

**RESUME**

*Dans la région d'Annaba (Algérie), les bouteilles en verre coloré ne sont ni triées ni recyclées. Il faut signaler aussi que dans certains pays comme le Canada, le recyclage des bouteilles en verre coloré n'est pas viable actuellement, son entreposage coûterait moins cher [Oxford Brookes University, 2004]. Cependant, la valorisation du verre à bouteille dans le béton pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, permettant l'élimination de décharges encombrantes et polluantes et sa qualification comme une nouvelle source de matériaux de construction. Sur le plan technique, les verres à bouteille contiennent des quantités importantes d'alcalin pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granulat si le verre est utilisé sous forme granulaire. Par contre, de nombreux auteurs [Chen et al, 2006] conviennent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre. En effet notre travail est une contribution à la valorisation du verre à bouteille sous forme de poudre en remplacement du filler calcaire traditionnellement utilisé comme addition dans les bétons autoplaçants (BAP). Les résultats obtenus montrent un comportement bénéfique de la poudre de verre sur les caractéristiques des bétons autoplaçants aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci pour un dosage allant de 30 à 60 % par rapport à la masse du ciment.*

**MOTS-CLÉS :** Déchets, poudre de verre, Filler calcaire, Additions, Béton autoplaçant.

**ABSTRACT**

*In the region of Annaba (Algeria), the colored glass bottles are not sorted or recycled. It should be noted that in some countries like Canada, the recycling of colored glass bottles is not currently viable; the storage would be cheaper [Oxford Brookes University, 2004]. But, the valorization of glass bottles in the concrete could constitute an interesting ecological and economical alternative, allowing the removal of bulky waste and pollutants and their qualification as a new source of building materials. Technically, glass bottles contain significant amounts of alkalis that can cause detrimental effects to concrete in relation to alkali-silica or alkali-aggregate reaction if the glass is used in coarse form. In the other hand, many authors [Chen et al, 2006] agree that the glass causes a beneficial behaviour associated with the pozzolanic reaction when used in powder form. Indeed, our work is a contribution to the valorization of powder glass bottles for substituting the limestone filler traditionally used as an addition in self compacting concrete (SCC). The results obtained show a beneficial behaviour of glass powder on the characteristics, of fresh and hardened self-compacting concrete to a dosage of 30 to 60% compared to the mass of cement.*

**KEYWORDS :** Waste, Powder of glass bottles, additions, formulation, Self Compacting Concrete

# Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants

**BEHIM Mourad et ALI BOUCETTA Tahar**

Laboratoire Matériaux, Géo – Matériaux et Environnement - Université BADJI MOKHTAR Annaba BP 12, 23000 Annaba – Algérie (Département de Génie Civil)

Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : [mbehim@yahoo.fr](mailto:mbehim@yahoo.fr)

## I. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité et se mettent 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. 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 par une exothermicité importante, 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. De nombreuses études ont montré les effets favorables des additions minérales fines sur les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais [Nehdi et al, 2000] et à l'état durci [El Barak, 2005], notamment les fillers calcaires qui sont les plus utilisées. Cependant, l'influence des additions minérales sur la fluidité des bétons autoplaçants est fonction du dosage, du type, de la finesse et de la forme des particules [Zhang et al, 2000].

En effet, peu d'études ont été conduites sur le verre à bouteille comme addition fine aux bétons autoplaçants. Dans certains pays, comme le Canada par exemple, qui dispose de circuit de tri et de récupération, ce qui n'est pas le cas de l'Algérie, le recyclage du verre à bouteille coloré n'est pas viable, car son entreposage coûterait moins cher [Oxford Brookes University, 2004]. La valorisation du verre à bouteille coloré dans les bétons autoplaçants pourrait constituer une alternative intéressante, aussi sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. Cependant, sur le plan technique les verres à bouteilles contiennent des quantités importantes d'alcalins pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granat.

Par contre, de nombreux auteurs [Chen et al, 2006] conviennent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre. Ainsi, notre travail est une contribution à la valorisation du verre à bouteille sous forme de poudre comme substituant au filler calcaire traditionnellement utilisé comme addition dans les bétons autoplaçants.

## 2. Matériaux et méthodes expérimentales

### 2.1 Matériaux

#### 2.1.1 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  $3480 \text{ cm}^2 / \text{g}$  et de composition minéralogique : C3S = 58,2, C2S = 18,5, C3A = 9,3 et C4AF = 8,2. (%).

#### 2.1.2 Les additions

- Le filler calcaire

Les fillers calcaires proviennent de carrières de la région d'Annaba. Ils sont obtenus par le broyage fin de résidus de production de granulats pour béton. Les fillers calcaires sont composés essentiellement de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). L'analyse aux rayons X est présentée sur la figure 1

- Verre à bouteille

La poudre de verre est obtenue par récupération, nettoyage et broyage de bouteilles colorées dans les décharges sauvages. L'analyse aux rayons X est présentée sur la figure 2, elle montre un matériau essentiellement vitreux. Outre la fraction vitreuse, le verre présente une faible quantité de fer.

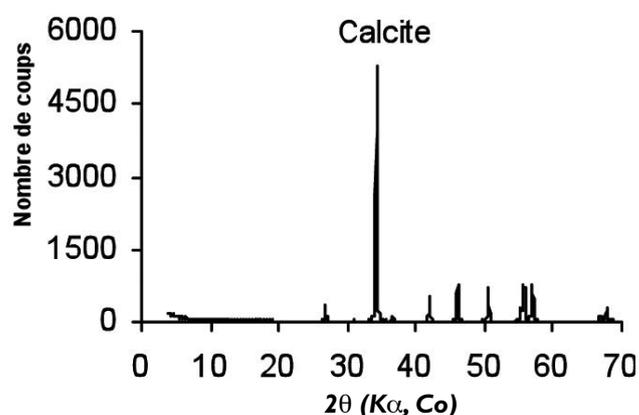
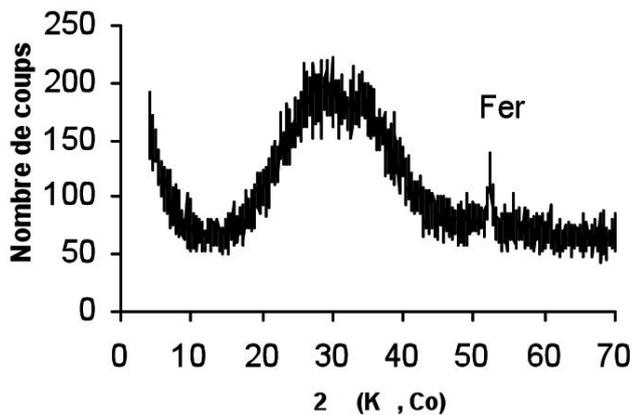


Figure 1 : Diffractogramme du filler calcaire



**Figure 2 : Diffractogramme du verre à bouteille**

- Caractéristiques chimiques et physiques des additions  
A coté des éléments dominants tels que la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et la chaux ( $\text{CaO}$ ) d'autres éléments composent le verre. On note en particulier la présence de l'oxyde de fer et une teneur en oxyde de sodium relativement faible par rapport aux données bibliographiques [ProGeCo, 2012] qui est de l'ordre 13%. Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques des additions sont données au tableau 1.

### 2.1.3 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 2.

### 2.1.4 Le superplastifiant (sp)

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant à base de polycarboxylates modifiés, de masse volumique 1110  $\text{kg/m}^3$ . Le  $\text{pH} = 5 \pm 1$ , la teneur en ions chlore  $\leq 0,1\%$ , la teneur 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 liant.

**Tableau 1 : Compositions chimiques et finesses des additions**

	Composition chimique, %									Densité $\text{Kg/m}^3$	Finesse Blaine	Refus tamis -63 $\mu\text{m}$ ,	
	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{MnO}$	S	PAF				
FC	0,31	55,26	0,50	0,08	0,14	0,01	0,10	0,02	42,5	$\rho_{\text{abs}}$ 2632	$\rho_{\text{app}}$ 857	$\text{cm}^2/\text{g}$ 7360	% 3,2
PV	70,25	16,12	1,32	2,32	4,08	1,60	0,65	-	0,20	2270	795	5661	4,5

## 2.2 Méthodes expérimentales

Dans le but de vérifier, de comprendre et d'expliquer les effets de la poudre de verre sur les propriétés du béton, un béton autoplaçant de référence (BAPR) sans addition a été formulé en se basant uniquement sur les critères recommandés par l'AFGC [AFGC, 2008]. Avec comme base de cette composition de référence, six bétons autoplaçants ont été formulés en introduisant le filler calcaire (C) et la poudre de verre (V) à des taux de 30, 45 et 60 % par rapport à la masse du ciment. Les bétons autoplaçants formulés doivent satisfaire plusieurs tests normalisés [EN 206-9] qui permettent de caractériser les principales propriétés des BAP à l'état frais :

- Mobilité en milieu non confiné, caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (SF) et le temps d'étalement pour un diamètre de 500 mm ( $T_{500}$ ),
- Aptitude à l'écoulement, caractérisée par le taux de remplissage dans la boîte en L (PL),
- la résistance à la ségrégation exprimée par l'essai de stabilité au tamis (SR).

Nous avons aussi choisi deux autres essais comme paramètres rhéologiques : la viscosité ( $\mu$ ) selon le modèle de Sedran [Sedran, 1999] et le seuil de cisaillement  $\tau$  selon la méthode de la boîte LCPC [Roussel, 2007].

### 2.2.1 Essais sur bétons autoplaçants à l'état frais

Les essais de caractérisation ont été effectués selon les procédures décrites par les normes [EN 12350 – 8, 10 et 11, 2010] les valeurs limites sont données par la Norme Européenne [EN 206-9].

- Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow, sf) et le  $T_{500}$ . L'essai d'étalement et la mesure du temps  $T_{500}$  constituent un essai destiné à évaluer la mobilité et la vitesse d'écoulement du béton autoplaçant en l'absence d'obstacle. Le béton frais est déversé dans le cône d'Abrams. On soulève le cône vers le haut et le temps  $T_{500}$  est donné par la durée qui s'écoule entre le début du mouvement ascendant du cône et le moment où le béton atteint un diamètre de 500 mm.

**Tableau 2 : Caractéristiques des granulats**

Caractéristiques	Unités	Sable roulés	Sable concassé	Gravillon	Gravier
Masse volumique apparente	Kg /m <sup>3</sup>	1440	1375	1340	1370
Masse volumique absolue	Kg /m <sup>3</sup>	2645	2587	2500	2540
d/D	-	0/0,5	0,5/5	3/8	5/15
Module de finesse	-	1.43	3.97	-	-

**Tableau 3 : Valeurs préconisées par les normes**

Essais	Étalement (SF), cm		Stabilité au tamis (SR), %		Boite en L PL = (H <sub>1</sub> / H <sub>2</sub> )		T <sub>500</sub> , Secondes	
	SF 1	SF 2	SR 1	SR 2	PL 1	PL 2	VS 1	VS 2
Classes	550 - 650	650 - 750	≤ 20	≤ 15	≥ 0,8 <sup>a</sup>	≥ 0,8 <sup>b</sup>	< 2	≥ 2

a - Deux armatures

b - Trois armatures

Le plus grand diamètre d'étalement du béton et le diamètre perpendiculaire sont mesurés pour calculer le diamètre moyen.

- Essai de stabilité au tamis (résistance à la ségrégation, SR)  
L'essai de stabilité au tamis permet d'évaluer la résistance du béton autoplaçant à la ségrégation. Après prélèvement d'un échantillon de 10 litres de béton, il est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser  $4,8 \pm 0,2$  kg de l'échantillon sur un tamis d'ouverture 5 mm. Après 2 minutes d'attente, on détermine le pourcentage de laitance qui est passé au travers du tamis.

- L'essai de boite en L (taux de remplissage  $PL = H_2/H_1$ )  
Cet essai permet d'évaluer l'aptitude à l'écoulement du béton autoplaçant au travers des zones confinées notamment les espaces entre les barres d'armature et autres inserts, sans aucune ségrégation ou aucun blocage. Un volume donné de béton frais s'écoule horizontalement à travers les espaces entre deux ou trois barres d'armature lisses verticales. Les hauteurs du niveau de béton dans la partie verticale (H<sub>1</sub>) et à l'extrémité de la partie horizontale (H<sub>2</sub>), sont mesurées et le rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> constitue une mesure de la capacité d'écoulement ou de blocage du béton autoplaçant.

- Seuil d'écoulement

L'essai de la boite LCPC permet d'évaluer le seuil de cisaillement  $\tau$  [Roussel, 2007]. Cette méthode s'appuie sur la mesure de la longueur d'étalement L du béton autoplaçant dans une boite de longueur 120 cm. Après l'arrêt de l'écoulement, la longueur d'étalement mesurée dans la boite permet de calculer le seuil de cisaillement du béton à partir de l'abaque donné par [Roussel, 2007].

- Viscosité plastique

Les corrélations rhéologie - ouvrabilité les plus pertinentes sont celles reliant la viscosité au T<sub>500</sub>. En effet la relation (1) (Sedran, 1999) qui souligne cette corrélation a été utilisée pour le calcul de la viscosité.

$$\mu = \frac{\rho}{1000} (0,0268 Sf - 2,39) T_{500} (1)$$

$\mu$  : la viscosité plastique du matériau en (Pa.s),

$\rho$  : la masse volumique du béton (Kg/m<sup>3</sup>),

SF : l'étalement en (mm),

T<sub>500</sub> : le temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (seconde).

- Caractérisation des bétons durcis

Afin de vérifier la résistance mécanique des bétons autoplaçants,

**Tableau 4 : Compositions des bétons autoplaçants avec additions**

		BAPR	BAPC			BAPV		
	%	0	30	45	60	30	45	60
Filler	Kg/m <sup>3</sup>	0	105	157,5	210	105	157,5	210
Ciment	Kg/m <sup>3</sup>	350	350	350	350	350	350	350
Eau	Kg/m <sup>3</sup>	200	200	200	200	200	200	200
E / C	-	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
E / L	-	0,57	0,43	0,39	0,35	0,43	0,39	0,35
S 0/0,5	Kg/m <sup>3</sup>	495	471	460	448	471	460	448
S 0,5/5	Kg/m <sup>3</sup>	249	237	231	225	237	231	225
G 3/8	Kg/m <sup>3</sup>	416	396	387	377	396	387	377
G 5/15	Kg/m <sup>3</sup>	499	475	463	451	475	463	451
G / S	-	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
SP	Kg/m <sup>3</sup>	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
Volume de pâte	l/m <sup>3</sup>	322	394	363	383	402	369	392

BAPR – Béton autoplaçant de référence

BAPC – Béton autoplaçant avec addition de filler calcaire

BAPV – Béton autoplaçant avec addition de poudre de verre

nous avons utilisé des éprouvettes cubiques (10.10.10) cm<sup>3</sup> pour la compression à 2, 7 et 28 jours. Les éprouvettes ont été 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 – 1, 2001].

- Analyse aux rayons x par diffraction sur les poudres de verre et de filler calcaire

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

### 3. Formulation des BAP

La plupart des formulations des bétons autoplaçants sont conçues actuellement de manière empirique [AFGC, 2008]. Cependant, on doit concilier deux caractéristiques a priori contradictoires : la fluidité et la ségrégation. A cet effet, un béton autoplaçant de référence a été formulé sans aucune addition (BAPR) en s'appuyant sur les critères recommandés par l'AFGC [AFGC, 2008] et en visant un diamètre d'étalement compris entre 600 et 750 mm. 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 / m<sup>3</sup>, au dosage en

ciment qui se situe entre 300 et 350 kg / m<sup>3</sup>. Les bétons d'étude ont été ensuite formulés en introduisant les additions avec des dosages de 30, 45 et 60 % par rapport à la masse du ciment. Les compositions des bétons autoplaçants d'étude sont données dans le tableau 4.

## 4. Discussions des résultats obtenus sur béton frais

### 4.1 Etalement (slump flow)

L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre 55 et 85 cm selon la Norme européenne [EN 206-9]. Les résultats obtenus et présentés sur la figure 3 montrent que tous les bétons ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des bétons autoplaçants. L'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur état (inerte ou actif) [Zhang, 2000]. 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 [Yahia, 2005]. 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. Ainsi les fillers calcaires améliorent légèrement l'étalement (72 cm pour le BAPC 60), alors que la poudre de verre influence peu l'étalement. En effet, certaines additions comme le verre potentiellement pouzzolanique, ont une demande en eau importante par rapport au filler calcaire chimiquement inerte, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton.

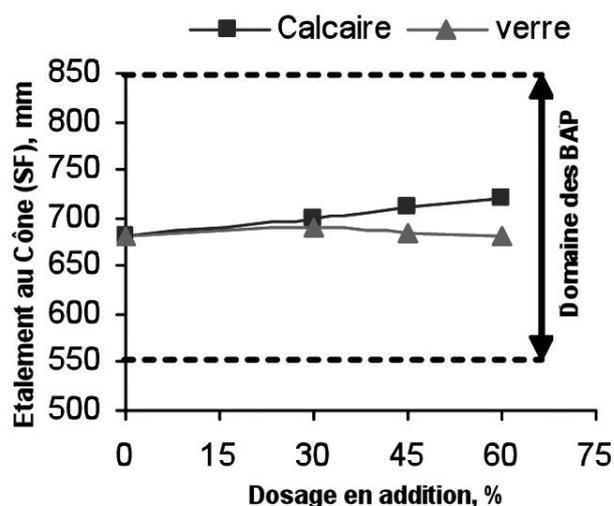


Figure 3 : Influence du dosage en addition sur l'étalement au Cône d'Abrams (Slump flow)

### 4.2 Stabilité au tamis

Le béton autoplaçant de référence (BAPR) sans aucune addition est le seul mélange qui présente un risque de ségrégation statique. En effet la quantité de laitance (SR = 18 %) présentée sur la figure 4 est importante. D'ailleurs c'est le mélange le moins riche en pâte (Vpâte = 317 litres, tableau 5). Il présente une stabilité critique selon [AFGC, 2008], (tableau 5), d'où l'importance du volume de pâte et le rôle des additions pour limiter les risques de ségrégation et de ressuage [Sedran, 1999].

Tableau 5 : Critères de stabilité

Conditions	Stabilité	Remarques
0 % < SR < 15 %	satisfaisante	Béton homogène et stable
15 % < SR < 30 %	critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
SR ≥ 30 %	très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

La poudre de verre améliore la stabilité du béton autoplaçant au même titre que le filler calcaire. Cependant l'augmentation du volume de pâte au-delà d'une certaine quantité peut entraîner une résistance à la ségrégation trop importante : le mortier devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis et peut causer une mauvaise qualité de parement.

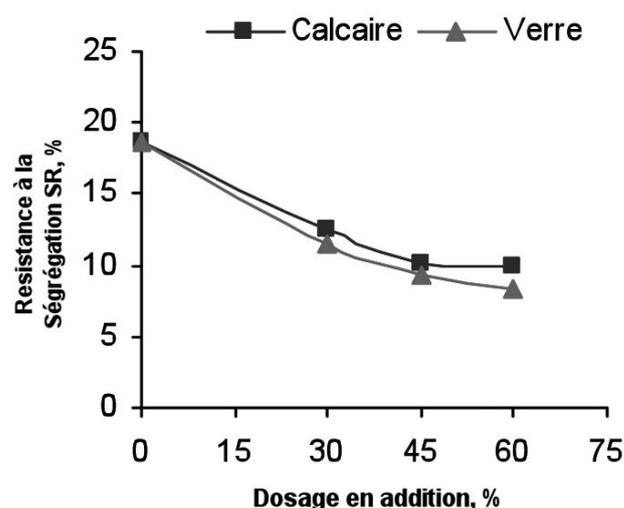


Figure 4 : Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis

### 4.3 Essai de la boîte en L

Les résultats obtenus par l'essai de la boîte en L sont présentés sur la figure 5. Tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des bétons autoplaçants, excepté le béton autoplaçant de référence (BAPR) qui est formulé sans aucune addition.

Ce qui confirme l'intérêt d'augmenter le volume de pâte par l'addition de fine dans la composition des bétons autoplaçants. On note un taux optimal d'addition de l'ordre de 30% aussi bien pour le filler calcaire que pour la poudre de verre, garantissant le meilleur taux de remplissage. L'augmentation du dosage en additions entraîne une diminution rapide du taux de remplissage mais reste supérieur à 0,8, valeur limite définie par la norme [EN 206-9].

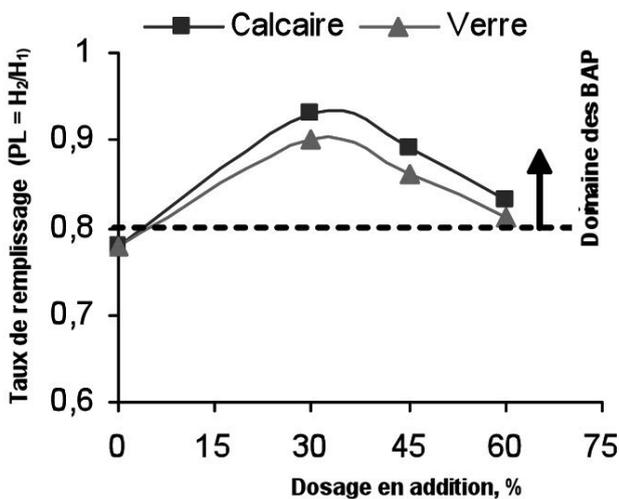


Figure 5 : Influence du dosage des additions sur l'écoulement (L - BOX)

### 4.4. Seuil d'écoulement

Les résultats obtenus et présentés sur la figure 6, montrent qu'avec l'augmentation des dosages en addition, le seuil de cisaillement augmente aussi, ceci résultant de l'augmentation de la viscosité. Le seuil de cisaillement ne devrait pas dépasser une certaine limite qui pourrait se traduire par une résistance à la ségrégation entraînant le blocage des gros granulats par raidissement de la pâte. On peut noter à cet effet que la poudre de verre a un effet densifiant pour tous les dosages, corroborant ainsi les résultats obtenus par les essais précédents.

### 4.5 Viscosité

Les corrélations rhéologie - ouvrabilité les plus pertinentes sont celles reliant la viscosité au T<sub>500</sub>. En effet la relation<sup>(1)</sup> [Sedran, 1999] qui souligne la corrélation entre la viscosité et la mesure du temps d'étalement T<sub>500</sub> a été utilisée pour

le calcul de la viscosité. Le temps d'étalement pour atteindre le diamètre de 500 mm augmente avec l'augmentation du dosage en addition et en particulier pour la poudre de verre (figure 7a).

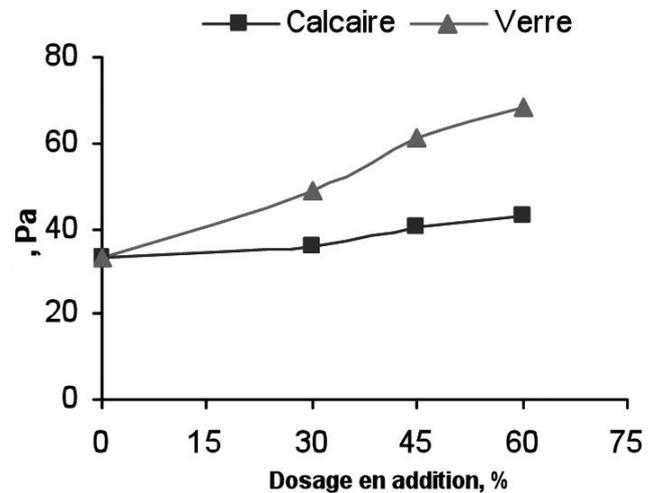


Figure 6 : Effet des additions sur le seuil de cisaillement

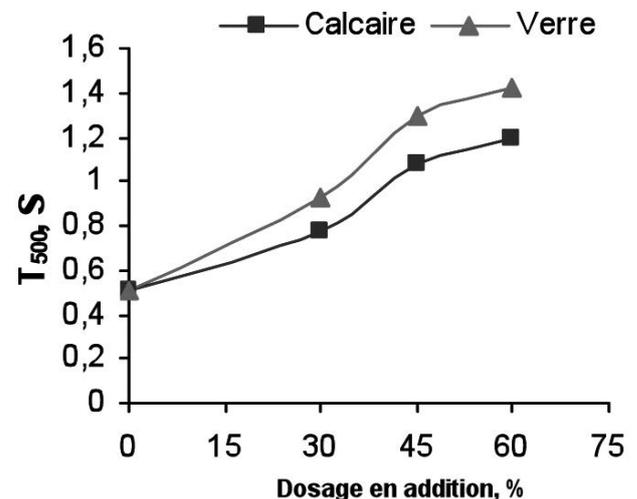


Figure 7a : Effet des additions sur le T<sub>500</sub>

L'écoulement du béton autoplaçant de référence BAPR à faible viscosité est très rapide au départ puis s'interrompt, alors que les bétons autoplaçants avec addition de filler calcaire (BAPC) et poudre de verre (BAPV) à viscosité croissante (figure 7b) en relation avec le dosage des poudres de calcaire et de verre continuent de s'étaler lentement pendant une durée plus longue.

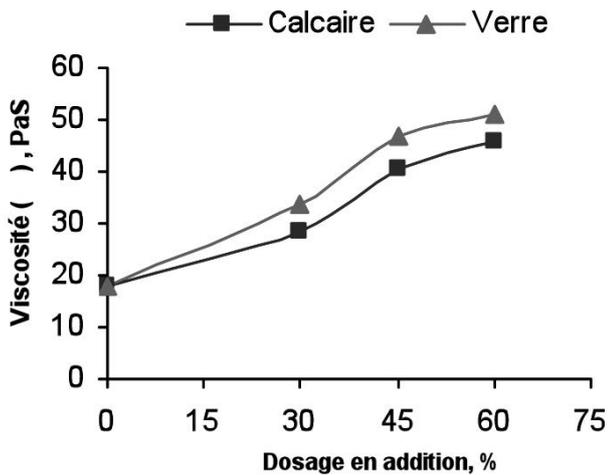


Figure 7b : Effet des additions sur la viscosité des BAP

## 5. Discussion des résultats obtenus sur béton durci

Les résultats obtenus et présentés sur les figures 8a, 8b et 8c montrent les résistances mécaniques en compression développées par le béton autoplaçant avec addition de filler calcaire (BAPC) à 2 et 7 jours, légèrement supérieures à celles du béton autoplaçant avec addition de poudre de verre (BAPV) traduisant l'effet de remplissage du filler calcaire plus fin, donc plus important que la poudre de verre. Cependant, le béton autoplaçant avec addition de poudre de verre (BAPV) développe, rattrape et dépasse les résistances du béton autoplaçant avec addition de filler calcaire (BAPC) au-delà de 7 jours, vraisemblablement par effet pouzzolanique.

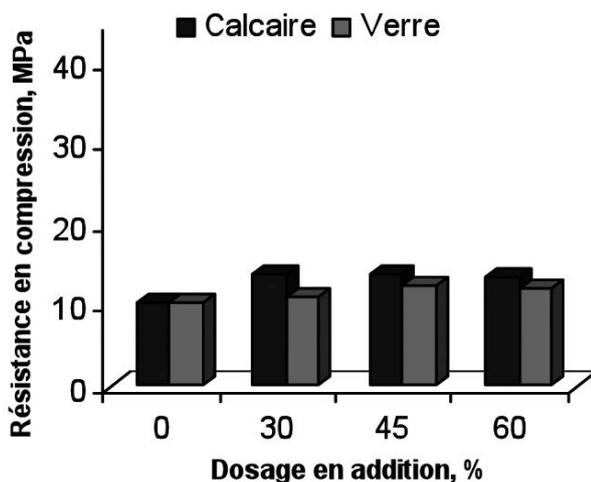


Figure 8a : Influence du dosage des additions sur la résistance en compression à 2 jours

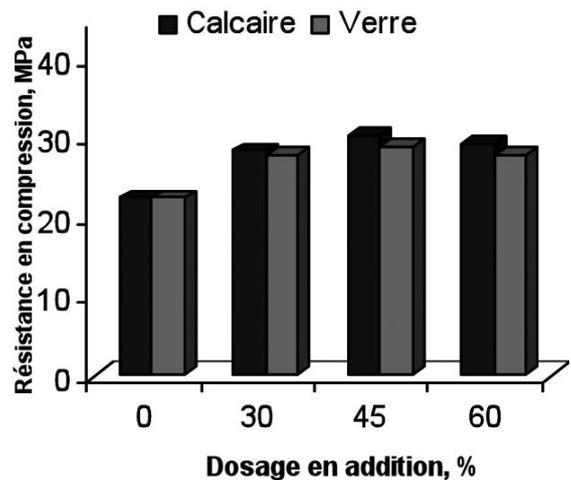


Figure 8b : Influence du dosage des additions sur la résistance

Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à rapport E/C équivalent [Assié, 2004]. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et améliore les résistances mécaniques des bétons [Billberg, 2001] au jeune âge par effet physique principalement et par effet chimique lorsqu'elles sont chimiquement réactives ou pouzzolaniques, à plus longues échéances [Behim, 2011]. Cette amélioration des résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de l'addition. L'introduction du verre à bouteille dans le béton autoplaçant génère donc un gain de résistance par rapport au béton autoplaçant de référence (BAPR) par effet de remplissage, mais aussi par rapport au béton autoplaçant avec addition de filler calcaire (BAPC) par effet pouzzolanique.

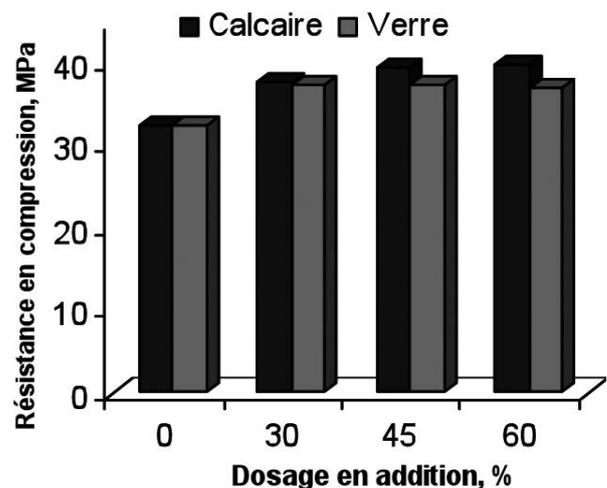


Figure 8c: Influence du dosage des additions sur la résistance en compression à 28 jours

## 6. Conclusion

Les résultats obtenus ont montré l'intérêt de substituer dans les bétons autoplaçants le filler calcaire par la poudre de verre à bouteille dans les mêmes proportions de 30 à 60 % par rapport à la masse du ciment, induisant des intérêts techniques et des avantages environnementaux potentiels.

L'écoulement des bétons autoplaçants peut être obtenu par l'emploi de superplastifiant comme pour le béton autoplaçant de référence (BAPR) alors que pour rétablir un niveau de viscosité convenable, l'emploi d'additions fines est parfaitement justifié. L'addition peut avoir des effets aussi bien sur le béton frais par l'amélioration de la stabilité et l'élimination des risques de ségrégation en relation avec le dosage, que sur le béton durci par l'augmentation des résistances mécaniques. En effet, par rapport aux bétons autoplaçants de référence (BAPR) et avec addition de filler calcaire (BAPC), le gain de résistance généré par l'ajout de la poudre de verre par effet de remplissage et par effet pouzzolanique (donc par la fixation de la Portlandite générée par l'hydratation des minéraux du ciment), constitue une propriété de durabilité qui permet d'envisager la valorisation du verre à bouteille dans les bétons autoplaçants. Il est toutefois nécessaire de valider le caractère durable de la valorisation de la poudre de verre dans les matériaux à matrice cimentaire par d'autres travaux.

## Références bibliographiques

ASSOCIATION FRANÇAISE DU GENIE CIVIL. Les BAP : recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons autoplaçants, 2008, 63 p.

ASSIE S. Durabilité des bétons autoplaçants. Thèse LMDC. Toulouse : INSA de Toulouse, 2004, 249 p.

BEHIM M., CYR M., et CLASTRES P. Physical and chemical effects of El Hadjar slag used as an additive in cement-based materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 15/10, 2011, pp 1413-1432.

BILLBERG P. Proceedings of 2nd Inter Conf on SCC, Japan, 2001, pp 285-294 et 23-25.

CHEN C.H., HUANG R., WU J.K., et YANG C.C. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, *Cement and Concrete Research*. 2006, vol. 36, n°3, pp 449-456.

EL BARAK M. Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des BAP à l'état frais. Thèse LMDC. Toulouse : INSA de Toulouse, 2005, 228 p.

AFNOR. Béton: partie 9 – Règles complémentaires pour le béton autoplaçant. NF EN 206 – 9. Paris : AFNOR, 2010, 26 p.

AFNOR. Essai pour béton frais, Partie : Béton autoplaçant – essai d'étalement au cône d'Abrams. NF EN 12350 – 8. Paris : AFNOR, 2010, 8 p

AFNOR. Essai pour béton frais, Partie : Béton autoplaçant – essai de stabilité au tamis. NF EN 12350 – 10. Paris : AFNOR, 2010, 9 p

AFNOR. Essai pour béton frais, Partie : Béton autoplaçant – essai à la boîte en L. NF EN 12350 – 11. Paris : AFNOR, 2010, 7 p

PROGECO. Recyclage du verre, fiche N° 14. (consulté le 14.02.2012).

GRÜNEWALD S., ET WALRAVEN J.C. Proceedings of the Third International Symposium on SCC. Island, 2003, pp 49-58.

NEHDIM., RAHMAN M. Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30/ 10: pp 1663-1669.

ROUSSEL N. The LCPC Box cheap and simple technique for yield stress measurement of SSC. *Materials and structures*, 2007, vol. 40, pp 889 – 896.

SEDRAN T. Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons auto-nivelant. Thèse ENPC. Paris. 1999, 220 p.

YAHIA A., TANIMURA M., SHIMOYAMA Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler: effect of powder content and W/C ratio. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35/3, pp 532-539.

ZHANG X., HAN J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cement and Concrete Research*. 2000, vol. 30/5, pp 827-830.