Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons

Thi Lien Huong Nguyen* - Nicolas Roussel* - Philippe Coussot **

** Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
58 boulevard Lefèbvre, F-75015 Paris
thi-lien-huong.Nguyen@lcpc.fr ; nicolas.roussel@lcpc.fr

*** Laboratoire des Matériaux et Structures du Génie Civil*
2 allée Kepler, F-77420 Champs sur Marne
philippe.coussot@lcpc.fr

RÉSUMÉ. *Dans une première phase, l'écoulement et l'arrêt d'un fluide à seuil dans un canal horizontal non ferraillé sont étudiés dans ce travail. Une corrélation entre la longueur de l'écoulement L ou le rapport $h_2/h1$ entre les épaisseurs de l'écoulement aux extrémités du canal et le rapport de seuil d'écoulement sur densité est proposée. La forme théorique d'un écoulement au moment de l'arrêt a été corrélée avec des résultats expérimentaux obtenus sur des écoulements de suspensions de Carbopol Ultrez 10. L'approche analytique proposée peut prédire la capacité d'un fluide à seuil tel que le béton à remplir un coffrage horizontal non ferraillé. Dans une deuxième phase, une quantification expérimentale de l'influence d'un ferraillage élémentaire vertical sur l'écoulement en canal est considérée. Une perte de niveau de l'écoulement est observée systématiquement due à la présence du ferraillage. Une relation linéaire entre la perte de niveau de l'écoulement, le seuil d'écoulement du matériau et les caractéristiques du ferraillage a été proposée et validée sur des résultats expérimentaux sur des suspensions de Carbopol.*

ABSTRACT. *In this paper, the flow and flow stoppage of a homogeneous yield stress fluid in a bounded channel without steel bars are investigated. A relation linking the spread length L or the ratio between the thicknesses of the deposit at the extreme sides of the channel h_2/h_1 with the yield stress/specific gravity ratio was proposed. The obtained theoretical shape of the sample at stoppage is then compared to experimental results in the case of Carbopol Ultrez 10 suspensions. The proposed theoretical approach proves to be able to predict the capacity of a yield stress fluid to fill a formwork without steel bars. Furthermore, an experimental quantification of the influence of the steel bars is considered. A difference in thickness is systematically recorded due to the presence of the steel bars. A linear relation between the thickness difference, the yield stress and the characteristics of steel bars was proposed and validated on experimental results obtained on Carbopol suspensions.*

MOTS-CLÉS : *béton frais, rhéologie, seuil d'écoulement, canal, Carbopol.*

KEYWORDS: *fresh concrete, rheology, yield stress, channel, Carbopol.*

1. Introduction

La caractérisation de la capacité à s'écouler des bétons à l'état frais afin de prédire la mise en œuvre du matériau sur chantier ou en usine de préfabrication a fait l'objet de nombreuses études durant la dernière décennie (Roussel N. et Coussot P., 2006 ; Coussot P. et Roussel N., 2006). Les difficultés à résoudre sont nombreuses : nous sommes face à un écoulement tridimensionnel à surface libre d'un fluide non-Newtonien au sein d'obstacles constitués par les barres d'acier. Si le phénomène de blocage des granulats au niveau des ferraillages est écarté dans un premier temps, une mauvaise mise en œuvre peut être causée par le comportement de fluide à seuil du béton. En effet, lorsque la contrainte de cisaillement devient égale ou inférieure à la valeur de seuil du matériau, le béton s'arrête de s'écouler dans le coffrage. Si la densité d'armatures dans le coffrage est importante, le béton peut, à cause de son seuil, ne pas franchir certaines zones ferraillées. Par conséquent, pour prédire la capacité à s'écouler du matériau dans une géométrie connue telle que celle de dalles ou de poutres, il est nécessaire d'être capable de prédire ce phénomène en fonction de paramètres d'entrée comme le seuil d'écoulement du matériau et les caractéristiques des obstacles. Tout d'abord, l'écoulement et l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil homogène dans un canal semi-infini sont étudiés. Si la présence des ferraillages est écarté, l'écoulement en canal non ferraillé peut être considéré comme une version Cartésienne de celui dans les essais d'affaissement et d'étalement. Roussel dans (Roussel et al., 2005) et (Roussel et Coussot, 2005) a corrélé la forme de l'écoulement à l'arrêt dans ces essais et le seuil d'écoulement du matériau. L'objectif de ce travail est de proposer une corrélation analytique similaire pour l'écoulement en canal horizontal. Dans une deuxième partie, l'influence de la présence d'un ferraillage élémentaire vertical sur l'écoulement est considérée.

2. Ecoulement en canal

Les effets de l'inertie sont supposés négligeables. Nous considérons que le matériau testé est homogène et reste homogène au cours du temps (pas de ségrégation des particules ou, de manière générale, d'hétérogénéité induite par l'écoulement). Sa loi de comportement est de type Bingham ou Herschel Bulkley. Par ailleurs, au contact avec les parois (le fond et les parois latérales), le tenseur de contrainte se simplifie en un scalaire : une contrainte de cisaillement. En supposant que le matériau adhère à la paroi, au moment de l'arrêt, la contrainte de cisaillement exercée sur ces couches limites atteint la valeur de seuil du matériau. Le bilan des forces exercées sur un élément infiniment court (Fig.1) peut être écrit. Il relie la densité ρ et le seuil d'écoulement du matériau τ_0, l'épaisseur de l'écoulement à l'arrêt h(x) à une abscisse x et la largeur l_0 du canal:

$$\rho g h(x)\frac{dh(x)}{dx} = -\tau_0 - 2\tau_0 \frac{h(x)}{l_0} \qquad [1]$$

Dans le cas d'un milieu infini, [1] devient :

$$\rho g h(x)\frac{dh(x)}{dx} = -\tau_0 \qquad [2]$$

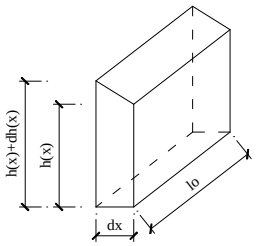

Figure 1. *Elément de matériau à l'équilibre*

Cette relation est similaire à la relation obtenue sur un écoulement d'étalement (Roussel et Coussot, 2005). En posant $A = 2\tau_0 / \rho g l_0$, [1] s'écrit :

$$Ax = h_1 - h(x) + \frac{l_0}{2} LN\left[\frac{l_0 + 2h(x)}{l_0 + 2h_1}\right] \text{ avec } h_1 = h(x=0) \qquad [3]$$

Selon le volume et le seuil d'écoulement du matériau testé, deux cas peuvent être observés : la longueur de l'écoulement peut être inférieure (Fig. 2a) ou égale à la longueur du canal (Fig. 2b).

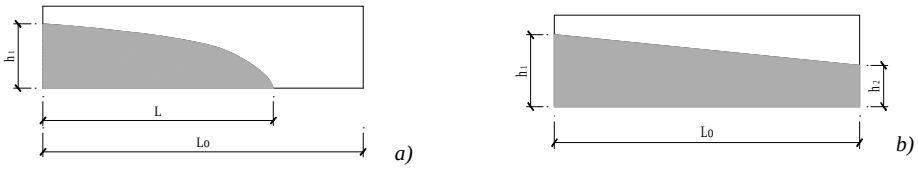

Figure 2. *Ecoulement en canal ; a)Cas L<L_0 ; b) Cas L=L_0*

– Cas a : L<L_0

Le volume de l'échantillon testé peut s'écrire:

$$V = l_0 \int_0^{h_1} x dh = \frac{l_0^3}{4A}\left[LN(1+u_1) + \frac{u_1(u_1-2)}{2} \right] \text{ avec } u_1 = 2h_1/l_0 \qquad [4]$$

Cette équation permet de calculer h_1 pour un volume connu V. La longueur de l'écoulement au moment de l'arrêt peut être déterminée selon la formule suivante :

$$L = \frac{h_1}{A} + \frac{l_0}{2A} LN\left(\frac{l_0}{l_0 + 2h_1} \right) \qquad [5]$$

Avec un même volume de matériau testé, un fluide de seuil d'écoulement faible s'écoule plus loin qu'un fluide dont le seuil est important. Cette relation permet de prédire la longueur de l'écoulement lorsque le seuil du matériau est connu.

– Cas b : $L=L_0$

L'expression reliant les épaisseurs de l'écoulement à l'arrêt (h_1 à x = 0 et h_2 à x = L_0) avec le seuil d'écoulement du matériau testé s'écrit :

$$L_0 = \frac{h_1 - h_2}{A} + \frac{l_0}{2A} LN\left(\frac{l_0 + 2h_2}{l_0 + 2h_1} \right) \qquad [6]$$

Considérons des écoulements d'un même volume testé dans une même géométrie, plus le seuil d'écoulement du matériau est élevé, plus la différence entre les épaisseurs de l'écoulement aux extrémités est importante. Rappelons que l'épaisseur de l'écoulement d'un fluide Newtonien (de seuil nul) serait constante dans le coffrage. En estimant approximativement le volume total de l'échantillon par $V = L_0 l_0 (h_1 + h_2)/2$ et en introduisant $r = h_2/h_1$ et $V' = V/L_0/l_0^2$, on obtient :

$$4V'\frac{1-r}{1+r} - LN\left(\frac{1+r+4V'}{1+r+4rV'} \right) = \frac{2AL_0}{l_0} \qquad [7]$$

Cette corrélation permet de prédire le rapport r pour un fluide de seuil connu et donc le remplissage du coffrage.

4. Etudes expérimentales

4.1. *Description du matériau testé*

Des suspensions de Carbopol Ultrez 10 ont été utilisées comme fluides à seuil homogènes. A la vue des données expérimentales dans la littérature, une concentration de 0,3 % de Carbopol a été choisie afin d'obtenir un matériau stable,

ayant un seuil d'écoulement suffisamment grand et évoluant peu au cours du temps (Ketz et al., 1988). La fabrication des suspensions de Carbopol comprend deux étapes : la dispersion des poudres de polymère et la neutralisation de la solution obtenue. La poudre de Carbopol a été incorporée progressivement dans de l'eau distillée sous agitation pour assurer une bonne dispersion et un mouillage complet des particules de polymère. La solution obtenue a ensuite été neutralisée par de la soude NaOH 18 % sous agitation en prenant grand soin de faire disparaître les bulles d'air. Finalement, les produits ont été laissés en repos à 25°C pendant 2 jours. Les suspensions de Carbopol utilisées dans cette étude ne présentent ni de caractère thixotrope ni d'évolution irréversible. Comme le montrent la superposition des courbes de montée et de descente obtenues à l'aide d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux (Fig. 3a) et la superposition des courbes d'écoulement à différentes échéances (Fig. 3b). Les suspensions de Carbopol étudiées ont des seuils d'écoulement compris entre 9 et 140 Pa. Des suspensions initiales ont été diluées dans de l'eau distillée à différentes fractions massique pour obtenir de nouvelles suspensions de seuils d'écoulement plus faibles, tout en respectant le seuil minimum prévenant la sédimentation des inclusions (Roussel N.[a]).

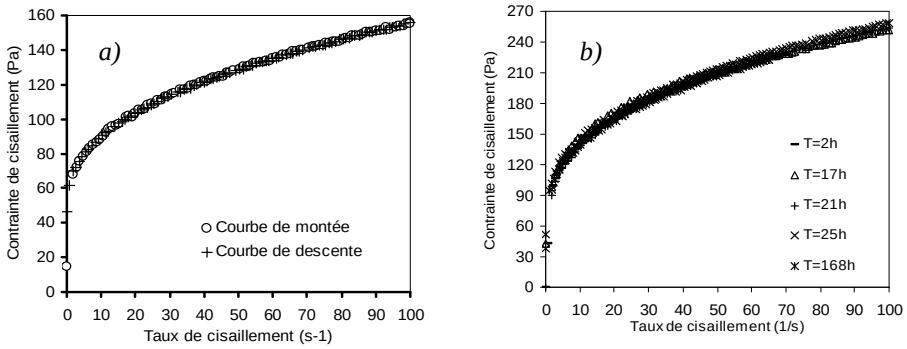

Figure 3. *a) Courbes d'écoulement à taux de cisaillement imposé en balayage croissant et décroissant ; b) Courbes d'écoulement à différentes échéances*

4.2. Manipulations

– Mesure du seuil : Le seuil d'écoulement des suspensions de Carbopol a été déterminé indépendamment au rhéomètre HAAKE VT550 équipé d'une géométrie de type Vane (HAAKE FL10). La mesure suit la procédure décrite par Nguyen et Boger (Nguyen et al., 1985) avec une vitesse de rotation de 0,4 rad.min^{-1}.

– Essai en canal non ferraillé : Le protocole d'essai suivant est répété pour chaque mesure : Un volume de 6 litres de matériau est prélevé dans un seau pré-marqué. Le contenu du seau est vidé lentement dans le canal horizontal. Deux minutes environ après l'arrêt de l'écoulement, l'épaisseur du dépôt est mesurée en

utilisant une technique d'analyse d'image. Le canal utilisé dans nos essais est constitué de plexiglas transparent de façon à visualiser la forme de l'écoulement. Des photos sont prises à travers une paroi latérale, un projecteur est posé à l'autre côté du canal pour obtenir de façon net le profil réel. La quantité de pixels est comptée pour obtenir les valeurs d'épaisseur à une position quelconque.

– Essai en canal ferraillé : Le protocole d'essai est similaire au cas précédent, sauf que, dans ce cas, un ferraillage élémentaire vertical est ajouté. Les ferraillages élémentaires utilisés ont tous un même diamètre de barres d'acier de 14 mm mais différents écartements entre les barres (18,5mm ; 25mm et 35,5mm).

5. Résultats et discussions

Premièrement, il est montré que l'approche analytique proposée pour l'écoulement en canal non ferraillé est capable de prédire la forme à l'arrêt d'un fluide à seuil en fonction des valeurs de seuil d'écoulement, de densité et de volume testé. Cette approche peut prédire la longueur L de l'écoulement (cas $L<L_0$) et les épaisseurs h_1 et h_2 de l'écoulement aux extrémités du canal (cas $L=L_0$) (Fig. 4).

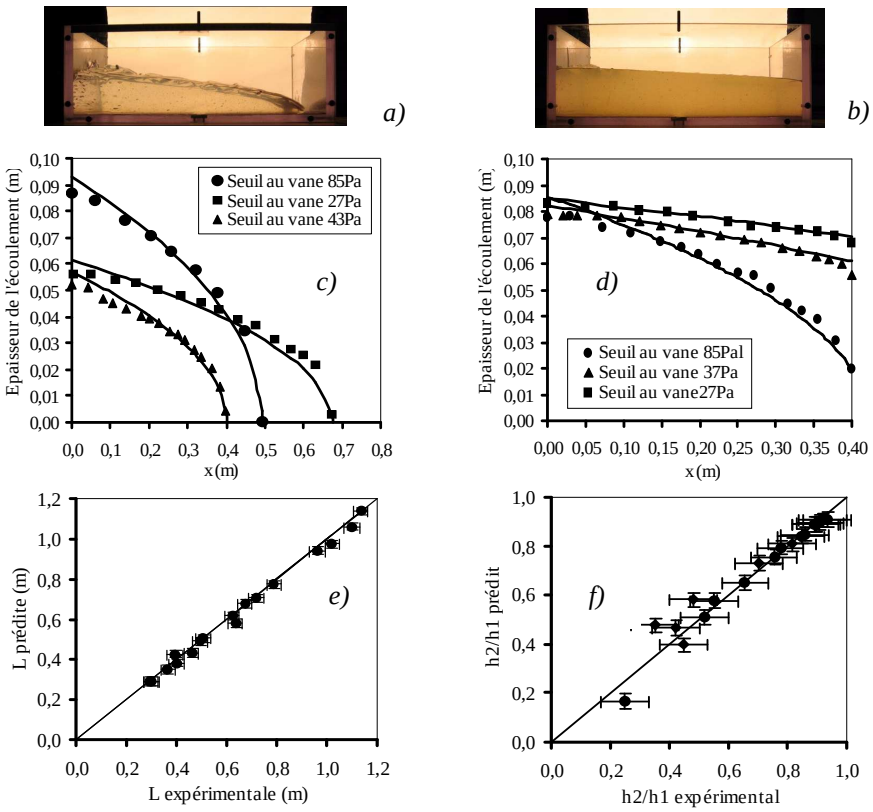

Figure 4. *a) et b) Photos pour l'obtention des profils réels des écoulements en canal ; c) et d) Profils prédits (ligne continue) et expérimentaux (points) ; e) et f) Confrontation des résultats analytiques et expérimentaux*

Deuxièmement, lorsqu'un matériau homogène s'écoule au travers d'un ferraillage élémentaire vertical, une perte de niveau localisée au passage du ferraillage est systématiquement observée. Plus le seuil d'écoulement du matériau testé est élevé, plus la perte de niveau mesurée est importante. Par ailleurs, il est montré dans le paragraphe précédent que le niveau du fluide diminue dans le canal non ferraillé, c'est à dire même s'il n'y a pas d'obstacle au sein de l'écoulement. En distinguant cette "perte de niveau naturelle", la perte de niveau due au ferraillage élémentaire peut être calculée comme la différence entre la perte de niveau total mesurée expérimentalement et la perte de niveau naturelle.

En effet, la variation de niveau (ou d'épaisseur) de l'écoulement localisée au ferraillage crée un gradient de pression local proportionnel à $\rho g dh_{fer}$ (voir Figure 6a). Ce gradient de pression génère une contrainte de cisaillement entre les barres d'acier. Lorsque le matériau s'arrête de s'écouler, c'est parce que cette contrainte de cisaillement est devenue égale au seuil d'écoulement du matériau. Considérons un ferraillage de diamètre *a* et d'écartement entre les barres δ; à l'arrêt de l'écoulement, le bilan des forces exercées sur un élément de volume entre deux barres s'écrit :

$$\delta \times dh_{fer} = \frac{\tau_0}{\rho g} f(a) \qquad [8]$$

où *f(a)* est une fonction du diamètre *a* des barres d'acier du ferraillage.

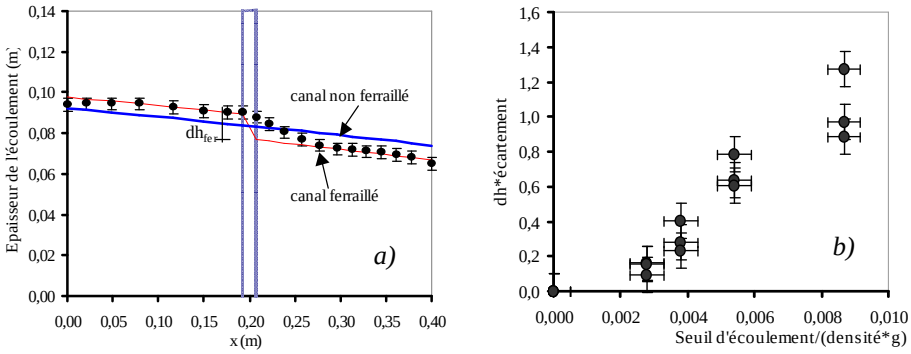

Figure 6. *a)Profils expérimentaux de l'écoulement à l'arrêt en canal ferraillé et non ferraillé; b) Corrélation des résultats expérimentaux*

Un fluide Newtonien de seuil nul ne présente aucune perte de niveau localisée au ferraillage. En traçant les valeurs de $\delta \times dh_{fer}$ en fonction de τ/ρ, une relation linéaire est effectivement obtenue (cf. Fig.6b). Cependant, les résultats expérimentaux font apparaître l'existence d'une valeur de seuil d'écoulement en dessous de laquelle le fluide peut s'écouler à travers le ferraillage sans présenter de perte de niveau.

5. Conclusions

Une analyse théorique de l'écoulement et de l'arrêt d'un fluide à seuil dans un canal horizontal non ferraillé a été proposée dans cet article. La confrontation des données prédites analytiquement sur des écoulements de suspensions de Carbopol Ultrez 10 avec les résultats mesurés expérimentalement valide les corrélations analytiques proposées. Nous sommes capables de prédire la capacité d'un fluide à seuil à remplir un canal horizontal non ferraillé.

Une quantification expérimentale de l'influence d'un ferraillage élémentaire vertical sur l'écoulement en canal a été également considérée. Une relation préliminaire entre le seuil d'écoulement du matériau et les caractéristiques du ferraillage a été proposée et vérifiée par les résultats expérimentaux sur des suspensions de Carbopol. De nouveaux essais expérimentaux sur d'autres tailles des barres d'acier sont nécessaires pour compléter l'ensemble des données expérimentales. De nouveaux ferraillages sont en cours de fabrication. Le but final de cette étude est de prédire la capacité d'un fluide à seuil à remplir un canal horizontal ferraillé en fonction du seuil d'écoulement du matériau et des caractéristiques des ferraillages. En fin, dans une troisième partie, des billes de verre seront ajoutés aux suspensions de Carbopol pour étudier les conditions de blocage des plus gros grains du béton au passage des ferraillages.

Bibliographie

Coussot P., Roussel N., « Quantification de la thixotropie des matériaux cimentaires et de ses effets », *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, n° 1, 2006, pp. 45-63.

Ketz R.J., Prud'homme R.K., Graessley W.W., "Rheology of concentrated microgel solutions", *Rheologica Acta*, vol. 27, n° 5, 1988.

Nguyen Q.D., Boger D.V., « Direct yield stress measurement with the vane method », *Journal of Rheology*, n° 29, 1985, p. 335-347.

Roussel N.[a], « A theoretical frame to study stability of fresh concrete », Accepté pour publication dans *RILEM Materials and Structures*.

Roussel N., Stefani C., Le Roy R. « From minicone test to Abrams cone test : mesurement of cement based materials yield stress using slump test », *Cement and Concrete Research*, n° 35, 2005, p. 817-822.

Roussel N., Coussot P., « “Fifty-cent rheometer” for yield stress measurements: from slump to spreading flow », *Journal of Rheology*, n° 49 (3), 2005, p. 705-718.

Roussel N., Coussot P., « Ecoulements d’affaissement et d’étalement : modélisation, analyse et limites pratiques », *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, n° 1, 2006, pp. 25-44.