HAL
open science

Comportement hydromécanique des milieux granulaires fins au cours de l'imbibition

Fatima Zahra El Korchi, Frédéric Jamin, E.K. Lakhal, Mohamed El Omari, Moulay Saïd El Youssoufi

To cite this version:

Fatima Zahra El Korchi, Frédéric Jamin, E.K. Lakhal, Mohamed El Omari, Moulay Saïd El Youssoufi. Comportement hydromécanique des milieux granulaires fins au cours de l'imbibition. 1e Congrès International sur les Ingénieries Civile, Mécanique et Electrique pour l'Energie, Nov 2015, Marrakech, Maroc. hal-01412438

HAL Id: hal-01412438

https://hal.science/hal-01412438v1

Submitted on 8 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comportement hydromécanique des milieux granulaires fins au cours de l'imbibition

F. Z. El Korchi[1,2], F. Jamin[1], E. K. Lakhal[2], M. Elomari[2], M.S. El Youssoufi[1]

[1]*Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, LMGC-UMR 5508, Université de Montpellier – CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05, France.*
[2]*Laboratoire d'Automatique de l'Environnement et Procédés de Transferts, LAEPT, Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, B.P 2390, 40000 Marrakech, Maroc.*
E-mail : fatima-zahra.el-korchi@univ-montp2.fr.

Résumé : *On présente une étude expérimentale d'identification et d'analyse du phénomène d'effondrement d'origine hydrique sur un milieu granulaire modèle constitué de billes de verre. Le potentiel d'effondrement d'un sol semble dépendre de plusieurs paramètres comme la limite de liquidité, la masse volumique apparente sèche, la teneur en eau initiale ou encore la présence de fines particules qui assurent une certaine cohésion du milieu poreux. Dans cette étude, on s'intéresse à l'effet purement hydrique par imbibition sur ce phénomène, sans chargement mécanique externe autre que la gravité. Des essais expérimentaux à différentes teneurs en eau initiales ont été réalisés sur des billes de verre de diamètres inferieurs à 50 µm. L'équipement utilisé est un appareil triaxial de type Bishop Wesley, instrumenté de capteurs de déplacements locaux axial et radial, rendant compte d'une partie de la cinématique de l'échantillon au cours de l'imbibition. Les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence une teneur en eau critique de l'effondrement, et montrent l'effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude de l'effondrement et sur la teneur en eau critique.*

1. INTRODUCTION

Le phénomène d'effondrement peut intervenir dans les sols granulaires non saturés, en présence ou non de contraintes mécaniques externes. Ce phénomène résulte d'un réarrangement important des particules solides au cours de l'imbibition d'eau. Sa manifestation peut nuire à la stabilité des ouvrages en provoquant, par exemple, des tassements différentiels des constructions civiles et routières, des ruptures de talus, digues ou barrages en terre, des éboulements de parois de galeries souterraines ou encore un tassement des remblais des réseaux ferrés.

D'après la classification de Gibbs et Barra [1], la limite de liquidité et de la masse volumique apparente sèche du milieu sont des critères déterminants dans le phénomène d'effondrement. Dans le même sens, les travaux de Ayadat et Ouali [2] ont montré l'effet des limites d'Atterberg (limites de liquidité w_L et de plasticité w_P) sur l'effondrement des milieux granulaires sableux. Des essais œdométriques réalisés sur un sable limoneux [3] ont montré que l'amplitude de l'effondrement varie de façon linéaire avec la densité sèche initiale du sol. D'autres travaux réalisés sur un limon prélevé à différentes profondeurs [4] montrent que l'amplitude de l'effondrement est plus importante pour des indices des vides initiaux plus élevés. L'effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude de l'effondrement a fait l'objet de plusieurs études. Entre autres, des essais œdométriques réalisés sur un sol limoneux à deux masses volumiques sèches différentes [3], ont montré que la forme de la relation entre la teneur en eau initiale du sol et l'amplitude de l'effondrement est une droite décroissante. D'autres essais faits sur un sable limoneux à différentes teneurs en eau initiales ([4] et [5]) ont également montré que la teneur en eau initiale du sol est inversement proportionnelle à l'amplitude de l'effondrement.

Dans le but de comprendre les mécanismes à l'origine de l'effondrement, plusieurs chercheurs l'ont associé à différents conditions, notamment une structure ouverte avec une grande porosité du sol [6] (Fig. 1. (a)), une grande contrainte mécanique appliquée induisant une instabilité au milieu [6] (Fig. 1. (b)), une perte de cimentation, suivie d'une migration des particules fines due à la percolation d'eau ([6] et [7]) (Fig. 1. (c)), ou encore à une réduction de la succion matricielle pendant l'inondation [3] (Fig. 1. (d)).

Des essais mécaniques réalisés sur des assemblages de billes de verre polydisperses (compression simple [8] et cisaillement direct [9]), ont montré que, dans le domaine pendulaire, les milieux granulaires sont sensibles à la teneur en eau qui leur procure une cohésion apparente par effet de capillarité. Le domaine hydrique pendulaire correspond à des teneurs en eau faibles, et donc à une situation dans laquelle les forces capillaires jouent un rôle important. Ces forces capillaires n'interviennent pas dans un état saturé des sols granulaires pour lequel le comportement est similaire à celui à l'état sec. Pour les états intermédiaires (hygroscopique, pendulaire et funiculaire), les effets capillaires peuvent être très variables.

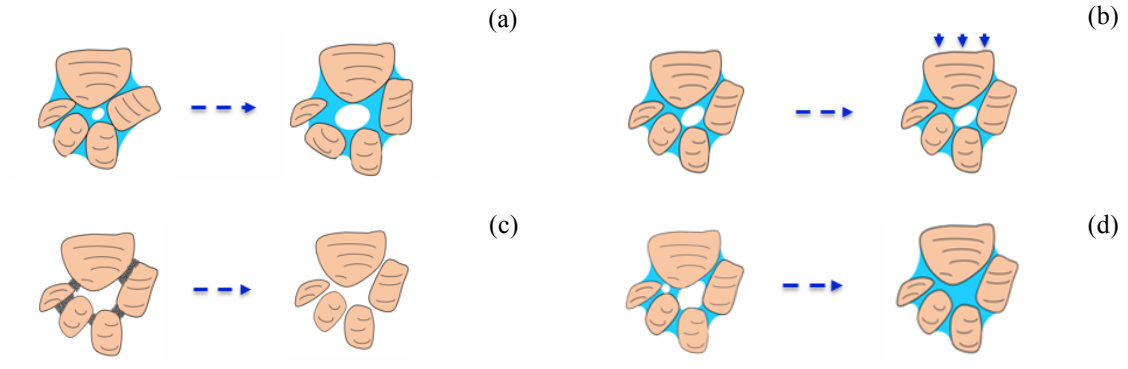

Fig. 1. (a) Indice des vides élevé, (b) Contrainte appliqué importante, (c)Perte de cimentation, (d) Diminution de la succion matricielle.

Contrairement au phénomène d'effondrement des sols non saturés lié à l'augmentation de teneur en eau sous un chargement mécanique externe, qui a fait l'objet de plusieurs études, l'effondrement dû purement à la fusion des ménisques capillaires dans les milieux granulaires, suite à une imbibition d'eau, sans chargement mécanique externe reste encore non abordé.

Dans cette étude, on propose un protocole expérimental permettant d'identifier le phénomène d'effondrement purement de milieux granulaires modèles, de type billes de verre, soumis à une imbibition d'eau sans chargement mécanique externe autre que la gravité. On donne tout d'abord l'ensemble des caractéristiques géométriques, physiques et hydriques, des échantillons de billes de verre. Ensuite, on décrit le dispositif expérimental et le protocole suivi dans le cadre de cette étude. On présente ensuite les résultats expérimentaux obtenus durant l'imbibition d'eau sur des billes de verre en fonction de la teneur en eau initiale. Enfin, on conclue par une discussion sur le rôle hydrique dans le processus d'effondrement des milieux granulaires.

2. MATERIAUX ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

2.1. Matériaux

Pour réaliser cette étude, on a utilisé un matériau granulaire modèle de type billes de verre de granularité poly-disperse. Les billes de verre utilisées sont de forme quasi-sphérique, homogènes et supposées indéformables (Fig. 2. (a)). Pour ce type de matériau granulaire, la cohésion est due uniquement à la présence de ponts capillaires entre les particules solides, contrairement aux sols naturels où la cohésion intrinsèque et la cimentation peuvent jouer un rôle important dans la tenue mécanique du milieu. La détermination expérimentale de la teneur en eau de rétention (qui correspond à la teneur en eau que le sol est capable de retenir par effet de capillarité et d'adsorption) a montré que les billes de verre dont les diamètres sont inférieurs à 50µm peuvent retenir par capillarité ce que correspond à un degré de saturation de 100%. Cet essai consiste à saturer des échantillons de billes de verre pour différentes granularités, à la compacité c = 0,59, et de les placer dans un dessiccateur où règne une humidité relative de 100% pour éviter le séchage par évaporation. Les teneurs en eau finales mesurées à l'équilibre après drainage correspondent à la teneur en eau de rétention du milieu granulaire.

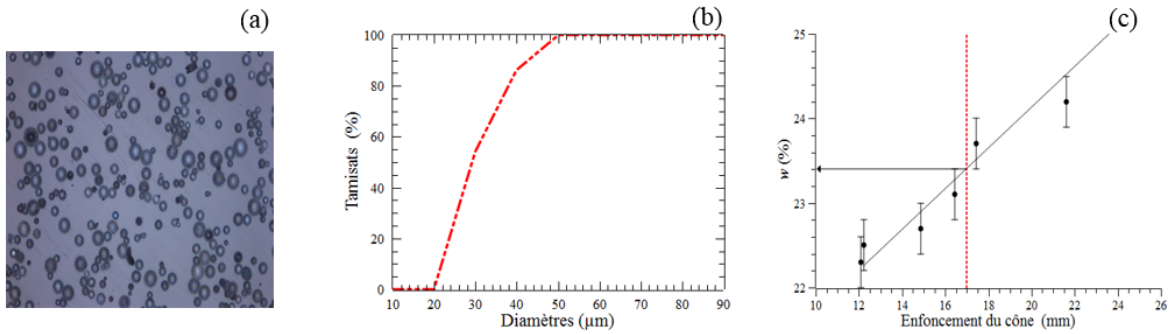

Fig. 2. (a) Photographie par microscope des billes de verre Φ <50µm, (b) courbe granulométrique des billes de verre et c) limite de liquidité.

La courbe granulométrique des billes de verre de diamètres Φ < 50 µm a été déterminée à partir d'une méthode de traitement d'images photographiques prises au microscope (Fig. 2. (a) et 2. (b)). Les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c des billes de verre sont présentés ci-dessous (Tab. 1). Les billes de verre ont une courbe granulométrique uniforme et bien graduée. La détermination de la limite de liquidité des billes de verre de Φ < 50 µm, dont la valeur est présentée dans le tableau 1, a été réalisée avec la méthode du pénétromètre à cône en suivant la norme NF 94-052-1 (Fig. 2. (c)).

Coefficient d'uniformité C_u **(/)**	**Coefficient de courbure** C_c **(/)**	**Limite de liquidité** w_L **(%)**	**Masse volumique spécifique** ρ_s^* **(kg/m³)**
1,55	0,90	23,4 ± 0,3	2450 ± 3

Tab. 1. Coefficients d'uniformité et de courbure, limite de liquidité et masse volumique spécifique des billes de verre Φ < 50 µm.

2.2. Protocole expérimental

Les échantillons de billes de verre sont de forme cylindrique avec une hauteur initiale H_0 = 94 mm et un diamètre initial D_0 = 50 mm. Ces échantillons sont préparés à une compacité c_0 = 0,59 et des teneurs en eau w_0 = 5%, 10% et 15% par mélange d'une masse de billes de verre sèche m_s et d'une masse d'eau déminéralisée $m_e = m_s \times w_0$. Cette teneur en eau de fabrication permet de constituer des ponts capillaires diffus dans l'échantillon et qui sont à l'origine de leur tenue mécanique par cohésion sous leurs poids propres.

Le principe des essais d'imbibition, consiste à imposer une faible pression d'eau (u_w = 5 kPa) à la base de l'échantillon en maintenant la pression de l'air constante et égale à la pression atmosphérique (u_a = 0 kPa) en tête de l'échantillon (Fig. 3. (a)). Afin de suivre les déformations axiale et radiale de l'échantillon au cours de l'imbibition à l'appareil triaxial, des capteurs de déplacement locaux de type LVDT (deux axiaux et un radial) ont été mis en place sur l'échantillon de billes de verre (Fig. 3. (b)).

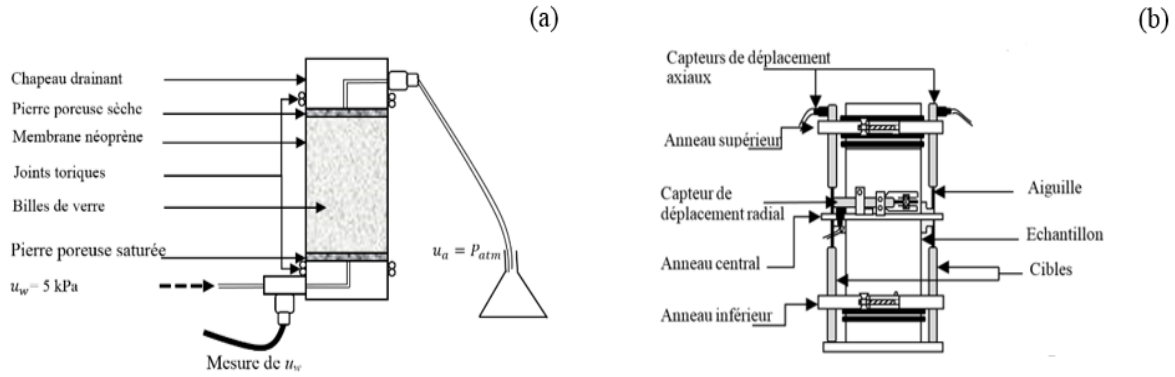

Fig. 3. (a) Schéma de principe de l'essai d'imbibition et (b) schéma de principe de montage avec les capteurs LVDT.

À partir des déplacements mesurés par ces capteurs locaux (Fig. 3. (b)), les déformations axiale ε_a et radiale ε_r sont déduites à partir des relations suivantes :

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{D_0} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

où $\Delta H = H - H_0$ et $\Delta D = D - D_0$ sont respectivement les variations de hauteur et de diamètre au centre de l'échantillon. Au cours de l'essai, la teneur en eau moyenne $w(t)$ au sein de l'échantillon est déterminée par la relation :

$$w(t) = \frac{m_e + \Delta m_e(t)}{m_s} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

où $\Delta m_e(t)$ est la masse d'eau injecté par le Contrôleur Pression-Volume dans l'échantillon au cours de l'imbibition à un instant t donné.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats de l'essai d'imbibition d'eau obtenus sur les échantillons de billes de verre de diamètre $\Phi < 50$ µm, à une compacité $c_0 = 0{,}59$ et une teneur en eau initiale w_0 de 5%, sont présentés à la figure 4. (a). Pour cet essai, trois tests de contrôle indépendants ont été entrepris pour évaluer le gradient de teneur en eau au sein de l'échantillon au cours de l'imbibition, et s'assurer de la reproductibilité des expériences. La mesure de la pression interstitielle au cours de l'imbibition est donnée à la figure 4. (b).

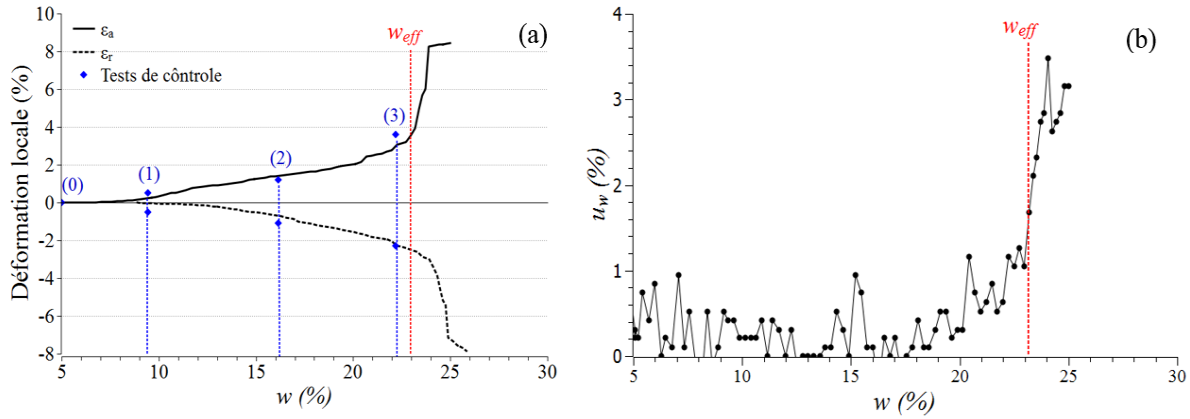

Fig. 4. (a) Variation des déformations axiale ε_a et radiale ε_r et (b) Évolution de la pression d'eau interstitielle u_w au cours de l'imbibition pour les billes de verre $\Phi < 50$ µm.

Pendant la remontée de l'eau dans l'échantillon granulaire, des déformations axiale et radiale se produisent progressivement (Fig. 4. (a)). À partir d'une teneur en eau critique, ces déformations subissent une variation brutale attribuée au phénomène d'effondrement du milieu. Cette teneur en eau critique est, par la suite, appelée teneur en eau d'effondrement et notée w_{eff}. Une augmentation de la pression d'eau interstitielle au sein de l'échantillon est observé également à l'approche de la teneur en eau w_{eff}, et donc à l'amorce du phénomène d'effondrement (Fig. 4. (b)).

La réalisation des essais expérimentaux en continu jusqu'à l'effondrement de l'échantillon ne permet pas d'accéder au gradient de teneur en eau au cours de l'imbibition. Pour avoir accès à ce gradient, les essais d'imbibition ont été interrompus avant l'apparition du phénomène d'effondrement, ce qui correspond aux points (1), (2) et (3) (Fig. 4. (a)), pour différents volumes d'eau injectés. Des mesures de teneur en eau (notées w_{mes}) ont été alors effectuées à l'étuve réglée à une température de 105°C sur des fractions d'échantillon prélevées à différentes positions de ce dernier (haut, milieu et bas). À partir de ces teneurs en eau w_{mes}, une teneur en eau « moyenne » notée w_{moy} a été estimée afin d'être comparée à la teneur en eau calculée $w(t)$ (Eq. 3). Pour rendre compte du gradient de teneur en eau au cours de l'essai d'imbibition, l'écart type σ des teneurs en eau mesurées w_{mes} a été estimé par l'équation 4 :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3}\left(w_{mes_i} - w_{moy}\right)^2}{2}} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Points de contrôle	$w(t)$ (%)	w_{mes}			w_{moy} (%)	Ecart type σ
		bas	milieu	haut		
(0)	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93	0,00
(1)	9,94	17,21	10,90	4,73	10,95	6,24
(2)	16,16	21,15	20,53	10,86	17,51	5,77
(3)	22,20	23,02	22,25	23,42	22,90	0,59

Tab. 2. Répartition de la teneur en eau dans l'échantillon au cours de l'imbibition.

Au début de l'imbibition, un gradient de teneur en eau important se met en place avec des teneurs en eau plus importantes à la base de l'échantillon (Tab. 2). Néanmoins, juste avant l'effondrement de l'échantillon, ce gradient devient quasiment nul ce qui indique une homogénéisation de la teneur en eau sur toute la hauteur de l'échantillon (Tab. 2). En d'autres termes, le phénomène d'effondrement intervient à une teneur en eau w_{eff} uniforme au sein de l'échantillon.

Les essais d'imbibition effectués sur des échantillons de billes de verre Φ < 50 µm, fabriqués à une compacité c_0 = 0,59 et à différentes teneurs en eau initiales w_0 de 5%, 10% et 15%, montrent l'influence de la teneur en eau initiale de l'échantillon sur la teneur en eau d'effondrement, ainsi que sur l'amplitude des déformations axiales et radiale (Fig. 5).

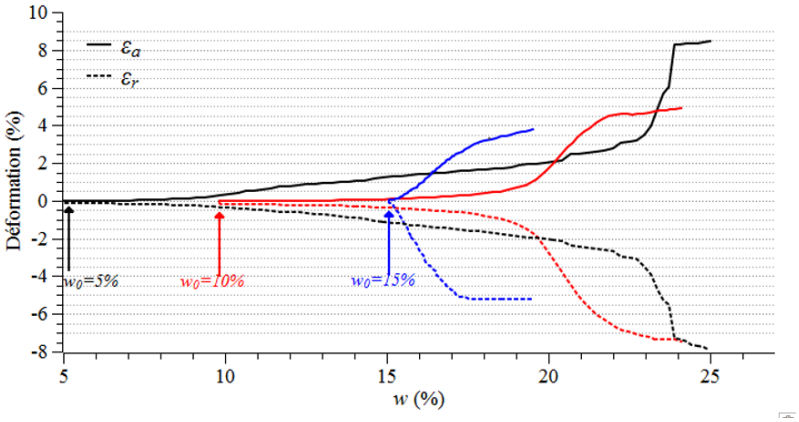

Fig. 5. Effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude et la teneur en eau d'effondrement au cours de l'imbibition.

4. DISCUSSION

Les essais d'imbibition d'eau ont été réalisés, sur des billes de verre, à une contrainte de confinement nulle (σ_3=0 *kPa*) et axiale nulle (σ_1=0 *kPa*) de façon à mettre en évidence les mécanismes d'effondrement d'origine purement hydrique. L'imbibition d'eau dans un milieu granulaire induit des variations dimensionnelles de l'échantillon cylindrique. Les déformations dues à la percolation d'eau prend une forme brutale à partir d'une teneur en eau critique, appelée teneur en eau d'effondrement, pour laquelle l'échantillon perd instantanément sa tenue mécanique (Fig. 4. (a)). Cette perte de tenue mécanique est accompagnée d'une surpression d'eau interstitielle de l'échantillon, due à un réarrangement rapide des billes de verre suite à l'effondrement (Fig. 4. (b)). L'effondrement observé semble résulter en premier lieu du phénomène de coalescence des ponts capillaires entre les billes de verre, ce qui conduit à une baisse brutale de la cohésion du milieu.

Pour des teneurs en eau initiales faibles (w_0 = 5%), on peut noter que la teneur en eau d'effondrement w_{eff} (Fig. 4. (a)), des billes de verre Φ < 50 µm, est pratiquement égale à la limite de liquidité w_L mesurée par la méthode du cône à pénétration (fig. 2. (c)). Cette caractéristique hydraulique du milieu a d'ailleurs été utilisée, par plusieurs auteurs ([1], [2]), pour la caractérisation des sols effondrables. La fusion des ponts capillaires, due à l'imbibition d'eau, à un effet important sur les billes de verre Φ < 50 µm car le nombre de contacts par unité de volume est élevé ce qui montre la sensibilité de ces milieux à l'imbibition.

L'effet de la teneur en eau initiale w_0 sur la teneur en eau d'effondrement w_{eff} est un paramètre important puisque l'on constate, une diminution de la teneur en eau d'effondrement pour des teneurs en eau initiales plus élevées (Fig. 5). On constate également que l'amplitude après l'effondrement est plus élevé quand la teneur en eau initiale est faible (Fig. 5). Cet effet de la teneur en eau initiale est similaire aux résultats de la littérature portant sur des sollicitations mécaniques induisant un effondrement sur des sols de type limoneux sableux [3], et de type limoneux d'une granularité de 2 à 80 µm ([4] et [5]). Ceci montre que la déformabilité des échantillons, de faibles granularités, a une origine essentiellement hydrique.

5. CONCLUSION

Le phénomène d'effondrement observé sur les échantillons de billes de verre résulte de la perte de cohésion du milieu granulaire suite à la fusion des ponts capillaires au cours de l'imbibition. Ce phénomène se manifeste à

une teneur en eau critique où la dépression de l'eau des ponts capillaires diminue suffisamment pour ne plus assurer la tenue mécanique du milieu. L'effet de la teneur en eau initiale a été mis en évidence.
La sensibilité des billes de verre $\Phi < 50$ µm à l'imbibition d'eau peut être expliquée par la particularité microstructurale (nombre de contacts, ponts capillaires, distribution des pores) des échantillons de billes de verre fins $\Phi < 50\ \mu m$. La teneur en eau à laquelle se produit l'effondrement pour une teneur en eau initiale faible $w_0 = 5\%$ est très proche à la limite de liquidité de ces milieux, ce qui ne semble pas être le cas pour les teneurs en eau initiales plus élevées $w_0 = 10\%$ et 15%.

Références

[1] H. J. Gibbs and J, P. Bara, Predicting surface subsidence from basic soils tests, Special Technical Publication N° 322, American Society for Testing and materials (ASTM), 1962, PP 277-283.

[2] T. Ayadat and S. Ouali, Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg, Revue Française de Géotechnique, V83, 1999, PP 1-9.

[3] R. Tadepalli, H. Rahardjo and D. G. Fredlund, Measurement of matric suction and volume changes during inundation of collapsible soils, Geotechnical Testing Journal, V15, 1992, PP 115-122.

[4] P. Delage, Y. J. Cui and P. Antoine, Geotechnical problems related with loess deposits in northern France, Proceedings of International Conference on Problematic Soils, 2005, PP 517-540.

[5] P. Delage, Geotechnical problems due to the collapse of unsaturated soils: the case of loess from northeern France, Journal of Applied Science & Engineering Technology, 2014, PP 17-22.

[6] L. Barden, A. McGow and K. Collins, The collapse mechanism in partly saturated soil, Engineering Geology, V7, 1973, PP 49-60.

[7] T. Ayadat and S. Ouali, La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme d'effondrement des sols, Revue Française de Géotechnique, V83, 1998, PP 73-83.

[8] F. Soulié, M.S. El Youssoufi, F. Cherblanc and C. Saix, Capillary cohesion and mechanical strength of polydisperse granular materials , The European Physical Journal, E21, 2006, PP 349-357.

[9] V. Richefeu, M. S. El Youssoufi and F. Radjaï, Shear strength properties of wet granular materials, Physical Review, E73, 2006, PP 05130.