

ETUDE DU COMPORTEMENT DES MATRICES CIMENTAIRES RENFORCEES DE FIBRES METALLIQUES SOUS CHARGEMENT MONOTONE CROISSANT.

Reçu le 21/06/2006 – Accepté le 11/06/2007

Résumé

La caractérisation d'un béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est toujours délicate et nécessite la réalisation de différents essais portant sur les deux états des bétons, c'est-à-dire à l'état frais et à l'état durci. Les essais effectués et les grandeurs mesurées permettent de déterminer le comportement monotone de poutrelles sous sollicitations de flexion quatre points. L'originalité de notre approche réside dans l'introduction de sous produits industriels comme renforts dans une matrice cimentaire pour améliorer ses caractéristiques mécaniques.

Le travail que nous présentons consiste à établir une fiche d'identification de ces nouveaux bétons et à comparer les résultats obtenus avec un béton témoin sans fibres et avec un béton renforcé de fibres commercialisées. Nous nous inscrivons dans une logique de développement durable.

Mots clés: matériaux, matrice, renforts, fibres, caractérisation, charge, flèche, monotone.

Abstract

To characterize a fibre reinforced concrete is not easy and requires realizing different tests concerning two states of concrete, fresh and hardening. The tests making and the values measuring give information on static behaviour (monotonous) of the ribs under four points loading rig (flexural strength test). The introduction of wastes products from mechanical industry in a matrix based cement, and the improvement of their mechanical characteristics, make the originality of our study.

In this research work, an identification card is making to optimize these new concretes. The results obtained are compared with those of indicator concrete without fibres and of reinforced fibres metallic marketing. Our work enters for a lasting development.

Keywords: Materials, matrix, reinforcements, fibres, characterisation, load, flexure, monotonous.

M. BENTALHA,
H. HOUARI

Laboratoire Matériaux et
Durabilité des Constructions
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri Constantine
Algérie

ملخص

مميزات الخرسانة المسلحة بألياف المعدنية تكون رقيقة و تستلزم تحقيق تجربات مختلفة على حالتان من الخرسانة. حالة معتدلة و حالة صلابة التجربات المنجزة و القيم النقيصة تسمح تحديد الاحتواء السكون لعارضة تحت حمل الانحناء أربعة نقط.

الجديد في الطريقة هو إدخال فضالة صناعية كدعم في قالب من الاسمنت لتحسين الميزات الميكانيكية.

العمل الحالي هو تأسيس بطاقة معلومات الخرسانة الجديدة و يقارن بالنتائج المحصول عليها مع الخرسانة بدون ألياف و مع الخرسانة المسلحة بألياف تجارية. و يسجل عملنا في منطق العمل الدائم.

الكلمات المفتاحية: مواد، قالب، دعم، ألياف، تميز، حمل، انحراف، سكون.

Dans cet article, nous allons uniquement nous intéresser au béton de fibres métalliques (BFM). [1] L'objectif de ce travail n'est pas de faire une étude bibliographique complète sur ce sujet pour lequel la littérature est abondante mais il est de déterminer les principales caractéristiques de ce matériau. D'une manière générale l'ajout d'une certaine quantité de fibres à la matrice d'un béton n'introduit pas de nouvelles conditions sur la nature des composants utilisés. On peut optimiser la formulation du béton en gardant le même dosage en ciment, en granulats et également le même adjuvant. [2] Par contre une optimisation de l'efficacité des fibres nécessite une étude minutieuse des caractéristiques de celles-ci. [3]

Il existe peu d'informations dans la littérature sur une formulation déterminée du béton de fibres, car il existe un grand nombre de paramètres qui doivent être pris en compte. L'étude de la composition de fibres est complexe car il ne suffit pas d'ajouter un certain pourcentage de fibres à une composition courante d'un béton dit classique. L'addition des renforts modifie les caractéristiques de la matrice. Il s'agit d'un matériau nouveau et il ne peut être abordé comme un béton armé tel qu'on le connaît actuellement. [4] Les fibres n'étant pas considérées comme des armatures classiques.

Nous n'allons pas nous étendre sur ces points qui sont quelque peu éloignés de notre étude. Compte tenu de la tendance des utilisateurs de privilégier la sécurité mais également à cause des freins normatifs ou réglementaires, le développement et la vulgarisation de l'incorporation des fibres ne sont pas aussi avancés que ce qu'ils pourraient être.

C'est pour tenter de lever ces appréhensions et résoudre les problèmes techniques, qu'une étude sur les possibilités d'emploi des renforts métalliques dans les bétons hydrauliques est menée.

Le travail que nous présentons est une analyse du comportement de poutrelles en mortier renforcé de fibres d'acier et une étude expérimentale menée sur plusieurs échantillons. Ceci pour :

- étudier l'effet de l'incorporation des fibres métalliques dans une matrice cimentaire
- étudier la valorisation de sous produits (copeaux d'usinage) en tant que renforts
- déterminer l'accroissement de la résistance à la flexion sous chargement monotone croissant
- observer un changement du mode de fissuration
- établir des taux de chargement

La première série de corps d'épreuve normalisés sera soumise à des essais d'écrasement afin de déterminer la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion à différentes échéances.

La deuxième série concerne les poutrelles (10x10x120 cm) qui seront soumises à un chargement statique (monotone croissant) jusqu'à la rupture afin de déterminer les caractéristiques statiques : charge, flèche de première fissuration et de rupture, de chaque élément ainsi renforcé.

1. PRESENTATION DES MATERIAUX TESTES

1.1. Définition des corps d'épreuve

Les essais sont effectués sur trois types d'éprouvettes (figure 1) :

- cylindriques d'élanement 2 (16 x 32 cm), destinées aux essais d'écrasement pour la détermination de la résistance à la compression.
- Prismatiques d'élanement 4 (7x 7 x 28 cm), destinées aux essais de traction par flexion
- Poutrelles de section carrée de 10 cm de côté et de 120 cm de longueur. Ce modèle expérimental est représentatif du comportement d'un élément de structure.

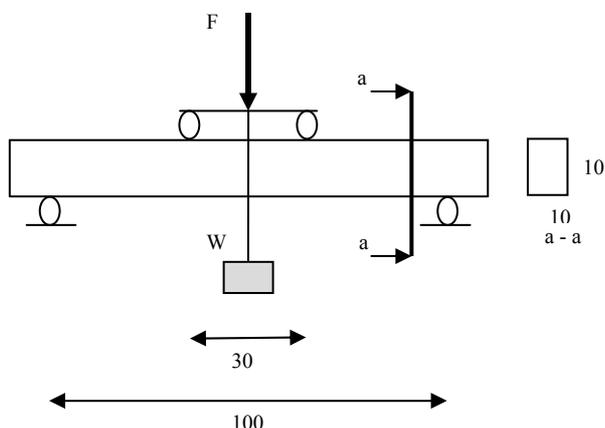


Figure 1 : Caractéristiques géométriques de la poutrelle

1.2. Choix de la composition du mortier

Etant donné le rôle de renfort joué par la fibre, il est impératif d'étudier un mélange de plasticité suffisante pour assurer un enrobage correct des fibres et améliorer ainsi l'adhérence, parce que la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenue qu'après une optimisation de la composition.

L'étude de l'influence des proportions relatives des différents composants : granulats, ciment, fibres, fluidifiant, eau, conduirait à un nombre d'essais considérables. A la suite de tests préliminaires et afin de réduire le programme expérimental, on s'est fixé un rapport constant en poids ciment / sable (C/S = 0.5), un rapport eau / ciment égal à 0.42, et les renforts et le fluidifiant ont été ajoutés à cette composition. [5]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Chlorures	CaO libre	Résidus insolubles	PAF
27	6.13	3.12	55.86	0.94	2.02	/	/	0.00	0.88	2.17	2.41
Eléments				C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
Teneur en %				56.6		22.98		9.87		8.25	

Tableau 1 : Composition chimique et minéralogique du clinker

1.3. Matériaux de base

1.3.1 Ciment

Le ciment utilisé pour l'étude est un ciment CPJ 45, il était préférable d'utiliser un ciment avec constituant secondaire pour ce type de recherche étant donné que sa classe de résistance le destine aussi bien aux travaux de bâtiment qu'à ceux de génie civil.[6]

Temps de prise		Expansion Le Châtelier		Surface spécifique (Blaine) mm ² /g	Consistance Normale
Début	fin	A chaud	à froid		
2h50mn	4h06mn	2.90	1.65	3891	26.91

Tableau 2 : Propriétés physiques du ciment

Les résultats des essais normalisés effectués sur ce ciment sont indiqués sur les tableaux 1, 2 et 3.

Essais	Age		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression	143.2	266.4	433.1
flexion	35.7	58.3	77.9

Tableau 3 : Résistances mécaniques du ciment (bars)

Ces résultats montrent que les ciments utilisés peuvent être considérés conformes aux normes en vigueur : NA 442.

1.3.2. Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du mortier. L'eau introduite dans le mélange va remplir deux fonctions essentielles :

- une fonction physique qui confère au mortier frais les propriétés rhéologiques d'un liquide
- une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc des résistances mécaniques.

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau du robinet provenant de la source Fesguia qui alimente notre laboratoire. Le tableau 4 représente les résultats de l'analyse chimique effectuée sur cette eau qui répondent aux prescriptions de la norme NF P18 404.

Propriétés mesurées	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente	Equivalent de sable	Valeur au bleu de méthylène	Coefficient d'absorption
Sables 0/3	2.76	1.44	78.67	0.39	1.1
Gravillons 3/8	2.62	1.36	/	/	1.22

L'eau utilisée est faiblement agressive si on se réfère à la composition chimique déterminée, on a aussi un pH légèrement acide, un taux de magnésium assez faible, la température varie de plus ou moins cinq degrés par rapport au temps de coulage des différentes poutrelles.

Tableau 7 : Caractéristiques physiques

1.3.5 Renforts

Dans le cadre de cette étude, on a sélectionné deux types de fibres métalliques se différenciant, par leur provenance :

Echantillon	Matières en suspension	C _a	M _g	N _a	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	T°(C)	pH
Concentration	Traces	116	36	80	3	140	170	305	5	19	7.9

Tableau 4 : Composition chimique de l'eau

1.3.3. Fluidifiant

On a choisi, dans des essais d'efficacité préliminaire un seul adjuvant fluidifiant pour les deux types de renforts utilisés (tableau 5).

Fluidifiant : MEDAPLAST SP 40

Fiche technique	
Caractéristiques	Super plastifiant, haut réducteur d'eau
Forme	Liquide
Couleur	Marron
pH	8.2
Densité	1.22
teneur en chlore	< 1g par litre
Dosage	0.6 à 2.5% du poids du ciment

Tableau 5 : Caractéristiques du fluidifiant

Toutes les teneurs en adjuvants seront données en pourcentage de la masse de ciment par la suite.

1.3.4. Granulats

Le granulats utilisé provient d'une grande carrière de la région de Constantine, en l'occurrence la carrière Hedna de Ain Smara. Ce choix est dicté par le fait que cette dernière avec celle géante du Khroub (ENG) approvisionnent principalement toute la région de part leur importance en production.

Ces granulats sont des matériaux concassés et sont commercialisés en tant que classes granulaires de sable 0/3 et gravillons de classe 3/8.

Les résultats des analyses granulométriques sont représentés sur le tableau 6.

tamis	0.08	0.16	0.25	0.315	0.5	0.63	0.8	1.25	2.5	4	5	6.3	8
modules	20	23	25	26	28	29	30	32	35	37	38	39	40
Sables 0/3	10	15.5	20	22	28	32	35.5	45	75	92	100		
Gravillons 3/8							0	5	38	54	85	100	

Tableau 6 : Caractéristiques géométriques

Les propriétés physiques des sables et gravillons utilisés sont représentées dans le tableau 7.

- fibres d'acier industrielles : elles se présentent sous forme de bâtonnets métalliques. Elles ont une forme ondulée. Celle-ci facilite son adhérence à la matrice. C'est une fibre normalisée et commercialisée sous l'appellation MEDAFAC. Leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 8.

- sous produits d'usinage en acier (copeaux) : ces renforts sont produits par l'usinage en tant que copeaux d'acier à performances élevées, selon la composition de l'acier de la pièce usinée. Ce renfort est en forme de spirale, tranchante aux bords et aux extrémités.

Cette présentation permet aux fibres de jouer un rôle identique aux granulats lors de leur introduction dans la matrice.

On a opté pour deux longueurs de fibres : 25 et 50 mm avec un pourcentage de fibres de 1% de la masse de ciment utilisé.

Le tableau 8 donne les caractéristiques de ces fibres.

Types de fibres métalliques	Notation	Longueur mm	Largeur mm	Epaisseur mm	Elongement l/d	Forme
Fibres industrielles	FI50	50	10	0.6 ± 0.09	83.33	ondulée
Sous produits	SP50 SP25	50 25	12.5 12.5	0.6 0.6	83.33 41.66	spirales spirales

Tableau 8 : Description des renforts

Le choix des renforts a été fait pour nous permettre d'établir une comparaison entre les fibres industrielles et les déchets métalliques. Il est important à l'heure actuelle de s'inscrire dans une démarche de développement durable et d'économie. Il est intéressant de mettre en place un recensement des matériaux recyclables utilisables ou non dans les mêmes conditions qu'un matériau normalisé.

On opte généralement pour des fibres métalliques lorsqu'on désire améliorer le comportement d'un béton de structure. Nous avons étudié deux formes différentes de renfort pour avoir des renseignements sur l'ancrage de ces renforts. On s'apercevra de son impact sur la rupture du matériau.

Comme indiqué précédemment, le mortier est composé d'un sable calcaire conforme à la norme P15- 403. Le malaxage a été effectué selon la norme P18 – 452. Le fluidifiant a été ajouté à l'eau de gâchage et les renforts mélangés aux granulats avant malaxage.

Le tableau 9 donne la composition des différents mélanges.

- BSF : matrice témoin sans fibres
- BFI50 : matrice renforcée avec des fibres commercialisées (FI50)
- BSP50 : matrice renforcée avec des copeaux (SP50)
- BSP25 : matrice renforcée avec des copeaux (SP25)

	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Fluidifiant (g)	00	52.96	13.24	45
Ciment (kg)	662			
Sable (kg)	1327			
Eau (kg)	278			
E/C	0.42			
Fibres : 1% (kg)	6.62			

Tableau 9 : Composition du mortier (pour 1 m3)

1.4. Caractérisation.

Compte tenu des difficultés que présente la mesure des propriétés rhéologiques des mortiers (bétons), on s'est contenté des essais :

- mesurant les propriétés d'écoulement d'un mortier sous vibration (maniabilimètre LCL)
- mesurant l'air occlus

On a déterminé à l'aide de ces essais des teneurs « optimales » en fibres et en fluidifiant, c'est-à-dire des teneurs permettant d'atteindre un E/C minimum de 0.42.

Nous avons cherché à estimer l'ordre de grandeur de la variation des performances que l'on peut obtenir sur des mortiers pour une maniabilité fixée. L'objectif pratique est, en effet, de réaliser des BFM ayant la même maniabilité qu'un mortier témoin [7].

Nous présentons les résultats obtenus sur des mortiers à l'aide de deux types de renforts métalliques (une industrielle commercialisée et un sous produit valorisé) et une seule qualité de fluidifiant.

1.4.1. Etude à l'état frais

Quelques essais préliminaires ont montré que l'ouvrabilité du mortier était fortement influencée par le pourcentage et la longueur des fibres. Sur le plan d'une mise en place correcte, les essais ont montré que l'ouvrabilité du mortier était fortement influencée par le pourcentage et la longueur des fibres. Sur le plan d'une mise en place correcte, les essais ont montré que l'on devait limiter le pourcentage à 1.7 % en volume (soit 5.5% en poids) en valeur maximale et que l'on devait utiliser des fibres de longueurs comprises entre 10 et 50 mm.

En effet dans le cas d'une fabrication pour malaxage classique (notre cas), des pourcentages plus élevés ou des longueurs de fibres plus importantes conduisent à mauvaise

homogénéité du mélange. Ces résultats confirment les conclusions de l'étude de SERNA ROS. [8]

Pour des bétons (micro bétons) ayant un faible module de finesse (bétons de petits granulats), il est possible d'ajouter des fibres jusqu'à 1% (en volume) sans précautions particulières et jusqu'à 2% et plus en contrôlant la fabrication d'une manière rigoureuse.

Les évolutions des temps d'écoulement au maniabilimètre LCL et la teneur en air occlus sont tout à fait comparables à celles du béton témoin, comme le montre le tableau 10. Les résultats sont la moyenne des essais sur trois gâchées et la maniabilité est de l'ordre de 11 ± 2 s.

Mélanges / Caractéristiques	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Maniabilité	13 s	9 s	12 s	10 s
Air occlus	4.4%	4.2%	4.2%	5.1%
densité	2.26	2.33	2.29	2.29

Tableau 10 : Maniabilité, air occlus, densité

1.4.2. Etude à l'état durci

Le tableau 11 présente les résultats des résistances obtenues avec les mélanges élaborés sur une moyenne de trois essais par éprouvettes.

mélanges	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
7 j	24.43	27	28	23
28 j	29	29	35	29

Tableau 11 : Résistances à la compression à 7 et 28 jours. Epruvettes 16x32 cm. E/C = 0.42. 1% fibres.

Les résultats des essais à la compression et à la traction par flexion, varient en fonction de l'âge de l'éprouvette, du type et de l'élancement de la fibre (figure 12).

mélanges	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
7 j	4.9	5.5	5.5	5.81
28 j	8.57	7.35	9.8	7.35

Tableau 12 : Résistances à la traction à 7 et 28 jours. Epruvettes 7x7x28 cm. E/C = 0.42. 1% fibres

Les résultats des essais à la compression et à la traction par flexion, varient en fonction de l'âge de l'éprouvette, du type et de l'élancement de la fibre.

La lecture de ces tableaux nous indique que le mortier BSP25 a développé les plus faibles résistances quelque soit l'âge et la sollicitation. Quant au mortier BSP50, il est admis que les résistances soient plus élevées compte tenu des paramètres de ces matériaux par rapport aux gains de résistance au jeune âge et à long terme. Les mélanges BSP25 ont montré des résistances plus faibles à partir de 7 jours. On peut attribuer ce comportement à une teneur en air élevée : 5.1%. La variation des résistances en fonction du type de fibres est représentée sur les figures 2 et 3.

On constate que l'ensemble des résultats, présente le même aspect (quelque soit l'âge de l'essai et l'élancement des fibres). On constate que les fibres SP50 développe de meilleurs résultats en résistance à la compression et à la

traction comparées aux fibres FI50 et SP25, malgré une compacité plus faible. Les compositions BSP25 donnent de meilleurs résultats que les mélanges de référence (BSF).

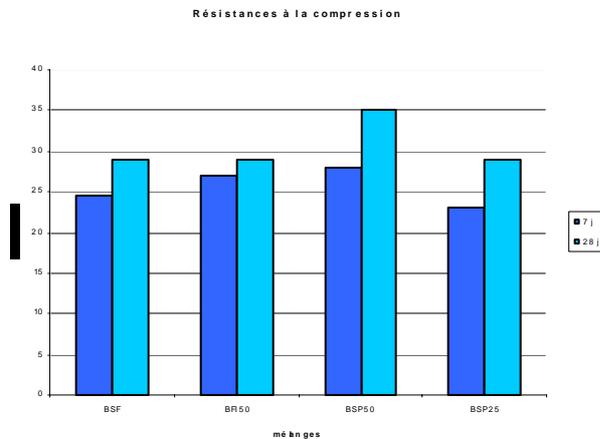


Figure 2 : Résistances à la compression

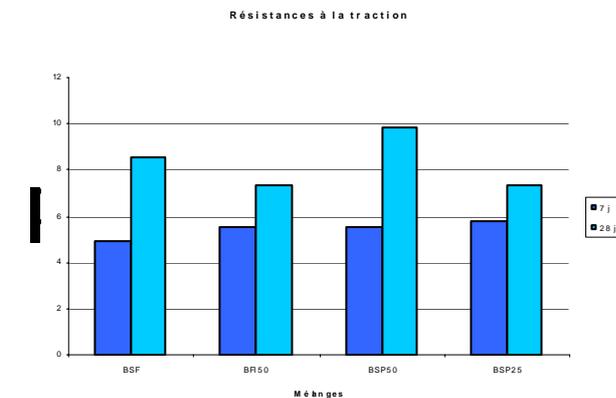


Figure 3 : Résistances à la traction

On constate que l'ensemble des résultats, présente le même aspect (quelque soit l'âge de l'essai et l'élançement des fibres). On constate que les fibres SP50 développe de meilleurs résultats en résistance à la compression et à la traction comparées aux fibres FI50 et SP25, malgré une compacité plus faible. Les compositions BSP25 donnent de meilleurs résultats que les mélanges de référence (BSF).

Sur les mortiers durcis, les résistances mécaniques diminuent de l'ordre de 15% pour les BSP25 et ce uniquement pour les différences géométriques des fibres.

Mais le plus remarquable, est que les résistances en compression à 28 jours pour les BF150, BSP25 sont égales à celles des BSF pourtant réputés excellents. [9]

En résumé il apparaît donc que :

- la présence éventuelle de renforts ne conduit pas à des baisses importantes des performances des mortiers
- le niveau de performance des mortiers renforcés de fibres est avantageusement comparable à celui des mortiers sans fibres.

Nous pouvons décrire ce que l'on a observé au niveau des essais mécaniques classiques d'écrasement sur éprouvettes de mortier renforcés de fibres d'acier :

- la résistance à la compression du mortier avec fibres est sensiblement la même que celle du mortier témoin sans fibres, toutefois on observe qu'un éclatement très limité de la matrice.
- Nos résultats sont en accord avec ceux des différents chercheurs pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration en compression. [9] Dans certains cas, on a une légère augmentation et dans d'autres une légère diminution. Cette diminution pouvant être causée par une mauvaise compacité due à un excès de fibres.
- l'augmentation, de la résistance en flexion des mortiers avec fibres est plus importante, elle atteint 1.34% pour FI50, 1.16% pour SP50. Elle est due à la déformabilité du matériau. Il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion.
- les résultats varient avec la géométrie de la fibre, son orientation, et son adhérence à la matrice.

SWAMY a rassemblé les résultats de diverses expérimentations et propose une formule de régression qui donne la résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du béton sans fibres :

$$\sigma_c = 0,97 \cdot \sigma_m \cdot (1 - V_f) + 3,14 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d} \quad (1)$$

V_f = pourcentage en volume des fibres
 l/d : élançement des fibres

	SF	AF1	AF2	AF3
σ_m (Mpa)	0.45	0.63	0.545	0.47
l/d	00	83.33	83.33	41.66
σ_c théorique	0.455	0.63	0.545	0.47
σ_c expérimental	0.45	3.29	3.29	1.88

Tableau 13 : Résistances théoriques.

L'essai de traction par flexion réalisé sur prismes est certainement le plus significatif du comportement du béton de fibres (tableau 13). Cependant on constate que le résultat de l'essai dépend entre autre de la dimension de l'éprouvette et du mode de chargement.

2. COMPORTEMENT SOUS CHARGEMENT MONOTONE CROISSANT (ESSAIS STATIQUES EN FLEXION)

Une série de vingt poutrelles de mortiers renforcés avec différentes fibres a été soumise à l'essai de flexion quatre points sous chargement monotone croissant jusqu'à la rupture. Toutes les poutrelles sont conservées à l'air libre. La durée de conservation avant l'essai est de sept jours.

2.1. Description des essais et des dispositifs de mesure

Les poutrelles reposent sur deux appuis simples distants de 100 cm et sont soumises à une sollicitation de flexion au moyen d'un vérin pneumatique. La figure 4 décrit ce dispositif d'essai.

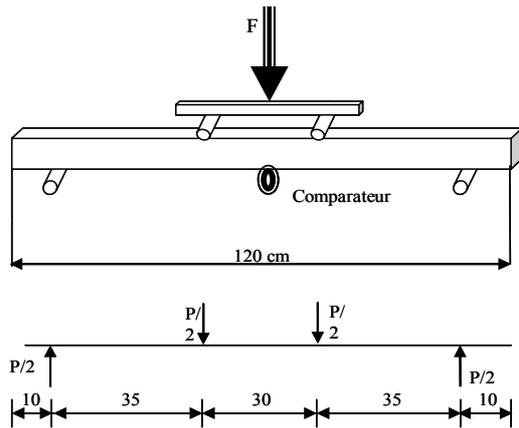


Figure 4 : Dispositif d'essai flexion 4 points.

La mesure de la charge appliquée est effectuée à l'aide d'un capteur de forces, placé au même niveau que l'application de l'effort. Sa capacité est de l'ordre de 1 tonne et sa précision est de plus ou moins 0.1 kg. La mesure du déplacement est effectuée à l'aide d'un capteur de déplacement placé à mi portée de la poutrelle. La course du capteur est plus ou moins 2.25 cm avec une précision de plus ou moins 10^{-2} mm. L'observation des fissures est réalisée de manière optique à l'aide d'une loupe de grossissement 10 et déplaçable le long des fissures.

Pour l'observation des fissures, il faut mouiller la surface à l'aide d'un pinceau trempé dans l'eau, et grâce au mouvement de l'eau, on peut suivre l'évolution des fissures.

Pour chaque essai complet, suivant le montage proposé on dispose :

- d'un enregistrement des résultats
- de courbes charge – déplacement sur une table traçante

2.2. Résultats des essais statiques

2.2.1. Diagramme charge – flèche

La première caractéristique des matériaux fragiles renforcés de fibres qui frappe, c'est le diagramme charge – flèche qui est radicalement allongé. On constate que la première partie du diagramme est une zone sans dégradation dans laquelle le comportement est élastique. La microfissuration reste très discrète dans cette partie. Puis une zone présentant un léger infléchissement correspondant au début de la fissuration, c'est la limite au-delà de laquelle les fissures se développent de manière instable. Cette limite est facilement définie car elle coïncide avec l'apparition de la première fissure (figure 5).

Donc on peut introduire la notion de seuil qui représente la première partie linéaire du diagramme charge – flèche et qui dépend peu de la teneur en fibres. Cette dernière n'intervient que progressivement au cours de la déformation. Cette notion de seuil est spécifique au renforcement en fibres.

Le point du début de la fissuration est le sommet du diagramme charge – flèche. Les déformations subissent

l'influence des renforts à partir de point. Sur les parties descendantes, par contre, les différences sont nettes, les courbes décroissent plus lentement avec les fibres, les déformations à la rupture augmentent et la fragilité diminue. C'est le résultat du glissement des fibres dans leurs gaines car la rupture survient toujours par arrachement des fibres.

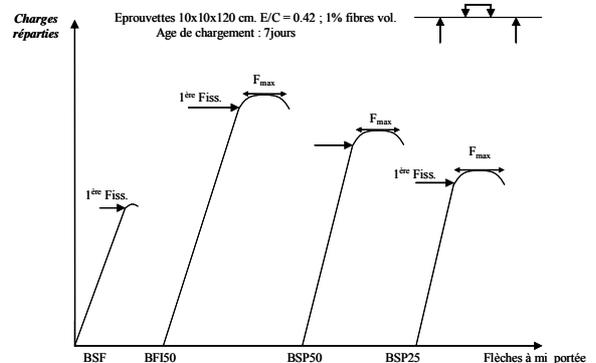


Figure 5 : Courbes charges – flèches

Le diagramme charge – flèche n'est pas réductible de façon simple au diagramme contrainte – déformation. La contrainte calculée avec une hypothèse de matériau homogène ne correspond à une contrainte effective dans le matériau fibré à la rupture. Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 14.

Types de mortiers	BSF	BF150	BSP50	BSP25
Ff (N)	4550	5250	4950	4630
δf (mm)	0.40	0.59	0.44	0.42
Fmax (N)	4700	6300	6450	4950
δmax (mm)	0.45	0.76	0.57	0.45
δr (mm)	0.45	1.10	0.92	0.52
Fmax / Ff	1.03	1.20	1.10	1.07

Tableau 14 : Résultats des essais mécaniques en flexion (Âge de chargement 7 jours ; poutrelles 10x10x120 cm) E/C = 0.42 ; 1% de fibres

Avec :

- Ff : charge de première fissuration
- δf : flèche sous charge de première fissuration
- Fmax : charge maximale
- δmax : flèche sous charge maximale
- δr : flèche de rupture

On peut dire que :

- la charge de rupture à la flexion des poutrelles en béton renforcé est de 1.16% à 1.34% fois celle des poutrelles en mortier sans renforts.
- Cet accroissement est maximal pour les fibres d'acier industrielles ayant un coefficient de forme l/d = 83.33.
- Le mode de rupture change : rupture par cisaillement pour les BSF et rupture en flexion – cisaillement pour les BFM.
- La déformation à la rupture des poutrelles en BRFM est de 2 à 1.26 fois plus grande que celle des poutrelles sans renforts.

Ainsi l'évolution incontrôlée des fissures est empêchée et le mortier à base de fibres présente une certaine ductilité.

La charge après fissuration est supérieure à la charge de fissuration ; elle dépend de multiples paramètres mais est d'autant plus élevée que le pourcentage des fibres est élevé. Il faut remarquer qu'une macro fissure se développe progressivement en choisissant le chemin le plus faible (fissure tortueuse) et non selon un plan perpendiculaire à l'axe de la poutre (figure 6).



Figure 6 : Fissuration et rupture d'une poutrelle (10x10x120 cm ; âge de chargement 7 j.)

2.2.2. Modules d'élasticité

Le module d'élasticité représente une constante mécanique importante des matériaux, il est donné par la pente de la première partie du diagramme (F, δ). C'est un module instantané calculé au premier seuil. On constate que le module expérimental du béton renforcé de fibres métalliques est légèrement supérieur au béton témoin et qu'il croît avec la longueur des fibres.

- fibres industrielles de 50 mm : augmentation de 4.85%
- sous produits de 50 mm : augmentation de 4.35%
- sous produits de 25 mm : augmentation de 2.87%

De nombreuses formules ont été élaborées pour cette constante reliée au paramètre du composite. La manière la plus simple de tenir compte de l'incorporation des fibres est d'utiliser la formule des lois des mélanges :

$$E_c = E_f \delta f + E_m \delta m$$

Avec :

E_c : module instantané du composite
 $E_c = 200000 \times 0.01 + 0.99 \times 19050 = 20860 \text{ MPa}$

On constate une variation de 2.4% entre le module d'élasticité expérimental et celui calculé par la loi des mélanges. En réalité, cette formule n'est valable que si les fibres sont continues. En général, on fait intervenir un coefficient β qui tient compte de la géométrie de la fibre, de l'interface fibre – matrice.

$$E_c = E_f \delta f \beta + E_m \delta m$$

Avec β coefficient d'efficacité <1.

On peut dire que le pourcentage efficace des fibres de 50 mm est de 94%. On fait cependant remarquer (A.J. MAJUMDAR) [10] que pour augmenter le module d'élasticité du composite le rapport E_f / E_m doit dépasser 12 pour les matériaux à orientation aléatoire tridimensionnelle des fibres et 3 pour une orientation aléatoire plane.

2.2.3 Indices de ténacité

L'augmentation de la résistance à la fissuration et celle à la flexion sont les caractéristiques généralement mentionnées, mais la plus importante et la plus typique des BRFM, c'est sa ténacité.

Nature des mortiers	Indice
BSF	1
BFI50	1.81
BSP50	2
BSP25	1.50

Tableau 15 : Indice de ténacité des mélanges

L'indice de ténacité du BSF est égal à 1, celui des BRFM varie avec le pourcentage de fibres, leur nature mais également avec la vitesse de chargement. Cet indice permet de chiffrer la qualité d'une fibre. Il faut signaler qu'il dépend aussi de l'apparition de la première fissure : si cette dernière se produit rapidement, l'indice sera élevé, si elle se produit tard, l'indice sera faible.

En résumé :

Nos résultats ont montré que l'incorporation des fibres d'acier dans le mortier apporte une nette amélioration. Le comportement en flexion peut être résumé de la façon suivante, comme le souligne HANNANT [11], après la première fissure :

- la distribution des contraintes n'est plus linéaire
- les déformations en traction augmentent plus que les déformations en compression
- l'axe neutre est déplacé vers la partie comprimée
- les contraintes ne sont plus proportionnelles aux déformations dans la zone de traction
- le diagramme de traction peut être assimilé à un rectangle tandis que le diagramme de compression reste triangulaire.

Ces remarques sont aussi illustrées par les travaux de JOHNSTON [12], HOUARI [5] et MAI. [13]

CONCLUSION

Les nombreuses recherches effectuées pour l'obtention des BRF, font apparaître que cet objectif ne peut être atteint qu'en jouant sur les paramètres qui conditionnent les caractéristiques du béton. ; la réussite du but poursuivi, bien entendu, est étroitement liée à la qualité de la mise en œuvre.

L'incorporation dans la composition du béton de fibres d'acier, constituées par des spirales apporte des améliorations notables dans les caractéristiques du béton. Les performances constatées ont été obtenues sans exiger un choix particulier de ciment celui-ci (CPJ 45) étant un de ceux couramment employés, ni des granulats naturels, issus de concassage. Les résistances élevées des BSP50 à court terme de ce matériau, permettent de penser qu'il pourrait convenir tout particulièrement dans la fabrication des éléments de structure de faible épaisseur, avec une grande durée de service sans entretien ni réparation.

Par ailleurs, le BRF présente des améliorations notables de comportement vis-à-vis de la fissuration et que l'ajout de tels renforts a pour conséquence la modification du comportement du béton [14], alors qu'un mortier sans fibres casse de manière fragile (dès qu'une fissure apparaît, la rupture est complète).

Les courbes efforts – déformations (flèches) obtenues lors des essais de flexion 4 points sur des corps d'épreuve prismatiques de dimensions 10x10x120 cm font apparaître :

- des résistances à la flexion à 7 jours améliorées
- une énergie à la rupture supérieure à celle du mortier témoin (sans fibres)
- un comportement très différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine

La courbe moyenne charge – flèche obtenue par l'essai monotone donne des informations sur l'endommagement du matériau sous sollicitations mécaniques. [15] Cette dernière est utilisée comme référence pour définir des seuils d'endommagement. Une partie linéaire sur la courbe est observée, puis des phénomènes non linéaires apparaissent. Ils correspondent à une localisation de l'endommagement sur une (ou plusieurs) fissure.

Une étude plus approfondie devrait permettre à l'aboutissement des explications des phénomènes observés et des mécanismes d'action des renforts sur le comportement global de l'élément de structure.

REFERENCES

- [1]- P. ROSSI. « Les bétons de fibres métalliques. », 1998, Presse de l'ENPC. Paris
- [2]- F. De LARRARD. « Construire en béton. » Collection du LCPC.2002.
- [3]- P. ROSSI. « Le développement industriel des bétons de fibres métalliques, conclusions et recommandations. » BEFIM.2002. Presses de l'ENPC. Paris.
- [4]- JALLIL W. « Dallages en béton renforcé de fibres métalliques. » Annales n°522, Mars – Avril 1994. ITBTP. Série : technique générale de la construction. N° 149.
- [5]- H.HOUARI. « Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques. »1993. INSA Lyon.243 p.
- [6]- H. HOUARI, N. CHEIKH, S. FERKOUS, M. MOUATSI, M.L. CHIBANE. « Contrôle et qualité des bétons : identification et caractérisation des bétons de la région de Constantine. » Rapport de recherche n°2 du projet n°J2501/04/95, CNEPRU. U.M. Octobre 1996.
- [7]- C. HOY, P.J.M. BARTOS. « Interaction and packing of fibres: effects of the mixing process.3 Proceedings of the third International of RILEM Workshop. High Performance Fibre Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC3), PRO 6, edited by A.E. NAAMAN and H.W. REINHARDT, MAINZ. Germany. May 16-19, pp 185-191
- [8]- P. SERNA ROS. « Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement. » Thèse Doct. Ing. ENPC. Paris.1984. 77p.
- [9]- J. MAS. Centenaire de l'America Concrete Institute. « BHP, BTHP, bétons de fibres, BFUP, applications.3 6-7/12/2004.
- [10]- MAJUMADAR. « Fiber cement and concrete composite. » In fiber reinforced cement and concrete, RILEM Symposium 1975, edited by A. NEVILLE, L. LANCATER. Construction press.1975, pp 279-313. Communication 7.1
- [11]- D.J. HANNANT « Fibre cements and fibre concretes.3 New York. J. WILEY and sons, 1978, 219 p.
- [12]- C.D. JOHNSTON. « Steel fiber reinforced and plain concrete factors influencing flexural strength measurement. » A.C.I. Materials journal, 1982. Vol. 79, N°2, 12 p.
- [13]- Y.W. MAI. « Cohesive zone and crack resistance - curve of cementitious materials and their fibre – reinforced composites. » Engineering Fracture Mechanics; pp 219-234, 2002.
- [14]- E. PARANT « Mécanismes d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibre multi échelle sous sollicitations sévères : fatigue, choc, corrosion. » ENPC. 3/12/2003.
- [15]- F. BENBOUDJEMA. « Modélisations des déformations différées du béton sous sollicitations bi axiales. Applications aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs de centrales nucléaires. » Université de Marne La Vallée. UFR des sciences et technologie. 2002.