



**HAL**  
open science

# Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres

Nonna Yermak

► **To cite this version:**

Nonna Yermak. Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167693

**HAL Id: hal-01167693**

**<https://hal.science/hal-01167693>**

Submitted on 24 Jun 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.

---

# Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres

**Nonna Yermak<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, 5 mail Gay Lussac, Neuville sur Oise, 95031, Cergy-Pontoise, France

Adresse e-mail : nonna.yermak@u-cergy.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*RÉSUMÉ. Ce travail vise à améliorer la stabilité thermique des bétons en utilisant les fibres de polypropylène (FPP) et/ou métalliques (FS). Dans un premier temps, différentes compositions de béton ont été soumises à un chauffage rapide de type incendie ISO. Une forte instabilité thermique est remarquée avec les bétons contenant 60 kg/m<sup>3</sup> de FS. L'ajout de 0,75 kg/m<sup>3</sup> de FPP a permis d'éviter l'écaillage de ces bétons. Dans un second temps, une étude de caractérisation à chauffage lent est réalisée sur les formulations de béton de référence (Créf), de béton de fibres métalliques (CS 60) et de béton de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques (CPPS 0.75-60), afin de comprendre l'apport de fibres sur la stabilité thermique et les performances mécaniques résiduelles. L'apport des fibres métalliques à fort dosage reste ambigu, bien qu'elles améliorent les caractéristiques mécaniques résiduelles jusqu'à 750°C, elles ont tendance à limiter l'ouverture des fissures pendant le chauffage, favorisant ainsi l'écaillage sous feu ISO 834.*

*ABSTRACT: This work aims to improve the thermal stability of concrete using the polypropylene fibers (FPP) and / or steel fibers (FS). Firstly, different concrete compositions were subjected to rapid heating of ISO fire curve. A strong thermal instability is noticed on concrete containing 60 kg/m<sup>3</sup> of FS. The addition of 0.75 kg/m<sup>3</sup> FPP could prevent spalling of the concrete. Secondly, a slow heating characterization study is performed on the control concrete formulation (Cref), concrete with steel fibers (CS 60) and a cocktail of polypropylene and steel fibers (CPPS 0.75-60 ) in order to understand the contribution of fibers on the spalling sensibility and residual mechanical performances. The contribution of steel fibers in high amounts remains unclear, although they improve the residual mechanical properties up to 750 ° C, they also tend to limit the opening of cracks during the heating, which can be the reason of spalling under ISO 834.*

*MOTS-CLÉS : béton, température, fibres de polypropylène, fibres métalliques.*

*KEY WORDS: concrete, temperature, polypropylene fibres, steel fibres.*

---

## 1. Introduction

Par rapport aux bétons ordinaires, les bétons à haute résistance ont des performances mécaniques supérieures, une plus faible perméabilité et une meilleure durabilité. Cependant, lorsque les bétons à hautes performances (BHP) sont soumis à des températures élevées, comme dans une situation d'incendie, ces bétons denses manifestent parfois un comportement sensible, qui se traduit par une altération de la microstructure et un détachement de petits ou gros fragments de béton. Plusieurs études ont reporté sur le risque d'écaillage élevé du BHP lors de la sollicitation thermique [NOU 95], [HAG 04], [MIN 09]. Le procédé de remédiation le plus connu est l'addition de fibres de polypropylène (FPP) afin d'améliorer la stabilité thermique du béton et des fibres métalliques (FS) pour augmenter les performances mécaniques résiduelles. La fusion des FPP se produit à 160 - 171°C ; celles-ci sont complètement ou partiellement absorbées par le réseau poreux de la matrice cimentaire. Un vide reste à la place des fibres offrant un espace supplémentaire à la vapeur d'eau pour circuler. Par conséquent, le risque d'écaillage diminue avec la réduction de pressions de vapeur au sein du matériau [KAL 01]. Les FS sont utilisées dans le béton afin de limiter la propagation des fissures dans une matrice fragile et améliorer en même temps la ductilité du béton. Il serait intéressant de coupler les deux types de fibres, afin d'observer leur complémentarité.

Dix formulations de béton contenant différents dosages et tailles de FPP et FS ont été testées au feu ISO 834, en vue d'étudier le phénomène d'écaillage, suite aux travaux de Yermak [YER 14]. La formulation CS 60 (60 kg/m<sup>3</sup> de FS) est la seule à présenter des fortes instabilités thermiques. La formulation CPPS 0.75-60 (0.75 kg/m<sup>3</sup> de FPP et 60 kg/m<sup>3</sup> de FS) s'est avérée peu endommagée et le Créf (béton de référence) également n'a pas présenté de fissurations importantes. Par conséquent, ces trois bétons ont été étudiés dans la suite du programme de recherche. Ce travail a pour but d'expliquer les différences de stabilité thermique sous feu ISO des différentes formulations en caractérisant leur microstructure et l'évolution de leurs propriétés de transferts thermique et hydrique en fonction de la température. L'apport des fibres sur les performances mécaniques résiduelles est déterminé à l'aide des valeurs mesurées de résistance à la compression, à la traction et du module d'élasticité.

## 2. Matériaux et protocole expérimental

### 2.1 Matériaux et leur composition

Dans le cadre de ce travail, trois compositions de béton de rapport E/C (Eau/Ciment) constant (E/C = 0.38) sont formulées: les bétons de référence (Créf), les bétons de FS (CS 60) et les bétons de cocktail de FPP et FS (CPPS 0.75-60). La classe de consistance des bétons non fibrés est S4 (160-210 mm) et celle des bétons fibrés est S3 (100-150 mm).

Tous les bétons ont été formulés avec des granulats calcaires de Tournaisis.

Les fibres de polypropylène utilisées sont des fibres cylindriques monofilaments, de diamètre 32 µm et de longueur 12 mm. La densité des FPP est de 905 kg/m<sup>3</sup>, la température de fusion est de 160°C – 165°C. Les fibres métalliques utilisées sont des fibres Dramix RC-80/30-CP de diamètre 380µm et de longueur 30 mm.

Le Tableau 1 regroupe la composition des trois bétons et leur résistance à la compression à 28 jours.

**Tableau 1.** Composition des bétons et résistance à la compression ( $f_c$ ) à 28 jours

Bétons	Composition [kg/m <sup>3</sup> ]							$f_c$ [MPa]
	Ciment	Gravier 4-10	Sable 0-4	Eau efficace	Superplasti fiant (extrait sec)	FS (fraction vol. %)	FPP (fraction vol. %)	
<b>Créf (C)</b>	475	884	885	181	1	-	-	65.2 ± 0.69
<b>CS 60</b>	475	866	867	181	2.85	60 (0.8)	-	79.0 ± 2.40
<b>CPPS 0.75-60</b>	475	865	867	181	2.99	60 (0.8)	0.75 (0.1)	81.2 ± 0.84

Des éprouvettes cylindriques de dimensions 15 cm × 30 cm (diamètre x hauteur) ont été confectionnées puis conservées jusqu'à au moins 90 jours.

## 2.2 Conservation

Les éprouvettes ont été conservées suivant le mode «non drying concrete», conformément aux recommandations de la RILEM [RIL 07]. Elles sont gardées dans leur moule durant les sept premiers jours puis dans des sacs plastiques étanches à la température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au jour du chauffage.

## 2.3 Traitement thermique

Une campagne d'essais a été réalisée afin de déterminer les propriétés mécaniques résiduelles avec des bétons Créf et CPPS 0.75-60 (Figure 1). Les cycles de traitement thermique incluaient un chauffage jusqu'à la température 300, 600, 750, ou  $900^\circ\text{C}$  à une vitesse de  $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ , suivi d'un palier d'une heure, afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein de l'échantillon, puis un refroidissement à  $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$  jusqu'à la température ambiante (Figure 2). L'évolution de la température au sein du matériau a été mesurée sur 2 éprouvettes cylindriques 15x30 cm équipées d'un thermocouple au centre, pour les cycles à 750 et  $900^\circ\text{C}$ . Une deuxième campagne a été destinée à analyser les propriétés physiques et les propriétés de transferts thermique et hydrique avec des cycles de  $200^\circ\text{C}$  (fin de la fusion des FPP) et  $500^\circ\text{C}$  (fin de la vaporisation des FPP).



Figure 1. Disposition des éprouvettes dans le four

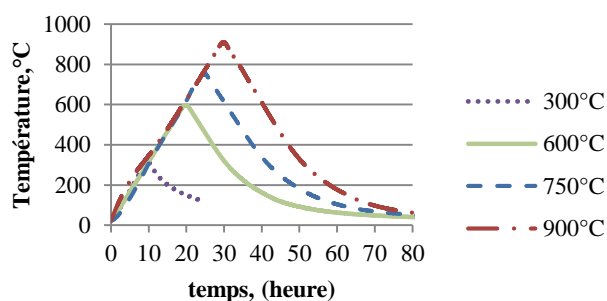


Figure 2. Evolution de la température moyenne en surface des éprouvettes

## 2.4 Essais après le chauffage

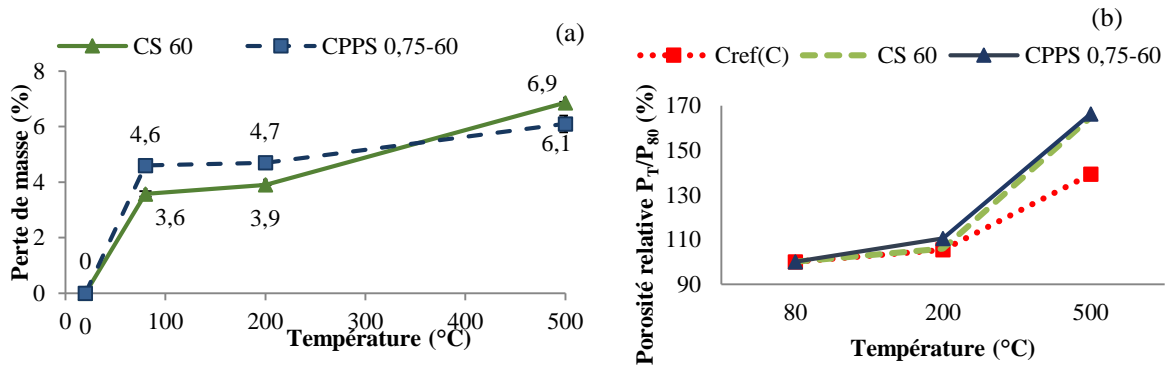
La résistance à la compression a été réalisée conformément à la norme NF EN 12390-3 (2012). Trois éprouvettes cylindriques 15x30 cm<sup>2</sup> sont rectifiées par surfacage au souffre et testées sur une presse hydraulique de 3000 kN à un taux de chargement de  $0.5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  jusqu'à la rupture. Conformément à la norme NF EN 12390-5 (2012), la résistance à la traction par flexion a été mesurée en chargeant au moins 3 éprouvettes prismatiques de 10x10x40 cm<sup>3</sup> à  $0.05 \text{ MPa}/\text{s}$ . Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de deux rouleaux supérieurs. Le module d'élasticité statique est mesuré en conformité avec la norme NF P18-459 (2010) sur trois éprouvettes cylindriques 15x30 cm<sup>2</sup>. Le calcul du module d'élasticité est fait à partir des résultats second cycle.

Les essais de porosité à l'éthanol ont été réalisés par pesée hydrostatique conformément à la norme NF P18-459 (2010). Les échantillons sont des quarts d'éprouvettes cylindriques de 15 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur. La porosité au mercure est effectuée sur les éclats du béton de 2x2 cm<sup>2</sup>. L'analyse de la distribution volumique cumulée et de la distribution des tailles des pores a été déterminée sur les échantillons témoins et les échantillons chauffés jusqu'à  $200^\circ\text{C}$  et  $500^\circ\text{C}$ . La conductivité thermique et la diffusivité thermique sont mesurées au cours du chauffage jusqu'à  $600^\circ\text{C}$  puis du refroidissement à l'aide du dispositif Hot-Disk TPS 1500 de Thermoconcept, équipé d'un four spécifique piloté par le logiciel de l'appareil. Les principes de mesure sont basés sur la méthode de la source plane transitoire. Des sondes en kapton pour la température ambiante et mika pour les essais en température sont utilisées. Les échantillons du béton sont des disques de 15cm de diamètre et de 5 cm de hauteur coupés en deux.

### 3. Résultats

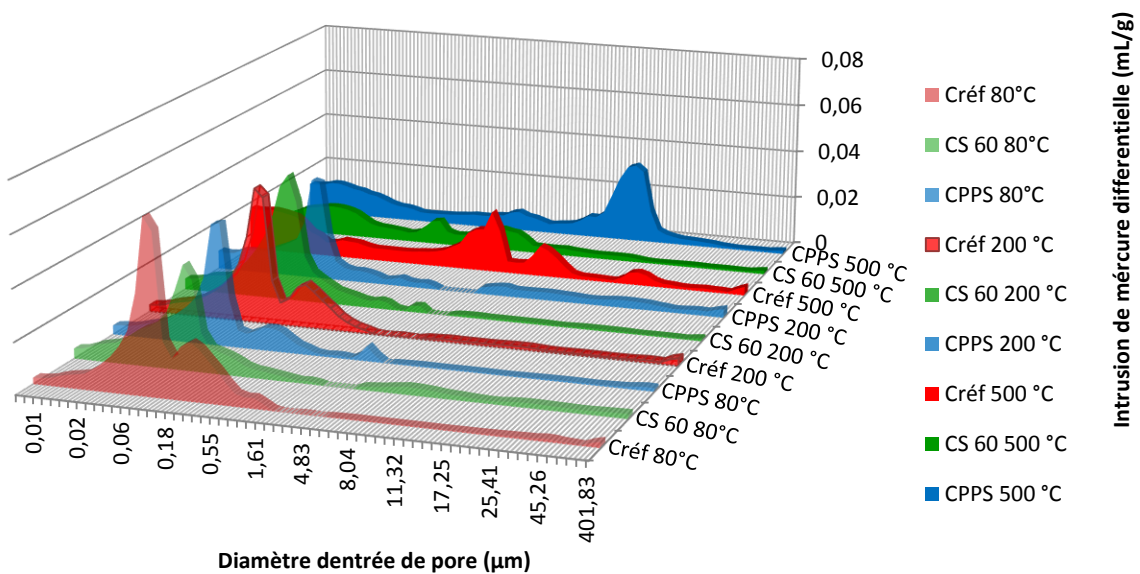
#### 3.1 Influence des fibres sur l'évolution de la perte de masse et de la porosité

L'évolution de la perte de masse a été réalisée en pesant sept éprouvettes avant et après le chauffage. La Figure 3 (a) présente la perte de masse globale avec de très faibles écart-types des éprouvettes CS 60 et CPPS 0.75-60 pour les paliers de température de 200°C et 500°C. A 80°C et 200°C, la perte de masse des bétons CPPS 0.75-60 est supérieure à celle des bétons CS 60. Cela s'explique notamment par la teneur en eau libre volumique des éprouvettes avant chauffage:  $W_0_{CS60} = 7.7\%$ ,  $W_0_{CPPS\ 0.75-60} = 8.3\%$  et aussi, probablement, par un effet favorable des FPP pour le transport d'humidité.



**Figure 3.** Evolution de la perte de masse (a) et de la porosité relative à l'éthanol (b) des bétons en fonction du cycle de chauffage - refroidissement

Les essais de porosité ont été réalisés avec de l'éthanol, afin d'éviter la réhydratation de la portlandite et des CSH. Entre 80°C et 200°C, la différence de porosité des trois bétons est pratiquement nulle avec le plus grand écart de 5% entre les bétons Créf et CPPS 0.75-60. Après 200°C, la porosité à l'éthanol des bétons fibrés (CS 60 et CPPS 0.75-60) s'accroît plus vite que celle des bétons sans fibres (Créf) (Figure 3 (b)). L'essai de porosité à l'éthanol ne met pas en évidence de différences entre les bétons fibrés et le béton de référence avant 200°C ni l'apport des FPP. Des mesures complémentaires par porosimétrie mercure ont été réalisées, afin de caractériser plus précisément la microstructure. La distribution de la taille des pores dans les compositions des bétons Créf, CS 60 et CPPS 0.75-60 pour les chauffages à 200°C et 500°C est présentée sur la Figure 4. Entre 80°C et 200°C, les diamètres des pores restent quasiment les mêmes pour les trois bétons (0.1  $\mu\text{m}$ ), pourtant dès 200°C une faible apparition de gros pores (>10 $\mu\text{m}$ ) pour le béton CPPS 0.75-60 a lieu, qui devient très nette à 500°C. A 500°C les

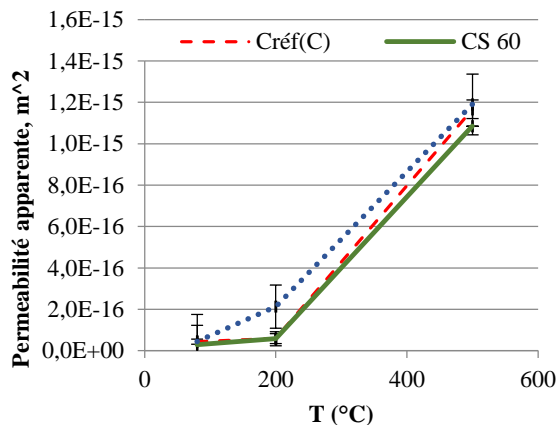


**Figure 4.** Distribution de la taille des pores avant (80°C) et après chauffage (200 et 500°C)

diamètres des pores ont augmenté pour les bétons Créf et CPPS 0.75-60 mais peu pour les bétons CS 60. Ceci peut expliquer la plus forte sensibilité des bétons CS60 à l'écaillage sous feu ISO. L'ajout de  $0.75 \text{ kg/m}^3$  génère, entre les températures 200 et  $500^\circ\text{C}$ , une famille de pores de forts diamètres qui peut contribuer à la stabilité thermique des bétons CPPS 0.75-60. Notons également la présence à  $500^\circ\text{C}$  d'une famille de pores de diamètres élevés dans le béton CPPS 0.75-60 qui pourrait correspondre au diamètre des FPP ( $32 \mu\text{m}$ ).

### 3.2 Influence des fibres sur l'évolution de la perméabilité

La Figure 5 présente la variation de la perméabilité intrinsèque résiduelle des formulations Créf, CS 60 et CPPS 0.75-60. A la température ambiante, les trois bétons ont une perméabilité très voisine de  $4.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ,  $2.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ,  $4.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  respectivement. Nous pouvons constater que quelle que soit la formulation, la perméabilité des bétons augmente avec l'élévation de la température. La perméabilité du béton CPPS 0.75-60 croît plus vite que celle des bétons CS 60 et Créf sur toute la plage de températures étudiée. A  $500^\circ\text{C}$ , le béton contenant les fibres métalliques seules montre une perméabilité plus faible que les deux autres ( $k_{a \text{ Créf}} = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,  $k_{a \text{ CS60}} = 1.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,  $k_{a \text{ CPPS 0.75-60}} = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ). Dès  $200^\circ\text{C}$ , les fibres PP semblent favoriser la connectivité entre les pores. Ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs ([MIN 09], [HAN 11], etc.), et a été interprété comme une conséquence de la fusion ( $160\text{-}170^\circ\text{C}$ ) et ensuite de la vaporisation ( $360\text{-}370^\circ\text{C}$ ) des FPP. Nous supposons que la plus faible augmentation de perméabilité du béton CS 60 est due aux fibres métalliques, qui en reprenant l'effort de traction limitent l'ouverture de fissures. Cela corrobore les résultats de l'étude de



**Figure 5.** Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction du cycle de chauffage - refroidissement

distribution du diamètre d'accès de pores : le béton CS 60 a une ouverture de pores plus faible que les bétons CPPS 0.75-60 et Créf. Ces plus faibles diamètres de pores peuvent expliquer une moindre connectivité entre les pores et par conséquent limiter l'augmentation de la perméabilité. La seule différence de composition entre ces deux bétons est l'ajout des FPP, qui favorise la création de pores supplémentaires de gros diamètre.

### 3.3 Influence des fibres sur l'évolution des propriétés thermiques des bétons

La conductivité thermique de trois bétons a été mesurée au cours de la phase de chauffage et de refroidissement :  $20^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$ . Les mesures ont été effectuées par pas de  $50^\circ\text{C}$  avec une moyenne de 5 mesures et un pas de temps horaire. L'analyse du graphique sur la Figure 6 (a) montre que les conductivités thermiques des bétons diminuent avec la température, mais augmentent au refroidissement. La diminution de la conductivité avec la température pour tous les bétons est liée à l'association de différents phénomènes : le départ de l'eau liée, la diminution du nombre de liaisons conductrices liée à la décomposition des hydrates, l'apparition de microfissures. Les mesures de conductivité thermique durant le refroidissement témoignent de l'irréversibilité des réactions qui amènent à la détérioration du matériau (création des pores). Les valeurs de conductivité thermique des bétons fibrés sont plus élevées que celles du béton de référence à température ambiante. L'écart de conductivité entre les bétons avec FS et sans FS diminue un peu avec l'augmentation de température. Les plus fortes conductivités des bétons CPPS 0.75-60 et CS 60 s'expliquent par la présence des fibres en acier dont la conductivité est plus élevée, par la plus faible porosité de la matrice cimentaire, ainsi que la substitution d'une partie des granulats par les FS. Les résultats de la diffusivité thermique sont très proches pour les trois bétons. Cela est possiblement lié à une plus forte chaleur spécifique de l'acier.

La Figure 6 (b) présente la différence de température entre la surface et le centre des éprouvettes cylindriques en fonction de la température en surface ( $T_{\text{surf}}$ ) des éprouvettes au cours du chauffage. Nous observons trois pics sur la courbe de différence de température (Figure 6 b). Ceci peut s'expliquer par des changements physiques et chimiques dans le béton sous l'effet de température. Le premier pic apparaît entre  $300$  et  $350^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{surf}}$ ) et peut être attribué à la consommation de la chaleur latente (déshydratation des CSH et l'évaporation de l'eau). Le second pic est apparu à  $600 - 650^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{surf}}$ ) et est lié à la deshydroxylation de la Portlandite. Le troisième pic débute à  $800^\circ\text{C}$  et pourrait s'expliquer par la décarbonatation des granulats calcaires. Le premier pic des bétons CPPS 0.75-60 a eu lieu plus tôt ( $300^\circ\text{C}$ ) et est plus important que celui des bétons Créf ( $330^\circ\text{C}$ ). La diffusivité mesurée par

Hot-Disk, similaire aux deux bétons, n'explique pas cette différence d'évolution de la température. Ceci est probablement lié aux réactions endothermiques de décomposition des FPP.

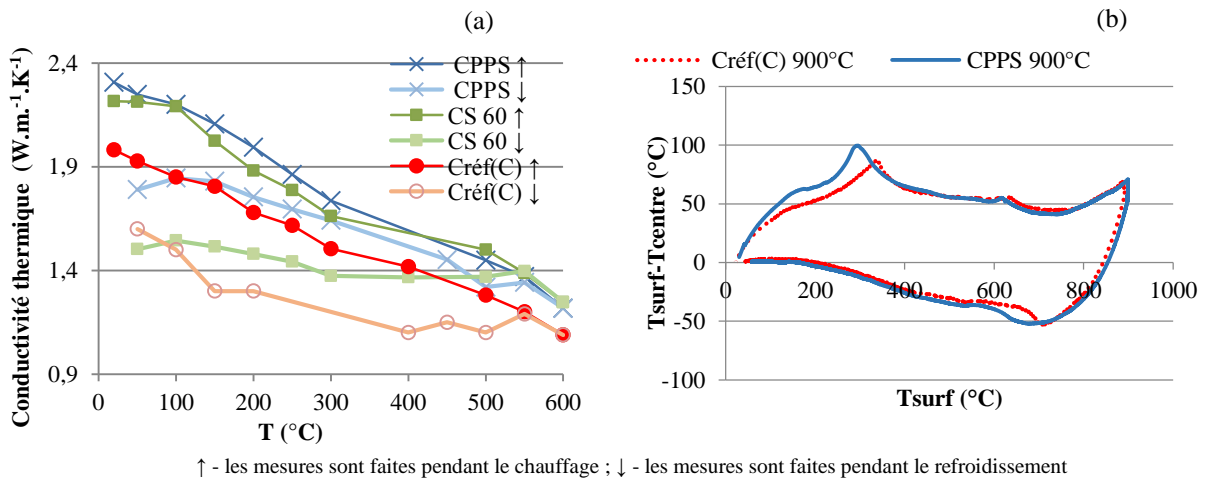


Figure 6. Évolution de la conductivité thermique (a) des bétons étudiés et différence des températures entre la surface et le centre d'éprouvette cylindrique (b), au cours de phase de chauffage et refroidissement

### 3.4 Apport du cocktail de fibres sur les performances mécaniques résiduelles

#### 3.4.1 Résistance à la compression

Les performances mécaniques résiduelles des deux bétons sont comparables. En ce qui concerne la résistance à la compression relative (Figure 7 a), nous pouvons distinguer globalement deux zones de comportement du béton. Dans la première zone qui varie de la température ambiante à 300°C, nous constatons une baisse ou une faible augmentation de résistance résiduelle. Dans la seconde zone, de 300°C à 900°C, nous remarquons une baisse progressive de la résistance résiduelle à la compression pour les deux types de béton. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des études de plusieurs auteurs : [HAG 04], [PLI 10]. L'augmentation de la résistance résiduelle à la compression entre la température ambiante et 300°C peut être due, premièrement, à la réhydratation des CSH lors de la migration et la condensation de l'eau vers les zones plus froides de l'éprouvette et, deuxièmement, à une formation de liaisons de siloxane (Si-O-Si), qui contribuent au retrait de la pâte et à l'augmentation de la résistance.

#### 3.4.2 Résistance à la traction

La résistance résiduelle à la traction des bétons avec ou sans fibres diminue progressivement avec la montée en température (Figure 7 b). De 750°C à 900°C, la perte de résistance résiduelle à la traction est remarquable. Par ailleurs, l'intersection des courbes a lieu à 900°C. Nous supposons que cela est dû à la perte de propriétés mécaniques des FS. Les mécanismes de rupture des éprouvettes pendant l'essai de la traction sont différents à 300°C et 900°C. Au cours de l'essai sur les bétons CPPS 0.75-60 à 300°C, nous observons que le béton a un comportement ductile, tandis qu'à 900°C le béton est plutôt fragile. Cette perte de ductilité à 900°C peut être expliquée par l'oxydation ou la corrosion des FS à des températures élevées. Ezziane [EZZ 12] a remarqué le début de phénomène d'oxydation des FS à 500°C. Après 700°C, le phénomène de corrosion devient plus important. L'épaisseur des couches d'oxyde est alors d'environ 30 µm tandis qu'elle est d'environ 75µm à 800°C.

Il est intéressant de noter qu'à la température 900°C, l'amélioration des performances mécaniques résiduelles du béton CPPS 0.75-60 par rapport à celle des bétons Créf était quasiment nulle.

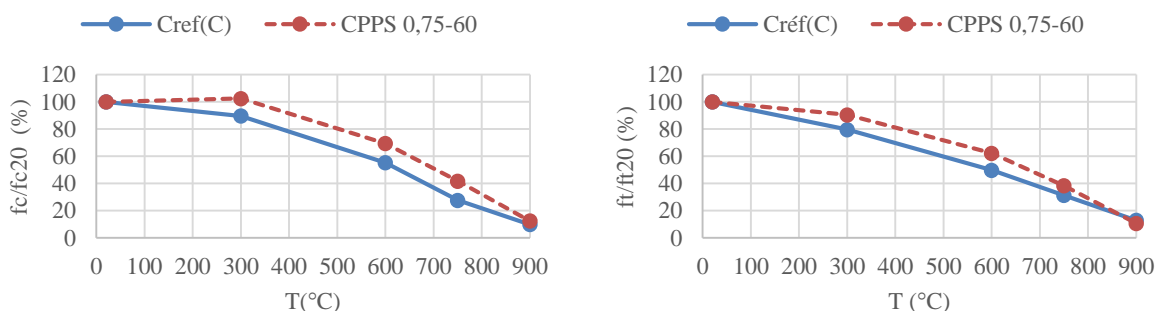
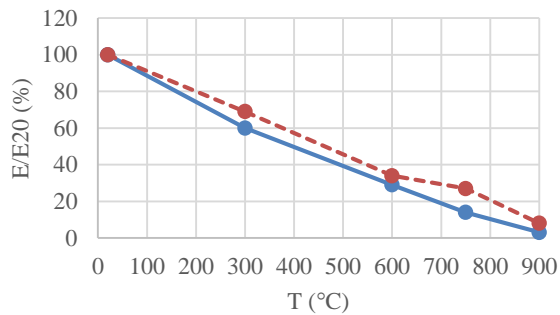


Figure 7. Evolution des résistances résiduelles relatives à la compression (a), et résistances résiduelles relatives à la traction (b) en fonction du cycle de chauffage - refroidissement

### 3.4.3 Module d'élasticité

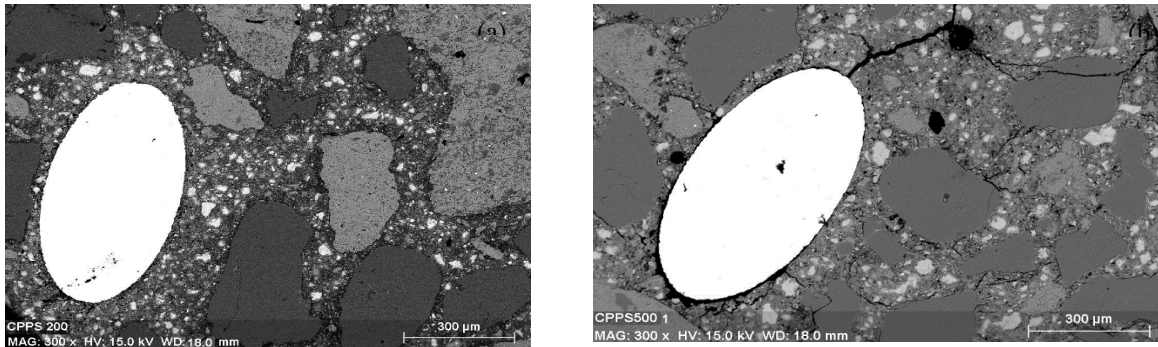
La Figure 8 présente l'évolution du module d'élasticité résiduel relatif des deux formulations de béton en



**Figure 8.** Evolution du module d'élasticité résiduel relatif de Créf et CPPS 0.75-60 en fonction du cycle de chauffage - refroidissement

fonction de la température. Nous constatons une baisse progressive du module d'Young, ce qui indique que le béton a subi un endommagement dès le début du chauffage. Tolentino [TOL 02] a remarqué que la diminution du module d'élasticité des bétons peut être liée à la microfissuration de l'interface induit par la dilatation du granulat. En effet, les déformations thermiques différentielles des granulats et de la matrice cimentaire créent des zones de traction localisées autour des granulats qui génèrent le développement des fissures. Dans notre cas, les FS se comportent de façon similaire aux granulats. L'incompatibilité des déformations entre la pâte et la fibre métallique provoque des fissurations à 500°C, qui ne s'observent pas à 200°C (Figure 9).

Les images de microscopie électronique à balayage montrent également l'apparition des fissurations entre la pâte et la fibre métallique suite aux déformations thermiques différentielles (Figure 9).



**Figure 9.** Microscopie électronique à balayage, interface pâte/fibre métallique dans les bétons chauffés (a) à 200°C et (b) à 500°C.

## 4. Conclusion

Suite au chauffage ISO 834, trois formulations ont présenté un intérêt pour l'étude de caractérisation : une formulation de béton CS 60 qui a écaillé, lors de l'essai incendie, et deux formulations qui sont restées peu endommagées (une formulation CPPS 0.75-60 qui contient des FPP et la formulation Créf). Afin de comprendre l'influence des fibres sur la stabilité thermique des trois formulations citées ci-dessus, leur microstructure et leurs propriétés de transferts thermique et hydrique ont été étudiées sous chauffage lent.

Les mesures de porosité à l'éthanol ont conduit à des résultats similaires pour les bétons CS 60 et CPPS 0.75-60 ( $P_{CS60} = 165\%$ ,  $P_{CPPS 0.75-60} = 166\%$  à 500°C). Par contre les mesures de la porosimétrie au mercure ont mis en évidence des différences de distribution et taille des pores après chauffage à 200°C et 500°C entre ces trois bétons. Une apparition des macropores ( $>10\mu\text{m}$ ) pour les bétons de CPPS 0.75-60 est observable à partir de 200°C et se confirme plus nettement à 500°C. La répartition multimodale des pores et leurs plus faibles diamètres pourraient être à l'origine de la sensibilité à l'écaillage des bétons CS 60 sous feu ISO 834. En ce qui concerne les bétons CPPS 0.75-30, ce phénomène est compensé par les FPP qui génèrent des pores supplémentaires. A 500°C, la principale famille de pores de CPPS 0.75-60 varie autour du diamètre de la FPP ( $32\mu\text{m}$ ).

Les mesures de perméabilité corroborent les résultats de la porosimétrie mercure. Le béton CS 60 présente une plus faible augmentation de la perméabilité que les bétons Créf et CS 075-60 après chauffage à 500°C. Les plus petits diamètres de pores et une répartition hétérogène de la porosité peuvent expliquer une moins bonne connectivité du réseau poreux et par conséquent une plus faible augmentation de la perméabilité. La présence de fibres métalliques reprenant les efforts de traction modifie la répartition de la fissuration au cours du chauffage.



La baisse de la conductivité thermique et l'augmentation de la perméabilité des bétons sont dues à l'augmentation de la porosité totale au cours du chauffage. La baisse de la conductivité thermique des bétons fibrés est plus élevée que celle du béton de référence. Ceci est possiblement dû à la présence de fibres en acier dont la conductivité est plus élevée, et par la plus faible porosité de la matrice cimentaire, ainsi que la substitution d'une partie des granulats par les FS.

Les propriétés mécaniques résiduelles des bétons CPPS 0.75-60 sont plus élevées que celles des bétons Créf. Cependant à 900°C les valeurs sont quasiment les mêmes, ce qui montre l'effet des FS. La perte des propriétés mécaniques des FS est liée à l'oxydation ou la corrosion de la fibre à des températures élevées. En ce qui concerne le module d'élasticité, la différence entre les deux bétons n'est pas significative. Cela est dû aux fissurations supplémentaires créées, par les FS. Les images de microscopie électronique à balayage ont mis en évidence l'apparition des fissurations entre la pâte et la fibre métallique à partir de 200°C, suite aux déformations thermiques différentielles.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la Fédération Nationale des Travaux Publics, l'entreprise Eiffage Travaux Publics, le Laboratoire de Génie Civil et Environnemental (École des Mines de Douai) ainsi que l'Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (Saint-Nazaire) pour leur soutien dans cette étude.

## 5. Bibliographie

- [EZZ 12] EZZIANE, M., MOLEZ, L., KADRI, T., JAUBERTHIE, R., & GOUTTEFANGEAS, F. (2012). Adhérence fibre d'acier – matrice cimentaire dans les mortiers fibrés à hautes températures, *AUGC*, 1–10.
- [HAG 04] HAGER, I. (2004). Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie.
- [HAN 11] HANICHE, R. (2011). Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement. Thèse de doctorat L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [KAL 01] KALIFA, P., CHÉNÉ, G., & GALLÉ, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres - From spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487–1499. doi:10.1016/S0008-8846(01)00596-8
- [MIN 09] MINDEGUIA, J. (2009). Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons. Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour. Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00418218/>
- [NOU 95] NOUMOWÉ, A. (1995). Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [PLI 10] PLYIA, P. (2010). Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée. Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise.
- [RIL 07] Recommendation of RILEM TC, 200-HTC. (2007). *Mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and application*. *Materials and Structures*, 40(5), 449–458. doi:10.1617/s11527-006-9203-z
- [TOL 02] TOLENTINO, E., LAMEIRAS, F. S., GOMES, .M., & RIGO DA SILVA C.A., V. W. L. (2002). Effects of high temperature on residual performance of Portland cement concrete. *Materials Research*, 5, 301–307.
- [YER 14] YERMAK, N., PLYIA, P., BEAUCOUR, A., NOUMOWÉ, A., SIMON, A., & GOTTELAND, P. (2014). Etude des paramètres de formulation en vue d'améliorer la stabilité thermique des bétons. *AUGC*, 11, 1–11.