
Intérêt d'une sollicitation complémentaire de vibration dans l'extrusion de matériaux à base cimentaire

**Arnaud Perrot* — Yannick Mélinge* — Patrice Estellé* —
Christophe Lanos* ***

** Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Equipe Matériaux et Thermique de l'Habitat, EA 3913, INSA Rennes
20, avenue des buttes de Coesmes, CS 14315, 35043 RENNES Cedex
arnaud.perrot@ens.insa-rennes.fr*

*** Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, Equipe Matériaux et Thermique de l'Habitat, EA 3913, IUT Rennes
rue du clos courtel, 35043 RENNES Cedex*

RÉSUMÉ. De récentes études ont montré l'importance du phénomène de drainage durant l'écoulement d'extrusion des matériaux à base cimentaire. Ce phénomène menant au blocage du process doit être réduit voire supprimé pour assurer un écoulement permanent continu permettant une extrusion « normale ». Nous proposons d'adjoindre à l'écoulement d'extrusion une vibration externe pour réduire les effets de drainage. Une étude de l'effet de cette sollicitation externe sur le comportement rhéologique d'un mélange granulaire à base cimentaire ainsi que sur les écoulements d'extrusion (à vis et à piston) montre le potentiel d'un couplage vibration-extrusion.

ABSTRACT. Recent studies highlight the predominance of the filtration phenomenon during the extrusion flow of firm cement based materials. Such filtration leads to the process blockage and prohibits its application in industrial settings. We propose to add a vibration to ease the extrusion flow. The study of the effect of such external solicitation on the rheological behavior of a firm extrudible cement based paste and extrusion tests (ram and screw extrusions) shows the potential of a vibration/extrusion coupling.

MOTS-CLÉS : Vibration, Extrusion, Filtration, Mortier

KEYWORDS: Vibration, Extrusion, Filtration, Mortar

1. Introduction

L'extrusion de matériaux à base cimentaire impose l'élaboration de mélanges fermes présentant une forte fraction volumique solide [1]. Cela confère à ces suspensions concentrées, dans des conditions de cisaillement telles que celles induites par l'extrusion, un caractère essentiellement plastique frottant propice à la filtration du liquide interstitiel à travers le squelette granulaire [2]. Nos récents travaux mettent en évidence les hétérogénéités induites par l'écoulement (consolidation du matériau dans l'extrudeuse) aboutissant au blocage du process [3]. L'application de ce procédé de mise en forme dans un contexte industriel nécessite donc des ajustements. Deux solutions apparaissent : adapter le process au fluide où adapter le fluide au process. Les travaux récents pour adapter la formulation du fluide au process aboutissent à la formulation de matériaux adjuvantés et ultra-fibrés très onéreux (adjuvantation coûteuse, diminution de la taille de grains, augmentation de la tortuosité par fibrage, ...) [4-5].

Nous nous proposons ici d'adapter le process au fluide en couplant une sollicitation externe de vibration à l'écoulement, ce qui permet théoriquement de transformer localement et ponctuellement le comportement rhéologique et tribologique apparent des matériaux à base cimentaire caractérisés par une forte fraction volumique solide. La vibration est connue pour transformer un régime d'écoulement de type frictionnel en régime lubrifié, et pour diminuer largement le seuil de cisaillement des matériaux à base cimentaire [6-7]. Dans ce travail, nous évaluons les effets d'une sollicitation de vibration sur le comportement rhéologique et tribologique d'un mortier à base cimentaire. Enfin, nous comparons les résultats d'essais d'extrusion réalisés dans des conditions identiques avec et sans sollicitation externe de vibration.

2. Matériaux et Méthodes

2.1. Matériaux

En construisant une équivalence test de compression-extrusion, Toutou [1] a établi empiriquement une formulation optimale de mortier répondant au mieux à tous les critères d'extrudabilité (rendement, capacité de l'extrudeuse, qualité de l'extrudât, ...) pour l'extrudeuse de laboratoire utilisée. Ce mortier est obtenu en couplant un liant de type ciment portland CEM II 32.5R (39% en masse) à d'autres fines possédant différentes distributions granulométriques et qualités hydrauliques : la finite (silicate de calcium anhydre, 11%), le milisil (quartz broyé 3%), la fumée de silice (3%) et un sable de Loire 0-630 μm (44%). La phase fluide du mélange optimum utilisé contient (en rapport massique) : de l'eau (14% de la masse de la fraction solide) et un plastifiant réducteur d'eau, le plastiment 22S SIKA (5,5% de la masse de la fraction solide). Le mélange obtenu permet d'obtenir un matériau dont le

comportement présente un caractère essentiellement plastique, maniable (seuil de 22 kPa).

2.2. Mesures de temps d'écoulement

Un réservoir cylindrique de hauteur 20 cm et de diamètre 8 cm est rempli de 600 g de pâte. Le réservoir est percé, à la base de la surface cylindrique, de 4 orifices par lesquels la pâte vibrée peut s'écouler. Au repos, le seuil de plasticité élevé de la pâte empêche un écoulement au travers de ces orifices. Le réservoir est posé sur une table reliée à un moteur par un excentrique et un jeu de bielles et est guidé en translation par un système de rail en PVC (figure 1). Le moteur (données constructeur) est piloté électroniquement et permet de réaliser une vibration de fréquence f variant de 0 à 50 Hz avec une précision de 0,1 Hz. Le réglage des bielles permet d'assurer une amplitude notée A de 0,3 ; 0,6 et 1,2 cm. Le montage utilisé permet d'assurer les mêmes amplitudes de déplacement pour chaque valeur de la fréquence de vibration. Le paramètre représentatif choisi est le débit massique. On soumet le matériau à une sollicitation de vibration pendant 20s. On pèse alors le matériau restant dans le cylindre. Cette valeur permet de calculer le débit massique moyen.

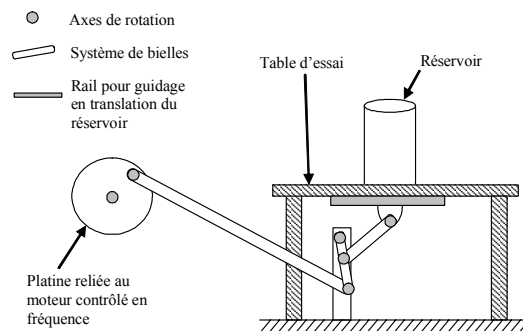


Figure 1. Montage expérimental pour l'étude rhéologique du matériau vibré

2.3. Mesures des seuils par pénétrométrie

Pour les mesures de seuil de cisaillement, le même montage est utilisé mais avec un réservoir non percé. La mesure est effectuée avec une méthode de type pénétrométrie inspiré de la mécanique des sols. Un piston de 25 mm de diamètre est enfoncé manuellement à une vitesse proche d'1 mm/s dans le matériau sur une distance de 5 mm et la force nécessaire à l'enfoncement est enregistrée. Le traitement de l'essai est effectué en considérant le comportement du matériau comme une géosuspension concentrée saturée en eau purement plastique et permet de calculer le seuil de plasticité du matériau. En mécanique des sols, cette mesure correspond à une mesure de cohésion non drainée.

2.4. Essais d'extrusion à piston

L'appareillage comprend un bâti métallique vertical sur lequel est fixé un vérin hydraulique commandé par un moteur pas à pas à courant continu. Le vérin est relié par un jeu de rallonge PVC au piston qui s'ajuste dans la chambre de l'extrudeuse de diamètre 43,3 mm. La vitesse résultante du piston peut varier de 0 à 1 mm/s, avec une précision de 0,001 mm/s. Le déplacement et la force au piston sont mesurés et enregistrés. Une filière présentant un rétrécissement brusque et un diamètre de sortie de 18 mm est utilisée. Un système de vibration est monté sur la chambre d'extrusion. Il permet d'assurer une sollicitation de vibration de fréquence de 50 Hz avec une amplitude de l'ordre du millimètre. Un même essai est effectué avec et sans vibration à une vitesse d'avance de 0,1 mm/s.

2.5. Essai d'extrusion à vis

Une extrudeuse à vis de laboratoire type HANDLE 42502 est utilisée pour étudier le couplage vibration-extrusion dans un contexte de production continu. Schématiquement, l'extrudeuse est composée de deux parties : une zone standard dimensionnée par le constructeur, qui comprend la chambre d'extrusion (diamètre de 80 mm) et la vis de poussée de la pâte et une zone de sortie modulable comprenant la filière (on utilise une filière carrée de section 40x40 mm à rétrécissement brusque). Pour les essais vibrés un mécanisme de vibration (déplacement alternatif horizontal et axial d'une chambre cylindrique) est intercalé entre ces deux zones. Ce système est raccordé à un moteur à courant continu ($N=3000$ tr/min) et permet une translation d'amplitude variant entre 3 et 12 mm. La longueur de la chambre est de 230 mm pour un diamètre de 70 mm. Des essais vibrés et non vibrés sont réalisés à vitesse de rotation de la vis constante.

3. Comportement rhéologique sous vibration

Les mesures de débit massique et de seuil de cisaillement sont complémentaires. L'évolution de ces quantités en fonction de la vitesse de vibration qui s'exprime en m.s^{-1} ($V_{\text{vib}}=2\pi.A.f$) (figure 2 et 3) montre une grande dépendance du comportement du matériau avec la sollicitation de vibration. Pour l'intervalle de fréquence 0-0,1 m.s^{-1} , on voit que le mortier se comporte comme un solide déformable et ne s'écoule pas, même si son seuil décroît avec l'augmentation de la vitesse de vibration. Au-delà de la vitesse caractéristique de 0,1 m.s^{-1} , le seuil continue à diminuer et le matériau commence à s'écouler pour les amplitudes de vibration les plus grandes. Pour des valeurs de vitesse plus importantes, le seuil n'est plus mesurable (< 1 kPa) et le matériau s'écoule sous son propre poids. Les mesures d'écoulement montrent alors une diminution rapide de la viscosité avec l'augmentation de la vitesse. La vitesse de vibration semble donc être un paramètre très influent sur le comportement du matériau.

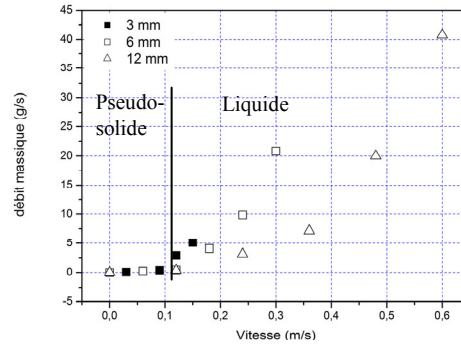


Figure 2. Evolution du débit massique moyen avec la vitesse de la vibration (f variant de 0 à 50 Hz, trois amplitudes de vibration sont utilisées : 3, 6 et 12 mm)

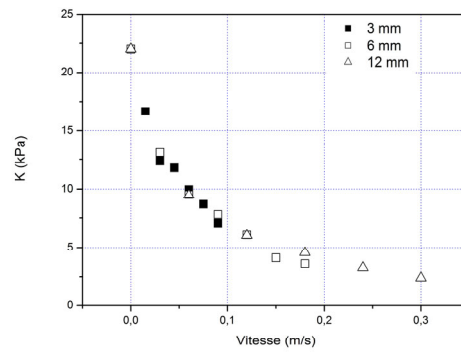


Figure 3. Evolution du seuil de cisaillement K avec la vitesse de la vibration

Ainsi, une courbe maîtresse apparaît reliant le seuil d'écoulement à la vitesse de la vibration (figure 3). Le seuil d'écoulement décroît exponentiellement vers une valeur limite avec l'augmentation de la vitesse de la vibration. Cette relation directe entre seuil d'écoulement et vitesse de vibration est très intéressante car elle décrit clairement l'effet de la vibration. La courbe liant le débit massique à la vitesse de vibration permet d'identifier une valeur de vitesse de vibration au-delà de laquelle le mortier commence à s'affaisser sous son propre poids : $0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Avec une vitesse de vibration plus grande, l'écoulement au travers des orifices apparaît. Cette étude rhéologique permet de cibler un domaine de valeur de vitesse de vibration où le couplage vibro-extrusion semble être en pertinent. Dans cette gamme de valeur, la vitesse de vibration doit être suffisamment grande pour permettre une réduction sensible du seuil de cisaillement de la pâte sans être trop importante pour ne pas induire une perte de la tenue de forme de l'extrudât en sortie de filière.

4. Résultats des essais d'extrusion

4.1. Extrusion à piston

A la vitesse d'avance utilisée (0,1 mm/s), les conditions de filtration de la phase liquide au sein du mélange sont réunies [2-3]. A la vue de la figure 5, la sollicitation de vibration permet de réduire considérablement l'effort d'extrusion. De plus, la diminution de l'effort d'extrusion permet de retarder le moment où l'extrudeuse atteint sa capacité limite.

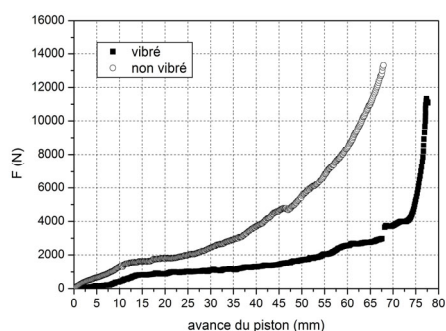


Figure 4. Evolution de l'effort d'extrusion pour une vitesse d'avance du piston de 0,1 mm/s (essai vibrés et non vibrés)

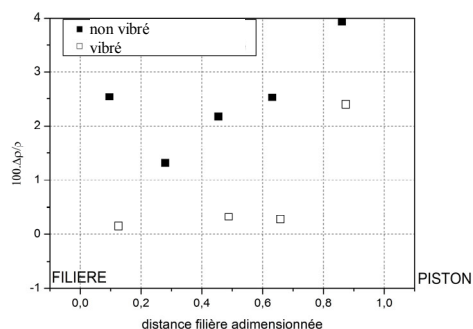


Figure 5. Evolution de la masse volumique du matériau dans l'extrudeuse, en fonction de la position du matériau après une avance de 55 mm du piston

Cette diminution de l'effort d'extrusion est directement liée à la réduction du drainage induite par la sollicitation de vibration. Dans le cas étudié, nous observons toujours l'existence d'un léger drainage dans les conditions vibrées, montrant que les conditions de vibration ne sont pas optimales. La réduction de la filtration du fluide

interstitiel est illustrée sur la figure 6. Après une avance du piston de 55 mm, le matériau restant dans l'extrudeuse est coupé en rondelle centimétrique. La masse volumique de chaque rondelle est obtenue par pesée hydrostatique. Les résultats montrent une forte augmentation de la masse volumique générale due à la filtration de liquide interstitiel (encore plus marquée au niveau du piston et de la filière) dans le cas non vibré. Cette augmentation est nettement contenue en présence de la sollicitation de vibration.

4.2. Extrusion à vis

La campagne d'essais d'extrusion à vis vibrés a été effectuée dans le souci de confirmer les conclusions de l'étude rhéologique. Les essais sont réalisés à une vitesse de rotation de la vis de 5 tr/min qui ne permet pas d'assurer une production continue de matériau dans le cas d'une extrusion sans vibration. Trois vitesses de vibration sont utilisées : 0,38 ; 0,55 et 0,75 m/s (l'amplitude est fixé à 12 mm). L'aspect des éprouvettes (figure 7) et la conservation de l'homogénéité des extrudats sont comparés (figure 8 : masse volumique des extrudats mesurée).

Aussi bien au niveau de l'aspect des extrudats que de l'évolution de la masse volumique, les résultats obtenus confirment l'étude rhéologique. Pour la plus faible vitesse de vibration 0,38 m/s, l'aspect des éprouvettes apparaît fracturé et la masse volumique des extrudats augmentent au fur et à mesure de leur production (drainage). Dans ce cas, l'effet de la vibration n'est pas suffisant et la mise en place d'un process continu est compromise. Dans le cas opposé, pour une vitesse de vibration trop importante 0,75 m/s, les extrudats qui présentent la même masse volumique au cours de l'essai perdent leur tenue de forme à la sortie de filière. L'extrusion, dans ces conditions, est inacceptable. Seule la valeur de vitesse de vibration intermédiaire 0,55 m/s permet une extrusion continue de bonne qualité : la masse volumique du matériau reste constante (extrusion en conditions non drainées) et la surface des extrudats est de très bonne qualité. Au niveau des résistances mécaniques, les éprouvettes réalisées dans les conditions de vibration optimales présentent une contrainte de résistance en compression de 56 MPa et de 15 MPa en traction (mesurée en flexion 4 points). Sans vibration ou moulé, les valeurs obtenues sur la même composition sont 45 MPa en compression et 11 MPa en traction.

L'intérêt et les principes d'utilisation de la vibro-extrusion sont donc ici démontrés.

Vvib = 0,38 mm/s

Vvib = 0,54 mm/s

Vvib = 0,75 mm/s



Figure 6. Aspect de surface des extrudats en fonction de la vitesse de vibration

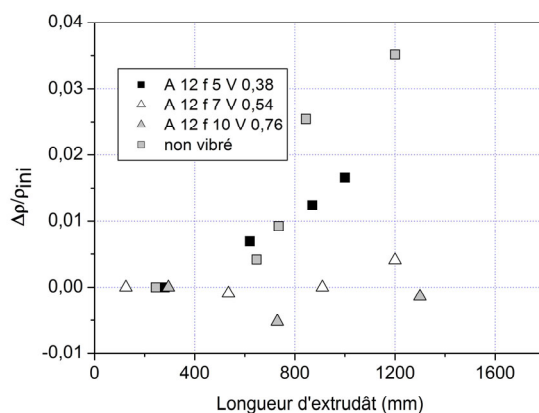


Figure 7. Evolution de la masse volumique des extrudats en fonction de la vitesse de vibration. Vitesse de rotation de 5 tr/min et $A = 12$ mm ($f = 5, 7$ et 10 Hz)

5. Conclusions

En conclusion, nous pouvons dire que l'ajout d'un système vibratoire est une idée prometteuse pour l'optimisation du process d'extrusion de matériaux granulaires denses. Nous avons montré que la vibration réduit l'intensité du drainage voire le supprime totalement. La sollicitation de vibration réduit le frottement intergranulaire par la lubrification des contacts et permet ainsi une baisse de l'effort d'extrusion et repousse les limites d'extrudabilité d'un géomatériau. De plus, la modification de la rhéologie du matériau avec une sollicitation de vibration est identifiée.

6. Bibliographie

- [1] Z. Toutou, N. Roussel, C. Lanos, Cement and Concrete Research 35,1891-1899, 2005
- [2] A. Perrot, C. Lanos, P. Estellé, Y. Mélinge, Rheologica Acta 45, 457-467, 2006
- [3] A. Perrot, C. Lanos, Y. Mélinge, P.Estellé, AERC 2006, Hersoninos, 2006
- [4] R. Srinivasan, D. DeFord, S.P. Shah, Cement Science and Engineering 29 (1), 26-36, 1999
- [5] X. Zhou, Z. Li, Journal of Materials in Civil Engineering 1, 28-35, 2005
- [6] P.F.G. Banfill, RILEM, Glasgow, 319-326, 1996
- [7] F. Decroix, Thèse de doctorat, INSA Rennes, 1999