

CONFECTION DE BÉTONS AUTOPLAÇANTS ALGÉRIENS À BASE DE GRANULATS CONCASSÉS

Mohammed-Rissel KHELIFA, Xavier BRUNETAUD, Muzahim AL-MUKHTAR

Centre de Recherche sur la Matière Divisée, Polytech'Orléans - Université d'Orléans, CNRS-CRMD
1B rue de la Férellerie, 45071 Orléans Cedex 2, (France)

Département LMD Sciences et Techniques- Faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Batna (Algérie).
Laboratoire de Mécanique des Sols et des Structures-Département de génie Civil
de l'Université de Constantine (Algérie).

1. INTRODUCTION

De nombreuses méthodes de formulations des bétons auto-plaçants (BAP) existent aujourd'hui dont la plupart des formules sont conçues de manière empirique. Ainsi, un grand nombre de formulation est basé sur l'expérience acquise ces dernières années [ROL 98, DES 05 et DES 07].

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) 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]. En effet, cette méthode n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels pour la confection d'un BAP.

Dans l'objectif de promouvoir l'utilisation des BAP en Algérie et d'adopter les matériaux locaux aux normes européennes pour ce type de bétons, nous cherchons à développer des formules de BAP stables et homogènes, réalisés exclusivement à base de matériaux algériens : ciment, granulats et adjuvants. L'une des spécificités est que les granulats utilisés sont concassés, alors que les gra-

nulats roulés sont préférés pour la confection des BAP. Les performances à l'état durci de ces bétons devront être similaires à celles des bétons ordinaires. Ainsi, les entreprises algériennes de BTP seront en mesure de concurrencer les entreprises internationales implantées en Algérie et qui utilisent les bétons auto-plaçants dans la construction de nombreux hôtels, complexes touristiques et hôpitaux.

Ce travail a été réalisé grâce à la collaboration de trois entreprises algériennes : l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) d'El-Khroub d'où proviennent tous les granulats utilisés (0/5, 5/8 et 8/15), la cimenterie d'Ain-Touta qui a mis à notre disposition toute sa gamme de ciments et l'entreprise GRANITEX d'Alger, qui nous a fourni les adjuvants (superplastifiant et agent colloïdal).

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 %, ce qui est une quantité suffisante pour confectionner un béton auto-plaçant. Il n'a donc pas été nécessaire d'ajouter 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 de 80 % de clinker, 5 % de gypse et 15 % de filler calcaire. Il a été sélectionné parmi 19 variantes, car il possède le meilleur rapport classe 42,5/coût.

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. Ainsi, l'objectif de cette étude préliminaire est 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.

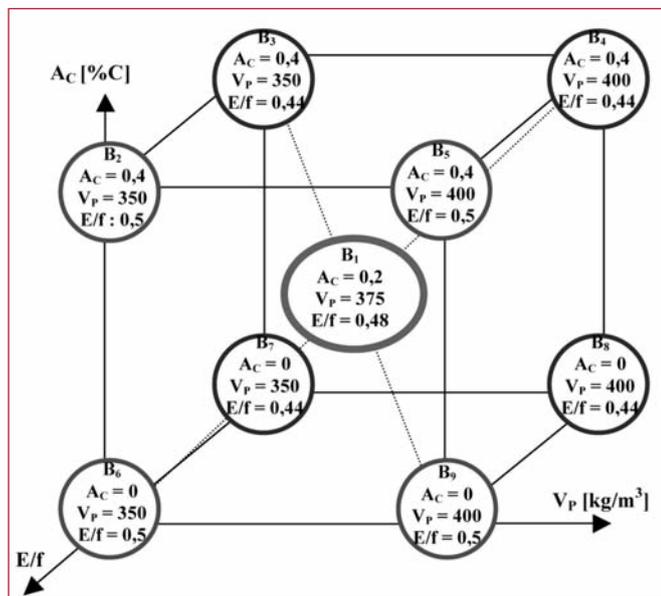


Figure 1. Champ de variation des paramètres des bétons préliminaires

3.1 Caractérisation des différents bétons à l'état frais

D'après les essais à l'état frais des différents bétons (figure 2), 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.

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 ; soient les bétons B₁, B₆ et B₇.



Figure 2. Mesure de l'étalement à l'anneau japonais

Bétons	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉
Ciment (kg)	306	260	295	375	333	260	297	377	335
Sable 0/5 (kg)	822	855	859	782	787	862	856	782	785
Granulat - G ₁ 5/8 (kg)	235	243	243	222	224	246	244	222	224
Granulat - G ₂ 8/15 (kg)	540	560	560	510	515	565	562	510	515
Superplastifiant, S _P (kg)	1,8	1,6	1,8	2,3	2,0	1,6	1,8	2,3	2,0
Eau (kg)	220	207	196	224	238	208	196	225	239
Agent colloïdal, A _C (kg)	0,6	1,0	1,2	1,5	1,3	/	/	/	/
Volume de pâte, V _P (kg)	375	350	350	400	400	350	350	400	400
Eau/fines (E/F)	0,48	0,50	0,44	0,44	0,50	0,50	0,44	0,44	0,50

Tableau 1. Formulations des bétons préliminaires pour 1m³

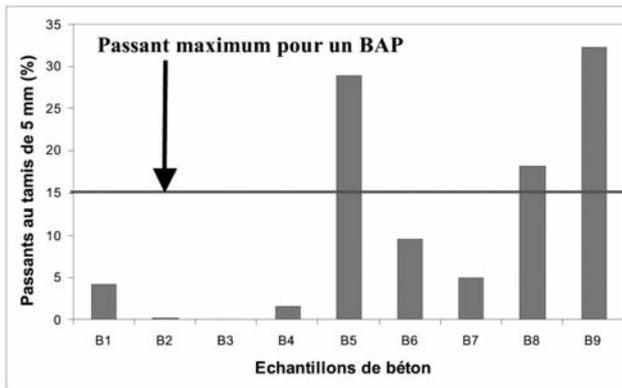


Figure 3. Stabilité au tamis de 5mm des différents bétons confectionnés

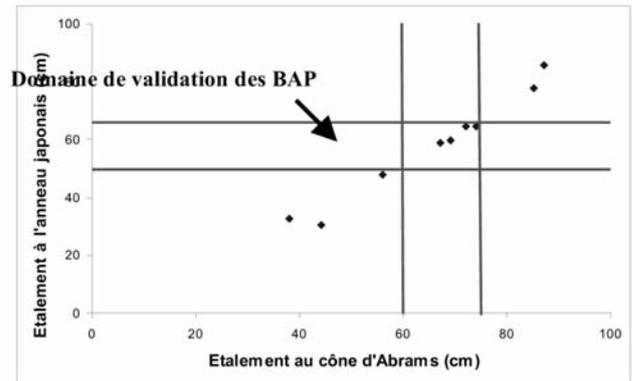


Figure 4. Etal. à l'anneau japonais en fonction de l'étal. au cône d'Abrams

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°C pendant 28 jours puis à l'air libre dans une pièce à 20°C. Les résistances à la compression sont données en MPa par le Tableau 2. 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 simple (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 kg/m³ ;
- Ne plus raisonner en Eau/fines mais en Eau/Ciment et diminuer considérablement son apport dans la formulation du béton.

- Ajuster le % du superplastifiant tout en diminuant l'agent colloïdal pour avoir un BAP stable avec un minimum d'air occlus.

Nous avons ainsi obtenu le BAP₀₁ à base de granulats concassés (formulation en tableau 3), 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 sur des éprouvettes 11x22 qu'un béton ordinaire : 16 et 19 MPa à 7 et 28 jours respectivement.

Echantillons	B ₁	B ₆	B ₇
Rc _{360j} [MPa]	13	7	17

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

A _{occlus} (%)	Et. Abr. (cm)	Et. AJ (cm)	Stabilité (%)
3,6	58	53	2,0

Tableau 4. Essais caractérisant le BAP₀₁ à l'état frais

C (kg)	S (kg)	G ₁ (kg)	G ₂ (kg)	E (kg)	S _p (%C)	A _c (%C)	E/F
350	922	262	602	206	1,4	0,05	0,59

Tableau 3. Formulation du BAP₀₁

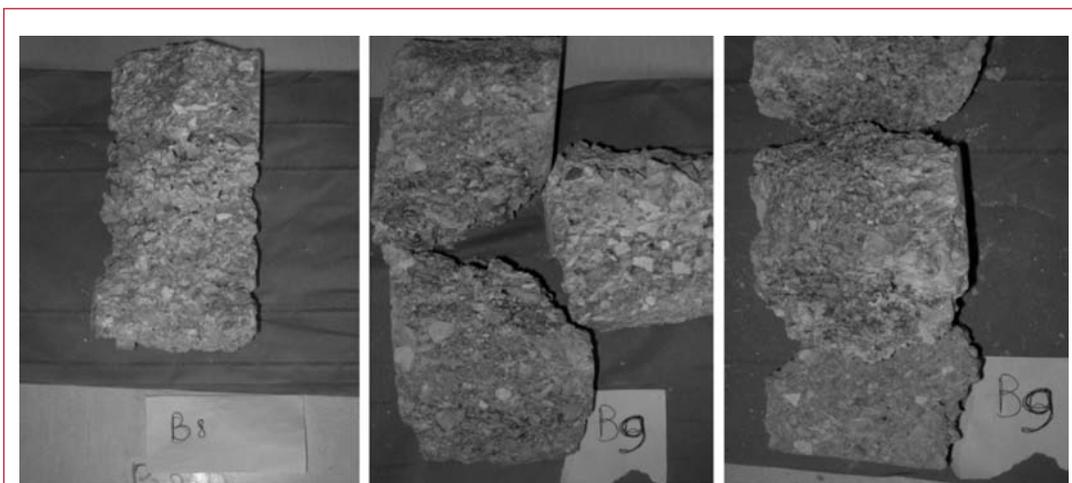


Figure 5. Aspect des éprouvettes 11x22 après essai de compression à la rupture

4. CONFECTION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS ÉQUIVALENTS

Nous avons utilisé la méthode du seuil d'équivalence 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 la forme finale du matériau et le 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 ($D = 2R$) obtenue après arrêt de l'écoulement est mesuré et corrélé au seuil τ_c 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 négligeable (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_c 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 et nous avons comparé le seuil d'écoulement de chacune d'entre elles à celui de mortier issu du béton BAP₀₁. En sélectionnant les temps d'écoulement 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).

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 5).

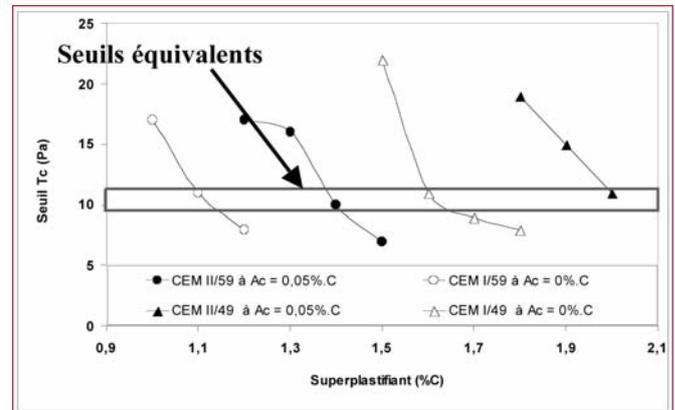


Figure 7. Graphe récapitulatif de $T_c = f(S_p)$ pour les quatre bétons

Mortiers	M ₁ :CEMII/59	M ₂ :CEMI/59	M ₃ :CEMII/49	M ₄ :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 _c (%C)	0,05	0,05	/	/
S _p (%C)	1,4	1,1	2,0	1,6
Seuil τ_c (Pa)	10	12	11	11

Tableau 5. Résultats obtenus par la méthode du seuil de cisaillement

La validation de notre méthode a nécessité la confection des bétons relatifs aux mortiers retenus. Les formulations des quatre bétons autoplaçants résultants et leurs caractéristiques à l'état frais sont données par les tableaux 6 et 7, 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), mais c'est le rapport E/C qui finalement influence considérablement les résistances à 28 jours.

Bétons	BAP ₂ :CEMII/59	BAP ₂ :CEMI/59	BAP ₂ :CEMII/49	BAP ₂ :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 _{0,05} (kg)	922	922	971	971
G _{0,05} (kg)	262	262	275	275
G _{0,16} (kg)	602	602	633	633
S _p (kg)	4,9	3,9	7,0	5,6
E (kg)	206	206	172	172
A _c (g)	175	175	/	/
E/C	0,59	0,59	0,49	0,49
M _v (kg/m ³)	2,3	2,3	2,4	2,4

Tableau 6. Formulations des quatre BAP retenus pour 1 m³ de béton

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

Tableau 7. Essais caractérisant les quatre BAP à l'état frais

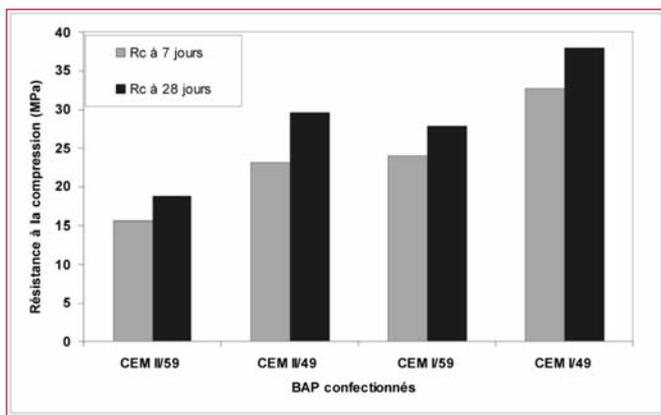


Figure 8. Résistance mécanique des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours

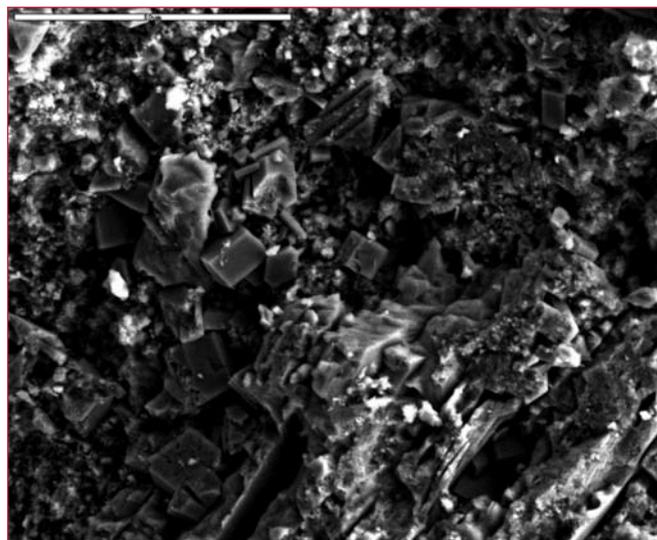


Figure 9. Observation au MEB – Fracture x1000 d’un BAP CEM II/59 soumis à l’immersion / séchage à 105° qui indique une présence de nombreux cristaux de mirabilite et aucune formation d’ettringite

5. ÉTUDE DE LA DURABILITÉ

Les différents bétons confectionnés ont subi des tests de vieillissement accélérés (immersion complète, immersion / séchage à 60°C, immersion / séchage à 105°C et exposition à un brouillard salin) pour étudier leur durabilité face à l’attaque sulfatique externe [KHE 09]. Des mesures à l’échelle macroscopique (prise de masse, résistance mécanique, module dynamique, allongement...etc) et une étude à l’échelle microscopique (microscope électronique à balayage (figure 9), diffraction par rayons X, et porosité au mercure) ont révélé que les bétons formulés ont bien réagi face à l’attaque sulfatique externe imposée par les différents protocoles

6. CONCLUSION

Les principales conclusions de cette étude sont :

- 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.
- La 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 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 de BAP réalisés à partir de matériaux exclusivement algériens, notamment des granulats concassés, 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.

Enfin, cette étude est encourageante pour les trois entreprises algériennes partenaires car leurs matériaux peuvent être employés avec les formulations obtenues pour confectionner des bétons autoplaçants 100% algériens. Ainsi, ces entreprises peuvent promouvoir l’emploi de BAP algérien et concurrencer les entreprises étrangères dans le secteur des constructions complexes en grande expansion en Algérie.

7. 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.
- [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.
- [GRA 07] Granitex-NP, Dossiers techniques de la société Granitex, BP 85, 16270 Oued Smar, 2007, Alger.
- [ROU 08] Roussel N., «Ecoulement et mise en œuvre des bétons», Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, août 2008.
- [KHE 09] Khelifa M. R., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Effet de l’attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants », Ecole Polytechnique d’Orléans, Université d’Orléans, le 20 juin 2009.