
Comportement mécanique sous sollicitations monotones croissantes des mortiers renforcés de fibres métalliques

Ghofrane Benkechkache ¹, Hacène Houari ², Gerard Debicki ³

¹ Doctorante, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions - Université de Jijel - Algérie.

² Professeur, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions - Université Mentouri Constantine - Algérie .

³ Professeur, Laboratoire de Génie Civil - INSA de Lyon – France

paper_lmdc@yahoo.fr, b_ghofrane@yahoo.fr

RÉSUMÉ . Dans ce travail, nous présentons une étude expérimentale pour quantifier la contribution des fibres métalliques sur les principales caractéristiques mécaniques du composite, afin de préciser ses domaines spécifiques d'utilisation et de définir les données nécessaires pour les critères de dimensionnement. Ainsi, sont examinés les lois de comportement (courbes « effort – déformation ») en compression, traction directe et en flexion. Les fibres modifient les mécanismes de dommages au titre de sollicitation statique, la première fissuration est retardée, en plus les fibres jouent un rôle de couture sur les fissures ce qui augmente la charge maximale de la ruine. La présence des fibres métalliques augmente la résistance fortement à résistance à la flexion, mais peu la résistance à la traction, si l'ajout des fibres n'augmente pas la résistance en compression, il améliore l'énergie de rupture .

ABSTRACT. In this work, we present an experimental study to quantify the contribution of steel fibers on the main mechanical characteristics of the composite, to clarify its specific areas of use and define the necessary data for design criteria. Thus, we analyze behaviour laws (curves "stress - strain) in compression, direct tension and bending. Fibers alter the mechanisms of damage under static loading, the first cracking is delayed, the more the fibers play a role sewing on the cracks which increases the maximum load of ruin obtained under static loading. The presence of metallic fibers increases bending resistances, but not traction resistances. The addition of fibers does not increase the compressive strength, it improves the fracture energy.

MOTS-CLÉS: Béton renforcé des fibres métalliques – caractérisation –Compression- traction directe – flexion- comportement statique – déformation

KEY WORDS: Metal fiber reinforced concrete - Compression-characterization-direct tension - bending-static behavior - strain

1. Introduction:

L'incorporation des fibres métalliques au béton donne un nouveau matériau, dont il convient d'une part de préciser et quantifier les comportements et la durabilité, d'autre part il est nécessaire d'adapter les appareils de chantier et les formulations pour que l'introduction des fibres se fasse sans formation de boules, d'une façon uniforme et homogène, avec une ouvrabilité correcte. Qu'apporte la présence des fibres à la matrice ? Ce sera une des questions importantes qui seront discutées dans cet article (ACI,2001) (Johnston,1982).

Lorsque l'on considère la littérature portant sur le comportement mécanique des bétons de fibres métalliques, il apparaît que les informations obtenues sont très nombreuses mais souvent pas directement transposables, ni généralisables (Benboudjema,2002) (Castel *et al.*,2006) (Huon *et al.*,1999).

Il est extrêmement difficile de déterminer l'apport exact des fibres par rapport à un béton conventionnel car le nombre de paramètres influents est considérable.

Les études mécaniques rapportées dans la littérature donnent souvent des résultats globaux sans séparer les caractéristiques du matériau, et les effets induits par l'élément de structure testé. Dans le cadre de ce travail nous restons au niveau de l'approche globale, en essayant toutefois d'expliquer phénoménologiquement les constatations expérimentales, grâce à quelques manipulations plus instrumentées (Bissonnette *et al.*,2000) (Garas *et al.*,2009).

Deux types de fibres ont été retenus. Ces fibres se distinguent par leur nature, leur géométrie, mais aussi par le mode de dispersion au sein de la matrice. Ceci crée deux types de composites nettement distincts (Houari *et al.*,2004) (Benkechkeche *et al.*,2010).

2. Programme expérimental

2.1 .Corps d'épreuve et mode opératoire des essais :

2.1.1. Eprouvettes cylindriques

Les éprouvettes cylindriques d'élançement 2 sont utilisées pour l'essai de compression simple (NFP 18 – 406).

Pour l'essai de compression, ces éprouvettes sont équipées de deux capteurs inductifs de déplacement. Les capteurs sont placés de façon à être diamétralement opposés et solidaires d'un gabarit. Les gabarits sont collés directement sur la paroi de l'éprouvette dans la partie centrale. La déformation est mesurée à partir de la moyenne des deux capteurs disposés de part et d'autre de l'éprouvette. Les capteurs mesurent directement le raccourcissement de l'éprouvette. Les capteurs inductifs sont placés dans la partie centrale de l'éprouvette à partir d'une base de mesure de 20 cm. Ils sont reliés à une centrale de mesure, elle même reliée à un ordinateur.

Le chargement se fait à une vitesse de déformation constante. Cet asservissement est retenu pour l'ensemble des essais de compression statique.

2.1.2. Epreuve en forme de I :

Les essais en traction directe ont été effectués sur des éprouvettes en forme de I. Ce corps d'épreuve a été choisi afin d'éviter les décollements des têtes sur les éprouvettes dont la forme et les dimensions choisies sont indiquées sur la figure 1 (l'équation de la courbure de raccordement de l'éprouvette aux épaulements est celle d'une ligne de jet, comme proposé par l'Hermite). L'âme de l'éprouvette avait une section carrée de 10 cm de cote et longueur de 40 cm.



Figure 1. Corps d'éprouve utilisé en traction

2.1.3. Poutrelle prismatique

Les essais de flexion ont été effectués sur des poutrelles de section rectangulaire de 5x10 cm, ayant une longueur de 120 cm. La distance entre appuis étant de 100 cm. Nous avons opté pour un essai de flexion quatre points (NFP 18 – 407 Dec. 81). Ce mode de chargement permet d'éliminer toute contrainte de cisaillement dans la zone centrale, en y conservant un moment fléchissant constant; par ailleurs, la flexion quatre points donne des résultats moins dispersés que la flexion trois points [10], suivant le schéma de chargement indiqué sur la figure 2.

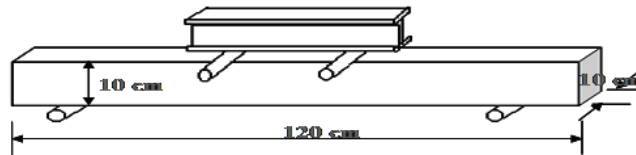


Figure 2. Poutrelles utilisées pour l'étude du comportement des mélanges en flexion

2.2. Constituants des mortiers étudiés :

2.2.1. Fibres :

Deux types de fibres métalliques ont été testés :
 -Fibres d'acier (en acier doux écroui) : elles se présentent sous forme cylindrique et munies de crochets aux extrémités. Elles se présentent collées par groupes, sous forme de plaquettes de 10 à 15 fibres élémentaires. Cette solution technologique a été choisie pour éviter la mise en pelote, ou « oursin », des fibres au moment de la mise en œuvre, la colle étant soluble dans l'eau et la dispersion des fibres dans le matériau étant assurée par le malaxage.

-Fibres de fonte amorphe : elles se présentent sous forme de rubans souples très minces de longueurs et largeurs variables, faciles à mettre en œuvre. Cette faible épaisseur lui confère en outre une surface spécifique (surface développée par unité de volume ou de poids) nettement supérieure à celle des fibres métalliques traditionnelles.

Ces fibres se distinguent par la nature, leur géométrie mais aussi par le mode de dispersion au sein de la matrice. Ceci crée deux types de composite nettement distincts.

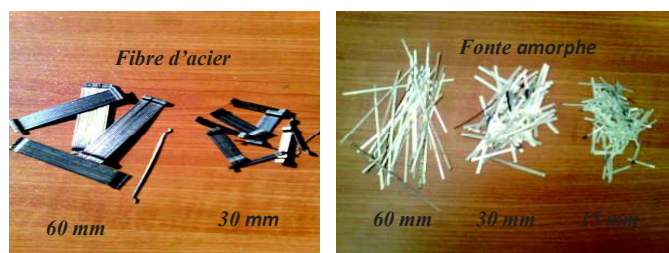


Figure 3. Type de fibres

Les caractéristiques géométriques des fibres utilisées sont données dans le tableau suivant :

Type de fibres	Longueur (mm) <i>I</i>	Largeur (mm) <i>b</i>	Epaisseur (mm) <i>e</i>	Diamètre (mm) <i>d</i>	Elancement		Masse volumique (Kg/m ³)
					<i>l/e</i>	<i>l/d</i>	
Fonte amorphe	15	1	0.03	-	900	77	7200
	30	1	0.03	-	1800	154	7200
	60	1	0.035	-	2600	285	7200
Fibre d'acier	30	-	-	0.5	240	60	7800
	60	-	-	0.8	300	75	7800

Tableau 1 . Les caractéristiques géométriques des fibres

2.2.2. Matrice:

Comme matrice, c'est un mortier qui est retenu car les corps d'épreuve choisis sont de taille modeste. Ainsi cela donne une grande homogénéité à la matrice.

Le mortier utilisé était confectionné à partir de : ciment de type CPA55 de Montalieu, sa masse volumique est 3150 Kg/m³, Granulats des sablières du Rhône 0/5 mm, fluidifiant (SIKAFLUID) dont le dosage est inférieur à 1% du poids du ciment et deux types de fibres métalliques, et l'eau de robinet du laboratoire.

La notation SF (sans fibres) désigne le mortier témoin ; et la lettre F désigne le mortier de fibres, suivie d'une autre lettre F ou A désignant la nature de la fibre métallique (fonte ou acier) suivie d'un chiffre qui représente les longueurs des fibres (15,30 et 60 mm).

2.2.3. Information sur la formulation:

Pour fixer les compositions pondérales, nous prenons celle d'un mortier avec un rapport pondéral sable/ciment égal à 2. Notre objectif est de trouver un mortier de maniabilité correcte facile à mettre en œuvre comme le réclament les recommandations françaises (temps d'écoulement au maniabilimètre L.C.L. compris entre 10 et 15 secondes). Nous avons formulé les mélanges avec un critère de maniabilité identique à l'état frais. Avec le fluidifiant, nous avons décidé de fixer le volume de pâte et ne jouer que sur la quantité de fluidifiant pour obtenir la maniabilité recherchée.

A la suite des essais préliminaires, on a choisi $E/C=0,42$.

Pour un 1 m^3 , on a :

- 1324 kg de sable 0/5 mm
- 662 kg de ciment CPA
- 278 litres d'eau
- 72 kg de fibres (1% en volume).
- 3.97 kg de fluidifiant (SIKAFLUID)

3. Résultats et discussion

3.1. Essai statique sous sollicitation de compression

La figure 4 permet de comparer les résultats obtenus sur un mortier témoin et sur des mortiers de fibres.

Nous avons relevé la contrainte de compression maximale σ_{\max} , la déformation correspondante ϵ_{\max} , et le module d'élasticité E_0 pour la valeur de contrainte égale à $0.45 \sigma_{\max}$.

ϵ_{90} est la déformation pour laquelle la courbe atteint 90% de la résistance maximal après rupture. L'aire indiquée correspond à celle comprise sous la courbe entre les déformations ϵ_{90} et ϵ_{\max} .

La résistance maximale en compression des mortiers de fibres est plus faible que celle du mortier témoin. Cette baisse est de 16% et 9% respectivement pour les mortiers de fibres de fonte amorphe et d'acier par rapport au mortier témoin. Il est d'usage de relier cette valeur de résistance à la porosité du matériau.

Une remarque commune à tous les types de fibres s'impose : c'est la plus grande ductilité des mortiers de fibres, phénomène qui se traduit par un plus grand allongement des courbes « effort-déformation ». Ainsi, la contrainte maximale du mortier de fibres est obtenue avec une déformation plus grande de 37% et 28% respectivement à la déformation obtenue pour la contrainte maximale du mortier sans fibres.

La déformation ϵ_{90} augmente de 88% pour le mortier de fibres FF30 et de 76% pour le mortier de fibres FD30 par rapport au témoin SF, amélioration pratiquement typique de la nature des fibres utilisées.

Si l'ajout des fibres n'augmente pas la résistance en compression, il améliore nettement l'énergie à la rupture que l'on peut estimer par le calcul de l'aire sous la courbe effort déformation. Cette énergie est supérieure d'environ 65% à celle du

témoin pour des essais à 7 jours.

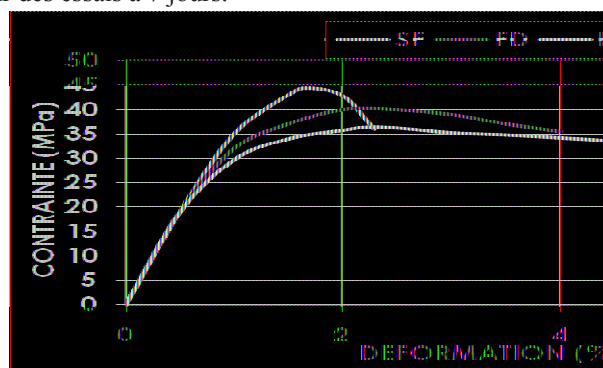


Figure 4. Courbe « contrainte – déformation » en compression

3.2. Essais statiques sous sollicitation de traction directe:

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 2 et représentés graphiquement sur la figure 5.

Type de mortier	σ_{max} (Mpa)	ϵ_{max} ‰	ϵ 90 ‰	E_0 (Mpa)	Energie de rupture (Mpa)
SF	(0.14)	(3.06)	(17.43)	(0.15)	(27.4)
	2.4	0.097	0.13	27550	77.13
FF30	(0.13)	(17.28)	(13.64)	(0.12)	(27.3)
	2.71	2.2	0.915	27788	0.375
	(-12.92)	(+37.5)	(+50)	(+0.86)	(+88)
FD30	(0.11)	(19.35)	(15.63)	(9.14)	(29.8)
	2.68	2.05	0.184	30575	0.365
	(-19.66)	(+28.12)	(+41.53)	(-2.59)	(+82)

Tableau 2. Résultats des essais mécaniques en traction pure sur des éprouvettes en forme de I (âge de chargement, 7 jours)

La présence des fibres améliore la résistance à la traction. Cette amélioration elle n'est pas importante, seulement 11% pour le mortier FF30 et 10% pour le mortier FD 30. Ainsi, par rapport au témoin, les mortiers des fibres FF30 et FD30 ont une déformation à la rupture supérieure de 36% et 13% respectivement, et une déformation ϵ 90 pour laquelle la courbe atteint 90% de la résistance maximale après rupture supérieure 50 % et de 42% respectivement.

L'allure des courbes se rapproche de celle courbes « contrainte-déformation » du mortier comprimé. On peut distinguer trois phases sur chaque courbe.

- une première zone linéaire jusqu'à 60 à 70 de la contrainte maximale : zone élastique.

- une deuxième zone dans laquelle se produit un fléchissement progressif jusqu' à atteindre la contrainte maximale. ce fléchissement correspond à l'apparition des premières microfissures se répartissant dans le volume d'éprouvette.
- Une troisième zone étant une branche à décroissance rapide de la contrainte jusqu' à rupture complète (localisation de la rupture). Ce sont les fibres qui reprennent la charge.

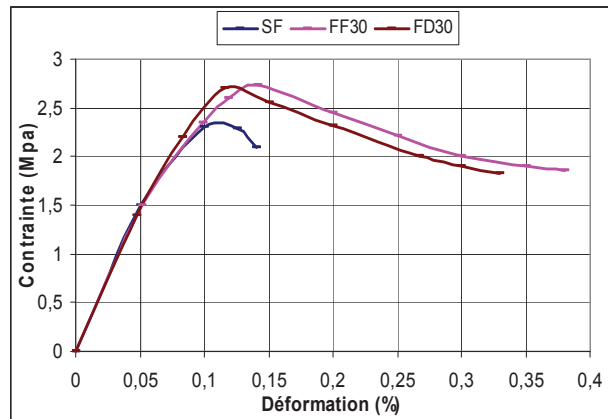


Figure 5. Courbe « contrainte – déformation » en traction (éprouvette en forme I)

La partie post pic de la courbe ($\sigma - \epsilon$) en traction est très difficile à obtenir à cause de la fragilité du béton. Il y a séparation totale en deux fragments dans la plupart des cas. Pratiquement pour le mortier de fibres, dans la partie descendante de la courbe, à partir d'une certaine déformation, la courbe reste sensiblement horizontale (courbe plus allongée). Dans notre cas, par mesure de sécurité du dispositif expérimental, dès que la fissure franche apparaît, on arrête l'essai. La rupture se produit dans la plupart des cas au milieu de l'éprouvette entre les deux points de la base de mesure (20 cm). Dans certains cas on a obtenu des fissures visibles de plusieurs dixièmes de millimètre d'ouverture.

3.3. Essai statique sous sollicitation de flexion

Les courbes « effort-déplacement » (Figure 6) obtenues lors des essais de flexion quatre points sur des éprouvettes prismatiques de dimension 5x510x120 cm font apparaître :

- Des résistances à la flexion à 7 jours notablement améliorées.
- Une énergie à la rupture 20 fois supérieure à celle du mortier sans fibres.
- Un comportement différent à la fissuration entraînant un retard notable à la fissuration franche.

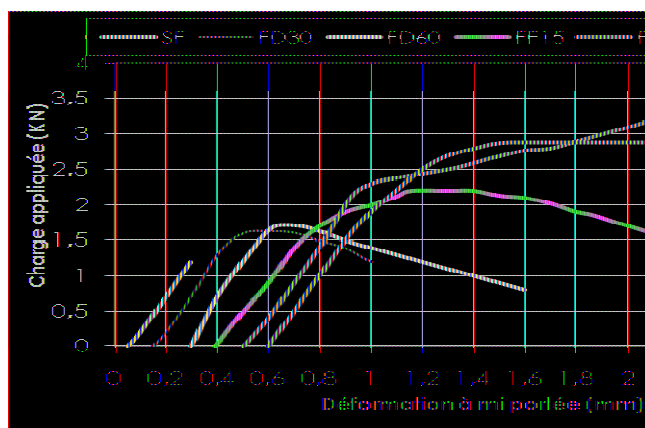


Figure 6. Courbe chargement – déformation en flexion

La courbe moyenne « charge-flèche » obtenue par l'essai statique donne des indications sur l'endommagement du matériau sous sollicitation mécanique. Elle est utilisée comme référence pour définir des seuils d'endommagement. Une partie linéaire sur la courbe observée, puis des phénomènes non linéaires apparaissent qui correspondent à une localisation de l'endommagement sur une (ou plusieurs) fissure. Sur les courbes, il est possible de repérer la limite de linéarité qui est supposée correspondre à la première fissure.

Type de mortier	SF	FF15	FF30	FF60	FD30	FD60
F_c(N) charge de première fissuration	1175	1400	1800	1700	1260	1350
		+19.15	+53.2	+44.7	+7.2	+14.9
δf (mm) flèche de première fissuration	0.27	0.38	0.41	0.40	0.30	0.3
		+40.7	+51.8	+48.1	+11.1	+11.1
F_{max} charge maximale (N)	1200	2270	2900	3470	1510	1730
		+89.2	+141.7	+189.1	+25.8	+44.1
δmax (mm) : flèche de charge maximale	0.3	0.95	1.50	2.11	0.51	0.50
		+216.7	+400	+603.3	+70	+66.7
δr (mm) : flèche de rupture	0.3	1.68	1.87	2.4	0.88	1.3
		+46	+523.3	+700	+193	+25.5
F_{max}/F_c	1.02	1.62	1.61	2.04	1.2	1.28

Tableau 3. Résultats des essais mécaniques en flexion (âge de chargement, 7 jours)

La présence des fibres augmente fortement la résistance à la flexion. Cette augmentation est de l'ordre de 26% à 189% suivant le type de mortier testé. Les flèches correspondant aux charges maximales sont encore plus fortement augmentées puisqu'elles peuvent atteindre 7 fois celles des mortiers sans fibres. La résistance de première fissuration, définie par la norme américaine ASTM C. 1018 comme le point sur la courbe charge flèche où la forme de la première courbe devient non linéaire (limite de proportionnalité sur le diagramme (charge-flèche) et

la résistance ultime (ASTM C78) basée sur la charge maximale de flexion sont établies pour les cinq compositions de mortiers de fibres. Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 3.

La notion de seuil n'est pas seulement un indice pour exprimer quantitativement les caractéristiques du mortier à la fissuration, mais également une valeur importante qui peut servir de critère pour le calcul d'une structure.

Sur toutes les éprouvettes observées à la rupture, une seule macrofissure apparaît placée entre deux points d'application des charges. La position de la fissure influence la forme de la courbe charge flèche. Ceci occasionne une certaine dispersion sur la valeur de la flèche correspondante à la charge maximale et explique en grande partie les dispersions constatées.

En résumé, les fibres modifient le mécanisme d'endommagement sous sollicitation statique, la première fissuration est retardée, de plus les fibres jouent un rôle de couture sur les fissures ce qui augmente la charge maximale de ruine obtenue en statique. Il est important de noter que pour les mortiers de fibres FD30 et FD60, les deux seuils repérés (F_f et F_r) sont très proches l'un de l'autre tandis que pour les mortiers de fibres FF15, FF30, FF60, ils sont éloignés. Ceci traduit une différence de comportement entre les deux composites retenus.

Lorsque la longueur des fibres augmente, les valeurs des forces relatives à la charge ultime sont plus élevées. Ceci est lié à la longueur des fibres (ancrages améliorés), mais aussi aux orientations plus favorables des fibres longues, à cause des effets de paroi dus aux dimensions du moule. Le meilleur seuil de fissuration est obtenu, en moyenne, avec le mortier de fibres FF30.

La fibre longue donne les meilleurs résultats, sans toutefois marquer un avantage important par rapport aux fibres plus courtes.

4. Conclusion

La résistance maximale en compression des mortiers de fibres est plus faible que celle du mortier témoin. Cette baisse est de 16% et 9% respectivement pour les mortiers de fibres de fonte amorphe et d'acier par rapport au mortier témoin. Il est d'usage de relier cette valeur de résistance à la porosité du matériau. Une remarque commune à tous les types de fibres s'impose : c'est la plus grande ductilité des mortiers de fibres, phénomène qui se traduit par un plus grand allongement des courbes « effort-déformation ».

Les essais statiques (monotones) en traction menés avec des fibres de longueur 30 mm montrent que la résistance maximale des mortiers de fibres augmente légèrement, grâce à la présence des fibres, les fibres de fonte étant les plus efficaces. La fissuration localise avec des déformations supérieures à 4000×10^{-6} , les fibres travaillent à l'arrachement, le matériau présente une certaine ténacité.

Les enregistrements « charge-flèche » obtenus lors des essais de flexion suggèrent les commentaires suivants :

- La résistance ultime en flexion des poutres en mortiers renforcés de fibres métalliques est beaucoup plus importante que celle en mortier non renforcé (44% FD 189% FF).
- L'observation du domaine linéaire permet de positionner la charge de fissuration.

Les fibres améliorent celle-ci (14% FD, 50% FF). Cette charge de première fissuration F_f sert de référence pour caractériser les taux de chargement du matériau. La dispersion sur ce résultat est faible.

- Le type d'essai retenu conduit à avoir beaucoup de dispersion sur la charge de rupture. Ceci vient en grande partie de la localisation de la fissuration. Il conviendrait d'améliorer le dépouillement de la phase post-fissuration. Néanmoins en moyenne, des gains de résistance 189% pour FF et 44% pour FD sont obtenus. Les charges de rupture et de fissuration sont très distinctes avec la fibre de fonte amorphe et assez proche pour les fibres d'acier.

5. Bibliographie

ACI Committee 440, ACI 440.1R-01. « Guide for the design and Construction of concrete reinforced with FRP bars », Am Concrete Inst 2001.

Benboudjema F "Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales – Application aux enceintes de confinement de bâtiment réacteurs des centrales nucléaires», *thèse doctorale, Université de Marne La Vallée*. 2002.

Benkechkeche .G, Houari. H « Evaluation expérimentale du comportement mécanique des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques » Seventh (CSM7) Beirut – Lebanon May 20 –22, 2010, International Conference on Material Sciences, pp 25, 2010.

Bissonnette B, Therrien Y, Pleau R, « Les bétons renforcés de fibres d'acier et la multifissuration » Can. J. Civ. Eng. 27(4): 774–784 | doi:10.1139/cjce-27-4-774 | © 2000 CNRC Canada 2000.

Castel A, Vidal T, Viriyametanont K, Francois R. Eectof « Reinforcing bar orientation and location on bond with self-consolidating « concrete .ACI Struct J 2006; 103(4):55967.2006.

Garas, V.Y., Kahn, L.F., Kurtis, K.E., « Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete », Cement & Concrete Composites, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.002.2009.

Houari H , Debicki G « Contribution to the study of the behaviour of metal fibres reinforced mortar under sustained and cyclic », these de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Villeurbanne, FRANCE. 1993.

Huon V, Cousin B, Maisonneuve O, « Analyse thermomécanique du comportement et de la fissuration de bétons de fibres métalliques », 14^{ème} Congrès Français de Mécanique, Toulouse, Septembre 1999.

Johnston C,D « Steel fibres reinforced and plain concrete factors influencing flexural strength measurement », ACI Material Journal , Vol.79,N°2,12p.1982.