
Etude de l'influence des additions et des superplastifiants sur le comportement rhéologique des bétons autoplacants à l'aide de trois rhéomètres

Elhachemi Agnaou¹, Yannick Vanhove¹, Chafika Djelal-Dantec¹

¹ Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), 62400 Béthune, France, agnaouel@gmail.com

RÉSUMÉ. D'un point de vue rhéologique, les Bétons Autoplacants (BAP) sont caractérisés par un faible seuil de cisaillement et une viscosité modérée, ce qui leur permet de se mettre en place par effet gravitaire sans nécessité de vibration. Afin de déterminer ces paramètres, des essais conventionnels tels que l'essai d'étalement sont utilisés dans la littérature. Cependant, ces essais ne permettent pas de caractériser l'ouvrabilité des bétons en termes de paramètres fondamentaux. De nombreux efforts ont été fournis ces dernières années afin de développer des outils capables de déterminer les propriétés d'écoulement des bétons pour mieux décrire leur ouvrabilité. Parmi ces outils, les rhéomètres sont les plus utilisés. Mais malgré leur grande variété, peu d'études ont été faites sur la comparaison des grandeurs rhéologiques obtenues avec ces appareils. Dans cette étude, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique de quatre différentes formulations de bétons autoplacants ont été mesurés à l'aide de trois rhéomètres : l'ICAR, le RheoCAD500 et le ConTec Rheometer-4SCC. Des relations linéaires ont été trouvées entre les rhéomètres en termes de viscosité plastique et de seuil de cisaillement. Cette étude a permis d'établir de nouvelles corrélations rhéologiques pour les bétons autoplacants.

ABSTRACT. From a rheological point of view, Self-Consolidating Concretes (SCC) are characterized by low yield stress and moderate plastic viscosity, allowing them to flow and to consolidate only under their own weight. In order to determinate these parameters, conventional workability test methods as the slump test were often used in the literature. However, these tests fail to characterize workability of concrete in terms of fundamental rheological parameters. Many efforts were made over the last decades to develop tools that will ultimately allow to determine the flow properties of concrete and to better describe its workability. The most important tools are the rheometers which allow measuring the concrete flow properties. However, despite their variety, comparison studies of rheological parameters are still lacking in the literature. In this study, the yield stress and the plastic viscosity, of four different self-compacting concrete mixtures were measured using three different rheometers; the ICAR, the RheoCAD500, and the Con-Tec Rheometer-4SCC. Linear relationships were found between rheometers in a wider range of plastic viscosities and yield stress. A good degree of correlation was obtained for the yield stress and the plastic viscosity. This study establishes new rheological correlations for these types of rheometer for SCC concretes.

MOTS-CLÉS: Rhéologie, Rhéomètres, Seuil de cisaillement dynamique, Viscosité plastique, Bétons Autoplacants (BAP).

KEYWORDS: Rheology, Rheometers, Dynamic yield stress, Plastic viscosity, Self-Consolidating Concretes (SCC).

1. Introduction

Avec l'avènement des bétons autoplaçants (BAP) au début des années 90, la connaissance des propriétés d'écoulement des bétons a connu un enrichissement sans précédent. La maîtrise des propriétés d'écoulement de ces bétons est décisive pour une utilisation optimale selon les applications industrielles : malaxage, déversement, flux dans les tuyaux de pompage, etc.

Pour évaluer de façon empirique la capacité d'écoulement des bétons autoplaçants, de nombreux essais ont été introduits : l'essai d'étalement au cône d'Abrams, le J-ring test, Le V-funnel, la boîte en L, etc. Cependant, ces essais ne permettent pas de donner directement les grandeurs physiques intrinsèques permettant de caractériser de manière univoque et indépendante le comportement à l'écoulement du béton. Pour déterminer les propriétés intrinsèques d'un béton, des rhéomètres sont utilisés pouvant fonctionner sur des principes différents :

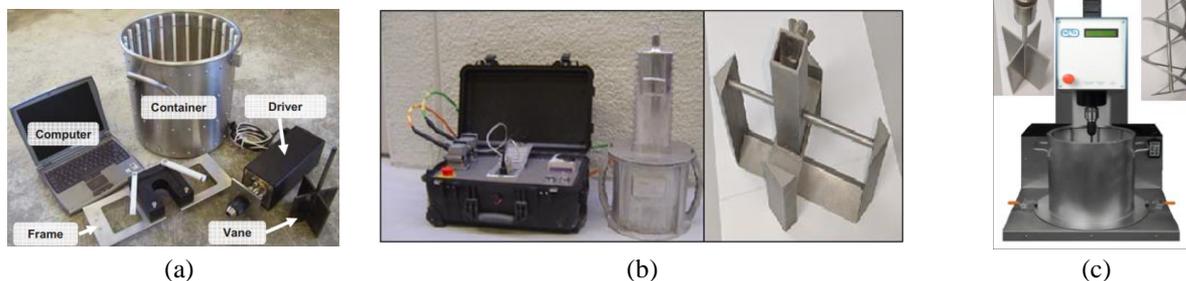
- Rhéomètres agitateurs-malaxeurs (ICAR, RheoCAD 500, ConTec Rheometer-4SCC, Two-point test, etc.)
- Rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML, Cemagref, etc.)
- Rhéomètre plan-plan (BT Rhéom).

[FER 01] ont réalisé une description et une comparaison entre plusieurs rhéomètres à bétons (BML, BTrheom, Cemagref-IMG, IBB et le Two-Point). C'est la première étude comparative réalisée dans le but d'établir des corrélations en termes de seuil de cisaillement et de viscosité plastique entre les différents rhéomètres. Les essais ont été effectués sur 12 formulations différentes de bétons (ordinaires, autoplaçants et hautes performances). En vue de poursuivre cet objectif de corrélation entre les différents rhéomètres, une étude a été menée par [HOC 13] à partir de deux rhéomètres coaxiaux (ICAR et BML) sur des bétons ordinaires. Cette étude précise la nécessité de poursuivre cette approche sur des bétons autoplaçants.

L'objectif de cette étude est d'établir des corrélations entre trois rhéomètres (ICAR, RheoCAD500, ConTec) retenus au niveau des seuils de cisaillement et de la viscosité plastique pour différents BAP. Le degré de corrélation du seuil de cisaillement dynamique et de la viscosité plastique entre chaque rhéomètre est élevé. Ces corrélations aideront à l'analyse et à la comparaison des résultats dans les différents laboratoires sur ce type de béton.

2. Les rhéomètres

Les trois rhéomètres utilisés lors de cette campagne d'essais sont présentés à la Figure 1 ainsi que leurs caractéristiques géométriques.



Rhéomètre	outil	V _{cuve} (l)	R _{cuve} (cm)	R _{outil} (cm)	H _{outil} (cm)
(a) ICAR	Vane	21,2	15,3	6,4	12,7
(b) RheoCAD500	Vane	21,3	14,5	6	15
	Hélice			8	25,5
(c) ConTec 4SCC	Complexe	7	12	8,5	16

Figure 1. Rhéomètres à bétons : (a) ICAR ; (b) ConTec Rheometer-4SCC ; (c) RheoCAD500

3. Composition des bétons

Un Ciment de Portland CEM I 52.5 N CE CP2 CALCIA a été utilisé dans toutes les formulations. Quatre additions ont été utilisées : deux fillers calcaires, une cendre volante et un laitier (Tableau 1). Deux superplastifiants hauts réducteurs d'eau polyvalents de nouvelle génération non chloré ont été utilisés. VISCOCRETE TEMPO 9 (SP1) utilisé pour les formulations SCC1 et SCC4. Les Bétons SCC2 et SCC3 ont été formulés à partir du superplastifiant Chryso® Fluid Optima 350 (SP2). Les quantités de superplastifiants ont été fixées afin d'obtenir des étalements au cône d'Abrams entre 600 et 750 mm appropriés à de nombreuses applications courantes.

Tableau 1. Composition des bétons (en kg/m³)

Bétons	SCC1	SCC2	SCC3	SCC4
Gravillon 4/12,5	822	778	857	822
Sable 0/4	789	856	779	789
Ciment CEM I 52.5 N	350	370	361	350
Cendres Volantes	-	92	-	-
Laitier	-	-	155	-
Filler 1	133	-	-	-
Filler 2	-	-	-	133
SP1 (l/m ³)	5,1	-	-	3,3
SP2 (l/m ³)	-	9	10	-
Eau	181	184	175	181
E/C	0,52	0,5	0,48	0,52
E/Liant	0,37	0,4	0,34	0,37
Etalement (mm)	740	630	675	660

SP 1 : Sika® Viscocrete Tempo 9 (l/m³) 2 : Chryso® Fluid Optima 350 (l/m³)

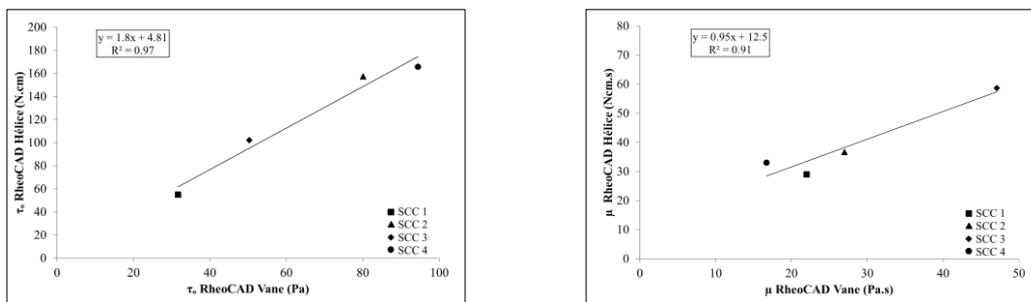
4. Corrélations entre les rhéomètres

Des corrélations en termes de seuil de cisaillement dynamique et viscosité plastique ont été établies entre les différents outils et rhéomètres. Ces corrélations ont été déterminées à partir de 4 bétons (SCC1, SCC2, SCC3 et SCC4). Les mesures de ces paramètres obtenues par les différents rhéomètres, sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Seuil de cisaillement (τ_0) et viscosité plastique (μ) obtenus à partir des différents rhéomètres

	Unités	SCC1		SCC2		SCC3		SCC4	
		τ_0	μ	τ_0	μ	τ_0	μ	τ_0	μ
RheoCAD Vane	τ_0 (Pa)	31,7	22	80,1	27	50,3	47,1	94,4	16,7
	μ (Pa.s)								
RheoCAD Hélice	τ_0 (Ncm)	54,9	28,9	157,4	36,7	102,3	58,6	165,9	33,1
	μ (Ncm.s)								
ICAR	τ_0 (Pa)	25	17,6	52,1	23,1	25	32,6	59,8	11,2
	μ (Pa.s)								
ConTec Complexe	τ_0 (mA)	664,7	3703,3	929,6	2954	654,9	6319,2	1209,9	2377,7
	μ (mA.s)								

Les mesures de seuil de cisaillement dynamique et de viscosité plastique obtenues à partir des différents rhéomètres, ont été comparées deux à deux. A titre d'exemple, la comparaison des mesures obtenues à partir des deux outils du RheoCAD (Vane et Hélice) a permis d'établir des corrélations entre les deux outils en termes de seuil de cisaillement dynamique ($R^2 = 0.97$) et de viscosité plastique ($R^2 = 0.91$).

**Figure 2.** Corrélation entre le RheoCAD Hélice et Vane en termes de seuil et de viscosité

A partir de cette analyse, deux équations peuvent être proposées qui relient les seuils de cisaillement dynamiques et les viscosités plastiques obtenus à l'aide des deux appareils :

$$\tau_{0\text{-RheoCADHelical}} = 1.8 \times \tau_{0\text{-RheoCADVane}} + 4.81 \quad [1]$$

$$\mu_{\text{RheoCADHelical}} = 0.95 \times \mu_{\text{RheoCADVane}} + 12.5 \quad [2]$$

5. Discussion

Afin d'observer l'effet de la quantité de superplastifiant ainsi que de la nature du filler, la formulation du béton SCC1 a été modifiée pour obtenir le béton SCC4. La quantité de superplastifiant est passée de 5,1 à 3,3 l/m³ de béton, et le filler 1 (Betocarb-MQ) a été remplacé par le filler 2 (Betocarb HP-MU). La première observation est la diminution de l'étalement qui est passé de 740 à 660 mm, reflétant une perte d'ouvrabilité. Cette tendance a été confirmée par les rhéomètres qui ont mesurés ces variations. Pour le RhéoCAD Vane, le seuil de cisaillement est passé de 31,7 à 94,8 Pa, alors que, la viscosité a diminué de 22 à 16,7 Pa.s. Ces variations sont dues aux quantités de superplastifiant et à la nature des fillers. Avec l'augmentation de la surface spécifique du filler (451 m²/kg pour le SCC1 contre 591 m²/kg pour le SCC4), le seuil de cisaillement augmente, ce qui peut expliquer la diminution de l'étalement. Ces observations vont dans le même sens que les résultats de Esping [ESP 08], qui montre que pour un même dosage en eau, l'augmentation de la surface spécifique du filler est suivie par une augmentation du seuil de cisaillement.

Les cendres volantes peuvent améliorer la fluidité, avec leur forme sphérique qui permet de réduire les frottements par ce qu'on appelle « l'effet de billes ». Cependant, le carbone imbrûlé contenu dans les cendres influence négativement la fluidité en raison de l'adsorption du superplastifiant [PAR 05]. Par ailleurs, le diamètre moyen des cendres volantes influence les propriétés rhéologiques des bétons [FOH 01]. Les résultats obtenus montrent que le diamètre moyen des cendres volantes a une influence sur la valeur du seuil de cisaillement et la viscosité. Les mélanges les plus fluides sont obtenus avec la cendre volante ultra fine, alors que la demande en eau et le dosage en superplastifiant diminuent. Le béton SCC2 contient quant à lui un remplacement partiel du ciment par des cendres volantes (20%) avec un rapport E/L égale à 0,40. Ce béton, présentant la fluidité la plus faible avec un étalement de 630 mm, a présenté un seuil de cisaillement dynamique et une viscosité plastique relativement élevés (respectivement 52,1 Pa et 23,1 Pa.s sur l'ICAR). Quant à la formulation SCC3 et selon [SHI 04], la substitution d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet en général, de réduire le seuil et la viscosité. Ceci est dû à la surface vitrifiée des grains de laitier qui permet un meilleur glissement entre les constituants solides. La formulation SCC3 présente un remplacement partiel du ciment par le laitier à hauteur de 30 % avec un rapport E/L fixé à 0,34. Cette substitution a permis d'obtenir un béton assez fluide (étalement de 675 mm) avec un faible seuil de cisaillement (25 Pa avec l'ICAR).

6. Conclusion

Les seuils de cisaillement et viscosités plastiques de quatre bétons autoplacants, obtenus à partir des trois rhéomètres (l'ICAR, le RheoCAD500 et le ConTec Rheometer-4SCC), sont comparés dans cette étude. Ce programme expérimental a permis de proposer de bonnes corrélations en termes de seuil de cisaillement dynamique et de viscosité plastique entre les différents rhéomètres. Aussi, tous les rhéomètres ont détecté les changements de composition des bétons de la même façon. D'autres travaux sont planifiés pour compléter les données expérimentales afin de valider les équations de passage entre les différents rhéomètres en prenant en considération la forme des outils.

7. Bibliographie

- [HOC 13] HOCEVAR A., KAVCIC F., BOKAN-BOSILJKOV V., « Rheological parameters of fresh concrete – comparison of rheometers », *GRADEVINAR*, 65(2), 2013
- [ESP 08] ESPING O., « Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete », *Cement and Concrete Research* 38, p938-944, 2008
- [FER 01] FERRARIS C. F., BROWER L. E., Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000
- [FOH 01] FERRARIS, C. F., OBLA, K. H. ET HILL, R., « The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete », *Cement and Concrete Research*, 31(2), 245-255, 2001
- [PAR 05] PARK, C. K., NOH, M. H. ET PARK, T. H., (2005). « Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures », *Cement and Concrete Research*, 35(5), 842-849, 2005
- [SHI 04], SHI, Y.-X., MATSUI, I. ET GUO, Y.-J., « A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete », *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1381-1387, 2004