

# Evolution des propriétés mécanique des BHP au Laitier Renforcés par un Fibrage Métallique Mixte

BOUTIBA Aldjia, CHAID Rabah, MOLEZ Laurent

## **Résumé:**

Les bétons de hautes performances (BHP) acquièrent des résistances mécaniques allant de 20 à 30 MPa à 24 heures, ce qui permet d'augmenter la productivité et de réduire les délais de réalisation sur les chantiers. Aussi, avec les BHP, il est possible de construire avec moins de coffrage, moins de béton à mettre en place et moins d'armatures qu'avec un béton ordinaire.

L'ajout des fibres métalliques a un effet plus efficace dans les matrices à hautes résistances, en augmentant à la fois la charge ultime et la ductilité, grâce à la bonne adhérence entre les fibres et la matrice du béton.

Le but de cette étude, est de définir l'effet d'un fibrage mixte sur les propriétés mécaniques des bétons de haute performance avec ajout de laitier de haut fourneau. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de laitier granulé ultrafin et des fibres a entraîné une amélioration relative des performances mécaniques.

**mot-clés:** BHP; Fibres; Laitier; propriétés mécaniques.

## **1. Introduction:**

Grâce à leurs performances structurales et économiques, ces dernières années les bétons de hautes performances (BHP) ont connu une utilisation massive à l'échelle mondiale. Avec les BHP, il est possible de construire avec moins de coffrage, moins de béton à mettre en place et moins d'armatures qu'avec un béton ordinaire [1,2].

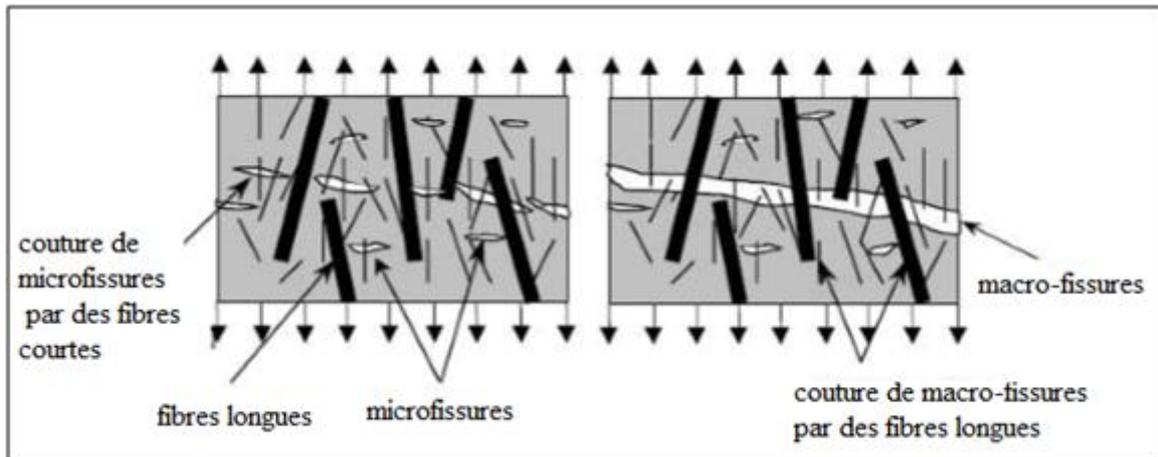
Avec l'augmentation de la résistance à la compression le BHP devient peu ductile ou plus fragile. Cette dernière entraîne des problèmes de conception et de dimensionnement pour certains types de structures. La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières ont un effet positif sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Dans ce domaine, on peut citer l'accroissement simultané de la ductilité du matériau et de la résistance à la traction. La formation et la propagation de fissures sont retardées et la taille d'ouverture de ces fissures est largement réduite. [3,4].

Les fibres se sont avérées plus efficaces dans les matrices à hautes résistances, en augmentant à la fois la charge ultime et la ductilité, grâce à la bonne adhérence entre les fibres et la matrice du béton. [5].

Dans le cas de l'utilisation de deux types de fibres métalliques dans la même composition, les fibres droites courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement ce qui augmente la résistance à la traction. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi, ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité [6,7], alors que les fibres courtes peuvent améliorer les caractéristiques du béton avant la fissuration macroscopique (Figure 1).

Le travail présenté est réalisé au laboratoire de génie civil et génie mécanique (matériaux) de l'INSA de Rennes-France. Le but de notre étude est la détermination des propriétés mécaniques instantanées à savoir la résistance à la compression, la résistance en traction par fendage, le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et la résistance à la flexion quatre (4)

points. D'un béton de haute performance renforcé par un mélange de fibres courtes et de fibres à crochets, Ainsi qu'une substitution de 15% du ciment par du laitier de hauts fourneaux. Le dosage en laitier optimisé dans des études antérieures est fixé à 15% (en remplacement de ciment). Cette teneur induit des résistances mécaniques à 28 jours très élevées [8].



**Figure 1 :** a) Influence des fibres courtes dans le processus de cicatrisation des microfissures.  
b) Influence des fibres longues dans le processus de cicatrisation des macro-fissures [89].

## 2. Matériaux et méthodes

Les matériaux utilisés pour la confection des bétons d'étude sont :

**2.1** - Un ciment de type portland sans ajouts minéraux CEM I 52,5 PM ES CP2 de l'usine Lafarge du Teil-France. Les caractéristiques chimique et minéralogique sont reportées tableau 1.

**Tableau 1 :** Compositions chimique et minéralogique (Bogue) du ciment.

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	RI	PAF	CaO <sub>L</sub>
%	66.60	22.40	2.96	2.33	0.95	0.15	0.10	2.13	0.20	1.59	0.50
		C <sub>3</sub> S = 65.3 %		C <sub>2</sub> S = 18.6 %		C <sub>3</sub> A = 4.35 %		C <sub>4</sub> AF = 7.14%			

**RI:** résidus insolubles, **PAF:** pertes au feu

### Les propriétés physiques :

Début de prise.....	2h 55mn
Retrait à 28jours.....	560 µm/m
Masse volumique absolue.....	3.16 g/cm <sup>3</sup>
Stabilité chimique.....	0.5 mm
Surface spécifique.....	3590 cm <sup>2</sup> /g

**2.2** - Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-Hadjar Annaba-Algérie. C'est un granulé amorphe, broyé jusqu'à une surface spécifique supérieure à celle du ciment, dont la composition chimique est reportée sur le tableau 2.

**Tableau 2 :** Composition chimique du laitier

Elements	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	RI	PAF
%	39.77	41.69	7.05	1.41	5.49	0.44	0.10	0.15	0.12	0.11

### Les propriétés physiques :

Masse volumique absolue ..... 2,99 g/cm<sup>3</sup>,  
Surface spécifique ..... 8 500 cm<sup>2</sup>/g.

**2.3** – Le sable utilisé est un sable siliceux concassé (0/2). Les graviers siliceux sont également concassés de granulométrie (2/6) et (6/12). L'adjuvant est un superplastifiant, Sika ViscoCrete TEMPO 9.

**2.4** - Pour les bétons fibrés, on a utilisé un mélange de fibres courtes et de fibres à crochets (fibres encollées Dramix RC-80/50BN) (figures 1 et 2). Ces fibres sont ajoutées à raisons de 0,35% en volume par mètre cube de béton chacune.



**Figure 1** : Fibres courtes.



**Figure 2**: Fibres à crochets.

La formulation du béton soumis aux essais (béton d'étude) est réalisée avec la méthode de Dreux-Gorisse en utilisant le logiciel béton lab free du LCPC. Après des essais de convenance, la composition de base retenue est la suivante :

- Ciment ..... 446 kg/m<sup>3</sup>
- Laitier ..... 66,9 kg/m<sup>3</sup>
- Gravier 6/12 (G1) ..... 891,9 kg /m<sup>3</sup>
- Gravier 2/6 (G2) ..... 85,2 kg/m<sup>3</sup>
- Sable 0/2 ..... 738,3 kg/m<sup>3</sup>
- Eau ..... 155,6 kg/m<sup>3</sup>
- Adjuvant ..... 0,34% de la masse du ciment.

Les corps d'épreuve c'est-à-dire, les bétons avec du laitier mais sans fibres et les bétons avec du laitier et les fibres après le démoulage sont immergées dans l'eau à 20°C.

Les abréviations utilisées pour les différents bétons sont :

- **BHP** : Béton témoin sans laitier granulé ni fibres
- **BHPL** : Béton avec du laitier granulé mais sans fibres
- **BHPFM** : Béton avec du laitier granulé et des fibres

## 3. Résultats et discussion

**3.1. Caractérisation des bétons frais :** Les résultats des essais d'affaissement au cône des bétons à l'état frais sont récapitulés, dans le tableau 3. L'affaissement mesuré pour les différents bétons était entre 13 et 14 cm ce qui correspond à un béton vibré plastique de classe d'affaissement S3, avec une bonne consistance selon la norme NF-EN 206 [9]. L'ajout des fibres a entraîné une perte d'affaissement du BHPLF lors de l'utilisation de la même quantité de super plastifiant. Mais, l'augmentation de la quantité d'adjuvant a conduit à l'amélioration de l'affaissement, de ce type de béton.

**Tableau 3** : Caractéristiques à l'état frais des bétons de granulats ordinaires.

Quantité de Superplastifiant	Caractéristiques	Types de béton		
		BHP	BHPL	BHPFM
Même quantité de super plastifiant pour les 3 bétons	Affaissement au cône d'Abrams en (cm)	13	14	10
Quantité de super plastifiant augmentée pour le BHPFM	Affaissement au cône d'Abrams (cm)	14	14	13

### 3.2. RESISTANCE MECANIQUE EN COMPRESSION ET A LA TRACTION PAR FENDAGE, MODULE D'ELASTICITE LONGITUDINAL ET COEFFICIENT DE POISSON

L'ensemble des résultats pour les différents bétons d'étude comme les résistances en compression  $f_{cm}$  aux différentes échéances et les caractéristiques mécaniques à l'âge de 6 mois, sont présentés dans le tableau 4.

**Tableau 4** : Caractéristiques mécaniques des différents bétons.

Types de béton	Caractéristiques mécaniques					
	Résistance à la compression (MPa)			A l'âge de 6 mois		
	28jours	6mois	18mois	Résistance à la traction par fendage (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Coefficient de poisson
<b>BHP</b>	58	62	79	5	35	0,33
<b>BHPL</b>	64	68	83	5	40	0,25
<b>BHPFM</b>	71	77	85	7	38	0,29

Les valeurs des modules d'élasticité des trois bétons à 180 jours sont toutes comprises entre 35 et 40 GPa. Ces valeurs sont caractéristiques des bétons à haute performance. Mais, le module d'élasticité du BHP avec du laitier granulé non fibrés est plus important que celui des BHP et des BHPLF. On peut donc penser que l'introduction des fibres ne modifie pas d'une façon significative le module d'élasticité. Dans la partie élastique de la déformation, les fibres ne participent pas encore à la résistance, la matrice cimentaire contrôle le comportement du matériau. Des études antérieures concernant l'influence des fibres sur le module d'élasticité [10] confirment ce résultat.

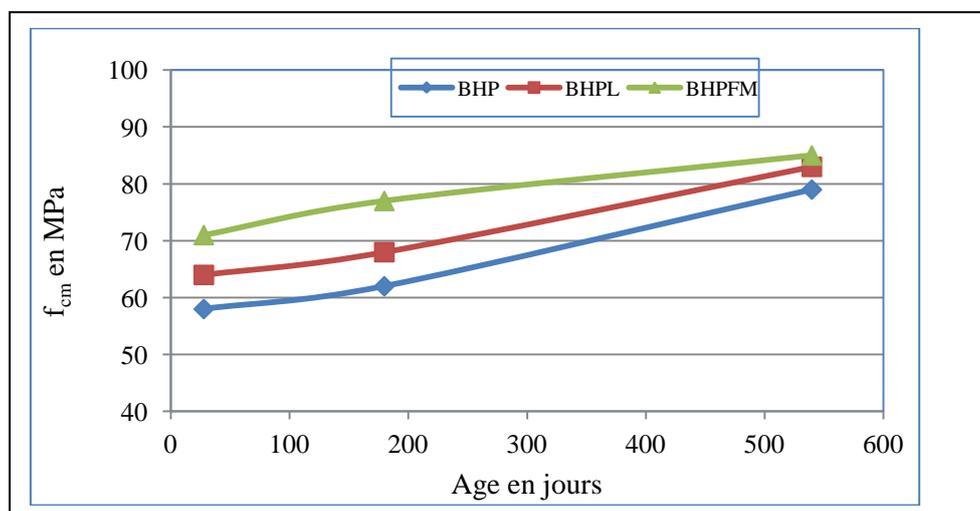
On constate que les BHP sans laitier granulé ni fibres développent des valeurs de coefficient de poisson légèrement plus élevées que celles des autres bétons, mais le BHPFM présente un coefficient de poisson important par rapport au BHPL.

La présence des fibres a un effet significatif sur le comportement du béton fibré au fendage. Après fissuration, la résistance est reprise par les fibres interceptant la fissure; ceci permet aux éléments en béton contenant des fibres de supporter d'avantage de chargement, même au-delà de la fissuration (Figure 3).



**Figure 3** : Rupture à la traction par fendage du BHPLF comparée au BHP.

La figure 4 présente les évolutions des résistances en compression en fonction du temps (28, 180 et 540 jours) des trois types de BHP. L'analyse globale des résistances en compression montre des valeurs supérieures pour les bétons contenant du laitier granulé et des fibres comparativement à celles non fibrées provenant certainement de la densification de la matrice cimentaire causée par l'effet hydraulique du laitier granulé. Les fibres ont entraîné une augmentation des résistances en compression, Notons que pour ces bétons on a augmenté la quantité d'adjuvant superplastifiant par rapport au béton non fibré, donc il y'a pas de baisse de compacité liée à la réduction des propriétés rhéologique.



**Figure 4** : Evolution des résistances en compression en fonction du temps des trois types de BHP.

Concernant les cinétiques, elles s'avèrent plus élevées dans le cas des bétons non fibrés entre 180 et 540 jours, ce qui peut également être relié à la densification du squelette solide due à l'évolution des réactions d'hydratation, vu que les échantillons étaient conservés dans l'eau.

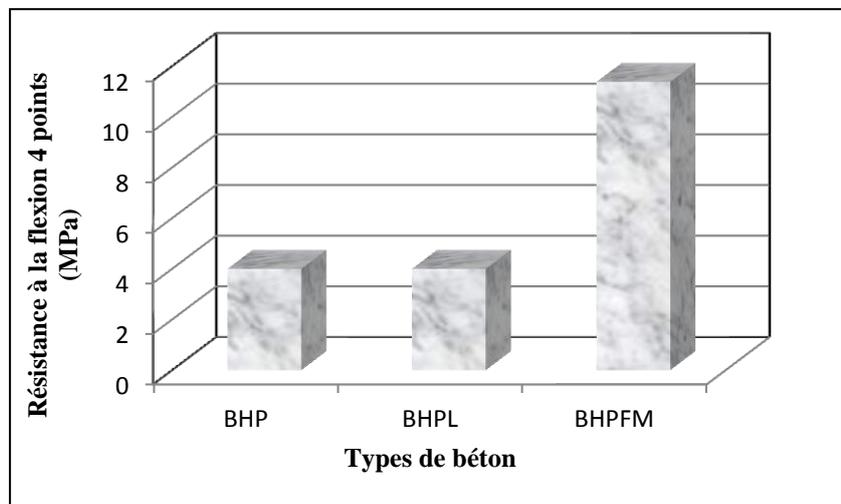
La présence de fibres évite la rupture brutale et fragile surtout pour les BHP et confère un comportement post-pic ductile (Figure 5). Un tel comportement fragile du béton est particulièrement troublant dans les régions sismiques et peut causer des dégâts importants en vies humaines et en infrastructures, même en présence d'armatures de confinement [11].



**Figure 5 :** Rupture à la compression du BHPFM comparée au BHP.

### 3.3. RESISTANCE MECANIQUE A LA FLEXION 4 POINTS ET EVOLUTION DES FISSURES

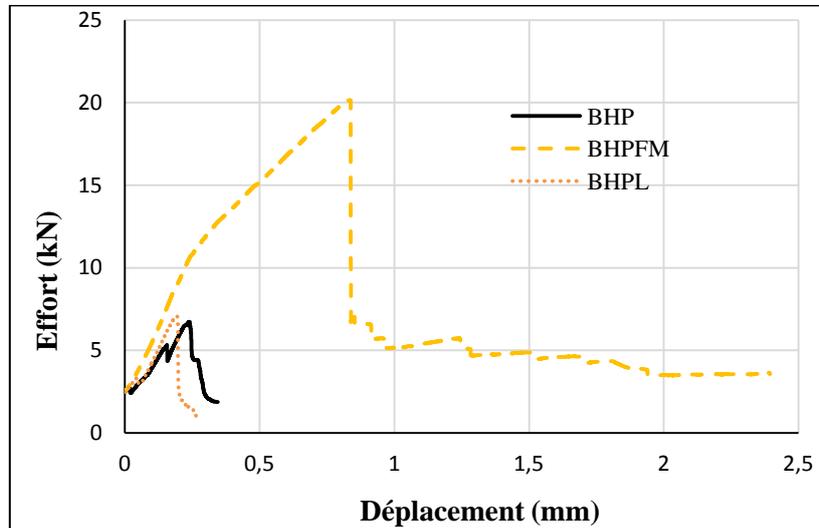
La figure 6 présente les résultats du comportement mécanique en flexion 4 points des bétons fibrés et non fibré. Le béton au laitier granulé renforcé de fibres d'acier affiche une amélioration de contrainte de rupture de 320% par rapport au béton témoin BHP et béton au laitier granulé BHPL non renforcé. L'ajout du laitier granulé n'a pas eu d'effet significatif sur les résistances à la flexion.



**Figure 6 :** Résistance à la flexion 4 points des différents BHP.

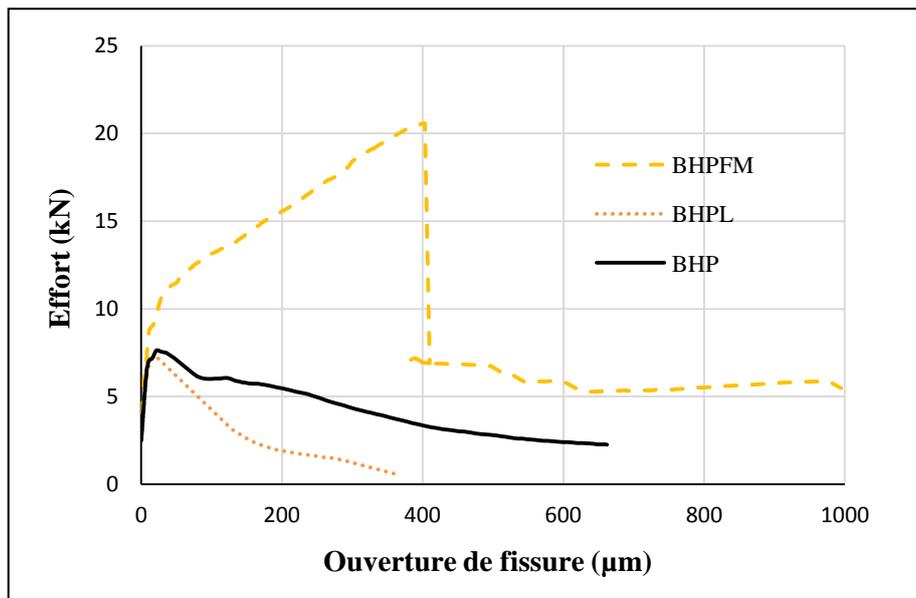
Les figures 7 et 8 montrent le comportement des bétons avec fibres et sans fibres lors des essais de flexion 4 points. Dans la partie linéaire de la figure 6, nommée domaine d'élasticité, les bétons fibrés et non fibrés ont le même comportement. Dans cette zone, la matrice cimentaire joue un rôle primordial ce qui est montré par les résultats des modules d'élasticité.

On observe un pic d'effort de flexion pour un même déplacement des bétons sans fibres. L'effet des fibres s'observe bien à travers les courbes d'évolution de l'effort de flexion en fonction du déplacement, on remarque une augmentation importante de l'intensité du pic de l'effort du bétons fibré BHPF.



**Figure 7 :** Evolution en flexion, de l'effort en fonction du déplacement, pour les différents BHP.

Dans le cas des BHP et BHPL (figure 8), on observe un pic de l'effort pour des ouvertures de l'ordre de 50  $\mu\text{m}$ . Ces pics faibles sont caractéristiques du comportement fragile de ces types de béton. A l'inverse, si l'on considère le matériau fibré, on observe une augmentation de l'intensité du pic de l'effort jusqu'à une ouverture de 400  $\mu\text{m}$  et il y a conjonction des effets d'engrènement et de pontage par les fibres.



**Figure 8 :** Evolution en flexion, de l'effort en fonction de l'ouverture des fissures, pour les différents BHP.

## 4. CONCLUSIONS

Les objectifs principaux de notre travail étaient, d'une part d'évaluer l'influence d'un renfort par un fibrage mixte en fibres métalliques et la substitution de 15% du ciment par du laitier granulé de hauts fourneaux sur les performances mécaniques.

L'ajout des fibres a entraîné une perte d'affaissement du BHPFM pour une même quantité de super plastifiant. Néanmoins, l'augmentation de la quantité d'adjuvant a conduit à l'amélioration de l'ouvrabilité de ce type de béton.

L'introduction des fibres ne modifie pas d'une façon significative le module d'élasticité, les BHP sans laitier granulé ni fibres développent des valeurs de coefficient de poisson légèrement plus élevées que celles des autres bétons, mais le BHPFM présente un coefficient de poisson important par rapport au BHPL, la présence des fibres a un effet significatif sur le comportement du béton au fendage.

L'analyse globale des résistances en compression montre des valeurs supérieures pour les bétons contenant du laitier granulé et des fibres comparativement à celles non fibrées.

A l'essai de flexion 4 points, le béton au laitier granulé renforcé de fibres d'acier affiche une amélioration de contrainte de rupture de 320% par rapport au béton témoin BHP et béton au laitier granulé BHPL non renforcé. L'ajout du laitier granulé n'a pas eu d'effet significatif sur les résistances à la flexion.

## 5. References:

- [1]. P-C. AÏTCIN, *Bétons hautes performances*, édition Eyrolles, (2001).
- [2]. G. ESCADEILLAS, *Les éco-matériaux dans la construction : enjeux et perspectives, septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF) 2B*, (2006).
- [3] Ezeldin A., Balaguru P., "Normal and high-strength fiber reinforced concrete under compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 4(4), pp. 415-429, 1982.
- [4] Rossi P., Acker P., Mailer Y., "Effect of steel fibers at two different stages: the material and structure", *Materials and Structures*, V. 20, pp. 436-439, 1987.
- [5] Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S., "Influence de la résistance à la compression et des fibres sur le comportement des bétons à la traction par fendage", XXIX<sup>ème</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.
- [6] Markovic I., Walraven J-C., Van Mier J-G-M., "Self-compacting hybrid-fibre concrete mix design, workability and mechanical properties", 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.
- [7] Pons G., Mouret M., Alcantara M., Granju J-L., "Mechanical behavior of self compacting concrete with hybrid fiber reinforcement", *Materials and structures*, vol. 40, n° 2, pp. 201-210, 2007.
- [8]. CHAID R., *Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux*, thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique, Alger, 2006.

[9] NF EN 206 (Nov. 2014), Béton -Spécification, performances, production et conformité (Indice de classement : P 18-325)

[10] Papworth F., "Use of Steel Fibers In Concrete", Presented at The Concrete Institute of Australia, NSW Branch, 1997.

[11] Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S., "Influence of the Rheology of Steel Fibers Reinforced Concretes on their Mechanical Properties" *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(4), 473-488,2009.