Contraintes aux parois lors de la structuration des fluides à seuil

Jean Claude Tchamba — Sofiane Amziane — Vincent Picandet

Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux, Université de Bretagne Sud, Rue de Saint maudé, B.P 92116, 56321 Lorient Cédex, France

{Jean-Claude.Tchamba, Sofiane.Amziane, Vincent.Picandet}@univ-ubs.fr

RÉSUMÉ. L'évaluation des contraintes aux parois exercées par les matériaux du génie civil contre un coffrage fait l'objet de nos investigations expérimentales. Les pressions latérales (horizontales) et verticales sont dans une première phase mesurées à l'aide d'une colonne coffrante instrumentée. Les observations montrent que l'amplitude des pressions initiales dépend des caractéristiques rhéologiques du matériau. De même, on montre que l'évolution des pressions est liée à l'évolution de la rhéologie du matériau du fait de sa structuration. Cette structuration est ici vue comme étant le résultat combiné de la thixotropie et du durcissement (due à l'hydratation) du matériau.

ABSTRACT. Evaluation of stresses against formwork by civil engeneering material have been investigated. First, lateral and vertical pressures have been measured using an instrumented column. The observation shows that initial pressure amplitude depend on the initial rheological material properties. Just after, The evolution of the pressure was then observed simultaneously with the appearance of rheological characteristics variation. The maturation of the material is considered here as the result of both thixotropy phenomenon and hardening (due to hydration of cement) of the material.

MOTS-CLÉS : matériaux cimentaires, bentonite, filler calcaire, rhéologie, pression, retrait. KEYWORDS: cementitious material, bentonite, limestone, rheology, form pressure, shrinkage.

1. Introduction

Dans le domaine du génie civil, l'optimisation des procédés de mise en œuvre des matériaux cimentaires est un enjeu important qui concerne directement la productivité et la qualité des ouvrages. Par exemple, pour un matériau donné, l'évaluation de sa pompabilité et de la poussée qu'il exerce contre un coffrage, l'estimation d'un temps de décoffrage et la qualité du parement obtenue font l'objet d'une attention particulière de la part des entreprises d'exécution.

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

De l'analyse des exemples cités, il est notable de constater qu'à chaque fois, les phénomènes développés au niveau de l'interface paroi/matériau interviendront de manière fondamentale.

Pour leur majorité, les matériaux courant du génie civil (béton, mortier, bentonite, ...) sont, du point de vue de la rhéologie, des fluides à seuil thixotrope. La thixotropie est la propriété que possèdent certains matériaux de se fluidifier progressivement lorsqu'ils sont soumis à un cisaillement constant. Ces matériaux reviennent à leur état rhéologique initial après un temps de repos. Par ailleurs, les matériaux hydrauliques tel que le ciment, ont la propriété de durcir après un processus d'hydratation exothermique. Ce processus thermo physico-chimique conduit à l'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau et au phénomène bien connu du retrait au jeune âge. C'est l'effet combiné de deux phénomènes : thixotropie et hydratation qui sont à l'origine des évolutions rhéologiques des matériaux cimentaires [1].

L'objet de notre étude est d'investiguer ce processus de structuration au travers de l'évaluation et de l'analyse des contraintes à l'interface paroi/matériau.

La paroi est définie ici au sens large et peut être représentée par un tuyau lors du pompage ou d'un coffrage couramment utilisé dans le génie civil. Dans ce dernier cas la hauteur de matériau introduite dans un coffrage donné génère à la paroi une pression latérale (normale à la surface) et une contrainte tangentielle. Une pression (ou une contrainte) verticale appliquée sur le matériau génère automatiquement une pression latérale qui lui est strictement proportionnelle (fig1) de sorte que :

$$P_h = K P_v$$

Pour les matériaux granulaires saturés, en vertu du principe de Terzaghi la pression latérale se décompose en :

$$\sigma = \sigma' + u, \quad et \quad \tau = \tau'$$

Où u est la pression interstitielle, $\sigma' et \tau'$ les contraintes effectives et σ, τ les contraintes totales.

La contrainte tangentielle résulte de l'apparition des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la paroi, ce sont des forces de cisaillement. Les forces de frottements sont les forces qui s'opposent au poids du matériau.





Au repos, c'est-à-dire à vitesse de cisaillement nulle, les contraintes évoquées évoluent dans le temps du fait de la structuration des matériaux cimentaires. L'hydratation du ciment et la thixotropie sont à l'origine du processus de structuration. Ce processus induit les déformations de retrait.

2. Expérimentation

2.1. Matériaux

Afin de découpler les différents phénomènes accompagnant la structuration ; trois types de mélanges présentant différentes caractéristiques ont été expérimentés (Tableau 1 et 2) :

- Pâte de ciment : le ciment utilisé dans cette étude est le CPJ CEM I/52.5 N de masse volumique 3160 kg/m³. La composition de la pâte P₃₆ est à rapport E/C = 0.36, de fraction volumique solide ϕ_0 =0.47. Le malaxage du ciment et de l'eau distillée est effectué en une seule gâchée de 50 litres pour l'ensemble des essais., le mélange ainsi obtenu est un fluide à seuil thixotrope durcissant.

- Pâte de filler calcaire : le filler utilisé est commercialisé sous le nom de BETO CARB. Sa masse volumique est de 2714 kg/m³. Une pâte de filler calcaire FC₄₁ de même concentration en volume solide que celle de la pâte P₃₆ (c'est-à-dire $\phi_0 = 0.47$) et à rapport E/FC = 0.41 est expérimentée. La pâte de filler calcaire a été obtenue par le même protocole de malaxage. Contrairement à la pâte de ciment, le mélange confectionné est un fluide à seuil non durcissant.

- Boue bentonitique : la bentonite employée dans de cette étude a un poids spécifique 2300 kg/m³. Une suspension dosée à 100gr/litre d'eau et de fraction volumique ϕ_0 =0.090 est préparée. Afin d'obtenir un mélange homogène et stable, le malaxage est réalisé sur 8 jours. Un malaxage à vitesse lente de 1400 tr/mn a été effectué durant les sept premiers jours suivi d'une alternance d'un malaxage à vitesse rapide de 2400 tr/mn. Le mélange bentonitique représente la gamme de fluide à seuil thixotrope non durcissant.

Mélange	$E(L/m^3)$	Liant	E/Liant	$ ho_{mel}$ (kg/m ³)	ϕ_0
		(kg/m^3)			
Pâte de ciment	532	1478	0.36	2010	0,47
PC_{36}					
Pâte de filler	530	1276	0.41	1806	0,47
calcaire FC ₄₁					
Boue	963	96.3	0.1	1060	0,090
bentonitique B ₁₀₀					

Tableau 1. Composition des mélanges étudiés.

A la sortie du malaxeur, les mélanges sont immédiatement placés dans les dispositifs respectifs. Tous nos essais ont été réalisés, à température constante 20 °C et à hygrométrie constante 60%. Afin de limiter au mieux l'évaporation de surface, une fine couche d'huile (1 à 2 mm) est mise en œuvre à la surface des échantillons.

Fluide	Filler calcaire	Bentonite	Pâte de ciment
Seuil	Oui	Oui	Oui
Thixotropie	Non	Oui	Oui
Hydraulique	Non	Non	Oui

Tableau 2. Nature rhéologique des mélanges étudiés

2.2. Dispositifs expérimentaux

Essai à la colonne : L'objectif de l'essai est de suivre l'évolution des pressions interstitielles et de la charge verticale exercées sur la paroi et à la base du coffrage. La colonne coffrante est en tube PVC de hauteur 130 cm, de diamètre intérieur 100 mm et d'épaisseur 5,3mm (figure 2). Deux capteurs de pression interstitielle [1] sont mis en place à une profondeur de 120 cm. Un capteur de force verticale de charge nominale 0,5 KN et de précision \pm 0,2%, couplé à un système coulissant (piston) est placé en fond de coffrage à une profondeur de 130 cm. Une variante du dispositif est réalisée à l'aide d'une colonne de 20 cm de hauteur.



Figure 2 : Dispositif de mesure de la pression interstitielle et de la charge verticale.

Figure 3 : Dispositif d'essai à la plaque pour la mesure des contraintes aux interfaces.

Essai à la plaque : L'essai consiste à immerger une plaque dans un matériau et à évaluer la quantité de matériau qui adhère à l'interface plaque/matériau (Figure 3). Le dispositif est constitué d'un coffrage en carton de forme cylindrique de rayon 10 cm et de hauteur 20 cm et d'une plaque métallique de géométrie (2 x 75 x 162 mm)

suspendue à une potence. Une partie de la plaque est immergée dans le matériau qui est recouvert d'une fine couche d'huile pour éviter toutes évaporation. Le dispositif est posé sur une balance $(3100 \pm 0,01)$ g. Le poids de la plaque après immersion (poids propre de la plaque réduit de la poussée hydrostatique) sert de point de référence. Ensuite, l'évolution du poids enregistrée. Elle traduit le développement des contraintes tangentielles (verticales) exercées par le matériau sur la plaque. La masse absolue de matériau dans le coffrage est bien entendue constante. La mesure concerne donc le poids du matériau qui n'est pas repris par la plaque. En d'autres termes, celle-ci aura tendance à diminuer si les contraintes tangentielles verticales descendantes se développent à la paroi.

3. Résultats et discussion

La courbe de la figure 4 illustre l'évolution simultanée de la pression interstitielle et du poids apparent dans la colonne en fonction du temps. On observe trois phases :

Phase 1 : Après remplissage et vibration du matériau dans le coffrage, on constate une montée en pression dont le pic correspond théoriquement à la fois à une pression hydrostatique maximale égale $P_{th} = \rho_{mel} g.h$ et à une charge verticale $P_v = \rho_{mel} g.V_t$ où : ρ_{mel} est la masse volumique du mélange en kg/m³, h la hauteur du matériau mise en œuvre dans le coffrage en m, g la pesanteur en m²/s et S la surface de la section droite de la colonne en m². Du fait de l'adhérence du matériau aux parois, ces valeurs théoriques sont réduites. Les écarts par rapport aux valeurs théoriques sont donnés sur le tableau 3.

Tableau 3 : Etat	de contraintes	dans la co	lonne co	ffrante après	la mise en	place.	(Le
capteur de force	verticale est de	écalé du ca	pteur de j	pression inte	rstitielle de	7.5 cm	l)

М	atériaux	Masse théorique (Kg)	Masse mesurée (Kg)	Ecart (%)	Pression théorique (kPa)	Pression mesurée (kPa)	Ecart (%)
DC	H=122.7 cm	18,6	18,2	2,1	-	-	
PC_{36}	H=115 cm	-	-		22,6	22,9	1.3
B100	H=113 cm	9,40	8,49	9.6	-	_	
	H=105 cm	_	_		10,9	9,85	9.6
FC ₄₁	H=111 cm	15,11	12,40	17.9	-	_	
	H=103 cm	-	-		18,25	20	9.5

Phase 2 : Pendant cette phase de repos, une chute de pression interstitielle est observée pour les trois types de mélange. Nous observons également une chute de charge verticale traduisant une reprise croissante des contraintes tangentielles par les

parois de la colonne coffrante. Il est remarquable de noter la similitude de cinétique d'évolution entre pression latérale relative et force verticale relative quelque soit la nature du mélange testé. En revanche, les mélanges se distinguent sur cette phase par la vitesse de chute de pression rapide pour la pâte de ciment (100% en 2,4 h) et relativement lente pour la pâte de filler calcaire (5% en 5h et 38 % en 24 h, figure 5) et de bentonite (5% en 5h, figure 6). Les contraintes de structuration sont à l'origine de l'évolution conjointe de la pression interstitielle et de la charge verticale dans le coffrage. D'un point de vue rhéologique des essais effectués sur la pâte de ciment [3] et la bentonite montrent que sur cette période le seuil de cisaillement s'accroît de manière importante. C'est le résultat de la thixotropie dans le cas de la bentonite et de l'hydratation combiné à la thixotropie pour la pâte de ciment. Par suite, l'adhérence aux parois augmente avec l'accroissement de la contrainte seuil. Dans le cas du filler calcaire, il nous est pour l'instant difficile de se prononcer à cause de l'apparition d'un fort ressuage pendant l'essai. Ce phénomène induit une rupture d'homogénéité du matériau sur la hauteur de l'échantillon.

Phase 3 : L'un des faits marquant au cours de la structuration des matériaux cimentaires est sans doute l'apparition d'une phase dépressionnaire qui est une conséquence du phénomène de succion des grains de ciment de l'eau (figure 4). Audelà de 2,4h c'est-à-dire au temps d'annulation des pressions interstitielles, la charge verticale tend à se stabiliser pour les pâtes de ciment. Ce passage en zone dépressionnaire n'a pas été observé sur les pâtes de bentonite et de filler calcaire. Il est donc attribuable à l'hydratation du ciment.



Figure 4 : Evolution simultanée de la pression interstitielle et du poids apparent mesuré pour la pâte de ciment PC_{36} sur 3.5 h

Figure 5 : Evolution simultanée de la pression interstitielle et du poids apparent mesuré pour la pâte de filler calcaire FC_{41} sur 25 h



Figure 6 : Evolution simultanée de la pression interstitielle et du poids apparent mesuré pour la pâte de bentonite B_{100} sur 4 h

Afin d'établir une corrélation entre l'évolution des contraintes reprises aux parois et la pression interstitielle, nous proposons d'analyser les résultats d'un essais de plaque et de pression réalisé à une profondeur de 10 cm du bord libre du matériau pour bénéficier de conditions de profondeur et de dimension de coffrage identiques. Les courbes de l'expérimentation sont présentées sur les figures 7 et 8. Quelque soit le cas, on observe que la plaque est soumise à une force descendante liée à l'adhérence croissante du matériau (Figure 8). Pour la pâte de ciment PC₃₆ (Figure 7), le maximum de cette force est atteint au bout d'une heure. La mesure de l'évolution de pression interstitielle à une même profondeur de 10 cm fait apparaître qu'il y'a une forte corrélation entre l'évolution de cette force et la pression. L'annulation de pression interstitielle est concomitante au pic d'adhérence pour les matériaux cimentaires. Sur la phase dépressionnaire on assiste à l'inverse à une augmentation du poids apparent du matériau dans le récipient. L'adhérence à la paroi est alors moindre. Le changement d'état de l'eau est certainement à l'origine de cette chute d'amplitude de l'adhérence paroi/matériau.



Figure 7 : Evolutions relatives du poids Figure 8 : Evolutions relatives du poids apparent à l'interface plaque/matériau et apparent à l'interface plaque/matériau de la pression interstitielle: cas de la suivant le type de mélange pâte de ciment

Par ailleurs, des essais de suivi du volume apparent sur les trois types de mélange montrent que les pâtes subissent une contraction volumique (retrait) sous l'action des contraintes de structurations (thixotropie et hydratation). Le retrait et sa cinétique sont aussi des aspects fondamentaux de l'évolution des contraintes de cisaillement aux interfaces paroi/matériau qu'il conviendrait de considérer.

D'un point de vue mécanique l'effet combiné de l'ensemble des forces de structuration en évolution provoque une constante diminution de la pression hydrostatique initiale. Les forces de structuration étant intrinsèques au matériau, c'est-à-dire homogènes en tout point d'un échantillon, il apparaît logique que l'annulation de la pression dépende de la profondeur considérée : Plus la profondeur initiale est importante, plus la pression initiale et le temps d'annulation est important. Ceci explique le fait qu'il y'ait annulation de la pression interstitielle en 1h à 10 cm et en 2.4 h à 115 cm (Figures 4 et 7).

4. Conclusion

Cette étude nous a permis d'investiguer des méthodes expérimentales permettant d'évaluer l'évolution des contraintes induites lors de la structuration d'un fluide à seuil confiné dans un coffrage. Trois matériaux de nature rhéologique différentes sont expérimentés. Les résultats permettent d'observer des différences dans leur comportement dans la zone d'interface paroi/matériau selon qu'il s'agisse d'un fluide à seuil thixotrope s'hydratant (pâte de ciment), ou d'un simple fluide à seuil thixotrope (bentonite) ou non (filler calcaire).

On observe pour tous les mélanges (pâte à base de ciment, filler calcaire ou de bentonite) que la structuration à pour corollaire une chute de pression interstitielle et un accroissement des contraintes aux parois. Cette chute de pression est fortement corrélée aux contraintes d'adhérence paroi/matériau. La restructuration de la bentonite et du filler calcaire induit une chute de pression interstitielle continu pour la bentonite et jusqu'à un pallier de stabilité pour la pâte de filler. Dans le cas d'une pâte de ciment, l'hydratation induit un passage de la phase interstitielle en dépression. L'adhérence paroi/matériau sur les parties en contact est maximal au moment de l'annulation de la pression interstitielle et diminue en phase dépressionnaire. Ces essais nous permettent finalement de mettre à jour une relation forte entre la cinétique de pression interstitielle, la vitesse de structuration et les contraintes exercées par le matériau à la paroi. D'où la nécessité de prendre en compte le phénomène de reprise des contraintes tangentielles aux parois lors de la modélisation des problèmes de pompage ou de pression dans les coffrages.

5. Références

[1] S. Amziane, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 2, February 2006, Pages 295-304

[2] S. Amziane, N.R. Andriamanantsilavo, Cement and Concrete Research, (V34) pp. 2141-2152. 2004

[3] S. Amziane, C.F. Ferraris, Submitted to ACI MATERIAL JOURNAL, 2006