

---

# Etude expérimentale et numérique de la ségrégation des coulis cimentaires sous cisaillement

Ba Tung PHAM<sup>1</sup>, Alexandre PIERRE<sup>1</sup>, Abdelhak KACI<sup>1</sup>, Jean-Louis GALLIAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Cergy-Pontoise, L2MGC, 5 mail Gay-Lussac, Neuville sur Oise, 95031 cedex, [ba-tung.pham@etu.u-cergy.fr](mailto:ba-tung.pham@etu.u-cergy.fr), [alexandre.pierre@u-cergy.fr](mailto:alexandre.pierre@u-cergy.fr), [abdelhak.kaci@u-cergy.fr](mailto:abdelhak.kaci@u-cergy.fr), [jean-louis.gallias@u-cergy.fr](mailto:jean-louis.gallias@u-cergy.fr)

---

**RÉSUMÉ.** Les matériaux cimentaires peuvent être soumis à de forts taux de cisaillement lors de leur mise en œuvre par voie d'injection, de projection ou d'impression 3D. Cela peut provoquer une ségrégation même si le matériau est stable au repos. Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'étude de ce phénomène. Dans ce travail, nous étudions le potentiel de ségrégation sous cisaillement des coulis cimentaires en exploitant des courbes d'écoulement obtenus à l'aide d'un rhéomètre équipé d'une géométrie de Couette à fond creux. En parallèle, des mesures de masses volumiques des suspensions avant et après cisaillement sont réalisées pour estimer la ségrégation sous cisaillement. Le changement de fraction volumique solide nous permet alors d'identifier la capacité de sédimentation des coulis sous cisaillement. Nous confrontons ces essais expérimentaux aux résultats obtenus en simulation numérique via le logiciel Comsol®. Nous mettons alors en évidence que la sédimentation sous cisaillement est accentuée par l'entrefer inférieur dans la configuration utilisée.

**Abstract.** Cementitious materials can be subjected to high shear rates during their implementation by injection, projection or 3D printing. This can induce a segregation even the material is stable at rest. However, little studies pay interest in researching this phenomenon. In this study, we study the potential of segregation under shearing of the cement grouts by exploiting the flow curves obtained thanks to a rheometer equipped with a Couette-type geometry with a hollow at the bottom. In parallel, density measurements of the suspensions before and after shearing are performed in order to estimate the segregation under shearing. The change in solid volume fraction allows us to estimate the sedimentation capacity under shearing. We confront those experimental tests with the results obtained by a numerical simulation with the software. We then highlight that sedimentation under shear is accentuated by the lower air gap in the configuration used.

**MOTS-CLÉS :** coulis cimentaire, ségrégation, rhéomètre, masse volumique.

**KEY WORDS:** cement grout, segregation, rheometer, density.

---

## 1. Introduction

La ségrégation des matériaux cimentaires à l'état frais est un problème courant dans le domaine de la construction. Ce phénomène peut être accentué par l'utilisation de procédé de mise en place contraignant tel que le pompage, la projection voire l'impression 3D. En effet, des mélanges stables au repos ne le sont pas nécessairement lors de leur mise en œuvre.

Si la ségrégation statique (effet du poids propre) et le ressuage ont déjà été étudiés, des récentes recherches montrent que le cisaillement d'un fluide à seuil comportant des particules induit une instabilité [OVA 12]. La question de la stabilité de matériaux cimentaires sous cisaillement est donc ouverte et encore peu étudiée. [HOA 15] a proposé une méthode de caractérisation de la ségrégation basée sur la mesure de masse volumique après et avant cisaillement qui permet de caractériser la ségrégation dynamique des coulis cimentaires lors de cisaillement avec un rhéomètre équipé d'une géométrie de Couette à fond creux.

Dans cette étude, une série d'essais est réalisée sur des coulis cimentaires pour mettre en évidence l'influence du gap entre le fond du récipient et de la géométrie sur la caractérisation de la ségrégation. En parallèle, la masse volumique dans la partie haute du coulis situé dans l'entrefer a été mesurée avant et après chaque essai pour vérifier la stabilité sous cisaillement de chaque coulis. Les résultats sont ensuite comparés aux résultats obtenus avec des simulations numériques réalisées avec le logiciel Comsol®.

## 2. Matériaux, matériel et méthodes

Le ciment utilisé est un ciment portland CEM I 52.5 N CP2 conformément aux normes NF EN 197.1 et NF P15 318. Nous avons testé deux coulis avec un rapport E/C de 0,45 et de 0,65. La procédure de malaxage est celle utilisée par [HOA 15], qui garantit une homogénéité et une reproductibilité des coulis.

Les essais rhéologiques sont réalisés à l'aide d'un rhéomètre Anton Paar MCR 102 muni d'un mobile cylindrique de 13,33 mm de diamètre et 40,00 mm de hauteur disposant un fond creux et d'un récipient de 14,46 mm de diamètre et de 67,00 mm de hauteur (figure 1). Ce type de rhéomètre est montré d'être convenable pour la mesure des comportements rhéologiques des pâtes cimentaires [WAL 15]. L'entrefer horizontal est de 1,13 mm ce qui est considéré petit selon [WAL 15] et l'entrefer vertical, appelé par la suite gap, peut varier entre 0 et 27 mm. Les parois du mobile et du récipient sont striées pour éviter le glissement du coulis pendant l'essai (figure 1). La caractérisation rhéologique des coulis s'appuie sur le protocole proposé par [HOA 15], composé de deux cycles de cisaillement séparés par une pose de 30s. Chaque cycle inclut un pré-cisaillement à un taux de  $500\text{s}^{-1}$  pendant 120 s, suivi d'une pose de 60 s et une série des paliers en phase descendante entre  $300\text{s}^{-1}$  et  $0,1\text{s}^{-1}$  pendant 360 s. Le protocole est appliqué sur une série de gâchées indépendantes de chaque coulis en faisant varier le gap entre le fond du récipient et le mobile de 1 à 10 mm. Des mesures de la masse volumique du coulis sont également effectuées t avant et à la fin des cycles. Le prélèvement est réalisé sur une hauteur de 20 mm à partir de la surface libre du coulis dans l'entrefer horizontal, à l'aide d'un tube capillaire de 1,06 mm de diamètre.

### 3. Etude numérique

Le logiciel Comsol® est utilisé pour simuler le cisaillement d'un fluide Newtonien entre deux cylindres coaxiaux. La géométrie exacte du mobile et du récipient (incluant les stries) sont implémentées dans la simulation pour différents gaps (Figure 1). En basant sur les résultats expérimentaux des coulis (partie 4.1 et 4.2), les valeurs de viscosités implémentées sont basées basant sur les résultats expérimentaux des coulis (partie 4.1 et 4.2), Les contraintes sont calculées en multipliant les valeurs du couple exercé sur la géométrie à un coefficient donné par le rhéomètre ( $C_{ss} = 19964.3\text{ Pa/Nm}$ ).

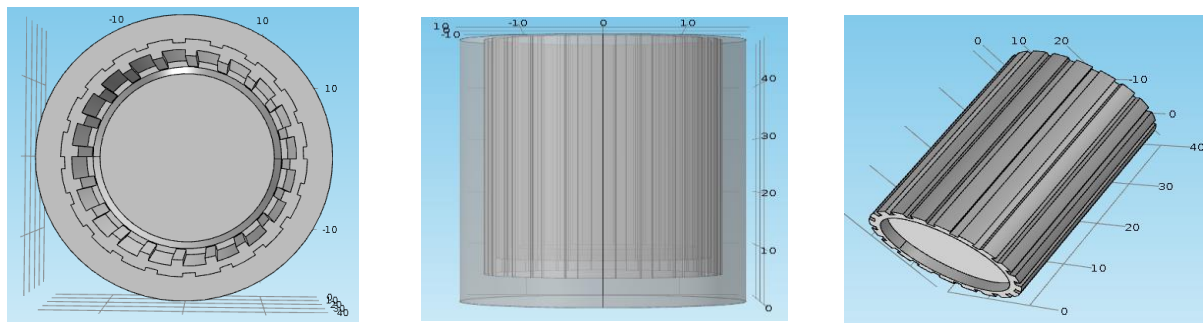


Figure 1. La géométrie du mobile et du récipient simulés dans Comsol®.

## 4. Résultats

### 4.1. Masse volumique avant et après cisaillement

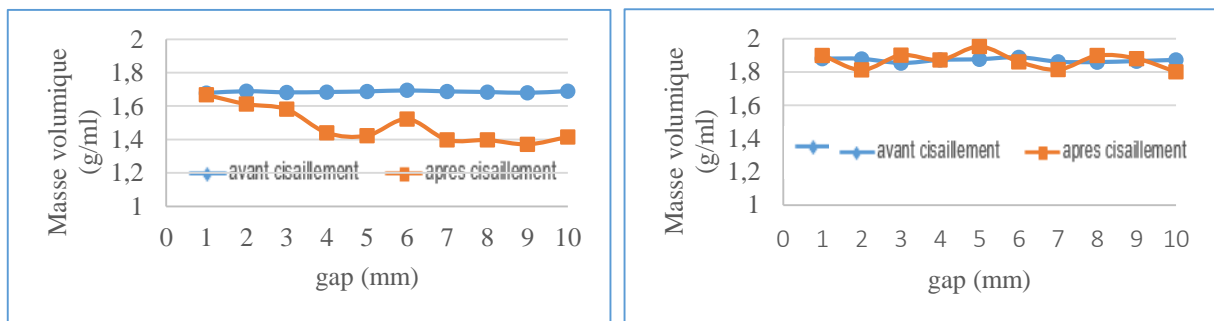


Figure 2. Variation de la masse volumique du coulis dans la moitié haute de l'entrefer en fonction du gap. Coulis avec rapport E/C = 0,65 (gauche) et E/C = 0,45 (droite).

La comparaison de la variation de la masse volumique dans la moitié haute de l'entrefer en fonction du gap des deux coulis (figure 2) permet de constater que le coulis E/C 0,65 présente une diminution significative de la masse volumique sous l'effet de cisaillement à partir d'un gap de 3 mm. Nous observons par contre que la masse volumique du coulis E/C 0,45 après cisaillement reste très proche de celle avant cisaillement. Cette observation met en évidence la ségrégation des particules de ciment pendant l'essai avec le coulis de E/C 0,65. Le phénomène

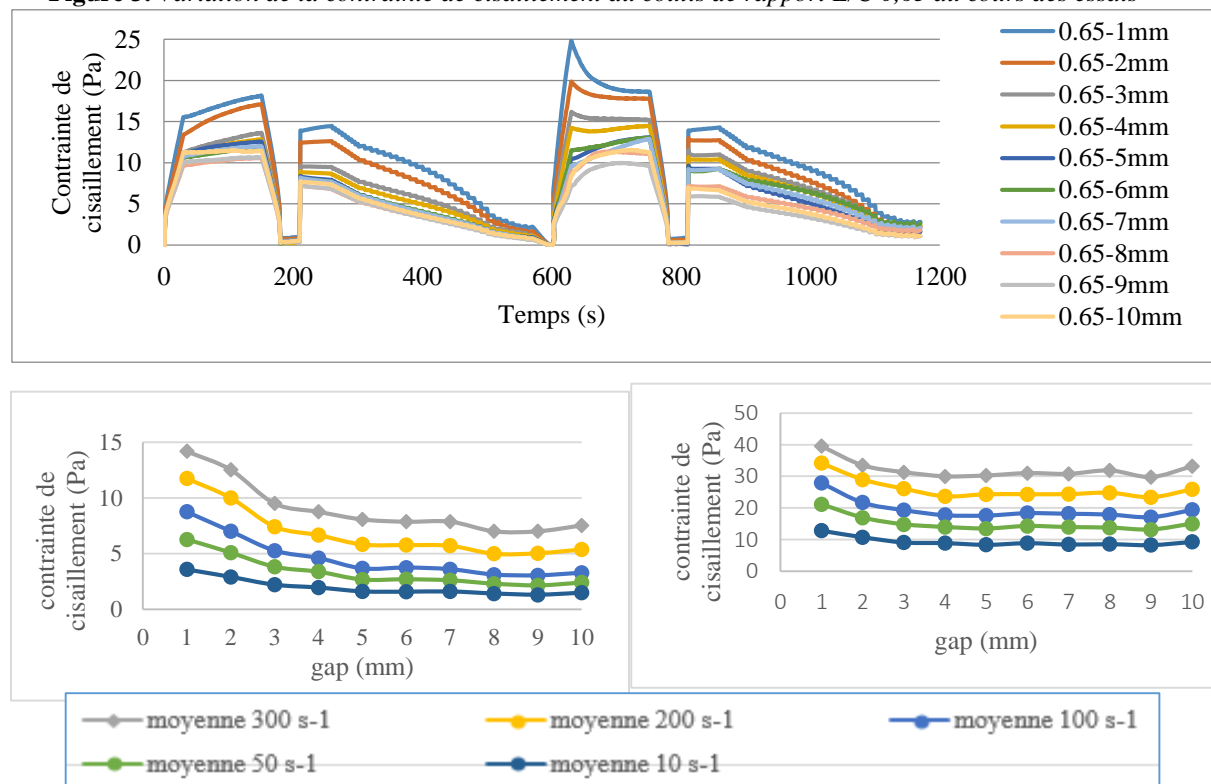
de sédimentation sous cisaillement est amplifié en augmentant le gap car l'espace disponible pour la ségrégation au fond du récipient est plus important. En revanche, le coulis avec E/C 0,45 reste stable sous cisaillement indépendamment du gap. Ces résultats confirment ceux de [HOA 15]. Nous constatons par ailleurs, une certaine fluctuation des valeurs de la masse volumique après cisaillement à cause du volume particulièrement faible du prélèvement (0,26 ml) qui a servi pour la mesure.

#### 4.2. Comportement rhéologiques

La figure 3 montre la variation de la contrainte de cisaillement du coulis ségréatif E/C 0,65 pendant les deux cycles de cisaillement pour les différents gaps étudiés. On observe un comportement rhéologique qui diffère significativement en fonction du gap. En effet, les contraintes de cisaillement diminuent sensiblement avec l'augmentation du gap. Cette diminution est beaucoup plus forte pour les gaps de 1 à 3 mm et s'atténue progressivement jusqu'au gap de 10 mm. Afin de mieux illustrer ce phénomène, la figure 4 présente les valeurs moyennes de la contrainte de cisaillement aux paliers de 300, 200, 100, 50 et 10 s<sup>-1</sup> des deux coulis. On constate en effet que cette diminution de la contrainte de cisaillement avec l'augmentation du gap affecte tous les paliers de cisaillement du coulis E/C 0,65. Cette diminution de la contrainte de cisaillement est à relier directement à la diminution de la masse volumique (figure 2). Les deux phénomènes sont la conséquence directe de la ségrégation dynamique de ce coulis qui, de toute évidence, commence dès le pré-cisaillement lors du premier cycle. Il faut signaler que ces résultats confirment ceux de [HOA 15].

Comparativement au coulis ségréatif, le coulis stable (E/C 0,45) a un comportement différent (figure 4). Pour ce coulis, seuls les gaps de 1 et 2 mm présentent une contrainte de cisaillement plus forte. A partir du gap de 3 mm, la contrainte de cisaillement reste stable indépendamment du gap. Ce comportement particulier pour les faibles gaps n'est pas le résultat d'une ségrégation des particules de ciment car la masse volumique du coulis reste stable avant et après l'essai rhéométrique (figure 2). Ce comportement particulier n'a pas été observé par [HOA 15]. Il est probable qu'il résulte des turbulences locales créées au fond du rhéomètre lorsque le gap est faible (< 3 mm). Les simulations numériques (cf. partie 4.3) vont nous permettre de retrouver le taux de cisaillement local. Il faut noter aussi que la géométrie du rhéomètre utilisée par [HOA 15] présente un entrefer latéral environ deux fois plus grand et un volume dans le fond du récipient 50% plus important que celui utilisé dans cette étude.

**Figure 3.** Variation de la contrainte de cisaillement du coulis de rapport E/C 0,65 au cours des essais



**Figure 4.** Variation de la contrainte de cisaillement moyenne du coulis de rapport E/C 0,65 (gauche) et E/C 0,45 (droite) pour les différents paliers de taux de cisaillement en fonction du gap

Nous concluons de l'analyse précédente que la ségrégation dynamique des coulis doit être identifiée facilement par la comparaison des rhéogrammes avec le gap de 3 mm et avec celui de 10 mm. Dans le cas d'un coulis stable,

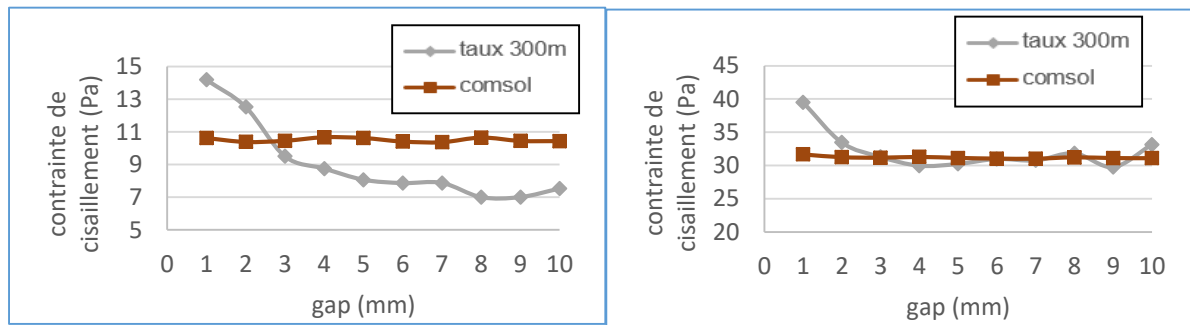
ces deux rhéogrammes sont très proches alors que dans le cas des coulis ségrégatifs les rhéogrammes diffèrent significativement : le rhéogramme avec le gap de 3 mm correspond à un fluide globalement plus visqueux et celui avec le gap de 10 mm à un fluide globalement moins visqueux à cause de la sédimentation des particules de ciment vers le fond du récipient et l'augmentation de la fraction volumique solide en fonction de la hauteur.

### 4.3. Simulation numérique

La figure 5 montre la comparaison de la contrainte de cisaillement en fonction du gap issues des résultats expérimentaux et numériques.

Dans le cas du coulis stable, les contraintes obtenues par simulation sont proches de celles mesurées pour les gaps supérieurs ou égales à 3mm (figure 5 droite). La différence constatée pour les gaps 1 et 2 peut être expliquée par un confinement de l'échantillon et nécessite la prise en compte d'autres paramètres dans la modélisation pour mieux décrire ce comportement.

Par ailleurs, dans le cas du coulis 0,65, la valeur de contrainte moyenne à  $300s^{-1}$  obtenue par simulation est plus élevée que celle trouvée dans les essais si l'entrefer est de 3 mm. LA confrontation de ces résultats confirme la tendance à la sédimentation sous cisaillement précédemment mise en évidence avec les mesures de masses volumiques.



**Figure 5.** Comparaison de la variation de la contrainte de cisaillement moyenne du coulis E/C 0,65(gauche) et du coulis E/C 0,45(droite) au palier de  $300s^{-1}$  en fonction du gap trouvée par les essais et par la simulation

## 5. Conclusion

La ségrégation sous cisaillement des matériaux cimentaires peut affecter les mesures rhéologiques et par conséquent l'identification précise des paramètres rhéologiques (seuil d'écoulement, viscosité). Nous avons montré dans cette étude qu'il est possible d'identifier la ségrégation dynamique en confrontant les mesures rhéologiques et les mesures de masses volumiques dans l'entrefer. Par ailleurs, les simulations numériques ont permis de mettre en évidence l'influence du gap sur l'évaluation de la contrainte dans le cas de coulis plus ou moins sensibles à la sédimentation sous cisaillement. Pour mieux décrire le comportement, en particulier pour les faibles valeurs de gaps, le choix d'une modélisation diphasique peut mieux décrire ce phénomène de ségrégation.

## 6. Bibliographies

- [HOA 15] HOANG Q. G., « Etude de la ségrétabilité des coulis cimentaires sous cisaillement », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2015.
- [HOA 15] HOANG Q. G., "A new methodology for characterizing segregation of cement grouts during rheological tests", *Construction and Buildings Materials* 96: 119-126, 2015.
- [OVA 12] OVARLEZ G., "Shear-induced sedimentation in yield stress fluids", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 177-178, 2012.
- [WAL 15] WALLEVIK O., "Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials", *Cement and Concrete Research* 78 100-109.