

# DURABILITÉ DE L'ADHÉRENCE DES BARRES PRFV SOUS TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Abdelmonem MASMOUDI<sup>1</sup>, Mongi BEN OUEZDOU<sup>1</sup>, Radhouane MASMOUDI<sup>2</sup>, Atef DAOUD<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de génie civil, Ecole National d'ingénieurs de Tunis (ENIT), Laboratoire de Génie Civil - BP 37 ,1002 Tunis- Belvédère, Tunisie.

<sup>2</sup> Département de génie civil, Faculté de génie - Université de Sherbrooke, 2500, Boulevard de l'université de Sherbrooke (Québec), J1K 2R1 Canada.

## 1. INTRODUCTION

**L**a corrosion des armatures de renforcement en acier est considérée comme une des causes principales de détérioration des structures en Génie civil. Pour empêcher ou éliminer la corrosion, plusieurs techniques ont été adoptées, telles que les barres enduites d'époxyde, les barres galvanisées en acier, les membranes synthétiques, la protection cathodique, les peintures spéciales. Cependant, l'efficacité à long terme de ces techniques est encore incertaine d'après les expériences *in situ*.

Récemment, une technique prometteuse de renforcement fait de barres en Polymères Renforcées de Fibres (PRF) a été appliquée, non seulement à de nouvelles structures en béton armé mais également pour la rénovation des structures existantes. Cette technique est avantageuse dans les cas d'exigence de non corrosion des armatures, d'isolation électrique ou magnétique. Les barres en PRF présentent d'autres avantages tels que la haute résistance à la traction comparée à leur faible densité [1-2-3-4-5-6]. Les propriétés mécaniques et le mode de déformation des barres PRF sont différents de ceux de l'acier. Cependant, les règles de conception avec renforcement en acier ne peuvent être appliquées directement dans le cas de renforcement avec des barres en PRF [7]. Les barres PRF présentent en effet un comportement anisotrope et sont caractérisées par une haute résistance à la traction uniquement dans la direction

des fibres de renforcement. Le coefficient d'expansion thermique transversale (CTE) contrôlé par la résine est deux à six fois plus grand que celui du béton [8]. Cette anisotropie pourra affecter la résistance de ces barres PRF aux efforts tranchants, et éventuellement la résistance à l'adhérence. Les températures élevées comme celles rencontrées dans les pays tropicaux peuvent également diminuer les propriétés de ces barres PRF.

Plusieurs études ont été effectuées pour étudier l'effet de la température sur le changement des propriétés d'adhérence des barres PRF : Katz *et al.* [9, 10, 11], Nanni *et al.* [12]. Cependant peu d'études sont orientées sur la quantification des pertes d'adhérence à long terme et sous températures élevées. Parmi ces études, on peut citer les travaux expérimentaux de Galati *et al.* [13]. Les travaux sont menés sur des éprouvettes en béton renforcées par des barres en PRF de Verre (PRFV) et soumises à un chargement thermique. Des essais d'arrachement direct sont effectués sur des barres de diamètre 9,5 mm ancrées dans des cubes en béton de 152 mm<sup>3</sup> avec différentes longueurs d'ancrage et différents enrobage. Les éprouvettes sont conditionnées pendant 200 h sous une température de 70°C et une humidité de 80 %. Les résultats montrent que l'influence de la température a été particulièrement observée pour les barres qui ne présentent pas un enrobage en béton suffisant. Un tel comportement peut être expliqué par l'apparition de microfissures dans le béton provoquées par les contraintes ther-

miques pendant le cycle de conditionnement. Pour l'ensemble des éprouvettes testées, une réduction de 16 % de la contrainte d'adhérence a été constatée. Une chute de la pente charge-déplacement de la barre a été également observée, qui aurait été provoquée par la dégradation de la résine utilisée dans la fabrication des barres PRFV testées [13].

Pour étudier l'effet de la température sur le changement des propriétés d'adhérence des barres, une autre étude expérimentale a été menée par Katz *et al.* [11]. Quatre barres de type Rods (12,7 mm diamètre) sont ancrées dans des cylindres en béton normal de 150 mm de diamètre et 300 mm de longueur. La longueur d'ancrage est 5 fois le diamètre de la barre ( $5D_b$ ). Les barres Rod CB ont des verrous similaires à ceux des barres en acier haute adhérence. Ces barres sont fabriquées avec des fibres de carbone imprégnées de polyéthylène téraphthalate recyclé. Les barres Rod CPH comportent des hélices consolidées par un polymère et un vinylester à la surface pour augmenter l'adhérence. Les barres Rod CPI comportent à la surface de larges rainures en fibres consolidées également par un polymère et un vinylester. De même, les barres Rod NG, sont fabriquées avec des fibres de verres incorporées dans une matrice composée d'un polymère et d'un polyester. L'adhérence est assurée par des verrous gravés sur la surface de la barre. Les essais d'arrachement sont conduits après un conditionnement entre 20 et 250°C. Une comparaison entre ces quatre barres pour une température de 80°C a montré que les barres NG présentent la réduction de contrainte d'adhérence la plus importante (43 %). Ceci peut être expliqué par la faible température de transition du verre ( $T_g$ ) et de la résine utilisée. Pour les barres Rods CPH et CPI, les dégradations de la contrainte d'adhérence sont relativement modérées et elles sont de l'ordre de 20 %. Cependant, les barres Rods CB ont présenté les plus faibles réductions de contrainte d'adhérence (3 %). Il est possible de conclure à partir de ces résultats que la dégradation de la contrainte d'adhérence sous températures élevées dépend en plus du type de polymère et du type de fibres. Notons que dans la même étude [11], et au voisinage d'une température de 200°C, les contraintes d'adhérence ont présenté une réduction sévère entre 80 et 90 % pour l'ensemble des barres testées (CB, CPH, CPI et NG Rods).

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer et de quantifier à long terme à l'aide d'essais d'arrachement direct l'effet de la température sur les dégradations des contraintes d'adhérence de barres PRFV de diamètre 8 et 16 mm noyées dans un béton et dans un environnement sec. Les résultats de 80 tests après plus de 5 000 h (240 jours) d'exposition sous températures élevées jusqu'à 80°C sont présentés. L'effet de la température et la moyenne des pertes de la contrainte d'adhérence sont comparés avec les résultats des éprouvettes de référence non conditionnées. (20°C). Basé sur les résultats expérimentaux, les paramètres  $\alpha$  du modèle analytique de Bertero-Popov-Eligehausen (BPE), ainsi que les paramètres  $\beta$  et  $S_r$ , du modèle Cosenza, Manfredi Realfonzo (CMR) sont calibrés. La dépendance de ces paramètres à la température est établie pour les deux modèles utilisés.

## 2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

### 2.1. Programme d'essais

L'objectif principal de ce programme expérimental est d'évaluer et de quantifier dans un environnement sec à long terme et à travers des essais d'arrachement direct, l'effet de la température sur les dégradations des contraintes d'adhérence des barres PRFV noyées dans un béton. Les éprouvettes d'essai sont conditionnées sous des températures de 40, 60 et 80°C pendant 4 et 8 mois dans des bassins de vieillissement contrôlés en température comme le montre la Figure 1.

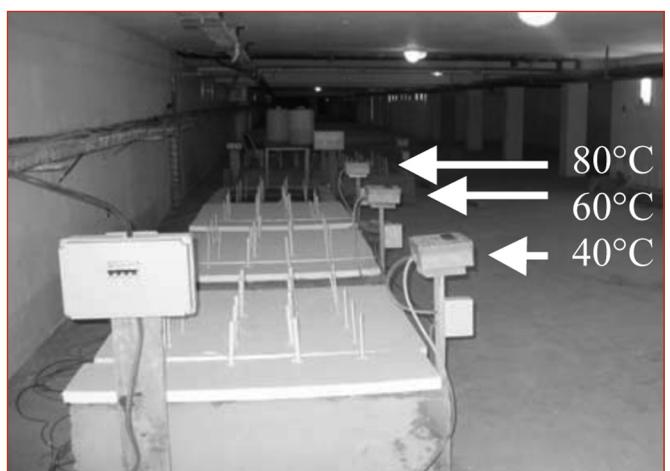


Figure 1 : Éprouvettes sous conditionnement.

Un total de 80 éprouvettes est testé. Le Tableau 1 présente les détails du programme expérimental.

Diamètre de la barre (Db)	Longueur d'ancrage	Température de conditionnement (°C)	Durée de conditionnement (mois)
8	$5d_b$	20	4
		40	
		60	
		80	
16	$5d_b$	20	4
		40	
		60	
		80	

Tableau 1 : Programme expérimental.

### 2.1. Barres PRFV

Les barres en PRFV « ComBAR® » utilisées pour les essais d'arrachement sont fabriquées par la compagnie Schock Co. [14]. Ces barres en PRFV sont fabriquées selon un système de pultrusion. Des fibres de verre sont combinées et imprégnées avec de la résine synthétique dans le but d'ap-

Type de barre	Diamètre nominal (mm)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance ultime (MPa)	Coefficient d'expansion thermique (mm/mm/°C)	Densité (g/cm³)
PRFV	8	$60,0 \pm 1,9$	$738 \pm 22$	$0,6 \times 10^{-5}$ (axial)	2,20
	16			$2,2 \times 10^{-5}$ (radial)	
	16				

Tableau 2: Propriétés des barres en PRFV utilisées dans cette étude [14].

porter à ce type de barres des propriétés mécaniques, chimiques et physique très élevées. Les propriétés de ces barres sont présentées dans le Tableau 2.

Elles sont basées sur des essais expérimentaux réalisés dans les laboratoire de la compagnie Schock Bauteile GmbH, Munich et à l'université de Syracuse [15]. Deux diamètres nominaux sont utilisés pour les barres en PRFV dans cette étude, 8 mm et 16 mm.

### 2.3. Caractéristiques du béton utilisé

Le béton qui a servi pour le coulage des éprouvettes d'essais est composé d'un ciment Portland du type CEM I 42,5, avec des granulats de diamètre maximal 20 mm. Les caractéristiques du béton sont présentées dans le Tableau 3.

Les éprouvettes cylindriques en béton  $160 \times 320$  mm sont coulés en deux couches et vibrés selon la norme en vigueur. Ces éprouvettes sont conservées dans une chambre humide jusqu'à l'âge des essais. La résistance à la compression des éprouvettes cylindriques est contrôlée le jour des essais d'arrachement. La résistance en compression et la consistance du béton utilisé sont respectivement de  $30 \pm 3$  MPa et  $90 \pm 2$  mm.

### 2.4. Procédure d'essais

Les essais d'arrachement ont été conduits sur des barres en PRFV de 500 mm de longueur ancrées verticalement dans des cubes en béton de  $150 \times 150$  mm pour les diamètres de 8 mm et  $180 \times 180$  mm pour les diamètres de 16 mm. Cette différence dans les dimensions des éprouvettes a été envisagée afin d'éviter tout mode de rupture dans le béton. Toutes les éprouvettes ont été confectionnées selon les spécifications du Guide des essais et méthodes ACI 440,3R [16]. La longueur d'ancrage des barres envisagée pour toutes les éprouvettes d'essais est de  $5D_b$ , avec  $D_b$  le diamètre de la barre en PRFV. La longueur d'ancrage limitée à  $5D_b$  est assurée par l'intermédiaire de tubes en PVC placés autour de la barre avant le coulage du béton. Les éprouvettes sont conditionnées sous différentes températures (40, 60 et 80°C) pendant 4 et 8 mois. Après conditionnement, les éprouvettes ont été soumises aux essais d'arrachement direct. Une éprouvette supplémentaire a été instrumentée avec un thermocouple placé sur la

surface de la barre à l'interface barre PRFV/béton avant le coulage de l'éprouvette. Le but de ce thermocouple était de pouvoir contrôler la valeur de la température à l'intérieur de l'éprouvette au niveau de l'interface pendant l'exécution de l'essai. Le résultat de cette éprouvette supplémentaire n'est pas pris en considération du fait que la surface de contact au niveau de l'interface était modifiée par la présence du thermocouple.

Les essais d'arrachement ont été réalisés sur une machine de traction commandée en déplacement type JJLloyd 50 KN. L'acquisition des données est assurée par une chaîne d'acquisition. La vitesse de chargement constante pour l'ensemble des essais est fixée à 1,2 mm/min en suivant les recommandations du guide ACI 440,3R-04. Un capteur LVDT de précision 0,001 mm est utilisé pour les mesures des déplacements du côté libre de la barre PRFV : trois LVDTs sont placés à 120 degrés pour la mesure des déplacements du côté chargé.

### 2.5. Résultats expérimentaux

#### 2.5.1 Comportement de la charge de traction-glissement (F-g)

Les résultats experimentaux obtenus sont présentés sous la forme d'une courbe charge de traction en fonction du glissement du côté non chargé de la barre. Les courbes charge de traction-glissement comportent principalement deux phases comme le montre la Figure 3.

La phase ascendante est linéaire avec un accroissement rapide de la charge pour des petites valeurs de glissement jusqu'à ce qu'une rupture par adhérence ait lieu. La phase descendante est non linéaire, la force décroît considérablement avec un glissement important de la barre.

Les valeurs maximales de la contrainte d'adhérence obtenues avec les barres en PRFV de diamètre 8 mm sont enregistrées pour des glissements du côté non chargé de la barre de 0,55 ; 0,53 ; 0,49 et 0,43 mm respectivement pour des températures de 20, 40, 60 et 80°C. Pour le diamètre 16 mm, les glissements sont de 0,6 ; 0,58 ; 0,56 et 0,47 mm respectivement pour 20, 40, 60 et 80°C. Pour l'ensemble des barres testées, le mode de rupture a lieu par déchirure du béton au niveau de l'interface barre en PRFV/béton Figure 4.

Eau (kg/m³)	Ciment I 42,5 (kg/m³)	Sable (kg/m³)	Gravier 4/12 (kg/m³)	Gravier 12/20 (kg/m³)	Résistance à la compressive (MPa)	Affaissement (mm)
204	300	857	296	691	$30 \pm 3$	90 ± 2

Tableau 3: Composition et caractéristiques du béton utilisé.

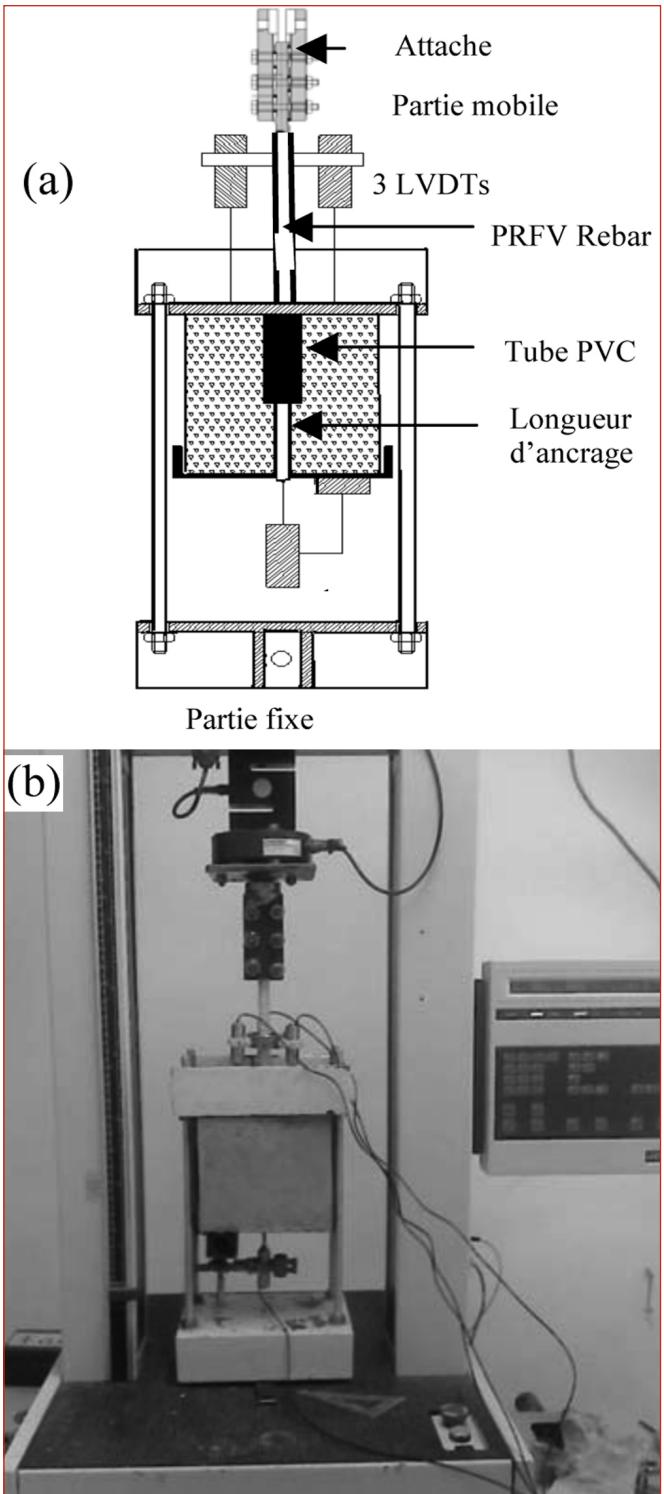


Figure 2: Montage de l'essai d'arrachement direct: (a) Schéma (b) photo.

### 2.5.2 Contrainte d'adhérence

La contrainte d'adhérence maximale est calculée par l'expression suivante :

$$\tau = \frac{F_{\max}}{\pi \cdot D_b \cdot L_{e.b}} \quad (1)$$

Avec  $F_{\max}$  la force maximale (N) provoquant l'arrachement de la barre,  $D_b$  le diamètre nominal de la barre testée (mm), et  $L_{e.b}$  la longueur d'ancrage de la barre en PRFV (mm). Le tableau 4 récapitule la variation de la contrainte

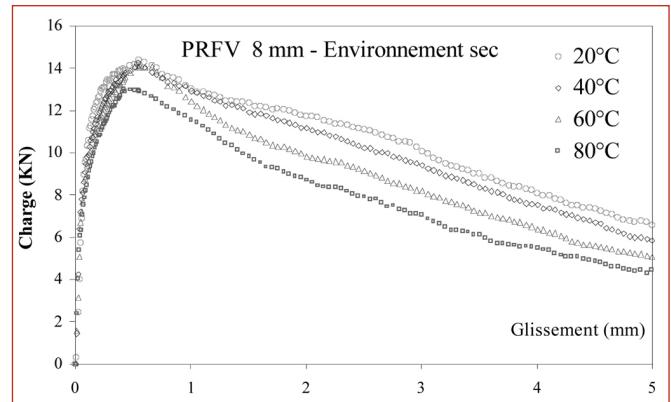


Figure 3: Variation de la charge-glissement de la barre.

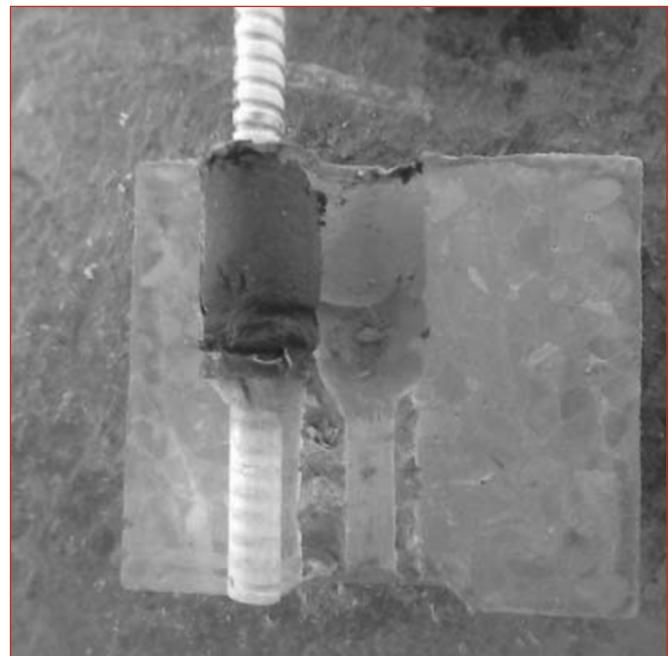


Figure 4: Mode de rupture de l'adhérence barre/béton.

d'adhérence en fonction de la température des barres utilisées basée sur la moyenne de cinq essais identiques.

La Figure 5 montre les valeurs maximales des contraintes d'adhérence après un conditionnement de 120 et 240 jours sous température élevée.

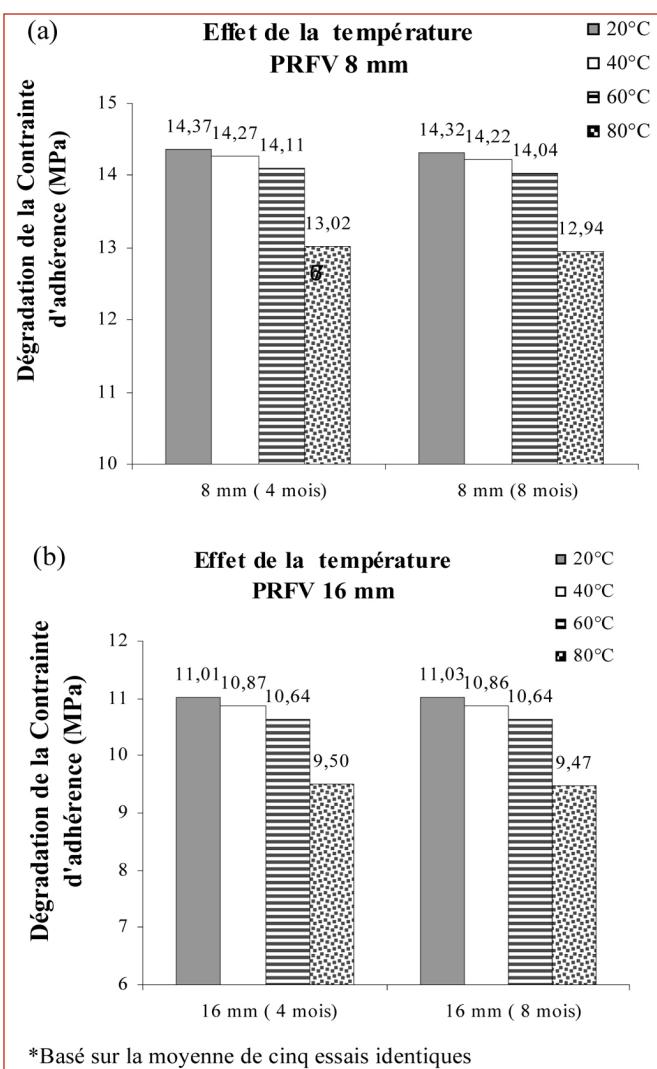
Après 120 jours de conditionnement des barres en PRFV Combar®, dans un environnement sec jusqu'à 60°C, la moyenne des contraintes d'adhérence n'a pas montré de dégradations significatives (1,81 % et 3,36 % respectivement pour les diamètres 8 mm et 16 mm). Pour une température de 80°C, les réductions maximales de la contrainte d'adhérence ont été de 9,39 % et 13,71 %, respectivement pour les diamètres 8 mm et 16 mm comparés aux résultats de référence à 20°C.

Après 240 jours de conditionnement des barres PRFV Combar®, dans un environnement sec jusqu'à 60°C, la moyenne des contraintes d'adhérence n'a également pas montré de dégradations significatives (1,96 % et 3,54 % respectivement pour les diamètres 8 mm et 16 mm). Pour 80°C, les réductions maximales de la contrainte d'adhérence ont été de 9,64 % et 14,14 %, respectivement pour les diamètres 8mm et 16 mm comparés aux résultats de référence à 20°C. La Figure 6 présente les courbes de contrainte d'adhérence

Température	Contrainte d'adhérence* (MPa)			
	4 mois		8 mois	
	8 mm (PRFV)	16 mm (PRFV)	8 mm (PRFV)	16 mm (PRFV)
20 °C	14,37 ± 0,40	11,01 ± 0,25	14,32 ± 1,19	11,03 ± 0,92
40 °C	14,27 ± 1,04	10,87 ± 0,36	14,22 ± 1,99	10,86 ± 0,21
60 °C	14,11 ± 0,75	10,64 ± 0,15	14,04 ± 1,24	10,64 ± 0,44
80 °C	13,02 ± 0,22	9,50 ± 0,27	12,94 ± 1,49	9,47 ± 0,93

\* Basés sur la moyenne de cinq essais identiques.

Tableau 4: Variation de la contrainte d'adhérence en fonction de la température.



\*Basé sur la moyenne de cinq essais identiques

Figure 5: Dégradation de la contrainte d'adhérence \*  
(a) PRFV 8 mm (b) PRFV 16 mm.

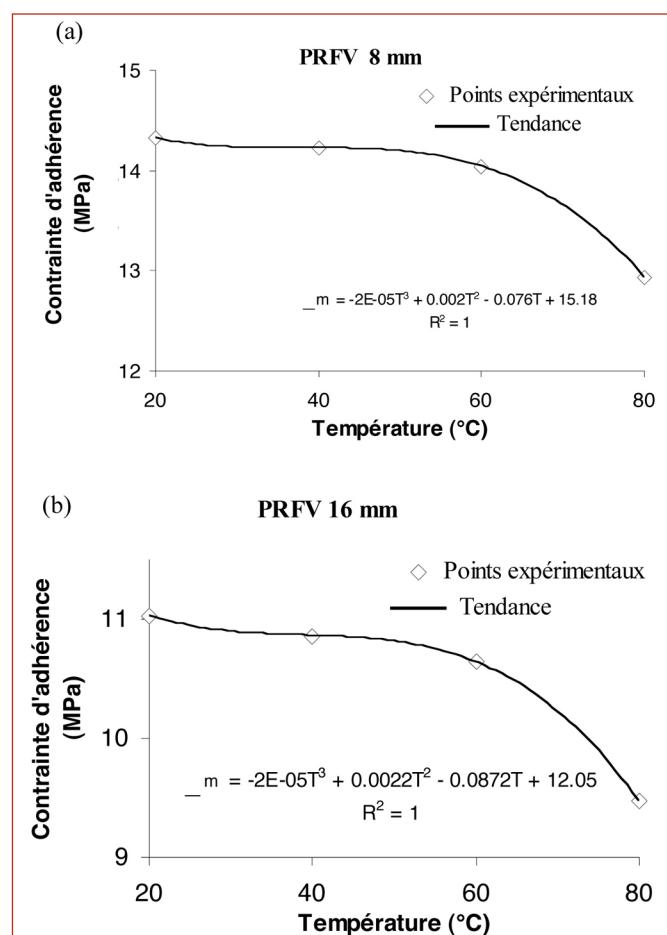


Figure 6: Dégradation de la contrainte d'adhérence.

### 3. ÉTUDE ANALYTIQUE DE LA CONTRAINTE D'ADHÉRENCE EN FONCTION DU GLISSEMENT

Pour déterminer la performance d'une structure en béton renforcée de PRF à l'aide d'une modélisation numérique tenant compte des propriétés d'adhérence, un modèle analytique de la loi de glissement est nécessaire. En comparant le grand nombre de modèles proposés dans le cas du renforcement en acier, très peu de modèles analytiques semblent applicables pour les PRF. Les modèles que nous avons retenus sont les suivants :

### 3.1. Eligehausen, Popov & Bertero (Modèle BPE I)

La Figure 7 montre un schéma explicatif du modèle BPE. L'allure de la branche ascendante proposé par le modèle Eligehausen *et al.* [17], est donnée par:

$$\tau = \tau_1 \left[ \frac{s}{s_1} \right]^\alpha \quad (2)$$

Avec  $\tau_1$  la contrainte d'adhérence maximale,  $s_1$  le glissement maximal au moment de la rupture par manque d'adhérence. Dans l'équation 2,  $\alpha$  est un paramètre compris entre 0 et 1 ( $\alpha = 0,40$  dans le cas des barres d'acier).

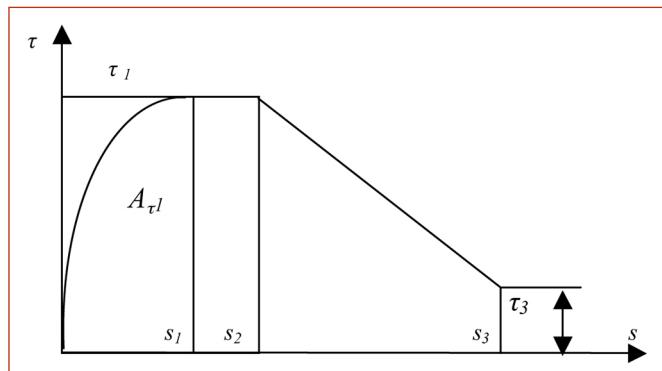


Figure 7: Modèle BPE [17].

Ce modèle comporte trois branches, une phase ascendante, une phase constante ( $\tau = \tau_1$ ) jusqu'à un glissement  $s = s_2$ , puis une branche linéaire de  $(s_2, \tau_2)$  jusqu'à  $(s_3, \tau_3)$  puis une branche horizontale pour  $s > s_3$ . La valeur ( $\tau = \tau_3$ ), représente le frottement de la barre dans la matrice béton comme le montre la Figure 7. Les valeurs  $s_2$ ,  $s_3$  et  $\tau_3$  sont calibrées à partir des résultats expérimentaux. La valeur du coefficient  $\alpha$  qui gouverne la pente de la branche ascendante est obtenue par calibration de l'aire  $A_{\tau_1}$ , en dessous de la branche ascendante analytique donnée par l'équation (Eq. 3), à l'aire  $A_{\tau_1}$ , en dessous de la branche ascendante expérimentale pour chaque courbe.

$$A_{\tau_1} = \int_0^{s_1} \tau(s) . ds = \int_0^{s_1} \tau_1 \cdot \left[ \frac{s}{s_1} \right]^\alpha . ds = \frac{\tau_1 \cdot s_1}{1+\alpha} \quad (3)$$

Dans l'équation 3,  $\tau_1$  et  $s_1$  représentent respectivement la contrainte d'adhérence et le glissement correspondant. Cependant, la valeur de  $\alpha$  peut être exprimée en fonction de  $A_{\tau_1}$  de la manière suivante :

$$\alpha = \frac{\tau_m \cdot s_m}{A_{\tau_1}} - 1 \quad (4)$$

### 3.2. Modèle CMR

Le modèle CMR (Cosenza, Manfredi Realfonzo) est également utilisé pour la simulation de la branche ascendante de la courbe contrainte d'adhérence /déplacement.

L'allure de la branche ascendante  $\tau$ - $s$  du modèle CMR est donnée par l'équation :

$$\tau(s) = \tau_m \left[ 1 - e^{-\frac{s}{s_r}} \right]^\beta \quad (5)$$

$\tau(s)$  est la contrainte à l'interface barre béton correspondant au glissement de la barre  $s$ ,  $\tau_m$  est la contrainte maximale correspondant au glissement maximal au pic de la branche ascendante,  $\beta$  et  $s_r$  sont les paramètres du modèle obtenus par calibration avec la courbe expérimentale.

La branche ascendante est la branche la plus importante parce qu'elle donne de l'information sur la relation entre la contrainte d'adhérence et le glissement de la barre en dessous de la charge ultime. Toutes les structures en Génie civil sont conçues pour travailler au dessous de cet état limite. L'allure des courbes expérimentales est comparée aux modèles analytiques BPE et CMR représentées dans les Figures 8 et 9 respectivement pour les diamètres 8 et 16 mm après 8 mois de vieillissement.

Le Tableau 5 présente la moyenne des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  pour chaque température et chaque diamètre de barre étudié. Ces paramètres sont calibrés par rapport aux résultats expérimentaux après conditionnement de 4 et 8 mois sous températures élevées dans un environnement sec.

La comparaison des deux modèles montre que le modèle CMR représente mieux l'allure de la branche ascendante des courbes dans le domaine  $0 \leq s \leq s_m$  pour toutes les éprouvettes testées.

Pour la branche ascendante, et après conditionnement des éprouvettes pendant 8 mois sous températures élevées, la valeur moyenne du coefficient  $\alpha$  obtenu avec le modèle BPE est pratiquement constante autour de 0,089 pour les barres PRFV. On note que la valeur moyenne trouvée par Cosenza *et al.* [18] pour des barres également en PRFV mais dont l'adhérence est assurée par des grains de sables est de 0,067.

Pour le modèle CMR le coefficient  $\beta$  dépend de la variation de la température  $T$ . Ce coefficient  $\beta$ , qui gouverne l'allure de la branche ascendante augmente en valeur quand la température augmente, comme l'indique la Figure 10. Les polynômes du troisième degré  $\beta = f(T)$  représentent pour chaque diamètre cette dépendance à la température Eq.(6) and Eq.(7) :

$$\text{Ø 8 mm : } \beta(T) = -0,0002T^3 + 0,005T^2 - 0,0088T + 0,462 \quad (6)$$

$$\text{Ø 16 mm : } \beta(T) = 0,0005T^3 + 0,008T^2 - 0,0185T + 0,426 \quad (7)$$

## 4. CONCLUSIONS

Les conclusions suivantes émanent des résultats expérimentaux et analytiques de notre étude :

- pas de réductions significatives observées de la contrainte d'adhérence des barres en PRFV noyées dans du béton à 40°C et 60°C ;
- à 80°C, des réductions de la contrainte d'adhérence sont observées. Ces réductions ont un maximum de 9,64 % et 14,14 % respectivement pour les diamètres

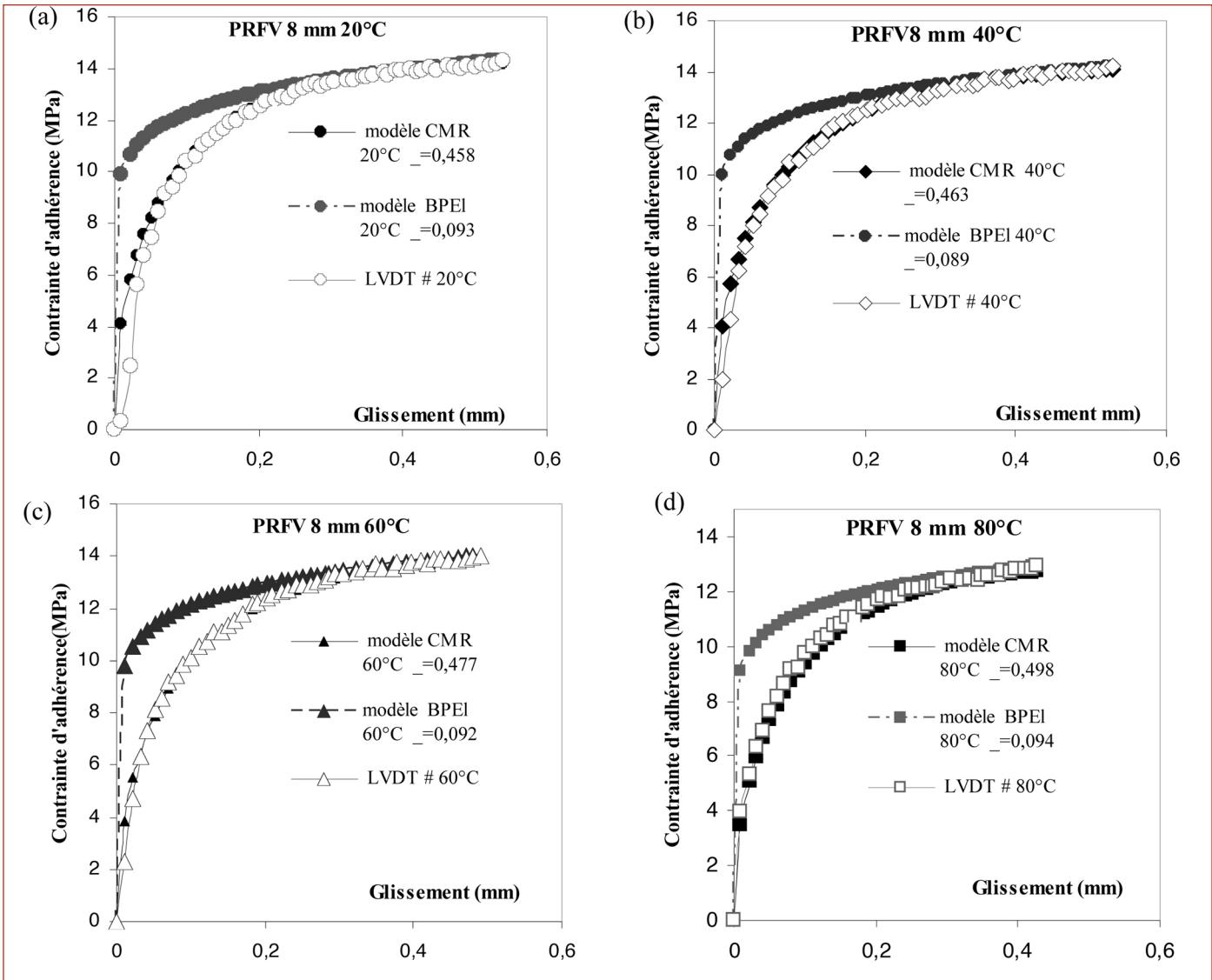


Figure 8: Courbes ascendantes PRFV 8 mm. (a) 20°C (b) 40°C (c) 60°C (d) 80°C.

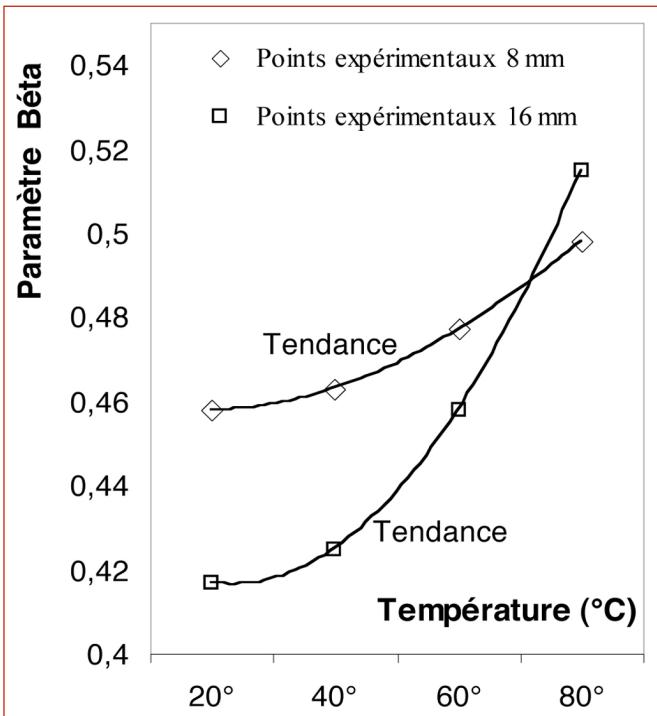


Figure 10: Variation du paramètre  $\beta$  en fonction de la température.

8 mm et 16 mm après 8 mois de conditionnement comparés aux résultats de référence à 20°C ;

- les réductions de la contrainte d'adhérence sont stables dans le temps entre 4 mois et 8 mois de conditionnement ;
- la contrainte d'adhérence moyenne minimale reste toujours supérieure à 12,94 MPa pour le diamètre 8 mm et 9,47 MPa pour les barres de 16 mm de diamètre pour une longueur d'ancrage 5Db après 8 mois de conditionnement dans un environnement sec sous température élevée ;
- la contrainte maximale d'adhérence diminue quand le diamètre augmente (effet du diamètre) ;
- le mode de rupture est toujours le cisaillement du béton ;
- pas de changement du coefficient  $\alpha$  relatif au modèle BPE, cependant pour le modèle CMR le coefficient  $\beta$  dépend de la variation de la température T ;
- la comparaison des deux modèles BPE et CMR montre que le modèle CMR représente mieux l'allure de la branche ascendante des courbes expérimentales dans le domaine  $0 \leq s \leq s_m$  pour toutes les éprouvettes testées.

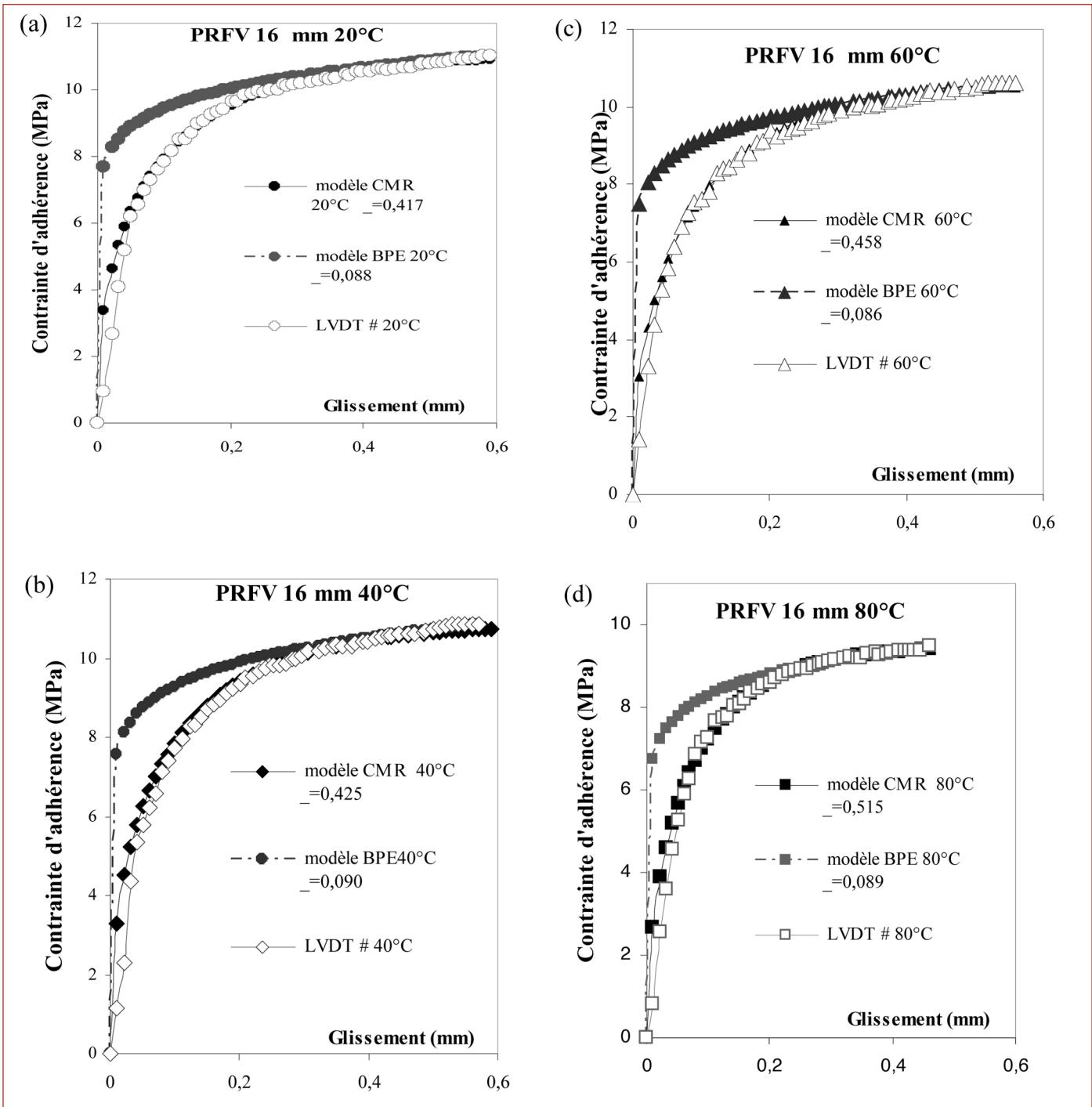


Figure 9: Courbes ascendantes PRFV 16 mm. (a) 20°C (b) 40°C (c) 60°C (d) 80°C.

Durée de conditionnement		Modèle	PRFV 8 mm				PRFV 16 mm			
			20°C		40°C		60°C		80°C	
			$\beta$	Sr (mm)	$\beta$	Sr (mm)	$\beta$	Sr (mm)	$\beta$	Sr (mm)
4 mois	CMR	$\beta$	0,458	0,463	0,476	0,496	0,416	0,425	0,456	0,512
		Sr (mm)	0,134	0,149	0,145	0,137	0,155	0,172	0,149	0,105
	BPE	$\alpha$	0,087	0,088	0,090	0,095	0,085	0,089	0,087	0,084
		$\beta$	0,458	0,463	0,477	0,498	0,417	0,425	0,458	0,515
	CMR	Sr (mm)	0,148	0,146	0,147	0,136	0,166	0,161	0,147	0,112
		$\alpha$	0,093	0,089	0,092	0,094	0,088	0,090	0,086	0,089
8 mois	CMR	$\beta$	0,458	0,463	0,476	0,496	0,416	0,425	0,456	0,512
		Sr (mm)	0,134	0,149	0,145	0,137	0,155	0,172	0,149	0,105
		$\alpha$	0,087	0,088	0,090	0,095	0,085	0,089	0,087	0,084
	BPE	$\beta$	0,458	0,463	0,477	0,498	0,417	0,425	0,458	0,515
		Sr (mm)	0,148	0,146	0,147	0,136	0,166	0,161	0,147	0,112
		$\alpha$	0,093	0,089	0,092	0,094	0,088	0,090	0,086	0,089

Tableau 5: Valeurs moyennes des paramètres relatifs aux modèles BPE et CMR.

## 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la compagnie Combar® (Schöck, Baden-Baden, Germany) pour avoir fourni les barres nécessaires pour cette recherche. Les auteurs sont responsables des opinions présentées dans cet article.

## 6. RÉFÉRENCES

- [1] **El-Salakawy E., Benmokrane B., Desgagné G.** (2003), "FRP Composite Bars for the Concrete Deck Slab of Wotton Bridge", Canad Jour of Civil Engin, Vol. 30, n° 5, p.861-870
- [2] **Huck Elbridge A. Jr, Eite I.A.K.** (2003). "Preliminary Performance Observations for FRP Reinforced Concrete Bridge Deck". Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, SP-215, S. Rizkalla and A. Nanni, eds., Amer Conc Instit, Farmington Hills, Mich, p. 121-138.
- [3] **Nanni A., Faza S.** (2002). "Designing and Constructing with FRP Bars: An Emerging Technology". Concr Intern ,Vol. 24, n° 11, p. 53-58.
- [4] **Stone D., Nanni A., Myers J.** (2001). "Field and Laboratory Performance of FRP Bridge Decks". Proceedings, CCC, FRP Compo Constr, J. Figueiras, L. Juv andes, and R. Furia, eds., Porto, Portugal, p. 701-706.
- [5] **Bradberry T.E.** (2001). Concrete Bridge Decks Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars". Transportation Research Record 1770, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., p. 94-104.
- [6] **GangaRao H.V.S., Thippeswamy H.K., Kumar S.V. and Franco J.M.** (1997). Design Construction and Monitoring of the First FRP Reinforced Concrete Bridge Deck in the United States". Proceedings of the Third International Symposium (FRPRCS-3) on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, Japan, Vol. 1, p. 647-656.
- [7] **Benmokrane B., Tighiouart B., Chaallal O.** (1996) Bond strength and load distribution of composites PRFV reinforcing bars in concrete. ACI Mater Journ., p. 246-253.
- [8] **Masmoudi R., Zaidi A., Girard P.** (2005). "Transverse Thermal Expansion of FRP Bars Embedded in Concrete". ACSE Journal of Comp for Const, Vol. 9 (5). p. 377-387.
- [9] **Katz A., Berman N., Bank L.** (1998). Effect of Cyclic Loading and Elevated Temperature on the Bond Properties of FRP Rebars. Proceeding of the 1<sup>st</sup> Int. Conference on the Durability of Composites for Construction CDCC98, Sherbrooke, Canada, Benmokrane B., Rahman (ed). p. 403-413.
- [10] **Katz A., Berman N., Bank L.C.** (1999). Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars. ASCE J of Comp for Const. 3 (2). 73-81.
- [11] **Katz A., Berman N.** (2000). Modelling the Effect of High Temperature on the Bond of FRP Rebars to Concrete. Cement and Conc Comp, 22 p. 433-443.
- [12] **Nanni A., Bakis C.E., Mathew J.A.** (1998). Acceleration of FRP bond degradation. Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Comp for Const. p. 45-53.
- [13] **Galati N., Nanni A., Dharani L.R., Focacci F., Aiello M.A.** (2006). "Thermal Effects on Bond between FRP Rebars and Concrete". Journ of Compo, Part A, 37. p. 30-36.
- [14] **Schock Bauteil GmbH Combar** (2006). Design Guideline for Concrete Structures Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer following the Requirements of DIN 1045-1and EC2 Issued Germany. 26 p.
- [15] **Aboutaha R.** (2004) Recommended Design for the PRFV Rebar Combar, Syracuse University, Department of Civil and Environmental Engineering, Technical report, sponsored by Schok Bauteile GmbH, USA.
- [16] **ACI Committee 440** (2004). "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete (ACI 440.3R-04)". American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 40 p.
- [17] **Eligehausen R., Bertero V., Popov E.P.** (1982). "Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitations". Report No. UCB/ ERC 82/23. Berkeley: EERC. University of California, CA., USA.
- [18] **Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R.** (1997). "Behaviour and Modelling of Bond of FRP Rebars to Conc. Journ of Comp for Constr. Vo1. 2, pp. 40-51.