



HAL
open science

Caractérisations non destructive de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température

Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Ibrahim Messaoudene, Tahar Kadri,
Raoul Jauberthie

► To cite this version:

Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Ibrahim Messaoudene, Tahar Kadri, Raoul Jauberthie. Caractérisations non destructive de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température. NoMaD 2015: Nouveau Matériaux et Durabilité, Nov 2015, Douai, France. hal-01216239

HAL Id: hal-01216239

<https://hal.science/hal-01216239>

Submitted on 15 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisations non destructives de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température

Ezziane M.^{1,2}, Molez L.¹, Messaoudene I.³, Kadri T.², Jauberthie R.¹

¹ Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) INSA – Université Européenne de Bretagne
20, avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, F35708 Rennes cedex, France.

² Laboratoire LMPC, Université de Mostaganem-27000, Algérie

³ Laboratoire de Caractérisation et Valorisation des Ressources Naturelles (LCVRN), Université de Bordj Bou Arréridj,
34000, Algérie

Résumé : L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la température sur les propriétés physiques et mécaniques de mortiers normalisés renforcés avec des fibres d'acier, des fibres de polypropylène et des mortiers hybrides. Des mesures non destructives (absorption d'eau par capillarité, porosité communicante, perméabilité au gaz, vitesse de propagation des ondes longitudinales) et des mesures destructives (résistance mécanique à la flexion, module d'élasticité, résistance mécanique à la compression) ont été réalisées sur des échantillons chauffés avec une vitesse de montée de 5°C/minute à des températures croissantes maximales : 105°C, 400°C, 500°C et 800°C. Les résultats montrent une très bonne corrélation entre l'évolution de ces propriétés et l'endommagement induit par le traitement imposé. L'étude montre une dégradation importante des caractéristiques physico-mécaniques du matériau fibré dès 500°C. Ce seuil de 500°C est identifié tant sur les mesures non destructives que sur les mesures destructives. Les mortiers hybrides présentent un bon compromis : les fibres de polypropylène garantissent une stabilité thermique tandis que les fibres d'acier permettent de conserver un comportement mécanique intéressant.

1. Introduction

Les matériaux cimentaires sont des matériaux endommageables vis-à-vis des sollicitations mécaniques, au comportement non linéaire de type fragile ou quasi-fragile, dont les propriétés en traction sont les plus faibles. Le renforcement par des fibres apparaît de différentes manières selon les auteurs : par leur capacité à contrôler les fissures [1], comme des absorbeurs d'énergie [2-4], par leur capacité à transférer les charges, par leur résistance en traction afin de retarder, de limiter ou d'éviter la rupture quasi-fragile [5,6]. Par leur capacité à modifier le comportement non linéaire en retardant la localisation de l'endommagement, les fibres augmentent la capacité de déformation du matériau, le niveau de contrainte au pic [7-8]. Elles reprennent les charges après fissuration. Aujourd'hui, le comportement au feu de ces matériaux cimentaires renforcés par des fibres présente une préoccupation majeure pour les chercheurs.

Les mortiers sont en général caractérisés par une microstructure dense et une faible perméabilité. La microstructure dense semble être un point faible pour la stabilité thermique lorsque ces matériaux sont soumis à une température élevée [9-11]. Les incendies des tunnels du St Gothard (Suisse 2001), de Tauern (Autriche 1999), du Mont-Blanc (France 1999) ou de la tour Windsor (Madrid 2005) ont révélé que le béton chauffé à hautes températures peut présenter des risques d'instabilité. Les paramètres comme les conditions d'incendie (température, durée, énergie calorifique...), la nature du béton, l'eau libre dans le béton, la nature des granulats, la vitesse de chauffe la présence de charge mécanique, ont une influence sur l'instabilité thermique [12].

Une méthode efficace pour réduire le risque d'instabilité thermique est l'ajout de fibres en polypropylène dans la composition du matériau cimentaire [13-15]. Les fibres de polypropylène en fondant à des températures relativement basse (~170°C) créent une porosité supplémentaire qui facilite le transport d'humidité dans le béton vers l'extérieur et limite ainsi les surpressions de fluide dans la matrice cimentaire [3, 16, 17]. Pour des raisons de sécurité, il est nécessaire que le matériau conserve ses propriétés mécaniques le plus longtemps possible lors d'incendie afin que la structure garde un comportement sécuritaire, limite la propagation du feu et laisse le temps aux usagers d'évacuer. De plus, il peut être important que le matériau confère aux ouvrages de bonnes possibilités de restauration après incendie [18]. Pour cela, les performances mécaniques résiduelles doivent être conservées à un niveau aussi proche que possible des performances initiales. L'ajout de fibres d'acier dans le

mortier cimentaire soumis à une température élevée peut être une solution pour améliorer ses propriétés mécaniques résiduelles. Celles-ci ne limitent pas les surpressions de fluide mais renforcent le mortier vis-à-vis de la fissuration et de l'éclatement. Elles ont un rôle plus mécanique que thermique.

L'objectif de ce travail est de caractériser l'endommagement de mortiers sans fibres et des mortiers contenant 0,58% en volume de fibres d'acier (45 kg/m^3) ou de fibres de polypropylène ou un mélange de fibres (1/2 de fibres d'acier + 1/2 de fibres de polypropylène) sous l'effet d'un traitement thermique à des températures de 105°C, 400°C, 500°C et 800°C. Dans chaque cas, l'échantillon est porté à la température désirée avec une vitesse de montée en température de 5°C/minute et maintenu à cette température pendant une heure. Ensuite, il est refroidi four fermé et éteint, jusqu'à la température ambiante avant d'être soumis aux différentes mesures. La caractérisation et la quantification des dommages induits par ce type de dégradation sont réalisées par des méthodes non destructives qui permettent de suivre l'évolution de l'endommagement des matériaux. Les essais non destructifs consistent aux mesures d'absorption d'eau par capillarité, de porosité communicante, de perméabilité au gaz (hélium (He)) et de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores.

2. Méthodes expérimentales

2.1 Réalisation et conservation des éprouvettes

Quatre types de mortier ont été réalisés : un mortier normalisé (MN), un mortier avec fibres d'acier (MNA), un mortier avec fibres de polypropylène (MNP) et un mortier hybride (MNAP : 1/2 fibres métalliques + 1/2 fibres de polypropylène). Un ciment CEMI 52,5R a été utilisé pour les quatre mortiers. Le rapport E/C est de 0,5 et le rapport S/C est de 3. Pour les trois mortiers fibrés, le dosage en fibres est de 0,58% en volume. Ce choix nous permet de conserver des ouvrabilités correctes sans ajout de superplastifiant [19]. 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 homogène. Le sable est ajouté graduellement à la pâte puis malaxé jusqu'à homogénéisation. Dans le cas des mortiers fibrés, les fibres ont été ajoutées et dispersées manuellement en dernière étape. Les mélanges ont été malaxés deux minutes après l'introduction du dernier constituant. Aucun ajustement du dosage en eau n'a été effectué pour prendre en compte la présence des fibres : l'ouvrabilité des différents mortiers est donc différente. L'ouvrabilité est évaluée à l'aide d'une mesure d'affaissement au mini-cône. La teneur en air est mesurée à l'aide d'un aéromètre à mortier.

Les échantillons sont de forme cylindrique de diamètre 40mm, et de longueur 60mm. Pour chaque composition, 6 éprouvettes ont été réalisées. Les éprouvettes ont ensuite été conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24h, puis conservées dans un bain d'eau pendant 28 jours, puis stockées en salle sèche (20°C, 50% HR) jusqu'à la stabilisation de la masse. Dans ces conditions, une part importante de l'eau libre dans la matrice cimentaire est évaporée [20].

2.2 Traitement thermique

Les caractéristiques physiques et 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 [21, 22].

Le traitement thermique a été réalisé dans un four électrique à moufle avec une vitesse de montée en température de 5°C/min. La durée du palier est fixée à une heure. Le retour à la température ambiante est obtenu four éteint et fermé. La vitesse de refroidissement n'est pas régulée mais elle est de l'ordre de (-0,3) °C/min.

2.3 Mesures non destructives

La caractérisation et la quantification non destructives des dommages induits dans les mortiers non fibrés et fibrés sous l'effet des élévations de températures ont été réalisées par des méthodes complémentaires qui sont de bons indicateurs de l'évolution de la microstructure et de la fissuration du mortier. Les mesures d'absorption d'eau par capillarité, de porosité communicante, de perméabilité au gaz reflètent l'importance du réseau interconnecté pouvant correspondre aux chemins d'intrusion des agents agressifs. Tandis que les vitesses de propagation d'ondes ultrasonores reflètent le niveau d'endommagement global de l'échantillon.

Pour faciliter la reproductibilité des résultats, nous avons fixé l'état de référence de tous les échantillons après un séchage à la température de 105°C jusqu'à la stabilisation de leurs masses. Ce traitement modifie légèrement

certaines hydrates (ettringite) et altère partiellement la microstructure. Cependant, il permet d'éviter une trop grande dispersion des résultats due aux variations du séchage.

2.3.1 Absorption d'eau par capillarité

Les essais d'absorption d'eau par capillarité ont été réalisés conformément aux recommandations AFPC-AFREM [23]. La face inférieure des échantillons cylindriques secs est immergée dans l'eau sur une hauteur de 3mm. Les faces latérales sont recouvertes d'une feuille d'aluminium pour forcer l'eau à adopter un cheminement axial et éviter l'évaporation par ces faces. Un suivi de la masse d'eau absorbée est effectué. Le coefficient cinétique d'absorption capillaire, exprimé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$, est le coefficient directeur de la tangente à l'origine de la courbe d'évolution d'absorption en fonction de la racine carrée du temps.

2.3.2 Porosité communicante

La porosité communicante est déterminée à partir de trois pesées des échantillons : une pesée de l'échantillon séché à 105°C, une pesée du même échantillon saturé sous vide pendant 24h et une pesée hydrostatique du même échantillon saturée. Ces mesures permettent de déterminer la porosité communicante et les masses volumiques apparentes et réelles.

2.3.3 Perméabilité au gaz

La perméabilité intrinsèque est mesurée pour l'état de référence (105°C) pour tous les mortiers. Elle est déterminée, à l'aide de l'approche de Klinkenberg, et à partir de 5 mesures de perméabilité apparente à différentes pressions de percolation d'hélium et sous pression absolue de confinement constante de 0,8 MPa. Aux états dégradés (400°C, 500°C et 800°C), seule la perméabilité apparente est mesurée pour une pression absolue de percolation de 0,2 MPa et à la même pression de confinement.

2.3.4 Vitesse de propagation des ondes ultrasonores et leurs atténuations

Le système de mesure d'onde ultrasonore est constitué d'un générateur-récepteur d'impulsion SOFRANEL mode 5800 PR. On dispose de part et d'autre de l'échantillon immergé dans l'eau deux transducteurs piézoélectriques, d'ondes longitudinales P de 25mm de diamètre et de fréquence nominale de 0,5MHz, l'un faisant office d'émetteur, l'autre de récepteur. Le temps de propagation de l'onde ultrasonore permet de calculer la vitesse de l'onde. Un traitement fréquentiel pour une méthode FFT permet d'obtenir le contenu fréquentiel de l'onde reçue et d'évaluer l'atténuation de l'énergie sonore

3. Résultats

3.1 Caractérisation à l'état frais des mortiers

Les caractéristiques à l'état frais des différents mortiers sont données dans le tableau 1. L'ajout de fibres tend à réduire l'ouvrabilité mesurée au mini-cône (NF P 18-451) et à augmenter la teneur en air occlus. Les fibres d'acier ont un effet relativement faible, alors que les fibres de polypropylène qui ont une surface spécifique importante, mobilisent une quantité d'eau de mouillage importante et diminuent fortement l'ouvrabilité. La teneur en air des mortiers contenant des fibres de polypropylène est importante. La quantité de fibres de polypropylène dans le mortier MNAP est réduite d'où des valeurs d'affaissement et d'air occlus intermédiaires.

Tableau 1. Caractéristiques à l'état frais des mortiers

Mortiers	MN	MNA	MNP	MNAP
Affaissement (cm)	3,9	3,4	1,4	2,4
Air occlus (%)	3,2	3,5	5,2	4,6

3.2 Caractérisations non destructives des mortiers durcis

Les caractéristiques des échantillons à l'état de référence sont différentes et le chauffage induit des évolutions très différentes suivant la présence ou non des fibres dans la matrice cimentaire. Aussi nous avons choisi de caractériser les dégradations par des mesures relatives, en exprimant les résultats par rapport aux valeurs obtenues à l'état de référence.

3.2.1 Absorption d'eau par capillarité

Les cinétiques d'absorption sont présentées par les variations de quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps (Figure 1). La stabilisation est visible sur les courbes des différents mortiers, la limite physique intervient lorsque le front de l'ascension capillaire atteint le haut de l'éprouvette.

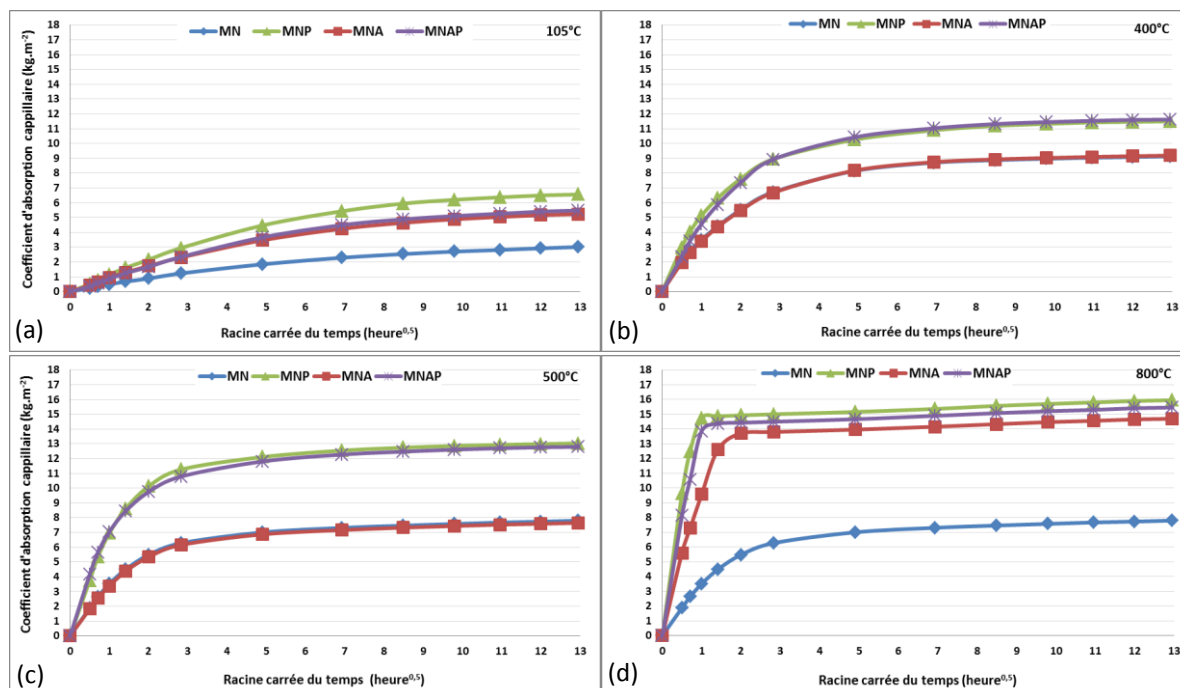


Figure 1 : Absorption d'eau par capillarité des mortiers sains et chauffés.

En comparant les résultats entre le mortier non fibré et les mortiers fibrés (figure 1a), il ressort que l'introduction de fibres, quelle que soit leur nature, se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du coefficient cinétique d'absorption capillaire (MN : $0,63 \pm 0,12$; MNA : $1,18 \pm 0,44$; MNP : $1,53 \pm 0,30$; MNAP : $1,26 \pm 0,30$ $10^{-2} \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$). Ce type de constatations a déjà été relevé par d'autres auteurs [24].

Après chauffage à 400°C, la variation d'absorption capillaire entre le mortier non fibré (MN) et le mortier fibré d'acier (MNA) est faible (Figure 1b). Les mortiers fibrés de polypropylène (MNP) et les mortiers hybrides (MNAP) ont un comportement similaire et présentent une absorption capillaire plus élevée que les deux autres mortiers (MN et MNA), en termes de cinétique et d'amplitude. Cette augmentation d'absorption est en relation directe avec la fusion des fibres de polypropylène. A 500°C (Figure 1c), la différence d'absorption entre les deux types de mortier (avec et sans fibres de polypropylène) est encore accentuée. L'absorption capillaire de tous les mortiers fibrés est nettement augmentée après traitement à 800°C (Figure 1d), témoignant ainsi des dommages causés par ce niveau de température. On peut remarquer sur les courbes à 800°C, que la saturation des mortiers est rapidement atteinte en comparaison avec les courbes à 400°C et 500°C. Le mortier MN présente l'absorption capillaire la plus faible. Le mortier fibré de polypropylène révèle d'une façon systématique une grande absorption d'eau.

3.2.2 Porosité communicante

A l'état de référence (105°C), la porosité des différents mortiers non fibrés et fibrés est équivalente, de l'ordre de 17% (17,1% au minimum pour le MNA et 17,8% au maximum pour le MNP). Entre l'état de référence et 400°C, la porosité augmente de façon relative de 24% en moyenne pour le mortier non fibré (Figure 2). Une augmentation légèrement inférieure, 19%, est observée pour le mortier fibré d'acier. En revanche, pour le mortier fibré de polypropylène et le mortier hybride, cette augmentation est plus importante : 35% pour le MNP et 31% pour le MNAP. Il est certain que la présence de fibres de polypropylène dans le mortier chauffé entraîne une augmentation du volume poreux et modifie la cinétique d'apparition de la porosité. A 500°C, on remarque une faible augmentation pour toutes les formulations par rapport à 400°C. Au-delà de cette température, tous les

mortiers voient leur porosité augmenter rapidement. A 800°C, nous distinguons deux niveaux de porosité : 31% pour le MNP et MNAP, 28% pour le MN et MNA.

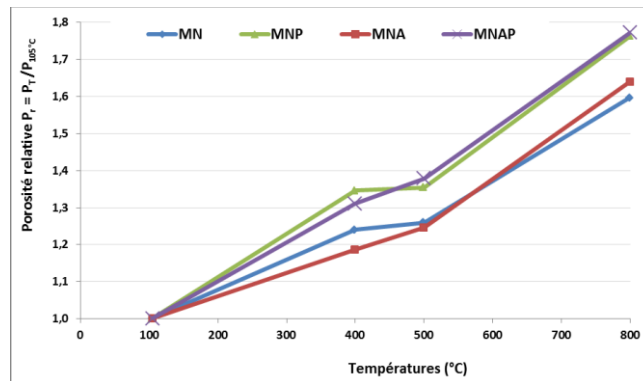


Figure 2 : Évolution de la porosité relative des mortiers en fonction de la température maximale du cycle de chauffage refroidissement.

3.2.3 Perméabilité au gaz

Tous les mortiers présentent une perméabilité intrinsèque relativement faible de l'ordre 10^{-17} m^2 . On observe que les mortiers sans fibres ($3,25 \pm 0,01 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$) et les mortiers fibrés d'acier ($3,12 \pm 0,55 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$) ont dans l'ensemble des perméabilités plus faibles que ceux qui contiennent des fibres polypropylène ($6,55 \pm 0,69 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$) et des fibres mixtes ($4,98 \pm 0,73 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$).

A l'état dégradé, la perméabilité résiduelle, après sollicitation, augmente lorsqu'on élève la température du traitement thermique (Figure 3). La perméabilité relative des mortiers augmente progressivement avec l'accroissement de la température jusqu'à 500°C. Au-delà de cette température, la perméabilité augmente très rapidement. Conformément aux mesures de porosité, les mortiers fibrés de polypropylène et les mortiers mixtes ont la perméabilité la plus élevée.

L'écart relatif entre la perméabilité des mortiers non fibrés et fibrés d'acier est faible entre 105°C et 500°C (moins de 2%). Au-delà de 500°C, l'augmentation de la perméabilité des mortiers fibrés d'acier est plus importante que celle des mortiers non fibrés. A 800°C, l'écart relatif entre ces deux matériaux atteint 30%.

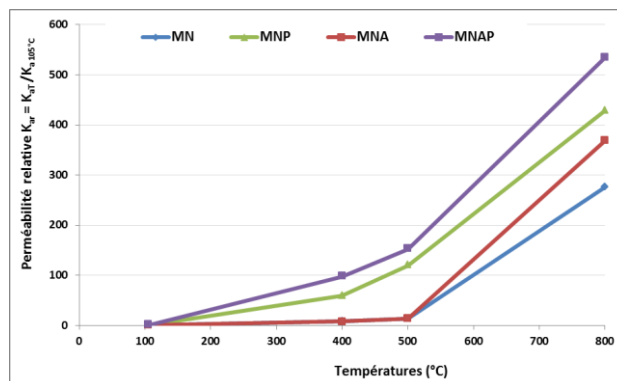


Figure 3 : Evolution de la perméabilité apparente relative des mortiers en fonction de la température maximale du cycle de chauffage-refroidissement.

3.2.4 Vitesse de propagation des ondes ultrasonores et leurs atténuations

Les mesures des vitesses sont effectuées en mode immersion sur des échantillons saturés sains et traités thermiquement. A l'état de référence, les vitesses moyennes de propagation s'échelonnent entre $4535 \pm 20 \text{ m/s}$ (MNP) et $4710 \pm 65 \text{ m/s}$ (MNA). Les mortiers fibrés d'acier présentent des vitesses légèrement plus élevées que les mortiers non fibrés ($4705 \pm 20 \text{ m/s}$). Les mortiers fibrés de polypropylène et fibrés mixtes ($4600 \pm 85 \text{ m/s}$) révèlent des vitesses moindres. Les écarts entre les vitesses de propagation des ondes entre les différents mortiers sont liés à la nature des fibres, à l'évolution de leur microstructure et leurs caractéristiques mécaniques (module d'élasticité, résistance en compression).

L'évolution en fonction de la température des vitesses moyennes de propagation des ondes longitudinales relative est portée sur la figure 4. Pour tous les mortiers, nous observons une diminution plus ou moins importante de la vitesse des ondes avec l'élévation de température.

La vitesse diminue progressivement jusqu'à 500°C. Au-delà de cette température, la diminution est plus importante. Elle indique que le traitement thermique induit des transformations irréversibles qui modifient le chemin parcouru par l'onde.

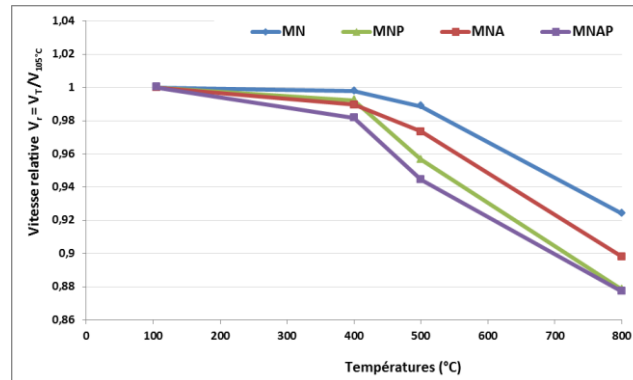


Figure 4 : Evolution de la vitesse des ondes longitudinales relative des mortiers en fonction de la température maximale du cycle de chauffage - refroidissement

L'analyse des spectres de fréquences en amplitudes permet de qualifier l'importance relative de l'amortissement des ondes dans le matériau dû à la porosité, à l'hétérogénéité et aux éléments diffusifs (présence des fibres) ou à faible impédance acoustique (pores, fissures). L'endommagement du matériau peut être aussi observé sur les courbes donnant l'évolution du spectre fréquentiel en fonction de la température (Figure 5).

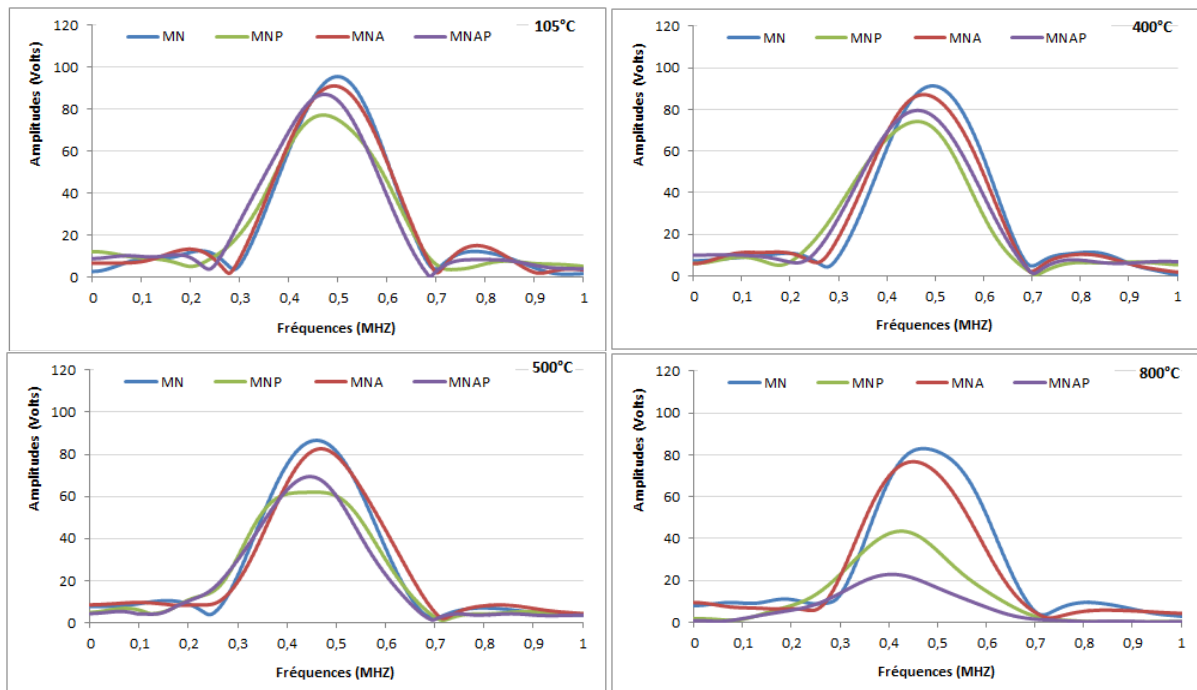


Figure 5. Evolution du spectre fréquentiel avec l'augmentation de la température

Deux conséquences nettes peuvent être identifiées : l'atténuation de l'amplitude du signal et le décalage vers les basses fréquences. Les courbes deviennent plus larges témoignant du niveau de dégradation.

L'évolution de l'atténuation de l'amplitude du signal en fonction de la température est donnée en figure 6.

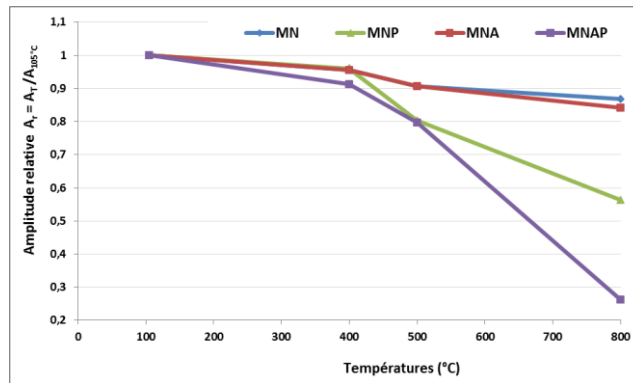


Figure 6. Evolution de l'atténuation de l'amplitude maximale relative du signal des mortiers en fonction de la température maximale du cycle de chauffage - refroidissement.

Les amplitudes maximales mesurées sur les mortiers fibrés sont plus faibles que celles mesurées sur les mortiers non fibrés : 95 ± 3 V pour le MN et 91 ± 4 V, 87 ± 4 V, 77 ± 4 V pour le MNA, MNAP et MNP respectivement. Le mortier contenant les fibres polypropylène présente une atténuation plus grande que celle des mortiers fibrés d'acier. Pour les mesures de l'amplitude relative du signal, on note un comportement identique pour les deux types de mortiers (non fibré et fibré, figure 6) jusqu'à 500°C . Au-delà de cette température, les amplitudes maximales relatives mesurées sur les mortiers fibrés sont plus faibles que celles mesurées sur les mortiers non fibrés.

4. Discussion

A l'état de référence, les résultats de capillarité montrent que l'introduction de fibres, quelle que soit leur nature, augmente la capillarité des mortiers. Le même type de résultats est obtenu pour la perméabilité. Toutefois, la porosité communicante semble peu modifiée par la présence des fibres. L'augmentation de perméabilité et de la capillarité sont donc liées à une augmentation de connectivité ou une diminution de la tortuosité liées à la présence des fibres. Les fibres induisent un effet de pontage, de par la nature plus poreuse de l'interface fibre – pâte de ciment [25]. L'augmentation de porosité au niveau de l'interface ne représente pas un volume suffisamment important pour modifier la porosité globale.

Les résultats sur la propagation des ondes (vitesse et atténuation) montrent la même influence des fibres que précédemment : les fibres tendent à diminuer la vitesse des ondes et l'amplitude de l'onde transmise. Cela montre que les fibres jouent un rôle de constituants diffusifs qui amortit l'amplitude de l'onde. Cette atténuation est très corrélée à la nature de la fibre. Les résultats des mesures d'atténuation montrent que l'interface des fibres de polypropylène avec la pâte de ciment est de moins bonne qualité que celle des fibres d'acier confirmant ainsi les mesures de perméabilité au gaz.

Une étude précédente [26], sur les caractéristiques mécaniques de ces mêmes mortiers conduit aux observations suivantes :

- Une grande résistance en traction du mortier MNA, pouvant être expliquée par l'effet de couture des fibres qui empêche la propagation des fissures [27, 28]. Les fibres de polypropylène sont moins efficaces de ce point de vue. Le mortier hybride présente un comportement intermédiaire.
- En compression, le mortier fibré d'acier a une résistance nettement plus élevée (effet de confinement lié l'effet de couture des fibres), alors que les mortiers contenant des fibres de polypropylène ont une résistance plus faible en raison de leur différence de rigidité (fibres d'acier $E= 200$ GPa; fibres de polypropylène $E=6$ GPa).
- Le module d'élasticité n'est pas influencé par la nature des fibres. En effet, avant la première fissuration les fibres n'interviennent pas, et le module d'élasticité ne dépend que de la matrice cimentaire [9, 17]

Après traitement thermique, toutes ces caractéristiques se dégradent. Avec l'augmentation de la température de traitement, on constate :

- une augmentation de la capillarité, de la porosité, de la perméabilité ;
- une diminution de la vitesse des ondes ultrasonores et l'énergie transmise ;

- une diminution des caractéristiques mécaniques (résistance en compression et en traction par flexion, module d'élasticité) [26].

L'évolution de la capillarité en fonction de la température met en évidence que, au-delà de 400°C, la dégradation est liée à la présence des fibres, quelle que soit leur nature, et non à la matrice cimentaire : celle-ci s'est dégradée à des températures plus basses, principalement avant 400°C. Pour les mortiers contenant des fibres de polypropylène, le phénomène d'absorption s'amplifie dû à la fusion de la fibre de polypropylène à 170°C. Par conséquent, les pores qui en découlent, favorisent la cinétique d'absorption.

L'évolution de la porosité confirme les résultats obtenus en capillarité et montrent que, lors du chauffage, la microstructure du mortier est modifiée et que le matériau devient plus poreux. Cette porosité ouverte facilite le transport de flux de vapeur, réduisant ainsi l'effet du bouchon (front de vaporisation) décrit par certains auteurs comme facteur d'instabilité thermique [29- 31]. Avec l'augmentation de température, la porosité des mortiers de fibres de polypropylène s'accroît plus vite que celle des mortiers sans fibres et des mortiers fibrés d'acier. Cette augmentation de porosité est certainement liée aux canaux formés après la fusion des fibres [32, 33]. L'accroissement de la porosité des mortiers de fibres d'acier est similaire à celle des mortiers non fibrés. Ainsi, nous constatons que l'addition d'une fraction volumique de 0,58% de fibres d'acier n'a pas d'impact sur la porosité des mortiers chauffés. Avec les mortiers hybrides (acier + polypropylène), la porosité croît avec la température moins rapidement que celle de mortier renforcé de fibres de polypropylène seules mais elle est supérieure à celle des mortiers non fibrés. Jusqu'à 500°C, la présence des fibres d'acier semble freiner l'augmentation de porosité (porosité de MNA plus faible que celle de MN et porosité de MNAP plus faible que MNP). Au-delà, ce phénomène n'est plus visible.

Des constatations similaires peuvent être conduites à partir de l'évolution des mesures de perméabilité : jusqu'à 500°C, le mortier de référence et le mortier fibré d'acier présentent la même dégradation ; au-delà le mortier fibré d'acier se dégrade de façon plus importante. Nous attribuons cette différence à l'hétérogénéité supplémentaire liée à la présence des fibres d'acier. Les interfaces nouvelles qu'elles apportent rendent les mortiers plus aptes à la création de discontinuités sous l'effet du chauffage. L'effet de la température sur la perméabilité du mortier fibré polypropylène et du mortier fibré mixte est différent sur toute la plage de température. Le mortier fibré mixte présente une perméabilité supérieure à celle du mortier fibré polypropylène. Nous expliquons cette différence de comportement par la nature des fibres incorporées dans le mortier. Dans le cas où le mortier est renforcé de fibres polypropylène, ces fibres ont des coefficients de dilatation différents de celui de la matrice du mortier. Au cours du chauffage ($T < 150^\circ\text{C}$), apparaît des décohésions entre la fibre et la pâte cimentaire qui accroissent la perméabilité (ou la connectivité). À partir de 170°C, la décomposition des fibres de polypropylène renforce l'interconnexion du réseau poreux et induit une augmentation conséquente de la perméabilité. Dans le cas des fibres hybrides, on observe un cumul des effets des fibres polypropylène et des fibres d'acier sur la perméabilité.

La diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les mortiers peut être attribuée à la déshydratation de la matrice cimentaire, aux discontinuités qui se créent dans la pâte cimentaire au cours du chauffage et aux décohésions qui se produisent aux interfaces fibre – pâte de ciment et granulats – pâte de ciment en raison de leurs dilatations thermiques différentes. Ces défauts induisent une diminution de rigidité du matériau et donc une diminution de la vitesse. L'atténuation de l'amplitude du signal signifie que les ondes ont plus de mal à se propager dans le mortier. Une partie de l'énergie de l'onde est dissipée sur les défauts (fissures, porosité, décohésion...) qui apparaissent dans les mortiers suite au traitement thermique. Le décalage vers les basses fréquences signifie que les hautes fréquences (petite longueur d'onde) sont plus atténuées que les basses fréquences (grande longueur d'onde). En effet, les hautes fréquences ont plus de mal à « franchir » des défauts tels que des fissures, que les basses fréquences. Les résultats montrent que les fibres jouent un rôle de constituants diffusifs qui amortit l'amplitude de l'onde. Cette atténuation est très corrélée à la nature de la fibre, à sa dégradation lors du chauffage, à la liaison pâte-fibre, et à la dégradation de la matrice cimentaire. De nouveau, ce sont les mortiers contenant des fibres de polypropylène qui se dégradent le plus. Comme pour la perméabilité, les mortiers hybrides subissent l'endommagement le plus important (cumul des effets des fibres de polypropylène et des fibres d'acier).

L'étude mécanique [26], amène aux mêmes constatations : la perte de résistance en compression est liée à la dégradation de la matrice et à l'augmentation de porosité induite par la dégradation des fibres ; la perte de rigidité est plus liée à la dégradation de la matrice qu'à la dégradation des fibres ; enfin, la perte de résistance en traction est liée à la dégradation de l'interface fibre – matrice.

Un seuil à 500°C peut être identifié au-delà duquel toutes les caractéristiques se dégradent rapidement. Celui-ci est certainement dû au cumul de l'altération de la matrice cimentaire, de la fusion totale des fibres de polypropylène, éventuellement de l'effet sur les granulats siliceux et du début d'oxydation à haute température des fibres d'acier [34, 35].

En termes de valeurs absolues (à 500°C par exemple), le mortier fibré d'acier conserve le meilleur comportement mécanique alors que le mortier de fibres de polypropylène se dégrade fortement. Le mortier hybride a un comportement intermédiaire qui permettra d'obtenir une stabilité thermique suffisante liée à la fusion des fibres de polypropylène et une résistance mécanique garantie par les fibres d'acier.

5. Conclusion

Au cours d'incendies, les mortiers ordinaires ont un comportement relativement protecteur, mais ils perdent rapidement toute résistance mécanique. Cette dégradation mécanique ne permet pas de garantir le maintien de cette protection thermique (écaillage, fissuration...). Pour améliorer le comportement mécanique, il a été envisagé de les renforcer à l'aide de fibres d'acier et/ou de fibres de polypropylène. Pour cela, nous avons caractérisé l'état initial d'un matériau cimentaire non renforcé et renforcé de fibres, par les mesures de ses propriétés physiques et mécaniques et d'étudier les effets d'une élévation de la température sur ces propriétés.

Le traitement à hautes températures induit :

- une augmentation de la capillarité, de la porosité, de la perméabilité ;
- une diminution de la vitesse des ondes ultrasonores et l'énergie transmise ;
- une diminution des caractéristiques mécaniques (résistance en compression et en traction par flexion, module d'élasticité).

Les mortiers renforcés de fibres d'acier donnent le meilleur comportement mécanique, toutefois les mesures non destructives indiquent une dégradation de l'interface fibre – matrice cimentaire : la capillarité et la perméabilité augmentent après le traitement thermique, la propagation des ondes ultrasonores se dégrade.

Les mortiers renforcés de fibres de polypropylène présentent une forte diminution du comportement mécanique. Cette diminution peut être liée à la fusion des fibres et à la création de porosité due à cette fusion.

Un seuil à 500°C a été identifié au-delà duquel les caractéristiques physico-mécaniques se dégradent rapidement. Ce seuil est lié au cumul de l'altération de la matrice cimentaire, de la fusion totale des fibres de polypropylène et du début d'oxydation à haute température des fibres d'acier.

Les mortiers hybrides (50% de fibres d'acier + 50% de fibres de polypropylène) présentent un bon compromis. Les fibres de polypropylène garantissent une stabilité thermique, la fusion des fibres provoquant une porosité supplémentaire limitant les phénomènes d'écaillage. Les fibres d'acier limitent les phénomènes de fissuration et permettent de conserver un comportement intéressant.

Références

- [1] Beaudoin J.J., Béton renforcé de fibres. CBD-223F. Publié à l'origine en juillet (1982) 1-6.
- [2] Zollo R.F., Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, *Cement and Concrete Composites* 19 (1997) 107-122.
- [3] Sukontasukkul P., Pomchiengpin W., Songpiriyakij S., Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1967–1974.
- [4] Ding Y., Azevedo C., Aguiar J.B., Jalali S., Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete after exposure to high temperature, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 21–31.
- [5] Bencardino F., Rizzuti L., Spadea G., Swamy R.N., Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties, *Composites: Part B* 41 (2010) 17–24.
- [6] Köksal F., Sahin Y., Gencil O., Yigit I., Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes, *Engineering Fracture Mechanics* 107 (2013) 29–37.
- [7] Nili M., Afroughsabet V., Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering* 37 (2010) 879-886.
- [8] Sideris K.K., Manita P., Chaniotakis E., Performance of thermally damaged fibre reinforced concretes, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1232–1239.

- [9] Pliya P., Beaucour A.L., Noumowe A., A way to improve the behaviour of concrete at high temperature: addition of a cocktail of polypropylene and steel fibres, 3rd International FIB Annual Convention & Bridge conference. Washington-DC (2010).
- [10] Khoury G.A., Sullivan P.J.E. Research at imperial college on the effect of elevated temperatures on concrete. *Fire Safety Journal* 13 (1988) 68-72.
- [11] Phan L.T, Lawson J.R., Davis F.L., Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and Structures* 34 (2001) 83-91.
- [12] Kanema M., de Morais M.V.G., Noumowé A., Gallias J.L., Cabrillac R., Thermo-hydrous transfers in a concrete element exposed to high temperature: experimental and numerical approaches, *Heat and Mass transfers* 44 (2007) 149-164.
- [13] Xiao J., Falkner H., On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal* 41 (2006) 115-121.
- [14] Zeiml M., Leithner D., Lackner R., Mang H., How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 929-942.
- [15] J.P.C. Rodrigues, L. Laím, A.M. Correia, Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire, *Composite Structures* 92 (2010) 1263–1268.
- [16] Bangi M. R., Horiguchi T., Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 1150–1156.
- [17] Pliya P., Beaucour A.L., Noumowe A., Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1926–1934.
- [18] Denoël J.F., *Fire Safety and Concrete Structures*, FEBELCEM Federation of Belgian Cement Industry (2007).
- [19] Beaudoin J.J., *Fibre-Reinforced Concrete*, National Research Council Canada (1982).
- [20] Andrade C., Sarría J., Alonso C., Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, *Cement and Concrete Research*, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 1249–1259.
- [21] Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turrillas X., Campo J., Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1633-1644.
- [22] Georgali B., Tsakiridis P. E., Microstructure of fire-damaged concrete. A case study, *Cement and Concrete Composites* 27 (2005) 255-259.
- [23] AFPC-AFREM Durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte-rendu des journées techniques 11 et 12 décembre 1997, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse.
- [24] Abdou K., Houari H., Influence des fibres d'acier sur les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires. *Sciences & Technologie* 26 (2007) 43-48.
- [25] Miloud B., Permeability and porosity characteristics of steel fiber reinforced concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building And Housing)* 6 (2005) 317-330.
- [26] Ezziane M., Kadri T., Molez L., Jauberthie R., Belhacen A., High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced mortars. *Fire Safety Journal* 71 (2015) 324-331.
- [27] Swamy R.N., Magat P.S., Rao C.V.S.K., The Mechanism of Fiber Reinforcement of Cement matrices. *ACI International*, SP 44-1 (1974) 1-28.
- [28] Aveston J., Kelly A., Theory of multiple fracture of fibrous composites. *J. Material. Science*, U.K. 8 (1973) 352- 362.
- [29] Zeiml M., Leithner D., Lackner R., Mang H. A., How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 929 – 942.
- [30] Behnood A., Ghandehari M., Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, *Fire Safety Journal* 44 (2009) 1015–1022.
- [31] Matesova D., Bonen D., Shah S.P., Factors affecting the resistance of cementitious materials at high temperatures and medium heating rates, *Materials and Structures* 39 (2006) 919–935.
- [32] Noumowe A., Lefèvre A., Duval R., Porosité supplémentaire consécutive à la fusion de fibres de polypropylène dans un béton à hautes performances. *Revue Française de Génie Civil* 6 (2002) 301-313.
- [33] Komonen J., Penttala V., Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes. *Fire Technology* 39 (2003) 23-34.
- [34] Ezziane M., Molez L., Jauberthie R., Rangeard D., Heat exposure tests on various types of fibre mortar, *European Journal of Civil Engineering and Environment* 15 (2011) 715-726.
- [35] Ezziane M., Molez L., Kadri T., Jauberthie R., Gouttefangeas F., Adhérence fibre d'acier – matrice cimentaire dans les mortiers fibrés à hautes températures, XXX^{èmes} Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.