



matériaux de construction

COMPORTEMENTS STATIQUE ET CYCLIQUE DES MATRICES CIMENTAIRES RENFORCÉES DE FIBRES DE VERRE

Nourredine ARABI¹, Raoul JAUBERTHIE², Hocine OUCIEF¹, Bachir REDJEL¹

¹ Laboratoire MGE, Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12 Annaba, 23000 Algérie

² Laboratoire GCGM, INSA de Rennes, 20 Avenue des buttes de Coësmes, 35043 Rennes, France

Auteur correspondant : nourredine_arabi@yahoo.fr

CONTEXTE

Cet article porte sur des travaux effectués concernant le renforcement des matrices cimentaires par des fibres de verre. Une partie de ces travaux a été déjà publiée dans les Annales BTP N°6/2005 en ce qui concerne la durabilité des fibres de verre.

Le composite ciment-verre désigné habituellement sous l'appellation CCV apparaît être une combinaison idéale de fibres de verre et de ciment qui permet d'avoir des solutions technologiques intéressantes et de remplacer les produits de type fibrociment. Ces derniers autrefois à base d'amiante sont actuellement interdits pour des raisons sanitaires. Il est donc utile de substituer l'amiante par des fibres d'une autre nature pour conserver les qualités mécaniques. Ainsi, en utilisant des adjuvants appropriés, les fibres de verre peuvent être incorporées aisément jusqu'à un taux de 5% et un peu plus en procédé de mise en place par projection. Le CCV a l'avantage d'assurer à très court terme des résistances mécaniques concurrentielles par l'apport des propriétés des fibres de verre. Ce matériau est souvent bien adapté pour la restauration de certains

ouvrages endommagés où le remplacement d'une partie du matériau support par un matériau identique est néanmoins difficile. Ce type de matériau agit en tant que matériau de remplissage, les fibres limitant les microfissures.

Concernant les justificatifs d'application, cet article est de portée scientifique mais concerne également les utilisateurs potentiels en restauration des ouvrages en béton armé endommagés.

1. INTRODUCTION

Dans les bétons armés, les armatures acier améliorent les résistances en traction mais n'ont aucun effet sur la microfissuration. Pour réduire cette dernière, l'utilisation de fibres est couramment préconisée. Par ailleurs, le béton fibré est très souvent utilisé en tant que matériau de réparation [1, 2, 3]. Le renforcement de la matrice cimentaire par des fibres assez courtes et réparties régulièrement dans le volume, empêche les microfissures de s'étendre en formant un pontage entre les lèvres de la fissure [4].

Les produits de type fibrociment autrefois à base d'amiante sont actuellement interdits pour des raisons de santé : il est donc préconisé de substituer cette amiante par des fibres d'une autre nature pour conserver les qualités mécaniques. La présence d'un volume minimum est alors nécessaire afin d'optimiser les bienfaits de cet ajout. L'influence de la nature des fibres est présentée dans les travaux d'Hermann [5]. Un excès de fibres compromet la maniabilité du mélange frais. Si les fibres métalliques se dispersent facilement dans le mortier frais [6], il n'en est pas de même pour les fibres de verre. Les fibres de verre sont généralement caractérisées par leur longueur et non par leur élançement [7]. La longueur, la nature et la teneur en fibres conduisent à l'augmentation de la résistance, de la résistance à la fissuration et de la ténacité [8,9]. Notre étude est basée sur des suivis mécaniques de l'endommagement jusqu'à la rupture sous sollicitation statique. Par ailleurs, nous avons étudié le comportement sous sollicitation cyclique. Les études en fatigue se limitent en général à des tracés de courbes $S-N$ (stress-number of cycles) et à la détermination d'une limite d'endurance probable pour des conditions d'essais particulières [10, 11].

Le but de ce travail est d'analyser l'influence de la longueur et du taux de fibres sur les propriétés physiques et mécaniques des composites à matrice cimentaire en sollicitations statique et cyclique.

2. PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1. Matériaux utilisés

Le ciment utilisé dans cette étude est le CEM II/B (32,5R), commercialisé par le groupe Cement Lafarge (France), la composition chimique est présentée tableau 1. Le sable employé, est un sable siliceux très fin dans une plage granulométrique ne dépassant pas 500 m (figure 1). La

Constituants en %	CEM II/B 32,5R
SiO_2	25,05
Al_2O_3	8,6
Fe_2O_3	3,5
CaO	55,4
MgO	0,9
K_2O	1
Na_2O	0,15
SO_3	2,7
S^-	<0,01
Cl^-	0,022
Insolubles	11,8
Perte au feu	2,2
TiO_2	-
MnO	-
P_2O_5	-
Mn_2O_3	-
Gypse	4
CaO libre	1,2

Tableau 1. Composition chimique du ciment

maniabilité des mélanges frais est améliorée à l'aide d'un fluidifiant (Sikament FF86). La fibre de verre utilisée est de type CemFil (alcali-résistante) fabriquée par Vetrotex Saint Gobin (France). Chaque fil est composé de 204 fils ayant chacun un diamètre de 10 m environ (figure 2). Son traitement à l'oxyde de zirconium ($\text{ZrO}_2=16,6\%$) le rend alcali résistant [12].

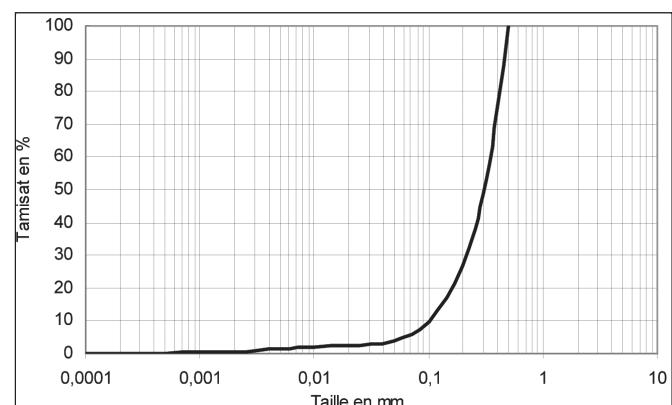


Figure 1. Distribution granulométrique du sable (réalisée avec un granulomètre Laser)

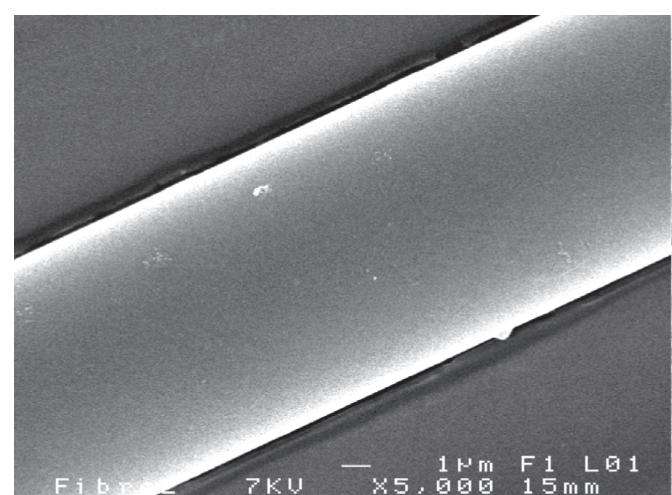


Figure 2. Fibre de verre CemFil (alcali-résistante)

2.2. Préparation des échantillons et essais

Des séries d'éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) ont été confectionnées : ceci pour un mortier témoin (0% de fibres) et un composite ciment-verre (CCV) renforcé de fibres à des taux volumiques par rapport à la matière sèche (ciment + sable) de : 0,5 - 1 - 1,5 - 2 et 2,5% et avec des longueurs de fibres de : 3 ; 6 et 12 mm.

Afin de trouver un bon compromis entre la mise en œuvre du mélange et le taux de fibres à incorporer, le fluidifiant a été dosé à un taux de 1% de la masse du ciment. Pour tous les mélanges, les rapports eau/ciment et ciment/sable sont fixés à 0,5. Les séries d'éprouvettes sont conservées en salle humide (20°C , humidité relative 95%).

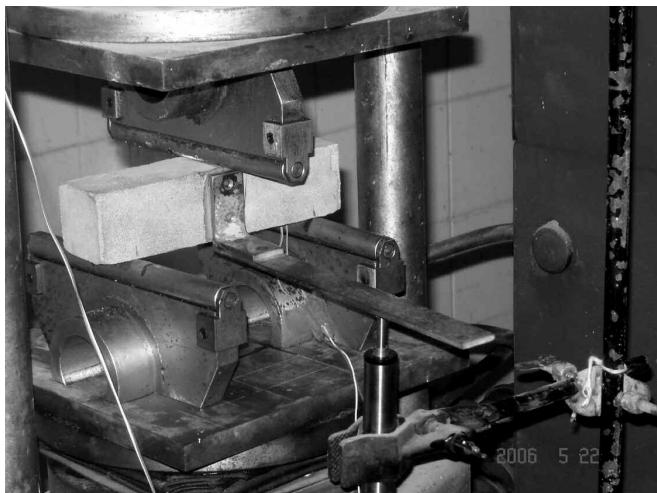


Figure 3. Essai de flexion 3 points

Les essais statiques sont menés en flexion 3 points sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avec un capteur LVDT pour mesurer les déplacements (figure 3), et en compression sur les demi-éprouvettes avec une surface d'appui de $4 \times 4 \text{ cm}^2$. Les mesures de résistance sont relevées à 7, 14 et 28 jours de durcissement.

Les essais cycliques de fatigue sont menés avec une machine à asservissement hydraulique équipée d'un capteur de charge de 5 kN et reliée à un système d'acquisition de données. La sollicitation choisie est ondulée avec un rapport $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,16$ à charge imposée en flexion 3 points et à une fréquence de 1 Hz sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) à l'âge de 28 jours. Les échantillons sont chargés à des niveaux de 70, 60, 50, 40 et 30% de la charge à la rupture statique avec un signal triangulaire. Trois échantillons par niveau sont testés. Toutes les éprouvettes ont été testées jusqu'à la ruine. Le nombre de cycles à la rupture est noté pour chaque échantillon.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Comportement en flexion

La figure 4 montre un exemple de courbes charge-déformation pour l'échantillon de référence et les échantillons fibrés à 2% et ceci, pour différentes longueurs de fibres. Avec les fibres courtes (3 ou 6 mm), le comportement est analogue à celui de l'échantillon de référence (non fibré). Les courbes sont quasi-linéaires jusqu'à la rupture, caractéristiques d'une fracture fragile. Pour les échantillons renforcés avec des fibres de 12 mm, la courbe montre trois phases : une phase élastique linéaire, suivie d'une autre non linéaire traduisant l'évolution de l'endommagement sous l'effet d'une diffusion de microfissures. Au-delà de ce maximum, le comportement plastique apparaît. Lors de l'augmentation de l'effort, les premières microfissures sont reprises par les fibres longues et la contrainte est ainsi redistribuée dans le matériau. Les maxima (efforts) sont plus élevés au fur et à mesure que la longueur de fibres croît mais la déformation n'est plus linéaire. Au-delà du

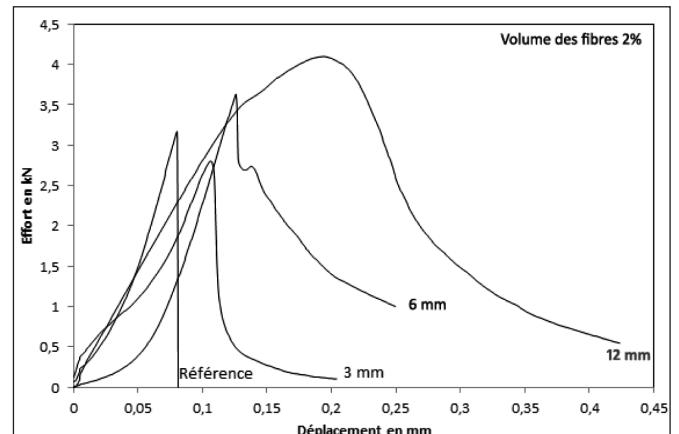


Figure 4. Résistance en flexion 3 points

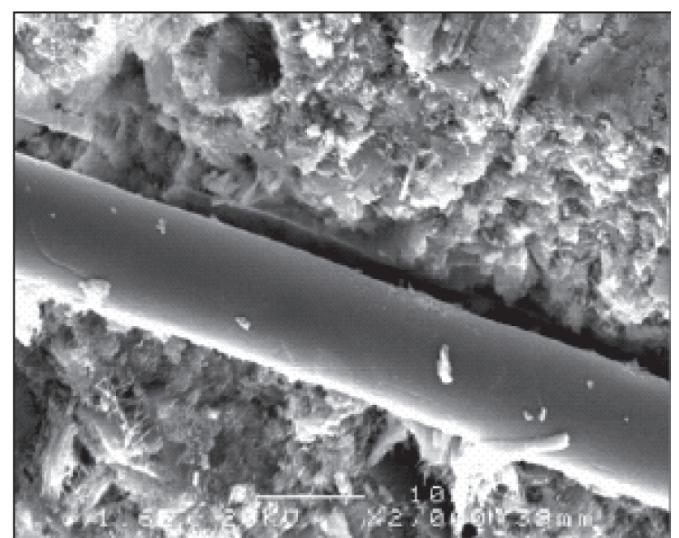


Figure 5. Déchaussement de la fibre de la matrice (observation au MEB)

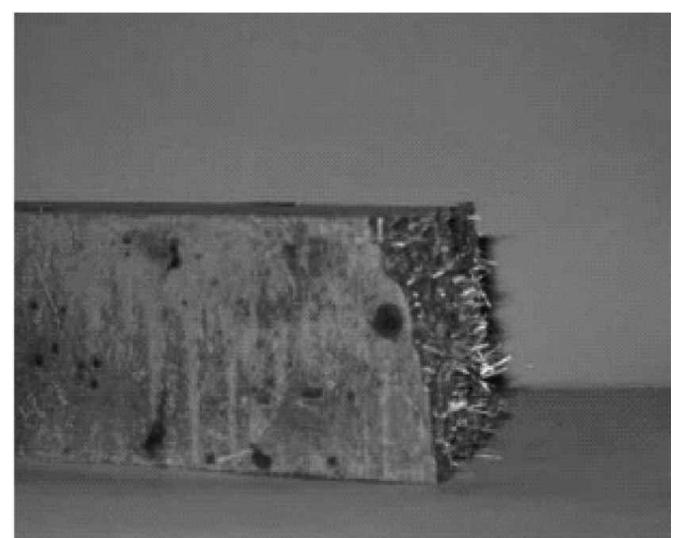


Figure 6. Fibres déchaussées à la suite d'un essai de flexion

maximum en efforts, la déformation est d'autant plus ductile que la longueur croît. Mais cette ductilité n'est pas aussi nette que celle obtenue en pareils cas avec des fibres métalliques [4, 6]. Les fibres utilisées dans cette étude pré-

sentent des longueurs critiques de fibres (longueur de fibre indispensable pour le transfert de charge) inférieures aux longueurs des fibres. Dans ce cas la rupture des fibres n'a pas eu lieu et c'est un déchussement qui se produit (figures 5 et 6).

Pour obtenir des indications sur la ductilité du matériau et l'apport des fibres en terme d'énergie dissipée, la figure 7 définit la répartition des énergies représentées par l'aire située sous la portion de la courbe comprise entre les points O, A et C. La rupture complète du matériau est définie lorsque la contrainte (ou l'effort) mesurée devient inférieure au tiers (1/3) de la contrainte maximale post fissuration [13]. Dans notre cas le point C de la figure 7 en est l'illustration. Ainsi, cette approche semblable à celles utilisées par les normes ASTM C 1018 [14] et JCI SF-4 [15], permet le calcul de l'énergie pour l'intervalle de l'effort entre 0 et 1/3 de l'effort maximal post-fissuration. La part de l'énergie totale consacrée à l'ouverture de la 1^{re} fissure (zone linéaire) est relativement faible. Elle est de l'ordre de 30% de celle de l'énergie totale dissipée et celle nécessaire pour atteindre l'effort maximal post fissuration ne représente que 45% environ de cette énergie totale dissipée au cours de l'essai. Cette constatation témoigne bien de l'apport des fibres comme résistance résiduelle si on considère celle-ci comme étant la résistance post pic (c'est-à-dire après la valeur maximale de la contrainte).

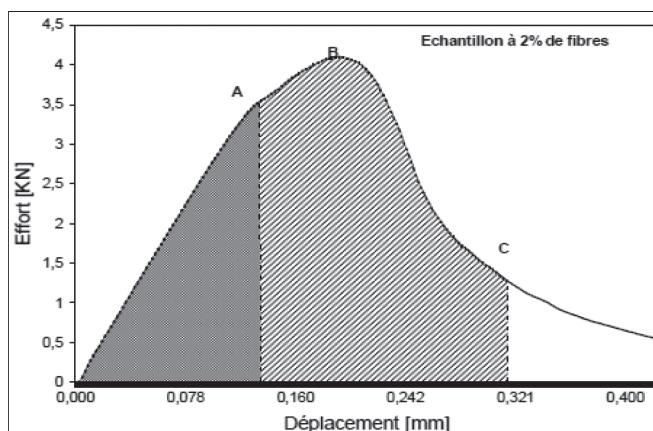


Figure 7. Répartition de l'énergie pour un essai de flexion 3 points

Les figures 8 et 9 illustrent les résultats obtenus des résistances en flexion à 7 et à 28 jours de durcissement pour les 3 longueurs de fibre utilisées en fonction du taux de fibres. Une forte dispersion des résultats apparaît, ceci est lié au caractère hétérogène des matériaux granulaires et en grande partie à la distribution aléatoire et variable des fibres (échantillons différents initialement).

La présence et la teneur en fibres de 3mm n'ont quasiment pas d'influence sur les résistances en flexion. L'amélioration croît avec la longueur des fibres et leur pourcentage (fibres de 6 mm et 12 mm). Il est à remarquer que pour les échantillons fibrés à des taux inférieurs à 2% présentent des écarts de résultats plus au moins importants (résistances obtenues à 7 jours). Toutefois, ces écarts deviennent moins importants à 28 jours. Ceci est probablement dû à la maturité de la matrice cimentaire. La liaison matrice fibre et, par là même le transfert de charge par la

fibre de par et d'autre de la micro fissure s'améliore avec le temps de conservation. A 28 jours la matrice acquiert une maturité suffisante pour supporter les charges et les fibres semblent présenter peu d'influence à cause de leur dégradation en milieu alcalin comme rapporté dans une précédente étude [16]. Les bienfaits des fibres sont plus marqués pour la longueur de 12 mm et à une fraction volumique de fibres à partir de 2%.

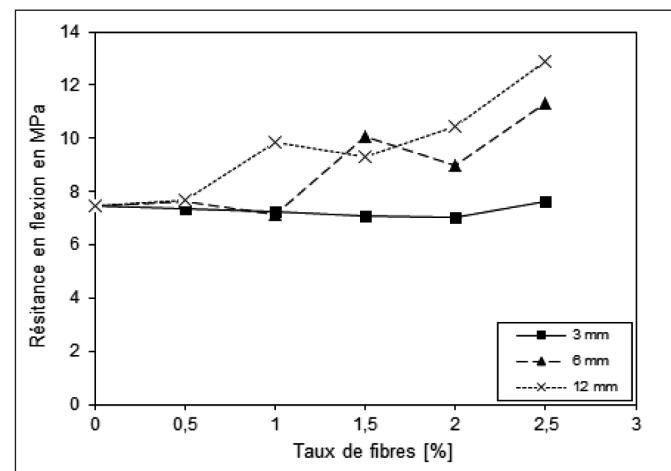


Figure 8. Evolution de la résistance en flexion à 7 jours

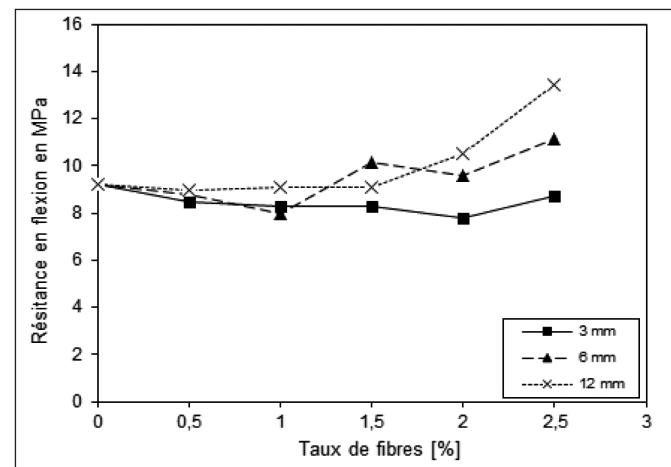
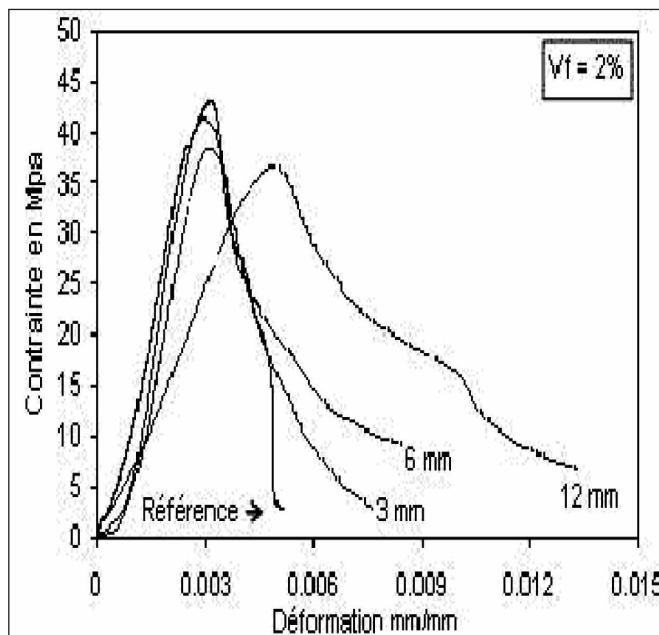


Figure 9. Evolution de la résistance en flexion à 28 jours

3.2. Comportement en compression

La figure 10 montre un exemple de courbes contrainte-déformation pour le matériau de référence et des matériaux fibrés à 2% pour les longueurs de fibres 3, 6 et 12 mm. Ces courbes sont classiques des matériaux granulaires soumis à une contrainte de compression uniaxiale. Les courbes des échantillons fibrés sont plus étendues que l'échantillon témoin ce qui se traduit par une pente moins raide donnant ainsi aux matériaux fibrés un caractère de comportement adoucissant. Les longueurs des fibres sont mises en évidence, les fibres courtes interviennent à une échelle très petite proche de l'ordre de la taille des matériaux utilisés (sable). Les fibres courtes retardent l'apparition des fis-

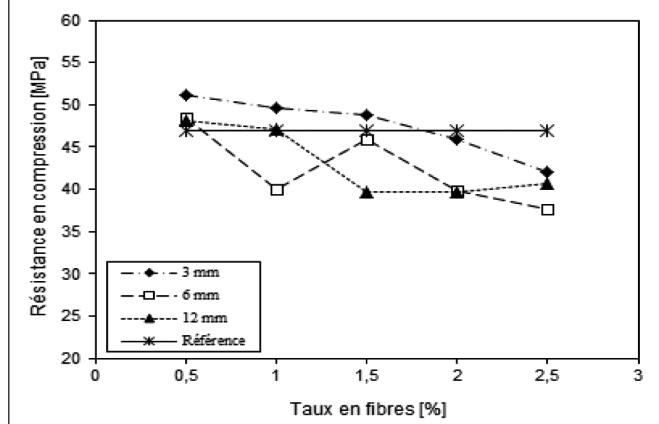
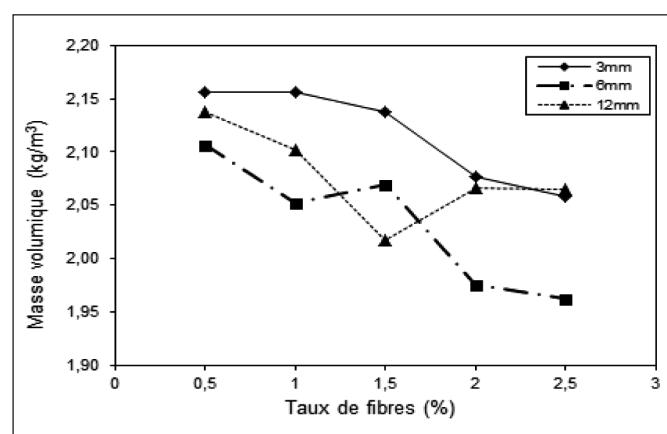
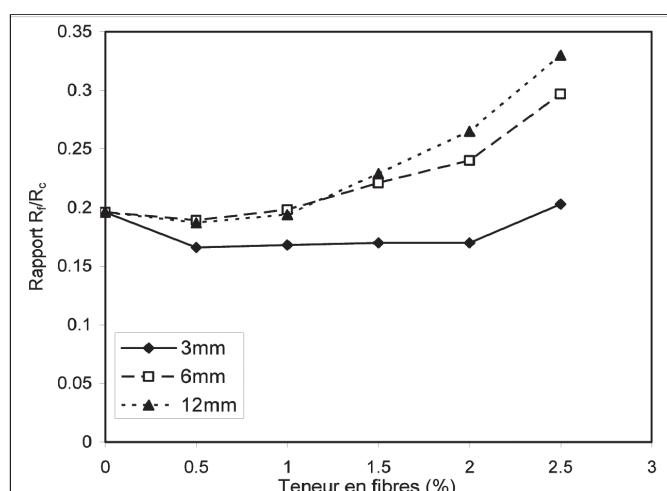
**Figure 10. Résistance en compression**

sures obliques et, ainsi, la résistance en compression augmente. En revanche, les fibres longues interviennent au niveau des macrofissures obliques [17].

L'incorporation de fibres de verre n'apporte pas d'amélioration en compression comme l'illustre la figure 11. Au contraire les résistances à la rupture sont plus faibles que pour le mortier de référence. A l'inverse de la résistance en flexion, les CCV à fibres longues enregistrent le plus de chute de résistance par rapport au témoin à cause de la concentration des fibres en faisceaux qui rendent la matrice moins compacte. Celle-ci montre une structure poreuse comme le montrent les observations d'échantillons au microscope électronique à balayage (figure 12).

La multiplication de vides entraîne une chute de masse volumique avec l'augmentation de la teneur en fibres (figure 13).

L'intérêt principal de l'ajout de fibres de verre est bien évidemment, le gain de résistance en flexion. Ceci est clairement mis en évidence par la figure 14 qui représente l'évolution du rapport R_f/R_c (résistance en flexion/résistance en compression) en fonction de la teneur en fibres

**Figure 11. Evolution de la résistance en compression à 28 jours****Figure 12. Fibres en faisceaux****Figure 13. Evolution de la masse volumique à échéance de 28 jours de durcissement****Figure 14. Rapport de la résistance en flexion à la résistance en compression**

et ceci pour les 3 longueurs de 3, 6 et 12 mm ; les fibres les plus longues sont les plus efficaces.

3.3. Comportement sous chargement cyclique

Les résultats des essais de fatigue sont traduits sur la courbe de Wöhler (figure 15) qui montre la variation de la durée de vie avec le niveau de chargement pour le matériau témoin et pour 2 taux de fibres : 0,5 et 1,5 %. Une seule longueur de fibres a été expérimentée : 12 mm. Nous nous limiterons dans cette analyse à une description qualitative des résultats des essais de fatigue endurance.

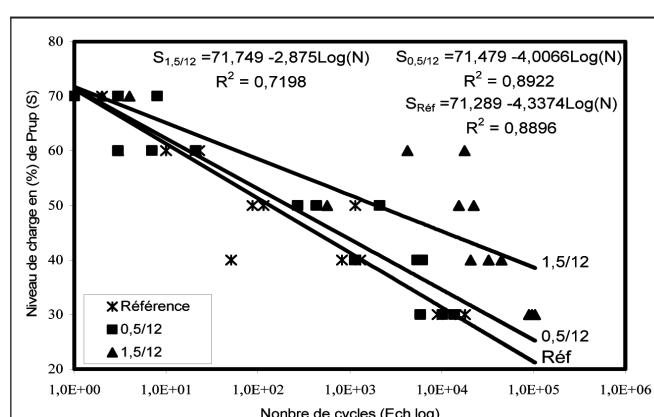


Figure 15. Courbes d'endurance S-N

Comme il apparaît sur la figure 15, les résultats de durée de vie se caractérisent par une forte dispersion empêchant toute prévision avec une bonne probabilité. Cette dispersion est devenue un fait acceptable considérée comme une caractéristique de ces matériaux liée à leur nature hétérogène [11, 18]. Les hétérogénéités locales: composition, granulométrie, taux, géométrie et orientation des fibres, distribution des défauts, porosité sont quasiment incontournables.

Les échantillons testés à 50% et plus de la charge maximale, se sont rompus sous un nombre de cycles très faible. Il est vraisemblable que ce niveau de charge correspond au domaine de comportement non linéaire de l'éprouvette, c'est-à-dire le domaine fissuré. La microfissuration n'est pas obligatoirement visible à l'œil nu. L'amplitude de contrainte plus importante va conduire à une vitesse d'endommagement plus rapide. A ce stade les fibres ne semblent pas intervenir. Ce qui semble probable, passé un certain taux de chargement, la sollicitation cyclique détériore très fortement l'interface fibre-matrice [19]. Le problème majeur du rôle des renforts tient au fait que les performances mécaniques du composite chutent dès qu'une fraction du renfort perd de son efficacité mécanique. Ainsi, la probabilité de ruine est beaucoup plus présente lorsqu'une détérioration de l'interface fibre-matrice est initiée sous une sollicitation cyclique. En outre, il faut signaler que tous les événements précédant la rupture en fatigue dépendent d'une série de processus aléatoires dont la conjugaison se traduit par une importante dispersion

dans les résultats. La présence de divers types de dommages qui se développent lors d'un essai de fatigue par flexion sont des paramètres difficiles à quantifier mais qui jouent sur la dispersion. D'autre part l'absence d'une définition claire d'un critère de rupture en fatigue reste l'une des sources majeures des dispersions observées dans les résultats de durée de vie des CCV. Le critère adopté dans cette étude est la rupture complète de l'éprouvette.

L'augmentation de la teneur en fibres semble améliorer la capacité d'endurance du matériau. Toutefois, dans la plage étudiée, il ne semble pas apparaître un palier de limite d'endurance.

4. CONCLUSIONS

L'incorporation des fibres de verre améliore le comportement en flexion des mortiers. Une synergie matrice-renfort a été constatée avec les fibres longues et un dosage volumique à partir de 2%. A l'inverse, les résistances en compression ont tendance à diminuer.

La longueur de fibre 12 mm ne permet pas de valider le comportement réel de ductilité en sollicitation de flexion, des fibres de verre plus longues pourraient apporter des réponses.

Les fibres de verre en faisceaux contraignent toute investigation correcte des composites ciment-verre. Cet aléa ne peut être résolu techniquement.

Lors des essais cycliques, la difficulté de travailler sur un nombre important d'échantillons empêche d'avoir une analyse quantitative significative permettant l'établissement d'un critère fiable de rupture par fatigue. Les résultats disponibles qui se caractérisent par leur forte dispersion dégagent néanmoins une tendance du matériau à montrer une limite de fatigue pour cette sollicitation. Les essais de fatigue démontrent le caractère fragile de ce matériau et même avec des cycles de faible amplitude de chargement aucune accommodation du matériau n'est à signaler.

Le taux de chargement n'est pas un paramètre suffisant pour analyser la probabilité de rupture par fatigue des CCV. A contrainte imposée impliquera une amplitude de contrainte importante, ce qui signifie à vitesse d'endommagement rapide. Ceci pourrait nuire à l'état de l'interface fibre-matrice. Cela n'impliquera pas pour autant une évolution rapide de la flèche qui reste elle aussi un facteur prédominant pour la rupture.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement les personnels techniciens du laboratoire GCGM de l'INSA de Rennes (France) pour toute l'aide apportée et les moyens matériels offerts pour la réalisation de ce travail.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Bentur, S. Mindess, Fibre reinforced cementitious composites, 2^{ème} edition, London and New York: Taylor and Francis, 2007



- [2] V. Houget, L. Ambroise, J. Pera, Propriétés mécaniques des composites ciment fibres organiques, *Materials and Structures*, 28 (178) (1995) 220-229
- [3] N. Arabi, B. Redjel, Y. Melinge and R. Jauberthie, Alkali resistant glass fiber reinforced cementitious materials for patching applications, *Concrete Solutions*, Proceedings 1st International Conference on Concrete repair, Volume 2, St-Malo, France, GR Technologie Ltd, London, UK, (2003) 657-662
- [4] R.N. Swamy, K. Al-Noori, Flexural properties of steel fibre reinforced concrete, *Concrete*, 09(6) (1975) 30-31
- [5] K. Hermann, Béton de fibres d'acier, fibres synthétiques et fibres de verre, *Bulletin du ciment*, 60 (7-9) (1992)
- [6] R.N. Swamy, P.S. Mangat, Influence of fibre geometry on the properties of steel fiber Reinforced concrete, *Cem. and Con. Res.*, 4 (1974) 451-465
- [7] H.N. Marsh, L.L. Clarke, Glass fiber reinforced cement base materials, ACI, An International symposium, U.S.A, SP-44 (1974) 247-264
- [8] B. Mu, C. Meyer, R. Felicetti, S. Shimanovich, Flexural performance of fiber-reinforced cementitious matrices, Proceedings of the third international conference on concrete under severe conditions, Canada (2001) 1433-1440
- [9] V.S. Gopalaranam, R. Gettu, On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes», *Cem. & Con. Comp.*, 17 (1995) 239-254
- [10] A. Toumi, A. Bascoul, A. Turatsinze, Prédition de la durée de vie du béton sous fatigue, *Revue Française de Génie Civil*, 4 (2-3)(2000) 297-307
- [11] A.E. Naaman, H. Hammoud, Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete, *Cem. & Con. Comp.*, 20 (1998) 353-363
- [12] A. Ayadi, M. Palou, A. Iratni, The durability of alkali-resistant glass fibres in cement matrix, *J. Phys. IV*, 123 (2005) 155-158
- [13] V. Langlois, B. Fiorio, A.L. Beaucour, R. Cabrillac, D. Gouvenot, Experimental study of the mechanical behaviour of continuous glass and carbone yarn-reinforced mortars, *Const. and Buil. Mat.*, 21 (2007)198-210
- [14] ASTM, Standart Test Method for flexural toughness and first-crack strength of fibre- reinforced concrete , ASTM C 1018-92, Vol 04.02, USA, (1992) 510-516
- [15] JCI Standard SF-4, Japan Concrete Institute Standards for Test methods of fiber reinforced concrete, Japan, (1984) 45-51
- [16] N. Arabi, B. Redjel, R. Jauberthie, Influence des milieux de conservation sur la tenue des fibres de verre alkali-résistant dans une matrice cimentaire (CEM II/B 32,5R), *Annales du BTP*, 6 (2005) 19-24
- [17] P. Rossi, Les bétons de fibres métalliques. Presse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1998
- [18] B. Redjel, Fatigue damage in short fiber reinforced composite materials, International Conference on Fatigue Composites, SF2M, Paris (1997) 165-172
- [19] E. Parrant, Mécanismes d'endommagement et comportement mécaniques d'un composite cimentaire, fibre multi-échelle sous sollicitations sévères : fatigue, choc, corrosion, Thèse de doctorat, ENPC de Paris 2003

