

RÉSISTANCE À L'EAU DE MER DES STRUCTURES EN BÉTON RENFORCÉES PAR DES BARRES EN COMPOSITES

Imen JMAL¹, Abdelmonem MASMOUDI^{1,2}, André WEBER³

¹ Université de Sfax, Laboratoire de Chimie Industrielle, Département de génie matériaux,
École Nationale d'ingénieurs de Sfax (ENIS), Rte Soukra km 4 – 3038 Sfax, jmal.imen@yahoo.fr

² Université de Tunis, El Manar Laboratoire LGC, Département de génie civil, École Nationale d'ingénieurs de Tunis
(ENIT), BP 37, 1002 Tunis-Belvédère, abdelmonem.masmoudi@gmail.com

³ Centre de Recherche de la Compagnie Baden, (CRCB), Bauteile GmbH AG Neumattstrasse 30, 5000 Aarau
andre.weber@schock.de

CONTEXTE INDUSTRIEL DE LA RECHERCHE

Cette recherche a pour but de comprendre le comportement face à l'eau de mer de structures en béton renforcées de PRFV afin de rassurer les entreprises de génie civil amenées à employer ce type de barres. L'étude s'articule autour d'un programme de collaboration entre le laboratoire de Génie Civil (LGC) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et le Centre de Recherche de la Compagnie Baden en Allemagne (CRCB). Cette recherche s'intéresse à l'application et l'amélioration des matériaux composites

dans le domaine du BTP et surtout dans les ouvrages maritimes exposés à un degré d'agressivité élevé. Cette étude devrait contribuer à développer l'usage des barres en composite du fait de leur bonne durabilité dans les milieux marin.

1. INTRODUCTION

L'industrie de la construction a été historiquement dominée par quatre matériaux traditionnels: la pierre, le bois, le béton et l'acier. Il y a quelques centaines d'années, la

Pierre et le bois étaient les principaux matériaux utilisés pour la construction des structures. Actuellement, l'acier et le béton armé sont devenus les principaux matériaux de construction et la plupart des paysages urbains modernes sont maintenant définis en grande partie par ces deux matériaux.

L'acier et le béton, ont bien servi la communauté du Génie Civil. [1]

Cependant, certaines structures exposées à des milieux agressifs, souffrent de la corrosion des armatures de renforcement en acier. Et c'est cette corrosion de l'acier qui a mené dans la majorité des cas à la détérioration des structures en Génie Civil. Dans le but de ralentir et/ou empêcher la détérioration des infrastructures, les ingénieurs recherchent de nouveaux matériaux qui peuvent être employés afin de prolonger la vie en service des structures existantes, tout en permettant la conception et la construction de nouvelles structures plus durables.

Les polymères renforcés de fibres (PRF), sont une classe relativement nouvelle de matériaux résistants à la corrosion. Ils sont de hautes résistances mécaniques, légères, et de plus en plus considérés au cours des vingt dernières années comme des matériaux pratiques pour des usages structuraux.

Les PRF sont utilisés dans les industries automobiles et aérospatiales depuis plus de cinquante ans, dans des usages où leur haute résistance et leur légèreté peuvent être employées avantageusement. M.P.ISIS Canada N°2. Depuis le début des années 90, l'intérêt pour l'utilisation des matériaux en PRF dans les structures a grandement augmenté. Il y a actuellement, des centaines de structures en service incorporant des PRF à travers le monde.

Le béton armé ne fonctionne que s'il existe une adhérence entre l'armature et le béton. C'est l'adhérence qui conditionne le comportement en service d'une structure en béton armé. En effet, la durabilité d'un ouvrage en béton armé est tributaire son état de fissuration, surtout pour les structures situées dans un environnement agressif. [2]

Il existe sur le marché plusieurs types de barres en PRF selon le fabricant, les fibres et les matrices utilisés. D'après les données actuelles, la pénétration de l'humidité dans les barres en PRF se produit généralement par capillarité dans la matrice à proximité des fibres. Par la suite, ces molécules d'eau dégradent les propriétés de la matrice tout en endommageant également la surface des fibres. [3]

De nombreuses études ont montré que jusqu'à 60°C la température n'a pas d'influence significative sur l'adhérence PRFV/béton [4-6]. Par contre, il y a manque des données fiables sur la durabilité des structures renforcées par des PRF dans des milieux agressifs et en particulier dans l'eau de mer. L'eau de mer a-t-elle une influence sur la dégradation de l'adhérence entre le béton et l'armature en PRF ?

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et quantifier à long terme par des essais d'arrachement direct l'effet de l'eau de mer sur la dégradation de la contrainte d'adhérence de barres en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV) noyées dans un béton et placées dans un environnement saturé en eau de mer. Les résultats des essais montrent que l'adhérence entre le béton et les barres en PRFV

comparé avec celles en acier, n'est pas affectée par l'eau de mer à température ambiante.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Composition du béton

Le ciment utilisé pour la composition des bétons est le CEM I 42.5 HRS, ciment de très bonne qualité, couramment utilisé dans les constructions d'ouvrages d'art, de densité 3.07 et de surface spécifique Blaine 4200 g/cm³. Le tableau 1 donne la composition de béton utilisée:

Éléments	Unités	Dosages pour 1m ³
Ciment HRS 42.5	Kg	300
Sable lavé	Kg	857
Gravier 4/12	Kg	296
Gravier 12/20	Kg	691
Eau	Litre	204
Adjuvant plastifiant réducteur d'eau	Kg	3

Tableau 1 : Composition de béton utilisé

2.2. Barres PRFV Combar

Les barres en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV) utilisées dans la présente étude sont fournies par la compagnie Schok Combar®. [7-8]. Le module d'élasticité des barres est de 60 000 N/mm². Quant à la résistance à la traction, elle excède 1000 N/mm², pour toutes les barres, quel que soit leur diamètre. Trois diamètres sont testés : 8, 12 et 16 mm.

2.3. Barres acier Tunisid

Les barres en acier utilisées dans l'étude sont des TUNISID 42.

Trois diamètres sont testés à fin de comparaison : 8, 12 et 16 mm. Figure 1. Le tableau 2 récapitule les propriétés des barres en PRFV et en acier utilisées dans l'étude.

2.4. Immersion des barres dans l'eau de mer

Avant le coulage, les armatures en PRFV de longueur 40 cm sont émergées dans l'eau de mer (PH=7,3) pendant 30 jours, dans un bassin à température ambiante. Figure 2. Des essais d'immersion dans l'eau douce n'ont pas montré de dégradation.

Type de barre	Diamètre nominal (mm)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance ultime (MPa)	Coefficient d'expansion thermique	Densité
PRFV	8	60.0 ±1.9	738 ± 22	0.6 x 10 ⁻⁵ (axial)	2.20
	12			2.2 x 10 ⁻⁵ (radial)	
	16				
Acier	8	200 ± 7	400 ± 11	1.00 x 10 ⁻⁵	7.85
	12				
	16				

Tableau 2 : Propriétés des barres en PRFV et en acier

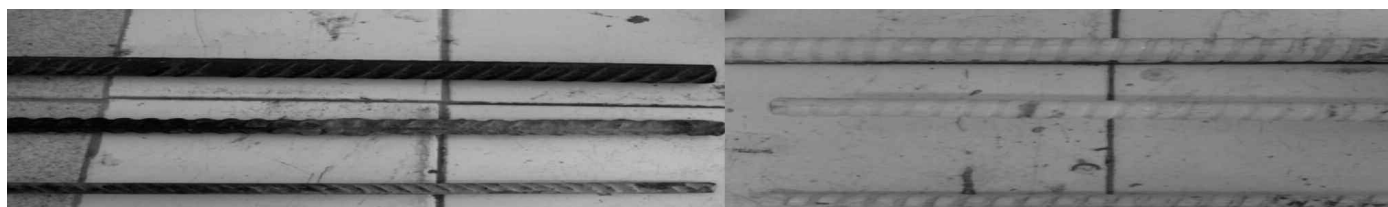


Figure 1 : Barres en acier et PRFV



Figure 2 : Immersion des barres dans l'eau de mer

2.5. Préparation des éprouvettes et coulage du béton

Toutes les éprouvettes ont été confectionnées selon les spécifications du Guide des essais et méthodes ACI 440.3R [9]. La longueur d'ancrage des barres envisagée pour toutes les éprouvettes d'essais est de $5D_b$, où D_b est le diamètre de la barre. Figure 3

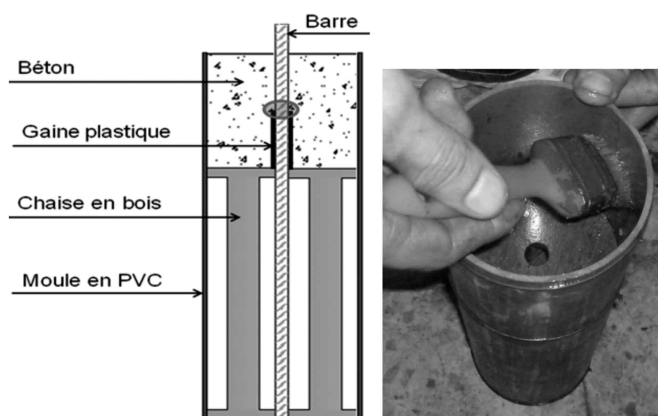


Figure 3 : Préparation des éprouvettes

2.6. Matériel utilisé

Une machine de traction de capacité 30 tonnes commandée en force est utilisée dans cette étude. Le dispositif d'attache qui se monte sur la machine de traction et qui assure la transmission de la charge aux barres est présenté Figure 4. La mesure des déplacements du coté chargé de la barre est assuré par un capteur LVDT Figure 5.

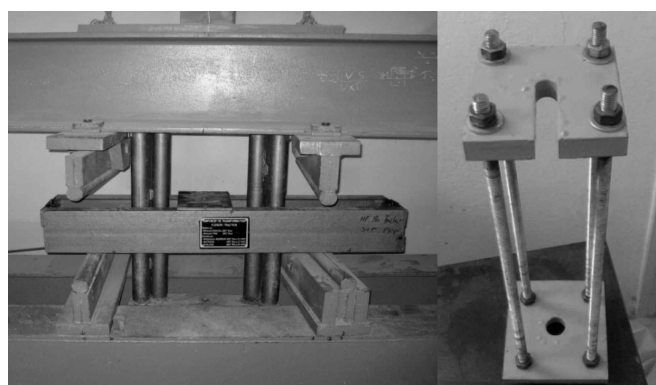


Figure 4 : Machine de traction

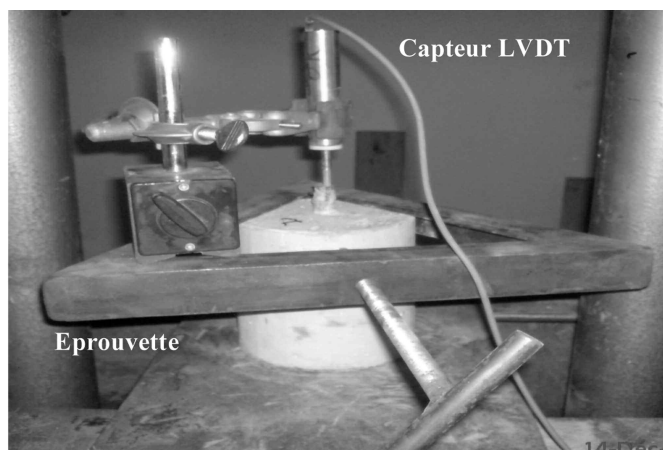


Figure 5 : Mesure du glissement du coté chargé

La mesure des caractéristiques du béton, a été effectuée par des essais de compression et de fendage à 28 jours Figure 6.



3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Essai de compression - traction par fendage (effet de l'eau de mer sur le béton seul)

Pour avoir les caractéristiques du béton dans l'eau de mer, nous avons effectué l'essai de compression et l'essai de traction par fendage sur des éprouvettes de référence cylindriques 16 x 32 conservées soit à l'air libre soit dans l'eau de mer tableau 3.

À travers ces résultats nous remarquons que la résistance du béton conservé à l'air libre est légèrement supérieure à celle dans l'eau de mer. La conservation dans l'eau de mer diminue la résistance du béton d'environ 10 %.

Nous pouvons constater que l'eau de mer a un effet agressif sur le béton.



Figure 6 : Essais de compression et traction par fendage

	résistance à la compression			résistance à la traction		
	masse Kg	charge KN	résistance MPa	masse Kg	charge KN	résistance MPa
essai 1	15,50	662,00	33,10	15,55	177,50	2,21
essai 2	15,45	653,20	32,66	15,50	201,80	2,51
essai 3	15,50	652,00	32,60	15,45	197,50	2,46
essai 4	15,50	626,50	31,33	15,40	236,60	2,94
essai 5	15,50	668,30	33,42	15,45	201,60	2,51
essai 6	15,50	697,20	34,86	15,45	201,60	2,51
Moyenne	15,49		32,99	15,47		2,52

Tableau 3 : Propriétés du béton

3.2. Variation de la masse

Nous constatons que la masse de la barre en PRFV augmente légèrement après immersion dans l'eau de mer alors que celle en acier diminue de façon plus importante Figure 7. L'augmentation de la masse dans les barres PRFV est due à l'absorption d'eau par les fibres parallèles à l'axe de la barre. La diminution de la masse des barres d'acier est due au phénomène d'oxydation.

Nous constatons ainsi que l'utilisation des barres PRFV comme renforcement du béton armé immergé dans l'eau de mer devrait permettre de réduire le problème de corrosion.

3.3. Essais d'arrachement : (effet de l'eau de mer sur l'interface béton/barre)

Dans le cadre de l'étude de l'interface béton/acier et béton/PRFV dans les deux milieux de conditionnement différents, nous avons effectué l'essai d'arrachement des barres PRFV et des barres en acier de diamètre 8, 12 et 16 mm conservées à l'air libre et dans l'eau de mer sur 36 éprouvettes de diamètre 8, 12 et 16 cm en béton (B30).

3.4. Exploitation des résultats expérimentaux

3.4.1. Comparaison des barres en PRFV et en acier (conservées à l'air libre)

Nous pouvons constater que les forces d'arrachement des barres en PRFV à l'air libre sont inférieures à celles des

barres en acier. Nous exprimons cette diminution en pourcentage en fonction du diamètre :

– Diamètre 16 mm $F_{PRFV} = 93,3\% F_{acier}$

– Diamètre 12 mm $F_{PRFV} = 76,2\% F_{acier}$

– Diamètre 8 mm $F_{PRFV} = 83,5\% F_{acier}$

$F_{PRFV} \text{ moyenne} = 84,33\% F_{acier}$

Cette valeur est plus optimiste que les valeurs trouvées dans la littérature (71%). Ceci montre que les barres Combar® Shöck possèdent des résistances à l'adhérence meilleures que les barres produites en Amérique du nord (Canada).

On peut constater que dans le cas de la conservation à l'air libre, les barres en acier résistent mieux à l'adhérence que les barres en PRFV. La géométrie des verrous des barres en acier offre en effet une butée plus importante que celle des barres en PRFV (plus de contact avec le béton), ce qui explique cette différence.

3.4.2. Comparaison des barres en PRFV et en acier (conditionnées dans l'eau de mer)

Les valeurs des contraintes d'adhérence sont récapitulées dans le tableau 4. Ces valeurs sont calculées en utilisant l'expression.

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot D_b \cdot L_{e,b}}$$

avec :

F la force maximale (N) enregistrée à la rupture pendant l'essai d'arrachement,

D_b le diamètre de la barre nominal (mm),

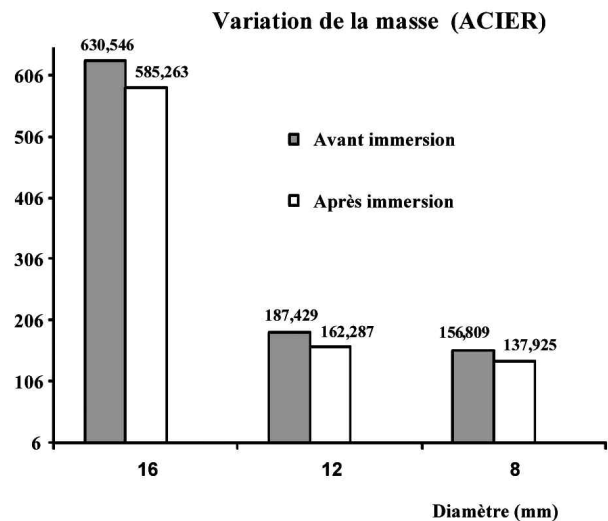
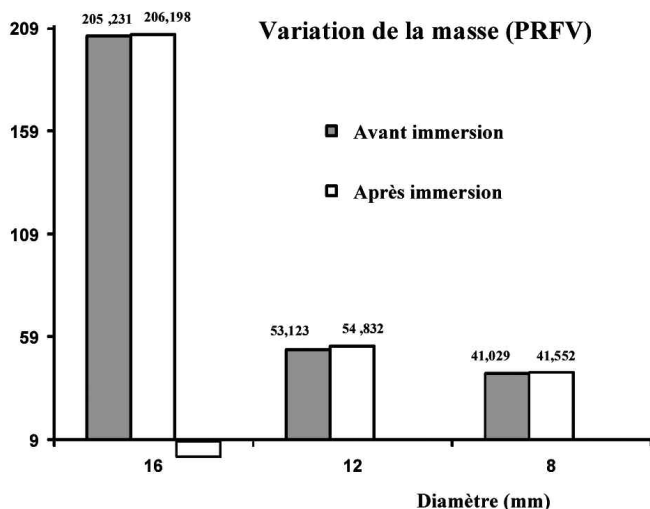


Figure 7 : Variation des masses des barres PRFV et acier

Température	Contraintes d'adhérences* (MPa)			
	Avant immersion		Après immersion	
	PRFV	Acier	PRFV	Acier
16 mm	10,96 ± 0,68	11,74±1,19	10,68±0,27	7,45±1,00
12 mm	12,35 ± 2,10	16,21±1,20	12,05±0,48	10,09± 0,67
8 mm	15,29 ± 1,13	18,68±0,41	15,12±0,43	12,28± 1,21

Tableau 4 : Effet de l'immersion dans l'eau de mer sur la contrainte d'adhérence

L_{eb} la longueur d'ancrage de barre PRFV (mm)

* Basées sur la moyenne de trois essais.

La contrainte d'adhérence des barres en PRFV est plus importante que celle des barres en acier pour les éprouvettes conditionnées dans l'eau de mer pendant 30 jours.

La diminution de la contrainte d'adhérence des barres PRFV après immersion dans l'eau de mer est respectivement de **2,55 2,43 et 1,05 %** pour les diamètres **16, 12 et 8 mm**.

L'acier présente une diminution de la contrainte d'adhérence plus significative après immersion dans l'eau de mer, qui est respectivement de **36,54 37,75 et 34,26 %** pour les diamètres **16, 12 et 8 mm**.

Ceci montre que la résistance de la liaison béton/PRFV dans l'eau de mer est beaucoup plus importante que la résistance de la liaison béton/acier et par conséquent la

durabilité du béton renforcé par des barres en PRFV est beaucoup plus importante.

3.4.3. Effet du diamètre

Nous pouvons déduire à partir de la figure 8 que la contrainte d'adhérence développée par les barres en PRFV et en acier est affectée par le diamètre. La contrainte maximale d'adhérence diminue quand le diamètre augmente que ce soit dans l'eau de mer ou à l'air libre. Cette conclusion est confirmée aussi par la littérature [10].

3.4.4. Mode de rupture

Pour l'acier et le PRFV, le mode de rupture observé pour l'ensemble des éprouvettes testées est un cisaillement du béton à l'interface. (Figure 9).

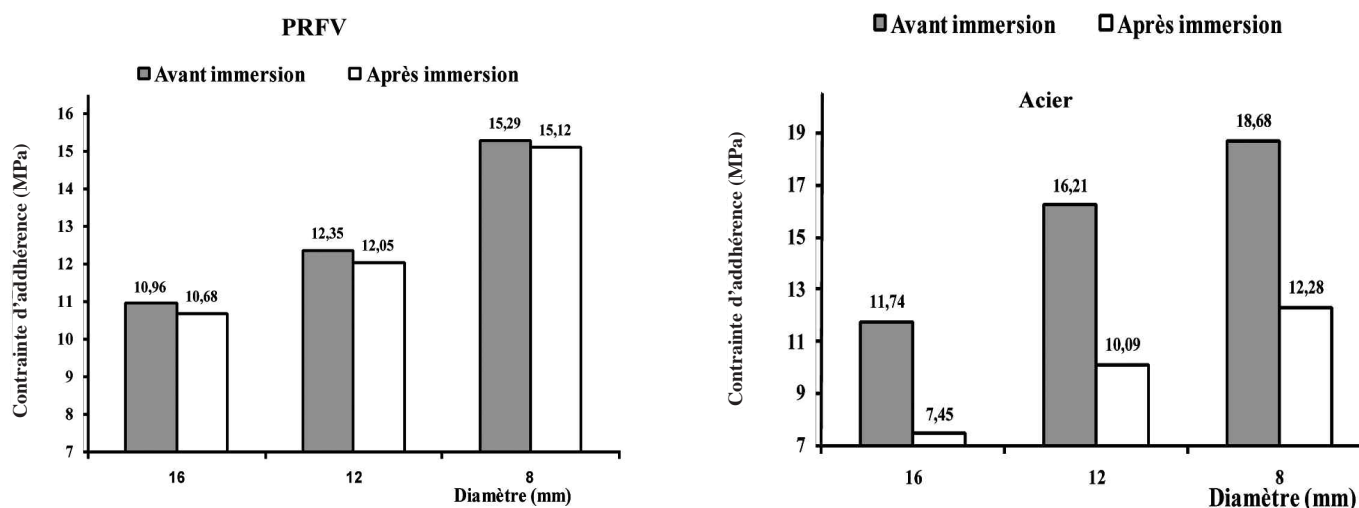


Figure 8 : Effet du diamètre des barres

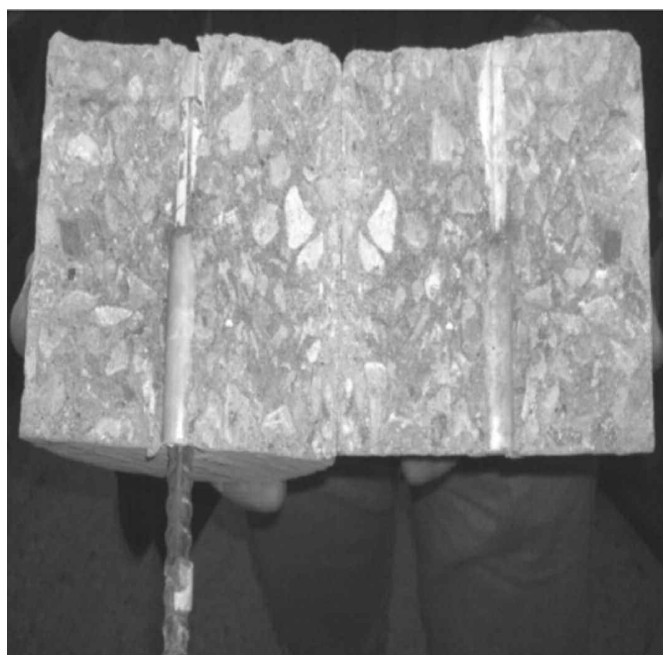


Figure 9 : Mode de rupture

4. CONCLUSION

Nous constatons que la masse de la barre en PRFV augmente légèrement après immersion dans l'eau de mer alors que celle de l'acier diminue de façon plus importante. L'augmentation de la masse dans les barres PRFV est due à l'absorption d'eau dans les fibres parallèles à l'axe de la barre. La diminution de la masse des barres d'acier est due au phénomène d'oxydation, confirmé par les observations. Nous remarquons que la résistance du béton conservé à l'air libre est légèrement supérieure à celle de celui conservé dans l'eau de mer. La conservation dans l'eau de mer diminue la résistance du béton d'environ 10 %.

À température ambiante (20°C) après conservation à l'air libre, les contraintes d'adhérence des barres en PRFV sont en moyenne de l'ordre de 84% de celles des barres d'acier, ce qui est meilleur par rapport aux différents résultats disponibles dans la littérature pour des barres en PRFV de géométrie différente, en particulier fabriquées au Canada (71%).

Après conservation dans l'eau de mer, la contrainte d'adhérence des barres en PRFV est systématiquement au contraire plus importante que celle des barres d'acier. Ceci s'explique par le fait que la diminution de la contrainte d'adhérence des barres PRFV après immersion dans l'eau de mer pour les trois diamètres étudiés 16, 12 et 8 mm est moins importante que celle de l'acier : **2,55, 2,43 et 1,05 %** contre **36,54 37,75 et 34,26 %**.

Nous remarquons que la contrainte d'adhérence est dépendante du diamètre. Elle diminue quand le diamètre augmente, ce qui est conforme aux données de la littérature.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Frigione, M., Aiello, M. A., and Naddeo, C., (2006) "Water effect on the bond strength of concrete/concrete adhesive joints", *Construction and Building Material*, 20, pp 957-970.
- [2] Coronado, C. A. and Lopez, M. M., (2008) "Experimental Characterization of Concrete-Epoxy Interfaces", *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 20, 4, pp 303-312.
- [3] Masmoudi A, Masmoudi R, Ben Ouezdou M.(2010) "Thermal effects on GFRP Rebars: Experimental study and analytical Analysis". *Materials and Structures*: Volume 43, Issue 6, pp 775-788.
- [4] Masmoudi A, Ben Ouezdou M, Masmoudi R, Daoud A. (2009) "Durabilité à l'adhérence des barres PRFV sous hautes températures" *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* France N°2-3, pp 10-17.
- [5] Masmoudi A, Daoud A, Ben Ouezdou M, Masmoudi R.(2011) "Long-term bond performance of GFRP bars in concrete under temperature ranging from 40°C to 80 °C". *Construction and Building Materials*. Elsevier, 25-2, pp. 485-493.
- [6] Mufti, A.A., Onofrei, M., Benmokrane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J.P., Bakht, B., Tadros, G., Brett, P. (2005). "Report on the studies of gfrp durability inconcrete from field demonstration structures." *Proc. Composites in Construction Conference (CCC 2005)*, Lyon, France.
- [7] Schock Bauteil GmbH Combar. *Design Guideline for Concrete Structures Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer following the Requirements of DIN 1045-1and EC2* Issued Germany.2006
- [8] Aboutaha R (2004) *Recommended Design for the GFRP Rebar Combar*, Syracuse University, Department of Civil and Environmental Engineering, Technical report, sponsored by Schok Bauteile GmbH, USA
- [9] ACI. (2005). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", *ACI No. 440.2R-02*, American Concrete Institute, 45,
- [10] Au, C. and Buyukozturk, O., (2006) "Peel and Shear Characterization of Debonding in FRP Plated Concrete Affected by Moisture," *Journal of Composites for Construction*, 10, 1, pp 35-47.