

COMPORTEMENT MECANIQUE DES MORTIERS FIBRES A DES TEMPERATURES ELEVEES

M. Ezziane^{1,2}, R. Jauberthie², T. Kadri¹ et A. Bouhaloufa¹

¹ Département Génie Civil, Laboratoire LMPC – Université de Mostaganem- 27000, Algérie

² Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique, INSA – Université Européenne de Bretagne- 35043 Rennes Cedex, France.

Résumé

Les caractéristiques mécaniques (flexion et compression) des mortiers ordinaires diminuent très rapidement lors des expositions à des températures élevées. Les microfissurations apparaissent quasi immédiatement à cause du départ de l'eau libre puis de l'eau liée, mais aussi des changements de phases cristallines.

En général, il est courant admis que l'introduction de fibres freine et limite la microfissuration des mortiers et des bétons à température ambiante.

Le travail actuel consiste à tester l'influence des fibres lors des expositions à des températures élevées. Les fibres utilisées sont des fibres d'acier qui, normalement, doivent mieux résister à ces conditions que les fibres polypropylènes ou les fibres de verre AR.

Les mortiers sont testés à des températures entre 400 et 1000°C avec une durée d'exposition de 2°C/mn et maintenus en température pendant 1h. Ce choix est guidé par les conditions incendie et intervention des secours.

L'évolution des résistances résiduelles est suivie, les changements de phases de la pâte cimentaire sont analysés par diffraction X. L'attaque éventuelle des fibres est observée par microscopie électronique à effet de champ. Lorsque les mortiers n'ont pas atteint le stade de ruine, le PH est déterminé afin de contrôler si les fibres sont toujours passivées.

Il s'est avéré que, jusqu'à 500°C, les fibres métalliques améliorent aussi bien les résistances en flexion et en compression et la ductilité. Au de là de cette valeur, l'écart entre mortier fibré et mortier non fibré s'amenuise.

A partir de cette température, l'apport des fibres sur le plan mécanique devient quasiment nul (alors que les fibres métalliques sont réputées avoir un comportement meilleur que les fibres polypropylènes).

Des explications sont avancées et des solutions pour pallier ces problèmes sont proposées. Les premiers résultats des tests encourt sont encourageants.

Mots clés : mortiers, fibres, tenue au feu, comportement mécanique, pertes de résistance résiduelles.

1. Introduction

L'introduction des fibres dans un mortier ordinaire a permis d'aboutir à une augmentation de la résistance mécanique et de la ductilité à température ambiante.

Lors des expositions à des températures élevées, un matériau cimentaire renforcé par des fibres d'acier subit un endommagement plus ou moins important. Le chauffage induit différentes modifications de ses propriétés et, en particulier, des changements de microstructure accompagnés de perte de résistance mécaniques et de masse (Serdar et al., 2007), (Fu et al., 2004). Le but de cette étude est de tester l'influence mécanique des fibres d'acier sous différentes températures.

2. Partie expérimentale

Ce travail expérimental vise à évaluer le comportement thermomécanique des mortiers renforcés par des fibres métalliques.

2.1 Réalisation des corps d'épreuve

Des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, en mortier normal et en mortier normal avec fibres sont confectionnées pour cette campagne d'essai. Le dosage en fibres est de 0,58% en volume. Ce choix, très souvent utilisé, est dicté par nombre d'auteurs pour éviter la formation de boules hérissées de fils (appelées parfois « oursins ») et avoir une bonne ouvrabilité (Beaudoin, 1982). La composition des mortiers est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1. Composition des mortiers

Composants	Mortier ordinaire sans fibres	Mortier ordinaire avec fibres d'acier
Ciment CPA-CEM I 52,5 R CE CP2, (g)	900	900
Sable plicène (lavé en carrière), (g)	2700	2700
Eau, (g)	450	450
Fibres d'aciers (d=0,25 mm et L = 25 mm), (% en volume)	0	0,58
Rapport eau/ciment	0,5	0,5

Tous les mélanges ont été gâchés en suivant le même protocole de malaxage. L'eau est ajoutée au ciment, puis l'ensemble est malaxé jusqu'à l'obtention d'une pâte. Le sable est ajouté graduellement à la pâte puis malaxé jusqu'à homogénéisation. Dans le cas des mortiers fibrés, les fibres d'acier ont été ajoutées et dispersées manuellement en dernière étape. Les mélanges ont été malaxés deux minutes après l'introduction du dernier constituant. Les éprouvettes sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 h, puis stockées en salle sèche (20°C, 50% HR) pendant un 1 an.

2.2 Condition de chauffage

Les caractéristiques mécaniques sont influencées notamment par la taille des échantillons et par la vitesse de montée en température. Le gradient de température à l'intérieur des échantillons peut engendrer, par dilatation thermique, des microfissures. En revanche, ce sont les températures atteintes et la durée d'exposition à ces températures qui importent pour obtenir les transformations chimiques et minéralogiques. Les traitements thermiques ont été réalisés sur des échantillons prismatiques, de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de mortier normal sans fibres et de mortier normal avec fibres. Les paliers atteints sont fixés à : 400, 500, 600, 700, 800 et 1000 °C. Cette température est maintenue pendant 1 h. La vitesse de montée en température est fixée à 2 °C/mn. Le retour à température ambiante est obtenu four éteint et fermé. Les essais mécaniques sont réalisés sur des mortiers sains et des mortiers traités thermiquement aux différentes températures afin de déterminer les résistances à la compression, à la traction par flexion et le module d'Young.

3. Essais mécaniques sur le mortier de référence

3.1. Résistance à la compression

La figure 1 montre que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression et que la résistance n'est que légèrement affectée comme l'ont montré un certain nombre d'études (Balaguri 1994), (Rossi, 1996). D'autres auteurs sont en désaccord et parlent soit d'une augmentation de 15 à 20 % ou quelques fois d'une légère diminution (Gopalaratnam et al, 1985).

Les fibres ne jouent un rôle significatif qu'après la rupture de la matrice cimentaire : l'énergie dissipée, caractérisée par l'aire sous la courbe, est très nettement augmentée (Fig. 1). Il est important de remarquer que le module d'élasticité reste pratiquement inchangé.

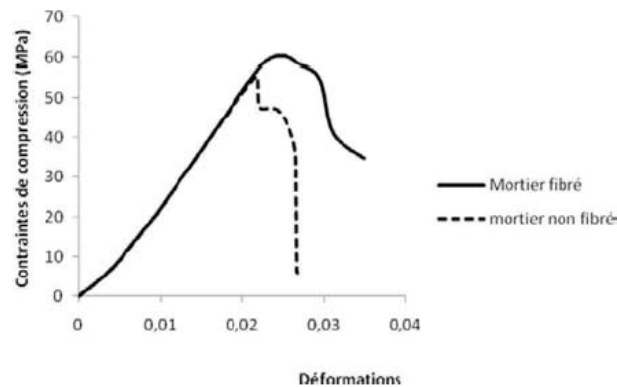


Figure 1. Courbes contraintes-déformations en compression de mortiers de références

3.2. Résistance à la traction

L'ajout des fibres dans le mortier a des conséquences plus marquées sur la résistance en traction (Fig.2). On remarque que, avec l'addition de 0,58% de fibres d'acier, la résistance à la flexion augmente de 25% par rapport à celle du mortier non renforcé.

Les résultats font également apparaître un comportement ductile du mortier fibré. La présence de fibres ductiles dans la matrice modifie considérablement le comportement fragile en limitant le phénomène de propagation rapide et instable de la rupture. Leur présence rend non seulement la propagation de la fissure plus lente et progressive avec l'accroissement de la charge, mais autorise un transfert de contrainte à travers les lèvres. Ceci permet au composite d'avoir une résistance post-fissuration et de supporter des déformations beaucoup plus grandes que la matrice seule.

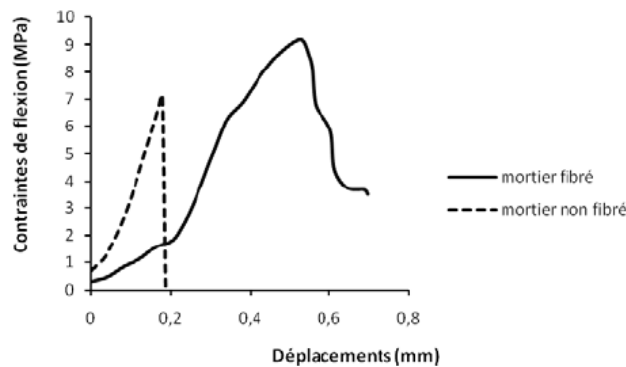


Figure 2. Courbes contraintes-déformations en traction par flexion 4 points des mortiers de référence

4. Essais mécaniques sur le mortier après chauffage

Exposé à de hautes températures, le mortier subit d'importantes modifications physico-chimiques qui influencent son comportement mécanique. Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance décroît avec la température à laquelle il est exposé.

4.1. Résistance à la compression

La figure 3 présente l'évolution de la résistance en compression des mortiers ordinaires fibrés et non fibrés, en fonction de la température à laquelle ils ont exposés.

On peut noter que l'introduction des fibres a nettement contribué à l'amélioration de la résistance en compression lors des expositions entre 400 et 700°C (environ 30%).

La perte de contrainte est définie par la relation :

$$(\sigma_i - \sigma_T) / \sigma_i$$

σ_i contrainte à la rupture par compression pour l'échantillon non traité thermiquement

σ_T contrainte à la rupture par compression pour l'échantillon traité à la température T

Au-delà de 500°C, la perte de résistance en compression sur la résistance initiale dépasse les 30% (Fig.4), par conséquent au-delà de ce seuil, les fibres n'apportent aucune amélioration sur les résistances à la compression résiduelles.

A partir de 800°C, la résistance du mortier fibré est moindre que celle du mortier non fibré. Cette différence peut être attribuée au phénomène d'écaillage qui est important sur les mortiers renforcés (Fig. 4). Ce comportement est fonction de la sollicitation thermique (vitesse d'échauffement et température atteinte), de la forme de l'élément, de la densité des fibres et de la porosité du mortier. La figure 5 est un exemple de l'écaillage visible sur les mortiers fibrés et ceci à partir de 800°C. Ce phénomène n'apparaît pas pour les mortiers non fibrés.

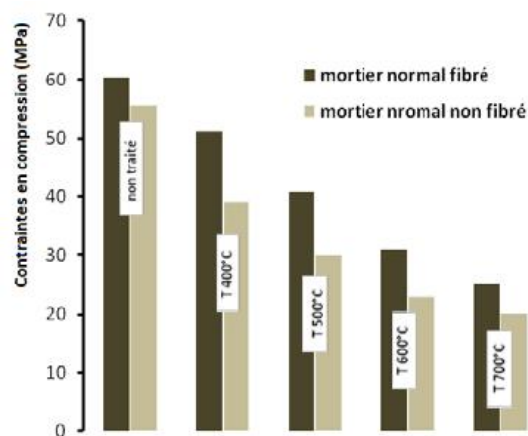


Figure 3. Évolution de la résistance en compression des mortiers en fonction de la température

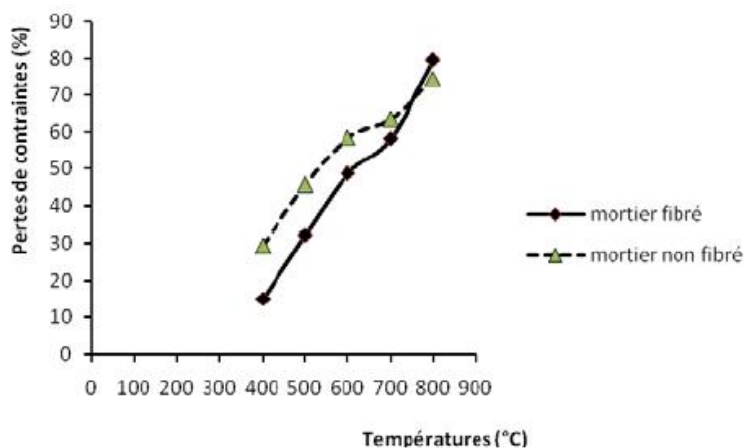


Figure 4. Pertes de la résistance en compression sur la résistance initiale



Figure 5. Mortier normal avec fibres d'acier traité à 1000°C

4.2. Résistance à la traction

L'analyse des résultats d'essais de traction par flexion 4 points indique que la résistance des mortiers renforcés par des fibres d'acier est nettement supérieure à celle des mortiers ordinaires (fig.6). De plus, les résistances résiduelles des mortiers fibrés sont nettement supérieures à celles des mortiers non fibrés et ceci quelle que soit la température de chauffage atteinte.

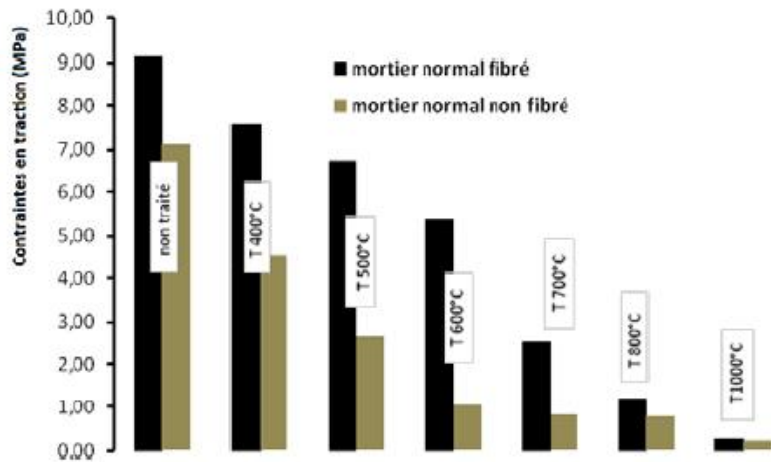


Figure 6. Evolution de la résistance en traction par flexion 4 points des mortiers chauffés

La figure 7 présente les pertes de résistances en traction par flexion sur la résistance initiale à différentes températures. Sur cette courbe, on constate que les pertes de résistances ne dépassent pas 30% sur l'intervalle de température [400, 500°C]. Au-delà de cet intervalle, les pertes deviennent très importantes et influent sur la capacité de résistance du matériau renforcé.

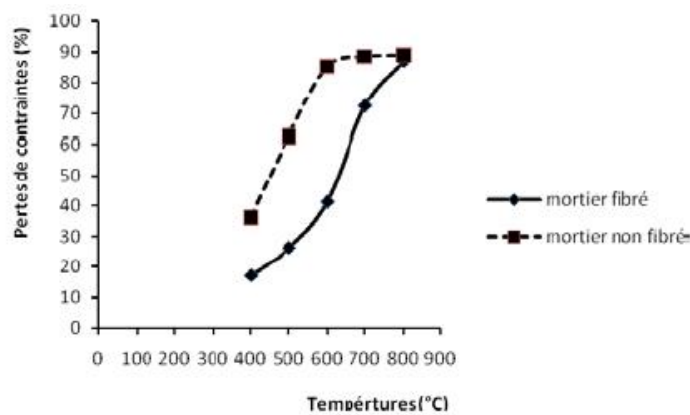


Figure 7. Pertes de la résistance en traction par flexion sur la résistance initiale

La figure 8 représente le comportement deux échantillons de mortier ordinaire renforcé et non renforcé par des fibres, chauffés à une température de 500°C. On constate, pour la matrice non renforcée, une rupture brusque. Par contre, pour la matrice renforcée, les fibres créent une certaine ténacité qui s'oppose à la propagation rapide des fissures et permettent d'obtenir une résistance post pic non négligeable.

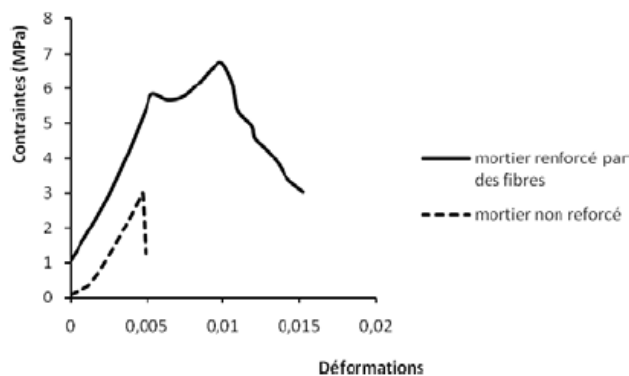


Figure 8. Courbes contraintes – déformations obtenues en traction par flexion

5. Influence des fibres sur les modules d'élasticité des mortiers à hautes températures

Les valeurs du module élastique du mortier fibré et non fibré à température élevée sont comparés dans la figure 9. On peut noter que le module élastique diminue d'une façon monotone avec l'augmentation de la température d'exposition, à la différence du comportement de contraintes-déformations. D'une façon générale, le module d'élasticité décroît d'une manière linéaire avec l'augmentation de température.

Il est à remarquer aussi que les fibres n'ont pratiquement aucune influence sur la variation du module d'élasticité et ceci à toutes les températures d'exposition.

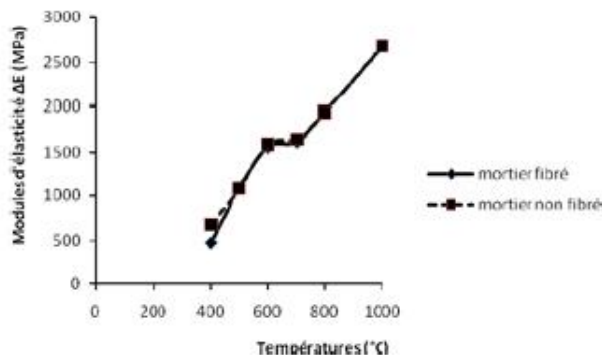


Figure 9. Evolution du module d'élasticité résiduel en fonction de la température

6. Influence des fibres sur la perte de masse

La perte de masse des échantillons due à l'effet de la température d'exposition est présentée dans la figure 10. La perte observée est probablement due à la teneur en humidité et à la porosité des spécimens. En outre, au delà de 800°C, la perte de masse de mortier fibré est plus grande que le mortier ordinaire. Ceci peut également être expliqué avec la porosité plus élevée du spécimen causée par la disparition des fibres.

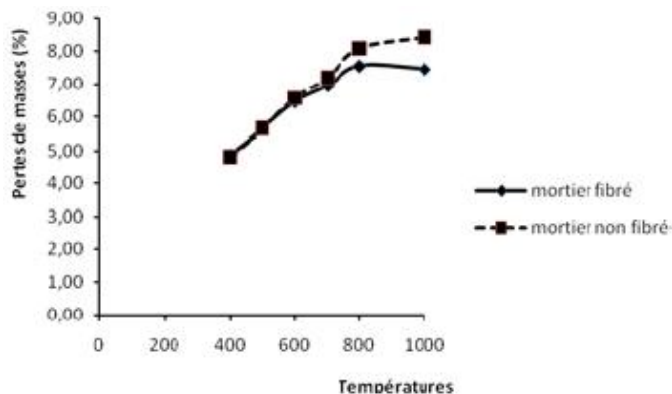


Figure 10. Evolution de la perte de masse en fonction de la température

7. Conclusions

Cette étude a mis en évidence la possibilité de revêtir les matériaux de constructions inflammable par un mortier fibré. La présence des fibres d'acier (0,58 % en volume) rend le mortier moins sujet à la fissuration et contribue à améliorer les résistances à la traction et à la compression aux températures élevées.

Entre 400 et 700°C, l'ajout des fibres d'acier permet :

- Une meilleure résistance à la déformation (meilleure ductilité), ce qui se traduit par une rupture graduelle plutôt que soudaine : les efforts de pontage sont transmis par les fibres aux surfaces de fracture. L'énergie dissipée avant la ruine de l'échantillon est très nettement augmentée.
- Une augmentation nette de la résistance à la compression de l'ordre de 30 %.
- Une augmentation très appréciable de résistance à la traction.

La perte de résistance sur la résistance initiale, quant à elle, varie en fonction de la variation de la température, à savoir :

- Entre 400 et 500°C, la perte de résistance est de l'ordre de 30 %. Cette perte est considérée comme acceptable car elle ne cause pas de désordre gênant.
- Au-delà de 500°C, la perte de résistance devient considérable et crée une instabilité de la structure qui peut conduire à la ruine.

Enfin, on peut conclure qu'en tenant compte du critère de perte de résistance, l'introduction des fibres métalliques est très efficace sur le comportement mécanique tant que la température n'excède pas le palier de 500°C. Au delà de cette limite, l'écart entre mortier fibré et mortier non fibré s'amenuise. Les premiers résultats d'essais à la flamme montrent qu'une protection de 4 cm d'épaisseur est suffisante pour protéger une structure pendant une durée d'une heure au minimum.

Références

- Serdar A., Halit Y. et Bulent B., 2007, High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 504–512.
- Fu Y.F., Wong Y.L., Poon C.S., Tang C.A., Lin P., « Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures », *Cement and Concrete Research*, 33, 789-797, 2004.
- Beaudoin J.J., 1982, Béton renforcé de fibres, Conseil national de recherches Canada.
- Balaguru, P "fiber Reinforced Concrete for structural Components.", A state of art, Workshop on Fiber Reinforced cement & concrete, July 1994, Sheffield, U.K.
- Rossi, P et al "Compressive behavior of concrete: physical mechanisms and modeling", *J. Eng. Mech*, ASCE, 122(11), 1996, p. 1038-1043.
- Gopalaratman, V.S et al "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension", *ACI Journal*, may-June 1985, Vol. 82, n° 3, pp. 310-323.