Modélisation de la consolidation dans l'extrusion des matériaux à base cimentaire

A. Perrot, C. Lanos, Y. Mélinge, P. Estellé

LGCGM équipe Matériaux et Thermique de l'Habitat-INSA/IUT Rennes 20 avenue des buttes de Coesmes CS 14315 35 043 RENNES Cedex aperrot@ens.insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. L'extrusion des matériaux à base cimentaire est un procédé caractérisé par une grande sensibilité à la filtration du liquide interstitielle le matériau en écoulement d'extrusion. Nous proposons de développer un modèle analytique permettant de calculer l'effort d'extrusion de matériaux plastiques frottants telles que les pâtes à base cimentaire étudiées, en prenant en compte les hétérogénéités induites par l'écoulement. Des essais expérimentaux valident notre modèle.

ABSTRACT. Cement-based materials extrusion is a forming process inducing a great sensitiveness of the material to liquid filtration during flow. We propose to develop an analytical modelling for the computation of the extrusion force of a frictional plastic material such as the tested cement-based materials, taking into account the flow induced heterogeneities. Experimental tests validate our modelling.

MOTS-CLÉS : matériaux plastiques frottant, écoulement multiphasique, drainage, consolidation, extrusion, mortier, pâte de ciment.

KEYWORDS: frictional plastic materials, multiphasic flow, fluid filtration, consolidation, extrusion, mortar, cement paste

1. Introduction

L'extrusion de matériaux à base cimentaire est un procédé de mise en forme prometteur pour produire des éléments préfabriqués hautes performances (Qian et col., 2003 ; Stang et Pedersen, 1996). Cependant, de tels matériaux sont sujets à des effets de drainage locaux durant l'écoulement. Ceci se traduit par de fortes évolutions de leurs caractéristiques rhéologiques et tribologiques qui compliquent le modélisation mécanique de leur mise en forme.

Dans de telles conditions, des travaux récents (Toutou et col., 2005) indiquent le comportement plastique frottant prédominant de ce type de suspensions concentrées.

Revue. Volume X – n° x/année, pages 1 à X

Une pâte de ciment et un mortier sont formulés en accord avec les critères d'extrudabilité fournis par les travaux de Toutou (2005). Le but est ici de confronter de tels matériaux à un écoulement d'extrusion. Cette étude reste limitée au cas de l'extrusion axisymétrique imposée par le mouvement d'un piston.

Les résultats de différentes études préliminaires liées à la typologie de l'écoulement sont pris en compte pour modéliser l'effort d'extrusion d'un matériau plastique frottant. Ce modèle doit tenir compte des effets « mémoire » liés à la consolidation du matériau et à son histoire de sollicitations. Le modèle prend en compte la réactualisation des caractéristiques locales de frottement et d'écoulement du matériau avec le mouvement du piston. Un comportement plastique et une loi de frottement de type Coulomb sont utilisés. La validation du modèle est réalisée en confrontant les résultats des simulations à ceux de tests expérimentaux d'extrusion réalisés avec des pâtes de ciment adjuvantées dont le seuil de cisaillement non drainé mesuré au vane-test est de 20 kPa.

2. Présentation du matériau à base cimentaire

2.1 Composition

En construisant une équivalence test de compression-extrusion (par la théorie et confirmée expérimentalement), Toutou (2005) a établi empiriquement une formulation optimale de pâte de ciment adjuvantée répondant au mieux à tous les critères d'extrudabilité (rendement, capacité de l'extrudeuse, qualité de l'extrudât...) pour l'extrudeuse de laboratoire utilisée. Cette pâte de ciment est obtenue en couplant un liant de type ciment portland CEM II 32.5R (70% en masse) à d'autres fines possédant des distributions granulométriques et des qualités hydrauliques différentes : la finite (silicate de calcium anhydre 20%), le millisil (quartz broyé 5%) et de la fumée de silice (5%). La phase fluide du mélange optimum utilisé contient (en rapport massique) : de l'eau (0,22 de la masse solide) et un plastifiant réducteur d'eau, le plastiment 22S de chez SIKA (0,01 de la masse solide). Le mélange obtenu permet d'avoir un matériau dont le comportement présente un caractère essentiellement plastique, maniable.

2.2 Comportement rhéologique et tribologique

D'après Ancey et Coussot (1999), le régime d'écoulement d'une telle suspension soumise à des taux de déformations assez faibles est frictionnel, ce qui rend le matériau très sensible à la pression (filtration du fluide à travers le squelette granulaire). Ce comportement concerne d'autres géosuspensions concentrées tels que les sols et est souvent modélisé par un modèle plastique dépendant de la pression (Cam Clay, Coulomb). Nous choisissons alors le modèle de type Coulomb pour modéliser le seuil de plasticité du matériau.

 $K = K_0 + bP \tag{1}$

Avec K₀, le seuil d'écoulement de référence du matériau et β un coefficient adimensionné. Il faut aussi tenir compte de l'effet mémoire lié à la consolidation du matériau. Le matériau garde les caractéristiques acquises sous la variation de pression ΔP , amenant le matériau au niveau de pression le plus grand qu'il ait connue. Au cours de l'extrusion, la pression est en constante augmentation et la pression instantanée est toujours égale à la pression maximale subie durant l'histoire de contrainte du matériau. Le seuil d'écoulement du matériau s'écrit alors dans ce cas :

$$K = K_0 + bP_{max}$$
(2)

Cette équation se base sur l'hypothèse d'une consolidation quasi-instantanée du matériau. Cette hypothèse sera considérée licite car le temps d'extrusion est élevé devant celui de migration de l'eau.

Sur la figure 1, la consolidation du matériau apparaît quand le matériau est soumis à une contrainte plus importante que ce qu'il avait connu jusque là (chemin BC, CE). La consolidation est alors irréversible et le matériau garde les caractéristiques (composition, indice des vides, seuil de cisaillement) acquises pendant la sollicitation. Au contraire, si le matériau est soumis à une contrainte inférieure à la contrainte maximale, le matériau ne rentrera pas en consolidation (chemin AB et DC). Cette illustration analogue aux bases de la consolidation utilisées en mécanique des sols conditionne la dépendance du comportement du matériau au chemin de contraintes qu'il va connaître dans l'extrudeuse.



Figure 1. Evolution du seuil de plasticité en fonction du chemin de contrainte de matériaux subissant une consolidation quasi-instantanée (conditions drainées). Visualisation de chemin réversible AB, BA, CD, DC et irréversible BC et CE

Afin de modéliser le comportement tribologique du matériau, on se base sur la forme du comportement rhéologique et on adapte la modélisation de coulomb du matériau au frottement paroi/matériau.

 $Kw=K_{w0}+aP_{max}$

(3)

Avec K_{w0} , le seuil de frottement pariétal de référence du matériau et a un coefficient adimensionné. Pour des écoulements d'extrusion, à l'image d'une distribution des contraintes de type Janssen utilisée par Ovarlez et col. (2002) dans le cas de colonne granulaire, nous proposons de lier les seuils de plasticité et de frottement à la contrainte axiale moyenne σ . Donc les équations (2) et (3) deviennent :

| (4) |) |
|-----|---|
| (| 4 |

$$Kw = K_{w0} + \alpha \sigma_{max} \tag{5}$$

Où α et β sont des coefficients adimensionnés.

3. Modélisation de l'effort d'extrusion

L'extrudeuse utilisée correspond à un tube de diamètre D dans lequel est placé le matériau. Un piston se déplaçant à l vitesse V pousse le matériau. Un disque percé de diamètre d est placé en extrémité du tube. Il induit une restriction brusque de diamètre formant la filière. Le calcul de l'effort d'extrusion et les expressions mathématiques sont écrites en utilisant les notations présentées sur la figure 2. Par ailleurs, ce calcul est rendu possible à partir des observations faites sur la typologie de l'écoulement et de la consolidation de la pâte dans une extrudeuse à piston (Perrot, 2006). L'effort d'extrusion est divisé en deux composantes couplées : l'effort de mise en forme plastique en z = 0 et l'effort de frottement pariétal sur la partie en écoulement bouchon.

Lorsque le piston avance, il se produit un frottement à l'interface paroi extrudeuse/matériau. La force de frottement crée un gradient de pression et de contrainte dans l'extrudeuse qui induit une filtration du liquide à travers le squelette granulaire considérée instantanée. A partir de l'équilibre d'une couche cylindrique élémentaire de matériau situé entre z et z + dz, la relation suivante est obtenue :

$$\frac{\pi D^2}{4} \left[-\sigma(z+dz) + \sigma(z) \right] + \pi DK_w(z)dz = 0$$
(6)

Où $K_{\rm w}(z)$ est la contrainte de frottement à la paroi à la position z. L'équation précédente devient :

$$\frac{d\sigma(z)}{dz} = \frac{4K_w(z)}{D}$$
(7)

En combinant les équations (5) et (7), l'équation suivante en $\sigma(z)$ est obtenue :

$$\frac{d\sigma(z)}{dz} - \frac{4\alpha}{D}\sigma(z) - \frac{4K_{w(z=0)}}{D} = 0$$
(8)

Consolidation dans l'extrusion des matériaux à base cimentaire 5



Figure 2. Géométrie d'extrusion et notations

3.1 Etat de contraintes à l'initiation de l'écoulement

Les conditions initiales correspondant à l'initiation de la mise en mouvement du piston sont choisies telles que : $K_{w(z=0)}=K_{w0}$ et $K_{(z=0)}=K_0$. L'équation (8) est résolue afin de trouver le profil de contraintes axiales agissant dans la zone en écoulement bouchon à l'initiation de l'écoulement.

$$\sigma(z) = \frac{K_{w0}}{\alpha} \left[exp\left(\frac{4\alpha z}{D}\right) - 1 \right] + \sigma(0)$$
(9)

Où $\sigma(0)$ est la contrainte axiale agissant à l'entrée de la zone de convergence et qui est nécessaire à la mise en forme plastique du matériau. Nous modélisons cette contrainte au moyen de l'équation de Hill utilisée par Mortreuil (2000). Cette équation relie linéairement la contrainte au seuil de plasticité du matériau.

$$\sigma(0) = \mathbf{K}_0 \left(\pi + 2 \right) \left(1 - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{D}} \right) = \gamma \mathbf{K}_0 \tag{10}$$

3.2 Etat de contrainte durant l'écoulement

Quand l'écoulement commence, la valeur de la contrainte axiale augmente quelle que soit la valeur de z. Par conséquence, la valeur instantanée de $\sigma(z)$ est la valeur maximale $\sigma_{max}(z)$ connue par le matériau en phase de consolidation.

La détermination initiale du profil des contraintes axiales permet de calculer l'effort initial de mise en forme du matériau. Le profil de contraintes axiales dans l'extrudeuse induit une relation entre les propriétés d'écoulement de la pâte et sa position dans l'extrudeuse. Donc, le seuil de plasticité K et la contrainte de frottement K_w sont des fonctions de z (translation du profil des contraintes axiales vers la filière). A chaque instant, le matériau arrivant dans la zone de mise en forme

présente un plus grand seuil de plasticité que la pâte qui vient juste d'être mise en forme. Donc, la contrainte axiale $\sigma(z)$ devient fonction de la position du piston : $\sigma(z,L)$ où L repère la position du piston. On note L₀ la position initiale du piston. La contrainte de mise en forme $\sigma(0,L)$ augmente lorsque L diminue, étant donnée l'arrivée de pâte de plus en plus consolidée dans la zone de mise en forme. L'évolution du seuil de plasticité avec l'avance du piston et calculée en écrivant la dérivée de K (z,L) par rapport à L obtenue par translation du profil des seuils K(z,L) suivant le mouvement du piston :

$$\frac{\partial K(0,L)}{\partial L} = \frac{4\beta K_{w0}}{D} \cdot \exp(\frac{4\alpha}{D}L)$$
(11)

L'évolution de la contrainte de mise en forme est alors facilement déduite :

$$\frac{\partial \sigma(0, L)}{\partial L} = \frac{4\beta \gamma K_{w0}}{D} \cdot \exp(\frac{4\alpha}{D}L)$$
(12)

La contrainte de mise en forme $\sigma(0,L)$ prend la forme suivante en intégrant l'équation (12) entre entre L₀ et L :

$$\sigma(0, L) = \gamma \left[K_0 + \frac{\beta K_{w0}}{\alpha} \left(exp \left(\frac{4\alpha}{D} (L_0 - L) \right) - 1 \right) \right]$$
(13)

On reconnaît dans l'équation (13) le terme correspondant au seuil de plasticité K(0,L) (terme entre crochets) calculé selon l'équation (4) où la variation de σ_{max} est calculée à l'aide du premier terme de l'équation (9) pour z=L₀-L.

L'augmentation de la contrainte de mise en forme provoque une augmentation globale de la valeur de contrainte axiale. La variation de la contrainte de frottement due à cette augmentation doit donc être prise en compte. La valeur de contrainte axiale augmente exponentiellement avec l'avance du piston à cause de l'évolution de la contrainte de mise en forme (l'équation (13)). Cette augmentation de $\sigma(z,L)$ avec la diminution de L affecte les valeurs de l'éffort de frottement. La dérivation de l'équation (9) en fonction de L s'écrit (à l'image de l'équation (12)) :

$$\frac{\partial \sigma(z, L)}{\partial L} = \frac{4\beta \gamma K_{w0}}{D} \cdot \exp(\frac{4\alpha}{D}L)$$
(14)

A partir des équations (5) et (14), on obtient la dérivée par rapport à L de K_w (à l'image de l'équation (13) :

$$\frac{\partial K_{w}(z,L)}{\partial L} = \frac{4\alpha\beta K_{w0}}{D} \cdot \exp(\frac{4\alpha}{D}L)$$
(15)

Cette équation permet de calculer $K_w(z,L)$ qui permet par intégration sur la surface de friction de calculer la part de l'effort d'extrusion induite par la friction sur la longueur L_0 . La contrainte totale d'extrusion $\sigma(L,L)$ agissant au niveau du piston

peut maintenant être calculée en sommant la contrainte de mise en forme $\sigma(0,L)$ à la contrainte induite par les effets de friction :

$$\sigma(L,L) = \gamma \left[K_0 + \frac{\beta K_w}{\alpha} \left[exp\left(\frac{4\alpha}{D}L_0\right) \left(exp\left(\frac{4\alpha}{D}(L_0 - L)\right) - 1 \right) \right] \right]$$
(16)

On reconnaît dans cette équation, la pondération des termes liés à l'évolution du seuil de plasticité K(0,L) visibles dans l'équation (13) par un terme exponentiel conforme à ce qu'induit l'intégration de l'équation (8).

4. Validation expérimentale



Figure 3. Comparaison entre courbes expérimentales et courbes modélisées pour trois extrusion réalisées à V = 1 mm/s, avec un rapport d/D de 0,35, D = 43,3 mm et trois longueurs L_{ini} différentes : 80, 58 et 41,5 mm

Trois extrusions sont réalisées dans des géométries différentes, la vitesse d'extrusion est gardée constante et est égale à 1 mm/s et le rapport d'extrusion est d/D = 0.35. Le diamètre du corps est D = 43.3 mm et trois quantités de matériau sont extrudées. Pour les trois configurations d'extrusion, on s'assure que le matériau est dans le même état initial. Le seuil de plasticité de la pâte de ciment K_0 est mesuré en utilisant un scissomètre et est égal à 20 kPa. Le paramètre de friction interne β est mesuré au moyen du test de compression simple et est égal à 0,53 (Toutou, 2004). La contrainte initiale de frottement à la paroi est mesurée à l'aide de l'essai de back extrusion et est égale à $K_{w0} = 15$ kPa (Perrot, 2006). A ce stade, les paramètres α et L_0 ne sont ni identifiés ni mesurés. Ils sont donc déterminés pour obtenir le meilleur ajustement du modèle aux courbes expérimentales liant l'effort d'extrusion à la position du piston dans l'extrudeuse L. Les courbes expérimentales et de modélisation de l'effort d'extrusion en fonction de la longueur de matière restante dans l'extrudeuse sont comparées (figure 3). Les courbes modélisées (obtenues avec

mêmes valeurs de K, K_w , β et α pris égal à 1 et valeurs proches de L₀ autour de 40 mm) sont très proches des courbes expérimentales.

5. Conclusion

Cette étude a permis de développer une méthode de modélisation de l'effort d'extrusion des matériaux plastiques frottants soumis à un phénomène de filtration du fluide interstitielle considérée instantanée en se basant sur l'observation de la typologie de l'écoulement bi-phasique à l'intérieur de l'extrudeuse. Le modèle a été confronté aux résultats d'extrusion obtenus avec une pâte de ciment adjuvantée très concentrée. Le modèle et les résultats expérimentaux s'ajustent de manière satisfaisante. Des améliorations aux modèles doivent être effectuées en particulier pour quantifier le débit du liquide interstitiel. Un couplage hydro-mécanique serait le plus à même de traduire le phénomène de filtration interstitielle et de mieux prendre en compte l'importance de la vitesse relative fluide/solide tout en intégrant des zones s'assouplissant comme constaté dans notre étude. Ce travail constitue cependant un premier pas très encourageant dans la modélisation de l'effort d'extrusion des fluides plastiques frottants drainants.

6. Bibliographie

- Qian X., Zhou X., Mu B., Li Z., « Fiber alignment and property direction dependency of FRC extrudates », *Cement and Concrete Research*, vol. 33, 2003, p. 1575-1583.
- Stang H., Pedersen C., «HPFRCC Extruded pipes », *Maetrials for the new millennium*, Ken P. Chong, Vol. 2, 1996, p. 261-270.
- Toutou Z., Roussel N., Lanos C., « The squeezing test, a tool to identify firm cement based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability », *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, p. 1891-1899.
- Ancey C., Coussot P., « Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes », *Comptes Rendus de l'académie des Sciences de Paris*, vol. 327, 1999, p. 515-522.
- Ovarlez G., Fond C., Clément E., « Overshoot effect in the Janssen granular column : a crucial test for granular mechanics », *Phys. Rev. Lett*, vol. E67, 2002.
- F.X. Mortreuil, C. Lanos, M. Laquerbe, A model for recombining clay paste plastic flow in dies, XIIIth International Congress on Rheology, vol. 3, British Society of Rheology, Cambridge, 2000, 400-402
- A. Perrot, C. Lanos, P. Estellé, Y. Mélinge, Caractérisation rhéologique et tribologique d'un materiau viscoplastique à l'aide d'un essai de back extrusion, à paraître, 2006
- A. Perrot, C. Lanos, Y. Mélinge, P. Estellé, Visualisation de la consolidation durant l'extrusion des matériaux à base cimentaire, AUGC 2006

Consolidation dans l'extrusion des matériaux à base cimentaire 9