



INFLUENCE DE LA RÉACTIVITÉ DES ADDITIONS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Tahar ALI-BOUCETTA¹, Mourad BEHIM¹, Walid LAIFA¹, Guillaume LAMBARE²

¹ Université Badji Mokhtar d'Annaba, BP 12, Annaba, 23000 Algérie
Laboratoire Matériaux, Géo-Matériaux et Environnement, Département de Génie Civil
² INSA, UPS, LMDC, 135 Avenue de Rangueil, Toulouse, France

1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte. Pour garantir un volume de pâte suffisant, l'emploi de diverses additions minérales qui sont le plus souvent des sous produits ou des déchets est recommandé [1]. De nombreuses études ont montré les effets favorables des additions minérales fines sur les propriétés des BAP à l'état frais [2] à l'état durci [3], notamment les fillers calcaires qui sont les plus utilisées [4]. L'influence des additions minérales sur la fluidité des BAP est fonction du dosage, du type, de la nature chimique, de la finesse et de leur morphologie [5 - 7]. Cependant peu d'études mettent en évidence l'influence de l'état réactif ou inerte des additions sur les propriétés des BAP. L'emploi des laitiers de haut fourneau pour mettre en évidence l'effet de l'état inerte ou réactif des additions sur les propriétés des BAP est intéressant, car le laitier granulé (LG) est réactif alors que le laitier cristallisé (LC) est inerte. Ces additions ont de surcroît la même composition chimique. Par ailleurs, la valorisation du laitier cristallisé, peu utilisé dans les ciments et bétons, constitue un objectif intéressant. Pour cela, quatre BAP ont été formulés, à partir d'une formulation de base

donnant un squelette granulaire voisin pour tous les bétons : un BAP de référence (BAPR) sans aucune addition, un BAPFC avec addition de filler calcaire comme addition témoin, un BAPLG avec addition de laitier granulé et un BAPLC avec addition de laitier cristallisé, avec des dosages de 30, 45 et 60 % par rapport à la masse du ciment.

2. MÉTHODES ET MATÉRIAUX

2.1 Méthodes

2.1.1. Caractérisation des BAP à l'état frais

Les bétons autoplaçants formulés doivent faire plusieurs tests, et nous en avons choisi trois qui sont normalisés [8 - 10] et qui permettent de caractériser leurs principales propriétés.

- La mobilité en milieu non confiné, essai réalisé par la mesure de l'étalement au cône d' Abrams (SF) et le temps d'étalement pour atteindre un diamètre de 500 mm (T_{500}) selon la norme EN 12350 – 8 [8]





– La mobilité en milieu confiné, réalisé par l'essai du taux de remplissage dans la boite en L (PL), selon la norme EN 12350 – 10 [9]

– OLa résistance à la ségrégation exprimée par l'essai de stabilité au tamis selon la EN 12350 – 11 [10]

Deux autres essais non normalisés ont été utilisés: la détermination de la viscosité plastique (μ) selon le modèle de Sedran [11] et la mesure du seuil de cisaillement (τ) selon la méthode de la boite LCPC [12]. Ces deux grandeurs rhéologiques sont décrites en annexes 1 et 2.

2.1.2. Caractérisation des bétons durcis

Afin de vérifier la résistance mécanique en compression à 2, 7 et 28 jours, trois éprouvettes cubiques (10.10.10) cm³ ont été utilisées pour chaque échéance. Elles sont démoulées 24 heures après le coulage et conservées sous l'eau à la température ambiante.

2.1.3. Caractérisation minéralogique des additions

Elle a été réalisée par diffraction des rayons X (DRX) à l'aide d'un diffractomètre Siemens D 5000, utilisant une anticathode de cobalt (Co K α , $\lambda = 1.789 \text{ \AA}$), sur une plage de 10 à 70° (2 θ) avec un pas d'avancement de 0.02° et un temps de comptage de 12s.

2.2. Matériaux

2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé est un CEM II 42,5, de masse volumique apparente ($\rho_{app} = 1020 \text{ kg / m}^3$), de masse volumique absolue ($(\rho_{abs} = 3000 \text{ kg / m}^3$, de finesse Blaine 3480 cm²/g, de composition minéralogique : C₃S = 58.2%, C₂S = 18.5%, C₃A = 9.3% et C₄AF = 8.2%.

2.2.2. Les additions

Le filler calcaire (FC) est composé essentiellement de calcite (> 70 %). Il est obtenu par broyage de pierres calcaires récupérées des stations de concassage des granulats pour béton. Le diagramme (DRX) présenté par la figure 1 montre que le filler calcaire est essentiellement composé de minéral cristallisé, sous la forme de calcite (CaCO₃).

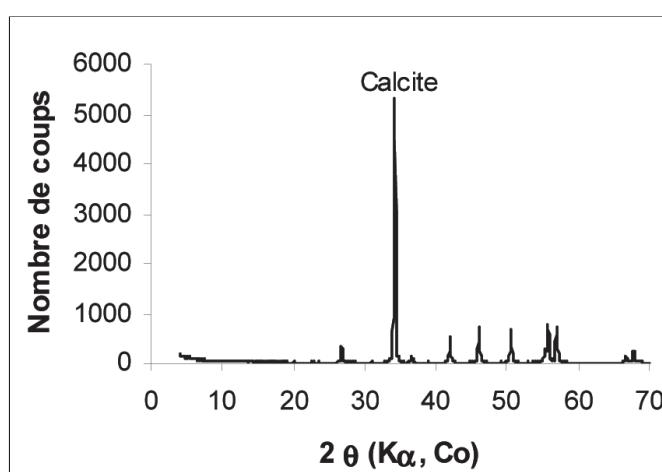


Figure 1. Diffractogrammes des Filler calcaire

Les laitiers granulé et cristallisés sont produits par le complexe sidérurgique d'El Hadjar (Annaba, Algérie). Le laitier granulé est trempé à l'eau, se présente sous forme de sable de granulométrie de 0 – 5 (mm). Le diagramme DRX du laitier granulé (LG) présenté par la figure 2 montre qu'il est essentiellement composé d'une phase amorphe. La teneur en verre est d'environ 97% [13], mais présente une faible réactivité hydraulique [13]. Le laitier granulé contient de faibles quantités de fer et de calcite. Le laitier cristallisés, déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau, il refroidi à l'air libre, se présente sous forme de granulat de 0 à 20 mm après concassage. Le diagramme DRX du laitier cristallisés présenté par la figure 3, montre l'existence d'une phase vitreuse. Le refroidissement lent du laitier ne peut être uniforme dans toute la masse, les couches au contact de l'air refroidissent plus rapidement et constitue la partie vitreuse du laitier cristallisés. Les principaux minéraux mis en évidence par DRX sont la Mélilite qui est une solution solide de Gehlinité (C₂AS) et d'Akermanite (C₂MS₂), la Merwinite (C₃MS₂), le silicate bicalcique (α' C₂S) et la calcite (CaCO₃). Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques des trois additions sont données aux Tableaux 1 et 2. Le broyage des additions a été réalisé dans les mêmes conditions (même broyeur, mêmes quantités de corps broyant et de matériaux, même durée de broyage). Les trois additions ont des broyabilités des différentes, il en résulte des finesses différentes.

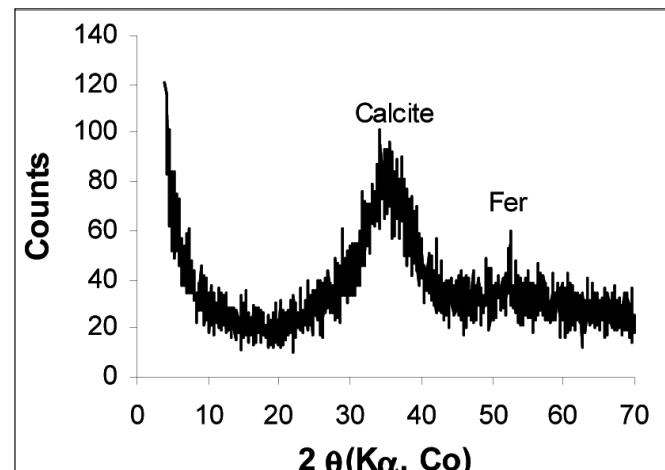


Figure 2. DRX du laitier granulé

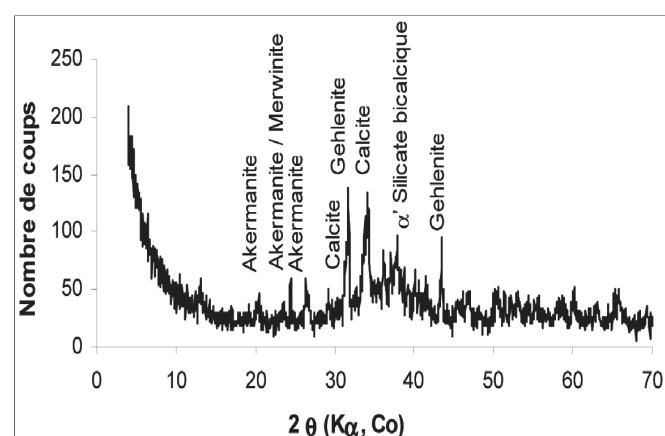


Figure 3. DRX du laitier cristallisés

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl	PAF
FC	55,51	0,11	0,50	0,06	0,20	0,08	0,01	0,04	0,02	42,5
LG et LC	38,55	8,45	35,73	3,20	5,21	0,36	0,95	0,34	-	-

Tableau 1. Compositions chimiques des additions

	r _{app} , Kg/m ³	r _{abs} , Kg/m ³	SSB, cm ² /g
FC	857	2620	7581
LG	1215	2910	5539
LC	1224	2930	6016

Tableau 2. Caractéristiques physiques des additions

2.3. Le super plastifiant

L'adjuvant utilisé est un SIKA VISCOCRETE 3045, superplastifiant de nouvelle génération à base de polycarboxylates modifiés, de masse volumique 1110 kg/m³, de pH égal à 5 ± 1, à teneur en ions chlore ≤ 0,1 %, à teneur en Na₂O Eq. ≤ 2,5 % et d'extrait sec égal à 36,4 ± 1,8 (%). Nous l'avons utilisé à un dosage de 2,2% du poids de ciment, la plage d'utilisation recommandée allant de 0,25 à 2,5 % du poids du ciment.

2.4. Les granulats

Les sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes, le premier est un sable roulé de dune, siliceux et fin. Le deuxième est un sable concassé, de roche naturelle calcaire. Le gravillon et le gravier sont des granulats concassés, de même nature minéralogique que le sable concassé. Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 3 :

L'analyse granulométrique des granulats est présentée sur la figure 4.

3. FORMULATION DES BAP

L'approche de formulation qui a été utilisée est expérimentale, s'appuyant uniquement sur des critères recommandés par l'AFGC [1]. Ces critères se résument au rapport (Gravier / Sable) qui doit être proche de 1, au volume de la pâte qui doit être de 330 à 400 l/m³, au dosage en ciment qui se situe entre 300 et 350 kg / m³ et au dosage en superplastifiant qui doit garantir la fluidité du mélange. A cet effet un béton de référence BAPR a été formulé conformément aux critères énoncés ci-dessus. A partir de la composition du BAPR, les additions ont été introduites avec différents dosages pour composer les BAP d'étude. Les différentes compositions des BAP sont données dans le tableau 4 :

Formulation du BAP R sans aucune addition

- Première étape

Données pour la formulation du BAP :

- La résistance visée à 28 jours est de 25 à 30 MPa
- Le dosage en ciment est fixé à 350 kg/m³.

– Le modèle de Bolomey permet de calculer le dosage en eau

$$f_c' = R_c \cdot G \left[\frac{C}{E_{eff}} - 0.5 \right]$$

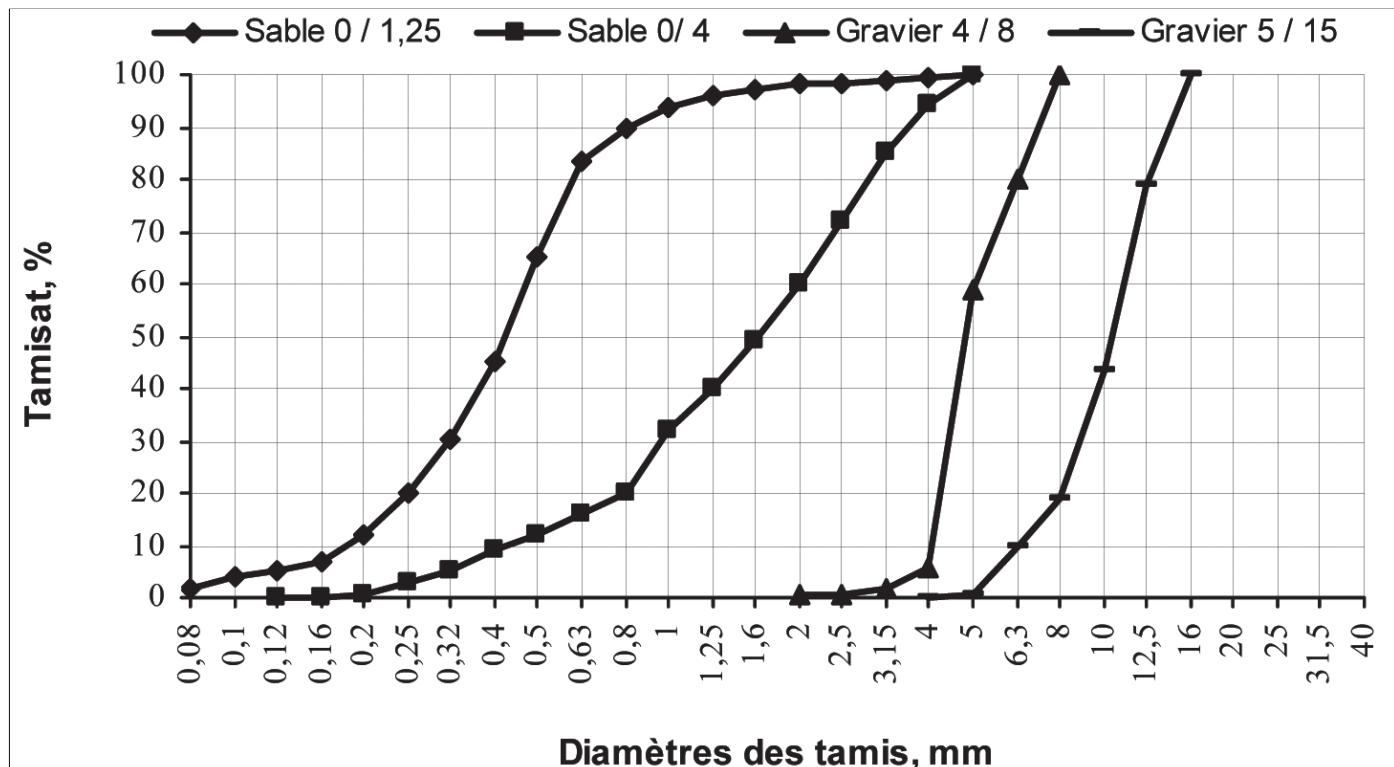
- Deuxième étape

- Le dosage en superplastifiant est déterminé par tâtonnement en visant un étalement entre 600 et 700 mm.

Formulation des BAP d'étude

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Concassé		
			Sable	Gravillon	Gravier
Masse volumique apparente	Kg /m ³	1450	1380	1450	1500
Masse volumique réelle	Kg /m ³	2580	2520	2590	2590
d/D	-	0/1,25	0/4	4/8	5/15
Module de finesse	-	1,84	2,69	-	-
Equivalent de sable	%	86	89	-	-
Coefficient d'absorption	%	1.5	2.7	1.4	1.4
Los Angeles	%	-	-	-	28
Coefficient d'aplatissement	%	-	-	-	14.59

Tableau 3. Caractéristiques des granulats

**Figure 4. Courbes granulométriques**

	Ajout	Ciment	Eau	E/(C+A)	SP	Sable		Gravier		V pate	Densité BAP
						0/1,25	0,25/4	4,0 / 8	5,0/15		
BAP	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	-	Kg/m ³	l/m ³	Kg/m ³				
R	0	350	196	0,56	7,7	498	260	410	495	317	2217
FC 30	105	350	196	0,43	7,7	474	248	390	472	352	2243
FC 45	157,5	350	196	0,39	7,7	463	241	381	460	369	2257
FC 60	210	350	196	0,35	7,7	451	235	371	448	386	2269
LG 30	105	350	196	0,43	7,7	474	248	390	472	353	2243
LG 45	157,5	350	196	0,39	7,7	463	241	381	460	371	2257
LG 60	210	350	196	0,35	7,7	451	235	371	448	389	2269
LC 30	105	350	196	0,43	7,7	474	248	390	472	355	2243
LC 45	157,5	350	196	0,39	7,7	463	241	381	460	374	2257
LC 60	210	350	196	0,35	7,7	451	235	371	448	394	2269

Tableau 4. Compositions des BAP d'étude

On introduit dans la composition du BAP R les additions avec différents dosages. Les dosages des constituants restent les mêmes (eau, SP, ciment et granulats), le but principal de cette étude étant de mettre en évidence les influences de la nature et du dosage des additions sur les propriétés rhéologiques des bétons.

4. DISCUSSIONS DES RÉSULTATS OBTENUS SUR BÉTON FRAIS

4.1. Étalement au cône d'Abra.ms

L'emploi du superplastifiant seul peut assurer un étalement qui s'inscrit dans le domaine des BAP, mais le béton peut présenter des signes de ségrégation et un ressuage important (photo 1). Il est donc nécessaire dans le cas général d'ajouter des additions minérales fines, dont le rôle est d'assurer la stabilité des BAP et prévenir la ségrégation et le ressuage (photo 2).



Photo 1. Ressuage et amoncellement des gros granulats au centre du BAP (sans addition)



Photo 2. Absence de ressuage et de ségrégation du BAPFC (avec addition de 45 % de FC)

Les résultats présentés sur la figure 5 ne montrent pas une grande différence entre les effets du laitier granulé et du laitier cristallisé sur l'étalement des BAP. Toutes les additions permettent d'améliorer l'étalement pour un dosage de 30%. Au delà de ce dosage, l'étalement des BAP diminue. Cette diminution est peu significative pour les BAPFC mais est très importante pour les BAPLG et BAPLC. Certains auteurs [14 - 15] ont relevé la faible influence du filler calcaire sur la demande en eau en raison de son caractère inerte. Le laitier cristallisé, addition à caractère inerte présente cependant une demande en eau plus importante que celle du filler calcaire (tableau 5). Cela est dû principalement à la morphologie tourmentée de ce laitier. Le laitier granulé a une demande en eau plus élevée encore, essentiellement à cause de sa réactivité chimique, dans la mesure où la morphologie est plus lisse (matière vitreuse). Les deux laitiers présentent donc des comportements rhéologiques voisins mais pour des raisons différentes : morphologie et absorption d'eau pour le laitier cristallisé, réactivité chimique pour le laitier granulé. Il est donc possible d'utiliser les additions de laitier sans risque jusqu'à 30% de la masse de ciment. L'augmentation du volume de pâte est bénéfique. Au-delà de 30%, la demande en eau devient pénalisante et limite (pour le BAP de référence donné) l'emploi de ces additions fines à base de laitiers, puisqu'avec des étalements inférieurs à 650 mm, on ne peut assurer le caractère auto-plaçant. Une optimisation du squelette granulaire et des dosages en adjoints permettraient peut-être d'augmenter

Type additions	Filler calcaire	Laitier granulé	Laitier cristallisé	CEMII 42,5 (au laitier)
Consistance (%)	23	26	24	28
E / L	0,23	0,26	0,24	0,28

Tableau 5. Demande en eau des additions (consistance normale d'après la norme EN 196-3)

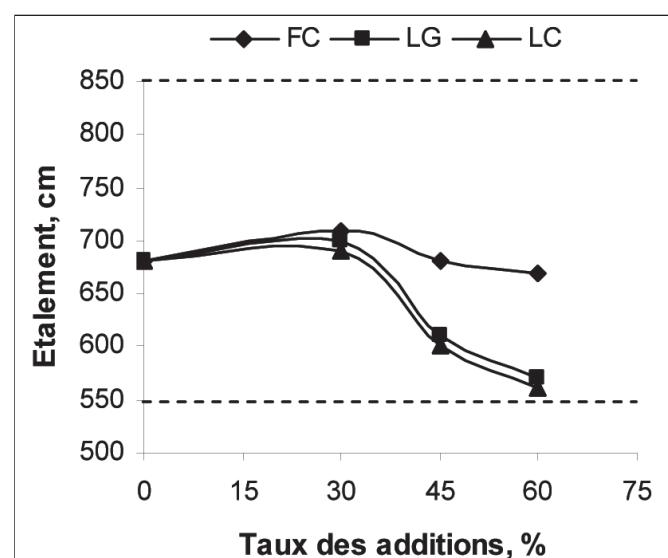


Figure 5. Influence du dosage en addition sur l'étalement

ce % de fines de laitier. Le filler calcaire n'a pas ces inconvénients, présente une demande en eau modérée et peut donc être utilisé dans ces BAP à des dosages bien supérieurs.

4.2. Stabilité au tamis

Deux classes de stabilité sont définies par la norme EN 206 – 9 (SR1 ≤ 20% et SR2 ≤ 15%)

Tests	Slump flow, cm	Stabilité au tamis, %	L – BOX (H_2 / H_1)
Valeurs limites	55 à 65 66 – 75 76 - 85	≤ 20 ≤ 15	> 0,8

Tableau 6. Valeurs normalisées [EN 206 – 9]

Le rôle des additions est aussi de limiter le risque de ségrégation et de ressuage dans les BAP. Le BAP formulé sans aucune addition est le seul mélange, qui présente un risque de ségrégation statique, avec la plus grande quantité de laitance (SR = 18%) (Fig.6) et un volume de pâte le plus faible ($V = 317 \text{ l/m}^3$, tableau 4). En effet lors de la mise au repos des 10 litres de BAP au moment de la réalisation de l'essai de stabilité au tamis on a relevé, après 15 minutes d'attente l'apparition d'une couche d'eau à la surface du béton, une eau qui est restée libre dans le béton, signe de ressuage. L'emploi des additions a permis d'absorber l'eau de ressuage en augmentant le volume de pâte et a permis l'amélioration de la stabilité des BAP. Les BAPLG et BAPLC avec 60% de laitier ont révélé une résistance à la ségrégation très importante et les quantités de laitance sont inférieures à 5% (figure 6). Ceci est dû à la très forte capacité d'absorption des ces additions de laitier, pour les deux types de raisons, physiques et chimiques, que l'on a vu précédemment. La stabilité des BAPFC s'améliore et a tendance à se stabiliser avec l'augmentation de la concentration volumique en solide.

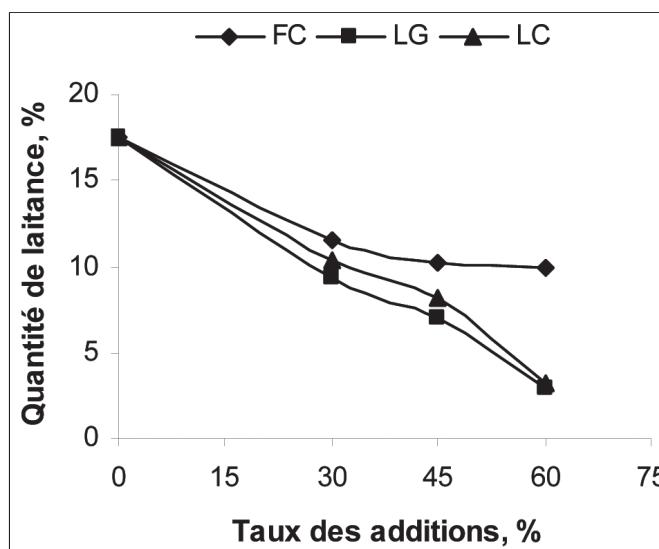


Figure 6. Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis

4.3. Taux de remplissage de la « L – box »

La valeur du taux de remplissage ($PL = H_2 / H_1$) doit être supérieure ou égale à 0,8 [Tableau 6,17]. Les résultats obtenus par l'essai L – Box, sont présentés sur la figure 7. Le BAP formulé sans addition ne garanti pas un taux de remplissage correct par manque de pâte. Les BAPLG et BAPLC donnent des valeurs du taux de remplissage optimales pour un dosage de 30%, des valeurs limites pour un dosage de 45 % et des valeurs inférieures pour un dosage de 60%, par rapport à celles recommandées par la norme [Tableau 6, 17]. L'augmentation de la viscosité des BAPLG et BAPLC a rendu difficile l'écoulement et a provoqué un blocage spécialement pour un dosage de 60% de laitier. Les résultats obtenus par l'essai de la boîte en L ne montrent pas non plus de différence significative entre les deux bétons LG et LC sur le taux de remplissage. Les BAPFC garantissent des valeurs du taux de remplissage supérieures à 0,8 pour tous les dosages.

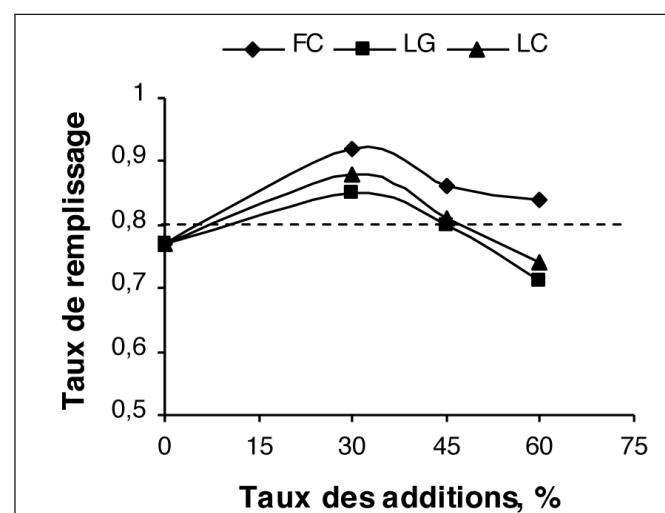
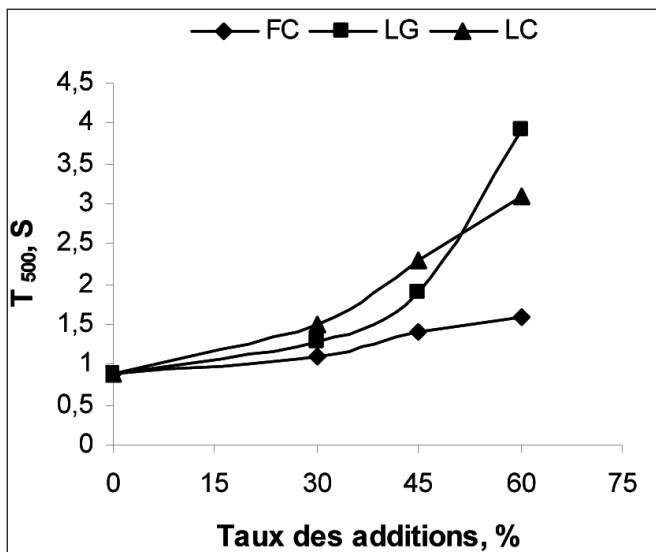
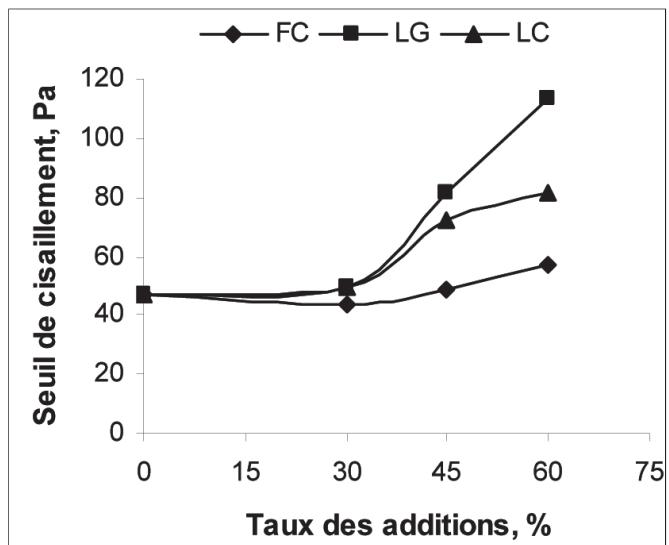
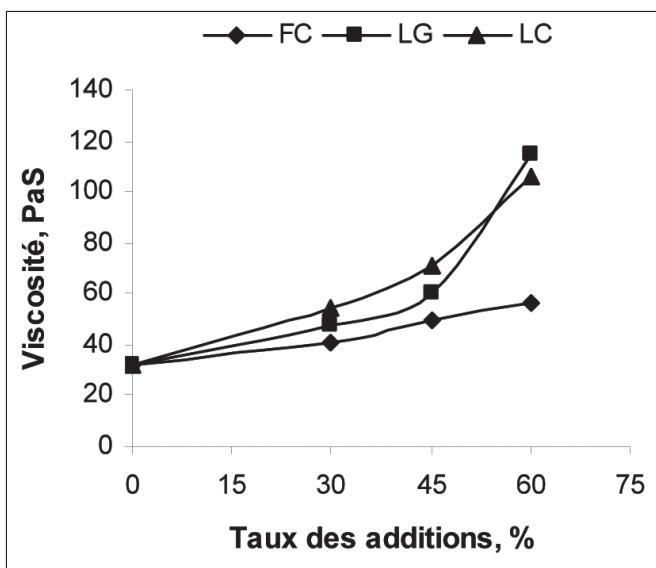


Figure 7. Influence du dosage des additions sur rapport de remplissage (L – BOX)

4.4. Viscosité plastique et T_{500} (annexe 2)

Les résultats présentés sur la figure 8, ne montrent pas non plus une grande différence entre les effets du laitier granulé et du laitier cristallisé sur la viscosité des BAP. Par contre, pour cet essai aussi, l'absorption d'eau plus importante des laitiers semble avoir une plus grande influence sur la viscosité des BAP comparativement à l'effet du filler calcaire, en relation avec le dosage. En effet la viscosité des BAP augmente de façon modérée jusqu'à un dosage de 30%. Au-delà de ce dosage, la viscosité des BAP de laitier (granulé et cristallisé) augmente rapidement, alors que celle du BAPFC continue d'augmenter aussi, mais de façon modérée. Le temps d'étalement pour former un diamètre de 500 mm donne une idée de la vitesse de déformation des BAP, par conséquent de la viscosité. Les T_{500} des BAPLG et BAPLC présentent une légère différence, mais restent largement supérieurs à celui du BAPFC pour un dosage de 60%.

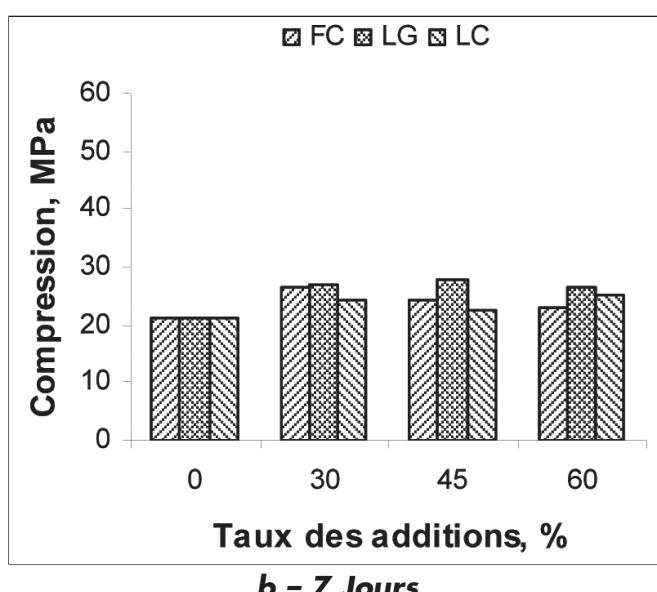
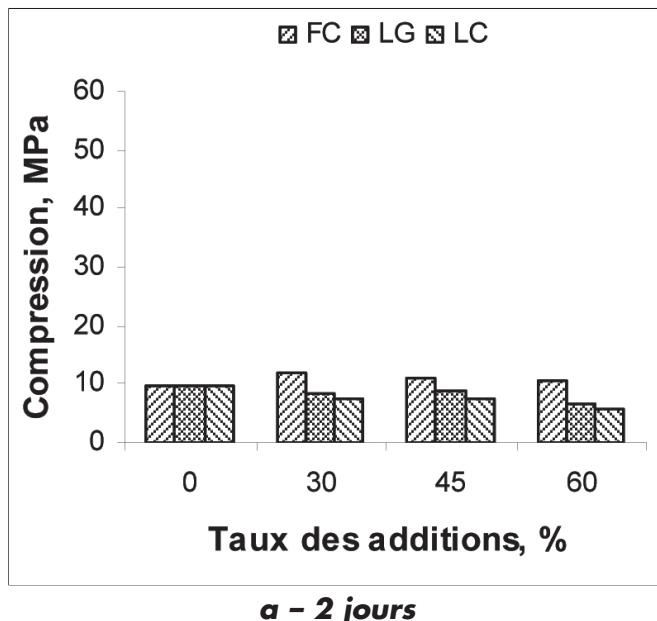
**Figure 8. Effet des additions sur la viscosité****Figure 10. Effet des additions sur le seuil de cisaillement****Figure 9. Effet des additions sur le temps T₅₀₀**

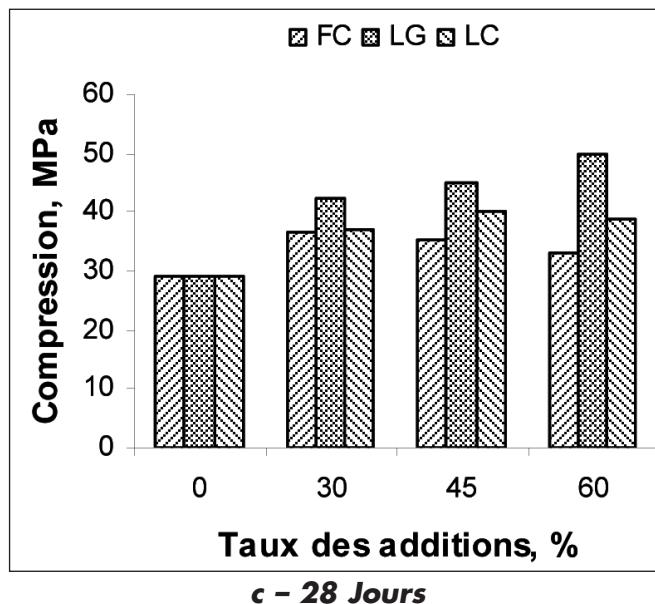
4.5. Seuil d'écoulement (annexe 1)

Les résultats présentés sur la figure 10 montrent que pour un dosage de 30%, la nature de l'addition influence peu le seuil de cisaillement des BAP. Cependant au-delà de ce dosage, le seuil de cisaillement augmente pour toutes les additions. L'augmentation est modérée pour l'addition calcaire, moyenne pour le laitier cristallisées et assez forte pour le laitier granulé. Il apparaît que pour ce test, la demande en eau par réactivité chimique est le paramètre principal.

5. DISCUSSIONS DES RÉSULTATS OBTENUS SUR BÉTON DURCI

Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique légèrement plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent [18] en relation avec la nature, le dosage, la nature chimique et la réac-





Figures 13. Effet des additions sur la résistance en compression des BAP

tivité de l'addition (figures 11, 12 et 13). L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et améliore les résistances mécaniques au jeune âge par effet physique (remplissage) principalement. Les meilleures résistances à 2 jours sont obtenues avec le FC, probablement par effet physique plus prononcé en raison de sa finesse plus élevée. Le laitier granulé, par son caractère pouzolanique [13], donne de meilleures résistances à plus longues échéances.

CONCLUSION

A partir d'une formulation de BAP prise comme référence et contenant une addition de filler calcaire égale à 30% de la masse de ciment, il est possible de conserver la plus grande partie des propriétés rhéologiques en remplaçant le calcaire par du laitier granulé ou cristallisé. Les deux laitiers donnent en effet les mêmes caractéristiques rhéologiques, proches de celles obtenues avec l'addition calcaire. Nous n'avons donc pas noté d'effet lié à la réactivité de l'addition utilisée, ou plus exactement les demandes en eau liées aux paramètres physiques (morphologie) et chimiques (réactivité) sont du même ordre de grandeur et aboutissent à des comportements similaires pour les deux bétons. Par contre, comme cela était prévisible, les résistances mécaniques à 28 jours sont améliorées (+15% environ) par utilisation d'addition de laitier granulé, comparativement à l'addition de la même quantité de calcaire ou de laitier cristallisé. Les résistances à 2 et 7 jours ne sont par contre pas affectées, vu la lente réactivité hydraulique du laitier.

Pour des taux d'additions de 45 ou 60%, les propriétés rhéologiques sont très affectées, au point que les bétons avec addition de laitier sont susceptibles selon la densité de

ferraillage, de ne plus être considérés comme des BAP. Ceci est moins marqué avec l'addition calcaire, dont les propriétés rhéologiques restent assez stables, même avec 60% d'addition. La principale raison de cet effet des fines de laitier est que ces fines ont une capacité d'absorption d'eau bien plus importante que les fines calcaires. Ceci doit être relié à leur morphologie et porosité bien particulière. Pour une utilisation de fines de laitier dans les BAP au-delà du taux de 30%, il sera donc conseillé d'adapter le couple dosage en eau/adjuvant afin d'avoir la rhéologie souhaitée, sans ségrégation.

REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre de l'accord programme Tassili N° 12 MDU 874 établi entre l'Université d'Annaba (Laboratoire de Génie Civil) et de Toulouse (LMDC).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Association Française du Génie Civil (2008). Les BAP : recommandations provisoires, p 63.
- [2] Nehdi M. et Rahman M. (2000). Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials, Cement and Concrete Research 30 (10), pp 1663-1669.
- [3] EL Barak M. (2005). Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des BAP à l'état frais, thèse de doctorat, Université Toulouse III, p 220.
- [4] Billberg P. (1999). Fine mortar rheology in mix design of SCC", Proceedings of 1st International RILEM Conference on SCC, Cachan, pp. 47-58
- [5] Nehdi M., Mindess S et Aïtcin P.C., (1998). Rheology of high-performance concrete: Effect of ultra-fine particles, Cement and Concrete Research, 28 (5), pp. 687-697.
- [6] Cyr M., (1999). Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse en cotutelle avec l'université de Sherbrooke, p 273.
- [7] Zhang X., Han J., (2000). The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. Cement and Concrete Research, 30 (5), pp. 827-830.
- [8] Norme Européenne, 12350 – 8, (2010). Essai pour béton frais, Partie : Béton autoplaçant – essai d'étalement au cône d' Abrams.
- [9] Norme Européenne 12350 – 10 (2010). Essai pour béton frais, Partie : Béton autoplaçant – essai de stabilité au tamis.
- [10] Norme Européenne 12350 – 11 (2010). Essai pour béton frais, Partie : Béton autoplaçant – essai à la boîte en L.
- [11] Sedran T. (1999). Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, Thèse de Doctorat de l'ENPC, p 220.
- [12] Roussel N. (2007). The LCPC Box cheap and simple technique for yield stress measurement of SSC, Materials and structures, 11787, 930, p 8.
- [13] Behim M., Cyr M., et Clastres P. (2011). Effets physiques et chimiques du laitier d'El Hadjar utilisé comme addition minérale dans les matériaux cimentaires, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 15/10, pp. 1413-1432.



- [14] Cyr M., Mouret M., (2003). Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: Consequences on SCC design, Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, pp. 241-255.
- [15] Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P., (2000). The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement paste. Cement and Concrete Research, 30 (10), pp. 1543-1549.
- [16] Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R., (2001). The influence of mineral admixtures on rheology of cement paste and concrete. Cement and Concrete Research, 31 (2), pp 245-255.
- [17] Norme Européenne, 206 – 9 (2010). Béton : partie 9 – Règles complémentaires pour le béton autoplaçant, p 33.
- [18] Assié S., (2004). Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, p 249.





ANNEXES

Annexe 1 : Détermination du seuil de cisaillement par la méthode LCPC – Box

Le seuil de cisaillement selon la méthode de la boite LCPC [9] : L'essai de la boite LCPC permet d'évaluer le seuil de cisaillement (t). Cette méthode s'appuie sur la mesure de la longueur d'étalement L du BAP dans une boîte en forme de canal (figure 1). Après l'arrêt de l'écoulement, la longueur d'étalement mesurée dans la boîte permet de calculer le seuil de cisaillement du béton à partir de l'abaque (figure 2).

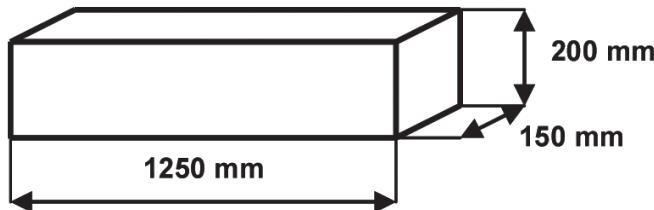


Figure 1. Représentation schématique de la boîte LCPC [Roussel, 2007]

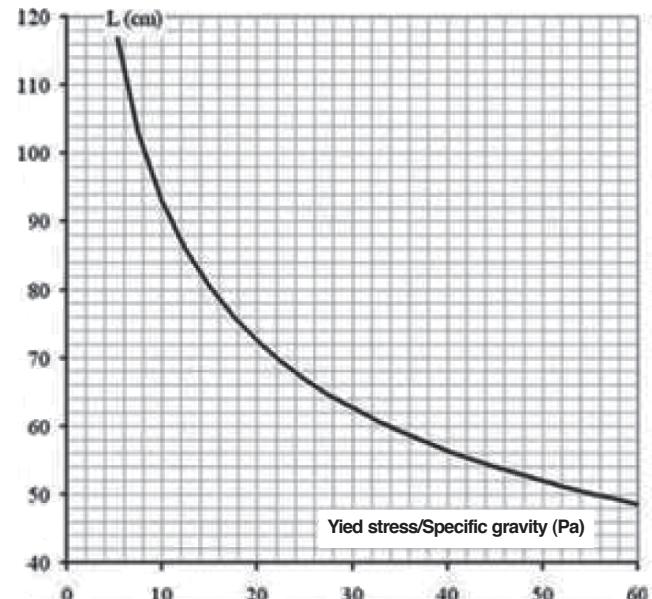


Figure 2. Relation entre longueur d'étalement et seuil de cisaillement [Roussel, 2007]

Annexe 2 : Détermination de la viscosité plastique par la relation de Sedran

La relation (1) [8] a été utilisée pour le calcul de la viscosité :

$$\mu = \frac{\rho}{1000} (0,0268 \text{ SF} - 2,39) T_{500} \quad [1]$$

μ : la viscosité plastique du matériau en (Pa.S),

ρ : la masse volumique du béton (Kg/m³),

SF : l'étalement en (mm),

T_{500} : le temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (S).