

## CONFECTION DE BÉTONS AUTOPLAÇANTS ALGÉRIENS À BASE DE GRANULATS CONCASSÉS

Mohammed-Rissel KHELIFA<sup>1,2,3,\*</sup>, Xavier BRUNETAUD<sup>1</sup>, Muzahim AL- MUKHTAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche sur la Matière Divisée, Université d'Orléans, CNRS-CRMD 1B, rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2, France

<sup>2</sup> Département LMD ST, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna (Algérie)

<sup>3</sup> Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures, Département de Génie Civil, Université de Constantine (Algérie)

\* Auteur correspondant : khelifarical@yahoo.fr

### RÉSUMÉ

*Les bétons autoplaçants «BAP» se distinguent des bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids quelque soit le confinement du milieu et restent homogènes au cours de l'écoulement. En général, ils possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons vibrés ainsi qu'un volume de sable assez proche, mais l'apport de fines est privilégié au détriment des granulats, ce qui permet d'établir un compromis entre la stabilité et la maniabilité du BAP. Généralement, les BAP sont confectionnés à partir de granulats alluvionnaires. L'objectif de cette étude est de confectionner des bétons autoplaçants algériens équivalents à base de granulats concassés ayant les mêmes performances que les bétons ordinaires.*

MOTS-CLÉS : BAP, granulats concassés, seuil d'écoulement, bétons équivalent.

### ABSTRACT

*Self-compacting concretes «SCC» are distinguished from vibrated concrete through their properties in fresh state. They are able to flow under their own weight and remain homogeneous during the flow. They have the same contents of water and cement than vibrated concrete and an equivalent volume of sand, but replacement of a part of aggregates by fine is preferred, providing compromise between the stability and the flow ability of the SCC. Generally, the SCC is made from alluvial aggregates. The objective of this study is to obtain Algerian self-compacting concrete using crushed and providing the same performances as the ordinary concretes.*

KEYWORDS: , crushed aggregates, threshold flow, equivalent concretes.

**1. Introduction**

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Plusieurs méthodes de formulations des bétons autoplaçants existent aujourd'hui dont un grand nombre a été publié dans les différents congrès dédiés aux BAP [ROL 98, DES 05 et DES 07].

La méthode japonaise développée par Okamura et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants dont l'étalement est d'au moins 65 cm [OZA 92, OKA 03]. La méthode préconise l'augmentation du volume de pâte au détriment du volume de granulats. Ce principe vise à éviter tout problème de blocage des gravillons en imposant un volume de gravillons inférieur à 50 % au volume solide du béton et un volume de sable de diamètre supérieur à 90 µm égal à 40 % du volume total du mortier du béton. Au final, la méthode conduit à des volumes de pâte très élevés, une augmentation du liant et donc à des bétons très onéreux [HAD 07].

La méthode proposée par Bui et Montgomery, préconise en premier lieu d'étudier le volume de pâte. Ils considèrent un volume de pâte égal à la porosité du squelette granulaire du béton augmenté d'une valeur qui conduira à une bonne lubrification du squelette en évitant les risques de blocage. Ils supposent que la pâte pénètre tous les vides inter-granulaires du squelette empilés d'une façon lâche sans aucune surpression extérieure. Ce volume est a priori de l'ordre de 42 à 48 % du volume total de l'échantillon [NAC 03].

L'AFGC (Association Française de Génie Civil) a mis en place des techniques pour la caractérisation des BAP à l'état frais qui sont appliquées dans la profession du BTP. Cependant, il n'existe pas encore pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme peut l'être la méthode de Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires [AFG 02, TUR 04].

**2. Matériaux utilisés**

Tous les granulats utilisés sont des granulats calcaires concassés, de couleur blanche. Nous avons utilisé le sable 0/5 et les granulats 5/8 et 8/15. Le sable contient une grande quantité de fines, de l'ordre de 18 % apportant une quantité suffisante de fines pour réaliser un béton autoplaçant, ce qui n'a pas nécessité l'ajout du filler calcaire.

Deux ciments de classe 42,5 ont été utilisés, le premier est un CEM I 42,5 PM-ES, ciment sans

ajouts pris comme ciment de référence et le second ciment est un CEM II/A 42,5 qui contient 80 % clinker, 5 % de gypse et 15 % de filler calcaire. Il a été sélectionné parmi 19 variantes ayant le meilleur rapport classe 42,5/prix.

Le superplastifiant utilisé est le MEDAFLOW 30 à base de polycarboxylates et l'agent de viscosité est le MEDACOL BSE, destiné principalement à la confection des bétons et mortiers coulés sous l'eau. Il est composé essentiellement d'agent colloïdaux et de micro-silice ultra-fine [GRA 07].

**3. Confection des bétons préliminaires**

Pour tester l'efficacité des matériaux utilisés, principalement celles de l'agent colloïdal, du volume de pâte et du rapport eau/fines, nous avons réalisé une campagne exploratoire, basée sur la formulation de neuf bétons (figure 1) et la composition de chaque formulation est donnée par le tableau 1. L'objectif est ici d'obtenir au moins un béton autoplaçant vérifiant toutes les caractéristiques à l'état frais d'un BAP et ayant une résistance à la compression à 28 jours proche de celle des bétons vibrés ordinaires.

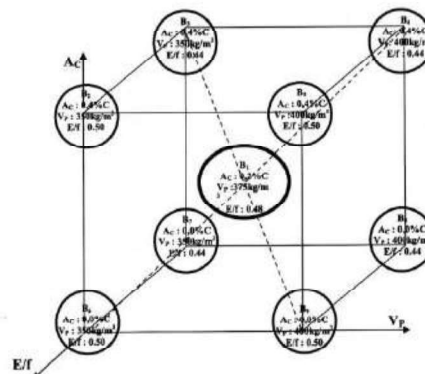


Figure 1 : Caractéristiques des différents bétons à confectionner (Ac: Agent colloïdal, Vp: Volume de pâte et E/f: Eau sur fines).

Tableau 1 : Différentes formulations préliminaires gâchées pour 1 m³.

Bétons	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
C (kg)	306	260	295	375	333	260	297	377	335
S (kg)	822	855	859	782	787	862	856	782	785
G <sub>1</sub> (kg)	235	243	243	222	224	246	244	222	224
G <sub>2</sub> (kg)	540	560	560	510	515	565	562	510	515
S <sub>p</sub> (kg)	1,8	1,6	1,8	2,3	2,0	1,6	1,8	2,3	2,0
E (kg)	220	207	196	224	238	208	196	225	239
Ac (kg)	0,6	1,0	1,2	1,5	1,3	/	/	/	/
V <sub>p</sub> (kg)	375	350	350	400	400	350	350	400	400
E/f	0,48	0,50	0,44	0,44	0,50	0,50	0,44	0,44	0,50
M <sub>T</sub> (kg)	2225	2128	2155	2116	2100	2142	2157	2118	2100
G/S	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10

### 3. 1. Caractérisation des différents bétons à l'état frais

D'après les essais à l'état frais des différents bétons, on remarque que plus l'air occlus augmente, plus la masse volumique mesurée diminue. Ce simple effet d'augmentation de volume par augmentation de l'air entraîné est la conséquence de l'utilisation de l'agent colloïdal. Il est possible de simuler cet effet en définissant une masse volumique théorique qui serait obtenue pour une teneur nulle en air occlus, et en prenant en compte cet air occlus comme suit :  $M_v(\% \text{ air}) = M_v(0) \cdot (1 - \% \text{ air})$ , avec  $M_v(0)$  calculée à partir de la composition du béton et égale  $2300 \text{ kg/m}^3$ . On vérifie bien que les tendances sont identiques (figure 2).

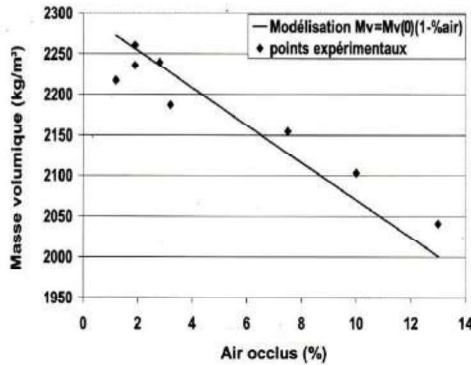


Figure 2 : Masse volumique réelle en fonction de l'air occlus.

En tenant compte de la stabilité au tamis qui doit être inférieure à 15 % pour un BAP (figure 3) ainsi que des étalements au cône d'Abrams qui doivent être compris entre 60 et 75 cm et à l'anneau japonais entre 50 et 65 cm (figure 4), trois des neuf bétons confectionnés répondent aux caractéristiques à l'état frais d'un béton autoplaçant, ce sont les bétons B1, B6 et B7.

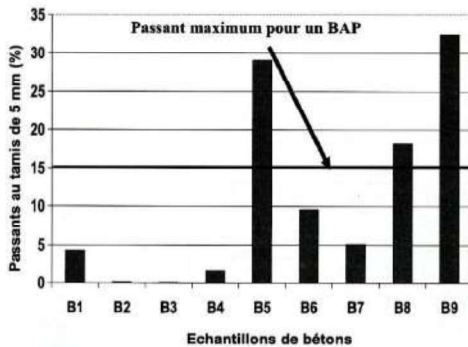


Figure 3 : Stabilité au tamis de 5mm des différents types de bétons confectionnés

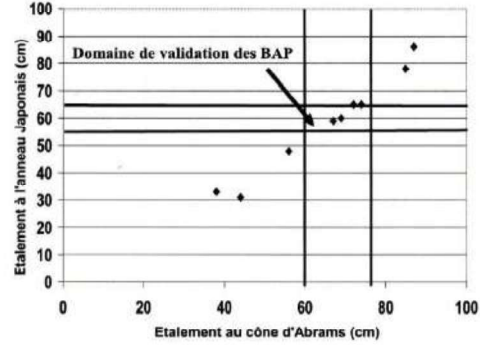


Figure 4 : Figure 4. Etalement à l'anneau japonais en fonction de celui au cône d'Abrams

### 3. 2. Caractérisation des bétons sélectionnés à l'état durci

Nous avons testé les résistances à la compression à un an après avoir conservé les éprouvettes dans l'eau à  $20^\circ\text{C}$  pendant 28 jours puis à l'air libre dans une pièce à  $20^\circ\text{C}$ . Les résistances à la compression sont données en MPa par le Tableau 2 :

Tableau 2 : Résistances à la compression à un an des bétons sélectionnés

Echantillons	B1	B6	B7
$R_{c360j}$ [MPa]	13	7	17

Nous remarquons que les résistances obtenues sont très faibles comparées aux résistances habituelles des bétons ordinaires. L'état des éprouvettes après écrasement à la compression (figure 5) montre une ségrégation importante, une forte porosité et une pâte de ciment très friable. Cela est probablement dû au faible dosage en ciment et au fort rapport E/F. Pour remédier à ce problème et obtenir un béton autoplaçant à résistance équivalente à celle des bétons ordinaires, nous avons dû :

- Augmenter le dosage en ciment et le fixer à  $350 \text{ kg/m}^3$  ;
- Ne plus raisonner en E/f mais en E/C et diminuer considérablement son apport dans la formulation du béton.
- Ajuster le superplastifiant tout en diminuant l'agent colloïdal pour avoir un BAP stable avec un minimum d'air occlus.



Figure 5 : Aspect des éprouvettes 11x22 après essai de compression à la rupture.

Nous avons ainsi obtenu le BAP<sub>01</sub> à base de granulats concassés dont la composition est donnée par le tableau 3 et qui répond à toutes les caractéristiques à l'état frais d'un béton autoplaçant (tableau 4) et aussi résistant à la compression qu'un béton ordinaire (tableau 5).

Tableau 3 : Formulation du BAP<sub>01</sub>.

C (kg)	S (kg)	G <sub>1</sub> (kg)	G <sub>2</sub> (kg)	E (kg)	S <sub>p</sub> (%C)	A <sub>c</sub> (%C)	E/f	V <sub>p</sub> (kg)	MT (kg)
350	922	262	602	206	1,4	0,05	0,40	385	2347

Tableau 4 : Essais caractérisant le BAP<sub>01</sub> à l'état frais.

A <sub>occlus</sub> (%)	Et. Abr. (cm)	Et. AJ (cm)	Stabilité (%)
3,6	58	53	2,0

Tableau 5 : Résistances mécaniques à la compression des éprouvettes 11x22 cm à 7 et 28 jours.

R <sub>c,7 jours</sub> [MPa]	16
R <sub>c,28 jours</sub> [MPa]	19

#### 4. Confection des bétons autoplaçants équivalents

Nous avons utilisé la méthode d'estimation de seuil qui a été élaborée par Nicolas Roussel et Philippe Coussot du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et de l'Université Paris Est [ROU 08]. Elle montre qu'il existe une corrélation quantitative très correcte entre l'étalement du matériau et son seuil de cisaillement.

Le principe général de l'essai est le suivant : un volume Ω de pâte de ciment, de mortier ou de béton est versé lentement sur une surface lisse horizontale (figure 6), le diamètre de la galette (D = 2R) obtenu après arrêt de l'écoulement est mesuré et corrélé au seuil τ<sub>c</sub> du matériau par la relation (1) :

$$\tau_c = \frac{225 \rho g \Omega^2}{128 \pi^2 R^5} \quad (1)$$



Figure 6 : Mesure du seuil de cisaillement selon Roussel et Coussot.

Le volume minimum testé est de 300 mL pour une pâte de ciment et 500 mL pour un mortier. Cependant, la corrélation en régime d'étalement proposée [ROU 08], n'existe que si :

- le rapport épaisseur de galette sur son rayon est faible, généralement :  
 $e \leq R/5$  (2).
- les effets de tension superficielle sont négligeables (légèrement humidifier la plaque métallique sans laisser de gouttelette).
- l'épaisseur de la galette formée est au moins égale à 5 fois la taille du plus gros grain (sable tamisé à 2 mm).

Les mélanges autoplaçants ayant le même τ<sub>c</sub> devraient présenter les mêmes propriétés à l'état frais. Nous souhaitons obtenir d'autres bétons autoplaçants, mais avec un autre rapport E/C et un autre ciment. Nous avons donc testé plusieurs formulations de mortier (D<sub>max</sub> des granulats ≤ 2mm) et nous avons comparé le seuil d'écoulement de chacune d'entre elles à celui de mortier issu du béton BAP<sub>01</sub>. En sélectionnant les temps décolement les plus proches de notre objectif, nous obtenons les pourcentages de superplastifiant à utiliser pour obtenir des bétons autoplaçants équivalents à notre référence (figure 7).

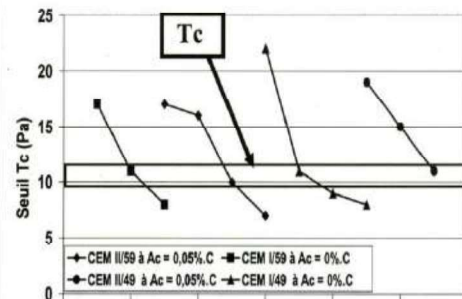


Figure 7 : Graphe récapitulatif de T<sub>c</sub> = f(S<sub>j</sub>) pour les quatre bétons

Les quatre principales formulations de mortiers sont données en fonction de deux E/C : 0,59 et 0,49 et deux types de ciments, le CEM II/A 42,5 et le CEM I 42,5 (tableau 6).

**Tableau 6 :** Résultats obtenus par la méthode du seuil de cisaillement.

Mortiers	M <sub>1</sub> : CEMII/59	M <sub>2</sub> : CEMI/59	M <sub>3</sub> : CEMII/49	M <sub>4</sub> : CEMI/49
Ciment	CEM II 42,5	CEM I 42,5	CEM II 42,5	CEM I 42,5
E/C	0,59	0,59	0,49	0,49
A <sub>C</sub> (%C)	0,05	0,05	/	/
S <sub>P</sub> (%C)	1,4	1,1	2,0	1,6
Seuil τ <sub>c</sub> (Pa)	10	12	11	11

La validation de notre méthode nécessite de réaliser les bétons relatifs aux mortiers retenus et à tester leur caractéristiques. Les formulations des quatre bétons autoplaçants résultants et leurs caractéristiques à l'état frais sont données par les tableaux 7 et 8 (G/S = constante = 1,10), leurs résistances à la compression à 7 et à 28 jours sont données par la figure 8. Les essais à l'état frais vérifient les caractéristiques d'un BAP pour les quatre formulations. Les résistances atteintes sont comparables à celles d'un béton ordinaire.

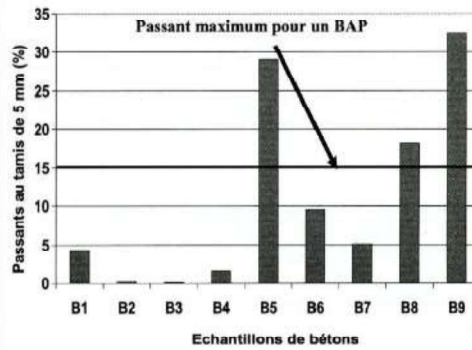
Nous remarquons que c'est le type de ciment qui joue le plus sur les résistances à 7 jours (le CEM I générant la plus forte résistance), et c'est rapport E/C qui finalement joue le plus sur les résistances à 28 jours.

**Tableau 7 :** Formulations des quatres BAP retenus pour 1 m<sup>3</sup> de béton.

Bétons	BAP <sub>1</sub> : CEMII/59	BAP <sub>2</sub> : CEMI/59	BAP <sub>3</sub> : CEMII/49	BAP <sub>4</sub> : CEMI/49
C utilisé	CPJ CEM II 42,5	CPA CEM I 42,5	CPJ CEM II 42,5	CPA CEM I 42,5
C (kg)	350	350	350	350
S <sub>075</sub> (kg)	922	922	971	971
G <sub>3/8</sub> (kg)	262	262	275	275
G <sub>8/16</sub> (kg)	602	602	633	633
S <sub>P</sub> (kg)	4,9	3,9	7,0	5,6
E (kg)	206	206	172	172
A <sub>C</sub> (g)	175	175	/	/
E/C	0,59	0,59	0,49	0,49
VP (kg)	385	384	355	358
M <sub>T</sub> (kg)	2347	2346	2408	2407
M <sub>V</sub> (kg)	2,3	2,3	2,4	2,4

**Tableau 8 :** Essais caractérisant les quatre BAP à l'état frais.

Bétons	CEMII/59	CEMI/59	CEMII/49	CEMI/49
A <sub>occlus</sub> (%)	3,6	3,9	2,9	4,7
Et. Abr. (cm)	58	59,5	74	68
Et. AJ (cm)	53	54,5	57	59
Stabilité (%)	2,0	2,2	2,8	2,6



**Figure 8 :** Résistances des différents confectionnés BAP à 7 et 28 jours.

## 5. Conclusion

A l'issue de cette étude nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Neuf formulations préliminaires de bétons ont été gâchées et caractérisées à l'état frais, seules trois d'entre elles pouvaient être considérées comme des BAP. Cette campagne exploratoire peut être évitée par une bonne connaissance des matériaux et des adjuvants.

Les essais à la compression de tous les bétons préliminaires ont donnés des valeurs très inférieures à celles d'un béton ordinaire, ce qui nous a poussés à augmenter le dosage en ciment et diminuer le rapport Eau/Ciment dans la deuxième campagne de formulation.

La deuxième campagne de formulation de BAP à base de ciment CEM II/A 42,5 a donné la formulation optimale d'un béton autoplaçant en tenant compte du coût de notre BAP et de ses performances mécaniques.

La mesure du seuil de cisaillement selon Roussel et Coussot basée sur l'étalement des différentes mortiers nous a permis de déterminer trois autres formulations de BAP à partir de celle obtenue pendant la deuxième campagne d'essais. Les quatre formulations se différencient par le type de ciment utilisé (CEM II/A 42,5 et CEM I 42,5) et par leur rapport E/C (0,49 et 0,59).

Les quatre formulations ont vérifié toutes les caractéristiques d'un béton autoplaçant à l'état frais et les performances mécaniques à 7 et à 28 jours sont comparables à celles d'un béton ordinaire.

#### Références bibliographiques

- [ROL 98] Rols S., Ambroise J. and Péra J., "Effects of different viscosity agents on the properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, 29 : 461-465, 1998.
- [DES 05] De Schutter G. «Guidelines for testing fresh self compacting concrete» European Research Project, 2005.
- [DES 07] De Schutter G., Tearwe L. «Self compacting concrete», SSC proceeding of the 5th international Rilem symposium, RILEM, 2007.
- [OZA 92] Ozawa K., Tangtermsirikul S. and Maekawa K. "Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete", *Proceeding of the first international symposium of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, Istanbul, Turkey 1992.
- [OKA 03] Okamura H., Ouchi M. «Self compacting concrete» *Journal of advanced concrete technology*, Vol1, N°1, 5-15 April 2003.
- [HAD 07] Haddad O. «Contribution au développement d'outil d'aide à la formation des BAP relatif à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge». Thèse de doctorat de Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, le 19 décembre 2007.
- [NAC 03] Nachdaur L., Kaplan D., Marchese G. «Extension of concrete mortar (CEM) method to self compacting concrete» 7th CANMET/ACI Int. Conf. on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Berlin, Supplementary papers pp333-339, 2003.
- [AFG 02] Association Française de Génie Civil «AFGC», *Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires*, Paris, Juillet 2002.
- [TUR 04] Turcry P., Thèse de doctorat en Génie Civil, «Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation», Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.