
Influence de la formulation des bétons fluides sur leur pompabilité

Tien-Tung Ngo * – **François Cussigh **** – **El-Hadj Kadri *** – **Rachid Bennacer *** – **Roger Duval ***

** Laboratoire Environnement Energétique Valorisation Matériaux,*

Université Cergy-Pontoise

5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex

*tien-tung.ngo@u-cergy.fr, El-Hadj.Kadri@iutc.u-cergy.fr,
bennacer@iupgc.u-cergy.fr, Roger.Duval@u-cergy.fr*

*** GTM Construction,*

61 Avenue Jules Quentin, 92730 Nanterre Cedex

fcussigh@gtm-construction.com

RESUME. Les frottements à l'interface acier-béton qui se produisent au cours de l'écoulement d'un béton fluide dans une canalisation jouent un rôle important sur leur pompabilité. Pour tenter d'expliquer ce phénomène, nous avons conçu un appareil tribométrie fiable, facilement utilisable sur chantier. L'influence des principaux paramètres de formulation du béton sur la pompabilité a été étudiée. L'augmentation du volume de pâte, des rapports eau/ciment (E/C) et granulats/sables (G/S) permet de réduire les frottements à l'interface, ce qui favorise la pompabilité.

ABSTRACT. :The friction at the steel-concrete interface which occurs during the concrete fluid flow plays an important role in their pumpability. To explain this phenomenon, we designed a reliable tribometric apparatus, easily usable on building sites. The influence of the principal parameters of concrete formulation on pumpability was studied. The increase in the cement paste volume, water/cement (E/C) and granules/sand ratio (G/S) allow the reduction of the steel-concrete interface friction. Such decreases induce better pumpability.

MOTS-CLES : Béton, interface acier-béton, pompabilité, viscosité, seuil d'interface, constante visqueuse.

KEY-WORDS : Concrete, steel-concrete interface, pumpability, viscosity, threshold of interface, viscous constant.

1. Introduction

Le pompage du béton est une technique de transport du béton frais dans laquelle on utilise les pompes pour transporter le béton d'un silo via un conduit vers un coffrage, sans avoir recours à une benne ou à une bande transporteuse. Par l'intermédiaire de la pompe, le béton est refoulé dans une tuyauterie en acier ou en élastomère. Cette technique, connue dans le monde depuis presque 90 ans, est largement utilisée de nos jours dans le domaine de la construction industrielle. Pour pouvoir utiliser la technique de pompage, il est indispensable que le béton soit considéré comme « pompable ». Les facteurs qui affectent la pompabilité du béton peuvent être classés en deux catégories. La première catégorie concerne les facteurs mécaniques qui sont relatifs aux équipements utilisés pour le pompage ainsi qu'aux caractéristiques du circuit de pompage. La seconde catégorie concerne les facteurs propres à la composition du béton. Ces facteurs sont directement reliés aux propriétés du béton frais, y compris la compacité, la stabilité dans le temps sous la pression de pompage et la mobilité. Or, la propriété de mobilité est conditionnée par la rhéologie du béton frais (viscosité et seuil de cisaillement) qui dépend de sa composition et du temps. De plus, dans une situation concrète de construction sur chantier, les facteurs mécaniques sont généralement fixés. Par conséquent, la pompabilité est une caractéristique qui doit dépendre uniquement des propriétés du béton frais et indépendante des équipements ou des conditions de pompage. On peut alors affirmer que les facteurs qui déterminent la pompabilité du béton restent liés à sa composition (Choinard, 1999).

Afin de mettre en évidence l'influence de la composition des bétons fluides sur leur pompabilité, dans ce contexte, nous avons, dans un premier temps, conçu un appareil tribométrique fiable, pour mesurer les paramètres d'interface béton – paroi de tuyau de pompage, en apportant une modification sur l'appareil de D. Kaplan (Kaplan, 2001), qui doit permettre une utilisation simple sur chantier à un coût raisonnable.

Comme le tribomètre conçu par D.Kaplan, notre appareil fonctionne en s'appuyant sur l'hypothèse que le comportement rhéologique des bétons frais est analogue à celui des fluides binghamiens (Tattersall, 1983), (Ferraris *et al.*, 1998), (Kaplan, 2001) dont la loi de comportement s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad [1]$$

où τ est la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 (Pa) seuil de cisaillement, μ (Pa.s) viscosité plastique et $\dot{\gamma}$ (1/s) taux de cisaillement.

Selon cette hypothèse, On observe deux zones de béton qui se forment au cours du pompage: une zone d'écoulement en bloc et une zone cisailée (appelée aussi couche limite) (Figure 1). L'avancement du béton dans le tuyau s'effectue au niveau de cette couche limite. Le béton commence à s'écouler dans le tuyau quand la

contrainte de cisaillement près de la paroi du tuyau est supérieure au seuil de cisaillement τ_0 (Tarrersall, 1983), (Bartos, 1992).

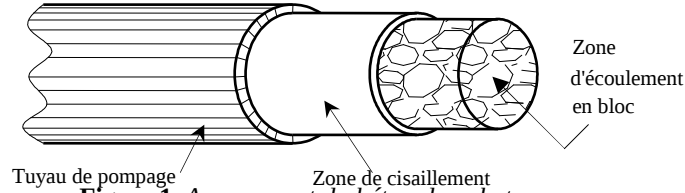


Figure 1. Avancement du béton dans le tuyau

L'écoulement du béton à l'interface acier-béton peut s'écrire sous la forme générale :

$$\tau = \tau_0 + \eta v \quad [2]$$

où τ (Pa) est la contrainte de cisaillement, τ_0 (Pa) le seuil de cisaillement à l'interface, η (Pa.s) la constante visqueuse et v (1/s) la vitesse relative de glissement.

Le résultat brut d'un essai réalisé avec l'appareil tribométrique se présente sous la forme d'un diagramme couple-vitesse de rotation du cylindre. La variation du couple de frottement en fonction de la vitesse de rotation est gérée par une fonction du type suivant :

$$T = T_0 + kV \quad [3]$$

où T (N.m) est le couple total appliqué sur le cylindre tournant, T_0 (N.m) le couple à l'origine, k (N.m.s/rad) un coefficient et V (rad/s) la vitesse angulaire relative de glissement égale, dans ce cas, à la vitesse de rotation de la pièce tournante.

L'exploitation de la courbe couple-vitesse de rotation obtenue avec le tribomètre en prenant en compte la géométrie de l'appareil permet de calculer les paramètres de l'interface béton-acier (Kaplan, 2001) :

$$\tau_0 = \frac{T_0}{2\pi^2 r^3 h} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{k}{(2\pi)^2 r^3 h} \quad [4]$$

où r (m) et h (m) sont respectivement le rayon et la hauteur du cylindre tournant.

Nous avons ensuite étudié l'influence des paramètres de composition des bétons fluides sur leur pompabilité. L'accent a été porté sur la caractérisation de l'interface béton-acier à partir des résultats obtenus en mettant en évidence des corrélations entre la pompabilité et les paramètres de composition des bétons.

2. Matériaux et techniques expérimentales

2.1. Appareil

Le tribomètre modifié fonctionne à l'aide d'un agitateur équipé d'un cylindre de 10 cm de hauteur et de 10,7 cm de diamètre. Un récipient de 20 cm de hauteur et de 30 cm de diamètre est placé sous l'agitateur puis un échantillon de béton de hauteur minimale 20 cm à l'arase du cylindre y est introduit. Cette configuration nous permet de minimiser les effets de paroi au fond du récipient (Figure 2). On mesure les couples ($N.m$) nécessaire pour maintenir la rotation du cylindre avec 8 vitesses différentes (tr/min) imposées dans une plage comprise entre 12 et 96 tours/min.



Figure 2. Différents étapes au cours de la réalisation d'un essai

2.2. Les matériaux de base

Nos essais sont réalisés sur des bétons ordinaires dont le ciment est de type Portland CPA CEM I 52,5 CP2. Les graviers 10/20 et le sable 0/4 proviennent d'une région alluvionnaire. Les granulats sont de couleur jaune, se présentent sous forme de grains plutôt ronds et possèdent peu de fines.

3. Résultats et discussions

Afin de mettre en évidence l'influence des paramètres de composition du béton sur l'écoulement, nous avons effectué des essais au tribomètre modifié au préalable

sur des bétons ordinaires, dont les compositions des différents mélanges sont représentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Formulations de béton et des paramètres mesurés

Cas d'étude	Bétons	E/C	G/S	Volume de pâte (m^3)	Ciment (kg)	Eau (kg)	Gravier (kg)	Sable (kg)	Slump (cm)	η (Pa.s/m)	τ_0 (Pa)
Influence de volume de pâte	B0	0,5	1,2	0,378	460	230	848	706	21	212,3	48,3
	B01			0,354	430	215	881	734	19	260,9	53,5
	B1			0,329	400	200	915	763	15	413,7	50,3
	B12			0,308	375	188	943	786	13	420,4	64,3
Influence du rapport E/C	B0EC0,55	0,55	1,2	0,378	434	239	848	706	23	163,6	25,2
	B0EC0,50	0,5			460	230	848	706	21	212,3	48,3
	B0EC0,45	0,45			490	220	848	706	18	411,0	68,9
	B0EC0,40	0,4			524	210	848	706	11	882,5	79,5
Influence du rapport G/S	B01GS1	0,5	1	0,354	430	215	808	808	19	328,1	52,4
	B01GS1,2		1,2		430	215	881	734	19	275,6	57,1
	B01GS1,4		1,4		430	215	943	673	19	263,5	47,5
	B01GS1,6		1,6		430	215	994	621	19	197,2	53,2

3.1. Influence du volume de pâte

Les essais sont réalisés sur des bétons qui ont les différents volumes de pâte et les mêmes rapports E/C et G/S égaux 0,5 et 1,2 respectivement (tableau 1). La pâte de ciment joue un rôle important dans la facilité de déplacement des bétons au niveau des frottements entre la paroi du tuyau de pompage et les granulats. La quantité de pâte présente va directement influencer sur les paramètres d'écoulement.

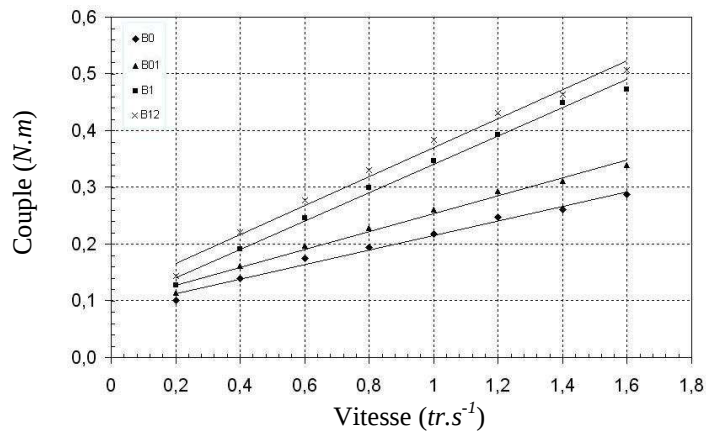


Figure 3. Evolution du couple de frottement en fonction de la vitesse pour différents volumes de pâte

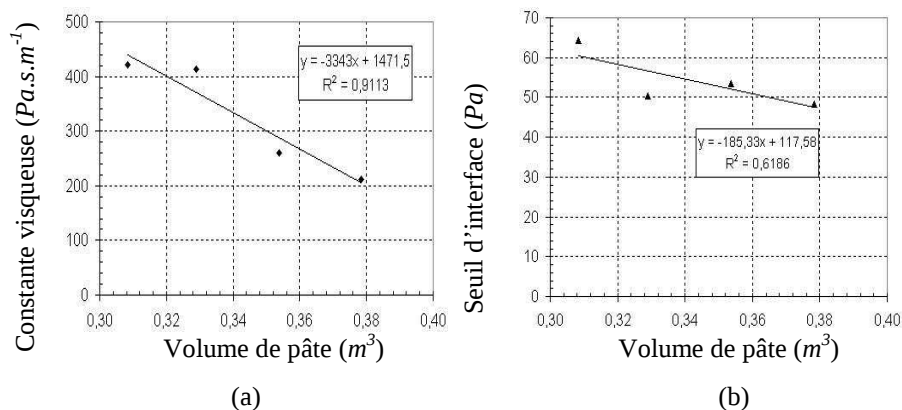


Figure 4. Variation de la constante visqueuse (a) et du seuil d'interface (b) en fonction du volume de pâte

L'évolution du couple de frottement en fonction de la vitesse est présentée sur la figure 3. On constate une augmentation quasiment linéaire du couple de frottement en fonction de la vitesse quelle que soit la formulation testée. Le passage de la formulation B0 à B12 s'accompagne d'une augmentation des frottements à l'interface béton-acier, ce qui montre la dégradation de la pompabilité lorsque le volume de pâte diminue.

La variation des paramètres de pompage en fonction du volume de la pâte est présentée sur la figure 4. La diminution du volume de pâte entraîne l'augmentation pratiquement linéaire de la constante visqueuse (Figure 4a), ce qui confirme l'augmentation des frottements à l'interface lorsque le volume de pâte diminue. On observe également une diminution du seuil d'interface avec le volume de pâte mais de façon plus limitée (Figure 4b).

3.2. Influence du rapport E/C

L'influence du rapport E/C sur les paramètres de pompage est étudiée tout en gardant le même volume de pâte et le même rapport G/S égal à 1,2. Nous avons choisi le béton B0 comme béton de référence. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1.

La figure 5 montre que les couples de frottement croissent linéairement en fonction de la vitesse de rotation du cylindre. Par ailleurs, la pente des droites diminue lorsque le rapport E/C augmente, ce qui montre de façon concomitante la diminution des frottements à l'interface acier-béton.

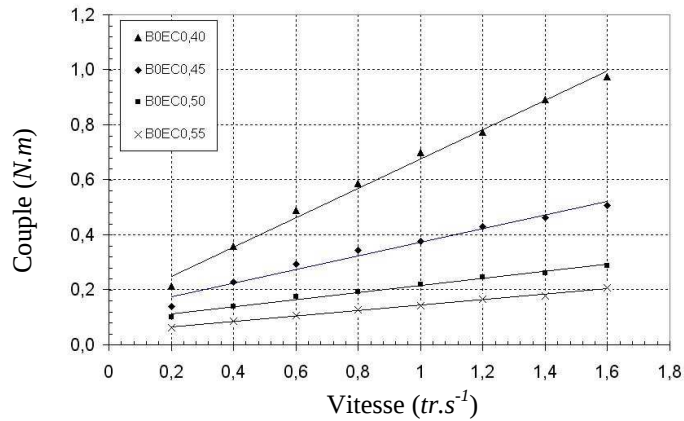


Figure 5. Evolution du couple de frottement en fonction de la vitesse pour différents rapports E/C

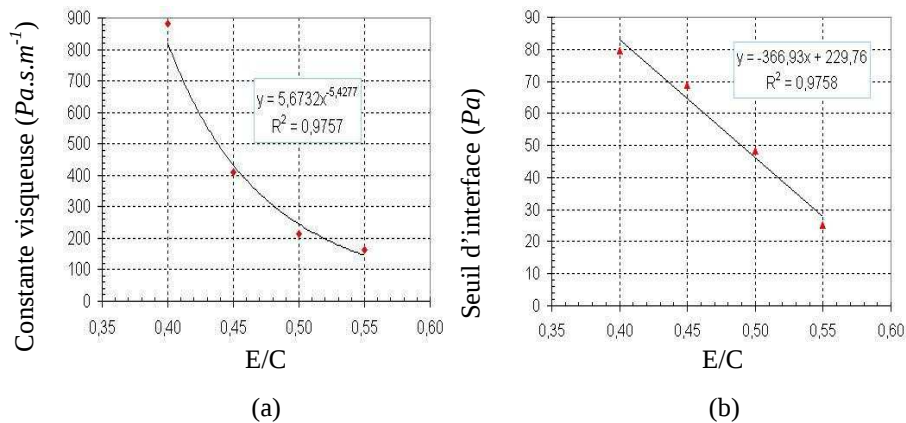


Figure 6. Variation de la constante visqueuse (a) et du seuil d'interface (b) en fonction du rapport E/C

On constate sur la figure 6a que la constante visqueuse décroît non linéairement (la courbe de variation s'approche d'une fonction puissance) lorsque le rapport E/C augmente, ce qui confirme la diminution des frottements à l'interface acier-béton et donc l'amélioration de la pompabilité. Par contre, le seuil de l'interface décroît linéairement et de façon prononcée lorsqu'on augmente le rapport E/C (Figure 6b).

3.3. Influence du rapport G/S

L'influence du rapport G/S sur les paramètres de pompage est aussi étudiée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1 :

On constate toujours une évolution linéaire des couples de frottement en fonction de la vitesse (Figure 7). L'augmentation du rapport G/S se traduit par une diminution de la pente des droites et corrélativement une diminution des frottements à l'interface béton-acier. La modification du squelette granulaire et donc de la compacité maximale du mélange influe directement sur l'écoulement.

La diminution des frottements à l'interface se manifeste par la diminution linéaire de la constante visqueuse lorsque le rapport G/S augmente. Par contre le seuil d'interface reste pratiquement constant lorsque le rapport G/S varie de la même manière que l'affaissement du béton (Figure 8).

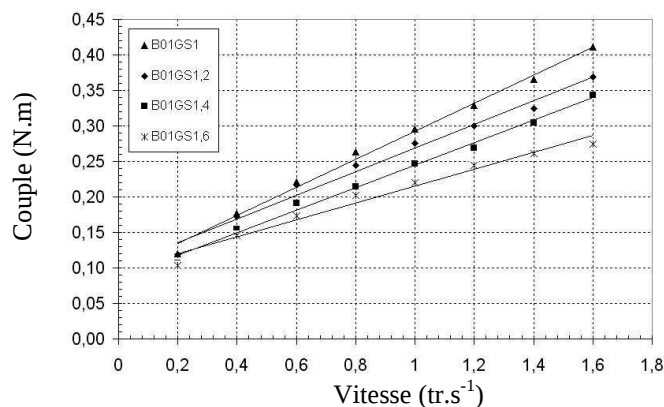


Figure 7. Evolution du couple de frottement en fonction de la vitesse pour différents rapports G/S

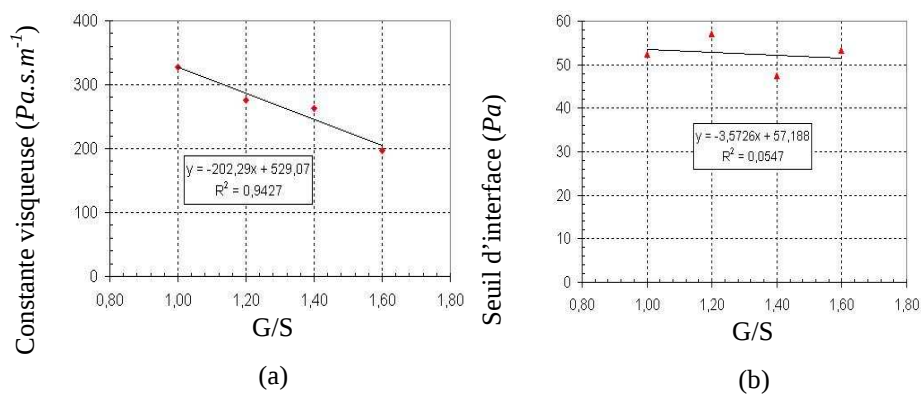


Figure 8. Variation de la constante visqueuse (a) et du seuil d'interface (b) en fonction du rapport G/S

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons conçu et mis en place un appareil tribométrique, afin de pouvoir quantifier le pompage des bétons. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres de composition des bétons (volume de pâte, E/C, G/S) sur leur pompabilité. Les essais au tribomètre réalisés sur ces différentes formulations nous ont permis de mettre en évidence les relations suivantes entre les paramètres de composition de béton et les paramètres de pompage (constante visqueuse et seuil d'interface):

Premièrement, pour des bétons suffisamment fluides ayant le même rapport E/C, lorsque le volume de pâte augmente, la constante visqueuse diminue linéairement traduisant une diminution des frottements à l'interface et donc une amélioration de la pompabilité. Le seuil d'interface varie dans le même sens mais de façon moins prononcée.

Deuxièmement, pour des bétons ayant le même volume de pâte et le même dosage en ciment, l'augmentation du rapport E/C et donc de la quantité d'eau conduit normalement à une augmentation de l'affaissement très nette se traduisant par une diminution rapide de constante visqueuse et donc des frottements. Le seuil d'interface suit un comportement similaire.

Enfin, les essais ont montré aussi l'importance de la granulométrie du mélange granulaire sur les paramètres de pompage et donc sur la pompabilité. L'augmentation du rapport G/S diminue la constante visqueuse de façon linéaire et donc les frottements à l'interface béton-acier, ce qui favorise aussi la pompabilité. Mais, cette augmentation influe peu sur l'affaissement du béton et le seuil d'interface.

5. Bibliographie

- Bartos P., *Fresh Concrete, Properties and Tests*, Elsevier, 292 pages, Amsterdam, 1992.
- Choinard B., Etude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité, Mémoire d'études supérieures de l'Université Laval, Canada, février 1999.
- Ferraris et De Larrard, Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6094, février, 61 pages, 1998.
- Tarrersall, *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman, 365 pages, London, 1983.
- Kaplan D., *Pompage des bétons*, Etudes des recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2001.