

---

## Couche limite et l'effet de la composition des bétons sur leur pompabilité

T. T. Ngo<sup>1\*</sup>, E. H. Kadri<sup>1</sup>, F. Cussigh<sup>2</sup>, H. Soualhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire L2MGC, Université Cergy-Pontoise, 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France.

<sup>2</sup>VINCI Construction-France, 61 Avenue Jules Quentin, 92730 Nanterre Cedex, France.

Tien-tung.ngo@u-cergy.fr, [el-hadj.kadri@u-cergy.fr](mailto:el-hadj.kadri@u-cergy.fr), francois.cussigh@vinci-construction.fr, hamza.soualhi@u-cergy.fr.

---

**RÉSUMÉ :** La "pompabilité" d'un béton est conditionnée par les frottements à l'interface entre le béton et la paroi de la tuyauterie. Ces frottements sont mesurés par des appareils appelés « tribomètre ». Un tribomètre développé précédemment dans nos études a été utilisé dans ce programme expérimental. Les résultats de ce programme permettent de mettre en évidence la présence des particules fines du sable de diamètre inférieur à 0,25 mm dans la couche limite formée à l'interface béton - paroi de tuyauterie au cours de pompage, ce qui détermine les frottements à l'interface et donc la "pompabilité". Ils ont également permis de quantifier l'influence de chacun des paramètres principaux de composition du béton sur les frottements et donc sur la "pompabilité".

**ABSTRACT:** "Pumpability" of concrete is conditioned by friction at the interface between the concrete and the piping walls. This friction can be measured by apparatus called tribometer. In this study, a tribometer, developed before, was used to study influence of the composition parameters of concrete on the interface friction and to distinguish pumping parameters of different concretes. It was also used in our experimental programme whose obtained results shown the presence of fine sand particles of diameter lower than 0.25 mm in the boundary layer formed at the concrete-wall interface of piping during pumping. It determines the interface friction. The tribometer test also enabled to quantify the influence of each principal parameter of concrete composition on the interface friction and the "pumpability".

**MOTS-CLÉS :** tribometre, pompabilité, frottement, constante visqueuse, couche limite.

**KEYWORDS:** tribometer, pumpability, friction, viscous constant, boundary layer.

---

## 1. Introduction

La technique de pompage du béton est largement utilisée de nos jours dans la construction industrielle, elle consiste à utiliser des 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. Pour pouvoir utiliser cette technique, il est indispensable que le béton soit considéré comme "pompable". Cela demande donc aux utilisateurs de cette technique de toujours savoir estimer et prévenir la "pompabilité" du béton utilisé afin de l'améliorer. Les recherches dans ce domaine ont tous montré le rôle déterminant des frottements à l'interface béton - paroi de tuyau de pompage. Autrement dit on peut prévenir la "pompabilité" d'un béton en s'appuyant sur les frottements à cet interface (couche limite), ce qui est conditionné par sa composition (Best et al., 1960), (Morinaga, 1973), (Chouinard, 1999), (Kaplan, 2000), (Kaplan et al., 2005) et (Chapdelaine, 2007], (Burns et al., 2007), (Ngo, 2009), (Ngo et al., 2010 a,b). Les études précédentes ont permis de mettre au point des appareils (appelé tribomètre) pour mesurer les frottements et de construire un modèle prédictif de la pression de pompage en fonction du débit et les mesures au tribomètre (Kaplan et al., 2005). (Chapdelaine, 2007). Dans ce travail, nous avons utilisé notre tribomètre développé précédemment pour étudier l'influence des paramètres de composition des bétons sur la composition de la couche limite et les frottements à l'interface et aussi les paramètres de pompage.

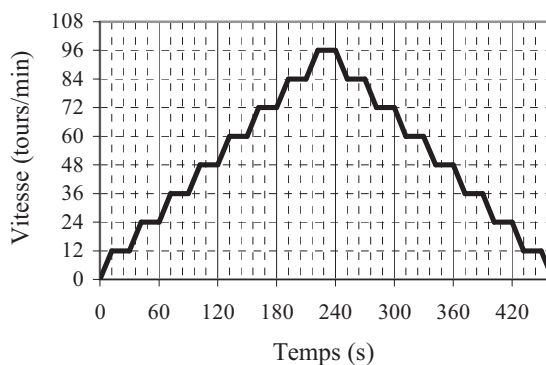
## 2. Tribomètre pour mesurer les frottements à l'interface béton-acier

### 2.1. Version définitive du tribomètre

Le tribomètre utilisé se compose de trois parties principales (Figure 1) : un agitateur à régulation électronique de vitesse permettant l'enregistrement du couple ; une pièce cylindrique en acier lisse de 10 cm de hauteur et 10,7 cm de diamètre ; un récipient de 20 cm de hauteur et 30 cm de diamètre.



**Figure 1.** Photo du tribomètre et de la procédure : (a) récipient vide ; (b) récipient rempli jusqu'à mi-hauteur ; (c) remplissage jusqu'à l'arase du récipient.



**Figure II.** Profil de vitesse de rotation du cylindre.

L'agitateur est placé en haut du cylindre tournant, lui-même plongé dans le récipient de béton. Le fonctionnement du tribomètre est complètement piloté par un logiciel installé dans l'ordinateur. Ce logiciel enregistre les couples de frottement en fonction de la vitesse de rotation du cylindre selon le profil de vitesse de la Figure 2.

## 2.2. Mode opératoire du tribomètre

**1<sup>er</sup> étape :** remplir la moitié du récipient avec le béton. Ensuite, piquer 25 fois avec une tige à piquage afin d'assurer le remplissage correct du volume.

**2<sup>ème</sup> étape :** centrer et poser le cylindre sur la surface du béton et assurer un bon contact entre le cylindre et le béton (Figure I-b).

**3<sup>ème</sup> étape :** Mesurer les couples de frottement correspondant à chaque palier de vitesse imposé. Cette étape permet de mesurer les couples de frottements au fond du cylindre.

**4<sup>ème</sup> étape :** A l'issue de cette première opération, on remplit le béton jusqu'à l'arase du récipient. Ensuite, piquer 25 fois avec la tige afin d'assurer le serrage du béton dans le récipient (Figure I-c).

**5<sup>ème</sup> étape :** Mesurer les couples de frottements totaux au fond et sur la surface latérale du cylindre correspondant à chaque palier de vitesse imposé.

**6<sup>ème</sup> étape :** obtenir les couples de frottement moyens à l'interface béton – acier par la différence des deux mesures correspondant à un remplissage du béton à l'arase et à mi-hauteur du récipient.

## 2.3. Exploitation des mesures au tribomètre

Le résultat brut d'un essai réalisé avec le tribomètre se présente sous la forme :

$$T = T_0 + kV_{rot} \quad [1]$$

où :  $T$  (N.m) est le couple total appliqué sur le cylindre tournant ;  $T_0$  (N.m) le couple au démarrage ;  $k$  (N.m.s) un coefficient ;  $V_{rot}$  (tour/s) est la vitesse de rotation du cylindre.

Le cisaillement du béton à l'interface acier-béton s'écrit sous la forme générale (Kaplan et al, 2005):

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

où :  $\tau$  (Pa) est la contrainte de cisaillement à l'interface ;  $\tau_0$  (Pa) le seuil d'interface ;  $\eta$  (Pa.s/m) la constante visqueuse ;  $v$  (m/s) la vitesse relative de glissement.

En tenant compte de la dimension du cylindre, les paramètres de pompage ( $\tau_0$  et  $\eta$ ) à partir des valeurs de  $T_0$  et  $V_{rot}$  trouvés lors de l'essai tribologique sont donnés par :

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

où :  $R$ (m) est le rayon moyen du cylindre ;  $T$  (N.m) le couple mesuré ;  $h$ (m) la hauteur du cylindre et  $k$  (N.m.s) est le coefficient de régression linéaire.

### 3. Composition de la couche limite

La couche limite joue un rôle primordial dans la pompabilité d'un béton. Il est donc important de connaître la composition de cette couche. Certains auteurs ont signalé la présence de particules fines de sable dans la couche limite mais sans préciser la dimension maximale de ces particules et la proportion relative des différentes fractions granulaires (Kaplan et al., 2005), (Chapdelaine, 2007). Des analyses de la composition de la couche limite formée sur plusieurs séries de bétons ont été réalisées dans notre étude.

#### 3.1 Prélèvement de la couche limite

Dans un premier temps, le prélèvement de la couche limite est réalisé en soulevant le cylindre dès la fin de l'essai (Figure 3-a). Pour la plupart des bétons testés, la quantité de matière prélevée par cette méthode est faible car l'épaisseur de la couche est limitée. Cette façon de procéder a été donc abandonnée. Une autre méthode équivalente a été ensuite adoptée, ce qui permet de récupérer une quantité suffisante de matériau pour procéder à une analyse plus fiable.

## La couche limite et la pompabilité des bétons

La procédure est la suivante : après la fin de l'essai, le béton est à nouveau remélangé dans le récipient. Le cylindre est ensuite remplacé par un disque posé sur la surface du béton qui est mis en rotation avec les mêmes paliers de vitesse (Figure III-c). Lorsque cette opération est terminée, le disque est soulevé et la matière constituant la couche limite concentrée au centre de la surface libre en béton est prélevée à l'aide d'une cuillère (Figure III-b).

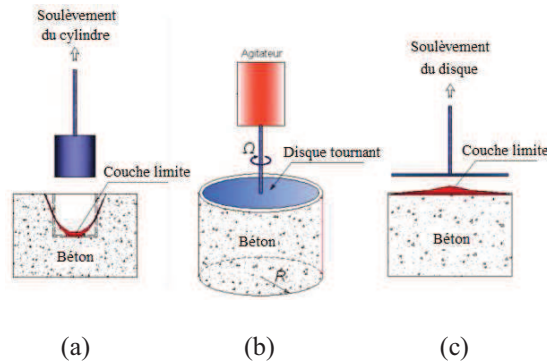


Figure III. Le prélèvement de la couche limite.

La matière prélevée de la couche limite a été placée dans un tamis de diamètre  $80\ \mu\text{m}$ , cette quantité est ensuite lavée pour éliminer complètement le ciment. Puis elle est mise à sécher dans une étuve pendant 24 heures à  $105^\circ\text{C}$  pour éliminer l'eau. Nous avons ensuite analysé la granulométrie du sable séché et comparé avec celle du sable de béton équivalent.

La granulométrie du sable de la couche limite prélevée, à partir d'un même béton (le volume de pâte est égal à  $0,378\text{m}^3$  et les rapports E/C et G/S égaux respectivement à 0,5 et 1,2), par les deux méthodes a été comparé. Les résultats représentés sur la Figure 4 montrent que ces deux méthodes sont similaires.

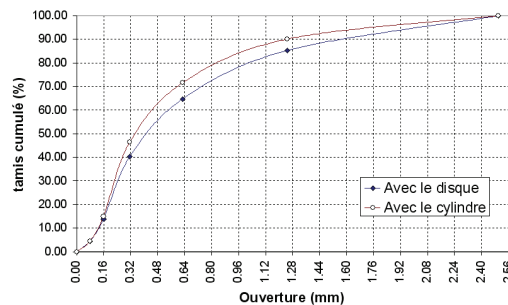


Figure IV. Granulométrie du sable de composition de la couche limite.

### 3.2 Programme expérimental

Plusieurs séries de bétons ont été testées, en utilisant la méthode de prélèvement validé précédemment, en faisant varier les paramètres les plus influents sur la composition afin d'obtenir des résultats généralisables.

La composition des bétons testés est rassemblée dans le tableau I.

Séries	Béton	V <sub>pâte</sub> (m <sup>3</sup> )	E/C	Sp (%)	Ciment (kg)	Eau (kg)	Graviers (kg)	Sable (kg)	Sablon (kg)
Série 1	B1	0,378	0,50	0	460	230	847	706	0
	B2	0,354			430	215	881	734	
	B3	0,329			400	200	915	762	
	B4	0,308			375	188	943	786	
Série 2	B10	0,378	0,55	0	434	239	847	706	0
	B1		0,50		460	230			
	B11		0,45		490	220			
	B12		0,40		524	209			
Série 3	B+adj0,25%	0,327	0,45	0,25	426	190	915	762	0
	B+adj0,50%	0,000		0,50					
	B+adj0,75%	0,000		0,75					
Série 4	BST	0,354	0,50	0	430	215	881	734	0
	BSb0							734	0
	BSb10%							661	73
	BSb20%							588	147
	BSb30%							514	220

**Tableau I.** Composition des bétons testés.

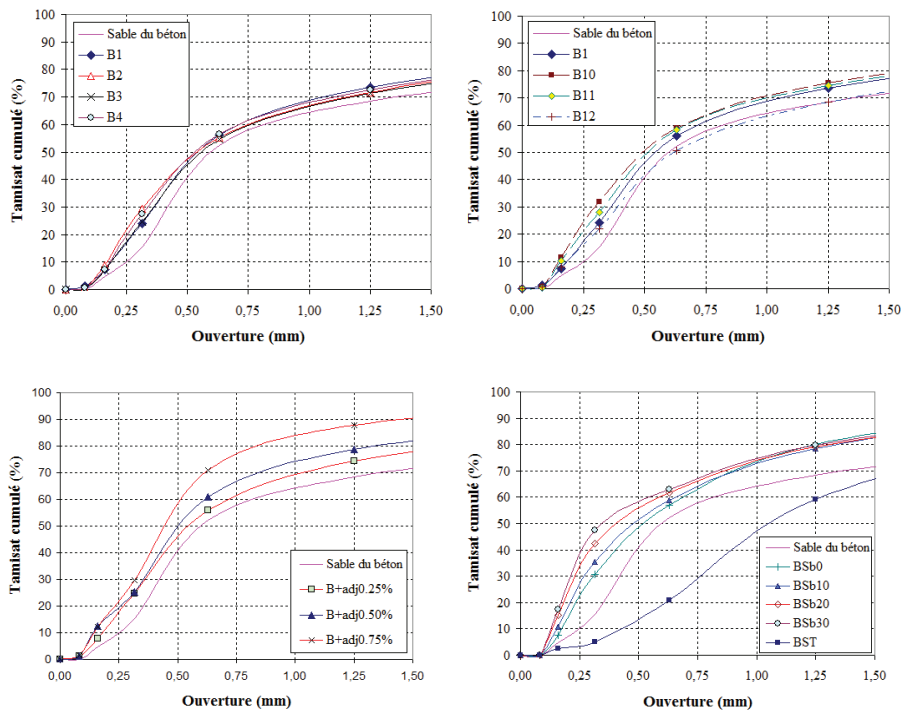
Matériaux utilisés dans cette étude : les granulats semi-calcaires, le gravier a une classe granulaire 10/20 et de densité 2,5 ; le sable a pour classe granulaire 0/4, de densité 2,5 ; le sablon a une classe granulaire 0/2, de densité 2,5 ; le ciment utilisé est du type CEM I 52,5.

### 3.3 Résultats et discussion

La figure V représente la comparaison des courbes granulométriques du sable du béton et du sable dans les couches limites. Les résultats montrent que : (i) il y a un enrichissement très net en particules fines au diamètre inférieur à 0,25 mm et cet enrichissement est plus prononcé avec la variation du rapport E/C qu'avec celle du volume de pâte ; (ii) l'addition de superplastifiant influe peu sur l'enrichissement en sable fin de diamètre inférieur à 0,25mm dans la couche limite ; (iii) Concernant l'influence des particules fines du sable sur la composition de la couche limite, la figure montre tout d'abord l'absence quasi complète de fines dans le cas du béton

BST. Par ailleurs à la coupure de 0,25 mm, on constate un enrichissement important en fines qui augmente avec le pourcentage de sablon introduit.

En définitive la comparaison des courbes granulométriques du sable des couches limites avec celle du sable du béton nous permet de constater un enrichissement en particules fines de sable inférieures à 0,25 mm dans la couche limite. De plus la concentration en fines dans la couche limite s'accroît avec la quantité de sable fin présent dans le béton.



**Figure V.** Comparaison entre les courbes granulométriques du sable de la couche limite et du sable du béton.

Les estimations et les observations sur l'épaisseur de la couche limite formée au cours des essais montrent que cette épaisseur varie entre 2 et 9 mm environ suivant les paramètres de composition des bétons.

Ainsi que l'augmentation du volume de pâte, du rapport E/C et de la quantité de superplastifiant entraînent un accroissement de l'épaisseur de la couche limite. Au contraire, l'introduction croissante de fines dans le béton (sablon) conduit progressivement à une diminution de l'épaisseur de cette couche. De plus, les bétons qui contiennent trop de fines ou les bétons dont le volume de pâte et le rapport E/C sont faibles ne forment que difficilement une couche limite.

#### 4. Influence des paramètres de composition

##### 4.1. Programme expérimental

Un exemple sur l'utilisation du tribomètre pour étudier l'influence des paramètres de composition des bétons fluides sur les frottements est donné ci-dessous. Les paramètres de composition étudiés sont le volume de pâte et le rapport E/C comme montré dans le tableau II.

Matériaux utilisés dans cette étude sont les mêmes que ceux utilisés dans l'étude sur la couche limite.

Séries	Bétons	E/C	G/S	Volume de pâte (m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Granulat (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (cm)	$\eta$ (Pa.s/m)
Série 1	B1	0.50	1.2	0.378	460	230	848	706	21	212
	B2			0.354	430	215	881	734	19	276
	B3			0.329	400	200	915	763	18	378
	B4			0.308	375	188	943	786	13	420
Série 2	B10	0.55	1.2	0.378	434	239	848	706	23	164
	B1	0.50			460	230			21	212
	B11	0.45			490	220			18	411
	B12	0.40			524	210			11	883

Tableau II. Compositions des bétons testés et les mesures correspondant.

##### 4.2. Résultats et discussion

Les résultats obtenus à partir de deux séries de bétons testés sont présentés dans la figure VI. Les résultats montrent bien que l'essai tribométrique permet de bien distinguer les frottements béton-acier des bétons différents. Ils montrent que les couples de frottement varient linéairement en fonction de la vitesse, ce qui représente bien le comportement binghamien du béton. L'augmentation du volume de pâte (lors du passage du béton B4 au béton B1) et l'augmentation du rapport E/C (lors du passage du béton B12 au béton B10) s'accompagne d'une diminution des frottements à l'interface béton-acier (la pente des droites diminue nettement), ce qui facilite le pompage du béton.

La variation de la constante visqueuse avec la constante visqueuse, le paramètre le plus important déterminant les frottements et conditionne donc le pompage « facile » ou « difficile » d'un béton est présentée sur la figure VII et le tableau 2. La figure montre que : (i) l'augmentation du volume de pâte ou/et le rapport E/C du béton entraîne une diminution de la constante visqueuse, ce qui favorise le pompage ; (ii) il semble que l'effet de la modification du rapport E/C sur la constante visqueuse est plus important que celui du volume de pâte.



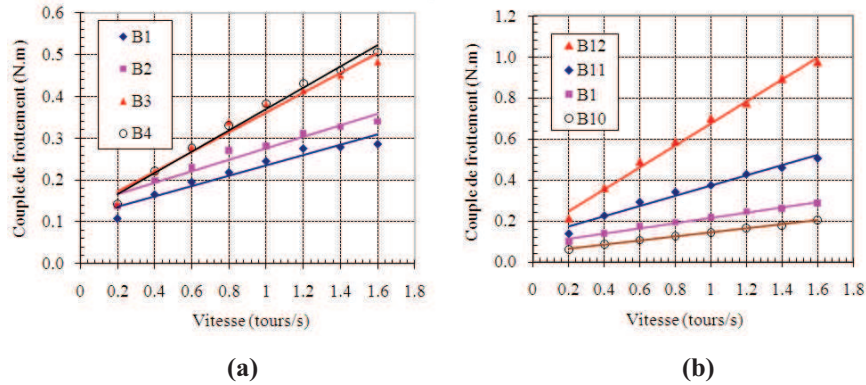


Figure VI. Variation des couples de frottement en fonction de la vitesse : (a) série 1 – influence du volume de pâte ; (b) série 2 – influence du rapport E/C.

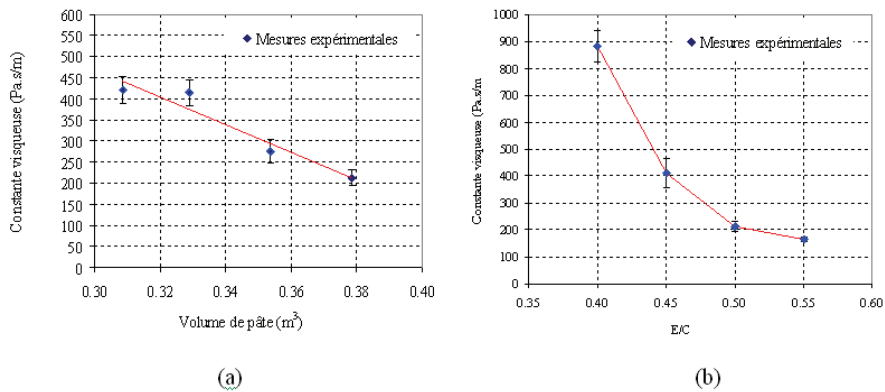


Figure VII. Variation de la constante visqueuse en fonction des paramètres de composition : (a) série 1 – variation du volume de pâte ; (b) série 2 – variation du rapport E/C.

## 5. Conclusion

Le rôle important de la couche limite sur les frottements à l'interface béton-acier a été bien montré. Les résultats de cette études ont bien montré que : (i) La couche limite constitue de l'eau, du ciment et des particules fines de diamètre inférieur à 0,25 mm du sable de béton. L'enrichissement des fines dans la couche limite dépend très peu de la variation du volume de pâte et/ou du rapport E/C du béton. Il ne dépend pas du dosage en superplastifiant dans le béton. Par contre cet

enrichissement croît avec l'augmentation de la proportion des fines dans le béton ; (ii) le tribomètre permet de bien distinguer les frottements de différents bétons ; (iii) en modifiant la composition du béton, nous pouvons affecter les paramètres de pompage ; (iv) effet des paramètres de composition sur les frottements béton-acier est différent. Il est donc possible, en réalisant des mesures tribométriques sur les bétons dont les paramètres de composition sont modifiés, de savoir quels paramètres de composition doivent être modifiés (en gardant la résistance souhaitable) pour obtenir un béton plus « facile » à pomper.

## 6. Bibliographie

- Best J., Lane R., « Testing For Optimum Pumpability of Concrete », *Concrete International*, October 1960, p. 9-17.
- Burns D. et al., Etat des connaissances dans le béton projeté par voie humide, Rapport de recherche, Département de génie civil, Université Laval, Canada, G1K 7P4, 2007.
- Chouinard B., Etude des relations entre la rhéologie du béton et sa "pompabilité", Mémoire de maîtrise, Université Laval, février 1999.
- Chapdelaine F., Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton, Thèse de doctorat, Université Laval, Canada, 2007.
- Kaplan D. (2000), *Pompage des bétons*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2000.
- Kaplan D., De Larrard F., Sedran T., « Design of Concrete Pumping Circuit », *ACI Materials journal*, Vol. 102, N° 2, March – April, 2005.
- Kaplan D., De Larrard F., Sedran T., « Avoidance of Blockages in Concrete Pumping Process », *ACI Materials journal*, Vol. 102, N° 3, May – June, 2005.
- Morinaga M., « Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines, Fresh Concrete: Important Properties and Their Measurement », *Proceedings of a RILEM, Seminar Held March*, Leeds, vol.7, p.1-39, 1973.
- Ngo T.T., Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d'un modèle de prévision de la constante visqueuse, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France, 2009.
- Ngo T.T., Kadri E.H., Bennacer R., Cussigh F., « Use of tribometer to estimate the concrete boundary layer composition during the fluid pumpability », *Construction & Building Materials*, Elsevier, Vol. 24, p. 1253-1261. 2010
- Ngo T.T., Kadri E.H., Bennacer R., Cussigh F., « Practical tribometer to estimate pumpability of fresh concrete », *Journal of Asian Architecture and Building Engineering (JAABE)*, Vol. 9, n° 1. 2010, p. 229-236, 2010.