HAL open science

Processus d'effondrement d'origine hydrique dans les milieux granulaires

Fatima Zahra El Korchi, Frédéric Jamin, Moulay Saïd El Youssoufi

To cite this version:

Fatima Zahra El Korchi, Frédéric Jamin, Moulay Saïd El Youssoufi. Processus d'effondrement d'origine hydrique dans les milieux granulaires. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167669

HAL Id: hal-01167669

https://hal.science/hal-01167669v1

Submitted on 24 Jun 2015

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.

Processus d'effondrement d'origine hydrique dans les milieux granulaires

F.Z. El Korchi [1,*], F. Jamin [1,2], M.S. El Youssoufi [1,2]

[1] *Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 UM2-CNRS, Université de Montpellier, CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5*

[2] *Laboratoire de Micromécanique et d'Intégrité des Structures MIST, IRSN-CNRS - Université de Montpellier, CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5*

[*] *E-mail : fatima-zahra.el-korchi@univ-montp2.fr*

RÉSUMÉ. *On présente une étude expérimentale d'identification et d'analyse du phénomène d'effondrement sur des milieux granulaires, en utilisant un milieu 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 pour différentes granularités du matériau. L'équipement utilisé est un appareil triaxial en non saturé 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 et de la granularité du milieu granulaire sur cette teneur en eau critique.*

ABSTRACT. *We present an experimental study of identification and analysis of the collapse phenomenon in granular media, using a model medium made of glass beads. The collapse potential of a soil appears to depend on several parameters such as the liquid limit, dry apparent density, the initial water content or the presence of fine particles that provide some cohesion of the porous medium. In this study, we investigate the fluid effect during wetting process, without external mechanical loadings other than gravity. Experimental tests at different initial water contents were made for different material granularities. The equipment used is a triaxial apparatus for unsaturated soil of type Wesley Bishop, instrumented with local axial and radial displacement sensors, reporting on some of the kinematics of the sample during imbibition. The experimental results were used to show a critical water content of collapse, and show the effect of the initial water content and granularity of the granular medium on this critical water content.*

MOTS-CLÉS : *Effondrement, imbibition, milieux granulaires, ponts capillaires.*

KEY WORDS: *Collapse, wetting, granular media, capillary bridge.*

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. Les sols effondrables ont généralement une structure ouverte et très poreuse. Les particules solides sont liées par des solutés déposés puis cimentés, et/ou par des ponts capillaires au niveau des contacts. Lorsque ces sols sont exposés à des infiltrations d'eau naturelles (pluies, fluctuations du niveau de la nappe phréatique, etc.) ou induites par l'activité humaine (irrigations excessives, fuites de conduites d'eau, etc.), ils peuvent subir un phénomène d'effondrement, révélateur de leur instabilité.

Afin de mettre en évidence le phénomène d'effondrement des sols, Jennings et Knight [JEN 57] ont proposé le "test du double œdomètre" sur un sol sableux. Suite à un chargement mécanique d'échantillons œdométriques, pour un indice des vides initial donné, ils concluent que l'imbibition d'eau rendait le sol instable et serait susceptible de déclencher le phénomène d'effondrement. Pour quantifier ce risque, Jennings et Knight [JEN 75] ont proposé, en se basant sur des résultats expérimentaux de type œdométrique sous charge constante (200 kPa), cinq niveaux de risque d'effondrement en fonction du pourcentage de déformation verticale due à l'imbibition d'eau.

D'après la classification de Gibbs et Barra [GIB 62], les valeurs de 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 [AYY 99] ont montré l'effet des limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité) sur l'effondrement des milieux granulaires sableux avec différentes proportions de fractions fines. Des essais œdométriques réalisés sur un sable limoneux [TAD 92] 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 [DEL 05] 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. Des essais œdométriques, réalisés sur un sol limoneux à deux masses volumiques sèches différentes [TAD 92], ont montré que la forme de 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 ([DEL 05] et [DEL 14]) ont également montré que la teneur en eau initiale du sol est inversement proportionnelle à l'amplitude de l'effondrement.

Dans le but d'identifier les mécanismes à l'origine de l'effondrement, plusieurs chercheurs ont associé ce phénomène à différents paramètres, notamment une structure ouverte avec une grande porosité du sol [BAR 73], une perte de cimentation, suivie d'une migration des particules fines due à la percolation d'eau ([BAR 73] et [AYY 98]), une réduction de la succion matricielle pendant l'inondation [TAD 92]. D'autres paramètres comme la granularité du sol ou encore les forces capillaires, et leur implication dans l'effondrement d'un milieu granulaire, restent encore peu abordés expérimentalement. Des essais réalisés sur des assemblages de billes de verre polydisperses (compression [SOU 06] et cisaillement direct [RIC 06]), 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.

Dans cette étude, on propose un protocole expérimental permettant d'identifier le phénomène d'effondrement de milieux granulaires modèles, de type billes de verre, soumis à une imbibition d'eau sans chargement mécanique externe autre que la gravité. On s'intéresse essentiellement à l'effet purement hydrique sur l'effondrement. La cohésion des matériaux étudiés est due uniquement aux ponts capillaires existants entre grains, contrairement aux sols naturels où la cimentation peut jouer un rôle important dans la tenue mécanique du milieu. On donne tout d'abord l'ensemble des caractéristiques géométriques, physiques et hydriques, des échantillons de billes de verre choisies. 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 granularité et 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. Matériaux

Pour réaliser cette étude, on a utilisé un matériau granulaire de type billes de verre de granularité poly-disperse. Les billes de verre utilisées sont de forme quasi-sphérique, homogènes et supposées indéformables (figure 1.a)). Pour ce type de matériau granulaire, la cohésion est due essentiellement à la présence de ponts capillaires entre les particules solides. Afin de choisir correctement les diamètres à utiliser pour l'étude, une première étape a consisté en 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. L'essai expérimental 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 correspondent à la teneur en eau de rétention du milieu granulaire (figure 1.b)).

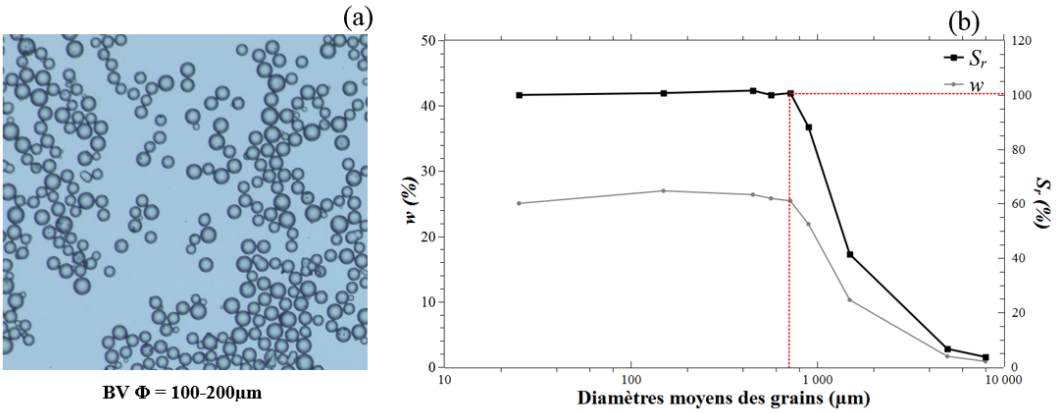

Figure 1. *a) Exemple de photo des billes de verre et b) Teneur en eau de rétention en fonction de la granularité des billes de verre (c = 0,59).*

Pour des billes de verre de granularité inférieure à 800 µm, la figure 1.b) montre que la teneur en eau de rétention correspond à un degré de saturation voisin de 100%. On en conclut que l'effet de capillarité est donc plus important dans ces milieux relativement fins. Dans cette étude, on a choisi quatre granularités de billes de verre, qui sont : Φ < 50 µm, Φ = 80-100 µm, Φ = 100-200 µm et Φ = 300-500 µm.

Les courbes granulométriques des billes de verre choisies (figure 2.a)) ont été déterminées à partir d'une méthode de traitement d'images photographiques. La détermination des limites de liquidité des billes de verre de Φ < 50 µm, Φ = 80-100 µm, Φ = 100-200 µm, dont les valeurs sont présentées dans le tableau 1, a été réalisée avec la méthode du pénétromètre à cône en suivant la norme NF 94-052-1 (figure 2.b)).

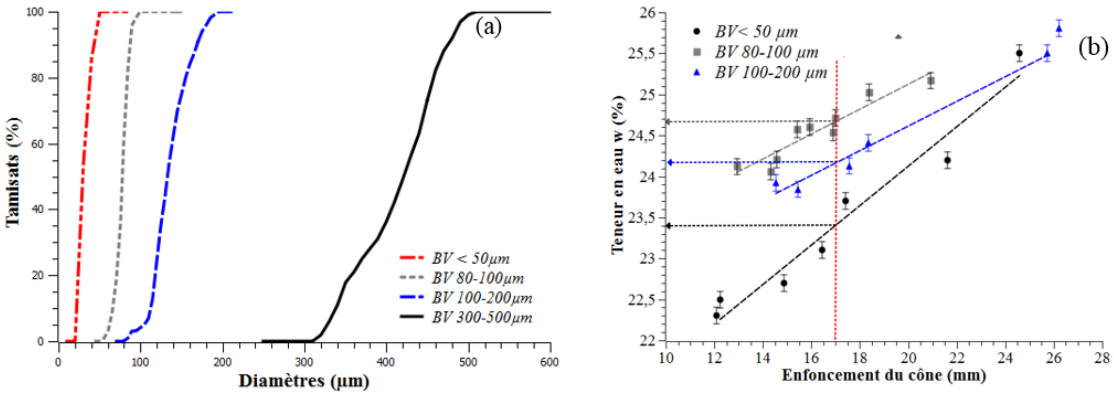

Figure 2. *a) Courbes granulométriques et b) Limites de liquidité des billes de verre utilisées.*

On constate que la limite de liquidité des billes de verre de granularité Φ = 80-100 µm est légèrement supérieure à celle de la granularité Φ = 100-200 µm. Cette différence peut être due à la répartition granulométrique des billes de verre des deux fractions. Pour la granularité Φ = 300-500 µm, les essais de limite de liquidité n'ont pas été effectués car la norme NF 94-052-1 ne concerne que les milieux fins dont le diamètre des grains est inférieur à 400µm.

Les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c des différentes granularités de billes de verre sont présentés dans le tableau 1. Les granularités des billes de verre choisies paraissent uniformes et bien graduées. On a procédé également à la détermination de la masse volumique spécifique de chaque granularité de billes de verre en utilisant la méthode du pycnomètre selon la norme NF P 94-054 (tableau 1).

Diamètre Φ (µm)	Coefficient d'uniformité C_u (/)	Coefficient de courbure C_c (/)	Limite de liquidité w_L (%)	Masse volumique spécifique ρ_s^* (kg/m^3)
< 50	1,55	0,90	23,4	2450 ± 3
80-100	1,20	1,10	24,7	2470 ± 3
100-200	1,25	1,03	24,2	2480 ± 3
300-500	1,27	1,03	-	2500 ± 3

Tableau 1. *Coefficients d'uniformité et de courbure, limites de liquidité et masses volumiques spécifiques des billes de verre.*

3. 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 initiale c_0 = 0,59 et des teneurs en eau initiales 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, présenté à la figure 3, 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.

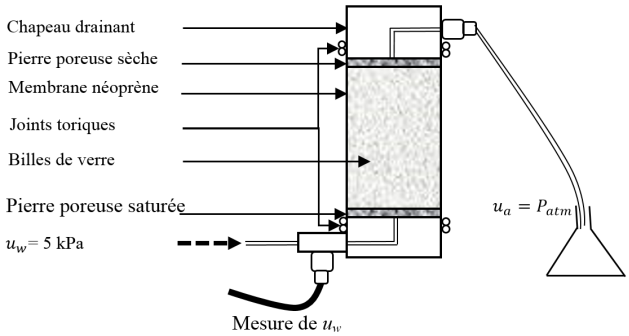

Figure 3. *Schéma de principe de l'essai d'imbibition de l'échantillon.*

Afin de suivre les déformations axiale et radiale de l'échantillon au cours de l'imbibition à l'appareil triaxial de type Bishop Wesley, des capteurs de déplacement de type LVDT (deux axiaux et un radial) ont été mis en place sur l'échantillon de billes de verre comme le montre les figures 4.a) et 4.b).

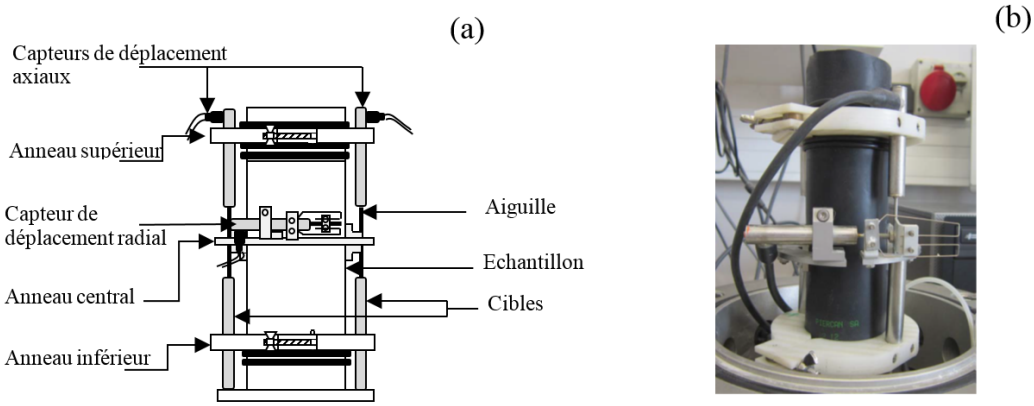

Figure 4. *a) Schéma de principe de montage et b) Photographie d'un échantillon avec les capteurs LVDT.*

À partir des déplacements mesurés par ces capteurs locaux, les déformations axiale ε_a et radiale ε_r sont déduites à partir des relations suivantes :

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad [1]$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{D_0} \qquad [2]$$

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 :

$$w(t) = \frac{m_e + \Delta m_e(t)}{m_s} \qquad [3]$$

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.

Résultats expérimentaux

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 5.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 5.b).

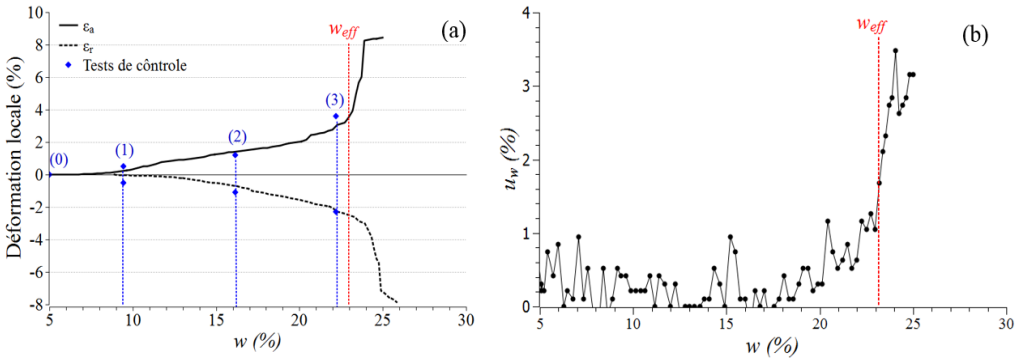

Figure 5. *a) Variation des déformations axiale ε_a et radiale ε_r et b) Évolution de la pression d'eau interstitielle u_w au cours de l'imbibition pour les billes de verre $\Phi < 50$ µm.*

Pendant la remontée de l'eau dans l'échantillon granulaire, des déformations axiale et radiale se produisent progressivement comme le montre la figure 5.a). À partir d'une teneur en eau critique, les 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}. La figure 5.b) montre une augmentation de la pression d'eau interstitielle au sein de l'échantillon à l'approche de la teneur en eau w_{eff}, et donc à l'amorce du phénomène d'effondrement.

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) sur la figure 5.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 $w(t)$ (relation 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 la relation 4 :

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

Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Points de contrôle	$w(t)$ (%)	w_{mes}			w_{mov} (%)	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

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

Le tableau 2 permet de noter qu'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. 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. En d'autres termes, le phénomène d'effondrement intervient à une teneur en eau w_{eff} uniforme au sein de l'échantillon.

Le même type d'essai a été réalisé sur les autres granularités de billes de verre Φ = 80-100 µm, Φ = 100-200 µm et Φ = 300-500 µm fabriquées à une teneur en eau initiale w_0 de 5%. Les résultats des teneurs en eau d'effondrement sont montrés dans les figures 6.a), et les déformations axiales après l'effondrement sont montrées dans la figure 6.b).

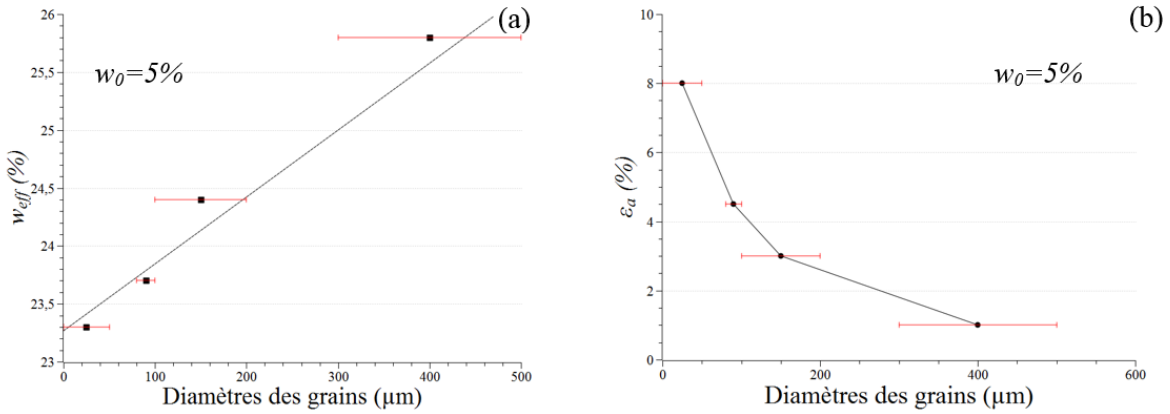

Figure 6. *Effet de la granularité sur a) la teneur en eau d'effondrement w_{eff} et b) la déformation axiale ε_a.*

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 la déformation axiale et radiale (figure 7).

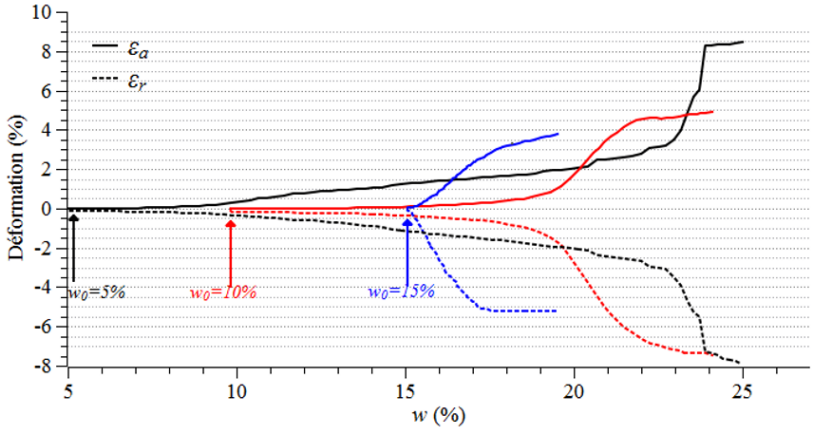

Figure 7. *Effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude et la teneur en eau d'effondrement au cours de l'imbibition pour les billes de verre Φ < 50 µm.*

Le même type d'essai a été réalisé sur les autres granularités de billes de verre Φ = 80-100 µm, Φ = 100-200 µm et Φ = 300-500 µm fabriquées à des teneurs en eau initiales w_0 de 5%, 10% et 15%. Les résultats obtenus sur les teneurs en eau d'effondrement et sur les déformations axiales après l'effondrement en fonction des teneurs en eau initiales sont montrées dans les figures 8.a) et 8.b).

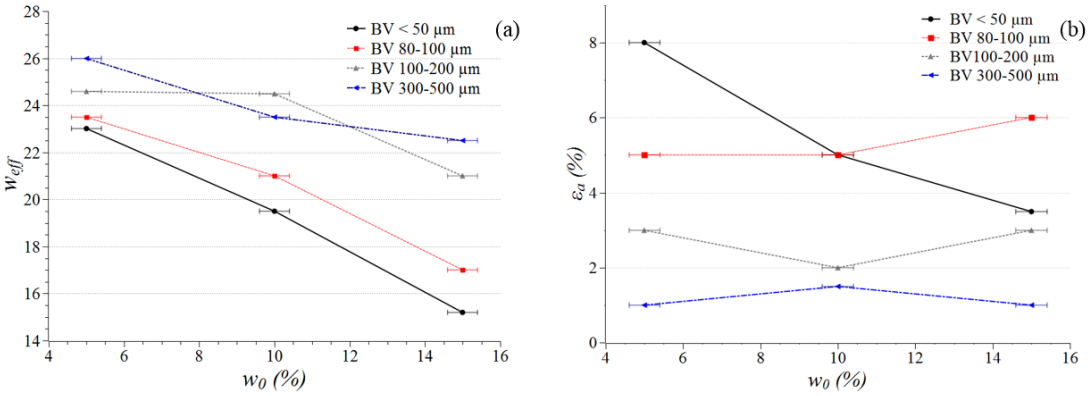

Figure 8. *Effet de la teneur en eau initiale sur a) la teneur en eau d'effondrement et b) la déformation axiale après l'effondrement pour les quatre granularités de billes de verre.*

Ces résultats montrent une forte dépendance de la teneur en eau d'effondrement vis-à-vis de la teneur en eau initiale du milieu granulaire (figure 8. a)) où l'on note une décroissance quasi-linéaire. Cette dépendance est plus prononcée pour les granularités fines. La figure 8. b) montre que la teneur en eau initiale des échantillons affecte peu les amplitudes de déformation axiale pour les granularités supérieures à 50 µm.

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*) 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 prennent 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 (figure 5.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 (figure 5.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} (figure 6.a), des billes de verre Φ < 50 µm, Φ = 80-100 µm et Φ = 100-200 µm, est pratiquement égale à la limite de liquidité w_L mesurée par la méthode du cône à pénétration (figure 1.b). Cette caractéristique hydraulique du milieu a d'ailleurs été utilisée, par plusieurs auteurs ([GIB 62], [AYY 99]), pour la caractérisation des sols effondrables.

Concernant la teneur en eau de l'effondrement et l'amplitude des déformations, notamment pour la déformation axiale ε_a (figure 6.a et 6.b), on constate que la teneur en eau de l'effondrement est d'autant plus faible que la granularité des billes est fine. Par ailleurs, cette progression semble linéaire. En ce qui concerne la déformation axiale ε_a, elle est d'autant plus importante que la granularité est fine. Ces deux résultats montrent ainsi une grande sensibilité de ces milieux à la percolation d'eau. Cette sensibilité vient de la différence de microstructures (nombre de contacts, ponts capillaires, distribution des pores) des échantillons de différentes granularités pour le même volume libre (porosité). Pour la granularité fine (Φ <50µm), les ponts capillaires assurant la cohésion du milieu sont plus nombreux que pour les granularités plus grossières. Ces ponts sont donc plus faciles à faire coalescer avec un minimum de volume d'eau injecté que dans le cas des granularités plus grossières (figure 6.a)), ce qui conduit par la suite à une grande déformation axiale ε_a (figure 6.b)).

Dans les milieux fins, l'effet de la fusion des ponts capillaires est plus important car le nombre de contacts par unité de volume est élevé montrant de nouveau la sensibilité importante de ces milieux à l'imbibition. Pour les granularités grossières, l'effet de la capillarité est nuancé par un effet plus important de la gravité, ce qui les rend moins sensibles à la coalescence des ponts capillaires (figure 6.a) et 6.b)).

Néanmoins, 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, pour toutes les granularités étudiées (Φ < 50 µm Φ = 80-100 µm, Φ = 100-200 µm et Φ = 300-500 µm), une diminution de la teneur en eau d'effondrement pour des teneurs en eau initiales plus élevées (figure 8.a)). Cette diminution est d'autant plus importante pour les granularités fines (figure 7). On constate également que, pour la granularité Φ < 50µm, l'amplitude après l'effondrement est plus élevé quand la teneur en eau initiale est faible (figure 7 et 8.b)). Cet effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude de l'effondrement, est similaire aux résultats de la littérature portant sur des sollicitations mécaniques induisant un effondrement sur des sols de type limoneux sableux [TAD 92], et de type limoneux d'une granularité de 2 à 80 µm ([DEL 05] et [DEL 14]). 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 granularité et celui de la teneur en eau initiale ont été mis en évidence. La forte sensibilité des milieux granulaires fins à l'effondrement peut être expliquée par la particularité microstructurale (nombre de contacts, ponts capillaires, distribution des pores) des échantillons. La teneur en eau à laquelle se produit l'effondrement pour une teneur en eau initiale w_0 = 5% est très proche de la limite de liquidité de ces milieux, ce qui ne semble pas être le cas pour des teneurs en eau initiales plus élevées w_0 = 10% et 15%.

6. Références

[AYY 98] Ayadat T., Ouali S., « La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme d'effondrement des sols », *Revue Française de Géotechnique*, 83: 73-83, 1998.

[AYY 99] Ayadat T., Ouali S., « Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg », *Revue Française de Géotechnique*, 83: 1-9, 1999.

[BAR 73] Barden L., McGow A., Collins K., « The collapse mechanism in partly saturated soil », *Engineering Geology*, 7: 49-60, 1973.

[DEL 05] Delage P., Cui Y. J., Antoine P., « Geotechnical problems related with loess deposits in northern France », *Proceedings of International Conference on Problematic Soils*, 517-540, 2005.

[DEL 14] Delage P., « Geotechnical problems due to the collapse of unsaturated soils: the case of loess from northeern France », *Journal of Applied Science & Engineering Technology*, 17-22, 2014.

[GIB 62] Gibbs H. J., Bara J, P., « Predicting surface subsidence from basic soils tests », *Special Technical Publication N° 322, American Society for Testing and materials (ASTM)*, 277-283, 1962.

[JEN 57] Jennings J. E., Knight K., « The additional settlement of foundation due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting », *Proceeding of the 4th International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, 1: 316-319, 1957.

[JEN 75] Jennings J. E., Knight K., « A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure », *Proceeding of the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering Durban, South Africa 1*, 1: 99-105, 1975.

[RIC 06] Richefeu V., El Youssoufi M. S., Radjaï F., « Shear strength properties of wet granular materials », *Physical Review,* E 73: 05130, 2006.

[SOU 06] Soulié F., El Youssoufi M.S., Cherblanc F., Saix C., « Capillary cohesion and mechanical strength of polydisperse granular materials », *The European Physical Journal*, E 21: 349-357, 2006.

[TAD 92] Tadepalli R., Rahardjo H., Fredlund D. G., « Measurement of matric suction and volume changes during inundation of collapsible soils », *Geotechnical Testing Journal*, 15: 115-122, 1992.