

---

---

# Etude expérimentale à l'échelle locale de la coalescence de ponts capillaires dans les sols granulaires

F.Z. El Korchi <sup>1,\*</sup>, F. Jamin <sup>1,2</sup>, M.S. El Youssoufi <sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

<sup>2</sup> MIST Lab., IRSN, CNRS, Univ. Montpellier, France.

\* E-mail : [fatima-zahra.el-korchi@umontpellier.fr](mailto:fatima-zahra.el-korchi@umontpellier.fr)

---

*RÉSUMÉ. L'imbibition d'eau dans les matériaux granulaires induit des changements dans la morphologie des ponts capillaires qui passent d'une forme isolée (entre deux grains), à une forme fusionnée (entre plusieurs grains). Ces changements de morphologie de la phase liquide influencent le comportement mécanique et la résistance de ces matériaux. Dans cette communication, on propose une étude expérimentale de caractérisation du comportement mécanique et de la résistance d'un matériau granulaire dans le régime pendulaire et funiculaire à l'échelle locale. On s'intéresse en particulier à l'effet de l'imbibition et de la coalescence sur la force capillaire entre les grains solides. Les résultats obtenus à l'échelle locale semblent en accord avec le comportement connu des matériaux granulaires humides dans les régimes pendulaire et funiculaire, à l'échelle macroscopique.*

*ABSTRACT. Wetting in granular materials induces changes in the morphology of capillary bridges which pass from an isolated shape (between two grains) to a merged shape (between several grains). These changes in the morphology of the liquid phase impact the mechanical behavior and strength of these materials. In this paper, we propose an experimental study to characterize the mechanical behavior and the strength of a granular material, at the local scale, in the pendular and funicular regimes. In particular, this study focus on the effect of the wetting and the coalescence, on the capillary force between grains. The results obtained on a local scale seem in agreement with the behavior of wet granular materials in the pendular and the funicular regimes, at the macroscopic scale.*

*MOTS-CLÉS : imbibition; régime hydrique; ponts capillaires ; coalescence; matériau granulaire.*

*KEY WORDS: wetting; hydric regime; capillary bridges; coalescence; granular material.*

---

## 1. Introduction

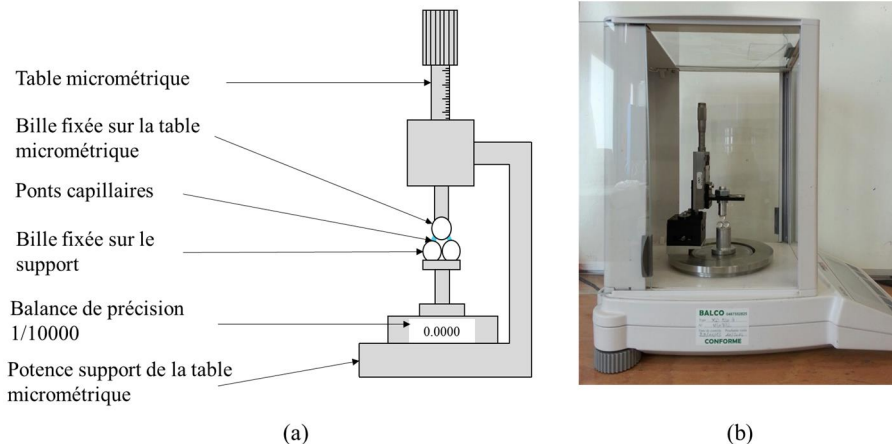
Le comportement des sols granulaires à l'état sec est similaire à celui à l'état saturé d'eau. Entre ces deux états extrêmes existent divers régimes hydriques, souvent nommés : (i) hygroscopique, (ii) pendulaire et (iii) funiculaire. Pour ces régimes, la morphologie de l'eau au sein de l'espace poral prend des formes variées : (i) eau adsorbée, (ii) ponts capillaires isolés et (iii) ponts capillaires coalescés. Ces morphologies influencent fortement le comportement hydromécanique des sols granulaires.

À l'échelle macroscopique ([RIC 06], [SOU 06], [SCH 08], [LU 09]), la présence des ponts liquides dans l'espace poral génère une distribution de forces dites capillaires entre les grains solides voisins. Dans le régime pendulaire, l'augmentation de la densité de ponts liquides isolés induit une augmentation importante de la cohésion par capillarité du sol granulaire. Au-delà du régime pendulaire, ces ponts isolés tendent à coalescer localement en formant des ponts fusionnés entre plusieurs grains voisins ([SCH 08]). Cette coalescence des ponts liquides tend à stabiliser la cohésion par capillarité du milieu granulaire, qui finit ensuite par s'annuler proche de la saturation au fur et à mesure que l'eau remplit l'espace poral ([SCH 08], [LU 09]).

À l'échelle locale ([GRA 11], [HUE 13]), dans le cas de l'évaporation de l'eau dans des triplets et des quadruplets capillaires présentant un pont coalescé au début de l'expérience, les résultats montrent que la force capillaire évolue peu avant la séparation du pont coalescé en plusieurs ponts isolés. À l'apparition de ces ponts isolés entre les grains, la force capillaire chute de façon notable, puis continue à décroître progressivement avec la diminution du volume d'eau des ponts capillaires. Le chemin inverse, correspondant à une augmentation du volume d'eau par imbibition, reste peu étudié expérimentalement. Ceci est dû à la difficulté de reproduire de façon homogène et continue le phénomène de coalescence à l'échelle locale par imbibition d'eau [GRA 11]. Dans le cadre d'une première approche, on présente des résultats expérimentaux nouveaux portant sur la coalescence de ponts capillaires par imbibition incrémentale, à l'échelle locale de trois grains (configuration 2D) et de quatre grains (configuration 3D).

## 2. Matériau et Protocole expérimental

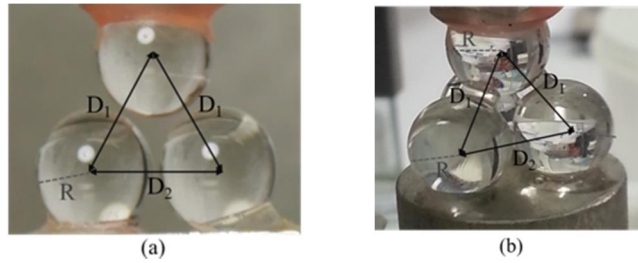
Des essais d'imbibition à l'échelle locale, par ajouts d'incrément de volume d'eau  $V_w$ , ont été réalisés sur des billes de verre de précision de diamètre 8 mm. Le système étudié est constitué de trois ou quatre billes, pour former des triplets ou des quadruplets capillaires. Le dispositif expérimental utilisé est composé d'une balance de précision 1/10000 de gramme, une table micrométrique sur laquelle est fixée la bille en partie haute ainsi qu'un support portant les billes de la base (Figure 1), et reposant sur le plateau de la balance.



**Figure 1.** Illustration du dispositif expérimental utilisé pour l'étude locale (a) et photographie (b).

Des supports spécifiques ont été conçus afin d'ajuster précisément les distances intergranulaires  $D_1$  et  $D_2$  entre les billes pour les cas du triplet capillaire (Figure 2a) et du quadruplet capillaire (Figure 2b). Dans le cas du triplet capillaire, les trois billes sont disposées de telle sorte que leurs centres forment un triangle isocèle dans le plan vertical. Dans le cas du quadruplet capillaire, les quatre billes sont disposées de telle sorte que leurs centres forment un tétraèdre. Dans les deux cas, les billes de la base sont fixées sur le support avec une distance séparant leurs centres notée  $D_2$ , et la bille supérieure est fixée sur la table micrométrique, ce qui permet de fixer la distance notée  $D_1$  entre le centre de la bille supérieure et les centres des billes du support.

De l'eau déminéralisée a été utilisée pour former les ponts capillaires entre les billes. L'apport progressif d'eau dans les ponts se fait à l'aide de micro-seringues de contenances 5  $\mu\text{l}$  et 10  $\mu\text{l}$ , graduées tous les 0,1  $\mu\text{l}$ .



**Figure 2.** Photographies du triplet capillaire (a) et du quadruplet capillaire (b) avec une illustration des distances  $D_1$  et  $D_2$  entre les billes de verre.

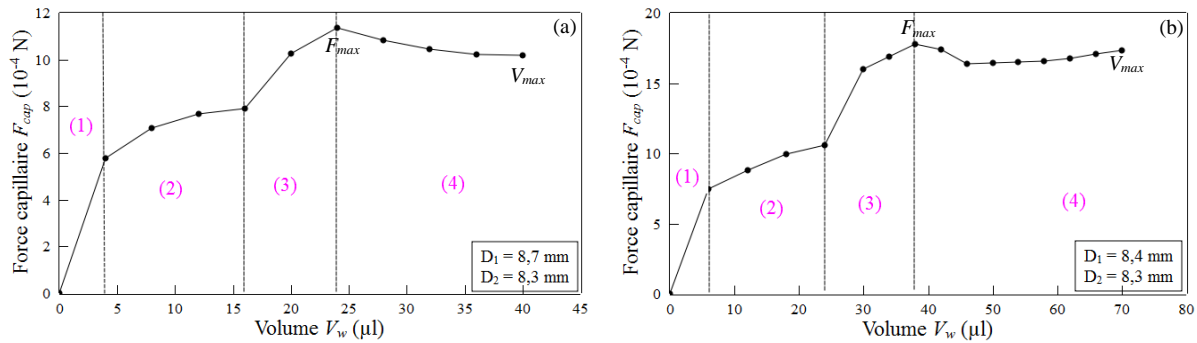
Dans les deux configurations, le protocole expérimental se déroule en trois étapes. Tout d'abord, on forme des ponts capillaires isolés, d'un volume initial  $V_{w0} = 2\mu\text{l}$  chacun, entre la bille supérieure et chacune des billes du support. Ensuite, on procède à l'augmentation du volume d'eau de chacun des ponts isolés par incréments  $V_w = 2\mu\text{l}$  jusqu'à obtenir la coalescence. Enfin, on poursuit l'augmentation du volume d'eau du pont coalescé par incréments  $V_w = 4\mu\text{l}$ . Pour chaque volume d'eau cumulé  $V_w$  présent dans les ponts capillaires ainsi formés, la force capillaire axiale  $F_{cap}$  est obtenue par pesée différentielle en utilisant la relation :

$$F_{cap} = (m_s + m_w - m_a).g \quad (1)$$

où  $m_s$  est la masse du support avec les billes fixées,  $m_w = \rho_w V_w$  est la masse d'eau cumulée (en prenant la masse volumique spécifique de l'eau  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $m_a$  est la masse apparente indiquée par la balance pour chaque volume d'eau injecté et  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$  est l'accélération de la pesanteur. L'incertitude sur la valeur de la force capillaire est estimée à  $\pm 10^{-4} \text{ N}$ . Les pesées sont relevées 5 à 10 secondes après l'ajout de l'eau pour permettre au pont de se stabiliser.

### 3. Résultats expérimentaux

Dans cette communication, on présente uniquement les résultats expérimentaux obtenus pour des distances intergranulaires  $D_1 = 8,7 \text{ mm}$  et  $D_2 = 8,3 \text{ mm}$  pour le triplet capillaire (Figure 2a) et  $D_1 = 8,4 \text{ mm}$  et  $D_2 = 8,3 \text{ mm}$  pour le quadruplet capillaire (Figure 2b). Les tendances obtenues pour d'autres distances intergranulaires  $D_1$  et  $D_2$  sont similaires à celles présentées par la suite. La Figure 3 montre l'évolution de la force capillaire  $F_{cap}$  en fonction du volume d'eau cumulé  $V_w$  dans le cas du triplet capillaire (Figure 3a) et dans le cas du quadruplet capillaire (Figure 3b).



**Figure 3.** Evolution de la force capillaire  $F_{cap}$  en fonction du volume d'eau injecté  $V_w$  dans le cas du triplet capillaire (a) et dans le cas du quadruplet capillaire (b).

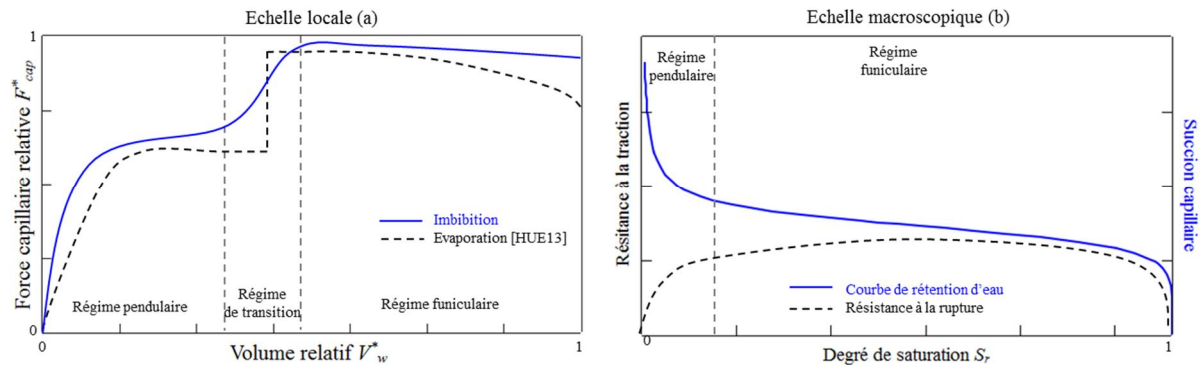
Dans les deux configurations, on peut identifier quatre domaines distincts. Après la formation des ponts liquides isolés (1), la force capillaire augmente légèrement avec le volume d'eau (2). Le phénomène de coalescence se produit ensuite dans un domaine de transition où la force capillaire augmente fortement (3). Après la coalescence des ponts (4), la force capillaire diminue légèrement avec l'augmentation du volume du pont coalescé  $V_w$  pour tendre vers un palier constant.

### 4. Discussion

A l'échelle locale, les essais d'imbibition incrémentale d'eau montrent clairement que l'évolution de la force capillaire en fonction du volume des ponts liquides présente des tendances spécifiques dans les deux cas de ponts isolés et d'un pont unique coalescé. En terme d'allure générale, ces résultats sont comparables à ceux obtenus dans

un essai d'évaporation d'eau [HUE 13]. Néanmoins, il existe une différence notable entre la coalescence des ponts et la séparation d'un pont coalescé en plusieurs ponts isolés. En effet, on observe dans le premier cas une augmentation progressive de la force capillaire au moment de la coalescence alors que, dans le second cas, la séparation du pont coalescé se traduit par une chute brutale de la force capillaire (Figure 4a).

À l'échelle macroscopique, les résultats expérimentaux donnés en fonction du degré de saturation de l'échantillon, montrent une augmentation rapide de la résistance à la rupture dans le régime pendulaire et une stabilisation de cette résistance dans le régime funiculaire (Figure 4b). Ces résultats sont similaires à ceux présentés à l'échelle locale où les régimes pendulaire et funiculaire correspondraient respectivement à la présence de ponts isolés entre grains et à la coalescence des ponts entre plusieurs grains localement. La stabilisation de la résistance à la rupture dans le régime funiculaire serait due à une configuration du pont coalescé dont la géométrie demeure quasi-inchangée.



**Figure 4.** Schématisation de l'évolution de la force capillaire relative  $F_{cap}^* = F_{cap} / F_{max}$  en fonction du volume d'eau relatif  $V_w^* = V_w / V_{max}$  à l'échelle locale en imbibition et en évaporation [HUE 13] (a) et de l'évolution de la succion capillaire et de la résistance à la rupture en fonction du degré de saturation  $S_r$  [LU 09] (b).

## 5. Conclusion

Une étude expérimentale a porté sur l'influence de la coalescence des ponts capillaires sur les interactions mécaniques locales dans les sols granulaires. Les résultats des essais effectués sur des triplets et sur des quadruplets ont montré qu'au cours de l'augmentation du volume d'eau, la force capillaire est générée dès la formation des premiers ponts capillaires, augmente légèrement dans le régime pendulaire, puis plus rapidement pendant la coalescence dans le régime de transition, puis finit par diminuer et tendre vers un palier de stabilisation dans le régime funiculaire. Les résultats obtenus semblent en accord avec les résultats des essais expérimentaux effectués à l'échelle macroscopique par différents auteurs ([RIC 06], [SOU 06], [SCH 08], [LU 09]). Les résultats obtenus à l'échelle locale confortent l'idée que les régimes pendulaire et funiculaire correspondent respectivement à un régime où la phase liquide est dispersée sous forme de ponts liquides isolés entre les grains solides et à un régime où la phase liquide est continue.

## 6. Bibliographie

- [GRA 11] Gras J. P., Approche micromécanique de la capillarité dans les milieux granulaires: rétention d'eau et comportement mécanique. Thèse de doctorat, Montpellier, 2011.
- [HUE 13] Hueckel T., Mielniczuk B., El Youssoufi M. S., « Micro-scale study of rupture in desiccating granular media », *Geotechnical Special Publication GSP 231, Geo-Congress*, San Diego, 3-7 mars 2013, USA, p. 808-817, doi:10.1061/9780784412787.082.
- [LU 09] Lu, N., Kim, T. H., Sture, S., Likos, W. J., « Tensile strength of unsaturated sand », *Journal of engineering mechanics*, 135(12), 2009, p. 1410-1419.
- [RIC 06] Richefeu V., El Youssoufi M. S., Radjai F., « Shear strength properties of wet granular materials », *Physical Review E* 73(5), 2006, 051304.
- [SCH 08] Scheel M., Seemann R., Brinkmann M., Di Michiel M., Sheppard A., Herminghaus S., « Liquid distribution and cohesion in wet granular assemblies beyond the capillary bridge regime », *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20 (49), 2008, 494236.
- [SOU 06] Soulié F., El Youssoufi M.S., Cherblanc F., Saix C., « Capillary cohesion and mechanical strength of polydisperse granular materials », *European Physical Journal*, E 21(4), 2006, p. 349-357.