

# EFFONDREMENT DE MILIEUX GRANULAIRES LORS DE L'IMBIBITION D'EAU

F.Z. EL KORCHI<sup>1,2</sup>, F. JAMIN<sup>1</sup>, L. LAKHAL<sup>2</sup>,  
M. EL OMARI<sup>2</sup>, M.S. EL YOUSOUFI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, LMGC-UMR 5508, Université de Montpellier – CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 05, France

<sup>2</sup>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

Cet article présente une étude expérimentale d'identification et d'analyse du phénomène d'effondrement sur des milieux granulaires modèles de type billes de verre. Dans cette étude, on s'intéresse à l'effet purement hydrique par imbibition, donc sans chargement mécanique externe en dehors de la gravité, sur ce phénomène. Des essais expérimentaux à différentes teneurs en eau initiales ont été réalisés à l'aide d'un appareil triaxial de type Bishop Wesley permettant de mesurer des déplacements locaux axial et radial de l'échantillon au cours de l'imbibition. Les résultats expérimentaux montrent l'effet de la teneur en eau initiale et de la granularité du milieu granulaire.

## 1. Introduction

L'effondrement est un phénomène qui intervient dans les sols non saturés avec ou sans contrainte mécanique externe. Il résulte d'un réarrangement important des particules après qu'elles soient inondées.

Dans le but d'évaluer le potentiel d'effondrement d'un sol, plusieurs études se sont intéressées à l'influence de paramètres comme la masse volumique sèche [1], la limite de liquidité ([1] et [2]), la teneur en eau initiale [3] ou encore la présence de fines particules [4].

La teneur en eau et l'indice des vides initiaux ont un effet important sur l'amplitude de l'effondrement selon des études faites sur des sols de type limoneux et sableux selon [3], [5] et [6]. Dans la littérature, le phénomène d'effondrement a été attribué à différents paramètres, notamment :

- une structure ouverte avec une grande porosité du sol [7];
- une perte de cimentation causée par la migration des particules fines due à la percolation d'eau [3], [7];
- une réduction de la succion matricielle pendant l'inondation [6].

L'effondrement est par définition une déformation plastique irréversible. Dans la littérature, plusieurs modèles ([8], [9] et [10]) décrivent le phénomène d'effondrement avec un modèle phénoménologique basé sur une approche hydromécanique.

En mécanique des sols, le comportement des sols granulaires, comme le sable à l'état sec, est similaire au comportement à l'état saturé. Entre ces deux états extrêmes existent divers domaines de teneur en eau souvent nommés : hygroscopique, pendulaire et funiculaire (figure 1).

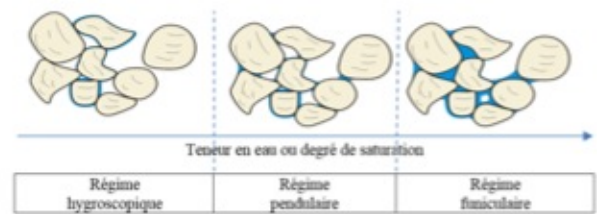


Figure 1. Différents domaines d'eau dans le sol.

Dans le domaine pendulaire, les milieux granulaires sont sensibles à la teneur en eau qui leur procure une cohésion apparente par effet de capillarité. Ce comportement a été observé notamment dans les travaux de Soulié [11] et de Richefeu [12].

## 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, indéformables et homogènes. Pour ce type de matériau granulaire, la cohésion est due uniquement à la présence de ponts capillaires entre les particules solides ([11] et [12]). Les quatre granularités choisies dans cette étude sont :  $\Phi < 50 \mu\text{m}$ ,  $\Phi = 80-100 \mu\text{m}$ ,  $\Phi = 100-200 \mu\text{m}$  et  $\Phi = 400-500 \mu\text{m}$  dont les courbes granulométriques sont présentées à la figure 2.

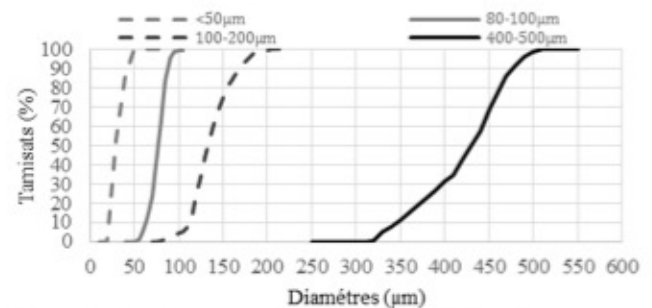


Figure 2. Courbes granulométriques des billes de verre.

Les masses volumiques spécifiques et les limites de liquidité ont été déterminées respectivement selon les normes NF P 94-054 et NF P 94-052-1 et sont présentées dans le tableau 1.

Diamètre $\Phi$ ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique spécifique $\rho_s^*$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Limite de liquidité $w_L$ (%)
$< 50$	$2450 \pm 3$	$23,15 \pm 0,4$
80-100	$2470 \pm 3$	$24,67 \pm 0,4$
100-200	$2480 \pm 3$	$24,20 \pm 0,4$
400-500	$2500 \pm 3$	-

Tableau 1. Caractéristiques des billes de verre.

## 3. Protocole expérimental

Les échantillons de billes de verre sont de forme cylindrique avec une hauteur initiale  $H_0 = 94 \text{ mm}$  et un diamètre initial  $D_0 = 50 \text{ mm}$ . Ces échantillons sont préparés à une compacité  $c = 0,59$  et des teneurs en eau initiales  $w_t$  de 5%, 10% et 15% par mélange d'une masse de billes de verre sèches  $m_s$  et d'une masse d'eau déminéralisée  $m_e = w_t \times m_s$ .

La teneur en eau de fabrication permet de former des ponts capillaires à l'origine de la tenue mécanique des échantillons sous leurs poids propres.

Le principe des essais d'imbibition, présenté à la figure 3, consiste à imposer une faible pression d'eau ( $u_w = 5 \text{ kPa}$ ) à la base de l'échantillon en laissant la pression de l'air constante et égale à la pression atmosphérique ( $u_a = 0 \text{ kPa}$ ) en tête de l'échantillon.

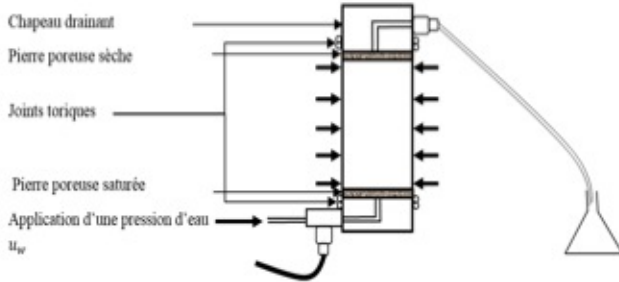


Figure 3. Principe d'imbibition de l'échantillon.

Afin de suivre les déformations axiale et radiale de l'échantillon au cours de l'imbibition à l'appareil triaxial, des capteurs de déplacement de type LVDT (deux axiaux et un radial) ont été mis en place sur l'échantillon de billes de verre. A partir de ces derniers, les déformations axiale  $\epsilon_a$  et radiale  $\epsilon_r$  sont déterminées par les relations suivantes :

$$\epsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (2)$$

où  $\Delta H = H - H_0$  et  $\Delta D = D - D_0$  sont respectivement les variations de hauteur et de diamètre de l'échantillon.

Au cours de l'essai, la teneur en eau moyenne  $w$  au sein de l'échantillon est calculée par :

$$w = \frac{m_e + \Delta m_e}{m_s} \quad (3)$$

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

#### 4. Résultats expérimentaux

Les résultats d'imbibition obtenus sur des échantillons de billes de verre de diamètre  $\Phi < 50 \mu\text{m}$ , fabriqués à une teneur en eau initiale  $w_i$  de 5%, sont reportés sur la figure 4.

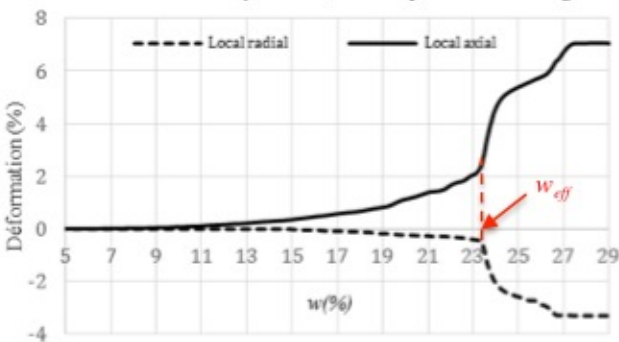


Figure 4. Variation des déformations axiale et radiale au cours de l'imbibition pour les billes de verre  $\Phi < 50 \mu\text{m}$ .

Les courbes montrent que, suite à la remontée de l'eau dans le milieu granulaire, des déformations axiale et radiale se produisent progressivement. En atteignant une teneur en eau critique, les déformations axiale et radiale subissent une variation brutale correspondant au phénomène d'effondrement du milieu. Cette teneur en eau critique est, par la suite, appelée teneur en eau d'effondrement  $w_{eff}$ . La mesure de la pression d'eau interstitielle au cours de l'imbibition (figure 5) montre une augmentation de la

pression au moment de l'apparition du phénomène d'effondrement.

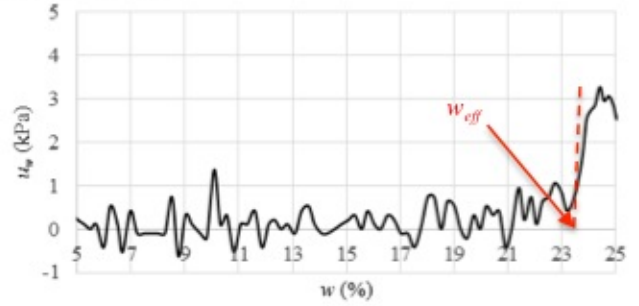


Figure 5. Evolution de la pression d'eau interstitielle au cours de l'imbibition pour les billes de verre  $\Phi < 50 \mu\text{m}$ .

Le même type d'essais a été réalisé sur les autres granularités de billes de verre où les résultats sont montrés dans les figures 6 et 7.

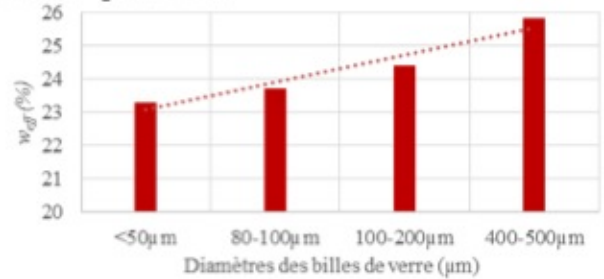


Figure 6. Effet de la granularité sur la teneur en eau d'effondrement  $w_{eff}$  de l'échantillon.

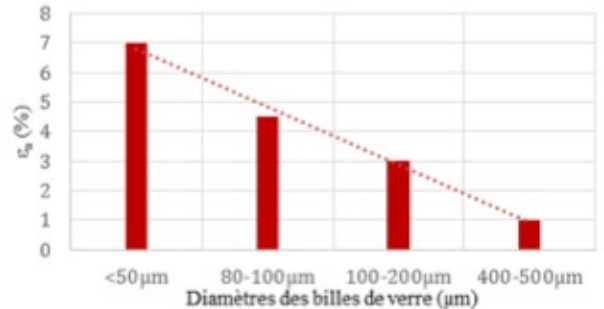


Figure 7. Effet de la granularité sur la déformation axiale  $\epsilon_a$  à l'effondrement de l'échantillon.

Les essais d'imbibition à différentes teneurs en eau initiales  $w_i$  de 5%, 10% et 15% sur quatre granularités de billes de verre montrent une forte dépendance entre la teneur en eau d'effondrement et la teneur en eau initiale du milieu (figure 8). Cette dépendance est plus importante pour les granularités fines (figure 9).

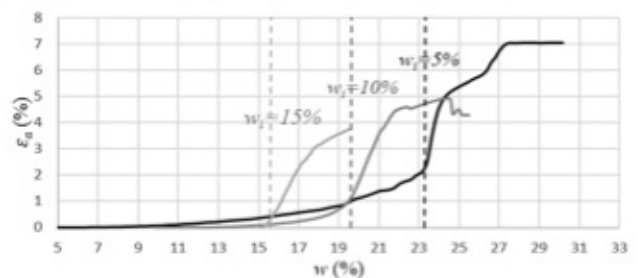


Figure 8. Effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude et la teneur en eau d'effondrement au cours de l'imbibition pour les billes de verre  $\Phi < 50 \mu\text{m}$ .

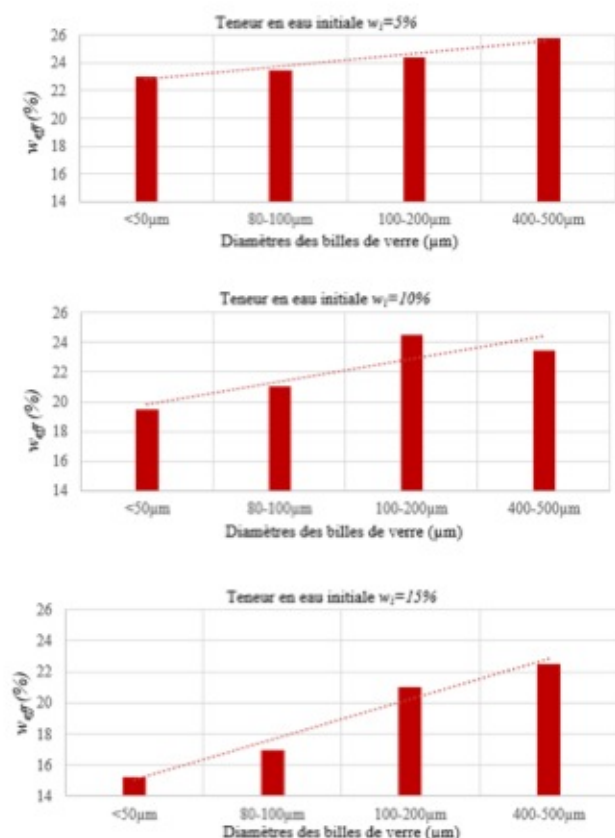


Figure 9. Evolution de la teneur en eau d'effondrement pour les quatre granularités de billes de verre.

## 5. Discussion

Nos essais ont été réalisés à une contrainte de confinement nulle ( $\sigma_3 = 0 \text{ kPa}$ ) ce qui implique que nos résultats sur le phénomène d'effondrement est purement hydrique.

Pour des teneurs en eau initiales faibles ( $w_i = 5\%$ ), on peut remarquer que la teneur en eau d'effondrement  $w_{eff}$  (figure 6) est pratiquement similaire à la limite de liquidité  $w_L$  mesurée par la méthode du cône à pénétration (tableau 1) ce qui a été signalé par [1] et [2]. Concernant l'amplitude des déformations et notamment de la déformation axiale  $\varepsilon_a$ , on constate qu'elle est dotant plus importante que la granularité est fine (figure 7).

L'effet de lubrification est plus important dans les milieux fins où le nombre de contacts est élevé expliquant ainsi la sensibilité importante de ces milieux à l'imbibition, l'effet de la gravité des billes de verre rend les gros grains plus stables contrairement aux milieux plus fins.

Néanmoins, l'effet de la teneur en eau initiale  $w_i$  sur la teneur en eau d'effondrement  $w_{eff}$  est un paramètre important puisque l'on constate, pour toutes les granularités étudiées, une diminution de la teneur en eau d'effondrement pour des teneurs en eau initiales plus élevées (figure 9). Cette diminution est dotant plus importante pour les granularités fines. On constate également que l'amplitude à l'effondrement est plus élevé quand la teneur en eau initiale est faible (figure 8). Cet effet de la teneur en eau initiale sur l'amplitude de l'effondrement est en accord avec les résultats de la littérature portant sur des sols de type limoneux et sableux [3], [5] et [6].

## 6. 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 de la teneur en eau initiale ont été mis en évidence. La forte sensibilité des milieux granulaires fins à l'effondrement peut être expliquer par l'effet de la tailles des pores à l'échelle locales des grains, de la dépression de l'eau interstitielle ainsi que par l'effet du poids propre des grains dans leur stabilité.

## Références

- [1] Gibbs H.J. et Bara J.P., 1962. Predicting surface subsidence from basic soils tests. ASTM STP 322. 277-283.
- [2] Ayadat T., Ouali S., 1999. Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg. Revue Française de Géotechnique. 83: 1-9.
- [3] Delage P., Cui Y.J. and Antoine P., 2005. Geotechnical problems related with loess deposits in northern France. Proceedings of International Conference on Problematic Soils. 517-540.
- [4] Ayadat T., Ouali S., 1998. La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme d'effondrement des sols, Revue Française de Géotechnique. 83: 73-83.
- [5] Delage P., 2014. Geotechnical problems due to the collapse of unsaturated soils: the case of loess from northern France. Journal of Applied Science & Engineering Technology. 17-22.
- [6] Tadeballi R., Rahardjo H. and Fredlund D.G., 1992. Measurement of matric suction and volume changes during inundation of collapsible soils. Geotechnical Testing Journal. 15: 115-122.
- [7] Barden L., McGow A. and Collins K., 1973. The collapse mechanism in partly saturated soil. Engineering Geology. 7: 49-60.
- [8] Alonso E.E., Gens A. and Josa A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique. 40, N° 3: 405-430.
- [9] Maâtouk A., Leroueil S. and La Rochelle P., 1995. Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil. Geotechnique. 45, N° 3. 465-477.
- [10] Geiser F., Laloui L. & Vulliet L., 1997. Constitutive modelling of unsaturated sandy silt. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Yuan (ed.). pp. 899-904.
- [11] Soulié F., El Youssoufi M.S., Cherblanc F. and Saix C., 2006. Capillary cohesion and mechanical strength of polydisperse granular materials. The European Physical Journal. E 21, 349-357.
- [12] Richefeu V., El Youssoufi M.S. and Radjaï F., 2006. Shear strength properties of wet granular materials, Physical Review. E 73, 05130.