

# INFLUENCE DE LA FORMULATION DU BÉTON LORS DE SA MISE EN PLACE DANS LES COFFRAGES

S. BOUHAROUN<sup>1\*</sup>, C. DJELAL<sup>2\*</sup>, Y. VANHOVE<sup>3\*</sup>, I. DUBOIS<sup>4\*\*</sup>

<sup>1</sup>LAMTI, PRES, Université de Lille Nord de France, IUT, 1230 rue de l'Université, 62408 Béthune Cedex

<sup>\*\*</sup>Centre de Recherche Lafarge, 95 rue du Montmurier, BP 15, 38291 St Quentin Fallavier

## 1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau largement utilisé dans le monde pour de nombreux cas de construction. Il doit répondre à plusieurs exigences de sécurité, de durabilité et d'esthétique. La facilité offerte par le béton lors de sa mise en œuvre est liée directement à la quantité de pâte présente dans le volume. La pâte est donc un élément unique et actif du béton enrobant les granulats et remplissant les vides existants dans le squelette granulaire. Cette pâte joue également un rôle de lubrifiant en limitant les forces de frottement intergranulaires [Chapdelaine, 2007]. La capacité de mise en œuvre du béton est améliorée dans certain cas avec l'ajout de superplastifiant dans le béton.

Le but de cette étude est de comprendre l'influence du volume de pâte et le dosage en superplastifiant sur les mécanismes intervenant lors de la mise en œuvre des bétons dans les coffrages, et en particulier le comportement du béton à l'interface béton/coffrage. Des essais ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre plan/plan, sur quatre bétons possédant différents volumes de pâte, deux bétons adjuvantés et un béton auto-plaçant (BAP). L'analyse des résultats montre que l'augmentation du volume de pâte et le dosage en superplastifiant influencent de manière importante le frottement à l'interface béton/coffrage.

## 2. MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

### 2.1. Le tribomètre plan/plan

Le tribomètre [Djelal *et al.*, 2004], [Vanhove *et al.*, 2004] permet d'étudier le frottement entre un échantillon de béton et une surface métallique. Sur ce tribomètre, le contact se produit entre deux surfaces planes. Le principe consiste à faire glisser une plaque métallique entre deux échantillons de béton (Figure 1). Le matériau est placé dans des porte-échantillons cylindriques de 120 mm de diamètre. Des joints d'étanchéité sont montés sur les porte-échantillons afin d'éviter tout départ du béton. Les échantillons de béton sont appliqués contre la plaque par l'intermédiaire d'un vérin. La mise en mouvement de la plaque s'effectue à l'aide d'un moteur accouplé à une vis sans fin. Le déplacement de la plaque est de 800 mm. La pression de contact peut atteindre 1700 kPa. La vitesse de glissement varie de 0 à 300 mm/s. La contrainte de frottement ou tangentielle est définie comme suit :

$$\tau_f = \frac{\text{Force mesurée} - \text{Force parasite}}{\text{Section du porte échantillon}} = \frac{F_{mes} - F_{par}}{S_c}$$



Figure 1. Tribomètre.

$F_{par}$  est la résultante des forces de frottement parasites due au système d'étanchéité contre la plaque (essai à vide).  $F_{mes}$  est la somme de la résultante des forces de frottement tangentielles des deux échantillons de béton contre la plaque et la résultante des forces parasites. La surface en contact ( $S_c$ ) entre le béton et la plaque est calculée à partir du diamètre du porte-échantillon. Dans notre cas, celle-ci est de  $S_c = 113,1 \text{ cm}^2$ .

## 2.2. Caractéristiques des matériaux

Afin d'étudier le comportement tribologique béton/paroi, quatre bétons ordinaires et deux bétons adjuvantés de classe S3, très plastique, et un BAP ont été formulés.

### 2.2.1. Les bétons

Quatre bétons (B1, B2, B3, B4) possédant 28 %, 30 %, 32 % et 34 % de volume de pâte ont été confectionnés pour étudier l'effet de la quantité d'éléments fins apportés par le ciment et le filler. Les rapports Eau/Ciment (E/C), Ciment/Filler et Gravillon/Sable (G/S) ont été gardés constants pour les quatre compositions (voir le tableau 1). Afin de mieux comprendre les effets du dosage en superplastifiant, un BAP à 36 % de pâte et deux bétons adjuvantés à 30 % de pâte (BA1, BA2) avec un dosage différent de superplastifiant, sont étudiés. La composition des bétons est donnée au Tableau 2.

Le GLENIUM 27 est un superplastifiant à haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C et avec un long maintien de maniabilité. Cet adjuvant non chloré est d'une nouvelle génération chimique à base d'éther poly carboxylique.

La granulométrie du béton est très étalée. Elle est de l'ordre du micron pour les grains de ciment et de filler calcaire et peut atteindre 12,5 mm de diamètre pour les gravillons. Seront appelées *particules fines ou fines* tous les éléments du sable, de ciment et fillers dont le diamètre est inférieur à 63  $\mu\text{m}$ . La forme anguleuse de ces grains peut jouer un rôle important sur la contrainte de frottement à l'interface béton/paroi.

Afin de mesurer la consistance du béton, des essais d'affaissement (BAP) et d'étalement pour les bétons vibrés ont été réalisés.

### 2.2.2. La surface métallique

Concernant la plaque du tribomètre, celle-ci a été prélevée dans des parois de coffrage, pour se placer dans des condi-

Béton	B1	B2	B3	B4	BA1	BA2	BAP
Affaissement (mm)	120	130	140	150	130	130	-
Etalement (mm)	-	-	-	-	-	-	650
Taux de remplissage (%)	-	-	-	-	-	-	91
ségrégation (%)	-	-	-	-	-	-	8
Eau/ (ciment+filler)	0,57				0,5	0,43	0,45
Gravillon/sable	1,27						

Tableau 1. Propriétés des bétons.

Bétons	B1	B2	B3	B4	BA1	BA2	BAP
Volume de pâte (%)	28	30	32	34	30	30	36
Ciment CEM I 52,5 CP2 (kg/m <sup>3</sup> )	232	248	265	282	269	294	367
Filler calcaire (kg/m <sup>3</sup> )	77	83	88	94	90	98	92
Sable de l'Oise 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	838	815	792	768	815	815	751
Gravillon concassé 4/8 (kg/m <sup>3</sup> )	287	279	271	263	279	279	243
Gravillon concassé 8/12,5 (kg/m <sup>3</sup> )	778	756	734	712	756	756	658
Sp GLENIUM 27 (l/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	2	3,20	5,75
Eau (Kg/m <sup>3</sup> )	176	189	201	214	179	169	206

Tableau 2. Composition des bétons.

tions proches de celles des chantiers. L'un des paramètres qui caractérise le coffrage est sa rugosité (légère inégalité de surface). La rugosité influence directement le frottement du béton sur le coffrage [Djelal *et al.*, 2004]. Une rugosité moyenne a été mesurée à l'aide d'un rugosimètre portable :  $R_a = 0,9 \mu\text{m}$  ( $R_a$  est la distance moyenne entre le pic le plus haut et le plus bas des profils de rugosité de la plaque) et  $R_t = 6,9 \mu\text{m}$  ( $R_t$  est la hauteur du pic à vallée maximale du profil rugosité).

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette étude, l'influence de la pression, du volume de pâte et du dosage en superplastifiant ont été étudiées pour des bétons en contact avec la plaque, sans agent de démoulage.

#### 3.1. Influence de la pression

La Figure 2 présente l'évolution de la contrainte de frottement enregistrée en fonction du temps pour un béton à 28 % de pâte pour différentes pressions. Toutes les courbes enregistrées présentent la même allure quels que soit la pression ou le volume de pâte testés. Ces courbes peuvent être décomposées en deux zones :

- La zone I qui correspond au temps de démarrage du moteur et à la réponse de la chaîne mécanique.
- La zone II traduit un régime stationnaire. Les contraintes de frottement statique et dynamique sont identiques pour ce type d'interface (béton/acier).

La Figure 3 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour un béton à 28 % de volume de pâte. Chaque point de cette courbe traduit une moyenne de cinq points sur le régime dynamique (Zone II) de la Figure 2.

La contrainte de frottement croît lorsque la pression augmente. La contrainte normale appliquée au matériau est transmise à la phase granulaire et à la pâte formée par le liant (ciment, filler). Sous l'effet de cette contrainte, une partie des fines va migrer en direction de la plaque métallique (Figure 4a). Une couche limite lubrifiante composée d'eau et des fines apparaît à l'interface. La plaque de rugosité faible ( $0,9 \mu\text{m}$ ) ne possède pas de rainures suffisam-

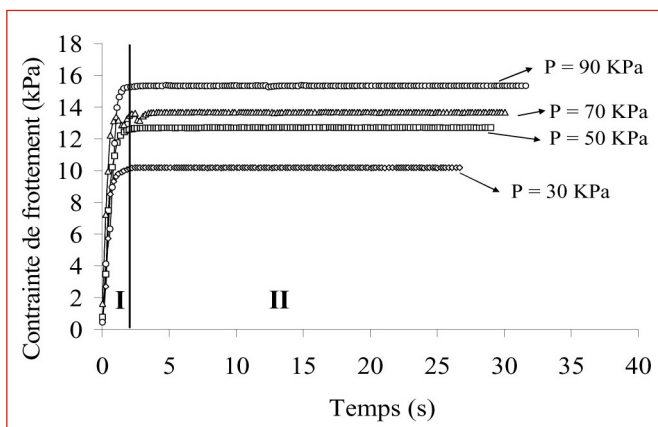


Figure 2. Evolution de la contrainte de frottement pour un volume de pâte de 28 % en fonction du temps.

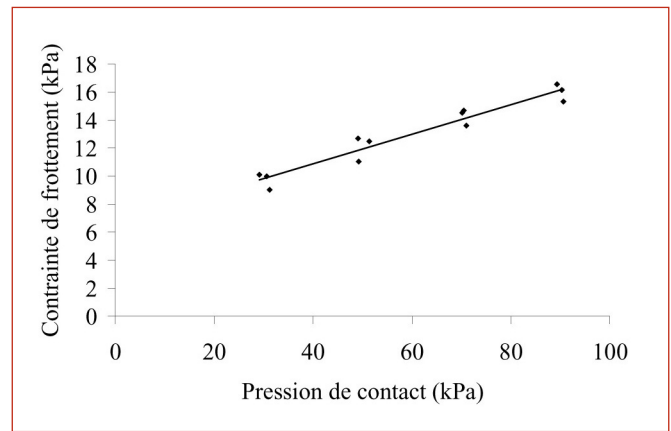


Figure 3. Evolution de la contrainte de frottement pour un volume de pâte de 28 % en fonction de la pression de contact.

ment profondes pour permettre à la couche limite de s'écouler.

Dans le cas des faibles pressions, celle-ci reste emprisonnée à l'interface béton/plaque. Elles se mettent alors en pression et reprend une partie de la contrainte normale ou pression (Figure 4b).

Quand les pressions augmentent, on suppose que la phase liquide initialement emprisonnée à l'interface va migrer dans l'échantillon sous l'effet de la pression (Figure 4c). L'épaisseur de la couche limite n'est pas suffisamment importante pour empêcher le contact des granulats sur la surface métallique. Les grains de ciment et de filler sont en contact avec la plaque. Une énergie plus importante est nécessaire pour cisailier la couche limite. Ce phénomène entraîne une augmentation de la contrainte de frottement. Le frottement est alors de type granulaire.

Les phénomènes décrits sont identiques pour les autres bétons (30 à 34 % de volume de pâte).

#### 3.2. Influence du volume de pâte

La figure 5 montre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression pour les bétons B1 à B4. La contrainte de frottement diminue quand le volume de pâte diminue. Les grains de ciment en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas (flocs) avec une structure en château de cartes (Figure 6). Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la

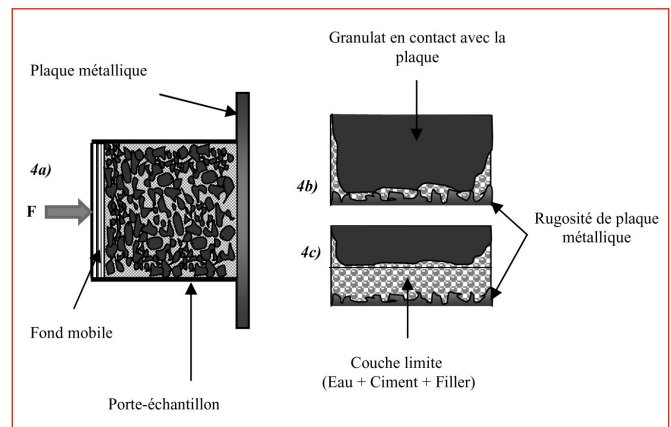


Figure 4. Mécanismes intervenant à l'interface béton/paroi.

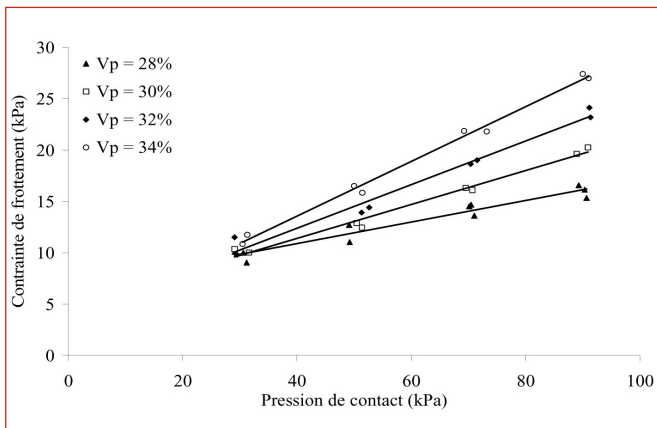


Figure 5. Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact.

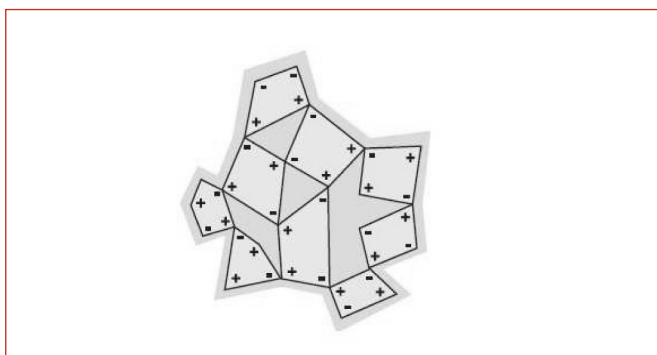


Figure 6. Agglomération des grains de ciment [Rixom et al., 1986]

surface des grains et en l'absence de réducteur d'eau, ils tendent à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des amas de grains [Rixom *et al.*, 1986]. Cette eau emprisonnée, se déplace avec l'agglomérat comme si elle était solide [Coussot *et al.*, 2002].

Avec l'augmentation du pourcentage de pâte, le nombre de floccs augmente ce qui entraîne un encombrement dans la couche limite. Sous l'effet de la pression de contact, ces agglomérats ont plus de difficultés à se mouvoir, la couche limite devient plus rigide, ce qui induit une augmentation plus importante de la contrainte de frottement. Le béton 34 % possède 2,2 % de fines (ciment + filler) de plus que le béton à 28 % de pâte. L'encombrement dans le béton (en particulier à l'interface) est plus important. Ce phénomène peut expliquer les contraintes plus importantes observées pour le béton 34 %.

### 3.3. Influence du dosage de superplastifiant

La Figure 7 illustre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour quatre bétons, un béton à 30 % de pâte, un BAP et deux bétons adjuvantés. La contrainte de frottement diminue lorsque le dosage en superplastifiant augmente.

La présence du superplastifiant dans un béton, disperse les grains de ciment par l'effet stérique et répulsion électrostatique (Nicoleau L, 2004). Les molécules du superplastifiant s'adsorbent à la surface des particules du ciment leur conférant des charges électrostatiques négatives.

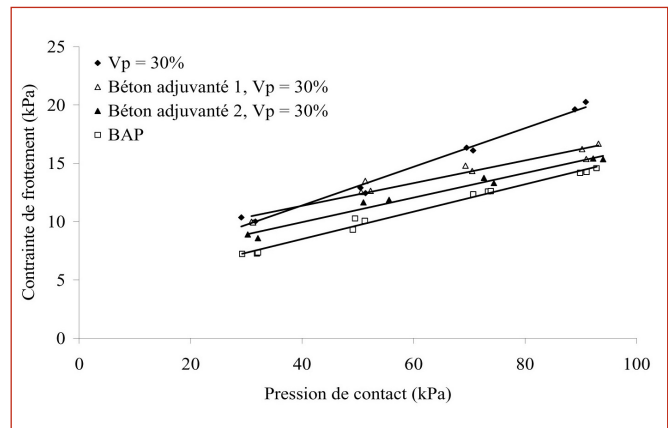


Figure 7. Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact.

De cette façon, les particules de ciment se repoussent et sont déflocculées. Lorsque le dosage en superplastifiant augmente, le pouvoir dispersant sur les grains de ciment croît. Cette augmentation réduit les frottements intergranulaires, libère plus de quantité d'eau emprisonnée et augmente le taux de déformation. Ce qui améliore la fluidité du béton.

La couche limite est alors moins rigide, plus fluide. Le mouvement des grains de ciment est plus aisé et permet ainsi une déformation plus facile du milieu sous cisaillement. Ce qui entraîne une diminution des contraintes de frottement à l'interface béton/paroi.

## 4. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de montrer l'influence de la teneur en fines dans un béton et le dosage en superplastifiant sur le comportement tribologique à l'interface béton/coffrage. Deux phénomènes ont pu être observés :

- L'augmentation du volume de pâte conduit à une augmentation des contraintes de frottement à l'interface béton/coffrage. L'encombrement des particules fines dans la couche limite provoque une augmentation des frottements.
- La présence du superplastifiant dans un béton, diminue les contraintes de frottement à l'interface béton/paroi. Les résultats obtenus à l'aide du BAP et des bétons adjuvantés confirment que l'augmentation du dosage en superplastifiant diminue les contraintes de frottement. Enfin, les résultats ont montré une réduction notable des frottements pour le béton autoplaçant malgré son pourcentage élevé de pâte (36 % de pâte).

## BIBLIOGRAPHIE

- Chapdelaine F., Etude fondamentale et pratique sur le pompage du béton, Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec, Canada, Janvier 2007, p.154.
- Coussot P, Grossiord J.L., (Eds) *Comprendre la rhéologie – De la circulation du sang à la prise du béton*, EDP Sciences, Paris, 2002.

Djelal C., Vanhove Y., Magnin A., Tribological behaviour of self compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, N° 5, 2004, p. 821-828.

Nicoleau L., Interactions physico-chimiques entre le latex et les phases minérales constituant le ciment au cours de l'hydratation. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 2004.

Rixom M.R., Mailvaganam N.P., *Chemical admixtures for concrete*, E.& F.N. Spon, Ed., London, 1986, Second edition.

Vanhove Y., Djelal C, Magnin A., A device for studying fresh concrete friction, *Cement Concrete and Aggregates*, Vol. 26, N°2, December 2004, p. 35-41.