

Influence du comportement rhéologique des coulis cimentaires sur leur écoulement au cône de Marsh

Viet-Hung NGUYEN

Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, EA N°4114 - Université de Cergy-Pontoise, 5 Mail Gay-Lussac, Neuville sur Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France

RESUME. La présente étude est consacrée à la liaison entre les deux méthodes de caractérisation rhéologique des coulis cimentaires : la mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh et la rhéométrie. Une approche semi-analytique permettant de déterminer le temps d'écoulement des coulis cimentaires considérés comme des fluides de Herschel-Bulkley est proposée. Elle est établie en premier lieu sur la base d'hypothèses simplificatrices et corrigée ensuite sur la base de modélisations numériques. L'approche proposée présente un écart inférieur à 12% par rapport à la modélisation numérique et a été vérifiée de manière satisfaisante expérimentalement sur plusieurs coulis cimentaires de différentes compositions avec un écart inférieur à 25%. Elle permet de montrer que le modèle de Bingham très largement utilisé dans la littérature ne peut décrire de manière satisfaisante le comportement rhéologique des coulis cimentaires que dans le cas où l'exposant n obtenu avec le modèle de Herschel-Bulkley est compris entre 0.65 et 1.20.

MOTS-CLÉS : Coulis cimentaires, Cône de Marsh, Herschel-Bulkley, Bingham, Rhéologie

ABSTRACT. The present study is devoted to the connection between the two methods of rheological characterization of cement grouts: Marsh cone and the rheometry. A semi-analytical approach allowing to determine the flow time of cement grouts considered as Herschel-Bulkley fluids has been proposed. It is established initially on the basis of simplifying assumptions and then corrected on the basis of numerical simulation. The proposed approach presents a deviation lower than 12% compared to numerical simulation and has been verified satisfactorily experimentally on various cement grouts of different compositions with a deviation lower than 25%. It allows to show that the Bingham model largely used in the literature can only describe satisfactorily the rheological behavior of the cement grouts if the exponent n obtained with the Herschel-Bulkley model lies between 0.65 and 1.20.

KEYWORDS : Cement grouts, Marsh cone, Herschel-Bulkley, Bingham, Rheology

1. INTRODUCTION

Les coulis cimentaires sont très souvent utilisés pour la stabilisation des sols meubles, pour le renforcement des massifs fissurés ou pour le remplissage des gaines de précontrainte. Ils doivent posséder une fluidité suffisante pour réussir leur mise en place par injection. Le cône de Marsh est un outil normalisé [NF P 18-507, 1992] simple et efficace pour caractériser globalement cette fluidité. Le principe de caractérisation est de mesurer le temps d'écoulement d'un volume donné du coulis à travers un ajutage. Plus le temps est court, plus le coulis est fluide.

En laboratoire, le comportement rhéologique du coulis peut être étudié de manière plus complète à l'aide des rhéomètres. De nombreuses études dans la littérature ont montré que les coulis cimentaires sont des fluides viscoplastiques présentant un seuil d'écoulement [Legrand, 1982]. Parmi différents modèles rhéologiques simples tenant compte de l'existence du seuil d'écoulement, le modèle de Herschel-Bulkley caractérisé par trois paramètres : seuil d'écoulement τ_0 , consistance K et exposant n qui relie la contrainte τ à la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ par la relation suivante a été reconnu comme

un des modèles les plus adaptés pour décrire le comportement rhéologique des coulis [Atzeni et al., 1985] :

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n & \text{si } \tau > \tau_0 \end{cases} \quad [\text{Eq. 1}]$$

La fluidité du coulis caractérisée au cône de Marsh est liée au comportement rhéologique du coulis caractérisé par rhéométrie. La présente étude se focalise sur la liaison entre ces deux méthodes de caractérisation. Nous allons établir une approche semi-analytique qui permet de déterminer le temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction des caractéristiques rhéologiques intrinsèques τ_0 , K , n des coulis cimentaires simulés par le modèle de Herschel-Bulkley.

2. APPROCHE SEMI-ANALYTIQUE

Une description plus détaillée de cette approche est présentée dans [Nguyen et al., 2006].

2.1. ÉTABLISSEMENT DE L'APPROCHE SUR LA BASE D'HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

L'écoulement dans une géométrie aussi complexe que celle du cône de Marsh est impossible à calculer analytiquement sans faire des hypothèses simplificatrices, même dans le cas d'un fluide newtonien. Dans la présente étude, pour déterminer le temps d'écoulement au cône de Marsh des coulis cimentaires considérés comme des fluides de Herschel-Bulkley, nous avons supposé que : le fluide est incompressible, la surface libre est plane, l'écoulement dans l'ajutage cylindrique pendant un intervalle du temps infiniment petit est de type Poiseuille sous les effets cumulés de la pesanteur et de la différence de pression Δp entre les parties supérieure et inférieure de l'ajutage. La figure 1 représente schématiquement la géométrie du cône de Marsh et les notations utilisées.

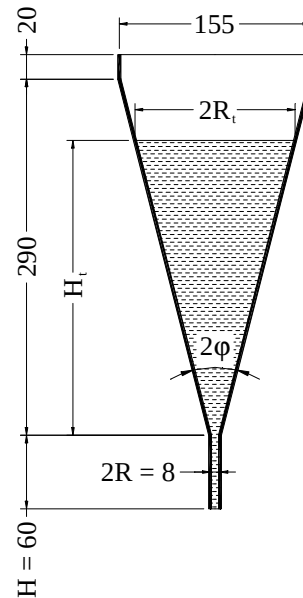


Figure 1 : Dimensions (en millimètre) du cône de Marsh et notations utilisées.

À partir de l'hypothèse d'écoulement de type Poiseuille dans l'ajutage sous l'effet de la gravité et de la différence de pression Δp entre l'entrée et la sortie de l'ajutage, nous pouvons déterminer la vitesse moyenne $\bar{V}$ à la sortie du cône qui a l'expression suivante dans le cas des fluides de Herschel-Bulkley :

$$\bar{V} = \frac{nR}{3n+1} \left[\frac{R}{2K} \left(\rho g + \frac{\Delta p}{H} \right) \right]^{\frac{1}{n}} f\left(\frac{r_0}{R}\right) \quad [\text{Eq. 2}]$$

où ρ et g sont respectivement la masse volumique du fluide et l'accélération de la gravité. Le rayon r_0 du bloc solide non-cisaillé dans l'ajutage et la fonction $f(r_0/R)$ sont respectivement déterminés par :

$$r_0 = \frac{2\tau_0}{\rho g + \frac{\Delta p}{H}} \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$f\left(\frac{r_0}{R}\right) = \left[1 + \frac{2n}{2n+1} \left(\frac{r_0}{R}\right) + \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \left(\frac{r_0}{R}\right)^2 \right] \left(1 - \frac{r_0}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}} \quad [\text{Eq. 4}]$$

Le calcul de la vitesse moyenne $\bar{V}$ par [Eq. 2] nécessite la connaissance de la différence de pression Δp entre l'entrée et la sortie de l'ajutage. Pour déterminer cette différence de pression Δp , nous avons supposé que la force extérieure qui s'exerce sur le fluide dans l'ajutage ($\rho g + \Delta p/H$) est proportionnelle à celle qui s'exerce dans le cas où la pression du fluide dans le tronc de cône est hydrostatique. Ceci peut être exprimé par la relation suivante :

$$\rho g + \frac{\Delta p}{H} = \alpha \rho g \left(1 + \frac{H_t}{H}\right) \quad [\text{Eq. 5}]$$

où α est le coefficient de proportionnalité. Dans la présente étude, il est déterminé en considérant deux cas particuliers des fluides de Herschel-Bulkley. Le premier cas concerne les fluides de seuil d'écoulement égal à zéro (fluides d'Ostwald), permettant de déterminer le coefficient de proportionnalité en fonction de la consistance K et de l'exposant n . Le deuxième cas qui concerne les fluides dont l'exposant n est égal à 1 (fluides de Bingham) permet de déterminer le coefficient de proportionnalité en fonction du seuil d'écoulement τ_0 et de la consistance K . Pour les fluides de Herschel-Bulkley présentant trois paramètres τ_0 , K , n , l'expression du coefficient de proportionnalité α doit alors satisfaire les deux cas particuliers ce qui permet de proposer l'expression suivante pour le coefficient de proportionnalité α :

$$\alpha = \frac{1 - 1.1 \frac{\tau_0}{\rho g H \tan \phi}}{1 + \frac{r}{3nH \tan \phi}} \quad [\text{Eq. 6}]$$

En substituant [Eq. 5] avec le coefficient α déterminé par [Eq. 6] dans [Eq. 2], la vitesse moyenne à la sortie du cône de Marsh peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\bar{V} = \frac{nR}{3n+1} \left[\alpha \frac{\rho g R}{2K} \frac{H + H_t}{H} \right]^{\frac{1}{n}} f\left(\frac{r_0}{R}\right) \quad [\text{Eq. 7}]$$

2.2. CORRECTION DE L'APPROCHE SUR LA BASE DE LA MODELISATION NUMERIQUE

Afin de vérifier l'approche établie, nous avons modélisé numériquement l'écoulement au cône de Marsh à l'aide du code Fluent 6.1. Nous avons observé que [Eq. 7] n'est vérifiée numériquement que pour les fluides très consistants de faible vitesse d'écoulement. L'écart augmente en fonction de cette dernière. Ceci peut être expliqué par le fait que l'hypothèse d'écoulement de type Poiseuille dans l'ajutage n'est pas vérifiée pour tous les fluides.

Pour corriger cette hypothèse, nous avons introduit un coefficient correctif β de manière à ce que la vitesse moyenne à la sortie du cône $\bar{V}_\beta$ soit déterminée par :

$$\bar{V}_\beta = \frac{\bar{V}}{\beta} \quad [\text{Eq. 8}]$$

Le coefficient β est une fonction croissante du nombre de Reynolds Re correspondant au champ d'écoulement de Poiseuille dans l'ajutage. Lorsque le nombre de Reynolds tend vers zéro, il n'est pas nécessaire d'introduire le coefficient β car le champ d'écoulement de Poiseuille s'établit dans l'ajutage. Lorsque le nombre de Reynolds tend vers l'infini, la vitesse d'écoulement tend vers celle du fluide parfait qui peut être déterminée en se basant sur le théorème de Bernoulli. Compte tenu de ces deux arguments et en se basant sur les résultats obtenus par modélisation numérique, nous proposons l'expression suivante pour le coefficient correctif β :

$$\beta = \frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{\alpha R}{H}} \left[\frac{n}{2(3n+1)} \right]^{\frac{n}{2}} \left(1 - e^{-0.1\sqrt{Re}} \right) \left(\sqrt{Re} + \frac{1.5}{n} \sqrt[4]{Re} \right) + 1 \quad [\text{Eq. 9}]$$

où λ est une constante inférieure à 1 ($\lambda = 0.96$) prenant en compte la dissipation d'énergie due au frottement pariétal dans le cône de Marsh et à la contraction locale de la section. Le nombre de Reynolds Re peut être déterminé par la relation suivante [Gu et Tanner, 1985] :

$$Re = \frac{\rho \bar{V}^{2-n} (2R)^n}{K} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Compte tenu de la correction de la vitesse par le coefficient β déterminé par [Eq. 9], la vitesse moyenne $\bar{V}_\beta$ à la sortie du cône de Marsh déterminée par [Eq. 8] est bien vérifiée avec un écart inférieur à 12% par rapport à celle obtenue par modélisation numérique pour de nombreux fluides de caractéristiques rhéologiques variant dans une large plage. La figure 2 présente la comparaison des vitesses moyennes à la sortie du cône de Marsh données par l'approche corrigée [Eq. 8] et par modélisation numérique.

À partir de la condition de continuité pour un fluide incompressible et dans le cas où la surface libre est plane, nous pouvons déterminer le temps d'écoulement t pour un volume de fluide qui sort du cône en faisant baisser la hauteur du fluide dans le tronc de cône de H_1 à H_2 , par résolution numérique de l'intégrale suivante :

$$t = - \int_{H_1}^{H_2} \frac{(R + H_t \tan \varphi)^2}{\bar{V}_\beta R^2} dH_t \quad [\text{Eq. 11}]$$

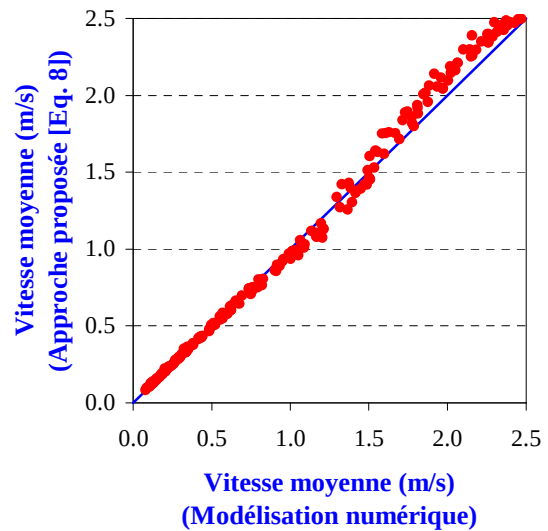


Figure 2 : Comparaison des vitesses moyennes à la sortie du cône de Marsh, données par l'approche proposée tenant compte de la correction [Eq. 8] et par la modélisation numérique.

3. VALIDATION EXPERIMENTALE

3.1. PROCEDURES DE MESURE EXPERIMENTALE ET DE CALCUL

Une attention particulière a été portée aux procédures expérimentales de mesure du temps d'écoulement et de mesure rhéométrique. En effet, pour que la validation de l'approche semi-analytique soit valable, il faut s'assurer que l'état du coulis lors de la mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh est identique à celui lors de la mesure rhéométrique. Ceci nécessite d'effectuer ces deux mesures après un même temps de repos à partir d'un même état reproductible, en raison de la propriété thixotrope des coulis cimentaires. Cette condition nécessite de re-malaxer le coulis qui est laissé au repos pendant la première mesure avant d'effectuer la deuxième mesure. Un pré-cisaillement dans le rhéomètre avant la mesure rhéométrique qui est effectuée après la mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh est donc nécessaire. Pour s'assurer que le pré-cisaillement dans le rhéomètre ne puisse pas améliorer encore la fluidité du coulis, il est également indispensable de malaxer complètement le coulis ce qui nécessite un temps de malaxage suffisamment long qui dépend de la puissance du malaxeur et du volume du coulis.

Une attention particulière a également été portée à la procédure de détermination des caractéristiques rhéologiques intrinsèques du coulis à partir de la mesure rhéométrique effectuée par rhéomètre rotatif cylindrique (Haake RS150) afin de s'assurer que ces dernières représentent de manière satisfaisante le comportement rhéologique du coulis en écoulement au cône de Marsh. Pour s'affranchir du glissement entre le coulis et la surface du cylindre intérieur [Barnes, 1995], cette dernière a été rendue rugueuse par sablage. Pour tenir compte de la largeur relativement importante de l'entrefer entre les deux cylindres, les caractéristiques rhéologiques intrinsèques du coulis simulé par le modèle de Herschel-Bulkley ont été déterminées en se basant sur la relation intégrale rigoureuse entre le couple et la vitesse de rotation [Couarraze et Grossiord, 1983]. Dans ce cas, la régression a été effectuée par minimisation la somme des carrés des écarts en pourcentage afin de s'assurer que tous les points jouent un rôle de même importance dans la régression. De plus, une gamme de vitesse de cisaillement appropriée dans laquelle les mesures sont utilisées pour déterminer les caractéristiques rhéologiques intrinsèques du coulis a été déterminée afin de s'assurer que ces dernières représentent de manière satisfaisante le comportement du coulis en écoulement au cône de Marsh.

3.2. QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous avons effectué la mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh et la mesure rhéométrique sur de nombreux coulis cimentaires de différentes compositions : rapport E/C (ciment CEM I 52.5 N CP2) compris entre 0.42 et 0.60, dosage en superplastifiant (Cimfluid Adagio 2019) compris entre 0% et 0.5%, dosage en agent de viscosité (Collaxim L4) compris entre 0% et 1%. La figure 3 présente un exemple des résultats obtenus pour les coulis cimentaires adjuvantés en superplastifiant : (a) le temps d'écoulement au cône de Marsh diminue d'autant moins rapidement en fonction du dosage en superplastifiant ; (b) le comportement rhéologique du coulis change progressivement de type rhéofluidifiant ($n < 1$) vers le type rhéo-épaississant ($n > 1$) au fur et à mesure que le dosage en superplastifiant augmente ; (c) la consistance K diminue exponentiellement en fonction de l'exposant n et donc très rapidement en fonction du dosage en superplastifiant ce qui entraîne une diminution importante de la viscosité apparente du coulis ; (d) le seuil d'écoulement τ_0 du coulis diminue exponentiellement en fonction du dosage en superplastifiant. Toutes ces évolutions sont dues à

l'adsorption des molécules polymériques du superplastifiant sur la surface des particules cimentaires dont l'efficacité d'adsorption diminue au fur et à mesure que le dosage en superplastifiant augmente.

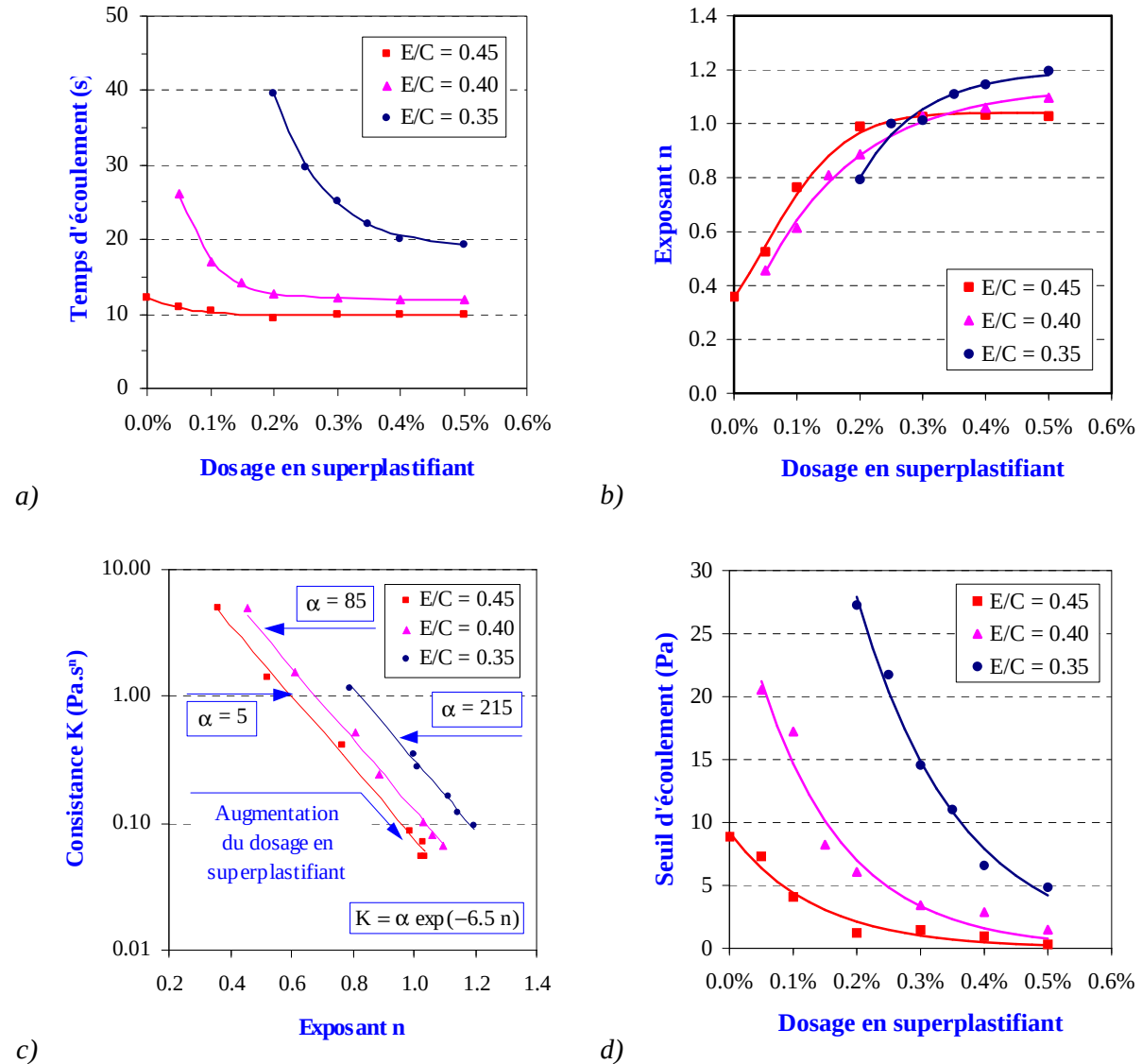


Figure 3 : Évolutions du temps d'écoulement (a), de l'exposant n (b), de la consistance K (c) et du seuil d'écoulement (d) des coulis cimentaires adjuvantés en superplastifiant.

3.3. COMPARAISON DES TEMPS D'ÉCOULEMENT

La figure 4 présente la comparaison des temps d'écoulement déterminés par l'approche semi-analytique proposée et mesurés expérimentalement pour la totalité des coulis testés. Pour tous les coulis cimentaires, l'écart entre le temps calculé et le temps mesuré expérimentalement est inférieur à 25%. Ceci permet de conclure que l'approche proposée est vérifiée de manière satisfaisante expérimentalement.

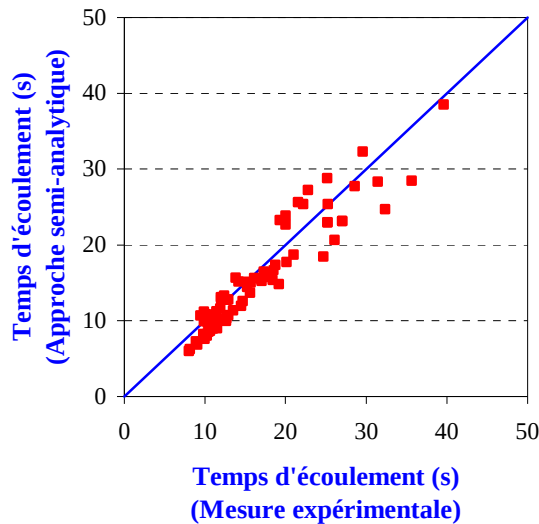


Figure 4 : Comparaison des temps d'écoulement au cône de Marsh déterminés par l'approche semi-analytique proposée et mesurés expérimentalement pour de nombreux coulis cimentaires de différentes compositions.

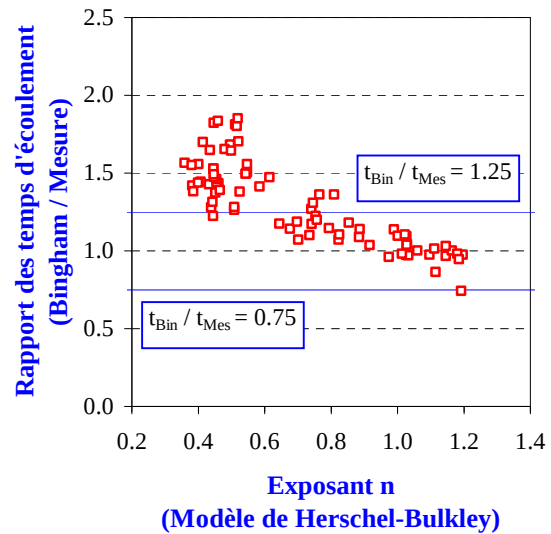


Figure 5 : Comparaison des temps d'écoulement au cône de Marsh, calculés par l'approche semi-analytique proposée en considérant les coulis cimentaires comme des fluides de Bingham et mesurés expérimentalement.

4. COMPARAISON AVEC LE MODELE DE BINGHAM

Dans la littérature, le modèle de Bingham qui est un cas particulier du modèle de Herschel-Bulkley pour lequel $n = 1$ est très largement utilisé pour décrire le comportement rhéologique des coulis cimentaires. Ce paragraphe est consacré à la mise en évidence de l'influence de la simplification du comportement rhéologique des coulis cimentaires par le modèle de Bingham sur le temps d'écoulement au cône de Marsh.

La figure 5 présente la comparaison entre le temps d'écoulement calculé par l'approche semi-analytique proposée en considérant les coulis comme des fluides de Bingham et le temps mesuré expérimentalement. Cette comparaison a été représentée par le rapport entre le temps calculé et le temps mesuré en fonction de l'exposant n obtenu avec le modèle de Herschel-Bulkley afin de mettre en évidence l'influence de la propriété non-linéaire du comportement rhéologique du coulis sur la validité du modèle de Bingham. Nous pouvons constater que le modèle de Bingham surestime significativement le temps d'écoulement pour les coulis cimentaires fortement rhéo-fluidifiant. En considérant qu'un écart maximal égal à 25% est raisonnable, la description du comportement rhéologique du coulis par le modèle de Bingham n'est satisfaisante que lorsque l'exposant n obtenu avec le modèle de Herschel-Bulkley est compris entre 0.65 et 1.20. Cette gamme de l'exposant n ne peut être atteinte que dans le cas où le coulis est adjuvanté avec un dosage en superplastifiant suffisamment élevé (supérieur à 0.10% dans notre étude).

5. CONCLUSION

Dans la présente étude, nous avons proposé une approche semi-analytique permettant de déterminer le temps d'écoulement au cône de Marsh des coulis cimentaires considérés comme des fluides de Herschel-Bulkley. Cette approche a été établie en premier lieu sur la base d'hypothèses simplificatrices et corrigée ensuite sur la base de modélisations numériques. Elle présente un écart inférieur à 12% par rapport à la modélisation numérique et a été vérifiée de manière satisfaisante expérimentalement sur les coulis cimentaires de différentes compositions avec un écart inférieur à 25%.

En se basant sur l'approche semi-analytique proposée, nous avons également montré que le modèle de Bingham très largement utilisé dans la littérature ne permet de décrire de manière satisfaisante le comportement rhéologique du coulis lors de l'écoulement au cône de Marsh que dans le cas où l'exposant n obtenu avec le modèle de Herschel-Bulkley est compris entre 0.65 et 1.20. Cette gamme de l'exposant n ne peut être atteinte que dans le cas des coulis cimentaires adjuvantés avec un dosage en superplastifiant suffisamment élevé (supérieur à 0.10% dans notre étude).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Atzeni C. et al. (1985) « Comparison between rheological models for portland cement pastes », *Cement and Concrete Research*, vol. 15, p. 511-519.
- Barnes H.A. (1995) « A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure », *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 56, n° 3, p. 221-251.
- Couarraze G., Grossiord J.L. (1983) « *Initiation à la rhéologie* », Lavoisier.
- Gu D., Tanner R.I. (1985) « The drag on a sphere in a power-law fluid », *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 17, p. 1-12.
- Legrand C. (1982) in Baron J. and Sauterey R., « *Le béton hydraulique* », Presses ENPC, Paris.
- NF P 18-507 (1992) « Additions pour béton hydraulique – Besoin en eau, contrôle de la régularité – Méthode par mesure de la fluidité par écoulement au cône de Marsh »
- Nguyen V.H. et al. (2006) « Flow of Herschel-Bulkley fluids through the Marsh cone », *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 139, p. 128-134.