

Tableau 2. Classement des sols affaissables d'après Jenning et Knight (1975).

C_p (%)	Gravité du problème
0 à 1 %	Sols non affaissables (pas de problème)
1 à 5%	Trouble moyennes
5 à 10%	Troubles
10 à 20%	Troubles sévères
> à 20%	Troubles très sévères

4. Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont donnés par les figures qui suivent, ces résultats sont fonctions des différents paramètres imposés dans chaque cas.

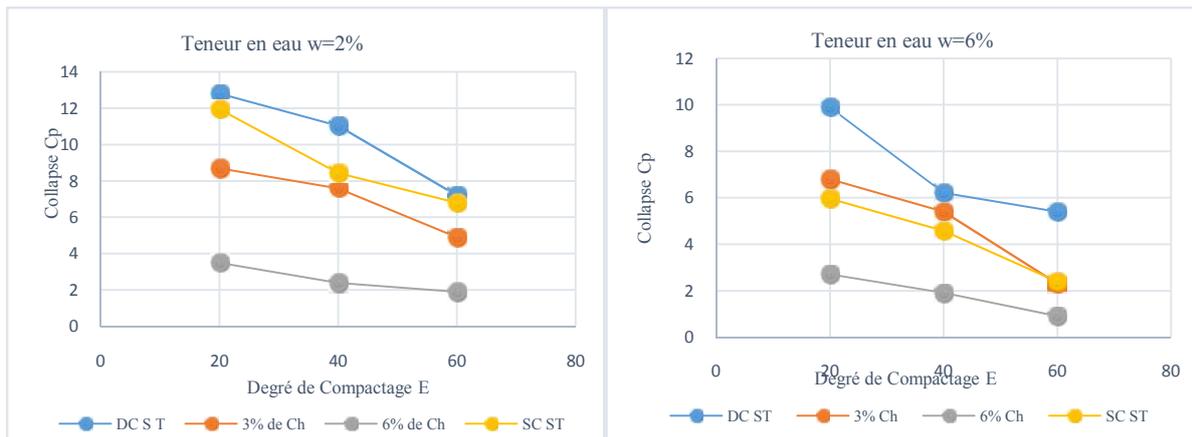


Figure 1. Mise en évidence de l'influence de la chaux sur le Collapse

- Les résultats donnés sur la figure 1 pour le sol non traité, par les deux méthodes simple et double consolidation, montrent une tendance à l'effondrement qui correspond dans la classification de Knight et Jennings (1975) à un sol à troubles sévères.
- Les résultats obtenus par la double consolidation (DC) ont été dans tous les cas supérieurs à ceux donnés par la simple consolidation (SC) confirmant ainsi les études menées par A. Luttenegger (1988), A. Zur (1969) et P. Delage (2001). Et les pourcentages dans les quelles varient les résultats des deux types d'essai vont de 0.44 à 0.94. confirmant encore une fois les pourcentages donnés par A. Luttenegger (1988), pour lequel le rapport entre les deux potentiels d'affaissement varie entre 0.35 et 0.94.
- L'influence du traitement du sol effondrable, donnée par la méthode de la double consolidation, avec un taux de 3% de chaux, diminue le taux d'affaissement dans tous les cas, mais surtout si une teneur en eau est de 6% et le degré de compactage de 60 coups, car le C_p atteint 4.5.
- Pour un taux de traitement de 6% de chaux, une teneur en eau de 6% et une énergie de compactage de 60 coups, les résultats sont encore meilleurs car le collapse atteint 1.9 c'est-à-dire le risque d'affaissement pour notre sol est moyen suivant la classification de Jennings et Knight (1975).

5. Conclusion

L'étude du traitement par la double consolidation a confirmé l'efficacité du traitement du sol affaissable par la chaux, mais les bons résultats ne sont obtenus qu'à partir d'un traitement avec un pourcentage de 6% de chaux associé à une teneur en eau de 6% et un degré de compactage de 60 coups valeurs pour lesquelles on peut obtenir un sol à risque d'effondrement moyen. Les résultats donnés donc par la double consolidation sont comparables à ceux donnés par la simple consolidation mais restent comme même légèrement supérieurs à ces derniers, chose qui a été déjà constatée dans des études antérieures.

6. Références

- Abbeche, K., O. Bahloul, T. Ayadat, A. Bahloul (2010) "Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method". Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publications, ASCE 10.1061/41103.

- Bakir, N. Abbeche, Kand Panczer.G (2017), “Experimental study of the effect of the glass fibers on reducing collapse of collapsible soil” *Geomechanics and Engineering*, Vol. 12, No. 1 (2017) 000-000 DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.1.000>
- Booth, A.R. (1975); “The Factors Influencing Collapse Settlement in Compacted Soils”, *Proc. Of the 6th, Reg. Conf. for Africa on SMFE, Dublin, South Africa*, pp. 57-63.
- Clevenger, W. A. (1958): Experiences with loess as foundation material. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 123(1):151–169.;
- Delage, P., Cui, Y. Antoine, P. (2005) “Geotechnical problems related with loess deposits in Northern France”. In *Proceedings of International Conference on Problematic Soils*, volume 25, page 27.
- Feda, J. (1964): Colloidal activity, shrinking and swelling of some clays. In *Proceedings of Soil Mechanics Seminar*, pages 531–546. Pages 149–172. Springer.
- Ganeshan, V. (1982) “Strength and Collapse Characteristics of Compacted Residual Soils”, Thesis.
- Gibbs, H. J. et Bara, J. P. (1962) : Predicting surface subsidence from basic soil tests. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Division of Engineering Laboratories.
- Handy, R. L. (1973): Collapsible loess in Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, 37(2):281–284.
- Ismael, N.F., Jeragh, A., Mollah, M.A. & Khalidi, O.(1987); Conference, Bangkok, Thailand, December 7-11, 5, 147-158.
- Jennings J.E, Knight.K.1975. The additional settlement of foundation due to collapse of sandy soils on wetting. *Proc. 4th Inter. Conf. on soil mechanics and foundation Engineering*, 1, p.316-319.
- Kassiff, G. et Henkin, E. (1967) : Engineering and physico-chemical properties affecting piping failure of low loess dams in the negev. In *Proc. 3rd Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng*, volume 1, pages 13–16.
- Knight, K. (1961) “The Collapse Of Structure Of Sandy Sub-soils On Wetting”. Thèse de doctorat, University of The Witwatersrand.
- Krinitzsky, E. L. et Turnbull, W. J. (1967): Loess deposits of mississippi. *Geological Society of America Special Papers*, 94:1–62.
- Lahmadi A, Bakir N, Abbeche K. (2012), « Traitement d’un sol à effondrement brusque par le ciment en utilisant la méthode double consolidation » ; *Colloque International sur les Sols Non Saturés et Environnement (UNSAT 2012)*, At USTHB, Alger, ALGERIA
- Lawton, E., Fragaszy, R. et Hardcastle, J. (1989): Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9):1252–1267.
- Lutenegger A. J., Saber R. T. (1988), Determination of collapse potential of soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 11 (3), 173-178.
- Mohamed A.M, El Gamal M. (2012)). "Treatment of collapsible soils using sulfur cement." *International Journal of Geotechnical Engineering* 2012; 6(1), 65-77
- Pécsi, M. (1990), “Loess is not just the accumulation of dust”. *Quaternary International*, 7:1–21.
- Poland, J. F., Lofgren, B., Ireland, R. et Pugh, R. (1975): Land subsidence in the san joaquin valley, california, as of 1972.
- Prikloński, V. (1952) : Gruntovedenie (en russe). *Vtoriaia Chast (Soil Science II)*, Gosgeolizdat, Moscow. : 371.
- Rogers, C. (1995): Types and distribution of collapsible soils. In *Genesis and Properties of Collapsible Soils*, pages 1–17. Springer.
- ZUR A., WISEMAN G. (1973), “A study of collapse phenomena of an undisturbed”, *Proc. Of the Inter. Conf. on soil Mech. and Found. Eng.*, Vol 2.2, p. 225-269.

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRAITEMENT D'UN SOL AFFAISSABLE PAR LA CHAUX, EN UTILISANT LA METHODE DE LA DOUBLE CONSOLIDATION

Nassima BAKIR¹, Khelifa ABBECHÉ², Meddah abdelaziz¹

¹Laboratoire de Matériaux et de Mécanique de Structure LMMS, Université de M'sila, ALGERIE; e-mail : nassima.bakir@univ-msila.dz

²Departement de Génie Civil, Université de Batna, ALGERIE e-mail : abbechek@yahoo.fr

¹Laboratoire de Matériaux et de Mécanique de Structure LMMS, Université de M'sila, ALGERIE; e-mail : ameddah2004@yahoo.fr

Résumé

L'étude de l'identification ou du traitement des sols affaissables n'a connu un réel développement qu'aux alentours des années 1980. Ces sols sont du genre non saturée, métastable, qui une fois humidifié sous une certaine charge peuvent subir un effondrement provoquant la ruine de toute construction émergeant de ce type de sol. Les sols effondrables sont localisés dans les régions arides ou semi-arides, présentant donc une faible teneur en eau, et caractérisé par une granulométrie qui présente un faible pourcentage d'éléments fins reliant les gros grains favorisant ainsi l'existence d'une structure lâche à grande porosité.

Pour pallier aux problèmes causés par ce type de sol, nous avons proposé une étude expérimentale basée sur l'essai de la double consolidation, et qui présente le traitement du sol à la chaux comme solution afin de diminuer d'une façon considérable le taux d'affaissement, puis nous avons essayé de vérifier, la concordance (si elle existe) des résultats donnés par les deux méthodes d'estimation de l'effondrement celle de la simple et de la double consolidation.

Mots clés : effondrement, traitement, chaux, double consolidation, énergie de compactage.

1 Introduction

Les sols effondrables, collapsibles pour les anglophones, sont généralement localisés dans les régions arides et semi arides, mais Krinitzky et Turnbull (1967), et Delage et al. (2005) affirment que, même dans des régions humides, les lœss sont reconnus comme étant des sols affaissables. Les lœss sont des dépôts éoliens précise Pécsi (1990), ils sont constitués principalement par des particules limoneuses, argileuses ou de sable.

Rogers (1995) propose une classification des sols à risque et de leur mécanisme de formation et révèle que les principales formations de sol effondrables sont les sols résiduels et les lœss. Rogers (1995) affirme que les sols cimentés du Nigeria, les sols gypseux de Russie ou encore les sols salins de Chine sont aussi effondrables.

Le phénomène d'effondrement du sol conduit généralement à une chute soudaine de ses propriétés mécaniques, ceci étant dû à la rupture des forces de liaisons et au réarrangement des grains, qui en contact de l'eau se déplacent par perte d'énergie au cisaillement et donne un nouvel arrangement de l'ossature granulaire du sol. Ce phénomène conduit généralement à l'apparition de déformations importantes et irréversibles dans les constructions.

Les graves conséquences qui peuvent affecter les ouvrages suites aux tassements importants de ce type de sols, ont donné dans ces trois dernières décennies, une impulsion à la recherche, notamment pour les méthodes d'identification et de traitement des sols affaissables.

La reconnaissance des sols effondrables est une étape importante pour le géotechnicien car elle peut l'orienter par rapport aux essais de sols à effectuer au laboratoire, puis vis avis des solutions à adopter lors de la réalisation du projet.

Plusieurs exemples d'effondrement du sol peuvent être énumérés. Nous pouvons citer celui du loess rencontré sur la ligne de LGV Nord en France (Delage et al. 2005), l'effondrement considérable du sol observé lors de la construction du canal de la vallée de San Joaquin en Californie durant les années 50 (Poland et al. 1975), et celui du Koweït qui suite à un faible compactage du sol les infrastructures routières et de bâtiments ont subis des dommages importantes (Ismael et al. 1987).

Plusieurs études d'identification ont mis en évidence que les principaux facteurs intervenant dans le phénomène d'effondrement du sol sont : la teneur en eau initiale, le degré de saturation, la densité sèche, la granulométrie, la nature des agents de cimentation des grains et la charge appliquée (Prikloński, 1952 ; Clevenger, 1958 ; Gibbs et Bara, 1962 ; Fedak, 1964 ; Handi, 1973 ; Kassif et Henkin, 1967 ; Ganachan, 1982 ; Booth 1975 et Lawton 1989).

Après avoir étudié les différentes caractéristiques du sol effondrable, et estimer l'amplitude de l'affaissement provoqué par l'humidification par des essais simples à l'œdomètre, dont l'essai de la simple consolidation et l'essai du double œdomètre, des études de recherche visant à trouver des solutions adaptées à ce type de sol se sont imposées.

Pour résoudre le problème d'effondrement, différentes méthodes de traitement ont été proposées, dont par exemple celle de Lahmadi et al. (2012), dont le sol affaissable a été traité avec du ciment en utilisant la méthode de la double consolidation. Cette étude a montré que pour un compactage minimal, une teneur en ciment de 4% et une teneur en eau de 6%, le sol n'est plus collapsible. Cependant, l'auteur a conclu que l'eau reste élevée compte tenu de la spécificité des zones à traiter. Toutefois, le traitement des sols présentant une faible résistance par le ciment souffré augmente environ trois fois sa résistance à la compression par rapport aux sols stabilisés au ciment Portland affirme Mohamed A.M, et al. (2012).

Une méthode de traitement par la fibre de verre a été récemment abordée, et a montré qu'un taux de 6% de fibre de verre pour un compactage de 60 coup et une teneur en eau de 6% pourrait palier au problème d'effondrement (Bakir.N et al., 2017).

La méthode proposée par Abbeche et al. (2010) consiste en le traitement du sol par des sels (sulfates d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et chlorures de potassium KCl). La méthode de la double consolidation a été réalisée sur des échantillons de sol à différentes concentrations (0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 mol / l) et énergies de compactage, cette étude montre que le taux d'effondrement peut être sensiblement réduit.

Le but de notre travail est d'étudier le traitement par la chaux du sol effondrable par la méthode du double œdomètre, puis de comparer les résultats avec ceux obtenus par la méthode du simple œdomètre afin de comparer nos résultats à ceux obtenus par les travaux antérieurs utilisant la méthode de la double consolidation.

2 Matériaux utilisés

Les principaux matériaux utilisés pour la reconstitution de notre sol au laboratoire sont : le sable qui provient de la région de Oued Maitar de Boussaâda dans la wilaya de M'sila, et le kaolin d'El Milia région de Mila située à Est de l'Algérie. Le sol reconstitué est obtenu en mélangeant 80% de sable ($D < 2 \text{ mm}$), avec 20% l'argile ($D < 0.080 \text{ mm}$). La chaux utilisée pour le traitement est celle hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ramenée directement de l'usine de SAIDA située dans la région ouest de l'Algérie.

Les différentes caractéristiques géotechniques du sol et de ses constituants sont citées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques géotechnique des constituants et du sol reconstitué

Matériau	Sable	Kaolin	Sol reconstitué
Equivalent de sable E_s %	78.24	-	-
Coefficient d'uniformité C_u	2.15	-	9.12
Coefficient de courbure C_c	0.99	-	1.45
Densité spécifique γ_s (g/cm ³)	2.65	2.55	2.63
Limite de liquidité W_l %	-	48.93	18.53
Limite de plasticité W_p %	-	29.76	13.13
Densité sèche optimale γ_d (g/cm ³)	-	-	1.9
Teneur en eau optimale w_{opt} %	-	-	9.8

3 Programme expérimental

Les essais programmés pour cette étude sont ceux de l'identification des matériaux puis du sol reconstitué. Des essais œdométriques ont été effectués en premier lieu en vue de s'assurer que le sol reconstitué dans les proportions de 20% de sable et 80% de kaolin, a bien les caractéristiques d'effondrement d'un sol affaissable.

Le programme expérimental a comporté donc des essais sur des échantillons de sol compacté à 20, 40 puis 60 coups grâce à une dame de compactage, et humidifié à 2 puis 6% de teneur en eau. Le taux de traitement a été fixé à 3 puis à 6% de chaux. L'étude de l'effet du traitement du sol par la chaux a été exécutée en utilisant la méthode du double œdomètre, cette méthode a été comparée à celle de la simple consolidation menée sur des échantillons sans traitement proposée par Jennings & Knight (1975).

3 1 Essais œdométrique simple :

Deux types d'essais œdométriques ont été utilisés dans cette étude, dont le premier, est celui de la simple consolidation, qui consiste en un essai effectué sur un échantillon confectionné à sa teneur en eau naturelle. L'échantillon étant préparé, il est placé à l'intérieur de la bague annulaire de l'œdomètre en forme de tas, puis on procède au compactage dynamique du sol avec une énergie E_c obtenue par la répétition de la chute d'une masse (132g), à partir d'une certaine hauteur (15cm), le tout assuré par une dame conçue spécialement au laboratoire. L'échantillon est placé ensuite dans l'œdomètre et on procède au chargement progressif jusqu'à atteindre 200KPa (suggérée par Knight 1975), l'échantillon est alors inondé puis laissé 24 heures dans cet état, puis l'essai est conduit à son chargement maximal. La courbe qui en résulte est représentée sur la Figure 3.1.

Le potentiel d'affaissement (C_p) est donné par la formule suivante :

$$C_p (\%) = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot 100$$

e_0 : indice des vides initial

$\Delta e = e_1 - e_2$.

e_1 : indice des vides au début de la saturation.

e_2 : indice des vides à la fin de la saturation.

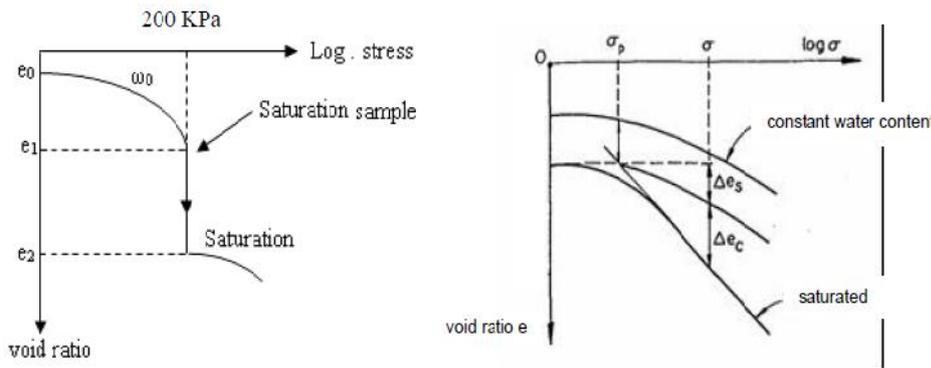


Figure 3.1 essai de la simple consolidation **Figure 3.2** essai au double œdomètre

3.2 Essais du double œdométrique :

L'essai du double œdomètre est conduit comme suit : Deux échantillons de sol sont placés dans deux œdomètres différents. Un chargement de 1 kPa est maintenu pendant 24 heures, puis un échantillon est saturé à l'eau et l'autre est gardé à sa teneur en eau naturelle, les deux essais sont ensuite conduits de manière conventionnelle en doublant la charge toutes les 24 heures, la courbe obtenue est illustrée par la figure 3.2.

Le potentiel d'affaissement (C_p) est calculé dans ce cas à l'aide de la formule suivante :

$$C_p (\%) = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot 100$$

Le potentiel d'affaissement ainsi défini donne une appréciation sur le degré de gravité de l'affaissement du sol. Les valeurs suggérées par Jenning Knight (1975) sont donné au tableau 2.

Tableau 2. Classement des sols affaissables d'après Jenning et Knight (1975).

C_p (%)	Gravité du problème
0 à 1 %	Sols non affaissables (pas de problème)
1 à 5%	Trouble moyennes
5 à 10%	Troubles
10 à 20%	Troubles sévères
> à 20%	Troubles très sévères

4. Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont donnés par les figures qui suivent, ces résultats sont fonctions des différents paramètres imposés dans chaque cas.

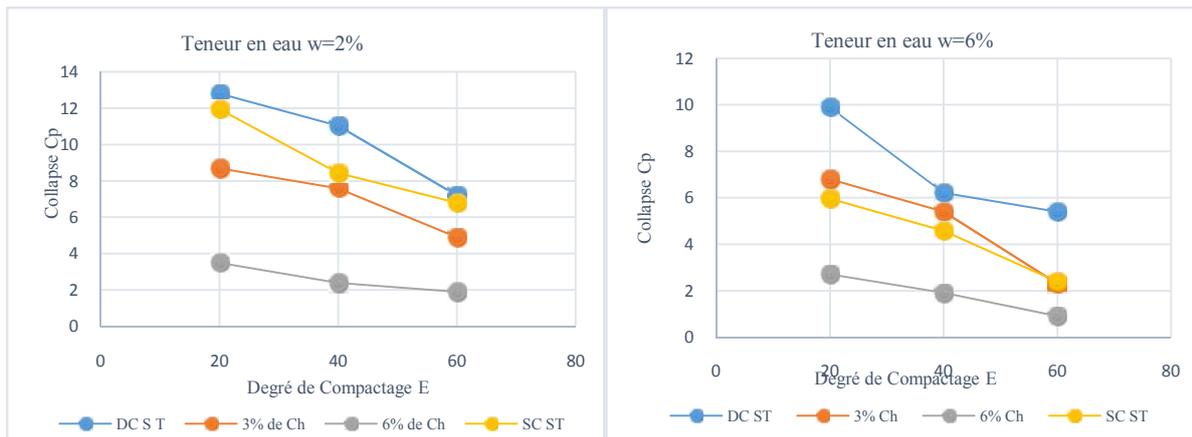


Figure 1. Mise en évidence de l'influence de la chaux sur le Collapse

- Les résultats donnés sur la figure 1 pour le sol non traité, par les deux méthodes simple et double consolidation, montrent une tendance à l'effondrement qui correspond dans la classification de Knight et Jennings (1975) à un sol à troubles sévères.
- Les résultats obtenus par la double consolidation (DC) ont été dans tous les cas supérieurs à ceux donnés par la simple consolidation (SC) confirmant ainsi les études menées par A. Luttenegger (1988), A. Zur (1969) et P. Delage (2001). Et les pourcentages dans les quelles varient les résultats des deux types d'essai vont de 0.44 à 0.94. confirmant encore une fois les pourcentages donnés par A. Luttenegger (1988), pour lequel le rapport entre les deux potentiels d'affaissement varie entre 0.35 et 0.94.
- L'influence du traitement du sol effondrable, donnée par la méthode de la double consolidation, avec un taux de 3% de chaux, diminue le taux d'affaissement dans tous les cas, mais surtout si une teneur en eau est de 6% et le degré de compactage de 60 coups, car le C_p atteint 4.5.
- Pour un taux de traitement de 6% de chaux, une teneur en eau de 6% et une énergie de compactage de 60 coups, les résultats sont encore meilleurs car le collapse atteint 1.9 c'est-à-dire le risque d'affaissement pour notre sol est moyen suivant la classification de Jennings et Knight (1975).

5. Conclusion

L'étude du traitement par la double consolidation a confirmé l'efficacité du traitement du sol affaissable par la chaux, mais les bons résultats ne sont obtenus qu'à partir d'un traitement avec un pourcentage de 6% de chaux associé à une teneur en eau de 6% et un degré de compactage de 60 coups valeurs pour lesquelles on peut obtenir un sol à risque d'effondrement moyen. Les résultats donnés donc par la double consolidation sont comparables à ceux donnés par la simple consolidation mais restent comme même légèrement supérieurs à ces derniers, chose qui a été déjà constatée dans des études antérieures.

6. Références

- Abbeche, K., O. Bahloul, T. Ayadat, A. Bahloul (2010) "Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method". Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publications, ASCE 10.1061/41103.

- Bakir, N. Abbeche, Kand Panczer.G (2017), “Experimental study of the effect of the glass fibers on reducing collapse of collapsible soil” *Geomechanics and Engineering*, Vol. 12, No. 1 (2017) 000-000 DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.1.000>
- Booth, A.R. (1975); “The Factors Influencing Collapse Settlement in Compacted Soils”, Proc. Of the 6th, Reg. Conf. for Africa on SMFE, Dublin, South Africa, pp. 57-63.
- Clevenger, W. A. (1958): Experiences with loess as foundation material. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 123(1):151–169.;
- Delage, P., Cui, Y. Antoine, P. (2005) “Geotechnical problems related with loess deposits in Northern France”. In Proceedings of International Conference on Problematic Soils, volume 25, page 27.
- Feda, J. (1964): Colloidal activity, shrinking and swelling of some clays. In Proceedings of Soil Mechanics Seminar, pages 531–546. Pages 149–172. Springer.
- Ganeshan, V. (1982) “Strength and Collapse Characteristics of Compacted Residual Soils”, Thesis.
- Gibbs, H. J. et Bara, J. P. (1962) : Predicting surface subsidence from basic soil tests. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Division of Engineering Laboratories.
- Handy, R. L. (1973): Collapsible loess in Iowa. Soil Science Society of America Journal, 37(2):281–284.
- Ismael, N.F., Jeragh, A., Mollah, M.A. & Khalidi, O.(1987); Conference, Bangkok, Thailand, December 7-11, 5, 147-158.
- Jennings J.E, Knight.K.1975. The additional settlement of foundation due to collapse of sandy soils on wetting. Proc. 4th Inter. Conf. on soil mechanics and foundation Engineering, 1, p.316-319.
- Kassiff, G. et Henkin, E. (1967) : Engineering and physico-chemical properties affecting piping failure of low loess dams in the negev. In Proc. 3rd Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng, volume 1, pages 13–16.
- Knight, K. (1961) “The Collapse Of Structure Of Sandy Sub-soils On Wetting”. Thèse de doctorat, University of The Witwatersrand.
- Krinitzsky, E. L. et Turnbull, W. J. (1967): Loess deposits of mississippi. Geological Society of America Special Papers, 94:1–62.
- Lahmadi A, Bakir N, Abbeche K. (2012), « Traitement d’un sol à effondrement brusque par le ciment en utilisant la méthode double consolidation » ; Colloque International sur les Sols Non Saturés et Environnement (UNSAT 2012), At USTHB, Alger, ALGERIA
- Lawton, E., Fragaszy, R. et Hardcastle, J. (1989): Collapse of compacted clayey sand. Journal of Geotechnical Engineering, 115(9):1252–1267.
- Lutenegger A. J., Saber R. T. (1988), Determination of collapse potential of soils. Geotechnical Testing Journal, Vol. 11 (3), 173-178.
- Mohamed A.M, El Gamal M. (2012)). "Treatment of collapsible soils using sulfur cement." International Journal of Geotechnical Engineering 2012; 6(1), 65-77
- Pécsi, M. (1990), “Loess is not just the accumulation of dust”. Quaternary International, 7:1–21.
- Poland, J. F., Lofgren, B., Ireland, R. et Pugh, R. (1975): Land subsidence in the san joaquin valley, california, as of 1972.
- Prikloński, V. (1952) : Gruntovedenie (en russe). Vtoriaia Chast (Soil Science II), Gosgeolizdat, Moscow. : 371.
- Rogers, C. (1995): Types and distribution of collapsible soils. In Genesis and Properties of Collapsible Soils, pages 1–17. Springer.
- ZUR A., WISEMAN G. (1973), “A study of collapse phenomena of an undisturbed”, Proc. Of the Inter. Conf. on soil Mech. and Found. Eng., Vol 2.2, p. 225-269.