

EFFETS DE LA TEMPÉRATURE À COURT TERME ET DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON SUR L'ADHÉRENCE DES BARRES EN POLYMÈRE RENFORCÉ DE FIBRES DE VERRE (PRFV)

Atef DAOUD*, Abdelmonem MASMOUDI*, Mongi BEN OUEZDOU*, Radhouane MASMOUDI**

*Laboratoire de Génie Civil (LGC), Ecole National d'ingénieurs de Tunis (ENIT),
BP 37, 1002 Tunis Belvédère, Tunisie

**Département de génie civil, Faculté de génie - Université de Sherbrooke,
2500, Bd de l'université de Sherbrooke (Québec), J1K 2R1 Canada.

1. INTRODUCTION

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans les pays à climat rigoureux (Canada, États-Unis, Japon etc.), notamment les Polymères Renforcés de Fibre de Verre (PRFV).

L'utilisation des polymères renforcés de fibres (PRF) dans le domaine du génie civil est en pleine expansion, de par leurs caractéristiques mécaniques élevées, leur faible poids et leur bonne durabilité. Initialement utilisés sous forme de plaques pour la réparation des ouvrages en béton armé, une nouvelle application devenue rapidement assez courante des composites de PRF en génie civil est celle des barres d'armature pour le béton armé. En effet, l'excellente résistance à la corrosion des polymères confère aux matériaux composites un avantage certain comparé aux barres d'armature traditionnelles en acier.

Toutefois, plusieurs questions persistent chez les utilisateurs potentiels de cette technologie novatrice de renforcement interne. En effet, en raison de leur composition basée sur des composites à base de fibres orientées longitudinalement et de résine de polymère, ces barres possèdent :

- un coefficient d'expansion thermique (CET) faible dans le sens longitudinal car contrôlé par les fibres et un CET important dans le sens radial (2 à 5 fois celui du béton) car contrôlé par la résine (Aboutaha, 2004).

- un risque de dégradation accru quand ils sont enrobés dans un béton relativement résistant.

Le comportement d'une structure en béton armé dépend des propriétés mécaniques du béton et des armatures ainsi que celle de l'interface entre les deux matériaux. En effet, les caractéristiques de la liaison entre les deux matériaux sont responsables du transfert des efforts entre le béton et les armatures. C'est l'adhérence qui conditionne l'espacement et l'ouverture des fissures dans les éléments tendus en béton armé.

Peu d'études scientifiques se sont tournées vers l'analyse et la prédiction des changements de propriétés mécaniques de l'interface entre le béton et les barres de PRF dans leur environnement d'application réelle, c'est-à-dire enrobées de bétons de résistances diverses. Les conditions environnementales tel que l'exposition à l'eau, à l'humidité ou la température peuvent influencer le comportement des PRF durant le temps de service des structures et ainsi affecter la durée de vie de ces dernières.

(Katz *et al.*, 2000) ont étudié l'effet de la température (de 20°C à 250°C) sur le comportement de la liaison PRF-béton. Différents traitements ont été appliqués sur ces barres pour augmenter leur rugosité. Les résultats montrent des réductions de la contrainte d'adhérence des barres PRF qui peuvent atteindre 80 à 90 % à 250°C (contre 30 à 40 % pour l'acier). Ils ont noté que cette réduction est beaucoup plus accentuée au-delà de la température de transition du

Type de barre	Diamètre nominal (mm)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance ultime (MPa)	Coefficient d'expansion thermique	Densité (g/cm³)
PRFV	8	60,0 ± 1.9	738 ± 22	0,6 × 10 ⁻⁵ (axial)	2,20
	16			2,2 × 10 ⁻⁵ (axial)	
Acier	8	200 ± 7	400 ± 11	1,0 × 10 ⁻⁵	7,85
	16				

Tableau 1: Propriétés des barres PRFV et acier.

polymère (Glass Transition Temperature T_g). Une perte significative de la rigidité de la liaison avec l'augmentation de la température a également été observée.

La différence entre les coefficients de dilatation thermique des barres PRFV et du béton dans le sens radial peut provoquer des microfissures du béton entourant la barre et donc être à l'origine de cette perte de résistance à l'arrachement des PRF (Zaidi *et al.*, 2007). Cette hypothèse a été vérifiée par une modélisation numérique d'une barre PRF enrobée de béton. Les auteurs ont montré que la taille de la zone dégradée augmente avec le gradient thermique.

D'autres études au nord de l'Amérique ont montré qu'il n'y a pas de dégradations significatives de la contrainte d'adhérence des barres PRFV noyées dans du béton et exposées à des températures de 20°C à 40°C (Masmoudi *et al.*, 2007). A 70°C, (Galati *et al.*, 2006) ont trouvé une légère réduction de l'adhérence en termes de force ultime mais un effet plus prononcé sur le glissement de la barre à cause de la dégradation de la résine.

Il est connu que la contrainte d'adhérence des barres d'acier est proportionnelle à la résistance à la compression du béton (ou à sa racine carrée), puisque ce sont les caractéristiques mécaniques du béton autour de la barre qui conditionnent la résistance de la liaison. Ceci peut ne plus être vrai pour les barres PRFV puisque l'adhérence n'est plus gouvernée par le béton seul mais aussi par la dégradation de la surface de la barre PRFV (Davalos *et al.*, 2008). Ce résultat a été confirmé par (Lee *et al.*, 2008). Ils ont en effet montré que la surface dégradée de la barre augmente avec la résistance du béton.

Cet article présente les résultats d'une campagne expérimentale sur l'effet de la température à court terme et de la résistance du béton sur les propriétés d'adhérence des barres PRFV. Le programme expérimental consiste à tester des éprouvettes cubiques en béton normal soumises à des températures (20°C, 40°C, 60°C et 80°C) pendant 24 h par l'intermédiaire de l'essai d'arrachement direct. L'effet de la résistance du béton est étudié pour trois formulations donnant des résistances de 30, 50 et 70 MPa.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Armatures utilisées

Deux types d'armatures sont utilisés dans cette étude pour la confection des éprouvettes d'essais d'arrachement : barres en PRFV et barres en acier à fin de comparaison. Les barres en PRFV «ComBAR®» sont fabriquées avec

des fibres combinées avec d'autres matériaux dans le but d'apporter des performances mécaniques, chimiques et physiques très élevées. Les propriétés des barres en PRFV «ComBAR®» utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau 1.

Des essais menés par l'institut MPA de l'université Syracuse et à Munich (Aboutaha, 2004) montrent que les barres PRFV type ComBAR® présentent une élasticité linéaire jusqu'au point de rupture. Aucune déformation plastique n'est observée. Le module d'élasticité mesuré est de 60 000 N/mm². Quant à la résistance à la traction mesurée, elle excède 1 000 N/mm², pour toutes les barres, quel que soit leur diamètre. Ces barres ont été usinées pour obtenir une série de nervures afin d'augmenter leur rugosité. Les barres en acier Tunsid 42 sont de nuance FeE 400 MPa. Deux diamètres nominaux de 8 et 16 mm sont utilisés dans cette étude (Figure 1).

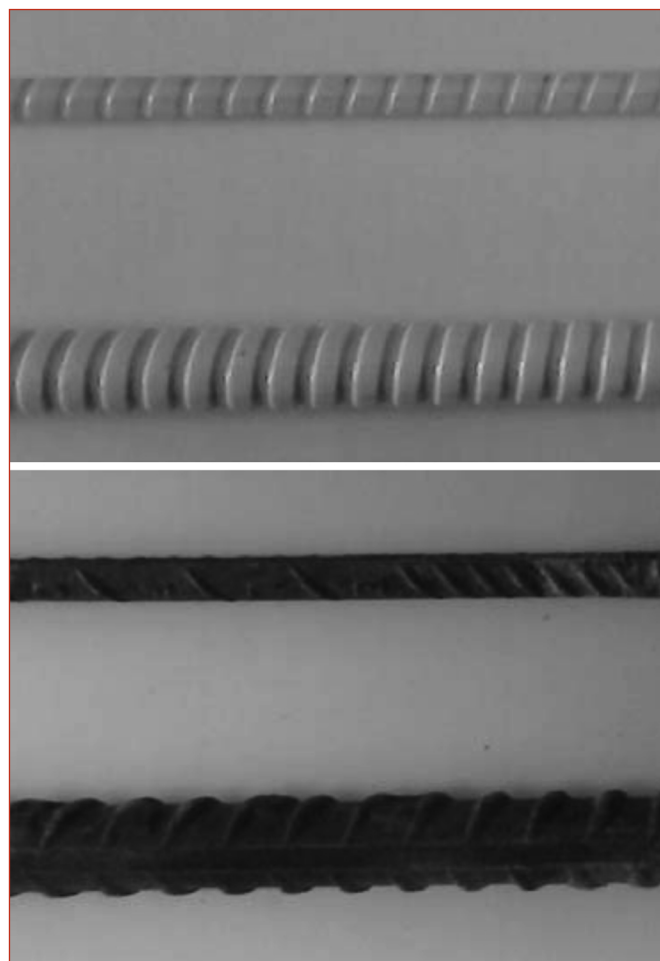


Figure 1: Barres PRFV et Acier de diamètre 8 et 16 mm.

2.2. Composition du béton

Les bétons ayant servi pour le coulage des éprouvettes d'essais sont composés d'un ciment Portland du type CEM I 42,5, avec des granulats de diamètre maximal 20 mm. Les éprouvettes de contrôle cylindriques en béton 160×320 mm sont coulées en deux couches et vibrées selon la norme en vigueur. Ces éprouvettes sont conservées dans une chambre humide jusqu'à l'âge de 28 jours, date des essais. La résistance à la compression des éprouvettes cylindriques est contrôlée le jour des essais d'arrachement (Tableau 3). Les caractéristiques des bétons sont présentées dans le Tableau 2.

2.3. Description des éprouvettes

Des barres PRFV de 500 mm de longueur sont ancrées verticalement dans des cubes en béton de 150×150 mm pour les diamètres de 8 mm et $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ pour les diamètres de 16 mm. Cette différence dans les dimensions des éprouvettes est justifiée pour éviter le mode de rupture dans le béton. Toutes les éprouvettes sont confectionnées selon les spécifications du Guide des essais et méthodes (ACI 440.3R, 2004). La longueur d'ancrage des barres

	U	B30	B50	B70
Affaissement	(cm)	9	5	4
f_{c7} jours	(MPa)	21	32	51,3
f_{c14} jours	(MPa)	25	44	62,8
f_{c28} jours	(MPa)	31	51,7	70,4
Densité	g/cm ³	2,41	2,44	2,53

Tableau 3. Résultats des essais de compression des bétons utilisés.

envisagée pour toutes les éprouvettes d'essais est de $5D_b$, D_b étant le diamètre de la barre en PRFV.

Les moules spécifiques à l'essai d'arrachement permettent de fixer une barre d'armature PRFV de longueur 500 mm lors du coulage du béton. La barre à tester doit être perpendiculaire à la face normale des éprouvettes. Pour assurer cette verticalité, nous avons adopté le système décrit par le guide ACI 440.3R-04 représenté en Figure 2.

Une gaine en PVC sera mise en place avant le coulage du béton. Cette gaine permet de limiter la longueur d'ancrage à $5 D_b$ (Figure 3).

Cent éprouvettes d'arrachement ont été confectionnées :

- Une 1^{re} série d'éprouvettes avec un béton B30, conditionnées dans une enceinte climatique pour une durée

Constituants		Unités	Dosages pour 1 m ³
B30	Ciment CEM I 42,5	kg	300
	Sable lavé	kg	857
	Gravier 4/12	kg	296
	Gravier 12/20	kg	691
	Eau	litre	204
	Adjuvant	kg	0
	E/C=0,68		
B50	Ciment CEM I 42,5	kg	400
	Sable lavé	kg	706
	Gravier 4/12	kg	177
	Gravier 12/20	kg	940
	Eau	litre	164
	Adjuvant : super plastifiant Tempo 10	kg	6
	Fumée de silice (Sika crête HD)	kg	30
	E/C=0,41		
B70	Ciment CEM I 42,5	kg	420
	Sable lavé	kg	726
	Gravier 4/12	kg	871
	Eau	litre	138
	Adjuvant : super plastifiant Tempo 10	kg	6,3
	Fumée de silice (Sika crête HD)	kg	30
	E/C=0,32		

Tableau 2: Composition des bétons utilisés.

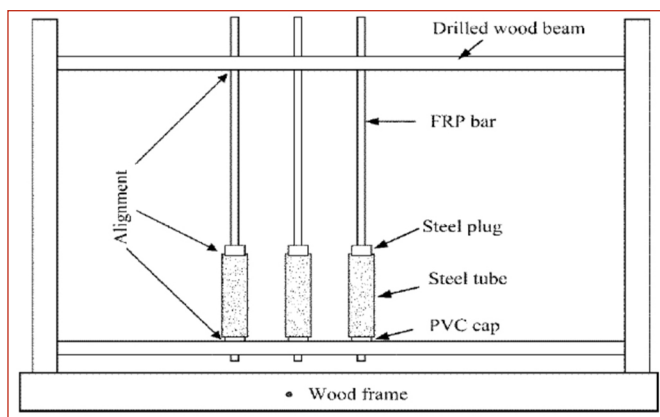


Figure 2: Système d'alignement des barres (Photo guide ACI 440).

de 24 heures sous différentes températures (40°C, 60°C et 80°C) Figure (4a).

- Une 2^e série d'éprouvette avec des bétons B30, B50 et B70 à la température ambiante.

Cinq éprouvettes identiques sont coulées pour chaque diamètre, pour chaque température et pour chaque résistance. Pour contrôler la distribution de la température le long de l'interface barre PRFV/béton, des éprouvettes supplémentaires sont confectionnées dans lesquelles des thermocouples sont placés dans une position médiane de la longueur ancrée de la barre au niveau de l'interface béton/barre PRFV Figure (4b).

La courbe de la figure 5 montre que la température se stabilise à l'interface à la température désirée au bout de 10h.

2.4. Procédure des essais

Tous les essais d'arrachement sont réalisés sur une machine de traction commandée en déplacement type JJ Loyd 50 KN. L'acquisition automatique 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 avec une précision de 0.001mm est utilisé pour la mesure des déplacements du côté non chargé de la barre (Figure 6).



Figure 4: (a) Conditionnement dans l'enceinte climatique (b) Thermocouples.

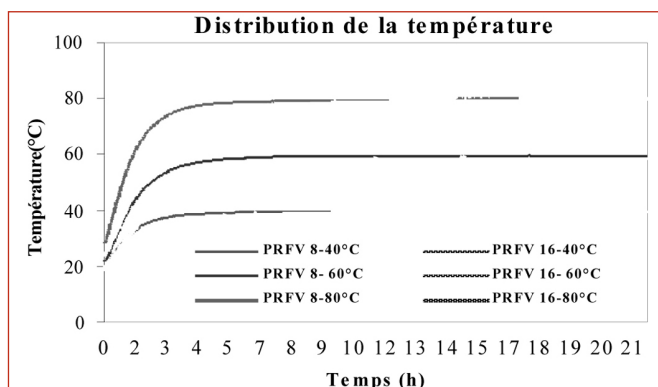


Figure 5: Distribution de la température le long de la longueur d'ancrage dans l'interface barre/béton.

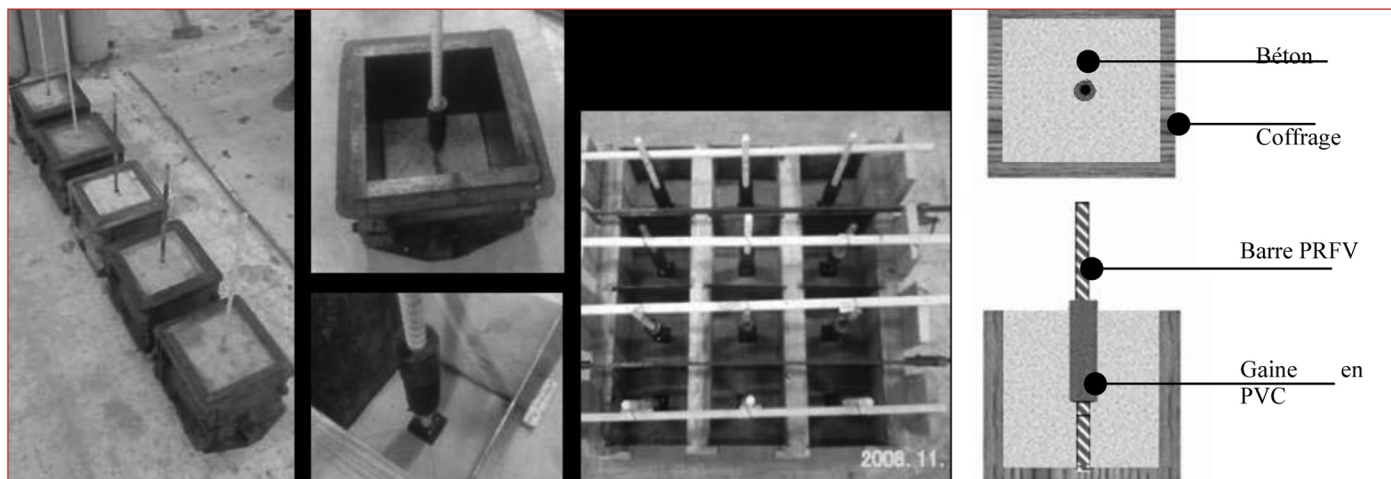


Figure 3: Coffrage des moules cubiques 150 et 180 mm.

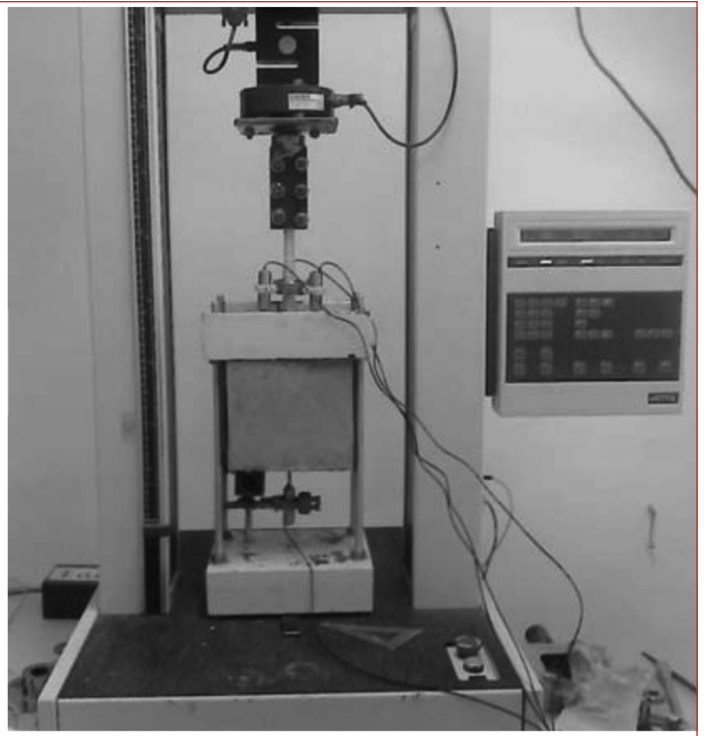
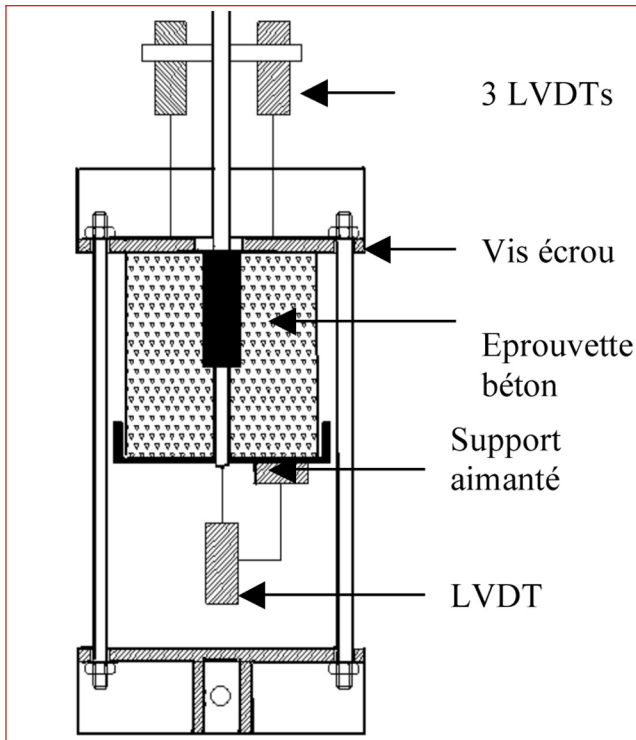


Figure 6: Dispositif pour l'essai d'arrachement.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Courbe Force-Glisement (F-g)

La figure 7 donne, à titre d'exemple, les variations de la force d'arrachement en fonction du glissement pour l'acier et le PRFV à 20°C.

L'allure des courbes F-g est similaire pour l'acier et le PRFV. Les deux courbes présentent une première phase caractérisée par une rigidité importante (accroissement rapide de la charge pour des petites valeurs de glissement de la barre) et une deuxième phase où la force d'arrachement décroît considérablement pour un glissement important traduisant la rupture de la liaison. Ces deux phases sont séparées par un palier, plus étendu pour l'acier, donnant la force maximale d'arrachement. La rupture de la liaison est brutale pour les barres d'acier alors qu'elle est relativement douce pour les barres PRFV. Ceci est dû essentiellement à la géométrie des verrous de ces barres, plus proche des barres lisses que des barres à haute adhérence.

La figure 8 donne les variations de la force d'arrachement en fonction du glissement pour les barres PRFV (a) et Acier (b) pour le diamètre 8mm à différentes températures.

3.2. Modes de rupture

Deux modes de rupture (figure 9) ont été observés lors des essais d'arrachement :

- Cisaillement du béton à l'interface (a) : dans le cas du B30 pour l'acier et le PRFV et indépendamment de la température
- Cisaillement du béton avec dégradation partielle de la barre PRFV dans le cas du béton B50 (b)

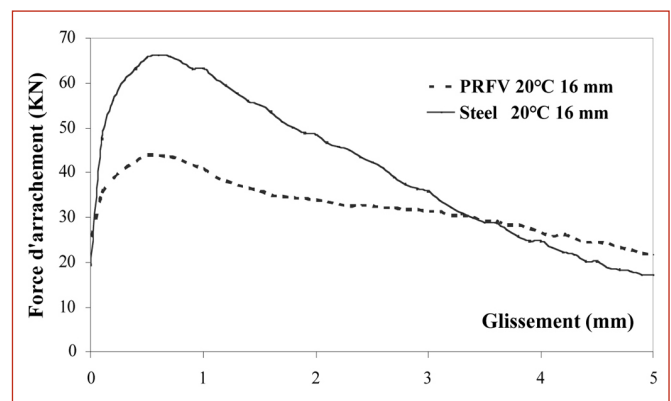


Figure 7: Variation de l'effort d'arrachement en fonction du glissement pour les barres d'acier et PRFV à la température ambiante (20°C).

- Cisaillement des verrous des barres PRFV dans le cas du béton B70 (c)

3.3. Contrainte d'adhérence maximale

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

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

Avec F_{\max} la force maximale provoquant l'arrachement de la barre, D_b le diamètre nominal de la barre testée, et $L_{e,b}$ la longueur d'enrobage de la barre PRFV.

Les tableaux 4 et 5 récapitulent respectivement les valeurs des contraintes d'adhérence moyennes en fonction de la température pour les barres d'acier et de PRFV et en fonction de la résistance du béton pour les barres PRFV.

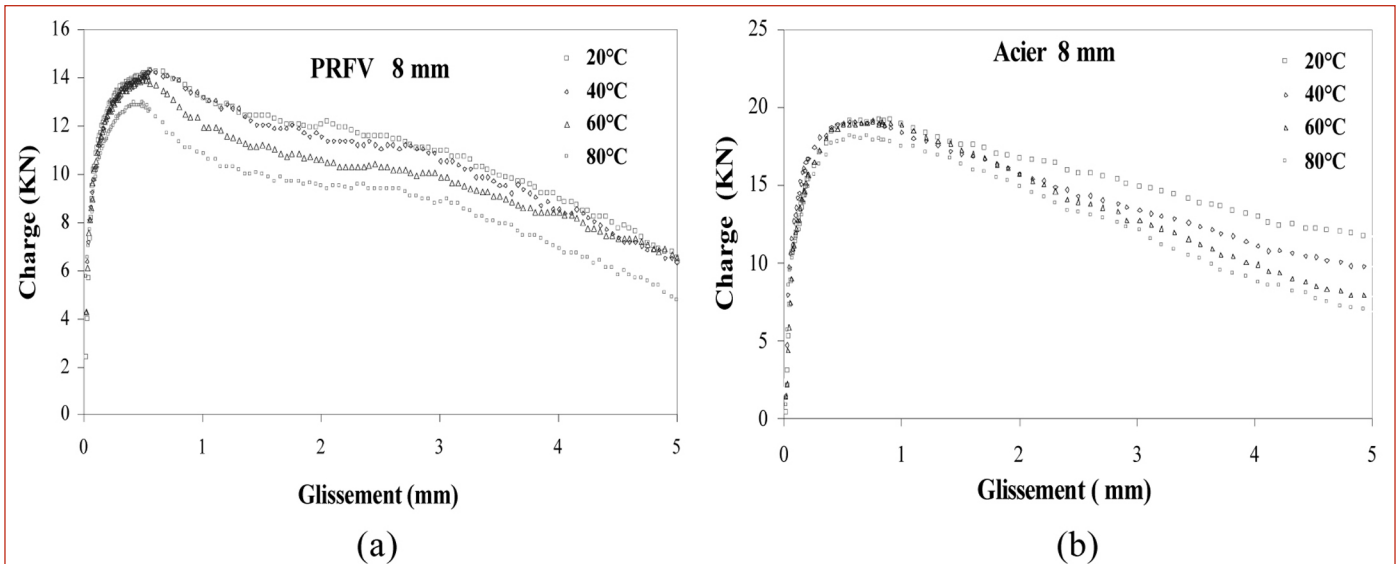


Figure 8: Évolution de la force en fonction du glissement de la barre pour différentes températures : PRFV (a) et Acier (b) (8mm).

Température	Contraintes moyennes* (MPa)			
	8 mm (PRFV)	16 mm (PRFV)	8 mm (acier)	16 mm (acier)
20°C	14,46 ± 0,18	11,20 ± 1,95	19,13 ± 1,98	16,46 ± 0,68
40°C	14,29 ± 0,53	10,80 ± 1,42	19,08 ± 2,00	16,25 ± 2,21
60°C	14,15 ± 1,40	10,67 ± 1,76	18,97 ± 3,06	16,17 ± 3,01
80°C	13,28 ± 2,04	9,52 ± 1,99	18,08 ± 1,14	14,90 ± 3,28

* Basée sur la moyenne de cinq essais.

Tableau 4: Effet de la température sur la contrainte d'adhérence moyenne des barres PRFV et acier (B30).

Béton	Contraintes moyennes (MPa)	
	8 mm (PRFV)	16 mm (PRFV)
B30	14,46 ± 0,18	11,20 ± 1,95
B40	26,45 ± 1,14	25,54 ± 2,68
B70*	27,75 ± 2,15	26,30 ± 0,29

* Correspondant à un cisaillement des verrous de la barre.

Tableau 5: Effet de la résistance du béton sur la contrainte d'adhérence moyenne des barres PRFV (à 20°C) .

3.3.1. Comparaison acier-PRFV

Les contraintes d'adhérence des barres PRFV sont en moyenne de l'ordre de 70 % de celles des barres d'acier à haute adhérence à 20°C. Ceci est conforme aux différents résultats disponibles dans la littérature pour des barres PRF à géométries différentes (entre 40 % et 100 %) (Bank *et al.*, 1998). Pour les barres PRF lisses sans traitement de surface, elles sont de l'ordre de 10 à 20 % d'après les mêmes auteurs.

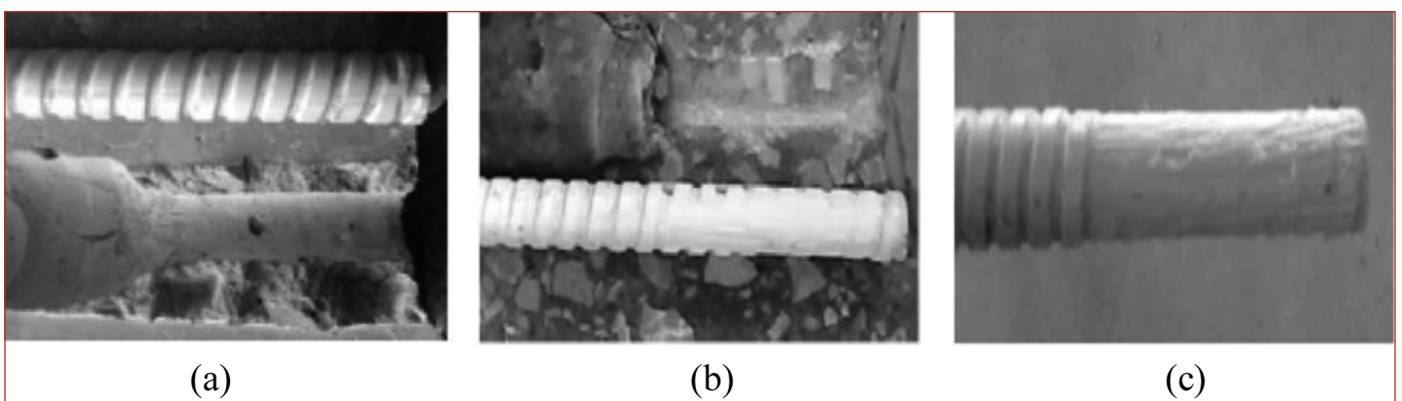


Figure 9 : Mode de rupture à l'interface barre-béton.

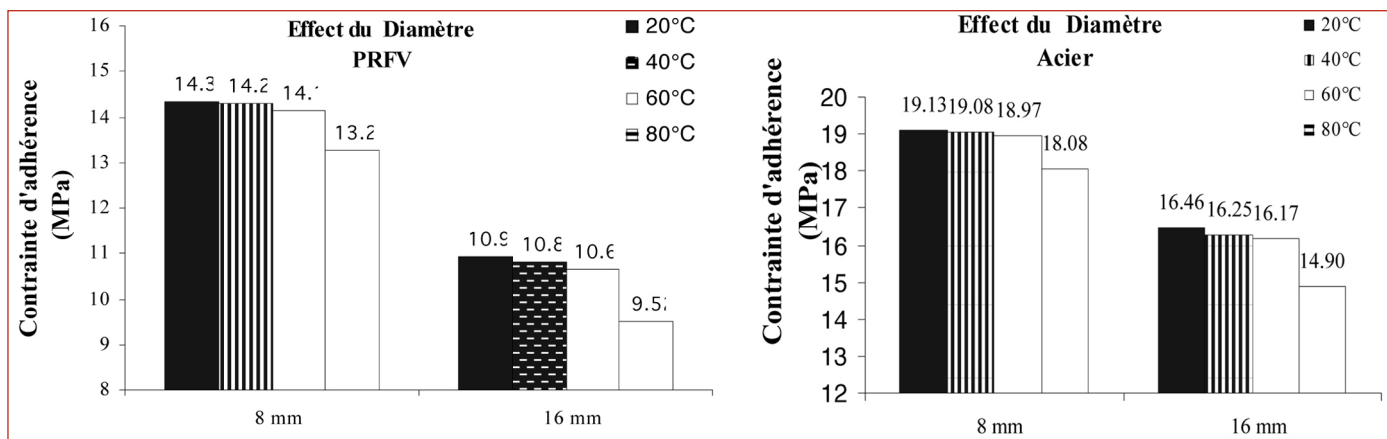


Figure 10 : Contrainte d'adhérence moyenne en fonction de la température et du diamètre pour les barres PRFV et acier.

3.3.2. Influence de la température

L'histogramme de la figure 10 donne les variations de la contrainte d'adhérence moyenne en fonction de la température et du diamètre pour les barres PRFV et pour l'acier. Nous pouvons déduire que pour des températures jusqu'à 60°C, les contraintes d'adhérence moyennes ne montrent pas de réduction significative pour les barres PRFV et acier.

Pour une température atteignant 80°C, les réductions sont 8,2 % et 15,0 % pour les barres PRFV, respectivement, de diamètre 8 mm et 16 mm comparé aux résultats de référence à 20°C.

Cette réduction pour l'acier est évaluée pour une température de 80°C à 5,49 % ; 9,46 %, respectivement pour les barres 8 mm et 16 mm.

Les caractéristiques mécaniques du béton n'étant pas affectées à ces niveaux de température, ce résultat s'explique par une expansion thermique dans le sens radial plus important pour les barres PRFV conduisant à une dégradation plus prononcée du béton autour de la barre.

La contrainte d'adhérence développée par les barres PRFV est affectée par le diamètre. La contrainte maximale d'adhérence diminue quand la le diamètre augmente (effet du diamètre) Cette conclusion est confirmée aussi par (Boyle *et al.*, 1994) (Nanni *et al.*, 1995a) (Tighiouart and Benmokrane, 1998).

3.3.3. Influence de la résistance du béton

L'histogramme de la figure 11 montre les variations de la contrainte moyenne d'adhérence pour les barres PRFV en fonction de la classe du béton.

Nous pouvons conclure que la contrainte d'adhérence moyenne augmente avec la résistance du béton (entre B30 et B50). Ce résultat est conforme à ce que l'on connaît pour l'acier (Lorrain *et al.*, 1997).

Cependant, la contrainte d'adhérence moyenne reste pratiquement constante au-delà de 50MPa puisque la rupture s'est produite dans la barre et la contrainte d'adhérence calculée correspond à la contrainte de cisaillement des verrous de la barre PRFV.

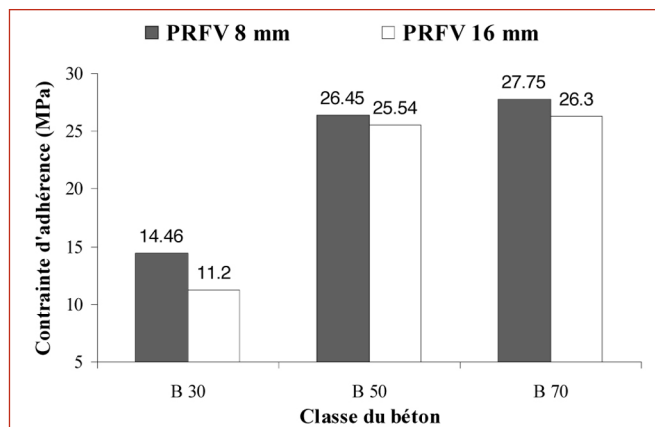


Figure 11 : Contrainte d'adhérence moyenne en fonction de la résistance du béton.

4. CONCLUSIONS

L'influence de la température à court terme et de la résistance du béton sur l'adhérence entre barres PRFV et béton ont été étudiés expérimentalement. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le comportement à l'arrachement des barres PRFV utilisées est similaire à celui des barres en acier ; c'est ce qu'attestent les courbes force-glissement.
- À la température ambiante, la résistance à l'arrachement des barres PRFV est de l'ordre de 70 % de celle de l'acier.
- On note peu de réductions significatives de la contrainte d'adhérence pour les barres de PRFV et d'acier pour des températures appliquées à court terme jusqu'à 60°C.
- À 80°C, les réductions, plus significatives, sont de 8,2 % et 15,0 % pour les barres PRFV, respectivement, pour les diamètres 8 mm et 16 mm comparées aux résultats de référence à 20°C.
- La réduction de la contrainte d'adhérence pour l'acier pour une température de 80°C est seulement de 5,49 % et 9,46 %, respectivement, pour les barres 8 mm et 16 mm
- La contrainte d'adhérence moyenne des barres PRFV utilisées augmente avec l'augmentation de la résistance du béton.

- Le mode de rupture à l'interface barre-béton varie avec la classe du béton : pour le B30 la rupture s'est produite par cisaillement du béton, pour le B50 par cisaillement du béton avec endommagement partiel de la barre, pour le B70 le mode de rupture est un cisaillement des verrous de la barre.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Aboutaha R.** (2004). Recommended Design for the GFRP Rebar Combar, Syracuse University, USA.
- [2] **ACI 440.3R.** (2004). Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures.
- [3] **Boyle H.C., and Karbhari V.M.** (1994). "Investigation of bond behaviour between glass fiber composite reinforcements and concrete". Polymer-Plastics Technology and Engineering, vol. 33, n° 6, p. 733-753.
- [4] **Galati N., Nanni A., Dharani L.R., Focacci F., Aiello M.A.** (2006). "Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete" Composites, Part A, vol. 37, p. 1223-30.
- [5] **Katz A. and Berman N.** (2000). "Modelling the effect of high temperature on the bond of FRP rebars to concrete" Cement and Concrete Composites, vol. 22, p. 433-443.
- [6] **Masmoudi, R., Alvarez, A.** (2007). "Pullout Bond Behaviour of FRP bars embedded in concrete under different temperatures". Actes du colloque SOMA-PRO, Hammamet, Tunisia, p. 369-379.
- [7] **Nanni A., Al-Zaharani M.M., Al Dulaijan S.U. and Bakis C.E.** (1995a). "Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete structures", Edited by L. Tarwe Published in 1995 by E and FN Spon.
- [8] **Schock Bauteil GmbH Combar,** (2006). Design guideline for concrete structures reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer following the requirements of DIN 1045-1 and EC2 Issued Germany.
- [9] **Tighiouart B., Benmokrane B. and Gao D.** (1998). "Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars", Construction and Building Materials, vol. 12, n° 8, p. 453-462.
- [10] **Zaidi A., Masmoudi R.** (2007). "Numerical analysis of the transverse thermal behaviour of FRP bars embedded in concrete" (CDCC-07) (Québec) Canada p. 303-310.
- [11] **Davalos J.F., Chen Y., et Ray I.** (2008). "Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete", Cement and Concrete Composites 30, p. 722-730.
- [12] **Lee J.Y., Kim T.Y., Kim T.J., Yi C.K., Park J.S., You Y.C., Park Y.H.** (2008). "Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete", Composites Part B 39, p. 258-270.
- [13] **Bank L.C., Puterman M., Katz A.** (1998). "The effect of material degradation on bond properties of fiber reinforced plastic reinforcing bars in concrete", ACI Materials Journal. 95(3), p. 232-243.
- [14] **Lorrain M., Maurel O., Hamouine A.** (1997). « Résistance à l'arrachement d'armatures à hautes adhérence de haute nuance ancrées dans du béton de hautes performances », Annales du BTP, n° 5, novembre 1997.