

## Caractérisation d'un béton autoplaçant avec addition de laitier cristallisé et renforcé par des fibres de polypropylène et de diss

### Characterization of a self-compacting concrete with addition of crystallized slag and reinforced with polypropylene and diss fibers

Walid Laifa<sup>1\*</sup>, Mourad Behim<sup>1</sup>, Anaclet Turatsinze<sup>2</sup> & Tahar Ali-Boucetta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Matériaux, Géo – Matériaux et Environnement, Département de génie Civil – Université Badji Mokhtar Annaba 23000– BP 12 - Annaba – Algérie.

<sup>2</sup> Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA – Université Paul Sabatier, 135 Avenue du rangueil Toulouse- France.

Soumis le : 20.01.2014

Révisé le : 14.07.2014

Accepté le : 17.09.2014

#### ملخص

تسليح الخرسانة بواسطة ألياف معدنية أو تركيبية أو نظام هجين أمر طبيعي. ولكن الألياف قد تقلل من الطاقة المتدفقة للخرسانة ذاتية القولبة خاصة عند استعمال الألياف النباتية التي يمكننا أن نتوقع خسارة كبيرة من فاعليتها. في الواقع تتميز الألياف النباتية بقدرة كبيرة على امتصاص الماء ، وألياف الديدس ليست ملساء مثل الألياف مادة البولي بروبيلين ، ولكنها تحتوي على اشواك خشنة. هذا السطح له تأثيرات متناقضة، ويقلل من تدفق الخرسانة الطازجة من ناحية لكنه يزيد من الالتصاق بين الألياف ومصروفة أسمنتية من جهة أخرى. مهمتنا هي تسليط الضوء على هذه الآثار وتحسين كميات ألياف الديدس مقارنة بالألياف البولي بروبيلين و ذلك بدراسة الخرسانة ذاتية القولبة في الحالة المائعة والحالة الصلبة. تظهر النتائج في الواقع انخفاض في خصائص الخرسانة ذاتية القولبة خاصة في الحالة المائعة وتحسين القوة الميكانيكية في الشد والانحناء للخرسانة مع الألياف النباتية. هذه الأخيرة تأخر أيضا تشقق الخرسانة بسبب الانكماش.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة ذاتية القولبة- الألياف النباتية - ألياف مادة البولي بروبيلين- إضافات- تدفق.

#### Résumé

Le renforcement du béton par les fibres métalliques, synthétiques ou un système hybride, est une démarche classique. Cependant pour le béton autoplaçant (BAP), l'utilisation de fibres peut affecter la capacité d'écoulement du matériau en particulier lorsqu'il s'agit de fibres végétales, on peut s'attendre à une perte d'ouvrabilité. En effet, les fibres végétales se caractérisent par un pouvoir d'absorption d'eau important et leur contour n'est pas lisse comme celui des fibres de polypropylène, il présente généralement des aspérités et une rugosité. Cet état de surface a des effets contradictoires : il entraîne une légère diminution de la fluidité du béton d'une part et améliore l'ancrage de la fibre dans la matrice cimentaire d'autre part. Dans cette étude, deux types de fibres ont été utilisés : une fibre de polypropylène comme matériau de référence et une fibre naturelle (fibre de diss) comme matériau d'étude. Notre travail a consisté à mettre en évidence les effets de ces fibres sur le comportement à l'état frais (étalement, taux de remplissage et stabilité au tamis) et le comportement à l'état durci (essai de traction par flexion, de compression et de retrait empêché) des BAP. Les résultats obtenus montrent que les fibres affectent les caractéristiques des BAP à l'état frais, notamment l'écoulement mais permettent d'améliorer sa résistance en traction par flexion. Les fibres de diss retardent aussi la fissuration des bétons.

**Mots clés:** Bétons autoplaçants - Fibre végétale - Fibre de polypropylène – Additions - Ecoulement.

#### Abstract

Concrete reinforcement by steel fibers, a synthetic or hybrid fiber is usual. However, for self compacting concrete (SSC) the fiber-reinforcement can decrease the workability. This is particularly true for polypropylene or vegetable fibers for which a significant loss of workability is expected due to the roughness of their surface. Such a surface state has contradictory effects on the material properties: on one hand, it reduces the flow of fresh concrete and on the other hand, it improves the bond between the fibers and the hardened cement matrix. In this paper, two types of fibers were used: natural fibers (Diss fibers) and polypropylene fibers. The contribution focuses on studying the effects of these fibers on both the fresh hard SCC properties and hardened ones (flexural, compression test and restrained shrinkage). Results show a decrease of the fresh SSC characteristics including the flow and an increase of the flexural strength of the hardened SSC reinforced by fibers vegetable fibers also delay cracking of concrete.

**Keywords:** Self compacting concrete - Plant fiber - Polypropylene fiber- Additions- Flow.

\*Auteur correspondant : laifawalid@yahoo.fr

©UBMA - 2014

## 1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité et se mettent en place par gravité sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte [1]. L'utilisation des additions minérales est nécessaire pour obtenir un volume de pâte suffisant. De nombreuses études ont montré les effets favorables des additions minérales sur les propriétés des BAP à l'état frais [2] et à l'état durci [3], notamment les fillers calcaires (FC) qui sont les plus utilisés. Cependant peu d'études ont été menées sur le laitier cristallisé (LC) contrairement au laitier granulé qui est souvent utilisé comme addition dans le béton. L'emploi du laitier cristallisé dans les BAP pourrait constituer une alternative intéressante aussi bien sur le plan environnemental que sur le plan technico-économique. L'utilisation des fibres dans les bétons permet de leur conférer une meilleure résistance à la propagation de la fissuration, de diminuer la fragilité du composite et dans certaines conditions, d'augmenter la résistance mécanique [4] et [5]. S'agissant de fibres végétales, leur introduction dans le béton est restée timide malgré les multiples avantages économiques, écologiques et techniques qu'elles pourraient procurer [6]. Parmi les fibres végétales utilisées, on peut citer le chanvre, la paille, le sisal et le bambou, mais très peu d'études ont été consacrées à la fibre de diss [7]. Le diss (Fig. 1) est une graminée répandue à l'état sauvage principalement dans les montagnes (Est d'Algérie). Localement appelé « diss », son nom scientifique est *Ampelodesmos mauritanicus*. Cette plante était utilisée dans la réalisation d'habitats ruraux anciens en terre armée de diss, pour son abondance mais aussi en raison de ses qualités mécaniques. Le contour de la fibre de diss n'est pas lisse comme celui des fibres de polypropylène. Il présente des aspérités et une importante rugosité. La fibre de diss présente aussi une absorption d'eau très importante et largue des substances ayant pour effet de retarder la prise du ciment [7]. Le but de cette étude est de mettre en évidence l'influence de la fibre de diss sur les caractéristiques des BAP à l'état frais (étalement, taux de remplissage et stabilité au tamis) ainsi qu'à l'état durci (essai de traction par flexion, de compression et de retrait empêché).

©UBMA - 2014

Ces propriétés seront comparées à celles d'un béton renforcé par des fibres polypropylènes et qui servira ainsi de matériau de référence.



a. Plante de diss

b. Tiges de diss

Figure 1. Le diss (El Kala, Algérie)

Ce travail est structuré comme suit : la première partie consiste à formuler un BAP de référence avec addition de filler calcaire (BAPFC) et un BAP d'étude avec substitution du FC par le laitier cristallisé (BAPLC). La formulation des BAP est basée sur les critères recommandés par l'AFGC [1]. Les dosages du FC et du LC sont fixés à 30% par rapport à la masse du ciment. La deuxième partie est consacrée à la formulation des BAP renforcés par les fibres de diss (D) et les fibres de polypropylène (PP).

## 2. MATERIAUX ET METHODES

### 2.1 Matériaux

- Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type CEM II/A de classe 42.5, dont la masse volumique apparente  $\rho_{app}$  est égale à  $1013 \text{ kg/m}^3$  tandis que la masse volumique absolue  $\rho_{abs}$  est égale à  $3060 \text{ kg/m}^3$ . Sa finesse Blaine est de  $3726 \text{ cm}^2/\text{g}$  et sa composition minéralogique est:  $C_3S = 59.66\%$ ,  $C_2S = 16.45\%$ ,  $C_3A = 9.14\%$  et  $C_4AF = 11.02\%$ .
- Le filler calcaire (FC) est composé essentiellement de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) [8]. Il est obtenu par broyage de pierres calcaires récupérées des stations de concassage des granulats pour béton.
- Le laitier cristallisé (LC) est déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau et refroidit à l'air libre ; il se présente sous forme de granulats de 0 à 20 mm après concassage. Le diagramme DRX du laitier cristallisé présenté sur la figure 2, 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 cristallisé.

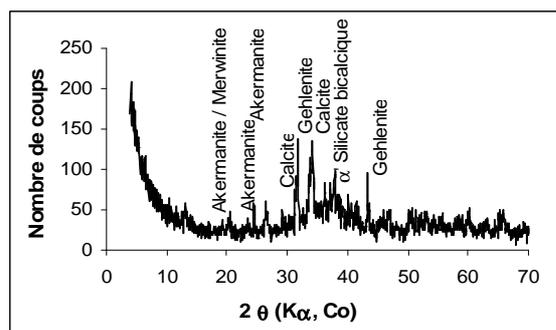


Figure 2. DRX du laitier cristallisé

Les principaux minéraux mis en évidence par DRX sont la Merwinite  $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ , le silicate bicalcique  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , la Gehlénite  $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$  et l'Akermanite  $\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{Si}_2\text{O}_7]$  qui font partie du groupe de la Melilite. L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) des additions a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre Siemens D 5000, utilisant une anticathode de cobalt (Co  $K\alpha$ ,  $\lambda = 1.789 \text{ \AA}$ ), sur

une plage de  $10$  à  $70^\circ$  ( $2\theta$ ) avec un pas d'avancement de  $0.02^\circ$ .

Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques des deux additions sont données dans le tableau 1.

- L'adjuvant employé est un plastifiant - réducteur d'eau (Viscocrete 3045) à base de polycarboxylates modifiés, de masse volumique  $1110 \text{ kg/m}^3$ , de  $\text{pH} = 5 \pm 1$ , de teneur en ions chlore  $\leq 0.1\%$ , de 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 ciment.

- Les sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes. Le premier est un sable roulé de dune, siliceux et fin ; le second 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.

Les courbes granulométriques des granulats sont présentées sur la figure 3.

Tableau 1. Compositions chimiques et caractéristiques physiques des additions

Oxydes (%)	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	PAF	$\rho_{\text{app}} \text{ kg/m}^3$	$\rho_{\text{abs}} \text{ kg/m}^3$	SSB $\text{cm}^2/\text{g}$
FC	55.51	0.11	0.50	0.06	0.20	0.08	0.01	42.5	857	2450	7581
LC	38.55	8.45	35.73	3.20	5.21	0.36	0.95	-	1224	2930	6016

Tableau 2. Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Concassé			
			Sable	Gravillon	Gravier	
Masse volumique apparente	$\text{kg/m}^3$	1358	2540	1425	1390	1370
Masse volumique absolue	$\text{kg/m}^3$	0/1.25		2520	2500	2500
d/D	-	1.65		0/4	4/8	5/15
Module de finesse	-	86		3.67	-	-
Équivalent de sable	%	1.5		89	-	-
Coefficient d'absorption	%	-		2.7	1.4	1.4
Los Angeles	%	-		-	-	28
Coefficient d'aplatissement	%	-		-	-	14.59
Micro Deval	%	-		-	-	12

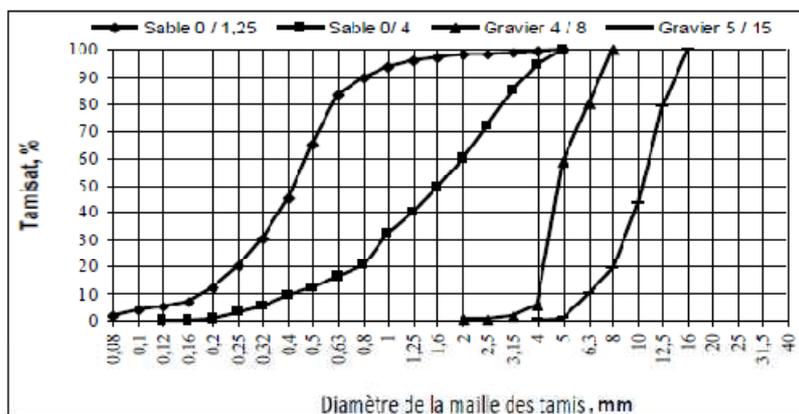


Figure 3. Courbes granulométriques des granulats

- Les fibres : les fibres utilisées dans cette étude sont de deux natures, synthétique de polypropylène et végétale de diss (Fig. 4). L'observation de la fibre de diss au MEB, montre que son contour n'est pas lisse comme celui des fibres de polypropylène, mais présente des aspérités ainsi qu'une remarquable rugosité (Fig. 5). En raison de sa structure poreuse (Fig. 6), la fibre de diss présente une absorption d'eau très importante (Tab. 3). Un essai de

traction directe réalisé sur des échantillons de fibre de diss de longueur 150 mm, de largeur 8 mm et de 0.2 mm d'épaisseur a permis de mettre en évidence une résistance en traction de 100 MPa, ce qui est une performance intéressante pour une fibre d'origine végétale. La figure 7 montre une courbe classique de traction traduisant plutôt un comportement fragile ; la loi de comportement est linéaire.



Figure 4. Fibres de diss après concassage et découpage

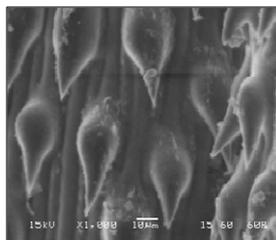


Figure 5. Mise en évidence des épines des fibres de diss après ébullition et broyage

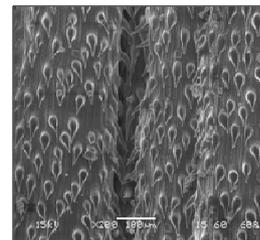


Figure 6. Microstructure de la fibre de diss après broyage

Tableau 3. Caractéristiques des fibres

Type de fibre	Polypropylène	Diss
Longueur, mm	12	12
Section transversale, $\mu\text{m}^2$	30	400000
Densité, $\text{g}/\text{cm}^3$	0.9	1.23
Résistance à la traction, MPa	-	100
Module d'élasticité, MPa	3500	6693
Absorption d'eau, %	Non traitée (à l'état brut)	88.09
	Traitée à l'eau bouillante	82

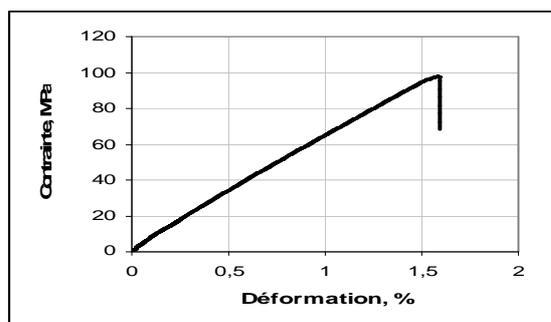


Figure 7. Essai de traction directe: courbe contrainte déformation de la fibre de diss

### 2.1.1 Traitement des fibres de diss

Les études qui ont été conduites sur les fibres de diss [7] montrent qu'il est nécessaire de les traiter avant leur utilisation dans le béton, afin d'éliminer des substances organiques ayant pour effet de retarder la prise du ciment. Ce traitement n'affecte pas la surface de la fibre, il consiste à broyer et à faire bouillir les fibres de diss dans l'eau pendant quatre heures. Elles sont ensuite rincées et séchées avant leur utilisation.

## 2.2 Méthodes

### 2.2.1 Caractérisation des BAP à l'état frais

Les bétons autoplaçants formulés doivent satisfaire plusieurs tests ; aussi, nous avons choisi trois tests normalisés permettant de caractériser leurs principales propriétés à l'état frais : le premier est l'essai d'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 [9]; le second est l'essai de stabilité au tamis selon la norme EN 12350 – 11 [10]; le troisième est l'essai du taux de remplissage dans la boîte en L selon la norme EN 12350 – 10 [11]. Les valeurs recommandées par la norme EN 206 – 9 [12] sont données dans le tableau 4.

Deux autres essais non normalisés, ont été choisis comme paramètres rhéologiques : la viscosité ( $\mu$ ) selon le modèle de Sedran [13] et le seuil de cisaillement ( $\tau$ ) selon la méthode de la boîte LCPC [14] (voir annexes 1 et 2).

### 2.2.2 Caractérisation des bétons durcis

- Résistance en compression et en traction par flexion : trois éprouvettes cubiques ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) ont été utilisées pour les essais de compression. Des éprouvettes prismatiques ( $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ ) ont servi pour la résistance en traction par flexion. Les éprouvettes sont démoulées 24 heures après le coulage et conservées sous l'eau à la température ambiante et testées à 2 et 28 jours.

- Retrait à l'anneau : l'objectif de l'essai de retrait empêché est de suivre le développement de la contrainte de traction dans une éprouvette de béton coulé autour d'un cœur annulaire en acier rigide (Fig. 8) et ce jusqu'à la fissuration du matériau cimentaire.

Tableau 4. Valeurs recommandées par les normes [12]

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 $\leq 20$	PL 1 $\geq 0.8$	VS 1 $< 2$
	SF 2	650 - 750	SR 2 $\leq 15$	PL 2 $\geq 0.8$	VS 2 $\geq 2$
	SF 3	750 - 850	-	-	-



Figure 8. Essai de retrait empêché à l'anneau

L'anneau en acier a pour rôle de bloquer partiellement les variations dimensionnelles du matériau cimentaire ce qui entraîne, en contrepartie, le développement des contraintes de traction et la fissuration [15]. Les éprouvettes annulaires sont démoulées 24 heures après le coulage et conservées dans une salle climatisée à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  et 50% d'humidité relative. Les déformations sont suivies au cours du temps grâce à deux jauges extensométriques, opposées et collées à mi-hauteur suivant le

cercle à l'intérieur du noyau central. Pour cet essai, quatre BAP ont été utilisés : BAP avec addition de filler calcaire sans addition de fibres (BAPFC), renforcé de  $0.6 \text{ kg/m}^3$  de fibre de polypropylène (BAPFCP), renforcé de  $0.8 \text{ kg/m}^3$  de fibre de diss (BAPFCD) et renforcé par un système hybride de fibres (BAP Mixte) qui est composé de  $0.3 \text{ kg/m}^3$  de fibre de polypropylène et de  $0.4 \text{ kg/m}^3$  de fibre de diss.

### 2.3 Formulation des BAP

L'approche de formulation des BAP qui a été utilisée est expérimentale. Elle s'appuie 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  $330 \text{ à } 400 \text{ l/m}^3$ , au dosage en ciment qui se situe entre  $300 \text{ et } 350 \text{ kg/m}^3$ , au dosage d'addition qui doit être compris entre  $120 \text{ et } 200 \text{ kg/m}^3$  et au dosage en superplastifiant qui doit garantir la fluidité du mélange. Les dosages en granulats et l'eau sont estimés à partir de la méthode de Dreux Gorisse, mais les dosages définitifs sont déterminés en apportant les corrections nécessaires sur des gâchées expérimentales. Ainsi, un béton de référence (BAPR) a été formulé sans aucune addition en visant un étalement de  $60 \text{ à } 70 \text{ cm}$ . A partir de la composition du BAPR, nous avons introduit 30% d'additions (filler calcaire ou laitier cristallisé) par rapport à la masse du ciment. Les BAP avec additions ont été renforcés de fibres de polypropylène (PP) et de diss (D). Le dosage en fibre de PP recommandé par le fabricant est  $600 \text{ g/m}^3$  de béton. Dans le but de garder les mêmes taux volumiques de fibres et vu les différences des masses volumiques des fibres de polypropylène et de fibres de diss, le dosage massique de la fibre de diss dans les BAP a été majoré par un coefficient ( $K = 1.37$ ) qui est égal au rapport des masses volumiques des deux types de fibres. Dans cette étude, nous avons utilisé trois différents dosages de fibres (Tab. 5).

Dans une première approche, deux BAP avec addition de 30% de filler calcaire et renforcés

de  $400 \text{ g/m}^3$  de fibre de diss à l'état sec et pré-mouillé ont été testés. Le BAP avec fibres de diss pré-mouillées a donné un étalement de  $68 \text{ cm}$  alors que le BAP avec fibres de diss séchées a donné un étalement de  $63 \text{ cm}$ . Ces résultats nous ont incité à travailler avec la fibre de diss pré-mouillée afin d'éviter une grande diminution de l'étalement. Le pré-mouillage est réalisé par la conservation des fibres de diss sous l'eau pendant 24 heures. Les huit formulations des bétons sont regroupées dans le tableau 6.

## 3. RESULTATS

### 3.1 Etalement et $T_{500}$

L'emploi du laitier cristallisé en remplacement du filler calcaire entraîne une diminution de l'étalement (Fig. 9) indépendamment du taux et de la nature des fibres ; ceci peut être expliqué par le fait que la demande en eau du laitier cristallisé est plus importante que celle du filler calcaire. En effet, des mesures de consistance normale à l'aide de la sonde de Vicat, réalisées sur des pâtes pures de filler calcaire et de laitier cristallisé ont données des rapports (eau/ pâte) respectivement  $E/FC = 0.23$  et  $E/LC = 0.25$ . Le renforcement des BAP par les fibres de PP ou de diss entraîne une diminution de l'étalement qui s'accroît avec l'augmentation du taux de fibres [16], ce qui indique que l'étalement est gêné par les fibres [17]. L'effet des fibres de diss est légèrement moins important que celui des fibres de PP sur l'étalement, car d'une part les fibres de diss sont introduites dans le BAP à l'état saturé d'eau et d'autre part le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss. Les résultats présentés sur la figure 10, montrent que le BAPLC non fibré (taux de fibrage = 0%) a un temps d'étalement  $T_{500}$  plus long que celui du BAPFC. L'introduction des fibres entraîne une augmentation notable des temps d'étalement.

Tableau 5. Taux de fibres utilisé dans les BAP

Fibre	Dosage					
	g	%	g	%	g	%
Polypropylène (PP)	300	0.035	600	0.066	900	0.1
Diss (D)	400	0.035	800	0.066	1200	0.1

Tableau 6. Compositions des BAP avec fibre de polypropylène et fibre de diss

Composant	Unités	BAP							
		Filler calcaire (FC)				Laitier cristallisé (LC)			
		BAPFCP / BAPFCD				BAPLCP / BAPLCD			
		0	1	2	3	0	1	2	3
Fibre PP	kg/m <sup>3</sup>	0	0.3	0.6	0.9	0	0.3	0.6	0.9
PP	%	0	0.035	0.065	0.1	0	0.035	0.065	0.1
Fibre Diss	kg/m <sup>3</sup>	0	0.4	0.8	1.2	0	0.4	0.8	1.2
Diss	%	0	0.035	0.065	0.1	0	0.035	0.065	0.1
FC	kg/m <sup>3</sup>	105	105	105	105	-	-	-	-
LC	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	105	105	105	105
Ciment	kg/m <sup>3</sup>	350	350	350	350	350	350	350	350
Eau	kg/m <sup>3</sup>	175	175	175	175	175	175	175	175
Adjuvant	kg/m <sup>3</sup>	7	7	7	7	7	7	7	7
E/L	-	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
S 0/1,25	kg/m <sup>3</sup>	385	385	385	385	389	389	389	389
S 0/4	kg/m <sup>3</sup>	481	481	481	481	486	486	486	486
G 4/8	kg/m <sup>3</sup>	132	132	132	132	133	133	133	133
G 5/15	kg/m <sup>3</sup>	658	658	658	658	665	665	665	665

BAPFCP – Béton autoplaçant avec filler calcaire et fibre de polypropylène

BAPFCD – Béton autoplaçant avec filler calcaire et fibre de diss

BAPLCP – Béton autoplaçant avec laitier cristallisé et fibre de polypropylène

BAPLCD – Béton autoplaçant avec laitier cristallisé et fibre de diss

L'ouvrabilité des BAP est par conséquent diminuée sous les effets conjugués du laitier cristallisé et des fibres.

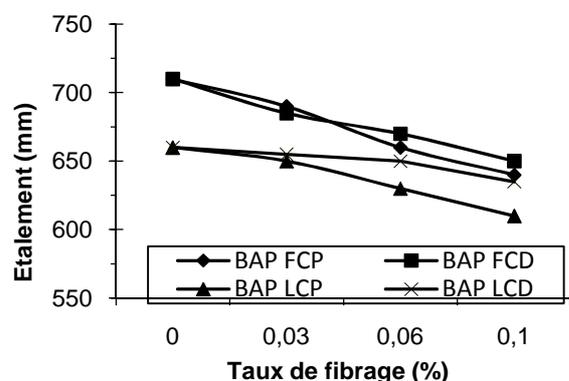


Figure 9. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur l'étalement des BAP

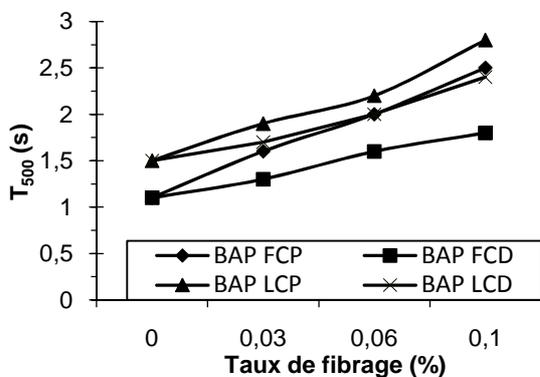


Figure 10. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur le T<sub>500</sub>

### 3.2 Stabilité au tamis

La substitution du FC par le laitier cristallisé entraîne une diminution de la quantité de laitance (Fig. 11), car la demande en eau du LC est supérieure à celle du FC. En effet, des études ont montrées que le laitier de haut fourneau adsorbe le superplastifiant [18]. Cette diminution de la quantité de laitance est accentuée par l'introduction des fibres et, en particulier ; les fibres de PP et passe en dessous de 5% avec un dosage de 900 g/m<sup>3</sup> se traduisant par une résistance à la ségrégation plus importante du matériau. Le béton devient alors trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis, ce qui aura pour conséquence une difficulté d'écoulement et donc de remplissage des coffrages. Les résultats présentés sur la stabilité corroborent les résultats obtenus sur l'étalement.

### 3.3 Taux de remplissage

Le BAP avec addition de LC non fibré donne un taux de remplissage plus faible que celui avec FC mais reste dans le domaine éligible pour des BAP (Fig. 12) ; ceci peut s'expliquer par les différences des demandes en eau des deux additions. L'introduction des fibres dans

les BAP conduit à une diminution du taux de remplissage. Cette diminution est fonction du taux et de la nature des fibres utilisées. Ainsi, les BAP avec addition de FC et renforcés de fibre de PP ou de diss satisfont le critère préconisé par la norme pour tous les dosages en fibres. Cependant, les BAP avec addition de LC et renforcés de fibres de PP ou de diss, ont des taux de remplissage inférieur à 0.8 pour des dosages en fibres supérieurs à 006%.

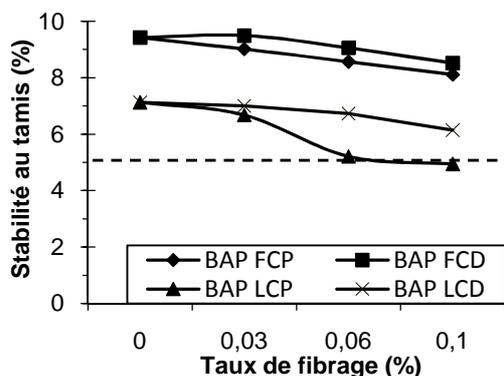


Figure 11. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur la stabilité des BAP

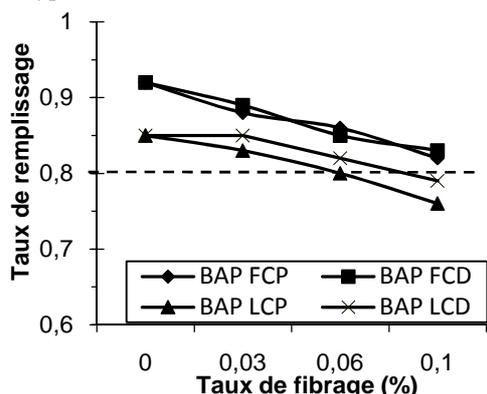


Figure 12. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur le taux de remplissage des BAP.

### 3.4 Viscosité plastique

La viscosité du BAPLC est supérieure à celle du BAPFC (Fig. 13). L'introduction des fibres de PP ou de diss entraîne une augmentation de la viscosité qui est principalement influencée par le taux de fibres et secondairement par leur nature [16]. La viscosité est plus importante pour les BAP renforcés de fibre de PP.

### 3.5 Seuil de cisaillement statique

Les résultats présentés à la figure 14 sur le seuil de cisaillement corroborent les résultats obtenus sur la viscosité. Le BAPLC non fibré a

un seuil de cisaillement supérieur à celui du BAPFC. Le seuil de cisaillement des BAP a

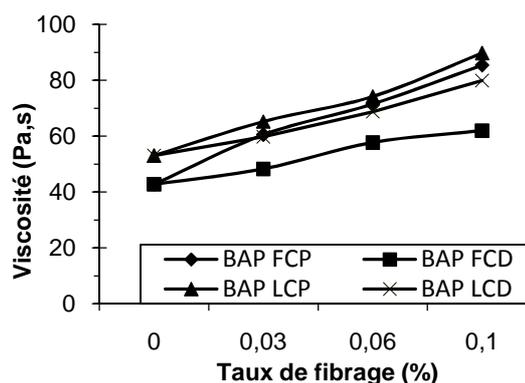


Figure 13. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur la viscosité plastique des BAP.

tendance à augmenter avec l'augmentation du dosage en fibres, quelle que soit la nature de la fibre.

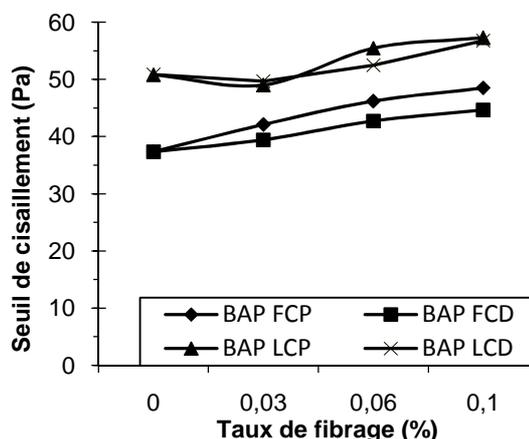


Figure 14. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur le seuil de cisaillement des BAP

### 3.6 Résistance en compression

Les résultats montrent que la substitution du filler calcaire par le laitier cristallisé permet un petit gain de résistance à 28 jours par effet hydraulique (Fig. 16). L'introduction des fibres entraîne globalement une légère diminution des résistances en compression [16]. Cette diminution est plus marquée pour les BAP avec fibre de diss à 2 et 28 jours. La perte de résistance en compression peut être expliquée par le fait que l'introduction des fibres perturbe la compacité du matériau et entraîne la formation d'une porosité supplémentaire, notamment à l'interface fibre - matrice cimentaire surtout pour la fibre de diss qui présente une orientation parallèle à la charge ce qui favorise la fissuration du béton durci.

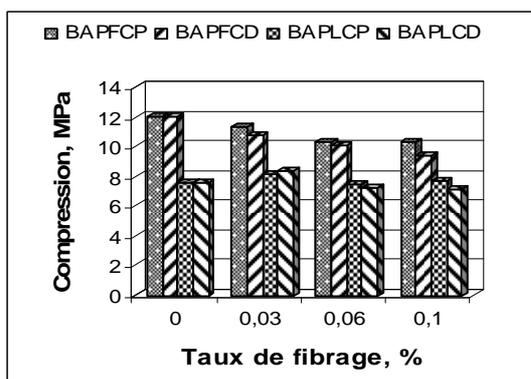


Figure 15. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur la résistance en compression des BAP à 2 jours.

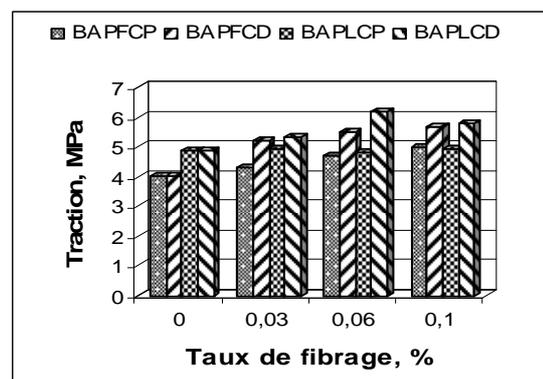


Figure 17. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur la résistance en traction par flexion des BAP à 2 jours

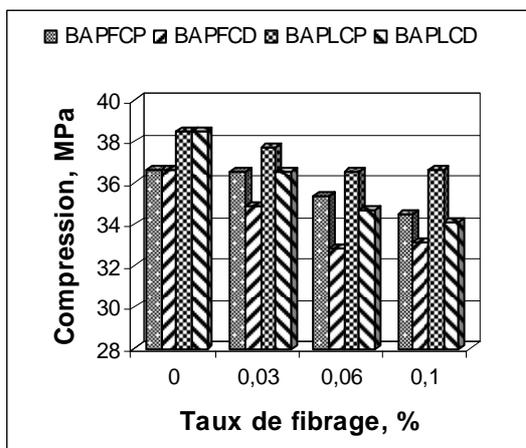


Figure 16. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur la résistance en compression des BAP à 28 jours.

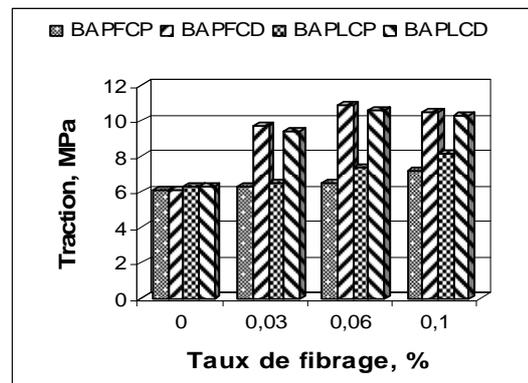


Figure 18. Influence de la nature de l'addition, du type et du taux de fibres sur la résistance en traction par flexion des BAP à 28 jours.

### 3.7 Résistance en traction par flexion

Les résultats des résistances en traction par flexion montrent l'effet bénéfique de l'utilisation des fibres dans le BAP [19] et [20]. Les fibres de diss donnent de meilleures résistances que les fibres de PP. Cela est due à la rugosité de la fibre de diss constituée d'épines qui favorisent l'adhérence avec le matériau cimentaire, en plus la fibre de diss présente une orientation perpendiculaire à la charge ce qui améliore la ductilité du matériau. Il semble qu'il existe un taux volumique optimum de fibres, de l'ordre de 0.06% qui correspond à des dosages massiques de 0.6 kg pour les fibres de PP et 0.8 kg pour les fibres de diss par m<sup>3</sup> de béton (Fig. 17 et 18). C'est sans doute l'une des raisons pour laquelle le dosage recommandé par le fabricant est de 0.6 kg/m<sup>3</sup>. L'effet du laitier cristallisé comme addition substituant le filler calcaire est notable surtout à court terme (2 jours).

©UBMA - 2014

### 3.8 Retrait empêché

La figure 19 montre l'évolution dans le temps de la déformation mesurée sur la surface intérieure de l'anneau en acier. Cette déformation est une conséquence de l'étreinte du béton sur l'anneau métallique. Cette déformation étant ainsi partiellement empêchée il en résulte le développement d'une contrainte de traction en concurrence avec le développement de la résistance du matériau. A une échéance donnée, cette contrainte contrebalance la résistance du matériau et une fissure apparaît. Les résultats montrent que toutes les fibres permettent de diminuer l'étreinte du matériau cimentaire sur l'anneau métallique ceci étant plus remarquable pour les fibres hybrides (0.4 kg/m<sup>3</sup> de diss + 0.3 kg/m<sup>3</sup> de PP). Le BAP renforcé par des fibres de PP exerce une étreinte moins intense que celle induite par un BAP renforcé par des fibres de diss. La diminution soudaine de la déformation (chute supérieure à 30 µm/m) est une conséquence de la fissuration du béton qui entraîne spontanément une relaxation de

l'anneau métallique. Dans ce sens on peut constater que le BAP témoin (BAP FC sans fibres) a une sensibilité à la fissuration en conditions de retrait empêché plus élevée que les autres BAP (fissuration après 12 jours de fabrication). Les fibres de diss et le système hybride de fibres permettent de retarder significativement l'échéance de la fissuration. Dans ces conditions, on peut affirmer que les fibres de diss peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration de retrait des matériaux cimentaires.

#### 4. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons étudié l'influence de deux paramètres (additions minérales et fibres) sur trois caractéristiques d'un béton : son caractère autoplaçant, sa résistance mécanique en traction et sa résistance à la fissuration en conditions de retrait empêché. L'emploi du laitier cristallisé en remplacement du filler calcaire entraîne une diminution de l'ouvrabilité, et impacte peu la résistance aussi bien en compression qu'en traction. Le

renforcement des BAP par les fibres de PP ou de diss entraîne une diminution de l'étalement, un effet qui s'accroît avec l'augmentation du dosage en fibres. Sur cet aspect les fibres de diss sont moins préjudiciables que les fibres de PP sur l'ouvrabilité des BAP, puisque pour un même volume, le nombre de fibres de diss est inférieur à celui de la fibre de PP. Le dosage optimum en fibres (par m<sup>3</sup> de béton) qui a permis d'obtenir les meilleurs résultats de résistance en traction est de 0.6 kg pour les fibres de PP et 0.8 kg pour les fibres de diss. L'amélioration de la résistance en traction par flexion est due probablement à la rugosité de la fibre de diss constituée des épines qui favorisent l'ancrage de la fibre dans le matériau cimentaire combiné avec sa résistance à la traction. Enfin, on notera le potentiel de la fibre de diss à contribuer à diminuer la sensibilité du matériau cimentaire à la fissuration due aux variations dimensionnelles de retrait. Enfin, il serait utile de réaliser des essais de durabilité sur la fibre de diss afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques des bétons.

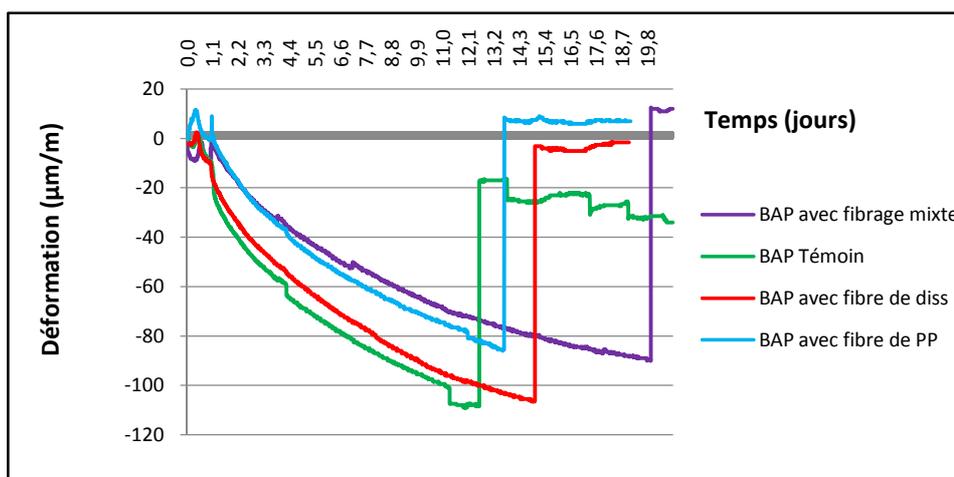


Figure 19. Evolution dans le temps de la déformation de l'anneau métallique sous l'étreinte due aux variations dimensionnelles de retrait du BAP

#### REFERENCES

- [1] Association Française du Génie Civil. Les BAP., 2008. Recommandations provisoires. 63p.
- [2] Nehdi M. & Rahman M., 2000. Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (10), 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, France. 220p.

- [4] Ghavami K., 2005. Bamboo as reinforcement structural concrete elements, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27(6), 637 – 649.
- [5] Toledo Filho R.D., Ghavami K., Sanjan M.A. & England G.L., 2005. Restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27(5), 534-544.
- [6] Savastano Jr. H., Agopyan V., Nolasco A.M. & Lia P., 1999. Reinforced cement components for roofing, *Constructions and Building Materials*, Vol. 13(8), 433 – 438.

[7] Merzoud M, Dheilly R.M, Goullieux A, Queneudec M & Habita M.F., 2008. 'Optimisation of Lignocellulosic Composite formulated with a local resource :The Diss (Ampelodesma mauritanica)', Proceeding of the 7th International Congress, Dundee Scoltand, U.K Edition IHS BRE press, 651-660.

[8] Ali-Boucetta T., Behim M. & Laifa W., 2013. Valorisation du laitier granulé et de la poudre de verre dans les bétons autoplaçants (BAP), Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse 27, 30-39.

[9] NF EN 12350 – 8, Novembre 2010. Partie 8 : Béton autoplaçant – essai d'étalement au cône d'Abrams.

[10] NF EN 12350 – 11, Novembre 2010. Partie 11 : Béton autoplaçant – essai de stabilité au tamis.

[11] NF EN 12350 – 10, Novembre 2010. Partie 10 : Béton autoplaçant – essai à la boîte en L.

[12] NF EN 206 – 9, Juin 2010. Béton: partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.

[13] Sedran T., 1999. Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, Thèse de Doctorat l'ENPC, France. 220p

[14] Roussel N., 2007. The LCPC Box cheap and simple technique for yield stress measurement of SSC, *Materials and structures*, Vol. 40(9), 889-896.

[15] ASTM C 1581 – 04., 2005. Standard test method for determining age of cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage.

[16] El hilali A., Décembre 2009. Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales, Thèse doctorat, université de Cergy Pontoise, France. 118p

[17] Grunewald S. & Walraven J.C., 2001. "Maximum content of steel fibers in self-compacting concrete", Proceeding of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete. Fukui Japan, COMS engineering corporation, 138-146.

[18] Y. Shi., Y. Tanigawa., H. Mori., and Y. Kurokawa., 1998. A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 20, 9-14.

[19] Alcantara M., 2004. Béton autoplaçant et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique, Thèse doctorat, université de Toulouse, France.

[20] Mohamed A S Mohamed., 2011. Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, Thèse doctorat, université de Cergy Pontoise, France. 261p

## ANNEXES

### Annexe 1 : Détermination de la viscosité plastique

La viscosité plastique ( $\mu$ ) est calculée par la relation suivante [13]:

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

$\rho$  : la masse volumique du béton ( $\text{kg/m}^3$ ),

Sf : l'étalement en (mm),

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

### Annexe 2 : Étude du seuil de cisaillement par la boîte LCPC

La boîte LCPC (Fig. 1), conçue par Roussel permet de calculer le seuil de cisaillement du béton [14]. Premièrement, la longueur d'étalement (L) est mesurée à l'aide d'une boîte LCPC de longueur 100 cm et lorsque l'écoulement du béton est arrêté, la longueur d'étalement mesurée dans la boîte permet de calculer le seuil de cisaillement ( $\tau$ ) à partir de l'abaque en dessous (Fig. 2).

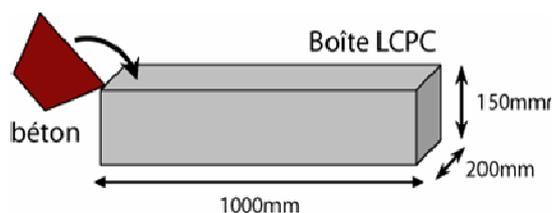


Figure 1. Dispositif de la boîte LCPC

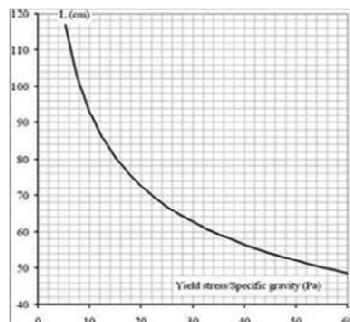


Figure 2. Relation entre la longueur d'étalement et le seuil de cisaillement