

Valorisation du laitier granulé et de la poudre de verre dans les bétons autoplacants (BAP)

Tahar Ali-Boucetta*, Mourad Behim & Walid Laifa

Laboratoire Matériaux, Géo – Matériaux et Environnement, Laboratoire de Génie Civil, Département de Génie Civil – Université Badji Mokhtar – BP 12 - Annaba

Révisé le 24/03/2013

Accepté le 08/05/2013

ملخص

الخرسانات ذاتية القوية (BAP) تتميز بشدة الميوعة، تأخذ مكانها بدون اهتزاز. يمكن الحصول على هذه الخاصية باستعمال الملدنات (superplastifiant) و زيادة حجم العجينة (الخليط الإسمنتي) لضمان توزيع جيد للحصى الخشن. لكن لضمان حجم كاف للخليط الإسمنتي، إمكانيات مهادتين، الأولى تتمثل في زيادة كمية الاسمنت، الذي ينتج عنه مبلغ عالي على المستوى الاقتصادي و خطر التشققات بطرد حراري كبير، على المستوى التقني. الطريقة الثانية، تتمثل في استعمال مختلف الإضافات المعدنية، المتمثلة في أغلب الأوقات في منتجات ثانوية (sous produits) أو النفايات. إشكالية هذا العمل هو إبراز مزايا النفايات الصناعية (الخبث المحبب) و النفايات المنزلية (زجاج القارورات) كبديل لحشو الحجر الجيري المألوف استعماله في الخرسانات ذاتية القوية. أفرحت صيغ مختلفة من أجل دراسة تأثير الإضافات المختلفة مثل حشو الحجر الجيري، الخبث المحبب و مسحوق الزجاج الناتج عن سحق القارورات، على خصائص الخرسانة ذاتية القوية. أبدت النتائج أثر إيجابي بالنسبة لكل من الخبث المحبب و مسحوق الزجاج فيما يخص الخصائص الريولوجية و الميكانيكية للخرسانات المصنوعة من نسب متراوحة بين 30 و 60 % من كتلة الاسمنت. الكمية المثلى تختلف من مادة إضافة إلى أخرى.

الكلمات المفتاحية: إضافات – حبيبات خبث الأفران العالية – مسحوق الزجاج – حشو الحجر الجيري – الريولوجيا.

Résumé

Les bétons autoplacants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité, se mettant en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte pour assurer une bonne dispersion des gros granulats. Cependant, pour assurer un volume de pâte suffisant deux possibilités sont offertes : la première consiste en l'augmentation du dosage en ciment, ce qui induit un surcoût sur le plan économique et des risques de fissuration, dus à des réactions exothermiques importantes lors de l'hydratation du ciment, sur le plan technique. La deuxième voie consiste en l'emploi de diverses additions minérales qui sont le plus souvent des sous produits ou des déchets. La problématique de ce travail est donc la valorisation de déchets industriels (laitier granulé) et des déchets ménagers (verre à bouteille) en substitution du filler calcaire traditionnellement utilisé dans les BAP. Différentes formulations sont proposées dans le but d'étudier l'influence des différents ajouts notamment le filler calcaire, le laitier granulé et la poudre de verre sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci. Les résultats montrent un effet favorable aussi bien du laitier granulé que de la poudre de verre sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons formulés à des taux variant entre 30 et 60 % par rapport à la masse du ciment. L'optimum du dosage est différent d'une addition à une autre.

Mots clés: Additions - Laitier granulé de haut fourneau - Poudre de verre - Filler calcaire - BAP

Abstract

Self-compacting concretes (SCC) are characterized by high fluidity, their set up is done without vibration. This property can be obtained by the use of superplasticizer and the increased volume of paste to ensure good dispersion of coarse aggregate. However, to ensure a sufficient volume of paste, there are two possibilities: either an increase of cement dosage, which causes additional cost and risk of cracking through exothermy, or the use of various mineral additions such as waste and by products. The problematic of this work is the enhancement of industrial waste (slag) and household waste (glass bottle) a substitute to limestone filler traditionally used in the SCC. Different formulations are proposed to study the influence of various additions especially, limestone filler, granulated slag and glass powder on the properties of SCC, to fresh and hardened state. The results show a positive effect, of granulated slag and glass powder on rheological and mechanical properties of concretes at rates ranging between 30 and 60% compared to the mass of cement. The optimum dosage is different from an addition to another.

Key words: Additions - Granulated blast furnace slag - Glass powder - Limestone filler – SCC

*Auteur Correspondant : thr_aboucetta@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et par l'augmentation du volume de pâte pour assurer une bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation. Pour garantir un volume de pâte suffisant deux possibilités sont offertes. La première consiste en l'augmentation du dosage en ciment, ce qui induit manifestement un surcoût sur le plan économique et des dégradations, telles que les fissures de retrait thermique dues à des réactions exothermiques importantes lors de l'hydratation du ciment, sur le plan technique. La deuxième possibilité consiste en l'emploi de diverses additions minérales qui sont le plus souvent des sous produits ou des déchets. Le laitier granulé du complexe sidérurgique d'El Hadjar (Annaba, Algérie) est utilisé par la cimenterie de Hadjar-Soud pour la production du CPJ-CEM II/A 42.5 à un faible taux de l'ordre de 20 % en moyenne à cause de son faible pouvoir hydraulique [1]. La production du laitier au complexe sidérurgique d'Annaba est de l'ordre d'un million de tonne par an. Le verre à bouteille coloré n'est pas recyclé, il n'existe aucun circuit de collecte, il est jeté dans les bennes à ordures où en décharges sauvages. Il est connu que le laitier granulé contribue à l'amélioration de la durabilité des ciments et des bétons [2], alors que la poudre de verre est un matériau, nouvellement introduit dans les matériaux cimentaires. Les verres contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granat. Plusieurs auteurs [3 - 5] conviennent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre.

La valorisation de ces déchets dans les bétons autoplaçants (BAP) comme addition pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, permettant d'élargir le champ d'emploi du laitier et l'élimination de décharges encombrantes et polluantes de verre. Le but de ce travail est la substitution des fillers calcaires par le laitier granulé de haut fourneau ou la poudre de verre dans les BAP avec optimisation des dosages. Cette substitution doit communiquer au mélange les caractéristiques rhéologiques d'un BAP et les résistances mécaniques d'un béton usuel. A cet

effet, une étude comparative a été menée sur un BAP de référence (BAPR) sans aucune addition et des BAP avec additions de filler calcaire (BAPFC), de laitier granulé de haut fourneau (BAPLG) et de poudre de verre (BAPPV) à différents dosages.

2. MATÉRIAUX

2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/A 42.5, de masse volumique apparente et absolue respectivement (1020 et 3000 kg/m³), de finesse Blaine 3480 cm²/g et de composition minéralogique : C₃S = 58.2%, C₂S = 18.5%, C₃A = 9.3% et C₄AF = 8.2%.

2.2 Les additions

L'analyse par diffraction aux rayons X des additions a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre Siemens D 5000, utilisant une anticathode de cobalt (Co K α , λ = 1.789 Å), sur une plage de 10 à 70° (2 θ) avec un pas d'avancement de 0.02° et un temps de comptage de 12s. Un broyeur à boulet d'une capacité de 10 kg et une vitesse de rotation de 53 tr/min a servi au broyage du laitier granulé et des bouteilles de verre. Les paramètres de broyage ont été maintenus constants pour toutes les additions.

2.2.1 Filler calcaire (FC)

Les FC sont des déchets de concassage de roches provenant des carrières de production de granulats pour béton. Le diagramme aux rayons X présenté par la figure 1 montre que le filler calcaire est essentiellement composé de minéral cristallisé sous la forme de calcite (CaCO₃).

2.2.2 Le laitier granulé (LG)

Le LG est un sous produit de l'élaboration de la fonte au complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba), de structure vitreuse, avec un taux de vitrification de 97 %, mais de faible hydraulicité [1]. La figure 2 illustre le diagramme du laitier, typique d'un matériau essentiellement vitreux; outre la fraction vitreuse, le laitier granulé présente de faibles quantités de fer métallique.

2.2.3 La poudre de verre (PV)

La PV est obtenue par récupération de bouteilles de verre de même nature et de même couleur, dispersées dans les décharges sauvages dans la nature (montagne, bord de mer etc....). Elles sont nettoyées puis finement broyées. L'analyse aux rayons X (Fig. 3) montre un matériau essentiellement vitreux. Outre la fraction vitreuse, le verre présente de faibles quantités de fer. Le tableau 1 regroupe les compositions chimiques qui ont été réalisées par spectrométrie de fluorescence X et les caractéristiques physiques des trois additions

2.3 Le superplastifiant

L'adjuvant employé est un plastifiant- réducteur d'eau à base de polycarboxylates modifiés, de

masse volumique de 1110 kg/m^3 , de $\text{pH} = 5 \pm 1$, des teneurs en ions chlore $\leq 0.1 \%$, en $\text{Na}_2\text{O Eq.} \leq 2.5 \%$ et l'extrait sec = $36.4 \pm 1.8 \%$. La plage d'utilisation recommandée varie 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 et le deuxième est un sable concassé, de roche naturelle calcaire. Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 2. Le gravillon et le gravier sont des granulats concassés, de même nature minéralogique que le sable concassé. L'analyse granulométrique des granulats est présentée sur la figure 4.

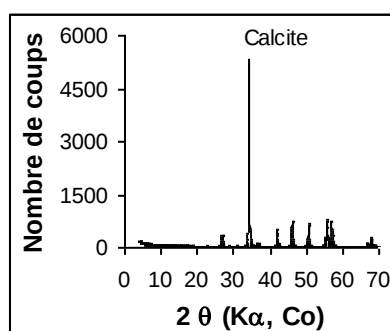


Figure 1. Diffractogramme des Filler calcaire

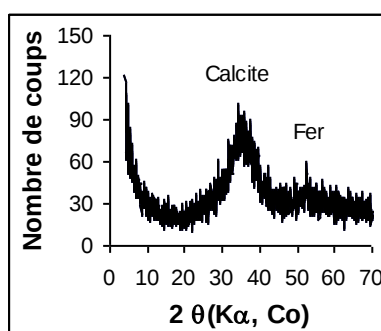


Figure 2. Diffractogramme du laitier granulé.

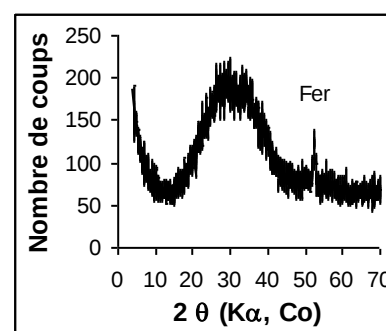


Figure 3. Diffractogramme de la poudre de verre

Tableau 1. Compositions chimiques et caractéristiques physiques des additions.

Analyse chimique				Analyse physique				
Oxydes	% Massique			Désignation	Unité	Valeurs		
	FC	LG	PV			FC	LG	PV
CaO	55.91	40.69	9.29	Densité absolue	(kg/m^3)	2450	2910	2550
Al ₂ O ₃	0.11	8.17	1.34	Densité apparente	(kg/m ³)	857	1215	795
Fe ₂ O ₃	0.06	4.15	1.15					
SiO ₂	0.40	34.41	69.20	S.S.B	(cm ² /g)	7581	5539	5661
MgO	0.18	4.56	1.81					
Na ₂ O	0.05	0.10	15.60	I ₂₈	-	0.74	0.88	0.85
K ₂ O	0	0.89	0.26					
Cl ⁻	0.009	0.01	0.016	I ₉₀	-	0.76	1.13	1
SO ₃	0.04	0.36	0.01					
P-A-F à 1000°C	42.68	-	0.30					

I₂₈ et I₉₀ – Indices d'activités à 28 et 90 jours

Tableau 2. Caractéristiques des granulats.

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Concassé		
			Sable	Gravillon	Gravier
Masse volumique apparente	kg /m ³	1440	1375	1450	1500
Masse volumique absolue	kg /m ³	2500	2500	2590	2590
d/D	-	0/2	0/3	3/8	6.3/15
Module de finesse	-	2.03	3.02	-	-
Equivalent de sable	%	86	89	-	-
Coefficient d'absorption	%	1.5	2.7	1.4	1.4
Los Angeles	%	-	-	-	28
Coefficient d'aplatissement	%	-	-	-	14.59
Micro Deval	%	-	-	-	12

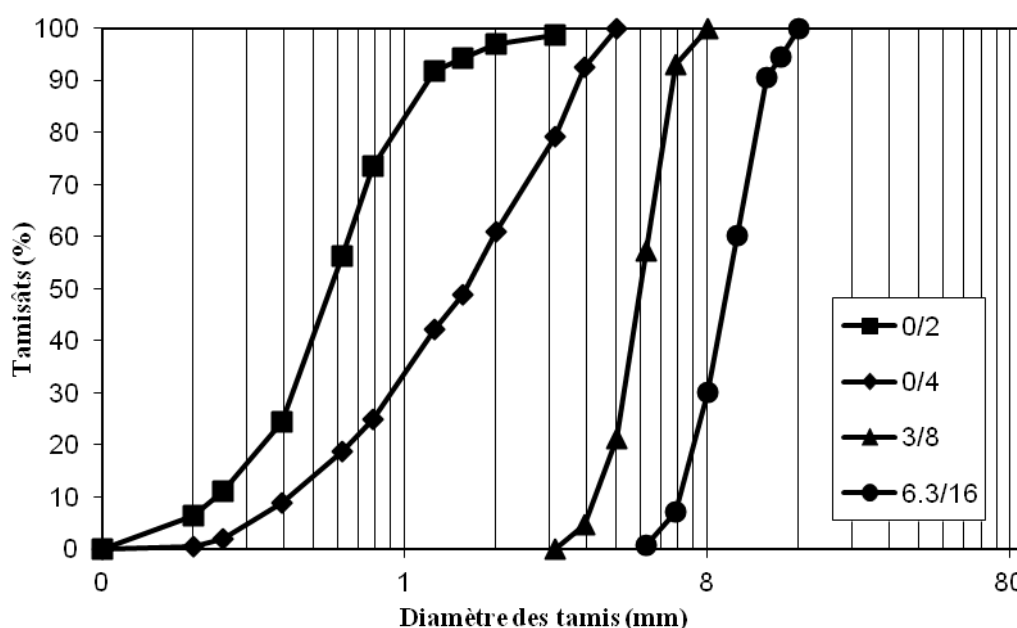


Figure 4. Courbes granulométriques.

3. METHODES EXPERIMENTALES

3.1 Formulation des BAP

L'approche de formulation qui a été utilisée est empirique, basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant uniquement sur des critères recommandés par l'AFGC [6]. Ces critères se résument au rapport gravier/sable (G/S) qui doit être proche de 1, au volume de la pâte qui doit être de 330 à 400 litre/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. L'optimisation du squelette granulaire a été réalisée à l'aide d'un logiciel [7] donné en annexe 4, basé sur la méthode de Dreux - Gorisse modifiée et

appliquée au BAP avec la prise d'un rapport G/S (proche de 1) afin d'assurer la stabilité et garantir l'écoulement.

Dans le but de mener une étude comparative de l'effet du dosage et de la nature des additions minérales sur les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci, un BAPR a été formulé. Les compositions des BAP d'étude sont obtenues par ajout au BAPR d'additions (FC, LG et PV) à des dosages de 30, 45 et 60 % par rapport à la masse du ciment. Bien que certains dosages ne sont pas en accord avec les textes normatifs, leurs utilisations sont importantes pour le déroulement de cette étude. Les différentes compositions des BAP sont données dans le tableau 3.

Tableau 3. Compositions des BAP d'étude.

	Unités	Ref	BAPEC			BAPLG			BAPPV		
Ciment	kg/m ³	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Addition	kg/m ³	-	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Eau	kg/m ³	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
SP	kg/m ³	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
S 0/2	kg/m ³	590	555	538	520	560	545	530	555	538	520
S 0/3	kg/m ³	315	298	288	278	300	290	282	295	288	278
G 4/8	kg/m ³	231	218	212	205	220	215	207	218	212	205
G 6.3/16	kg/m ³	575	541	523	508	546	531	518	539	523	508
E/C	-	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
E/L	-	0.54	0.42	0.38	0.35	0.42	0.38	0.35	0.42	0.38	0.35
G/S	-	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
V/pâte	l/m ³	312	353	374	394	347	364	381	352	371	391
Air occlus	%	6.4	6.3	6.4	6.5	5.2	4.3	4.0	5.1	5.0	4.2

3.2 Caractérisation des BAP à l'état frais

Les bétons autoplaçants formulés doivent satisfaire plusieurs tests normalisés [8-10] qui permettent de caractériser leurs principales propriétés. Les valeurs préconisées par la norme EN 206 – 9 [11] sont données dans le tableau en annexe 1.

- La mobilité du béton autoplaçant en milieu non confiné, est un essai réalisé pour la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (Slump flow, SF). Cet essai est complété par la mesure du temps d'étalement pour un diamètre défini de 500 mm (T_{500}) selon la norme EN 12350 – 8 [8].
- La résistance à la ségrégation du béton autoplaçant est exprimée par l'essai de stabilité au tamis selon la norme EN 12350 – 11 [9].
- La mobilité du béton autoplaçant en milieu confiné, est réalisé par l'essai du taux de remplissage dans la boîte en L (PL), selon la norme EN 12350 – 10 [10].

Deux autres essais non normalisés, comme paramètres rhéologiques ont été choisis: la viscosité (μ) selon le modèle de Sedran [12] et le seuil de cisaillement (τ) selon la méthode de la boîte LCPC [13] décrites successivement en annexes 2 et 3. Chaque essai est reproduit trois fois sur trois gachées différentes de mêmes compositions.

3.3 Caractérisation des bétons durcis

Les essais à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³ démoulées 24 heures après le coulage et conservées sous l'eau à la température ambiante. L'essai de compression simple est

réalisé selon la norme EN 12390-3 [14] à l'aide d'une presse d'une capacité de 200 tonnes à 2, 7, 28 et 90 jours. Le nombre d'éprouvettes pour chaque résultat est de trois.

4. DISCUSSIONS DES RÉSULTATS OBTENUS SUR BÉTON FRAIS

4.1 Etalement au cône d'Abrams (Slump flow)

Les résultats obtenus et présentés sur la figure 5 montrent que tous les bétons ont des valeurs d'étalement qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, y compris le BAPR.

Toutes les additions améliorent de façon remarquable l'étalement. L'augmentation du volume de pâte par l'introduction des additions a entraîné la réduction des frottements des granulats par leur dispersion en améliorant l'écoulement des BAP [15] (Fig. 6). Cependant au-delà d'un dosage critique de 45 % d'addition, l'étalement diminue par effet de l'augmentation de la concentration volumique en solides, mais reste largement supérieur à celui donné par le BAPR. L'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur nature chimique (inerte ou active). Les particules fines de l'addition remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice. Par conséquent, la quantité d'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Cependant, au delà d'un dosage critique, la viscosité du mortier augmente avec l'ajout de l'addition. Le FC garantit les valeurs maximales de l'étalement par rapport au LG et la PV. En effet, certaines additions à caractère

pouzzolanique comme la poudre de verre et le laitier granulé, leur écoulement dépend de deux composantes: une composante physico-chimique et une composante granulaire liée aux frottements des particules [16]. Shi *et al.* [17] montrent que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible, à dosage constant en SP, qu'une diminution de la fluidité soit observée. Au contraire, sa demande en superplastifiant est moindre pour une même fluidité [18], si l'addition est à caractère inerte.

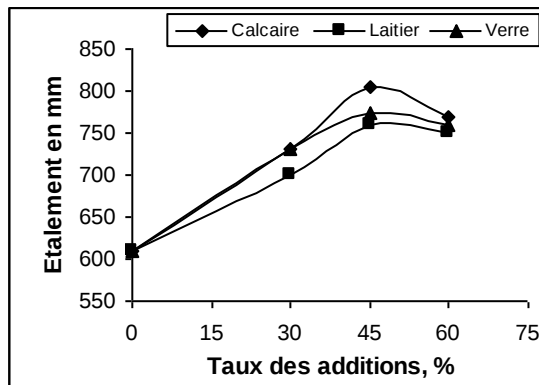


Figure 5. Influence du dosage en addition sur l'étalement (Slump flow).

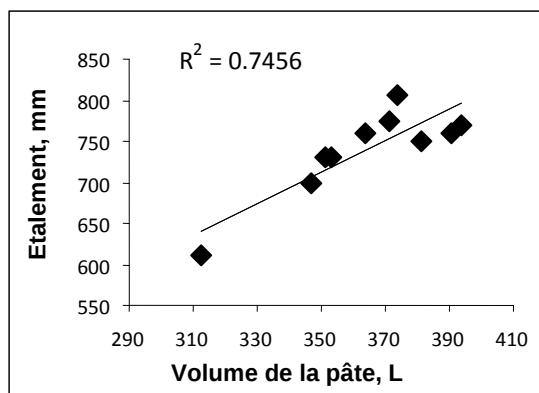


Figure 6. Relation entre l'étalement et le volume de pâte (addition de laitier granulé).

4.2 Stabilité au tamis

Les résultats présentés sur la figure 7 montrent que le BAPR révèle la plus faible stabilité par manque de pâte. Le volume de mortier est insuffisant pour s'écouler à travers le tamis, ce qui peut conduire à une qualité de parement assez mauvaise [19].

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 [9], après 15 minutes d'attente, une pellicule d'eau est apparue à la surface du béton, signe révélateur de ressuage.

L'emploi des additions a permis d'absorber l'eau de ressuage en augmentant le volume de pâte et a permis aussi l'amélioration de la stabilité des BAP. On note toutefois un dosage optimal d'addition de l'ordre de 45 %, au-delà duquel la stabilité diminue par augmentation de concentration volumique en solides de la pâte, le mortier devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis.

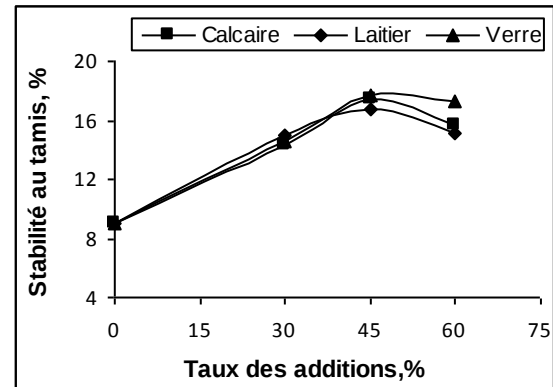


Figure 7. Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis.

4.3 L – box

La valeur du taux de remplissage ($PL = H_2 / H_1$) doit être supérieure ou égale à 0.8 [10]. Les résultats obtenus par l'essai L – Box, sont présentés sur la figure 8.

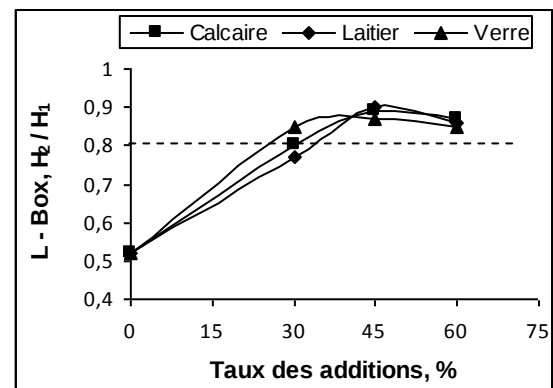


Figure 8. Influence du dosage des additions sur l'écoulement (L – BOX).

Tous les BAP donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP ($H_2/H_1 > 0.8$), excepté le BAPR dont le volume de pâte (312 l/m^3 de béton, voir tableau 3) est insuffisant pour entraîner les gros granulates, donne une valeur du taux de remplissage (H_2/H_1) de 0.52 (Fig. 8). Les BAP LG avec un dosage de 30 % d'addition, donnent une valeur critique du taux de remplissage de 0.77 traduisant un volume de pâte encore

insuffisant ; la densité du LG est supérieure à celles du FC et de la PV. Ces résultats confirment le taux optimal d'addition de 45%. Au delà de ce dosage on constate une légère diminution du taux de remplissage (PL) quelle que soit l'addition.

4.4 Le temps T_{500}

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 500 mm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. En général, pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [20, 21]. Au-delà de 45 % d'addition, (Fig. 9) le temps T_{500} réaugmente.

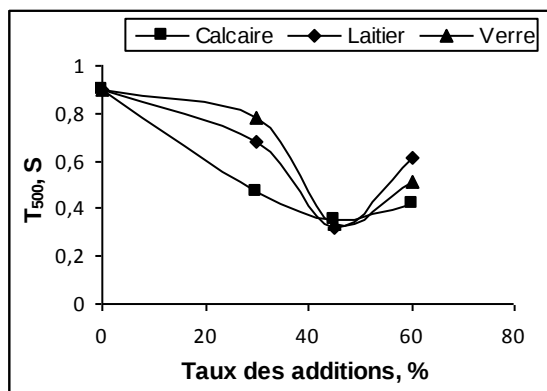


Figure 9. Effet des additions sur le temps T_{500} .

4.5 Viscosité plastique

La viscosité, estimée par application de la relation (1) donnée en annexe 3 et présentée sur la figure 10, montre qu'avec l'augmentation du volume de la pâte, on constate une diminution de la viscosité, ce qui explique une plus grande fluidité et un Temps T_{500} plus faible des BAP avec addition. Cependant, au-delà de 45 % d'addition, la viscosité augmente par effet de l'augmentation de la concentration du volume en solides.

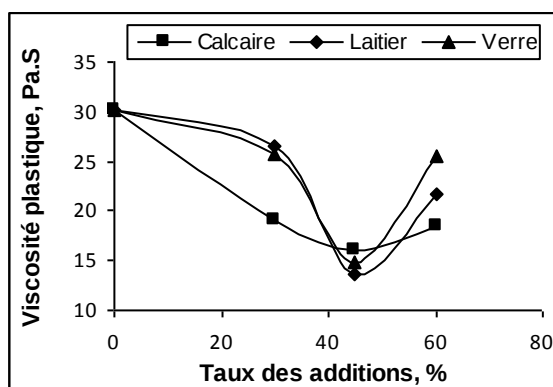


Figure 10. Effet des additions sur la viscosité.

4.6 Seuil d'écoulement

Les résultats obtenus présentés sur la figure 11, montrent l'effet fluidifiant de toutes les additions se traduisant par une diminution importante du seuil de cisaillement.

Ici aussi le dosage optimal est de l'ordre de 45%. Tous les résultats obtenus par l'essai à la boîte LCPC corroborent les résultats obtenus par l'essai d'étalement.

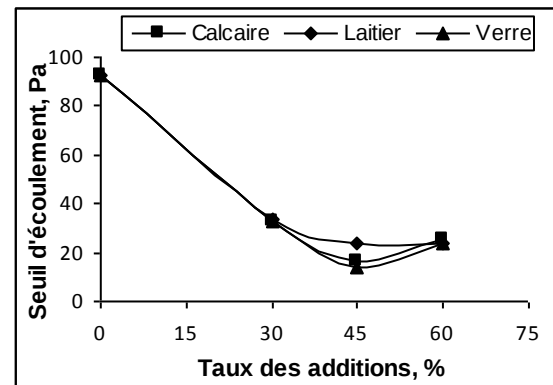


Figure 11. Effet des additions sur le seuil de cisaillement.

5. DISCUSSIONS DES RESULTATS OBTENUS SUR BÉTON DURCI

Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique légèrement plus élevée qu'un béton ordinaire à rapport E/L équivalent [22]. Dans l'étude présente c'est l'incorporation d'additions minérales qui est étudiée à partir d'une référence autoplaçante sans addition. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire. Les additions améliorent les résistances mécaniques au jeune âge par effet physique (remplissage). Lorsqu'elles sont réactives, elles améliorent les résistances à plus longues échéances par effet chimique (hydraulique ou pouzzolanique) [2]. Cette amélioration des résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de l'addition. En effet, l'augmentation du dosage en addition entraîne une amélioration des résistances mécaniques à tous les âges, ce phénomène est dû à l'effet du remplissage qui améliore la compacité et à l'effet de surface qui entraîne une meilleure hydratation du ciment au jeune âge. Les résultats obtenus et présentés sur la figure 12 a, b, c et d sont conformes aux références bibliographiques citées dans ce paragraphe.

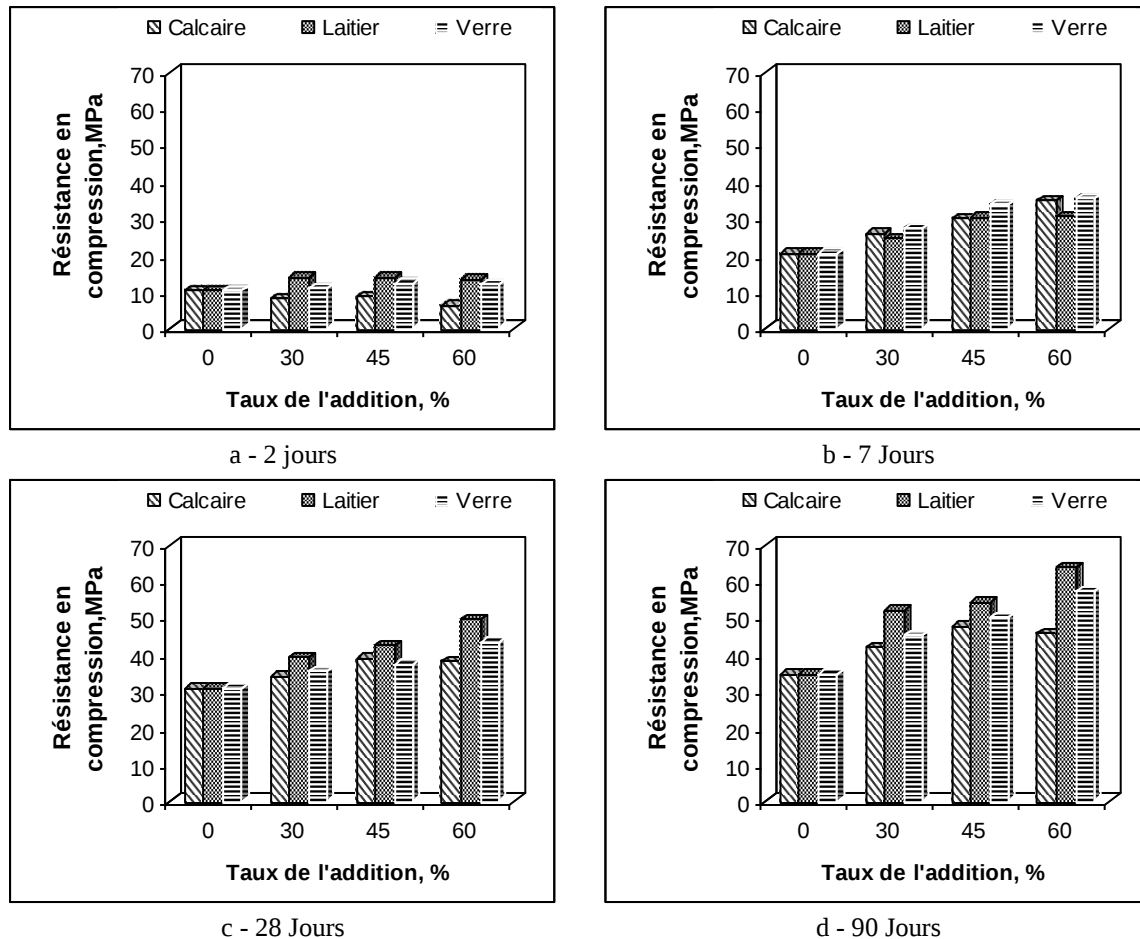


Figure 12. Effet des additions sur la résistance en compression (a, b, c, d,).

Il est également noté un gain de résistance remarquable des BAP avec addition de poudre de verre et de laitier granulé, notamment à partir de 28 jours de durcissement ce qui correspond au développement des résistances par effet pouzzolanique. En effet, les analyses aux rayons X du laitier granulé de haut fourneau et de la poudre de verre ont montré des matériaux essentiellement vitreux, caractérisés vraisemblablement par un pouvoir pouzzolanique. Par ailleurs, les résistances en compression des BAP avec addition sont supérieures à celle du BAP de référence (sans aucune addition). De plus, le laitier utilisé est réactif mais sa cinétique est très lente à 7 jours [2], les résistances obtenues sont moins importantes que celles développées par les BAP FC et PV. Par contre, l'accroissement des résistances des BAP LG par effet pouzzolanique prend toute son ampleur à 28 jours [2]. Il est toutefois important de signaler que nous avons posé comme résistance caractéristique en compression à 28 jours pour un béton d'ouvrage $\sigma_{C\ 28} = 30$ MPa. Tous les mélanges satisfont à cette condition et les résistances à 28 jours de tous les BAP sont

largement supérieures à la résistance projetée, en particulier le BAP LG dont la résistance en compression à 28 jours est égale à 50 MPa.

CONCLUSION

L'écoulement des BAP peut être obtenu par l'emploi de superplastifiant comme nous l'avons vu avec le BAPR. Pour rétablir un niveau de viscosité convenable permettant de diminuer les risques de ségrégation et de ressasse et améliorer l'étalement, l'emploi d'additions fines est parfaitement justifié, voir même recommandé.

Le caractère inerte ou réactif de l'addition peut avoir des effets aussi bien sur le béton frais par l'amélioration de la fluidité et l'élimination des risques de ségrégation en relation avec le dosage, que sur le béton durci par l'augmentation des résistances mécaniques. Si le filler calcaire est traditionnellement utilisé dans les BAP, le laitier granulé et la poudre de verre le sont moins. Les résultats obtenus permettent d'envisager leur emploi comme addition fine au BAP avec des dosages de 30 à 60 % selon le type d'addition avec un dosage

optimal de 45 % pour toutes les additions. Il serait certainement utile de conduire une étude sur l'optimisation du dosage en superplastifiant d'une part et la limitation de $D_{\max}$ à 10 ou 12 mm au lieu de 15mm comme nous l'avons pratiqué dans cette étude. Finalement il est connu que le laitier granulé contribue à l'amélioration de la durabilité des ciments et des bétons, alors que la poudre de verre est un matériau nouvellement introduit dans les matériaux cimentaires et nécessite donc d'autres études notamment de durabilité pour valider son emploi dans les bétons. C'est dans cette optique qu'une étude de durabilité des BAP incorporant des ajouts cimentaires normalisés tels que le filler calcaire, laitier granulé ou la fumée de silice conjointement à la poudre de verre est en cours de réalisation.

REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre de l'accord programme Tassili N° 12 MDU 874.

RÉFÉRENCES

- [1] Behim M., Cyr M. & 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), 1413-1432.
- [2] Behim M., 2005. Sous produits industriels et développement durable : Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'EL HADJAR dans les matériaux à matrice cimentaire, Thèse de doctorat d'état en cotutelle Université d'Annaba – INSA de Toulouse. 187p.
- [3] Shao Y., Lefort T., Moras. & Rodriguez D., 2000. Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (1), 91-100.
- [4] Chen C.H., Huang R., Wu J.K. & Yang C.C., 2006. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, *Cement and Concrete Research*. Vol. 36 (3), 449-456.
- [5] Shi C., Wu Y., Riefler C. & Wang H., 2005. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*. Vol. 35 (5), 987- 993.
- [6] Association Française du Génie Civil., 2008. Les BAP : recommandations provisoires, 63p.
- [7] CBAO SARL., 2011. Logiciel de formulation pour béton, BCN Bureau d'étude. Site web: <http://www.cbao.fr/logiciel-formulation-beton-bureau-etude-dosage.html>.
- [8] NF EN 12350 – 8., Novembre 2010. Partie 8 : Béton autoplaçant – essai d'étalement au cône d'Abrams.
- [9] NF EN 12350 – 11., Novembre 2010. Partie 11 : Béton autoplaçant – essai de stabilité au tamis.
- [10] NF EN 12350 – 10., Novembre 2010. Partie 10 : Béton autoplaçant – essai à la boîte en L.
- [11] NF EN 206 – 9., Juin 2010. Béton: partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.
- [12] Sedran T., 1999. Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, Thèse de Doctorat de l'ENPC. 220p.
- [13] Roussel N., 2007. The LCPC Box cheap and simple technique for yield stress measurement of SSC, *Materials and structures*. Vol. 40 (9), 889-896.
- [14] NF EN 12390-3., Avril 2012. Essai pour béton durci: Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes.
- [15] Kennedy C.T., 1940. The Design of Concrete Mixes, *Proceedings of the American Concrete Institute*, 36, 373-400.
- [16] Toutou Z., 2002. Rhéologie et formulation des géo-suspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité, Thèse de doctorat de INSA- Rennes, p 221.
- [17] Shi and al., 1998. A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol. 20, 9-14.
- [18] Zhu and Gibbs., 2005. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cement and concrete research*, vol 35, 1457-1462.
- [19] Cussigh S. & De S., 2003. Project testing SCC-segregation test method, *Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Island, 311-322.
- [20] Grünwald S. & Walraven J.C., 2003. Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete, *Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Island, 49-58.
- [21] Nielsson I. & Wallevick O.H., 2003. Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results, *Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Island, 59-68.
- [22] Assié S 2004, Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de doctorat, INSA-Toulouse, p 249.

ANNEXES

Annexe 1

Tableau 1. Valeurs préconisées par les normes [7]

Essais	Etalement (SF), cm		Stabilité au tamis (SR), %		Boîte en L PL = (H ₁ / H ₂)		T ₅₀₀ , Secondes	
Classes	SF 1	550 - 650	SR 1	≤ 20	PL 1	≥ 0.8 ^a	VS 1	< 2
	SF 2	650 - 750	SR 2	≤ 15	PL 2	≥ 0.8 ^b	VS 2	≥ 2
	SF 3	750 - 850	-		-		-	

a - Deux armatures

b - Trois armatures

Annexe 2 : Détermination du seuil de cisaillement par la méthode LCPC – Box

Le seuil de cisaillement selon la méthode de la boîte LCPC [9] : L'essai de la boîte LCPC permet d'évaluer le seuil de cisaillement (τ). Cette méthode s'appuie sur la mesure de la longueur d'étalement L du BAP dans une boîte de longueur 120 cm (Fig.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 (Fig 2).

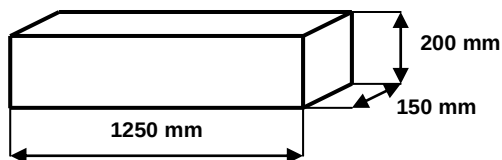


Figure 1. Représentation schématique de la boîte LCPC [13]

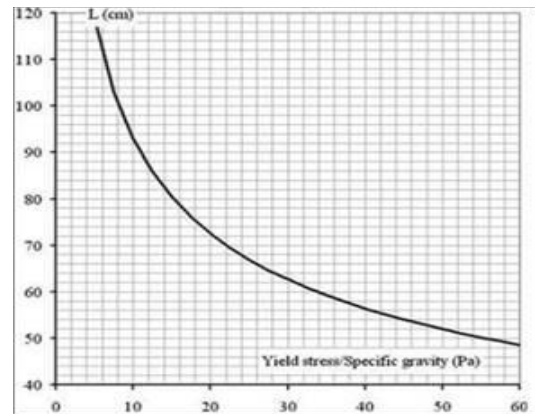


Figure 2. Relation entre longueur d'étalement et seuil de cisaillement [13]

Annexe 3 : Détermination de la viscosité plastique par la relation de Sedran

La relation (1) [8] a été utilisée pour le calcul de la viscosité plastique du matériaux en Pa.S :

$$\mu = \frac{\rho}{1000} (0.0268Sf - 2.39)T_{500} \quad (1)$$

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

SF : l'étalement en (mm),

T₅₀₀ : le temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (S).

Annexe 4 : Paramètre de formulation du logiciel BCN

Les données à introduire au logiciel sont les suivant :

- caractéristiques des granulats (densité absolue, absorption d'eau et les courbes granulométrique), du ciment (densité absolue, classe de resistance et les courbes granulométriques), des additions (densités absolues, l'indice d'activité à 28 et 90 jours et les courbes granulométriques) et enfin de l'adjuvant (extrait sec, teneurs en Cl⁻ et Na⁺ et le dosage à saturation).
- type de béton (BO, BAP etc...)
- choix du rapport G/S .

Comme données de sortie on obtient ainsi la composition du squelette granulaire optimisée.