

Influence de la nature et du dosage en fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de fillers de laitier granulé

Influence of fiber type and volume contents on the physical and mechanical behaviour of sandcrete with blast furnace slag fillers

Saloua Melais*, Fatma Zohra Melais & Djamel Achoura.

Laboratoire Matériaux, Géomatériaux et Environnement, Département de Génie Civil,
Université Badji-Mokhtar Annaba, BP 12, 23000 Annaba, Algérie.

Soumis le : 09.04.2014

Révisé le 20.12.2014

Accepté le : 07.01.2015

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد تأثير مقدار ألياف البوليبروبيلان و الألياف المعدنية على خصائص الخرسانة اللينة و على الخصائص الفيزيوية- ميكانيكية للخرسانة الرملية. إن مرونة و كثافة الخرسانة اللينة يتأثران بنوعية مقدار الألياف. ففي الحالة الصلبة سجلنا مكسب لمقاومة الضغط و الشد تقدر على التسلسل ب 10% و 30.4% وهذا بفضل استعمال الألياف المعدنية ذات الشكل المتموج. لكن بالباف البوليبروبيلان لاحظنا تحسنا خفيفا للخصائص الميكانيكية، من جهة أخرى سجلنا زيادة لمقاومة الشد تقدر ب 20.5%. نتائج مرضية تم إيجادها بالنسبة للعناصر المحتواة على ألياف معدنية موزعة فقط في الجهة المشدودة وهذا يعطي ميزة اقتصادية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية - خبث الفرن العالي- ألياف البوليبروبيلان - ألياف معدنية- الخصائص الميكانيكية.

Résumé :

L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence du dosage en fibres de polypropylène et métalliques et du mélange de deux types de fibres sur les propriétés à l'état frais et les caractéristiques physico- mécaniques des bétons de sable. La maniabilité et la densité des bétons à l'état frais sont considérablement influencées par la nature et le dosage en fibres. A l'état durci, des gains de résistances en compression et en traction par flexion respectivement de l'ordre de 10 et 30.4% sont obtenus grâce à l'utilisation de fibres métalliques de forme ondulée. En revanche, les fibres de polypropylène améliorent légèrement les résistances mécaniques. L'association des deux types de fibres augmente la résistance à la traction de 20.5% par rapport à celle du béton de référence. De plus, des résultats satisfaisants sont obtenus pour le comportement des éléments fléchis dont les fibres métalliques sont placées uniquement dans la zone tendue ce qui présente un avantage économique.

Mots-Clefs : béton de sable- laitier granulé- fibres de polypropylène- fibres métalliques- comportement mécanique.

Abstract:

The objective of this study is to evaluate the effect of polypropylene, metal and a mixture of the two types of fiber content, on the properties of fresh and on the mechanical behavior of sandcrete. The workability and the density of fresh sandcrete are considerably influenced by nature and fibers content. In hardened state, an increase of 10 % and 30.4% respectively for compressive strength and flexural strength of sandcrete with corrugated steel fiber is obtained. On the contrary, the polypropylene fibers improved slightly the mechanical resistance. Moreover, an increase of 20.5% for flexural strength of sandcrete with the mixture of the two type's fibers is obtained compared to reference concrete. Satisfactory results are obtained for mechanical behavior of bent elements whose steel fibers are placed only in the tensile area. This presents also economical solutions.

Key-Words: sandcrete - granulated slag- polypropylene fibers - metallic fibers- mechanical behavior.

*Auteur correspondant : saloua.melais@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

La valorisation des matériaux locaux est devenue, actuellement, une solution nécessaire aux problèmes économiques des pays en voie de développement : La modification des ressources locales en matière de matériaux de construction peut solutionner au moins en partie le problème de la demande croissante en matière d'habitat. C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur la formulation d'un nouveau béton de sable en utilisant des ressources abondantes et présentant des caractéristiques soit comparables aux bétons usuels, soit répondant à des exigences mal assurées par ces derniers. L'Algérie dispose d'une part de plusieurs régions, soit dans le nord et surtout dans le sud, très riche en sables de différentes dimensions et d'autre part d'un complexe sidérurgique (El Hadjar-Annaba-Algérie) qui produit chaque année des quantités énormes de déchets et sous-produits. La production annuelle du laitier granulé est de l'ordre de 500000 tonnes.

Plusieurs recherches portant sur les bétons de sable ont montré leurs avantages économiques et leur spécificité technologique [1, 2]. L'utilisation de ce matériau est à envisager notamment dans les domaines du bâtiment, des travaux souterrains, des barrages, des chaussées routières, des travaux portuaires [1,3]. Ce matériau présente aussi une bonne alternative pour les bétons projetés [4].

Aujourd'hui, le renforcement du mortier ou du béton par des fibres constitue une voie nouvelle dans le domaine des matériaux composites, dont les applications sont très variées [5]. Le béton de fibres, présente de bonnes performances à la flexion, aux sollicitations dynamiques, réduit le retrait et s'oppose bien à l'apparition des fissures en les limitant au maximum [6]. Son utilisation permet surtout de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau ainsi renforcé de fibres en cousant les fissures [7]. Des conclusions appréciables sur la relation qui lie deux caractères (% fibres-résistance et nature de fibres-résistance), ont l'objet de nombreuses recherches, tant à l'échelle nationale, qu'internationale.

Le béton renforcé de fibres trouve de plus en plus d'emploi en pratique, notamment dans la

réalisation des chaussées bétonnées des routes et des pistes d'atterrissage des aéroports, dans les éléments préfabriqués et dans le renforcement des ouvrages dégradés [8,9]. Cependant des problèmes d'élaboration subsistent encore et exigent des études poussées. L'emploi d'un tel béton nécessite une recherche rigoureuse de l'influence des paramètres tels que, la nature et le dosage en fibres. Les fibres de polypropylène améliorent la cohésion du béton frais et limitent la propagation de fissures due au retrait plastique. Dardare [10] a trouvé que l'incorporation de fibres de polypropylène dans le béton apporte une légère amélioration lorsque le pourcentage de fibres est faible et une diminution pour des pourcentages plus élevés. A température ambiante, les résistances en compression varient peu pour des dosages inférieurs à 3kg/m^3 de fibres [11]. D'autres résultats [12] trouvés montrent au contraire une baisse de résistance de 17% et 25% pour des bétons contenant respectivement 1.75 kg/m^3 et 0.9 kg/m^3 de fibres de polypropylène malgré l'augmentation de 10% de la pâte de ciment dans la composition des bétons fibrés. Ces études montrent aussi que l'influence des fibres de polypropylène sur la résistance n'est pas significative. Par contre les fibres métalliques apportent un caractère ductile, améliorent le comportement post fissuration et la capacité portante résiduelle post fissuration [13,14]. En plus de l'augmentation des performances du béton, elles peuvent aussi être utilisées pour la réparation des structures [15, 9]. Les bétons renforcés de fibres métalliques présentent un comportement écrouissant et adoucissant remarquables en traction [16]. En gardant le même dosage en ciment et en adjuvant, l'optimisation du dosage en fibres est guidée par leurs caractéristiques [17, 8]. L'addition de ces renforts modifie les caractéristiques de la matrice et le comportement du béton [19]. Il s'agit d'un matériau nouveau et il ne peut être abordé comme un béton armé habituel : les fibres n'étant pas considérées comme des armatures classiques. Hannant [6] a montré que le comportement en flexion après la première fissure peut être résumé de la façon suivante:

- la distribution des contraintes n'est plus linéaire,

- les déformations en traction augmentent plus que les déformations en compression,
- l'axe neutre est déplacé vers la partie comprimée,
- les contraintes ne sont plus proportionnelles aux déformations dans la zone de traction,
- le diagramme de traction peut être assimilé à un rectangle tandis que le diagramme de compression reste triangulaire. Si les améliorations apportées par les fibres d'acier dans les bétons sont souvent montrées, leur utilisation dans les bétons de sable reste à tester [20, 21]. L'objectif principal de ce travail est d'intégrer les bétons de sable dans la nouvelle technologie des bétons fibrés et en même temps de valoriser les sables et les sous-produits industriels locaux disponibles en grandes quantités.

Le but de cette étude à caractère essentiellement expérimental est de quantifier l'apport de ces fibres dans du béton de sable conçu avec des matériaux locaux. L'effet de différents paramètres de formulation sur les propriétés des

bétons frais et le comportement physico-mécanique des bétons durcis sont présentés.

2. MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

2.1 Matériaux et formulation des bétons d'études

Matériaux :

Pour formuler un béton de sable fibré les constituants retenus sont les suivants en respectant la norme NFP 18-101 pour la taille des plus gros grains du sable fixée à 5 mm.

Granulats :

Deux types de sable sont utilisés : un sable de dune (SD) d'une étendue granulatoire 0/1.25 et un sable de carrière (SC) d'une étendue granulatoire 1.25/5. Le mélange des deux types de sable a donné un module de finesse de 2.65. Les valeurs moyennes des équivalents de sable montrent qu'ils sont très propres (ES>95). Les caractéristiques physiques des sables d'étude sont représentées au tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des sables d'études

Caractéristiques	Sable de dune	Sable de carrière
module de finesse	1.45	3.90
masse volumique apparente (g/cm ³)	1.416	1.453
masse volumique absolue (g/cm ³)	2.65	2.24
porosité (%)	46.57	35.13
propreté (ES) (%)	96	95

Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEMII/A- 42.5 (NF EN197-1), avec un ajout de laitier granulé de haut fourneau de l'ordre de 20% en moyenne et 5% de gypse conforme à la norme algérienne NA 442 produit

par la société algérienne de Hdjar-Soud. La composition chimique et les caractéristiques physiques du ciment sont représentées dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Composition chimique du ciment

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	P.A.F	Total
58.59	6.58	24.92	3.65	1.21	0.08	0.85	0.00	2.17	1.70	99.41

Tableau 3 : Caractéristiques physiques du ciment.

Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Consistance normale (%)	Début de prise (H /min)	Finesse de mouture (%)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
1.057	3.00	27	2/ 34	3.1	3480

Filler :

Les ajouts utilisés sont des fillers de laitier granulé obtenus par broyage des sous produits de l'industrie sidérurgique d'étendue granulaire < 80µm. (Norme XP P 18-540). La composition

chimique du laitier et les propriétés physiques du filler sont représentées dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4 : Composition chimique de laitier

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	S
39-40	7.5-9	37-40	0.5-0.9	8-9	1.5-2	1-1.8

Tableau 5 : Caractéristiques physiques du filler de laitier granulé.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Finesse de mouture(%)	
	Refus sur tamis 0,08 mm (%)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
2.85	2.31	3800

Superplastifiant :

Le MEDAPLAST SP40 est le superplastifiant choisi pour la formulation des bétons de sable. Il est commercialisé par la société algérienne

(Granitex). Il respecte la norme NF EN 934-2. Ses propriétés données par le fabricant sont représentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Propriétés de MEDAPLAST SP40

Forme	Couleur	p.H	Densité	Teneur en Chlore	Dosage
Liquide	Marron	8.2	1.2±0.01	< 1 g/l	0.6 à 2.5 du poids du ciment

Les fibres :

Deux types de fibres sont utilisées (fibres polypropylène et fibres métalliques), fournis par la société algérienne « Granitex ». Les fibres métalliques se présentent sous forme de bâtonnets ondulés, géométrie qui favorise l'ancrage dans la matrice du béton. C'est une

fibre normalisée et commercialisée sous l'appellation Medafac. Les caractéristiques physico-mécaniques des fibres utilisées sont présentées dans les tableaux 7 et 8 et la forme est illustrée par la figure1.

Tableau 7 : Caractéristiques des fibres de polypropylène

Masse volumique (g/cm ³)	Longueur (mm)	Point de fusion (°C)	Allongement à la rupture (%)	Section de la fibre (µm)	Module d'élasticité (GPa)
0.9	12	150	50	30	3

Tableau 8 : Caractéristiques des fibres métalliques

Fusion (°C)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)	Elancement L/D	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)
>1000	50	0.6±0.09	83.33	> 1000	200	7.8



Fibres métalliques



Fibres polypropylène

Figure1 : Géométrie des fibres utilisées.

Formulation des bétons :

La méthode de formulation du béton de sable retenue est une approche théorique de formulation de Sablocrete ajustée expérimentalement. Les différentes formulations de bétons de sable d'étude sont ajustées en fonction de la nature et du dosage en fibres. Deux dosages en fibres de polypropylène sont utilisés : *BSFP1* (600 g/m^3) et *BSFP2* (1200 g/m^3). Trois dosages en fibres métalliques sont testés : béton *BSFM1* avec 20 kg/m^3 , *BSFM2* avec 30 kg/m^3 et *BSFM3* avec 40 kg/m^3 comparés avec un béton de sable de référence (sans fibres) *BST*.

Très peu d'études sur l'influence du mélange de fibres dans le comportement des bétons ont été menées jusqu'à présent [22]. Afin de connaître le comportement des bétons de sable renforcés par un mélange de fibres de polypropylène et métallique, trois formulations différentes sont réalisées avec un taux de fibre de polypropylène fixe (600 g/m^3) et un dosage en fibres métalliques qui varie de 20 à 40 kg/m^3 de béton avec un pas de 10. Ils sont nommés respectivement *BSFk1*, *BSFk2* et *BSFk3*. L'ensemble des formulations retenues est donné dans le tableau 9.

Tableau 9 : Formulation et propriétés des bétons de sable

Références des bétons	Composition du béton de sable (kg/1m^3)						Dosage en fibres (kg/m^3)		Propriétés du béton frais	
									Masse volumique	Affaissement au cône d'Abrams
	SD	SC	Ciment	Eau	Filler	SP	FP	FM	(kg/m^3)	(cm)
BST	745	655	399	206	162	11	0	/	2203,72	8
BSFP1	744	654	399	206	162	11	0.6	/	2224,34	6
BSFP2	743	653	399	206	162	11	1.2	/	2226,67	5
BSFM1	742	652	399	206	162	11	/	20	2443,31	7,5
BSFM2	740	650	399	206	162	11	/	30	2494,37	5
BSFM3	738	648	399	206	162	11	/	40	2511,87	5
BSFk1	741	651	399	206	162	11	0.6	20	2460,18	7
BSFk2	739	649	399	206	162	11	0.6	30	2510,31	5
BSFk3	737	647	399	206	162	11	0.6	40	2536,42	5

2.2 Procédure expérimentale

Le malaxage du béton témoin sans fibres est réalisé selon la norme NF P18-404 dans une bétonnière de capacité 30 litres, avec une durée de malaxage totale de 5 minutes. La vibration du béton est réalisée sur une table vibrante pendant 30+30s. Après 24h de conservation des moules à l'air, les éprouvettes sont conservées en humidité saturante (HR=100%) à une température ambiante.

Il n'existe pas de normes spécifiques pour l'ordre d'introduction des constituants et la durée de malaxage pour les bétons fibrés. Les fibres sont à ce moment considérées comme des granulats et un ajustement de la quantité de granulats intermédiaires et de liants est parfois nécessaire. Selon le type de fibres utilisé, leur géométrie et surtout la quantité spécifiée, il faut prévoir une séquence appropriée d'introduction des fibres et du malaxage du mélange. Dans notre cas les fibres de polypropylène sont introduites au mélange à sec et la durée de malaxage totale est pratiquement la même que celle d'un béton témoin. Par contre les fibres métalliques sont introduites après un premier malaxage humide et la durée de malaxage est augmentée d'une à deux minutes selon la proportion de fibres utilisées.

Pour chaque type de béton, les résistances moyennes en compression et en traction par flexion sont déterminées à une échéance de 28 jours. En compression, les essais sont effectués sur des éprouvettes cubiques de dimension ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) selon la norme NFP18-403. Pour les BSFP, l'essai de traction par flexion trois points est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) selon la norme NFP18-406. Les demies éprouvettes obtenues après l'essai de traction ont été testées en compression selon la norme EN 196-1. Le nombre d'éprouvettes pour chaque résultat de compression ou de traction par flexion est de six. Pour l'essai de traction par flexion des BSFM et BSFK et vu que la longueur des fibres est de 50mm, la résistance mécanique moyenne en flexion 4 points est mesurée sur trois éprouvettes prismatiques ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$) selon la norme NFP18-400.

3. RESULTATS ET ANALYSE

3.1 Effet de la nature et dosage en fibres sur les propriétés des bétons frais

Les résultats de l'influence du type et du dosage de fibres sur les caractéristiques du béton frais sont regroupés dans le tableau 9. La figure 2 montre que l'introduction de fibres de polypropylène ne modifie pas de façon significative les masses volumiques des bétons qui au contraire sont très influencées par l'ajout de fibres métalliques. La masse volumique des BSFM et BSFK est voisine de celle d'un béton armé qui est de l'ordre de 2500 kg/m^3 .

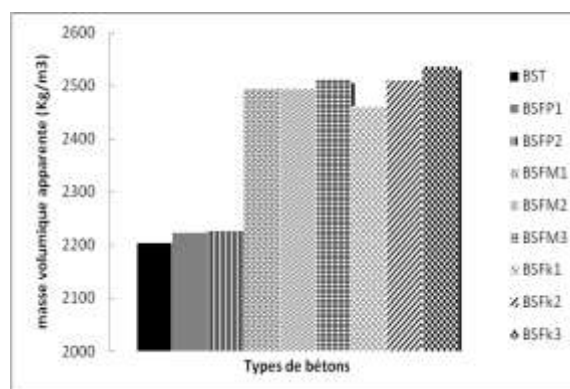


Figure 2 : Influence de la nature et du dosage en fibres sur la masse volumique

En revanche, l'ajout de fibres quelque soit la nature améliore la cohésion et par conséquent réduit la maniabilité. L'augmentation du rapport (l/d) accroît le problème de distribution hétérogène et de floculation des fibres. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue. La figure 3 montre que la diminution de la valeur de l'affaissement ne dépasse pas 3cm pour l'ensemble des mélanges testés par rapport au béton témoin. Les bétons de sable de notre étude restent plastiques selon la norme NFP18-451.

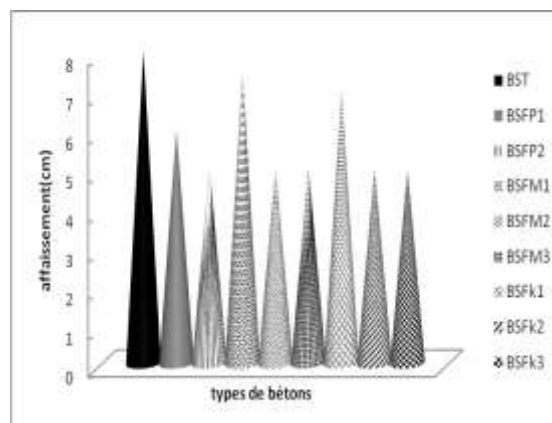


Figure 3 : Influence de la nature et du dosage en fibres sur l'affaissement

3.2 Influence du dosage en fibres polypropylène sur la résistance mécanique

Résistance à la compression

Les résultats illustrés par les figures 4 et 5 montrent que l'influence du dosage en fibres de polypropylène sur la résistance en compression est négligeable. La différence des niveaux de résistance à 28 jours par rapport au béton de référence sans fibres BST est de l'ordre de 1.08 MPa qui représente une augmentation de 3.62% pour les essais effectués sur les cubes de sections $10 \times 10 \text{ cm}^2$ et de l'ordre de 1.84 MPa avec une augmentation de 5.13% pour les essais de compression réalisés sur les demi prismes de section 25 cm^2 . Une légère diminution de la résistance a été observée en passant d'un dosage de 600 g/m^3 à un dosage de 1200 g/m^3 . Cette chute de résistance est de l'ordre de 0.6% pour les cubes et de 0.95% pour les demi-prismes, mais elle reste toujours légèrement supérieure à celle du BST. Cela est dû à la dispersion des valeurs des résistances de compression de différents échantillons caractérisée par l'écart type obtenu. Cela s'explique aussi par le fait que le taux élevé en fibre influence la bonne formation de la matrice cimentaire. Différents chercheurs [10, 11,12] confirment que les fibres de polypropylène n'apportent pas d'amélioration sensible en compression.

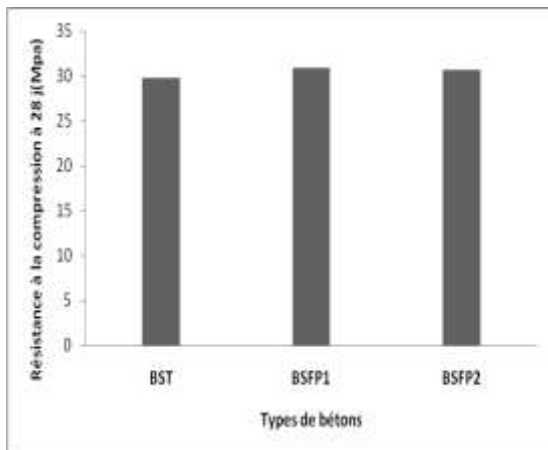


Figure 4 : Résistances à la compression des BSFP sur une section de $(10 \times 10) \text{ cm}^2$

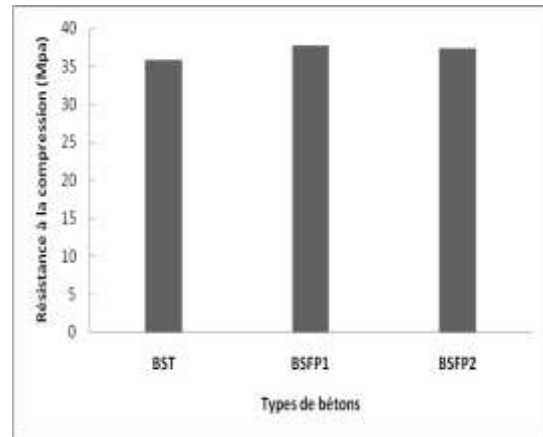


Figure 5 : Résistances à la compression des BSFP sur une section de $(25) \text{ cm}^2$

Résistance à la traction par flexion

La figure 6 montre que le taux de fibres de polypropylène influence la résistance à la traction par flexion. On constate deux phénomènes distincts: une amélioration de la résistance en traction par flexion pour un taux de fibres de 600 g/m^3 dont le gain est de 11.51% et une chute de résistance avec un taux de 1200 g/m^3 dont la diminution est de l'ordre de 8.7% : Cela indique qu'au-delà du dosage optimum en fibres, il est clair que des boules de fibres se forment ce qui présente des points faibles lors du test de traction par flexion.

On peut conclure que les meilleurs résultats obtenus en compression et en traction par flexion sont ceux obtenus avec un dosage en fibre de 600 g/m^3 qui peut être considéré comme dosage optimal.

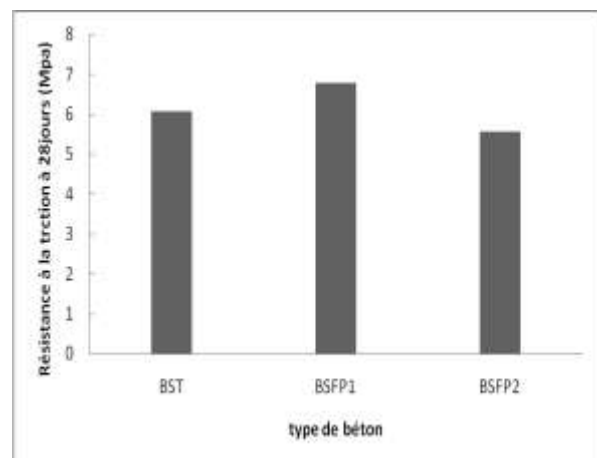


Figure 6 : Résistances à la traction par flexion à 28 jours des BSFP

3.3 Influence du dosage en fibres métalliques sur la résistance mécanique

Résistance à la compression

Les résultats de l'influence du dosage en fibres métalliques sur la résistance à la compression sont illustrés par la figure 7. On constate une amélioration de la résistance à la compression en fonction du taux en fibres. Le gain maximal qui est de l'ordre de 14.9% est obtenu avec un dosage de 30kg/m^3 . Cette augmentation est attribuée à la forme géométrique ondulée de la fibre qui développe une adhérence supplémentaire avec la matrice. Elle est due aussi à la présence d'un bon nombre de fibres, ayant une bonne orientation au sein de la matrice. Le gain de résistance est dû également à l'efficacité des fibres noyées dans la matrice qui jouent un rôle de ralentisseur du développement des microfissures, ce qui se traduit par une augmentation significative de la résistance à la compression. Cependant elle reste faible par rapport à celle de traction, car dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures. Les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression pour le béton mais néanmoins ils sont meilleurs avec la forme géométrique ondulée. Le gain de résistance en compression obtenu avec un dosage de 40 kg/m^3 est de l'ordre de 12.41% qui est inférieur à celui obtenu avec le dosage de 30 kg/m^3 . Cette diminution est causée par une mauvaise compacité due à un excès de fibres.

Les fibres ondulées retardent l'apparition des fissures obliques et ainsi augmentent la ductilité

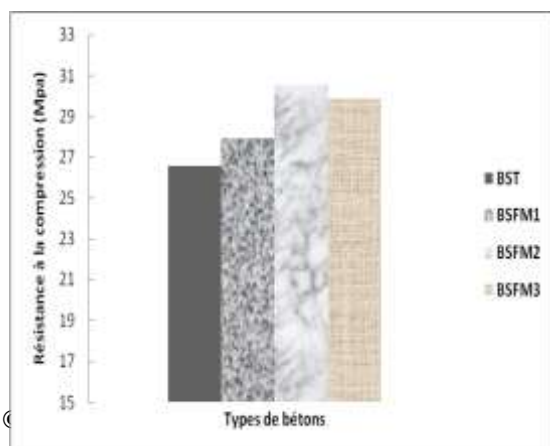


Figure 7: Résistances à la compression à 28 jours

et la ténacité du matériau. Grâce à cette caractéristique, le béton voit sa résistance croître légèrement. La figure 8 montre que le mode de rupture en compression d'un béton non fibré se fait par cisaillement (8 a) et celui d'un béton fibré se fait par un éclatement très limité de la matrice (8 b)



Figure 8 : Mode de rupture d'un BST et BSFM

Résistance à la traction

L'influence du dosage en fibres métalliques sur la résistance en traction par flexion est déterminée en exploitant les résultats obtenus sur deux types d'éprouvettes. Le premier est rempli à 100% avec un béton fibré **BSFM**. Pour le deuxième type d'éprouvette **BSFMt**, on distingue deux zones égales : la partie inférieure (zone tendue) est remplie avec le béton fibré, l'autre partie (zone comprimée) est remplie d'un béton de sable sans fibres.

D'après la figure 9, on constate une augmentation de la résistance en traction par flexion en fonction du dosage en fibres métalliques pour les deux types d'éprouvettes mais avec des gains différents. Dans le cas du premier type d'éprouvette, les gains de résistance sont de l'ordre de 4.53%, 12.4% et 30.4% respectivement pour les dosages 20, 30 et 40 kg/m^3 . Pour le deuxième type d'éprouvette les gains de résistance de traction par flexion, légèrement inférieurs à ceux du premier type d'éprouvette, sont de l'ordre de 3.73%, 9.46% et 22.8% respectivement.

Cette amélioration est attribuée au rapport l/d élevé et à la forme ondulée de la fibre.

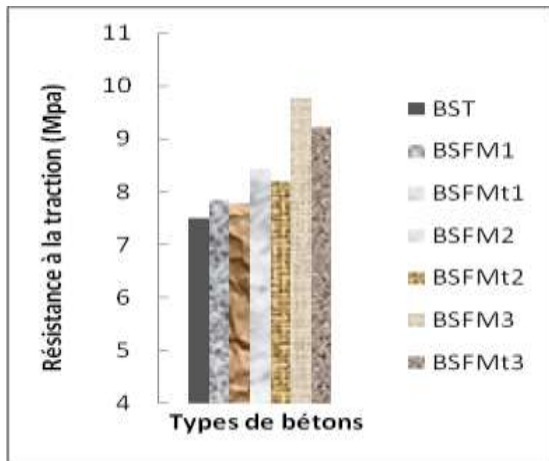


Figure 9 : Résistances à la traction par flexion
4 points

Le rapprochement des résistances de traction pour les deux types d'éprouvettes peut s'expliquer aussi par l'effet de vibration du béton qui peut conduire à une ségrégation et à une orientation préférentielle des fibres en fonction de l'axe de vibration qui, sous l'effet de leur poids propre, vont avoir tendance à descendre dans le fond du moule. Le taux d'augmentation pour les BSFM1, BSFM2 et BSFM3 par rapport au BSFM_{t1}, BSFM_{t2} et BSFM_{t3} est respectivement de l'ordre de 0.77%, 2.68% et 6.18%. Cela confirme que le rôle primordial des fibres est atteint en sollicitation de traction. Lorsque l'éprouvette est soumise à la flexion, l'effort de traction est absorbé par les fibres métalliques et celui de compression est repris par le béton témoin sans fibres.

Ce résultat est très important pour les bétons de sable renforcés de fibres métalliques car il lui donne non seulement une résistance de traction plus élevée et une amélioration de la ductilité mais aussi un gain économique surtout pour les pièces fléchies suite à une réduction du dosage en fibres de moitié.

Dans le cas de la traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leurs lèvres et les fibres travaillent en traction. Les fibres modifient le mécanisme d'endommagement sous sollicitation statique. La première fissure est retardée. De plus les fibres jouent un rôle de couture de la fissure et permettent d'obtenir des résistances résiduelles importantes pour de grandes ouvertures de fissures ce qui augmente la charge maximale de ruine et améliore grandement les caractéristiques à l'échelle du matériau, ceci grâce à leur bonne adhérence et

leur module d'élasticité très élevé. Elles transmettent les efforts au béton dans lequel elles sont ancrées. Les efforts résiduels repris diminuent ensuite au fur et à mesure que les fibres se déchaussent. La rupture se développe lors de la perte de liaisons béton-fibres et du déchaussement des fibres (fig. 10).



Figure 10 : Mode de rupture en flexion
4 points

3.4 Comportement des bétons de sable renforcés par un mélange de fibres métalliques et de polypropylène

Afin de connaître le comportement mécanique des bétons de sable renforcés par un mélange de fibres de polypropylène et métalliques, des essais de compression et de traction par flexion à 28 jours ont été effectués.

Résistance à la compression

D'après les résultats illustrés par la figure 11 on remarque une diminution de la résistance en compression du béton de sable renforcés par un mélange de fibres de polypropylène et métalliques comparé à un béton de sable témoin BST. Cette diminution est de l'ordre de 0.84% pour le BSFK1, 7.41% pour le BSFK2 et 10.35% pour le BSFK3. Cela est causé par une mauvaise compacité due à un excès de fibres et une perturbation au niveau des liaisons matricielles et un niveau de l'arrangement de l'étendue granulaire, ce qui confirme les résultats de Poon [23] et ceux de Chen [24]. Par ailleurs, il convient de noter que ces pertes de résistances en compression, vont être

compensées par une amélioration de la ductilité les meilleurs résultats sont obtenus pour un mélange de fibres dosé à 600g/m^3 de fibres de polypropylène et à 20 kg/m^3 de fibres métalliques.

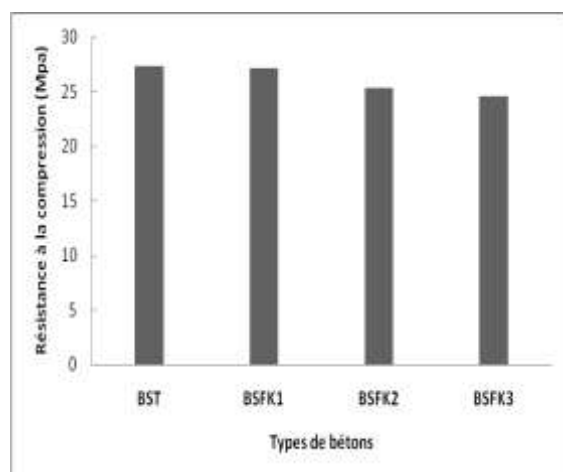


Figure 11 : Résistance à la compression à 28 jours (MPa) des BSFPM

Résistance à la traction par flexion

Les résultats de variations des contraintes de traction par flexion 4 points pour différents types de béton de sable renforcés par un mélange de fibres de polypropylène et métalliques sont illustrés par la figure 12. Pour un dosage de fibres de polypropylène fixe, on constate d'une manière très visible que la contrainte de traction par flexion augmente avec le taux de fibres métalliques par rapport au BST. Elle est de l'ordre de 7.87% pour les BSFK1, 12.15 % pour les BSFM2 et 20.51% pour les BSFM3. Cette augmentation reste cependant inférieure à celle obtenue par les BSFM composés seulement de fibres métalliques. La figure 13 représente une comparaison entre les résultats trouvés en traction par flexion avec le taux d'augmentation donné par les deux formulations (BSFM et BSFK).

Les performances mécaniques de ces nouveaux bétons dépendent des proportions relatives des deux natures de fibres. Le mélange de fibres peut avoir une influence positive sur d'autres caractéristiques telles que le retrait au jeune âge et la résistance au feu [25].

et du mode de rupture. On peut considérer que

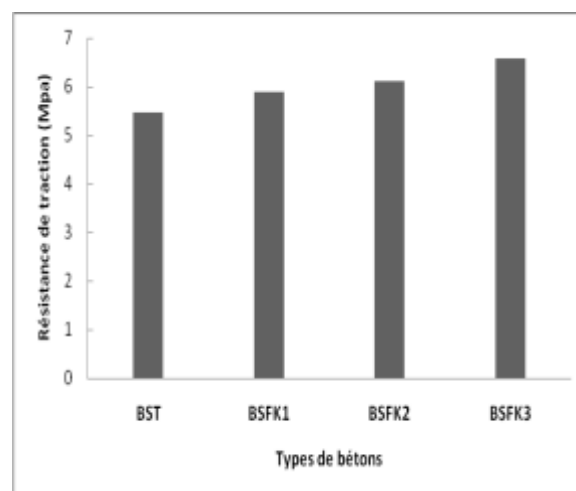


Figure 12: Résistance à la traction par flexion des BSFPM

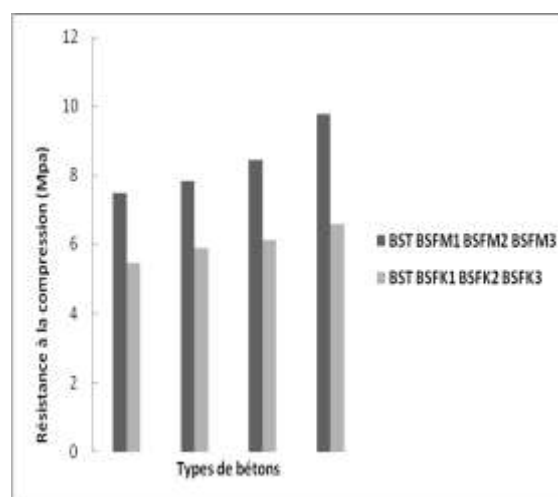


Figure 13: Comparaison entre les résistances traction par flexion des BSFM et BSFPM

4. CONCLUSION

Les bétons de sable ont dans un certain nombre de contrées, un gros intérêt au vu de la valorisation des ressources naturelles et artificielles disponibles. Mais souvent leurs caractéristiques mécaniques obligent à les abandonner. Pour améliorer ces dernières, il est envisagé de les renforcer par des fibres. Cette étude met en évidence le rôle et l'influence du dosage en fibres de polypropylène, métalliques

et un mélange des deux types de fibres sur les caractéristiques mécaniques des bétons de sable durci tout en conservant une rhéologie à l'état frais nécessaire à leur mise en place. Le béton renforcé de fibres métalliques présente des améliorations au niveau de la rigidité et de la ductilité post fissuration. Les principales conclusions tirées de l'étude sont:

- L'incorporation de fibres polypropylène dans la composition des bétons de sable améliore la ductilité et augmente légèrement la résistance en traction par flexion, mais n'apportent pas une amélioration sensible pour la résistance en compression: Les meilleures résistances en traction sont obtenues pour un dosage en fibres de 600 g/m^3 .

- L'incorporation de fibres métalliques dans un béton de sable améliore la cohésion et la densité même si la maniabilité des bétons frais est légèrement affectée en fonction du dosage en fibres

- L'utilisation de renforts de fibres métalliques présente une amélioration de la résistance mécanique illustrée par une augmentation considérable en traction par flexion de l'ordre de 30.4 % et une légère augmentation en compression avec un gain de l'ordre de 10%.

- Les essais de traction par flexion 4 points réalisés sur les bétons de sable contenant des fibres métalliques dans la totalité de la section *BSFM* ou dans la partie tendue *BSFM_t* ont montré qu'il n'y a pas de différences significatives pour ces deux compositions. Le taux d'augmentation pour les *BSFM₁*, *BSFM₂* et *BSFM₃* par rapport au *BSFM_{t1}*, *BSFM_{t2}* et *BSFM_{t3}* est respectivement de 0.77%, 2.68% et 6.19%. Cela confirme que le rôle primordial des fibres est atteint au niveau de la traction et lorsque l'éprouvette est soumise à la flexion.

- Ce résultat est très important pour les *BSFM* car il donne au nouveau béton de sable non seulement une résistance de traction élevée et une amélioration de la ductilité des éprouvettes mais aussi un cout réduit moitié de fibres métalliques et cela pour les pièces fléchies.

- La résistance en compression du béton de sable renforcé par un mélange de fibres baisse globalement avec l'élévation du taux de fibres. La diminution maximale est de l'ordre de 10.35% pour le *BSFK3* comparé à un béton de sable témoin *BST*.

- La résistance en traction par flexion des bétons de mélange de fibres *BSFK* semblent

meilleures que celles des *BST*. L'augmentation maximale a été de l'ordre de 20.51% pour les *BSFM*. Cependant cette augmentation reste inférieure à celle obtenue par les *BSFM* composés seulement de fibres métalliques (30.4%).

- Les performances mécaniques de ces nouveaux bétons *BSFK* dépendent des proportions relatives des deux natures de fibres. On peut conclure que l'introduction des fibres métalliques augmente la résistance de traction par flexion mais l'utilisation de ces fibres seules donne des résultats meilleurs que leur utilisation avec des fibres de polypropylène.

- Le mode de rupture en compression d'un béton de sable se fait par cisaillement et celui d'un béton de sable fibré se fait par un éclatement très limité de la matrice. Le processus de rupture par traction se développe lors du déchaussement des fibres.

- Le comportement mécanique des poutres en flexion est nettement modifié par l'incorporation de fibres. Les résultats font apparaître que le dosage optimum en fibres métalliques est de 40 kg/m^3 . Cela est justifié par l'amélioration des différents paramètres mécaniques : un gain de l'ordre de 30.4% de la contrainte de flexion,

- Les bétons de sable renforcés de fibres peuvent présenter un avantage ou une solution pour les éléments de structures fléchies. Le béton de sable fibré proposé dans cette étude constitue une bonne alternative pour plusieurs applications telles que les éléments de canalisations, les coques minces faiblement sollicitées, le dallage, les chaussées en béton, les dallages manufacturés, la stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels et les galeries souterraines.

5. REFERENCES

- [1] Sablocrete., 1994. Bétons de sable: «caractéristiques et pratiques d'utilisation, presses de l'ENPC (France), 230 p.
- [2] Achoura D., Redjel B., février 2009. Valorisation des sous produits de hauts fourneaux dans la fabrication d'une nouvelle gamme de bétons de sable, Séminaire International Innovation et Valorisation dans le Génie Civil, Hammamet, Tunisie, pp. 61-69.
- [3] Fauteux E., Fortin S., 2002. Le béton de sable appliqué aux chaussées routières, Infrastructures, Montréal. CERIU. Vol. 9, N° 5.
- [4] Benaissa A., Kamen A., Chouicha K., Malab S., 2008. Panneau 3D au béton de sable, *Materials and Structures*, Vol.41 RILEM pp. 1377–1391.

- [5] Melais S., Achoura D., Jaubertie R., 2011. Comportement mécanique des plaques en béton de sable renforcé de fibres métalliques. *Annales de bâtiments et travaux publics*, issue n°2/2011, pp. 17-22.
- [6] Hannant D.J., 1978. «Fiber cements and fiber concretes. »3 New York. J. Wiley and sons, 219 p.
- [7] Aydin A.C., 2007. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials* 21, pp.1149–1154.
- [8] Evangelista F. Jr., Roesler J.R., Paulino G.H., 2009. Numerical simulations of the fracture resistance of functionally graded concrete materials , *Transportation Research Record* 2113, Pp:122–131.
- [9] Barakat S., Altoubat S., 2010. Concrete welding using steel fibers, *Civil and Environmental Engineering*, University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates 32, pp. 2065–2073
- [10] Dardar J., 1975. Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène. In *fiber reinforced cement and concrete*, RILEM , Symposium, Edited by A. NEVILLE, Lancaster, Construction Press, , pp 227-235, Communication 5.2
- [11] Suhaendi, S.L., Horiguchi T., 2006. Effet of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength after heat exposition , *cement and concrete research* , Vol.36, ,pp.1672-1678.
- [12] Hager, I., 2004. Comportement à haute température des bétons à haute performance –évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées et école polytechnique de Croatie, novembre, 183p.
- [13] Rossi P., 1998. Les bétons de fibres métalliques, Presse de l'ENPC, Paris, France, 306p.
- [14] Andra., 2005. Les matériaux cimentaires Référentiel matériaux, tome 3, Rapport de recherche de l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs. France 40 p
- [15] Djebali S., 2013. Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 182p. .
- [16] Braïke S., Massicotte B., Charron J-P, 2002. Conception des ponts en bétons fibrés à haute et ultra haute performance, *Collection de la Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées LCPC*, France, 198p.
- [17] De Larrard F., 2002. Construire en béton *Collection de la Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées LCPC*, 197p.
- [18] Rossi P., 2002. Le développement industriel des bétons de fibres métalliques, conclusions et recommandations, BEFIM, Presses de l'ENPC, Paris. 264p.
- [19] Parant E., 2003. Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelles sous sollicitations sévères : fatigue, choc, corrosion, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ENPC, Paris, 3/12/. 248 p.
- [20] Mai Y.W., 2002. Cohesive zone and crack resistance - curve of cementitious materials and their fibre – reinforced composites, *Engineering Fracture Mechanics*; V 69, issue2, pp 219-234.
- [21] Houari H., 1993. Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 243p.
- [22] Bidossessi A., nov 2010 Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à température élevée , Thèse de doctorat de l'université de Cergy – Pontoise , France, 260 p.
- [23] Poon S, Shui, Z.H., Lam, L., 2004. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperature, *Cement and concrete Research*, Vol .34, pp.2215-2222.
- [24] Chen B., Liu, J., 2004. Residual strength of hybrid – fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1065-1069.
- [25] Aslani F., Samali B., 2013. High strength polypropylene fiber reinforcement concrete at high temperature, *Centre for Built infrastructure research, School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney, Ultimo, NSW, Australia*.