
Influence de la résistance à la compression et des fibres sur le comportement des bétons à la traction par fendage

Bensaid Boulekbache^{1*}, Mostefa Hamrat¹, Mohamed Chemrouk², Sofiane Amziane³

¹ Département de Génie Civil, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie.

² Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie.

³ Polytech'Clermont, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.

* bboulekbache@yahoo.fr, mhamrat@yahoo.fr, mchemrouk@yahoo.fr, sofiane.amziane@polytech.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de cet article est d'étudier l'effet de la résistance du béton et la présence des fibres métalliques sur la résistance au fendage et la ductilité des bétons fibrés. Les principaux paramètres du programme d'essai sont : la résistance à la compression, le dosage et l'élanement (longueur/diamètre) des fibres. Les résultats montrent que la présence des fibres et la résistance à la compression du béton ont un effet significatif sur le comportement du béton fibré au fendage. Les fibres se sont avérées plus efficaces dans les matrices à hautes résistances, en augmentant à la fois la charge ultime et la ductilité. Cette augmentation est attribuée à la bonne qualité d'adhérence entre les fibres et la matrice; une augmentation allant jusqu'à 70% a été enregistrée. Les résultats montrent l'existence de deux mécanismes de rupture, le premier est associé à une fissure centrale, le second à des fissures secondaires initiées au niveau des bandes de chargement après la fissure principale.

ABSTRACT. The aim of this paper is to study the effect of the concrete compressive strength and the presence of steel fiber on the splitting strength and the ductility of fiber-reinforced concretes. The main parameters of the testing program are: the compressive strength, the fiber volume and the aspect ratio (length/diameter) of the fibers. The results show that the fibers and the compressive strength of concrete have a significant effect on the behavior of fiber-reinforced concrete in splitting. The fibers were more effective in high-resistance matrix, increasing both ultimate load and ductility. This increase is attributed to the better quality bond between fibers and matrix; an increase of up to 70% was recorded. The results revealed the existence of two failure mechanisms; the first one is associated with a central unique crack, whereas the second with secondary cracks initiated at the bearing strip after the main one.

MOTS-CLÉS : béton, fibres, fendage, résistance, ductilité.

KEYWORDS: concrete, fibers, splitting, strength, ductility.

1. Introduction

L'essai de fendage connu aussi sous le nom d'essai brésilien est utilisé pour mesurer la résistance à la traction du béton. Cet essai a été proposé pour la première fois par Carneiro et Barcellos pendant la cinquième conférence de l'association brésilienne pour la normalisation en 1953 (Carneiro, 1953). Actuellement, cet essai est recommandé par la majorité des règlements internationaux tels que BS 1881-117 et ASTM C-496. Plusieurs travaux ont montré que l'essai de fendage est fiable, donnant des résultats raisonnables sur la résistance à la traction par rapport à l'essai de flexion. La résistance du béton mesurée lors de l'essai de fendage assez voisine (10 % près) de la résistance par traction directe.

L'avantage principal de l'essai de fendage est qu'il est facile à réaliser où une seule charge de compression est nécessaire. En appliquant une compression sur le plan médian d'un cylindre, une traction est générée perpendiculairement à l'effort appliqué selon le principe de poisson. Cette traction du matériau engendre des déformations localisées dans le plan diamétral situé entre les deux génératrices diamétralement opposés sur lesquelles s'applique l'effort. Les déformations sont dans un premier temps réparties, puis localisées autour de ce plan lorsque l'effort exercé augmente. L'objectif de cet article est d'étudier l'effet de la résistance du béton et la présence des fibres métalliques sur la résistance au fendage et la ductilité des bétons fibrés.

2. Programme expérimental

2.1. Matériaux utilisés

Trois types de bétons sont formulés selon les proportions indiquées au tableau 1. Les fibres utilisées sont des fibres métalliques munies de crochets à leurs extrémités de résistance à la traction de 1100 MPa. Dans cette étude, on a utilisé deux dosages volumiques en fibres 0,5 et 1 % et deux élancements de fibres 65 et 80.

Les bétons sont confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 100litres. Pour éviter la formation d'amas fibreux, les fibres sont introduites petit à petit après homogénéisation complète du béton. Les éprouvettes destinées aux essais sont des éprouvettes cylindriques 11x22 cm. Elles sont soumises à une vibration externe (table vibrante) sauf en ce qui concerne le béton auto-plaçant. Par la suite, les éprouvettes sont conservées dans une salle dotée d'une climatisation qui assure une température de 20 °C et une humidité relative de 90±5 %. Les résultats des essais des bétons à l'état frais sont présentés dans le tableau 1.

Désignations des spécimens :

- BO, BAP, BHP : désigne Béton Ordinaire, Auto-Plaçant et à Hautes Performances,
- BOF xx-yy, BAPF xx-yy, BHFP xx-yy : la lettre "F" désigne béton fibré,
xx désigne l'élancement des fibres, yy désigne le dosage des fibres.

	BO	BOF	BAP	BAPF	BHP	BHPF
Ciment (kg/m ³)	275	275	425	425	425	425
Fumée de silice (kg/m ³)	0	0	0	0	42,5	42,5
Filler Calcaire (kg/m ³)	90	90	200	200	90	90
Eau (kg/m ³)	178	178	192	192	161	161
Superplastifiant (kg/m ³)	0	1,95	5,10	7,22	4,25	6,75
Gravier 4/10 (kg/m ³)	910	900	825	814	825	814
Sable 0/4 (kg/m ³)	830	820	750	740	750	740
E/L	0,49	0,49	0,31	0,31	0,29	0,29
Affaissement (cm)	24	21	/	/	16	10
Étalement (cm)	/	/	70	65	/	/
Contrainte seuil (Pa)	45	/	36	/	120	/

Tableau 1. Formulation et caractéristiques rhéologiques des bétons testés

2.2. Description de l'essai

L'essai de fendage est exécuté selon la norme NF EN 12390-6. L'éprouvette cylindrique est comprimée le long de deux génératrices diamétralement opposées comme le montre la figure 1. Pour éviter une rupture locale en compression au niveau des génératrices de chargement et répartir la charge appliquée, deux bandes minces en contreplaqué neuf d'une largeur de 10 mm, d'une épaisseur de 4 mm et d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette, sont placées entre les plateaux de chargement et l'éprouvette. Un des avantages de l'essai de fendage est que le même type d'éprouvette est utilisé à la fois pour les essais de compression et de traction.

Cette configuration induit un effort de traction uniforme le long du plan diamétral situé entre les deux génératrices. Les déformations se localisent rapidement par l'apparition, le plus souvent, d'une seule fissure transversale dans la zone du plan diamétral sollicité, la rupture est caractérisée par le fendage de l'éprouvette en deux moitiés à travers le plan diamétral (figure 1) (Rocco, 1999). La mise en charge s'effectue avec une vitesse constante de 0,05 MPa/s. La contrainte maximale de traction par fendage (f_{tr}), perpendiculaire au diamètre sollicité, est évaluée selon l'équation :

$$f_{tr} = \frac{2P}{\pi DL} \quad [1]$$

P : la charge appliquée, D, L : diamètre et longueur de l'éprouvette.

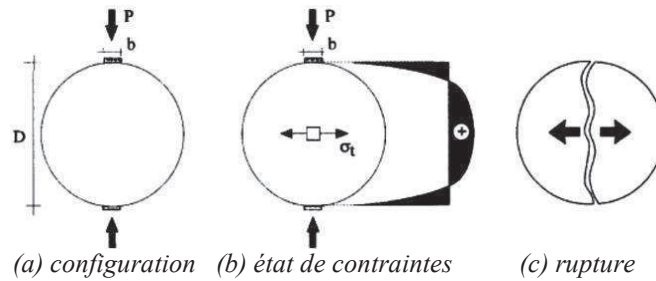


Figure 1. Essai de fendage

2.3. Mesure de contraintes et déplacements

Une presse hydraulique a été utilisée pour la sollicitation des éprouvettes. Les plateaux de la presse ont été adaptés et équipés de bandes de contreplaqué de 4 mm d'épaisseur et de 10 mm de largeur constituant la surface d'appui des plateaux sur l'éprouvette (figure 2). La charge appliquée et les déplacements latéraux mesurés sur une face de l'éprouvette par un LVDT sont enregistrés par un système d'acquisition. Sur l'autre face, une caméra numérique "Aramis" a été utilisée pour la détection de la première fissuration, la mesure de l'ouverture des fissures et le suivi du processus de la fissuration du matériau. Cette technique est basée sur l'analyse par corrélation d'images permet de suivre l'évolution des fissures. Le dispositif comprend une caméra couplée à une carte d'acquisition permettant de stocker les images prises. Les images de 2048x2048 pixels correspondent à la zone utile de l'éprouvette à chaque palier de chargement. Chaque image représente alors un état de déformation.

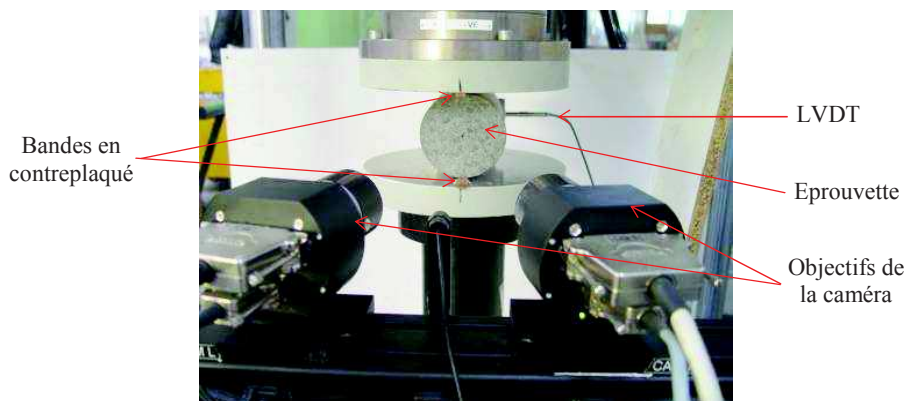


Figure 2. Essai de fendage d'une éprouvette cylindrique

3. Résultats et discussions

Dans le tableau 2 sont regroupés les résultats des résistances et des indices de ductilité des différents essais. La ductilité est la propriété visée dans les essais; pour l'évaluer, des indices de ductilité I_5 , I_{30} sont calculés selon la norme ASTM C 1018. On constate que la résistance au fendage est améliorée avec l'utilisation des fibres particulièrement pour les BAP et BHP en raison de la meilleure adhérence fibre-matrice. Les écarts types des essais varient entre 1 et 3 %. Les bétons étudiés se différencient par leur résistance à la compression (29, 61 et 80 MPa pour le BO, BAP et BHP respectivement). Une diminution de la résistance à la compression a été enregistrée et a légèrement diminué de 3 à 10 % (Boulekbache, 2010).

	Résistance à la compression fc_{28} (MPa)	résistance au fendage (MPa)	variation/au témoin	Résistance à la 1 ^{ère} fissure (MPa)	I_5	I_{30}
BO	29,3	2.82	/	/	1	1
BOF 35-0.5	27,0	3.09	9 %	2.09	4.7	28.0
BOF 35-1	28,4	3.50	43 %	2.14	5.3	32.6
BOF 60-0.5	28,3	3.13	37 %	2.11	4.9	30.1
BOF 60-1	28,5	3.24	40 %	2.37	5.2	31.4
BAP	61,3	4.57	/	/	1	1
BAPF 35-0.5	57,1	6.70	15 %	3.55	5.1	32.4
BAPF 35-1	53,6	7.43	41 %	4.10	6.6	40.3
BAPF 60-0.5	56,7	6.38	9 %	3.71	5.2	31.2
BAPF 60-1	54,6	6.90	31 %	3.95	6.5	41.5
BHP	82,6	4.57	/	/	1	1
BHPF 35-0.5	79,1	6.70	41 %	4.05	5.3	30.4
BHPF 35-1	78,8	7.73	59 %	4.80	6.3	35.9
BHPF 60-0.5	73,9	6.38	34 %	4.34	5.3	31.3
BHPF 60-1	72,2	6.99	45 %	4.75	6.1	33.2

Tableau 2. Résistances et déplacements de l'essai de fendage

3.1. Comportement mécanique au fendage

La figure 3 illustre les courbes contrainte-déplacement latéral pour les trois types de béton. La contrainte à la première fissuration n'est pas affectée par le volume de fibre, par contre la résistance ultime est considérablement influencée. On enregistre des augmentations variant de 15 à 40 % pour un dosage volumique de 0,5 % et de 40 à 60 % pour un dosage volumique de 1 %. Les fibres d'élanement 65 sont plus efficaces pour de faibles ouvertures de fissures, par contre celles avec un élanement de 80 sont efficaces pour des grandes ouvertures de fissures comme le montre la figure 3. L'expression [2] trouvée par (Ashour, 1992) exprimant la résistance par

fendage (f_{ff}) d'un composite en fonction de la résistance de la matrice (f_f) et le volume des fibres (V_f) fonctionne correctement sur nos essais.

$$f_{ff} = f_f + 3.02 V_f \quad (\text{MPa}) \quad [2]$$

La ductilité des bétons fibrés a été analysée par deux indices de ductilité I_5 et I_{30} , (tableau 2). La ductilité des bétons a été nettement améliorée par la présence des fibres. Par ailleurs la ductilité des BHP fibrés est supérieure à celle des bétons ordinaires; attribuée à la bonne adhérence fibres-matrice des BHP.

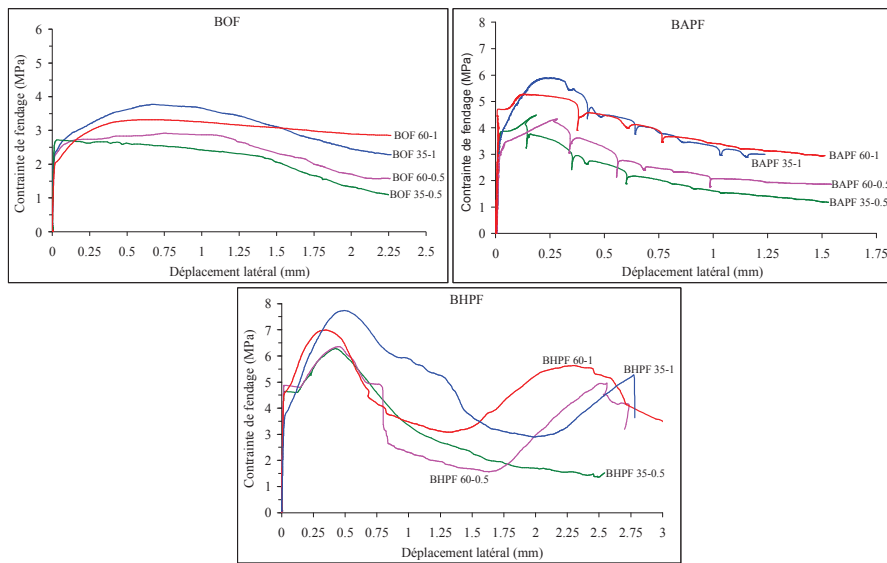


Figure 3. Courbes contrainte-déplacement des différents types de béton

3.2. Evolution de la fissuration des éprouvettes

La cartographie des fissures est réalisée par la caméra numérique, les images de la figure 4 montrent l'évolution de la fissuration des éprouvettes selon le type de béton. Nous constatons que les fissures obtenues pour les bétons non fibrés sont rectilignes. Généralement une fissure est initiée au centre de l'éprouvette et se propage le long du diamètre sollicité vers les points de chargement. L'ouverture de la fissure augmente ainsi que sa longueur, lorsque le déplacement latéral augmente. La rupture étant brutale et fragile surtout pour les BHP (figure 5).

Pour les bétons fibrés, la fissure principale commence au centre de l'éprouvette et se propage le long du plan de la symétrie vers les bandes de chargement. Cette fissure demeure très souvent la fissure principale d'ouverture plus importante au centre, même si souvent d'autres fissures connexes apparaissent. Une fois que la

fissure principale s'est prolongée le long du plan de symétrie de l'éprouvette (déplacement latéral $\delta > 200 \mu\text{m}$), des fissures connexes obliques apparaissent au niveau des deux côtés des bandes de chargement, mais leurs longueurs et ouvertures sont faibles (figure 6). L'origine de ces fissures est la localisation de contraintes de traction maximales au niveau des appuis. Ces fissures se développent en profondeur parallèlement à la fissure principale. A la fin de l'essai, le développement des fissures connexes devient asymétrique, l'ouverture de la fissure principale est très importante et par la suite l'éprouvette est fendue en deux demi-cylindres.

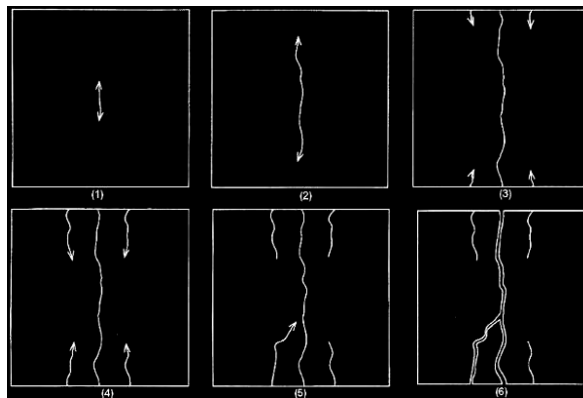


Figure 4. : Séquence de rupture par fendage des bétons fibrés

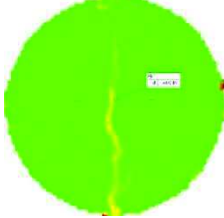
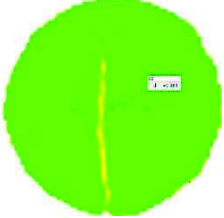
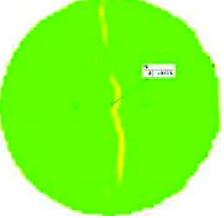
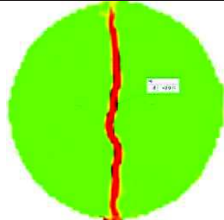
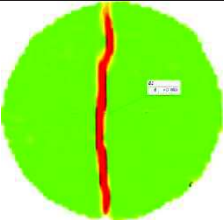
BO	BAP	BHP
 <p>F= 83 kN, $\delta = 14 \mu\text{m}$</p>	 <p>F= 123 kN, $\delta = 14 \mu\text{m}$</p>	 <p>F= 170 kN, $\delta = 15 \mu\text{m}$</p>
 <p>F= 90 kN, $\delta = 74 \mu\text{m}$</p>	 <p>F= 153 kN, $\delta = 88 \mu\text{m}$</p>	

Figure 5. Cartographie de la fissuration apparente sur la face d'une éprouvette des bétons non fibrés

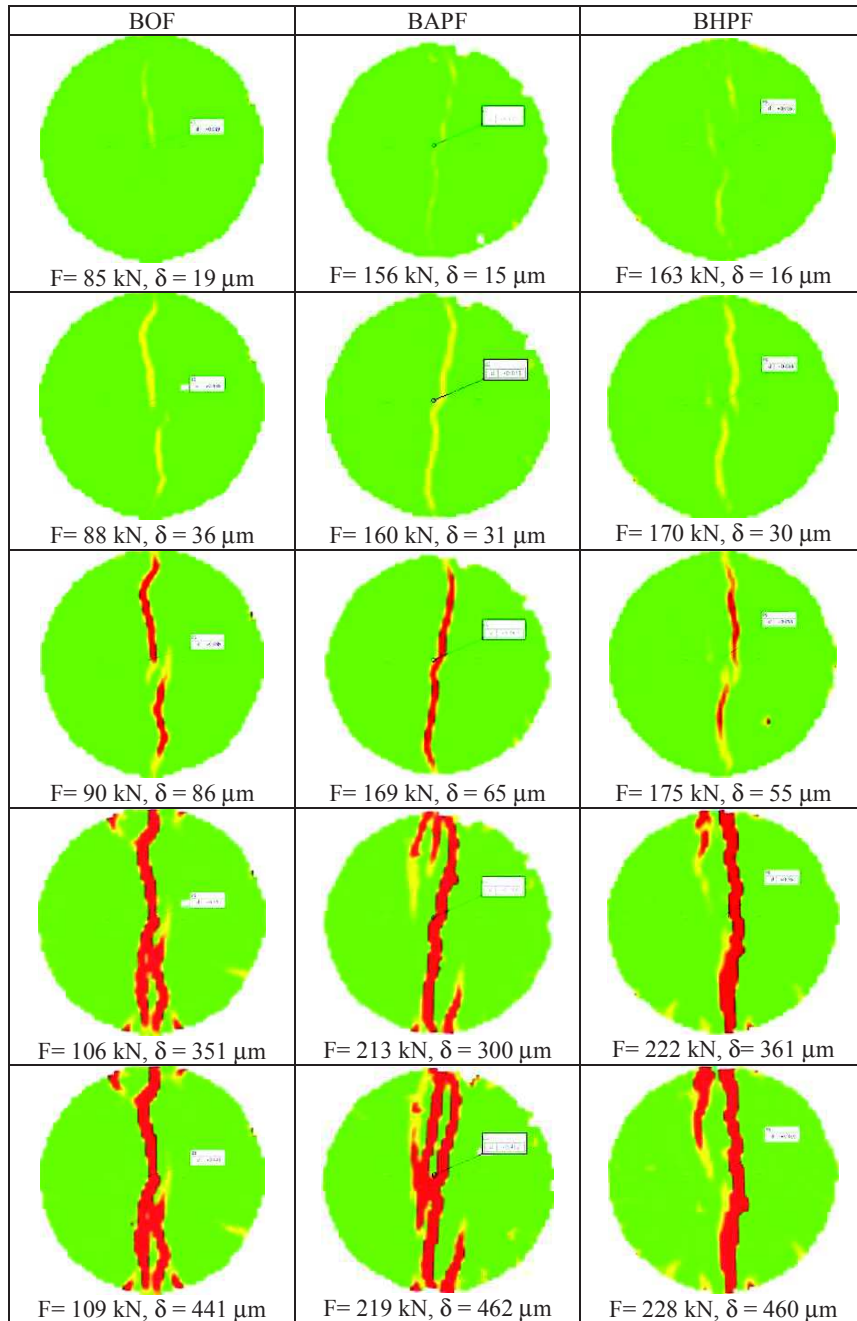


Figure 6. Cartographie de la fissuration apparente sur la face d'une éprouvette des bétons fibrés

3.3. Relation entre les résistances au fendage et à la compression

L'approche empirique traditionnelle pour estimer la résistance de traction par fendage f_{tf} consiste à déduire cette propriété en fonction de la résistance à la compression f_c , selon une loi de puissance de type (Zain, 2002) :

$$f_{tf} = m(f_c)^n \tag{3}$$

m et n sont des paramètres d'ajustement, $0.5 \leq n < 0.7$ et $0.3 \leq m \leq 0.6$.

D'après nos résultats, le rapport (f_c/f_{tf}) varie de 15 à 17 pour les bétons à hautes résistances. Au contraire, pour les bétons fibrés, ce rapport varie de 8 à 10 pour les bétons ordinaires et de 10 à 12 pour les bétons à hautes résistances. Une corrélation entre la résistance au fendage f_{tf} à celle de compression f_c peut être aisément déduite.

- Béton non fibré : $f_{tf} = 0.330f_c^{0.61}$ ($R^2 = 0,97$) [4]

- Béton fibré : $f_{tf} = 0,246f_c^{0,79}$ ($R^2 = 0,89$) [5]

Dans le tableau 3 sont représentées les résistances par fendage f_{tf} en fonction des résistances aux compressions f_c calculées à partir de différentes prédictions. L'écart entre les résultats expérimentaux et les prédictions a été évalué par l'erreur intégrale absolue (IAE) exprimée par la relation suivante :

$$IAE = \sum \frac{|f_{tfi} - P_{tfi}|}{\sum f_{tfi}} \times 100 \tag{6}$$

f_{tfi} : résistance au fendage expérimentale, P_{tfi} : résistance au fendage théorique.

	Source	Equation	Plage de résistance (MPa)	Erreur intégrale absolue (IAE)
(1)	CEB-FIB 1991	$f_{tf} = 0,3(f_c)^{2/3}$	$f_c < 83$	14.8
(2)	ACI 318-99	$f_{tf} = 0,56(f_c)^{0,5}$	/	12.8
(3)	Carino et Lew 1972	$f_{tf} = 0.272(f_c)^{0.71}$	/	23.2
(4)	Arioglu 2006	$f_{tf} = 0,231(f_c)^{0,661}$	$15 \leq f_c < 120$	20.2
(5)	Akazawa	$f_{tf} = 0,209(f_c)^{0,73}$	/	5.8
(6)	Carneiro et Barcellos	$f_{tf} = 0,185(f_c)^{0,735}$	/	7.7
(7)	Oluokun 1991	$f_{tf} = 0,21(f_c)^{0,7}$	/	8.5

Tableau 3. Résistance au fendage en fonction de celle à la compression

En comparant les différentes équations, l'équation de régression ayant la plus petite valeur de l'IAE est jugée comme la plus fiable. Une gamme de l'IAE de 0 à 10 % est considérée comme la limite pour une équation de régression acceptable [Arioglu, 2006]. Nous constatons que les équations (5), (6) et (7) fournissent des valeurs de l'IAE inférieures à 10, les autres sont au-dessus de 10%, ce qui prouve que ces relations empiriques ne sont pas applicables aux BFM.

4. Conclusions

A partir des résultats des essais, on peut tirer les conclusions suivantes :

- 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. L'augmentation de la résistance à la traction par fendage varie de 15 à 40 % pour un dosage volumique en fibres de 0,5 % et de 40 à 60 % pour un dosage de 1 %.
- La ductilité est la propriété principale visée pour pallier au comportement fragile des bétons, particulièrement les BHP. Les résultats ont montré que le comportement post pic a été nettement amélioré.

5. Bibliographie

- Arioglu N., Girgin Z.C., Arioglu E., « Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concrete up to 120 MPa and its application in strength criterion », *ACI Structural Journal*, vol. 103, n° 1, 2006, p. 18-24.
- Ashour S.A., Wafa F.F., « Mechanical properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete », *ACI Structural Journal*, vol. 89, n° 5, 1992, p. 449-455.
- Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S., « Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material ». *Construction and Building Materials*, vol. 24, n° 9, 2010, p. 1664-1671.
- Carneiro F.L., Barcellos A., « Tensile strength of concretes », *RILEM Bulletin*, n° 13, 1953, p. 97-123.
- Rocco C., Guinea G.V., Planas J., Elices M., « Mechanism of Rupture in Splitting Test », *ACI Materials Journal*, vol. 96, n° 1, 1999, p. 52-60.
- Zain M.F.M., Mahmud H.B., Ilham, A., Faizal, M., « Prediction of splitting tensile of high-performance concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 8, 2002, p. 1251-1258.