

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

CONTRIBUTION DES FIBRES D'ACIER À LA RÉSISTANCE À L'EFFORT TRANCHANT DES POUTRES EN BÉTON À HAUTES PERFORMANCES

TAHENNI Touhami ^A, CHEMROUK Mohamed ^B, LECOMPTE Thibaut ^C

A Université Djilali Bounaama, Khemis Miliana, Algérie.

B Laboratoire Bâtit dans L'Environnement, Université des Sciences et de la Technologie, Houari Boumedienne, Alger, Algérie.

C Institut de Recherche Dupuy de Lôme, Université de Bretagne Sud, Lorient, France.

Résumé : La rupture par effort tranchant d'une poutre en béton armé est affectée par un nombre important des paramètres dont le rapport portée de cisaillement sur hauteur utile est le plus important. Les autres paramètres par ordre d'importance sont : la résistance à la compression du béton, le pourcentage des armatures longitudinales, les types d'agrégat et la présence des aciers transversaux. L'ajout des fibres d'acier dans le béton représente un autre paramètre qui contribue à résister à l'effort tranchant et l'on se propose d'étudier quantitativement et qualitativement cette contribution.

Des essais de flexion quatre points ont été réalisés sur des poutres en béton à hautes performances avec et sans fibres d'acier, et avec et sans armatures transversales, avec une géométrie de chargement telle qu'un comportement en effort tranchant serait dominant pour ces éléments de structure. La zone critique à l'effort tranchant a été constamment enregistrée par une caméra numérique pendant le chargement et les données analysés par le logiciel Gom-Aramis afin d'étudier les déformations du matériau dans cette zone ainsi que l'évolution des fissures diagonales. Ce dispositif de mesure à l'avantage d'enregistrer les data jusqu'à la rupture. Un modèle mathématique a été proposé pour prédire la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton à hautes performances, et basé sur toutes les observations expérimentales faites dans le présent travail. Les résultats expérimentaux montrent que le comportement à l'effort tranchant des poutres sans armatures transversales et renforcées en fibres d'acier est similaire, sinon meilleure, à celui des poutres avec armature ordinaire de cisaillement et sans fibres d'acier.

Mots-clés : fibres d'acier, béton à hautes performances, résistance à l'effort tranchant, fissuration diagonale, flexion, ductilité.

1. INTRODUCTION

Le comportement à l'effort tranchant du béton à hautes performances (BHP) reste insuffisamment investigué comparativement à la littérature abondante sur le béton ordinaire. Sur l'aspect comportement à l'effort tranchant, il est utile de noter que cette sollicitation en béton armé est un sujet qui continue de susciter beaucoup d'intérêt et ce malgré l'abondance de la littérature existante. Le présent travail conduirait à des recommandations pour améliorer le comportement des poutres en BHP vis à vis de l'effort tranchant et donc parfaire les performances de l'environnement bâti afin de répondre aux exigences d'un développement durable. En particulier, le risque d'une fissuration excessivement ouverte qui pourrait conduire à des problèmes de durabilité à long terme ou même à des ruptures prématurées serait grandement réduits. Il a été souvent reporté dans la littérature (Pendyala et Mendis.,2000, Johnson et Ramirez.,1989, Cladera et Mari.,2005) que le BHP n'est pas suffisamment résistant aux sollicitations d'effort tranchant du fait que les fissures inclinées sont relativement lisses et trans-granulaires avec peu d'engrenage entre les particules d'agrégats, traduisant une faible contribution de ces agrégats à l'effort tranchant du matériau à travers l'effet d'engrenage. En l'absence d'un engrènement suffisant des agrégats, la fissuration du BHP apparait sous forme d'une fracture droite qui s'élargie en ouverture avec le chargement et donc a besoin d'être couturée par des fibres d'acier ajoutées au mélange béton de la même manière que les agrégats dans le but d'améliorer le comportement à l'effort tranchant. Dans ce travail, ce sont plutôt les fibres d'aciers qui ont été utilisées pour leur qualité d'adhérence relativement meilleure en raison des crochets à leurs extrémités et pour leur performance en ductilité du fait que l'acier est relativement plus ductile que les autres matériaux pouvant donner des fibres. Dans ce sens, les paramètres d'étude principaux sont la fraction volumique des fibres, leur élancement représenté par le rapport de leur longueur sur leur diamètre et la présence des aciers transversaux.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Caractéristiques des ingrédients du béton

Le béton utilisé pour préparer les spécimens de poutres de la présente étude, est fabriqué à partir des constituants suivants:

Le granulat a consisté en un quartz concassé de classe granulaire 4/15 mm. Ce gravier présente une demande en eau de l'ordre de 2 à 3% de sa masse.

Un sable roulé de la région de Loire de classe granulaire 0 /4 (mm) a été utilisé. Le module de finesse de ce sable a été mesuré à une valeur comprise entre 2.9 et 3.1. Ce sable présente par ailleurs une demande en eau inférieure à 0.5% de sa masse.

Le ciment utilisé est de type CEM I 52.5 N CE CP2 NF qui a été fourni par le groupe Lafarge (cimenterie de St Pierre La cour de Laval-France). La masse volumique de ce ciment est de 3160 kg/m^3 , sa granulométrie est comprise entre 0 et $100 \mu\text{m}$ et sa surface spécifique est de $3520 \text{ cm}^2/\text{g}$, donc rentrant dans la gamme des ciments pouvant formuler un BHP.

Le laitier des hauts fourneaux a été fourni par l'entreprise Ecocem en France. Ce laitier a été micronisé (broyé très finement), afin d'obtenir un D50 de $5.97\mu\text{m}$ et une surface spécifique de $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Le type de filler calcaire utilisé dans la formulation du béton, est du «Betocarb@HP-EB », fabriqué par le Groupe Omya-Meac en France. Son utilisation répond beaucoup plus à un besoin d'augmenter la pâte de béton frais à l'intérieur de laquelle se déplaceront les fibres sans beaucoup de gêne par les granulats.

Pour gâcher les différents types de bétons, l'eau potable de robinet a été utilisée.

Les fibres d'acier utilisées pour le renforcement du béton, sont des fibres Dramix, fabriquées par la société Bekaert en Belgique, à partir de fil d'acier tréfilé. Elles comportent des crochets aux deux extrémités, pour améliorer leurs ancrages dans le béton, et sont accolées en plaquettes au moyen

d'une colle à base d'acétate de polyvinyle (Figure 1), qui se dissout facilement au contact de l'eau de gâchage. Les fibres présentent une résistance à la traction de 1100 MPa. Deux types de fibres d'acier ont été utilisés dans le présent travail : Type 1 (65 /35) et Type 2 (80 /60)

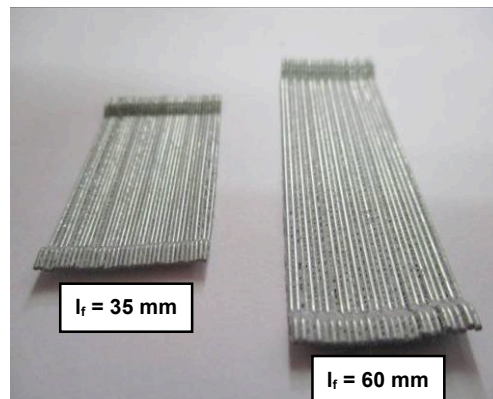


Figure 1 : Fibres d'acier utilisées

Les différentes compositions, qui ont servi à formuler les bétons de cette étude expérimentale, sont définies dans le Tableau 1. Les compositions ont été optimisées en vue de satisfaire à la fois une ouvrabilité conforme aux recommandations usuelles, et un comportement mécanique adéquat du béton à l'état durci, c'est-à-dire des résistances en compression et en traction qui avoisinent les valeurs visées.

Béton	Fibres ρ_f (%)	Gravier (4/15)	Sable (0/4)	Ciment	Laitier (10%)*	Filler calcaire (23%)*	Fibres d'acier	Eau	Adjuvant	E/C	Maniabilité (Cm)
BHP	0	1029	700	382.5	42.5	90	0	148.8	9.56 (2.5%)*	0.38	15
BHPF-0.5-35	0.5	1015.5	700	382.5	42.5	90	39	148.8	11.47 (3%)	0.38	25
BHPF-1-35	1	1002	700	382.5	42.5	90	78	148.8	11.47 (3 %)	0.38	19
BHPF-1-60	1	1002	700	382.5	42.5	90	78	148.8	11.47 (3 %)	0.38	19
BHPF-2-35	2	975	700	382.5	42.5	90	156	148.8	11.47 (3 %)	0.38	16
BHPF-2-60	2	975	700	382.5	42.5	90	156	148.8	11.47 (3 %)	0.38	16
BHPF-3-35	3	948	700	382.5	42.5	90	234	148.8	11.47 (3%)	0.38	17

* Par poids du ciment Notations : BHP : Béton à Hautes Performances BHPF 1-35 : Béton à Hautes Performances Fibré ayant une fraction volumique de fibres $\rho_f = 1 \%$ et une longueur de fibres $l_f = 35$ mm.

Tableau 1: Ingrédients du mélange des bétons (kg par m³ de béton frais).

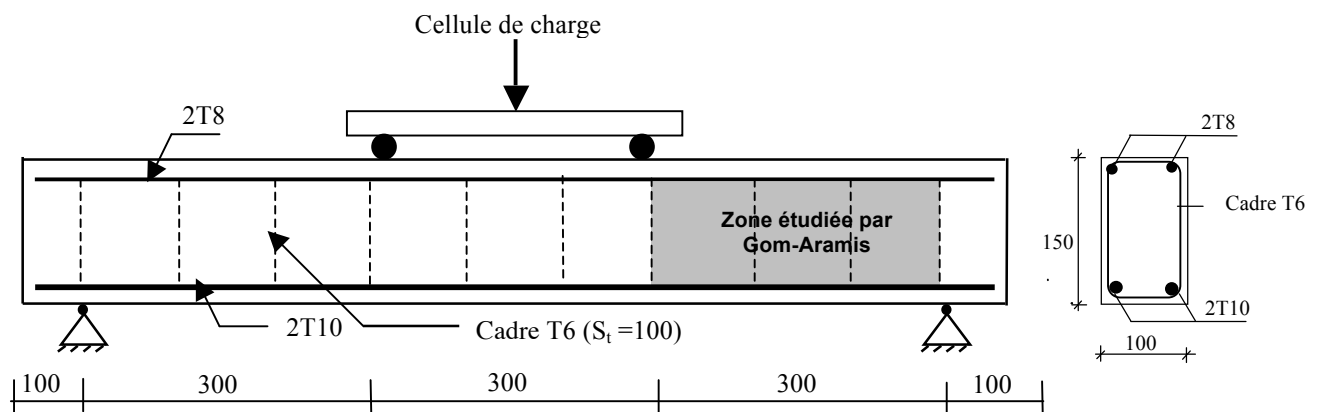
2.2. Description des poutres

Un total de 22 poutres en béton armé à hautes performances avec et sans fibres d'acier, divisées en huit séries ont été testées pour répondre aux objectifs tracés dans ce travail : Une série de poutres contenant des armatures transversales sous forme de cadres et ne contenant pas de fibres d'acier, et sept autres séries de poutres sans armature transversales mais contenant des fibres d'acier à différentes quantités et différentes longueurs. Chaque série de poutres consiste en deux à trois spécimens identiques pour travailler sur la base de valeurs moyennes.

Toutes les poutres avaient une section rectangulaire de 100x150mm et une portée de 900 mm (Figure 5(a)). Les armatures longitudinales consistaient en deux barres à haute adhérence de 10 mm de diamètre placées avec un enrobage de 10 mm pour donner une hauteur effective $d = 135$ mm. Il est à noter que la géométrie d'application des charges était telle que le rapport portée de

cisaillement sur hauteur effective, maintenu constant à $a/d = 2.2$, était dans l'intervalle qui induirait un comportement à dominance effort tranchant pour les poutres sous chargement.

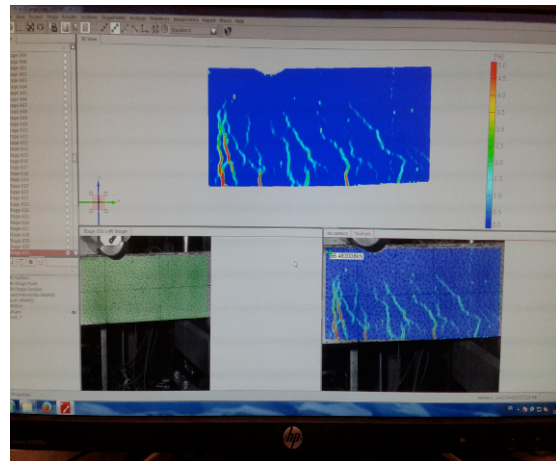
Les spécimens de poutres sont placés sur un bâti approprié pour être soumises à la flexion quatre points. Il s'agit d'une machine Zwick/Roell équipée d'un vérin hydraulique. La machine se compose d'une traverse supérieure mobile et d'une traverse inférieure qui permet de mettre en place les spécimens d'épreuve. La charge du bâti de flexion de la presse d'essai est limitée à 250 kN. La charge est appliquée de façon monotone croissante jusqu'à la rupture de la poutre. La poutre est posée sur deux appuis, un appui fixe et l'autre mobile. Un capteur de déplacement LVDT de 100 mm de course a été placé au milieu de la poutre dans la face tendue, pour mesurer les flèches à mi-portée. Une caméra numérique Aramis a été utilisée pour enregistrer le champ de déformation des points d'un mouchetis sur toute la zone de la poutre étudiée, ainsi que l'évolution des fissures lors de l'essai (Figure 5(b)). L'analyse des champs de déformation et de l'évolution des fissures est effectuée par un logiciel Gom-Aramis (Figure 5(c)) pour aboutir aux déformations et aux ouvertures de fissures.



(a)- Détail et renforcement des spécimens de poutres (dimension en 'mm')



(b) - Zone d'effort tranchant étudiée par la caméra numérique



(c)- Analyse d'image par logiciel Gom-Aramis

Figure 5 : Essai de flexion quatre-points

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

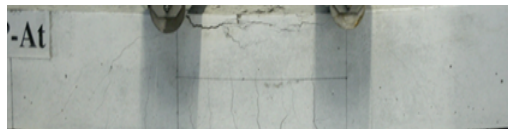
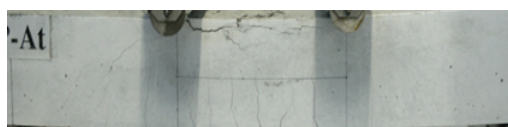
3.1. Fissuration et mode de rupture des poutres

Les premières fissures à apparaître sont toujours celles en flexion dans la région où le moment est maximum. Avec d'avantage de chargement (60 à 70% de la charge ultime), les fissures diagonales se forment dans la région d'effort tranchant dans la direction de l'appui et du point de chargement. Avec la présence des fibres d'acier, les fissures diagonales sont retardées et apparaissent à des charges relativement élevées par comparaison à celles dans les poutres sans fibres ou avec des quantités plus faibles de fibres (Tableau 2). Les fissures finissent par pénétrer dans la zone de compression sous le point de chargement et précipitent l'écrasement du béton à cet endroit critique (Figure 6(a)). Avec la présence d'une quantité élevée de fibres (2% et 3%), les fissures diagonales sont efficacement restreintes jusqu'à entraîner un changement de mode de rupture par effort tranchant sous forme d'une fracture diagonale d'une manière fragile et brutale (Figure 6(b)) en une rupture par flexion d'une manière souple et ductile pour des poutres conçues pour se rompre en effort tranchant, comme c'est le cas des poutres BHPF-2-35-SAt, BHPF-2-60-SAt et BHPF-3-35-SAt des Figures 6f, 6g, et 6h respectivement. La rupture s'est aussi produite par effort tranchant mais d'une manière plus souple et ductile à un niveau de chargement relativement plus élevé en présence d'une quantité insuffisante de fibres comme dans les séries BHPF-0.5-35-SAt et BHPF-1-35-SAt.

Identification des poutres	Nombres de poutres	a/d	ρ (%)	ρ_w (%)	ρ_f (%)	l_f (mm)	l_f/d_f	P_d (kN)	P_u (kN)	Mode de rupture
BHP-At	03	2.2	1.16	0.56	0.0	/	/	63.70	86.18	F-T
BHP-SAt	03	2.2	1.16	0.00	0.0	/	/	49,77	59.71	T
BHPF-0.5-35-SAt	03	2.2	1.16	0.00	0.5	35	65	41.43	86.21	T
BHPF-1-35-SAt	03	2.2	1.16	0.00	1.0	35	65	61.33	90.25	F-T
BHPF-1-60-SAt	03	2.2	1.16	0.00	1.0	60	80	61.30	97.75	F-T
BHPF-2-35-SAt	03	2.2	1.16	0.00	2.0	35	65	60.76	92.87	F
BHPF-2-60-SAt	02	2.2	1.16	0.00	2.0	60	80	70.79	105	F
BHPF-3-35-SAt	02	2.2	1.16	0.00	3.0	35	65	67.48	110.32	F

ρ = % d'armature longitudinale ρ_w = % d'acier transversal; ρ_f = % de fibres, l_f = longueur de fibres
 l_f/d_f = élanement de fibres (longueur /diamètre) P_d = charge de fissuration diagonale, P_u = charge ultime.
 BHP-At : poutre en Béton à Hautes Performances Avec armatures transversales.
 BHPF-1-35-SAt : poutre en Béton à Hautes Performances Fibré ayant une fraction volumique de fibres $\rho_f = 1\%$ et une longueur de fibres $l_f = 35$ mm, et Sans Armatures transversales.
 Notation des modes de rupture: T= Effort tranchant, F= Flexion, F-T= combinaison flexion – effort tranchant

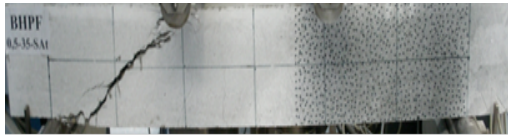
Tableau 2: Charges de fissuration diagonale et charges ultimes des poutres testées



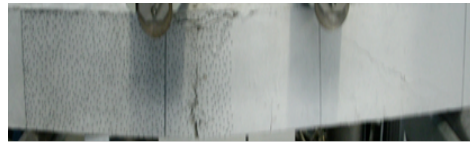
(a)- Rupture des poutres BHP-At

(b)- Rupture des poutres BHP-SAt

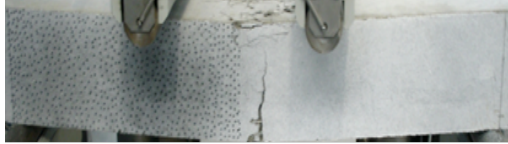




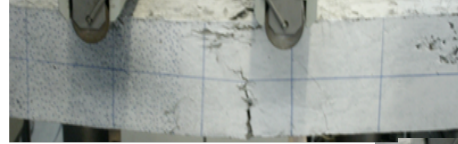
(c)- Rupture des poutres BHPF-0.5-35-SAt



(d)- Rupture des poutres BHPF-1-35-SAt



(e)- Rupture des poutres BHPF-1-60-SAt



(f)- Rupture des poutres BHPF-2-35-SAt



(g)- Rupture des poutres BHPF-2-60-SAt



(h)- Rupture des poutres BHPF-3-35-SAt



Figure 6 : Mode de rupture des spécimens de poutres.

3.2. Ouvertures des fissures diagonales

L'évolution des ouvertures maximales de fissures diagonales avec le chargement est illustrée en Figure 7. Les différentes courbes montrent clairement que lorsque les fibres d'acier sont utilisées, les ouvertures des fissures diagonales étaient très étroites et n'ont pas dépassé la limite de servicibilité de fissuration (0.3 mm) et ce jusqu'à la rupture comme dans les poutres BHPF-2-35-SAt et BHPF-3-35-SAt. Généralement les fissures diagonales sont restées très étroites par comparaison à celles des poutres sans fibres ni aciers transversaux (BHP-SAt). Les fibres ont aussi retardé l'apparition de ces fissures comme illustrée par les résultats du Tableau 4. Ceci est en concordance parfaite avec les résultats reportés dans la littérature (Swamy et al., 1993, Lim et Oh., 1999, Li et Leun., 1992, Meda et al., 2005). Les fibres d'aciers semblent donc être très utiles en BHP dans le but d'améliorer sa servicibilité dans les structures réelles, un critère de conception crucial du fait que souvent un excès d'ouvertures de fissures est responsable pour de nombreuses pathologies de constructions qui nécessitent des réparations et peuvent à l'extrême conduire à la rupture quand elles ne sont pas correctement traitées.

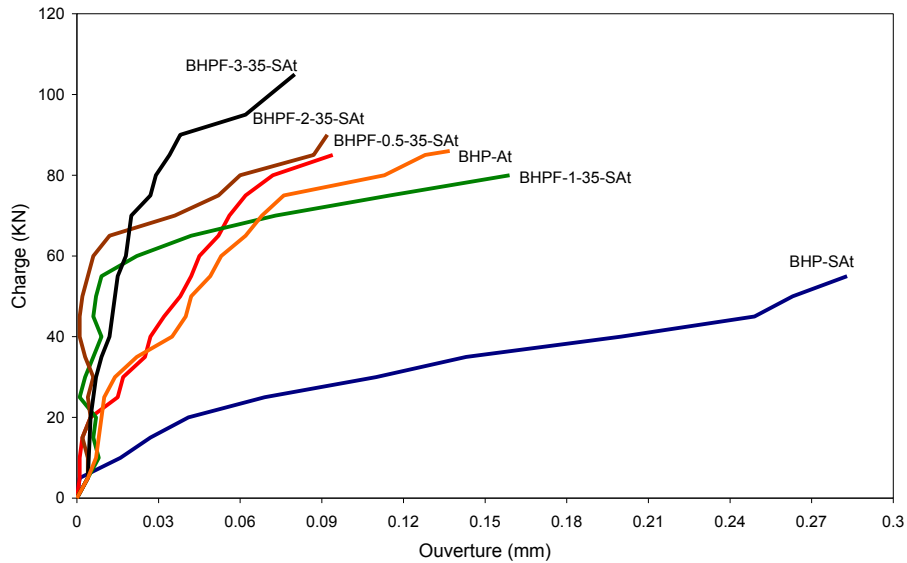
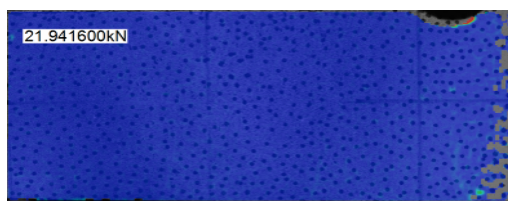
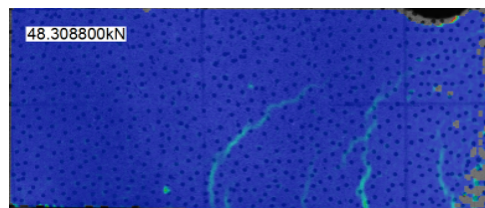


Figure 7: Ouvertures maximales des fissures diagonales des poutres testées.

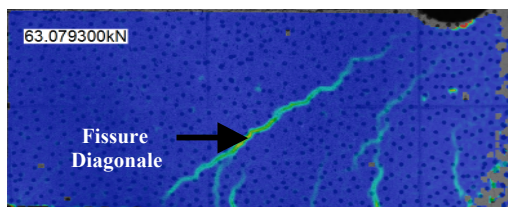
Une séquence typique de développement de fissure diagonale d'une poutre renforcée en fibres d'acier, est illustrée en Figure 8. Les photos présentées dans cette figure sont obtenues par analyse Gom-Aramis des images digitales de la vidéo.



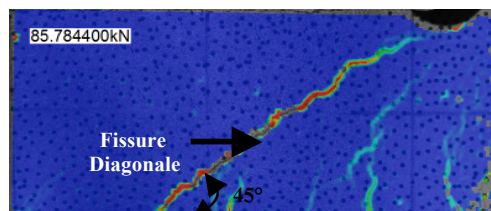
A 24 % de la charge ultime- pas de fissure dans la zone d'effort tranchant



A 53 % de la charge ultime- fissure inclinée (ouverture de 0.01mm)



A 70 % de la charge ultime- fissure diagonale (ouverture de 0.04 mm)



Juste avant rupture (ouverture de 0.016 mm)

Figure 8: Séquence de développement d'une fissure diagonale dans la zone d'effort tranchant.

3.2. Flèches des poutres

Dans la présente étude, les flèches des poutres ont été mesurées au fur et à mesure que le chargement augmente et ce jusqu'à rupture des spécimens. La Figure 9 ci-dessous, présente les courbes charge-flèche pour les poutres en BHP renforcées en fibres d'acier.

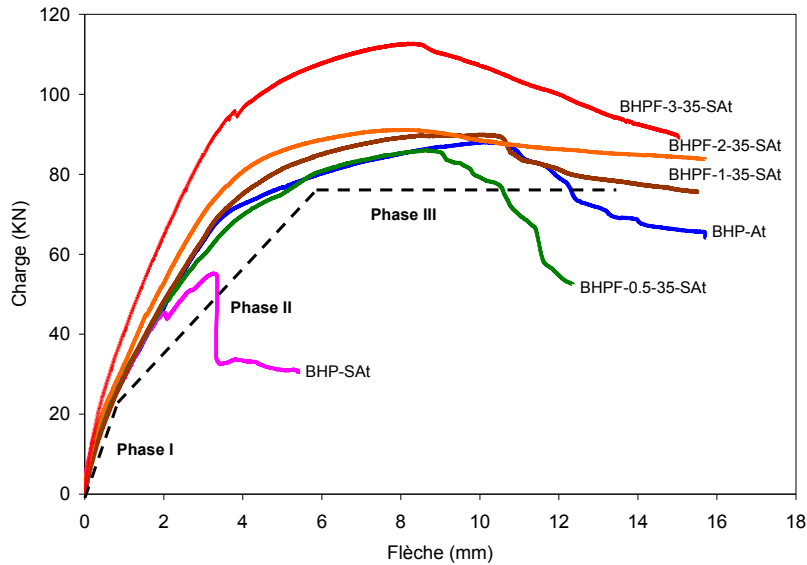


Figure 9: Evolution de la flèche pour différentes poutres en BHP avec et sans fibres d'acier.

A partir des courbes charge-flèche, on peut lire un comportement en trois phases pour les spécimens de poutres contenant des fibres d'acier ou des armatures transversales comme renforcement d'âme :

- Une phase quasi-linéaire avant l'apparition de la première fissure. Dans cette partie on ne note pas une variation de la rigidité en flexion pour toutes les poutres. En accord avec les conclusions d'autres études (Narayanan et Darwish., 1987, Lim et Oh., 1999, Furlan et de Hanai., 1997) l'évolution de la rigidité avant fissuration ne semble pas dépendre des fibres puisque toutes les courbes se superposent ou presque.
- Une deuxième phase de linéarité avec rabattement des courbes suite à une réduction des rigidités, conséquence de l'apparition des premières fissures de flexion. Au-delà du début de la fissuration, et pour le même niveau de chargement, on constate moins de flèches pour les poutres à fort dosage en fibres, traduisant une rigidité relativement meilleure due à une fissuration couturée et donc gardée très fine par les fibres. Ce résultat est en accord avec les conclusions reportées dans la littérature (Narayanan et Darwish., 1987, Lim et OH., 1999, Furlan et de Hanai., 1997) qui stipulent que la rigidité post-fissuration peut être augmentée par la présence des fibres. Les poutres sans armatures transversales et sans fibres se sont rompues immédiatement après cette phase sans exhiber de comportement ductile notable.
- Une troisième phase avant la rupture, correspondant à la plastification des armatures et des fibres d'acier et donc à un comportement ductile distingué. Cette phase commence à partir d'une limite de servicibilité de 3.6 mm telle que lue sur les courbes ; ce qui correspond à une flèche admissible de $L/250$, soit $900/250$. Les flèches ultimes ont atteint quatre fois la flèche admissible en présence de quantité suffisante de fibres ($\rho_f \geq 1\%$).

Le comportement charge-flèche des poutres en BHP révèle que les fibres peuvent se substituer aux armatures transversales pour maintenir une rigidité suffisante et apporter une certaine ductilité avant la rupture. En présence de quantités importante de fibres (ρ_f de 2 à 3%), la rigidité et la ductilité peuvent même être meilleures qu'en présence d'armatures transversales.

3.3. Contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant

Différentes études ont été publiées sur la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé et des modèles analytiques ont été proposés (Narayanan et Darwish., 1987, Swamy et al., 1993, Al-Ta'an et Al-Feel., 1990, Lim et OH., 1999). La résistance à l'effort tranchant v_u (effort tranchant ultime V_u /section du béton $b.d$) des poutres en béton armé renforcées de fibres d'acier est exprimée comme la somme de la contribution du béton v_c , de la contribution des aciers transversaux v_s et de la contribution des fibres d'acier v_f comme présentée en équation 1 ci-dessous (Cucchiara et al., 2004) :

$$v_u = v_c + v_s + v_f \quad (1)$$

Dans le cas des poutres en béton armé renforcées de fibres d'acier et sans armatures transversales comme dans les spécimens BHPF-SAt de la présente étude, la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant est donnée par l'équation (2) :

$$v_f = v_u - v_c \quad (2)$$

L'équation (2) donne la valeur expérimentale de la résistance à l'effort tranchant reprise par les fibres d'acier (v_f). Les résultats expérimentaux ont montré que la contribution des fibres à la résistance à l'effort tranchant dépend de la quantité de fibres utilisée ρ_f et par leur élanement l_f/d_f . Plus la fibre est longue, plus elle est efficace dans la couture des deux faces d'une fissure. De plus, pour une fraction volumique ρ_f donnée de fibres, plus le diamètre d'une fibre est petit, plus le nombre de fibres est important, le plus d'actions de couture se produisent le long d'une fissure, résultant en une contribution plus importante des fibres à la résistance à l'effort tranchant. De plus, la qualité de l'adhérence entre le béton et les fibres d'acier est très importante pour empêcher les fibres de glisser et de se retirer du béton à travers une fissure. Avec le développement d'une fissure, les fibres apparaissent ancrées dans les deux faces de la fissure et donc toute contribution de cette fibre d'acier à la résistance à l'effort tranchant est grandement dépendante de la qualité de cet ancrage et donc de la contrainte d'adhérence entre la fibre et le matériau béton.

En prenant tous ces paramètres en considération et tenant compte de l'aspect qualitatif de chaque paramètre, un modèle mathématique est proposé pour la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant comme suit :

$$v_f = \tau k \rho_f l_f/d_f \quad (3)$$

Où τ est la contrainte d'adhérence ultime entre les fibres d'acier et la pâte de ciment. Elle peut être prise comme celle recommandée par le règlement Britannique (BS8110, 1997) pour des barres lisses et rondes :

$$\tau = 0.28\sqrt{f_c} \quad (4)$$

k est un facteur d'efficacité, qui dépend strictement de la quantité de fibres utilisée. Selon des travaux reportés dans la littérature par d'autres chercheurs (Boulekbache et al.,2010, Perrot et al.,2013, Achour et al.,1992), l'efficacité des fibres diminue avec la quantité de fibres utilisée dans un mélange béton. Sur la base des résultats du présent travail, la valeur d'efficacité suivante est proposée pour le facteur k :

$$k = (1 - 20\rho_f) \quad (5)$$

En remplaçant les équations (4) et (5) dans l'équation (3), on obtient :

$$v_f = 0.28\sqrt{f_c} (1-20\rho_f) \rho_f l_f/d_f \quad (6)$$

Avec $\rho_f \leq 3\%$ (l'intervalle des fractions volumiques de fibres d'acier utilisées dans ce travail).

L'équation (6) a été utilisée pour prédire la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant des poutres en BHPF-SAt testées dans ce travail. Les prédictions obtenues par l'équation (6) ont été comparées aux valeurs expérimentales dérivées à partir de l'équation (2). Les résultats $v_{f, \text{test}}$ contre $v_{f, \text{calculée}}$ illustrés au Tableau 4 montrent que des prédictions acceptables peuvent être obtenues par la formule développée dans ce travail.

Pour des objectifs de comparaison, d'autres modèles (Tableau 3) existant dans la littérature (Lim et OH., 1999, Narayanan et Darwish., 1987, Swamy et al., 1993, Al-Ta'an et Al-Feel., 1990,) ont été considérés pour prédire la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant.

Investigation	Modèle	Commentaire
Lim et Oh	$v_f = 0.5\tau V_f \frac{l_f}{d_f} \text{ctg}\alpha$	<ul style="list-style-type: none"> - τ = contrainte d'adhérence moyenne fibre-matrice, assumée par Lim et Oh = 4.15 MPa. - l_f/d_f = élancement des fibres (longueur /diamètre) - V_f = fraction volumique des fibres (%). - α = l'inclinaison entre une barre de renforcement longitudinale et la fissure inclinée, assumée = 45°. - k = facteur d'adhérence, pris =1.2
Narayanan et Darwish	$v_f = 0.41\tau.k V_f \frac{l_f}{d_f}$	
Swamy et al	$v_f = 0.37\tau V_f \frac{l_f}{d_f}$	
Al-Ta'an et Al-Feel	$v_f = \frac{8.5}{9}kV_f \frac{l_f}{d_f}$	

Tableau 3 : Modèles existant pour la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant

On peut clairement voir à partir des résultats du Tableau 4 et de la Figure 10 que le modèle proposé dans ce travail est relativement plus précis par comparaison aux autres publiés dans la littérature. Certains modèles considérés surestiment considérablement la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant comme clairement illustrée par la Figure 10 et doivent donc être considérés avec précaution du fait qu'ils peuvent conduire à des conceptions non sécuritaires. La Figure 10 confirme encore plus que, malgré que la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant s'améliore avec la quantité de fibres utilisées, cette amélioration n'est cependant pas directement proportionnelle à ρ_f . La même Figure 10 montre clairement que cette contribution est en revanche directement proportionnelle à l'élancement l_f/d_f des fibres.

Poutres	f_c (MPa)	ρ_f (%)	l_f/d_f	V_u -test (MPa)	V_f -test (MPa)	V_f -test-moy (MPa)	V_f -calculée (MPa)				
							Model Proposé	1	2	3	4
BHPF-0.5-35	64.2	0.5	65	3.11	0.94	1.02	0.66	0.67	0.66	0.50	0.37
				3.28	1.11						
				3.19	1.02						
BHPF-1-35	64.0	1.0	65	3.33	1.16	1.17	1.16	1.35	1.33	1.00	0.74
				3.53	1.36						
				3.17	1.00						
BHPF-1-60	60.0	1.0	80	3.65	1.48	1.45	1.39	1.66	1.63	1.23	0.91
				3.87	1.70						
				3.33	1.16						
BHPF-2-35	63.1	2.0	65	3.41	1.24	1.28	1.73	2.70	2.65	2.00	1.47
				3.45	1.28						
				3.49	1.32						
BHPF-2-60	65.0	2.0	80	4.06	1.89	1.72	2.17	3.32	3.27	2.46	1.81
				3.72	1.55						
BHPF-3-35	62.2	3.0	65	4.17	2.00	1.91	1.72	4.05	3.98	3.00	2.21
				4.00	1.83						

Tableau 4 : Comparaison du modèle proposé avec les modèles existants

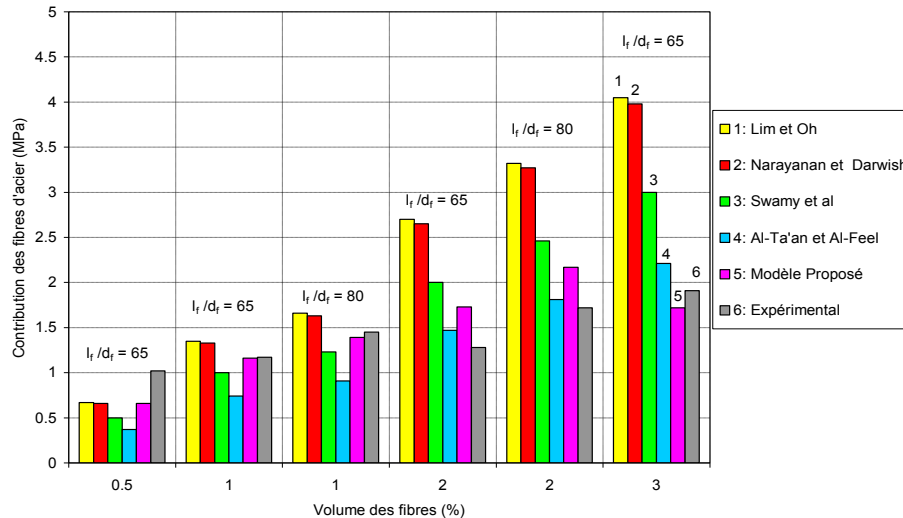


Figure 10 : Contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant des poutres en BHP

4. CONCLUSION

A partir du présent travail sur les effets des fibres d'aciers sur le comportement en effort tranchant du béton à hautes performances, les conclusions suivantes peuvent être faites :

-Les fibres restreignent efficacement les fissures et reprennent les contraintes résiduelles après fissuration. Dans ce sens, les fissures diagonales sont efficacement couturées par les fibres qui les traversent. Leur formation a été retardée et leur ouverture a été étroitement contenue et n'a jamais atteinte la limite de servicibilité de 0.3 mm à la rupture.

- Le mode de rupture des poutres, conçues à l'origine pour avoir un comportement en effort tranchant dominant, a changé d'effort tranchant à flexion en présence d'une quantité suffisante de fibres efficaces (ayant un élanement élevé). En changeant le mode de rupture, les fibres ont augmenté la capacité portante des poutres.

- Les aciers transversaux de renforcement contre l'effort tranchant peuvent être remplacés par les fibres d'acier en quantité suffisante. La capacité portante en effort tranchant est améliorée par l'ajout de fibres d'acier ; cette amélioration varie de 47% pour une quantité de fibres ρ_f de 0.5% à 88% pour ρ_f de 3% est donc même dépassé l'amélioration obtenue par les aciers transversaux en présence de quantité importante de fibres. Cependant, cette amélioration ne semble pas être directement proportionnelle à la quantité de fibres utilisée.

- En considérant toutes les observations expérimentales faites dans la présente investigation, un modèle mathématique a été proposé en équation 6 pour prédire la contribution des fibres d'acier à la résistance à l'effort tranchant des poutres en BHP. Cette équation a été comparée à des modèles existants dans la littérature. Elle aboutit à des prédictions relativement plus précises par comparaison au peu de modèles existants dans ce domaine. Le modèle proposé dans cette étude peut être d'avantage affinée ou étalée à d'autres types de fibres d'acier telles que celles ayant des ondulations superficielles pour une meilleure qualité d'adhérence.

RÉFÉRENCES

Al-Ta'an S.A. et Al-Feel J.R. (1990), Evaluation of shear strength of fibre reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 12 (2): 87-94.

Ashour S.A., Hasanain G.S. et Wafa F.F. (1992), Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams., *ACI Structural Journal*, 89 (2): 176-184.

Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M. et Amziane S. (2010), Flowability of fiber-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Materials*, 24 (9): 1664–1671.

BS8110. (1997), *Structural Use of Concrete, Part1, Code of Practice for Design and Construction*, British Standards Institution, London, 173 p.

Cladera A. et Mari A.R. (2005), Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear, *Engineering Structures*, 27:1519-1527.

Cucchiara C., La Mendola L. et Papia M. (2004), Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement, *Cement and Concrete Composites*, 26 (7): 777-786.

Furlan Jr.S. et de Hanai J.B. (1997), Shear Behaviour of Fiber Reinforced Concrete Beams, *Cement and Concrete Composite*, 19: 359-366.

Johnson M.K. et Ramirez J.A. (1989), Minimum Shear reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, 86 (4): 376-382.

Li V.C. et Leun G.C.K.Y. (1992), Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, *Journal Engineering Mechanics*, ASCE, 118 (11): 2246- 2264.

Lim D.H. et Oh B.H. (1999), Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 21: 937-944.

Meda A., Minelli F., Plizzari G.A. et Riva P. (2005), Shear behaviour of steel fibre reinforced concrete beams, *Material Structures*, 38: 343-351.

Narayanan R. et Darwish I.Y.S. (1987), Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 84 (3): 216-227.

Pendyala R.S. et Mendis P. (2000), Experimental Study on Shear Strength of High Strength Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 97 (4): 564-571.

Perrot A., Lecompte T., Estellé P. et Amziane S. (2013), Structural build-up of rigid fiber reinforced materials, *Materials and Structures*, 46(9): 1561-1568.

Swamy R.N., Jones R. et Chiam A.T.P. (1993), Influence of steel fibres on the shear resistance of lightweight concrete T-beams, *ACI Structural Journal*, 90 (1): 103-114.