Comportement mécanique de bétons réfractaires fibrés

N. Donval, Thierry Cutard, F. Nazaret, N. Schmitt

▶ **To cite this version:**

N. Donval, Thierry Cutard, F. Nazaret, N. Schmitt. Comportement mécanique de bétons réfractaires fibrés. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.190. hal-00597761

HAL Id: hal-00597761
https://hal.science/hal-00597761

Submitted on 1 Jun 2011

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 mécanique de bétons réfractaires fibrés

Mechanical behaviour of fibre reinforced refractory castable

N. Donval[1,2], T. Cutard[1,2], F. Nazaret[3], N. Schmitt[4,5]

1 : ICA (Institut Clément Ader)
Université de Toulouse ;Mines Albi – Campus Jarlard, F-81013 Albi CEDEX 09, France
2 : Ecole des Mines Albi
Campus Jarlard, F-81013 Albi, France
3 : Aurock
54 Rue Gustave Eiffel, F-81000 Albi, France
e-mail : donval@mines-albi.fr, cutard@mines-albi.fr
4 : LMT-Cachan
ENS-Cachan, CNRS-UMR 8535, UPMC – 61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan, France
5 : Université Paris-Est Créteil (UPEC)
Place du 8 mai 1945, F-93203 Saint-Denis, France

Résumé

Les bétons réfractaires sont caractérisés par une faible résistance mécanique en traction et par une rupture fragile ou quasi-fragile. L'ajout de fibres courtes est une solution classique pour renforcer des matériaux fragiles. Les effets des fibres dépendent principalement du matériau de la fibre, de la forme des fibres et de la fraction volumique de fibres. Pour le cas des bétons réfractaires fibres, la température d'essai et la température de traitement thermique influencent leur comportement thermomécanique.
L'objectif de cette étude est de quantifier et de comprendre les effets d'un renforcement par des fibres métalliques et/ou minérales sur le comportement thermomécanique en flexion quatre points d'un béton réfractaire à base de carbure de silicium. Trois types de renforcement sont considérés: des fibres en acier, des fibres de verre et un mélange de ces deux types de fibres.
Les résultats montrent que le renforcement par fibres a un effet bénéfique tant sur le comportement pré-pic que sur le comportement post-pic du béton réfractaire. Cet effet est discuté en considérant les évolutions microstructurales du matériau. Une étude de la sensibilité aux effets d'échelle est également abordée.

Abstract

Refractory castables are characterized by a low tensile strength and a brittle or quasi-brittle failure. Short fibre addition is widely used to improve the mechanical behaviour of brittle materials such as concretes. The fibre effects mainly depend on the fibre material, the fibre shape and the fibre volume fraction. Besides, both the testing and firing temperatures influence the thermomechanical behaviour of reinforced refractory concretes.
The purpose of this study is to quantify and to understand the effect of a steel and/or mineral fibre reinforcement on the thermomechanical properties of a SiC based refractory concrete. Four point bending tests are carried out in order to study the thermomechanical behaviour of the composite. Three types of strengthening are considered: steel fibres, glass fibres and a mix of the two types of fibre.
Results show that fibres have benefit effects on both the pre-peak and post-peak mechanical behaviour of the refractory concrete. They are discussed by considering the material microstructural evolutions. The sensitivity to size effects is is also discussed.

Mots Clés : béton réfractaire, fibres, renforcement, effets d'échelles, outillage
Keywords : castable refractory, fibres, reinforcement, size effect, tooling

1 Introduction

L'utilisation croissante de matériaux composites à matrice organique à hautes performances pose de nouveaux défis au plan des outillages. Ainsi aux problématiques récurrentes des coûts et des délais, s'ajoutent celles de l'augmentation des dimensions, de la durabilité des outillages et de la réduction de l'impact environnemental. Ces nouveaux enjeux sont particulièrement visibles dans le secteur aéronautique [1]. Partant de ce constat et de l'expérience acquise lors du développement

d'outillages pour la mise en forme de tôles métalliques par le procédé de formage superplastique, l'ICA Albi a lancé des études dans le but de développer une solution d'outillage économique et durable à base de Béton Réfractaire Renforcé de Fibres Métalliques (BRRFM) pour la réalisation de pièces de grandes dimensions en matériaux composites à matrice organique. Ce développement implique de caractériser et d'analyser le comportement thermomécanique et d'appréhender les mécanismes d'effets d'échelle d'un béton réfractaire à base de carbure de silicium fibré, ceci pour des températures comprises entre la température ambiante et 400°C.

Les bétons réfractaires sont des matériaux non-façonnés qui sont principalement utilisés dans les industries de la métallurgie, dans les centrales thermiques et dans les fours. Ils sont constitués d'agrégats dont la taille varie d'environ 200µm jusqu'à environ 10mm. Ces agrégats sont liés par de fines particules d'un ciment à haute teneur en alumine [2].Les bétons sont caractérisés par une faible résistance mécanique en traction et par une rupture fragile ou quasi-fragile. Leur renforcement par des fibres courtes est considéré depuis les années 1960 dans le domaine du génie civil. Aujourd'hui, différents types de fibres sont utilisés pour contrôler le comportement et les performances mécaniques des bétons [3,4].

Les effets du renforcement sont principalement liés au type de matériau qui constitue les fibres, à la géométrie des fibres et à la fraction volumique de fibres. Les fibres courtes permettent généralement d'augmenter la capacité de déformation des bétons, en modifiant la propagation des microfissures et en retardant l'amorçage de macrofissures. L'ajout de fibres courtes permet également d'accroître la ténacité des bétons. Le renforcement par des fibres longues permet de ponter les macrofissures et d'augmenter la ténacité des bétons fibrés. Ces deux mécanismes de renforcement peuvent être combinés en utilisant différents types de fibres au sein d'un même béton, en créant ainsi un renforcement hybride.

Dans le cas des bétons réfractaires renforcés, les températures d'essai et de traitement thermique ont une forte influence sur leur comportement thermomécanique. Plusieurs études ont en effet montré ce type d'influence en établissant des relations entre les évolutions microstructurales de ces matériaux et leur comportement thermomécanique, tant dans le cas de matériaux non-renforcés [5] que dans celui de matériaux renforcés [6]. Des travaux ont été menés pour quantifier et comprendre les effets de la température sur les propriétés microstructurales et mécaniques de bétons réfractaires renforcés par des fibres métalliques [7] et par des fibres minérales [8]. Ils ont concernés des bétons réfractaires à haute teneur en alumine et une attention particulière a été accordée aux températures supérieures à 500°C, notamment pour des applications dans des outillages de mise en forme. Pour des telles applications, des performances mécaniques élevées et une durabilité sont recherchées [9]. Le plus souvent, ces outillages sont utilisés dans des plages de températures dans lesquelles les bétons réfractaires peuvent connaître des évolutions microstructurales importantes avec une diminution de leurs performances mécaniques. Dans de tels cas, il est donc essentiel de bien comprendre les effets d'un renforcement par des fibres sur le comportement thermomécanique de ces matériaux afin de disposer d'éléments permettant de concevoir et de formuler un matériau aux performances appropriées. L'objectif majeur de la présente étude réside dans le développement d'un béton réfractaire à hautes performances mécaniques et thermiques pour des applications dans la plage de températures 20°C-400°C.

2 Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Matériaux et comportement thermomécanique

Le béton réfractaire considéré est une nuance commerciale de béton à basse teneur en ciment et à base d'agrégats de carbure de silicium (SiC) d'une taille maximale de 3mm. Lors de la mise en œuvre de ce matériau, un ajout de 7% en masse d'eau est réalisé pour adapter la rhéologie du mélange et permettre la prise hydraulique de la matrice cimentaire.

Deux types de fibres de renforcement sont pris en compte. Il s'agit d'une part de fibres à crochets en acier inoxydable (nuance AISI310) et d'autre part de fibres de verre alcali-résistantes (nuance de verre AR). Les propriétés de ces fibres sont résumées dans le tableau 1 (Tab. 1). Le tableau 2 (Tab. 2) permet de prendre connaissance des huit nuances de béton réfractaire fibré considérées dans cet article, ainsi que de leur désignation.

Propriétés	**Longueur [mm]**	**Diamètre [mm]**	**Masse volumique (g/cm^3)**	**Module d'Young [GPa]**	**Résistance en traction [MPa]**	**Coefficient de dilatation thermique [K^{-1}]**
Fibreen acier inoxydable(AISI310)	25	0.38	7.37	190	>1400	$18.5\ 10^{-6}$
Fibrede verre AR	12	0.011	2.68	775	2200	$6.0\ 10^{-6}$

Tab 1. Propriétés des fibres considérées.

		Nuance / désignation							
	Type de fibre	NF	HF05	HF10	HF15	HF20	AR05	AR10	AR05-HF10
Fraction volumique [%]	Acier AISI310	0	0.5	1	1.5	2	0	0	1
	Verre AR	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5

Tab. 3. Détails sur les huit nuances de bétons réfractaires fibrés considérées.

Les échantillons sont élaborés suivant un procédé classique de coulage sous vibrations. Ainsi, le mélange initial des constituants du béton réfractaire est malaxé à sec pendant 5 minutes, dans un malaxeur planétaire, pour son homogénéisation. L'eau et les fibres sont ensuite ajoutées et la durée de malaxage en voie humide est de 3 minutes. Les échantillons sont alors élaborés par coulage sous vibrations. La phase de prise est assurée durant 48heures à température ambiante avec maintien des éprouvettes dans leur moule. Les éprouvettes sont ensuite démoulées et séchées en étuve à 110°C durant 24 heures. Finalement, les éprouvettes sont rectifiées pour assurer une géométrie parallélépipédique aux dimensions de 160x35x40mm^3.

Les échantillons sont ensuite traités thermiquement pour stabiliser la microstructure du matériau avant sa caractérisation. Les caractéristiques des cycles thermiques sont les suivantes : rampes de montée/descente en température de 100°C/heure, durée de palier isotherme d'une 1 heure, température de palier isotherme de 250°C ou de 400°C.

Le comportement mécanique des matériaux a été caractérisé en flexion 4 points. Les essais ont été réalisés sur une machine d'essai servo-hydraulique MTS 810 équipée d'un four 1600°C. Les distances entre appuis inférieurs et supérieurs sont respectivement de 125mm et 45mm. Les essais sont pilotés en déplacement de vérin à une vitesse de 0,02mm/min et le support des rouleaux supérieurs est rotulé. La mesure de la flèche est réalisée au niveau du point médian de la face inférieure de l'éprouvette à l'aide d'un capteur différentiel de type LVDT prolongé par une tige en alumine. Afin de limiter la majeure partie des effets liés aux perturbations générées par le comportement au niveau des contacts rouleau/éprouvette [10], les courbes de comportement ne sont considérées que pour des niveaux de contrainte supérieurs à 2 MPa.

Trois échantillons de chaque nuance ont été testés pour chaque couple (température de traitement thermique, température d'essai). La désignation suivante a été adoptée pour préciser les conditions de traitement thermique et d'essai de chaque éprouvette : FxTy pour un échantillon traité thermiquement à x°C et caractérisé mécaniquement à y°C (par exemple F400T250 pour un échantillon traité à 400°C et testé à 250°C).

2.2 Etude de la sensibilité aux effets d'échelle

La sensibilité aux effets d'échelle de matériaux à base de SiC de cette étude a été évaluée au moyen d'essais de flexion 3 points réalisés sur des poutres non entaillées. Ainsi, cinq tailles d'éprouvettes pour le béton non renforcé et six pour un béton fibré ont été considérées. Les dimensions de ces éprouvettes sont identiques à celles d'études antérieures ayant également eu pour objectif l'étude de la sensibilité aux effets d'échelle. Ainsi, la hauteur et la distance entre les appuis évoluent par homothétie entre chaque taille et la profondeur de l'éprouvette reste quant à elle constante et égale à 100mm (Fig. 1 et Tab. 3). Pour la nuance de béton réfractaire fibré, la fraction volumique de fibres AI310 à crochets est de 1.5%vol.. Les éprouvettes ont été traitées thermiquement à 250°C.

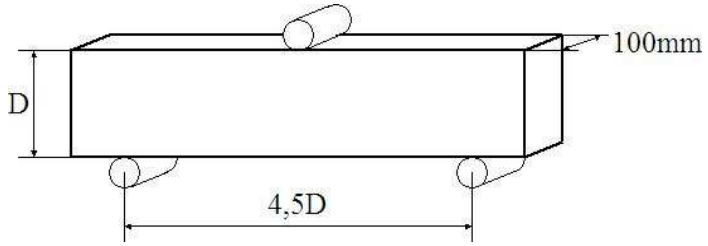

Fig. 1. : Géométrie des éprouvettes de flexion 3 points utilisée pour caractériser les effets d'échelle.

		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Nombre d'essais	**NF**	12	9	6	4	2	0
	HF15	12	7	6	4	2	2
Profondeur	**mm**	100	100	100	100	100	100
Hauteur (D)	**mm**	12,50	25	50	100	200	400
Distance entre appuis	**mm**	56,25	112,50	225	450	900	1800

Tab 3. : Dimensions des éprouvettes non entaillées de flexion 3 points.

Les essais ont été réalisés au moyen d'une presse hydraulique de traction/torsion de 100kN pour les tailles D1 à D4 et d'une plate-forme modulaire équipée d'un vérin rotulé de 150kN pour les tailles D5 et D6. Les mêmes appuis autorisant une rotation ont été utilisés pour toutes les tailles. Le pilotage des essais a été fait en imposant une vitesse de vérin constante de 0.08mm.s-1.

3 Résultats

En premier lieu, la figure (Fig. 2a) précise les terminologies retenues pour décrire le comportement et les caractéristiques mécaniques en flexion des matériaux étudiés. Ces terminologies sont reprises de celles classiquement utilisées dans la description des comportements mécaniques des bétons de génie civil, notamment par Naaman [11].

Le comportement mécanique d'un béton réfractaire fibré peut généralement être divisé en deux domaines. Avant macrofissuration, le comportement du béton est majoritairement linéaire élastique (domaine AB), même si un endommagement diffus est déjà existant au sein du matériau. Au-delà du point B, le comportement devient non linéaire du fait de l'augmentation progressive du niveau d'endommagement diffus. Au point C, l'amorçage d'une ou plusieurs macrofissures opère. Pour les matériaux non renforcés, une telle macrofissuration se propage rapidement et conduit à une rupture de type fragile ou quasi-fragile. Pour les bétons fibrés, un transfert de charge peut opérer vers les fibres et conduire à un adoucissement plus ou moins marqué voire à un comportement de type écrouissage. Dans certains cas, les niveaux de contrainte peuvent continuer de croître significativement au-delà du seuil d'amorçage et jusqu'à un niveau de contrainte maximal correspondant à la rupture du matériau.

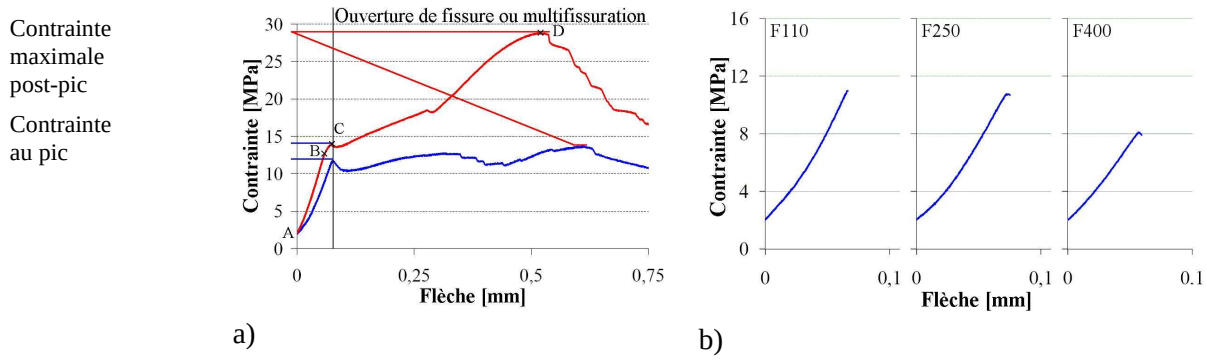

Fig. 2. Courbes contrainte-flèche en flexion 4 points : (a) des nuances HF05 (en bleu) et HF20 (en rouge) traitées thermiquement à 110°C et testées mécaniquement à température ambiante, (b) de la nuance NF HF20 traitée thermiquement à différents niveaux de température et testée mécaniquement à température ambiante.

3.1 Béton réfractaire non renforcé

En figure (Fig. 2b) sont regroupées des exemples de courbes de comportement à température ambiante du béton réfractaire non renforcé pour les différentes températures de traitement thermique. D'une part, elles permettent de constater le comportement fragile de ce matériau après séchage à 110°C, comportement qui devient quasi-fragile après traitement thermique à 250°C ou 400°C. D'autre part, elles montrent que la contrainte maximale décroit lorsque la température de traitement thermique croit. Ainsi, après cuisson à 250°C (respectivement 400°C) cette caractéristique a diminué d'environ 12% (respectivement 18%) par rapport à celle mesurée après séchage à 110°C. Dans le cas des essais réalisés à la température de traitement thermique, les résultats ont montré que cette caractéristique diminue de 8% du fait d'une augmentation de température de 20°C à 250°C alors qu'elle augmente de 18% pour une augmentation de 20°C à 400°C.

3.2 Béton réfractaire renforcé de fibres métalliques.

Les figures 3 et 4 (Fig. 3 et 4) permettent de visualiser des courbes de comportement en flexion du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques. Elles mettent en évidence les évolutions liées aux températures de traitement thermique et d'essai, ainsi qu'à la fraction volumique de fibres. Comme déjà mis en évidence dans des études antérieures [6], pour toutes les conditions d'essai considérées, l'augmentation de la fraction volumique de fibres entraîne une augmentation de la contrainte maximale post-pic. Le traitement thermique réduit à la fois le niveau de contrainte au pic et celui de la contrainte maximale post-pic. Il augmente également le caractère non-linéaire du comportement

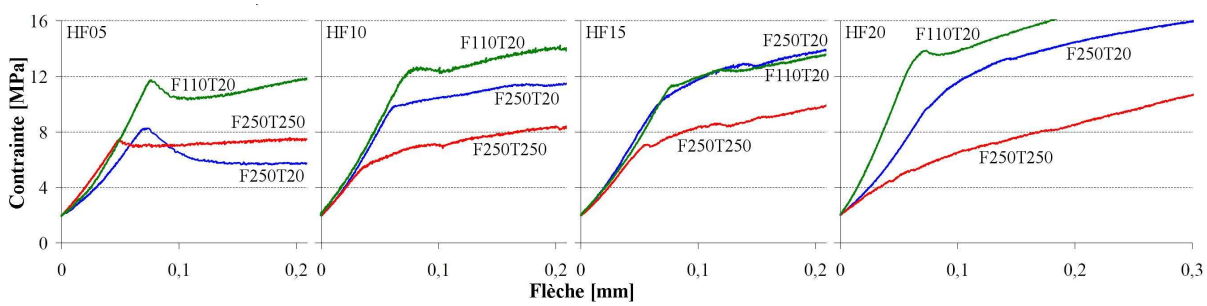

Fig. 3. Courbes de comportement en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (nuances HF05, HF10, HF15 et HF20) traité thermiquement à 110°C et testé à 20°C (vert), traité thermiquement à 250°C et testé à 20°C (bleu), traité thermiquement à 250°C et testé à 250°C (rouge).

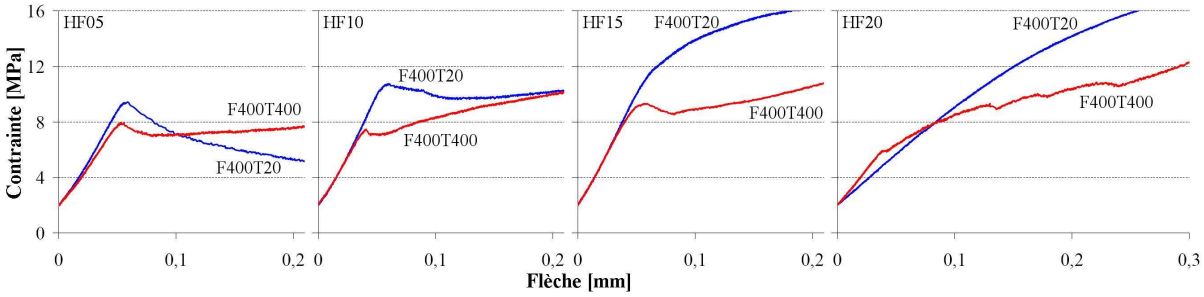

Fig. 4. Courbes de comportement en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (nuances HF05, HF10, HF15 et HF20) après traitement thermique à 400°C et testé à 20°C (bleu) ; traité thermiquement à 400°C et testé à 400°C (rouge).

Le comportement mécanique à 20°C du béton réfractaire renforcé évolue à la fois avec la fraction volumique de fibres et avec le niveau de la température de traitement thermique. Pour le matériau HF05 traité thermiquement, une forte diminution est observée pour ce qui concerne les niveaux de contrainte supportés après la fissuration du matériau. Des évolutions similaires sont observées pour la nuance HF10 après cuisson à 400°C. Cette diminution est en partie réduite lorsque les essais sont réalisés à la température de traitement thermique. Après traitement thermique à 400°C, les nuances HF20 et HF15 sont caractérisées par un comportement fortement non-linéaire en particulier du fait du déroulement de processus d'endommagement par multifissuration. En effet, de multiples fissures sont observées sur les échantillons en fin d'essai.
Pour les essais réalisés à haute température et en comparaison aux comportements enregistrés après traitement thermique lors des essais à température ambiante, la contrainte au pic croît et le domaine non-linéaire pré-pic est réduit.

3.3 Béton réfractaire renforcé de fibres de verre.

Le béton réfractaire renforcé de fibres de verre est caractérisé par une rupture quasi-fragile et par un comportement adoucissant après fissuration (Fig. 5). Le caractère adoucissant augmente lorsque la fraction volumique de fibres augmente.

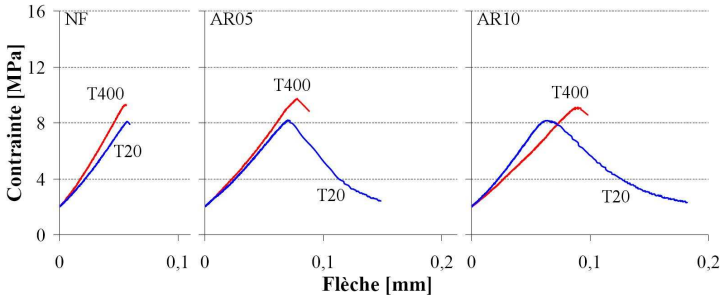

Fig. 5. Courbes de comportement en flexion 4 points à 20°C et à 400°C du béton réfractaire renforcé de fibres de verre : cas des nuances NF, AR05 et AR10 après traitement thermique à 400°C.

Lorsque le matériau est caractérisé à sa température de traitement thermique, il est constaté une diminution de l'effet des fibres dans le domaine post-pic. Si l'étendue du domaine non-linéaire du comportement du béton renforcé de fibres de verre diminue lorsque le matériau est testé à sa température de traitement thermique, elle augmente lorsque la fraction volumique de fibres augmente.

3.4 Renforcement hybride du béton réfractaire.

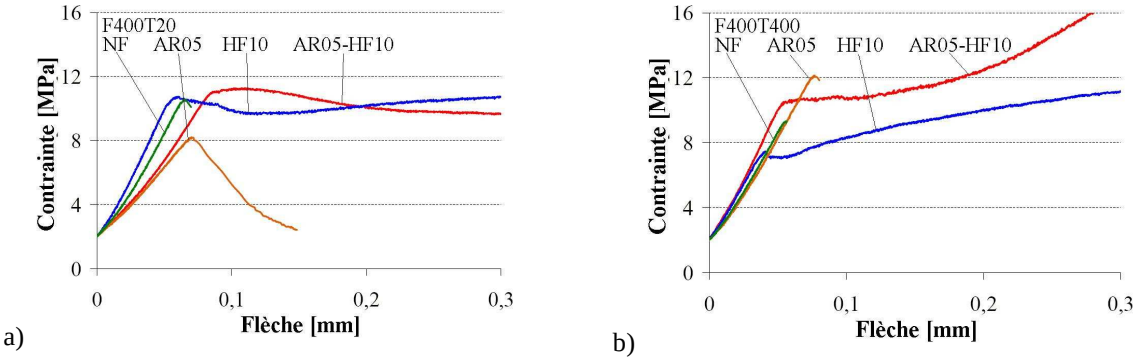

Fig. 6. Courbes de comportement en flexion 4 points des nuances NF (vert), HF10 (bleu), AR05 (orange) et AR05-HF10 (rouge) traitées thermiquement à 400°C et testées à 20°C (a) et à 400°C (b).

La figure 6 (Fig. 6) permet de visualiser le comportement mécanique de différents types de béton fibré après traitement thermique à 400°C pour des essais réalisés à 20°C (a) ou à la température de traitement thermique (b). Les résultats permettent de constater que le renforcement hybride permet de combiner les deux types de renforcement apportés par chaque famille de fibre. Ainsi lors des essais réalisés à la température de traitement thermique, après fissuration, il n'est pas observé de diminution des niveaux de contrainte pour la nuance AR05-HF10, en comparaison au cas de la nuance HF10. Si le niveau de contrainte au pic de la nuance AR05-HF10 est proche de celui de la nuance HF10, la contrainte maximale post-pic est 1,65 supérieure dans le cas du renforcement hybride.

3.5 Sensibilité aux effets d'échelle.

Pour les deux séries d'éprouvettes NF et HF15, les résultats de l'étude de sensibilité aux effets d'échelle sont détaillés dans le tableau 3 (Tab. 3). L'évolution de la contrainte maximale en fonction de la taille et des courbes de comportement sont présentés en figures (Fig. 7 et 8).

			D1	D2	D3	D4	D5	D6
HF15	**Moyenne**	**MPa**	22,23	20,36	15,60	14,90	18,60	15,85
	Ecart-type	**MPa**	1,76	1,65	1,88	0,83	0,71	0,64
NF	**Moyenne**	**MPa**	20,17	19,39	10,55	10,18	7,15	
	Ecart-type	**MPa**	1,72	1,81	0,27	0,35	0,49	

Tab. 3. Résultats des essais de flexion 3 points sur poutres HF15 et NF non entaillées cuites à 250°C et testées à 20°C.

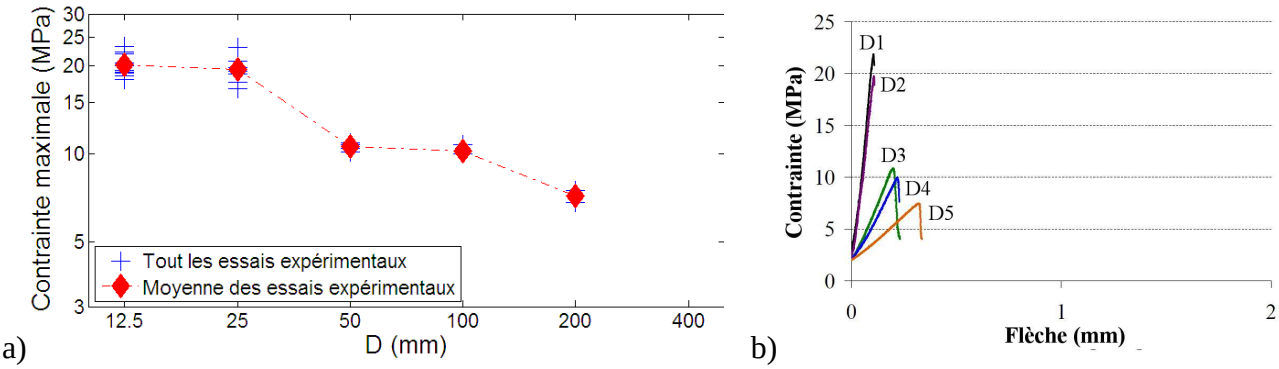

Fig. 7. Synthèse des essais de sensibilité aux effets d'échelles d'un béton réfractaire non-fibré en flexion 3 points, (a) Contrainte maximale (b) Courbes de comportement.

Le béton non renforcé montre une forte sensibilité aux effets d'échelles. Ainsi, la contrainte maximale pour les poutres de la taille D5 ne s'élève qu'à 35% de celle des poutres de la taille D1. Cette diminution de la contrainte maximale est confirmée par les courbes de comportement pour les 5 tailles de poutre (Fig. 7(b)). Cette représentation montre que le comportement du matériau reste fragile quelque soit la taille de la poutre, dans l'intervalle de tailles considéré.

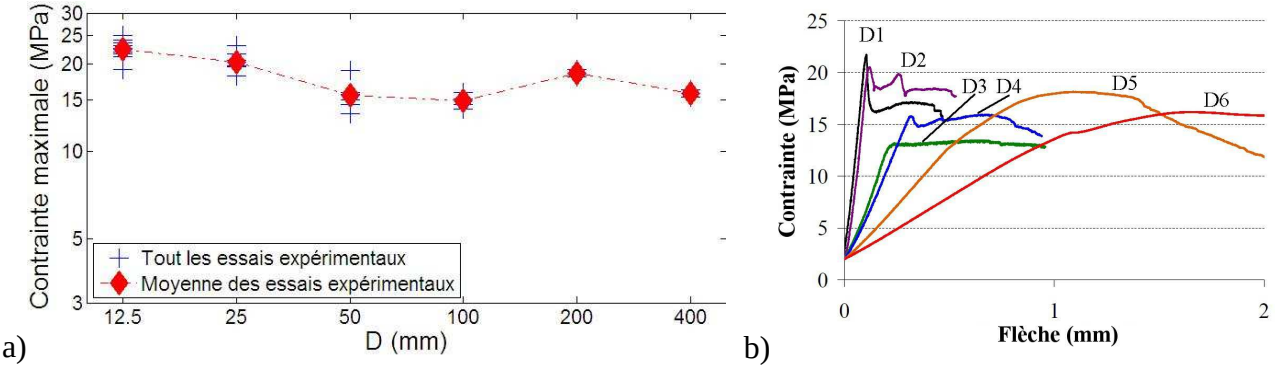

Fig. 8. Synthèse des essais de sensibilité aux effets d'échelles d'un béton réfractaire renforcé de fibres métalliques (Vf=1,5%) en flexion 3 points, (a) Contrainte maximale (b) Courbes de comportement.

Les résultats de la figure (Fig. 8) permettent de constater que le BRRFM développé et étudié dans les présents travaux n'est pas réellement sensible à l'effet d'échelle pour les tailles considérées. Ceci constitue un résultat positif et important, notamment en regard de la conception et du dimensionnement de structures qui pourront être basées sur ce matériau. Les courbes de comportement de la figure (Fig. 8b) montrent qu'un changement de comportement opère pour les grandes taille (au-delà de la taille D4. Ce changement concerne à la fois les domaines pré-pic et post-pic et son interprétation reste à identifier.

4 Discussion.

4.1 Contrainte de fissuration – Contrainte au pic.

L'endommagement diffus joue un rôle majeur dans le comportement mécanique et thermomécanique du béton réfractaire non renforcé et renforcé, en particulier celui généré par un traitement thermique. Le développement d'un tel endommagement d'origine thermique fait évoluer le comportement mécanique en flexion 4 points vers un comportement davantage non linéaire avec une rupture de type quasi-fragile. De telles évolutions sont liées au taux d'endommagement diffus initial et à l'augmentation de la capacité de microfissuration du matériau. L'endommagement d'origine thermique trouve notamment son origine dans les mécanismes de déshydratation de la matrice cimentaire qui opèrent essentiellement dans la plage de températures 110°C-300°C. Le différentiel de dilatation entre les différents constituants du béton réfractaire contribue également au développement de cet endommagement diffus [5].

En portant à nouveau le matériau à haute température, l'endommagement thermique est partiellement réduit notamment du fait de la refermeture de nombreuses microfissures. Ainsi, la contrainte de fissuration (contrainte au pic) des nuances NF et AR augmente lorsque la matériau est porté de la température ambiante à sa température de traitement thermique. Par ailleurs, l'étendue du domaine non linéaire (entre les points B et C, cf. Fig. 2a) diminue du fait de la réduction de l'endommagement diffus provoquée par l'élévation de température.

La figure 9 (Fig. 9) permet de visualiser l'effet d'un renforcement par des fibres métalliques sur la contrainte au pic. L'introduction de fibres métalliques dans la microstructure conduit à une augmentation du taux d'endommagement généré par le traitement thermique et à une diminution de la contrainte au pic. L'étendue du domaine non-linéaire augmente. L'augmentation de la fraction

volumique de fibre de 1 à 1,5% provoque une augmentation de la contrainte au pic. Lorsque le matériau est chauffé, la forte expansion thermique des fibres conduit au développement de contraintes internes élevées. Celles-ci génèrent une microfissuration dans la matrice cimentaire en particulier à proximité des interfaces fibre/matrice. Pour de fortes fractions volumiques, le comportement mécanique devient fortement non linéaire, rendant impossible la détermination d'une contrainte de fissuration. Plusieurs macrofissures se développent lors de la sollicitation du matériau. La proximité des fibres au sein de la microstructure conduit à un recouvrement des zones d'endommagement générées localement par chaque fibre. Il existe donc une forme de fraction volumique limite au-delà de laquelle l'endommagement généré par un traitement thermique devient trop élevé. Pour le matériau considéré dans cette étude, cette valeur critique se situe entre 1.5% et 2% pour une température de traitement limitée à 250°C et entre 1% et 1,5% pour une température de traitement de 400°C.

Porter de nouveau le matériau renforcé à haute température réduit une partie de l'endommagement thermique mais la contrainte au pic diminue, comme le montre la figure 9 (Fig. 9b). Cette diminution doit être attribuée aux contraintes internes générées par l'élévation de température et le fort contraste de coefficient de dilatation entre les fibres métalliques et le béton réfractaire. Du fait de ce préchargement mécanique lié à la chauffe du matériau, lorsque le chargement mécanique de flexion est appliqué, la propagation des microfissures démarre très rapidement.

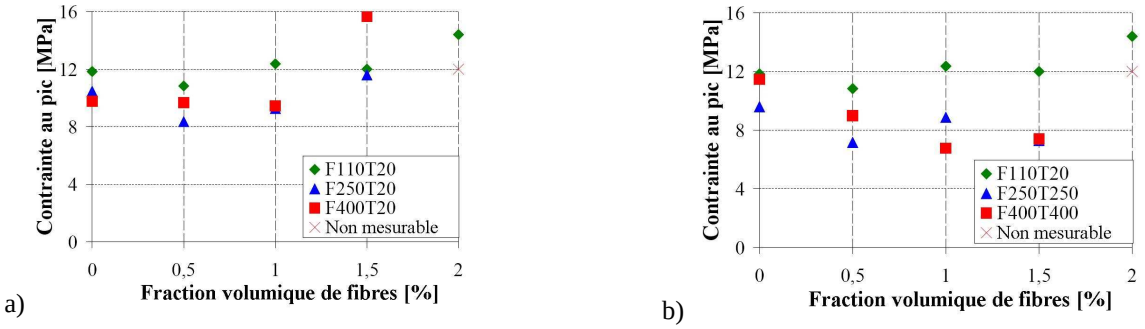

Fig. 9. Contrainte au pic (contrainte de fissuration) en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques traité à 110°C (vert), à 250°C (bleu) ou à 400°C (rouge) pour des essais réalisés à 20°C (a) ou à la température de traitement thermique (b).

4.2 Comportement post-pic

4.2 1 Béton réfractaire renforcé de fibres métalliques

L'exposition du matériau renforcé de fibres métalliques à des niveaux de température élevés provoque donc des évolutions microstructurales dont le développement d'un fort taux endommagement diffus. Plusieurs études antérieures ont en particulier montré que des décohésions opèrent aux interfaces fibre/matrice lorsque le matériau est traité thermiquement. Le frottement aux interfaces fibre/matrice et l'extraction des fibres étant les mécanismes dissipant le plus d'énergie après le seuil de fissuration (point C de la figure 2 (Fig. 2a), l'existence de décohésions fibre/matrice provoque une diminution de la contrainte maximale post-pic [12]. Néanmoins la géométrie en crochet des extrémités des fibres permet aux fibres de reprendre une partie importante de l'énergie libérée par la fissuration du béton.

Trois étapes principales peuvent être définies concernant le processus de décohésion aux interfaces fibre/matrice :

1- Durant la première chauffe du matériau renforcé, des niveaux de contraintes internes élevés se développent du fait du fort différentiel de dilatation thermique entre les fibres métalliques

et la matrice inorganique. Il en résulte un endommagement de la matrice à proximité de ces interfaces.

2- Durant le refroidissement, une forte contraction des fibres opère, conduisant à des décohésions aux interfaces fibre/matrice. Après retour à température ambiante, la matériau est donc caractérisé par un endommagement diffus qui est le cumul de l'endommagement généré durant les deux premières étapes de ce processus. Plus la température de traitement thermique est élevée, plus le taux d'endommagement généré par le cycle thermique est important.

3- Durant la seconde chauffe, les fibres subissent à nouveau les plus fortes déformations du fait de leur dilatation. Le contact fibre/matrice est restauré et une pression de frettage se développe aux interfaces fibre/matrice. Le développement d'une telle pression a deux conséquences majeures : d'une part elle conduit au développement d'un champ de contraintes inertes dans le matériau et à l'échelle de la microstructure, d'autre part elle rend plus difficile les phénomènes d'arrachement de fibres et de glissement aux interfaces fibre/matrice.

Cette dernière étape permet d'expliquer les différences observées en comparant les niveaux de la contrainte maximale post-pic sur les figures 10 (Fig. 10a et b). Ainsi, lors du passage de 20°C à la température de traitement thermique, le recouvrement du contact fibre/matrice et le développement d'une pression de frettage conduit à une augmentation le la contrainte maximale post-pic

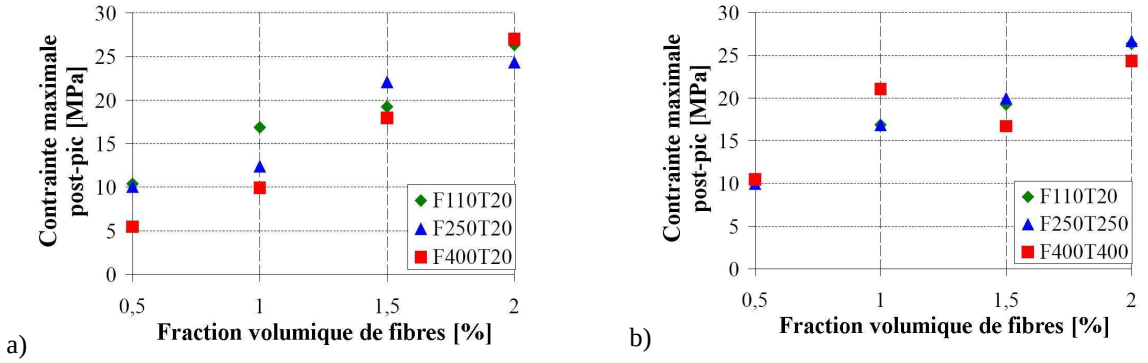

Fig. 10. Contrainte maximale post-pic pic en flexion 4 points du béton réfractaire renforcé de fibres métalliques traité à 110°C (vert), à 250°C (bleu) ou à 400°C (rouge) pour des essais réalisés à 20°C (a) ou à la température de traitement thermique (b).

4.2.2 Béton réfractaire renforcé de fibres de verre

Des études antérieures ont permis de mieux comprendre l'effet du renforcement par des fibres minérales sur le comportement thermomécanique d'un béton réfractaire à base d'andalousite [8]. Le renforcement par des fibres de verre a notamment montré un effet significatif sur le comportement pré-pic sur ce béton qui développe un endommagement d'origine thermique important. Ces travaux ont mis en évidence que les fibres courtes interagissent avec les microfissures du béton réfractaire et en influencent la propagation, notamment en la ralentissant. Ainsi l'amorçage de macrofissures est retardé. Comme l'augmentation de la température d'essai réduit l'endommagement diffus, l'effet des fibres de verre est moins marqué lorsque le matériau est testé à haute température que lorsqu'il est testé à 20°C. Dans le cadre de la présente étude, dans la mesure où les même types de comportement et d'évolutions sont observés avec le renforcement par des fibres de verre, il est probable que ces interprétations puissent être étendues à ce nouveau matériau.

4.2.3 Renforcement hybride du béton réfractaire

Les résultats obtenus en combinant un renforcement par des fibres métalliques et un renforcement par des fibres de verre montrent que les effets positifs respectifs de ces deux types de fibres peuvent

être cumulés au sein d'un béton réfractaire. Ainsi, dans une certaine mesure, le comportement mécanique d'un béton réfractaire apparaît pouvoir être piloté par l'introduction de différents types de renforcement fibreux, chacun jouant un rôle sur des zones différentes de la courbe de comportement non-linéaire d'un tel matériau.

5 Conclusion

Les résultats de cette étude du renforcement d'un béton réfractaire à base de carbure de silicium par des fibres réfractaires permet d'obtenir une meilleure connaissance et compréhension du comportement de tels composites jusqu'à des niveaux de température de l'ordre de 400°C. Deux types de fibres sont considérés : des fibres courtes en acier inoxydable AISI310 et des fibres courtes de verre AR. Comme cela avait pu être observé antérieurement sur des bétons réfractaires à base d'oxyde, dans ce béton à base de SiC, les deux types de fibres ont des effets de renforcement spécifiques et différents. Ainsi les effets du renforcement sont fortement différents en fonction du type de fibres, de la fraction volumique de fibres, de l'histoire thermique du béton réfractaire renforcé et du niveau de température auquel est mesuré le comportement thermomécanique. Combiner le renforcement par des fibres métalliques et de verre permet de cumuler les effets respectifs de chaque type de fibre. Les résultats ont été commentés sur la base de la description et de la comparaison des courbes de comportement en flexion et en considérant également les évolutions microstructurales de ces matériaux fortement hétérogènes. Par ailleurs, l'étude de la sensibilité aux effets d'échelle a montré que le béton réfractaire non fibré présente une forte sensibilité d'échelle, sensibilité qui n'existe plus, pour les tailles d'éprouvettes considérées, lorsque ce béton est renforcé de fibres métalliques.

Remerciements
Les auteurs tiennent à remercier la région Midi-Pyrénées pour son support financier.

Références

[1] T. CHAUVIN, « Enjeux et problèmes identifiés dans l'utilisation d'outillages composites série ». 16èmes Journées Nationales sur les Composites, 2009.
[2] W., LEE, W. VIEIRA, S. ZHANG, K. GHANBARI AHARI, H. SARPOOLAKY, C. PARR, « Castable refractory concretes ». *International Materials Reviews*, Vol. 46, n°3, pp. 145-167, 2001.
[3] A. BRANDT « Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. ». 14th International Conference on Composite Structures, Melbourne, Australia, 2007.
[4] Z. ZHENG, D. FELDMAN, "Synthetic fiber-reinforced concrete". *Progress in Polymer Science*, Vol 20, n°2, pp 185-210, 1995.
[5] O. BAHOUL, M. HUGER, T. CHOTARD, C. GAULT, « Elastic behaviour at high temperature of silicon carbide refractory castables used in waste incineration plants ». 51st International Colloquium on Refractories 2008. Aachen, Germany, 2008.
[6] L. BIOLZI, S. CATTANEO, G. ROSATI, « Evaluating residual properties of thermally damaged concrete ». *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, n°10, pp. 907-916, 2008.
[7] T. CUTARD, « Study of refractory concretes at high temperature: microstructural evolutions and mechanical behaviour ». ECERS2007 - 10th International Conference of the European Ceramic Society, Berlin, Germany, 2007.
[8] A. MAZZONI, F. NAZARET, T. CUTARD, « Thermomechanical behaviour of fibre reinforced refractory castables ». UNITECR2009, Bahia, Brasil, 2009.
[9] G. BERNHART, F. NAZARET, T. CUTARD, « Fibre reinforced refractory castables for SPF toolings. Material ». *Wissenschaft und Werkstofftechnick*, Vol 39, n°4-5, pp. 317-321, 2008.
[10] F. NAZARET, H. MARZAGUI, T. CUTARD, « Influence of the mechanical behaviour specificities of damaged refractory castables on the Young's modulus determination ». *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 26, n°8, pp. 1429-1438, 2006.
[11] A. NAAMAN, « Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960 ». Advances in Construction Materials 2007, pp. 181-202, 2007.
[12] E. CAILLEUX, T. CUTARD, G. BERNHAR, « Pullout of steel fibres from a refractory castable: experiment and modeling ». *Mechanics of Materials*, Vol. 37, n°4, pp. 427-445, 2005.