



DES POUTRES EN BÉTON RENFORCÉES PAR DES BARRES COMPOSITES : C'EST POSSIBLE ET ÇA EXISTE

Abdelmonem MASMOUDI*, Jamel BOUAZIZ, Mongi BENOUEZDOU*, André WEBER*****

*Laboratoire LGC, Département de génie civil, Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis (ENIT), BP 37,
1002 TUNIS-BELVÉDÈRE, Tunisie. abdelmonem.masmoudi@gmail.com

**Ecole Nationale d'ingénieurs de Sfax (ENIS), Laboratoire de chimie industrielle,
Route Soukra km 4, 3038 SFAX, Tunisie

***Centre de Recherche de la Compagnie Baden, (CRCB), Bauteile GmbH Allemagne

CONTEXTE INDUSTRIEL DE LA RECHERCHE : Cette recherche portant sur les structures en béton armé renforcées par des barres en matériaux composites PRFV, sont développées dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire de Génie Civil (LGC) de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et le Centre de Recherche de la Compagnie Baden, (CRCB), impliquant l'entreprise en Allemagne Schöck. Cette entreprise s'intéresse à l'application et l'amélioration des matériaux composites dans le domaine du génie civil. La coopération avec l'entreprise Schöck est une continuation naturelle de mes travaux de thèse pour mon habilitation de recherche.

1. INTRODUCTION

Le problème de corrosion des barres d'armatures en acier est l'un des facteurs les plus importants limitant la durée de vie des structures en béton armé. De plus, la maintenance d'éléments en béton armé corrodés est très coûteuse. Une solution à ce problème consiste en l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion comme les composites de Polymère

Renforcé de Fibres (PRF). Cette technologie est devenue récemment une alternative à l'utilisation de l'acier. Une étude bibliographique a montré qu'il n'y a pas suffisamment de travaux et de données fiables sur la durabilité de structures en béton renforcé des armatures en PRF.

L'ingénieur et le concepteur doivent tenir compte des différences des propriétés physiques, mécaniques et d'exécution, surtout ils doivent s'assurer si une rupture dans le béton doit avoir lieu avant celle dans les barres en PRF [1, 2, 3]. En effet tous les PRF sont élastiques linéaires jusqu'à la rupture et ne montrent aucune ductilité comparé à l'acier traditionnel. Les directives de conception du comité 440 ACI recommandent une quantité minimum de section en PRF plutôt qu'un maximum. Le béton sera le témoin et servira à l'avertissement d'une éventuelle rupture.

En raison de son module d'élasticité plus faible que l'acier, la flèche et l'ouverture des fissures gouvernent la conception des poutres en béton renforcées par des barres en PRF. La flèche et l'ouverture des fissures peuvent constituer un



avertissement additionnel d'une éventuelle rupture et ce même avant l'écrasement du béton en compression. Des conseils détaillés de conception peuvent être trouvés dans certaines publications et en particulier celle de l'institut américaine du béton ACI « guide pour la conception et la construction du béton renforcé avec les barres PRF » [4, 5, 6, 7].

Nanni a précisé que le rapport de renforcement en PRF est défini comme le rapport produisant une condition simultanée pour une éventuelle rupture du béton et de la barre de renforcement en PRF [8].

Le module d'élasticité de la plupart des matériaux disponibles en PRF est seulement 1/5 à 1/3 de celui de l'acier, qui a comme conséquence une ouverture de fissures plus marquée sous des charges de service en comparaison à des structures renforcées en acier [9, 10, 11].

La résistance et la rigidité d'un matériau composite sont définies par le type, la quantité et l'orientation des fibres de renforcement. Les fibres Schock Combar orientées linéairement, ont pour conséquence une résistance à la traction axiale plus élevée [12].

Beaucoup d'études ont prouvées que jusqu'à 60°C, la contrainte d'adhérence n'est pas affectée par la température [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Même une diminution de 30% de la contrainte d'adhérence des barres PRF n'affecte pas le bon fonctionnement du béton armé [19, 20]. La nécessité d'un personnel expérimenté et compétent pour cette nouvelle technologie de renforcement interne du béton par des barres en PRF n'est pas trop exigée.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Description des poutres d'essais

Six poutres en béton armé de dimensions, 150 x 200 x 2000 mm, ont été fabriquées avec un enrobage des armatures de 20 mm. Le diamètre 12 est employé pour les armatures de résistance et le diamètre 8 mm a été employé pour les armatures transversales et de montage. Les propriétés des barres en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV) et en acier utilisés dans cette étude sont récapitulées dans le tableau 1. [22]. Trois poutres, ont été renfor-

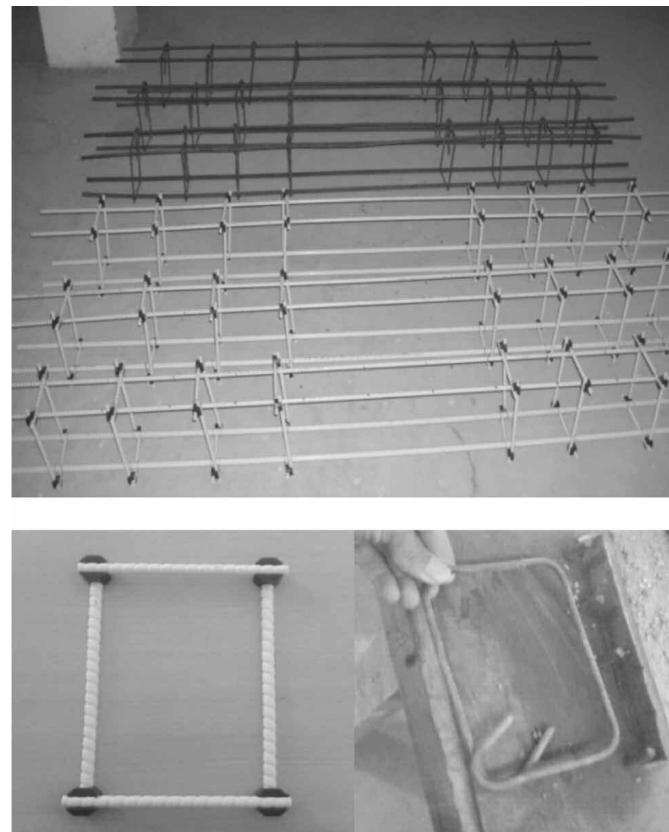


Figure 1 : Ferrailage des poutres en acier et PRFV

cées avec des barres en PRFV et trois autres avec des barres en acier (Figure 1). Les résistances de traction ultime des barres utilisées sont respectivement 738 MPa et 400 MPa pour les PRFV et pour l'acier. Quant aux modules d'élasticités sont respectivement de 60 et 200 GPa.

Les cadres espacées de 18 cm sont assemblés par des attaches spéciales. Le montage et la fixation avec les armatures longitudinales se font par des fils de ligature. Le béton utilisé pour le coulage des poutres est un béton de classe 30 MPa. Le ciment utilisé dans la composition du béton est le CEM I 42,5 HRS, il est couramment utilisé dans les d'ouvrages d'art. La densité et la surface spécifique Blaine sont respectivement 3,07 et 4200 cm²/g.

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

Tableau 1 : Propriétés des barres en PRFV et en acier



Désignation	Dosage (kg/m ³)
Ciment HRS	4003
Sable	857
Gravier 4/10	296
Gravier 12/20	691
Eau	204

Tableau 2 : Composition de béton utilisé

La composition de ce béton est récapitulée dans le tableau 2.

Le coulage du béton se fera par des couches successives en assurant une bonne répartition et vibration sur toute la longueur de la poutre (Figure 2).



Figure 2 : Coffrage et coulage du béton

2.2. Installation et instrumentation d'essai

Les poutres ont été soumises aux charges soutenues pendant une période de 60 jours, et ce pour comparer le comportement des poutres renforcées avec des barres en PRFV et en acier. Ce maintien des poutres sous charges soutenues est réalisé dans le laboratoire sous température ambiante. Pour simuler le chargement soutenu, les poutres ont été placées sous flexion quatre points. Nous avons choisi la flexion quatre points pour pouvoir étudier la flexion pure (indépendamment de l'effet de l'effort tranchant). L'étude de la flexion pure est intéressante étant donné quelle sépare l'effet de la flexion et l'effet de l'effort tranchant. Ceci est possible quand l'effort tranchant est nul c'est-à-dire : $dM/dx = V = 0$.

La déformation au milieu des poutres a été surveillée par des comparateurs de précision de 0.01 mm, placés au niveau de la fibre inférieure à mi section de chaque poutre.

Le diagramme schématique du chargement quatre points et de moment fléchissant est présenté par la figure 3.

Dans le but d'étudier si l'état limite ultime ou l'état limite de service qui contrôle le dimensionnement d'une poutre en flexion, une série de poutres sur deux appuis simples ont fait l'objet de recherche (Figure 4).

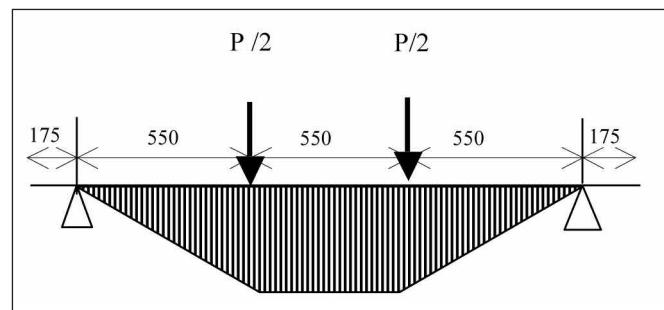


Figure 3 : Schéma mécanique du chargement de la poutre d'essai



Figure 4 : Poutres sous flexion quatre points

3. ÉTUDE ANALYTIQUE

Dans cette section nous mettons le point sur quelques paramètres critiques du règlement EC2, tels que la variation du moment résistant dans le béton et la contrainte interne dans les barres de renforcement par rapport au taux de renforcement en barres PRFV. Ces paramètres sont importants dans la conception des poutres renforcées par des barres en PRFV parce qu'ils peuvent affecter directement le comportement en service.

Le concept de sécurité suivant les règles EC2 concernant le dimensionnement en béton armé, est basé sur le principe de comparaison entre la charge externe provoquant une certaine sollicitation dans la structure et la résistance en compression du béton et en traction des armatures. La charge et la résistance sont multipliées par des coefficients de sécurité réglementaires, et ce dans le but de déterminer deux combinaisons fondamentales à l'état limite ultime de résistance (ELU) et à l'état limite de service (ELS). Une action « F » est subdivisée en charges permanentes (G), charges d'exploitation (Q), charges accidentelles (A) et charges provisoires (par exemple pendant la construction ou l'installation de l'ouvrage). Pendant la phase de conception, les valeurs suivantes sont distinguées : charges caractéristiques (F_k), charges représentatives (F_{rep}) et charges de calcul (F_d).

Pour déterminer l'état limite ultime, les charges de calcul F_d sont exigées. Celles-ci résultent de la multiplication de F_{rep} par un facteur de sécurité γ_F . ($F_d = F_{rep} \cdot \gamma_F$).

L'état limite de service est déterminé par les caractéristiques des charges représentatives, par conséquent, les facteurs de sécurité partiels est $\gamma_F = 1$.



3.1. Section minimale de renforcement interne

La section minimale de renforcement interne en PRFV devrait être conçue de façon à prévenir une éventuelle rupture par compression excessive du béton. Cette section minimale est donnée par l'expression suivante :

$$A_s \geq \frac{K_c \cdot K \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_{prfv}}. \quad (1)$$

K_c : Coefficient de distribution des contraintes dans le béton ($K_c=1.0$ en traction pure et $K_c=0.4$ en flexion simple)

K : Coefficient de distribution de contrainte non linéaire ($K=1$ si les contraintes de traction sont causées par des déformations imposées par des efforts externes)

$f_{ct,eff}$: Résistance à la traction du béton effective au moment où les fissures se produisent ($f_{ct,eff} \geq 3 \text{ N/mm}^2$).

σ_{prfv} : contrainte admissible de l'armature après formation de la fissure, elle est généralement égale à f_{vk} .

Par analogie au renforcement en acier traditionnel, la combinaison quasi-permanente de charge s'applique pour la détermination de la contrainte admissible σ_{prfv}

$$\sigma_{prfv} \geq \frac{M}{z \cdot A_{prfv}} \quad (2)$$

z : bras de levier $\approx 0.8 \text{ h}$

3.2. Calcul en fissuration préjudiciable ou très préjudiciable

Le dimensionnement des sections vis-à-vis de la flexion en cas de fissuration préjudiciable ou très préjudiciable, s'effectue à l'ELS en appliquant les hypothèses suivantes :

- Les sections droites restent planes après déformation.
- Pas de glissement relatif entre l'armature et le béton.
- Les contraintes de traction sont négligées dans le béton : seule l'armature qui reprend l'effort de traction.
- On ne tient pas compte du problème du retrait et du fluage, le béton et l'armature sont considérés comme des matériaux linéairement élastiques, ce qui permet d'appliquer les relations contraintes déformations :

$$\sigma_{prfv} = E_{prfv} \times \epsilon_{prfv}$$

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Calcul de la charge en service en fonction du moment résistant dans le béton M_{rc} et de la flèche

En comparaison avec les barres en acier, les barres en PRFV ont un module d'élasticité plus faible, ce qui aboutit à une plus grande flèche, à charge et travée égales. Par conséquent, dans beaucoup de cas, l'état limite de service (la flèche) pourrait contrôler le dimensionnement d'une

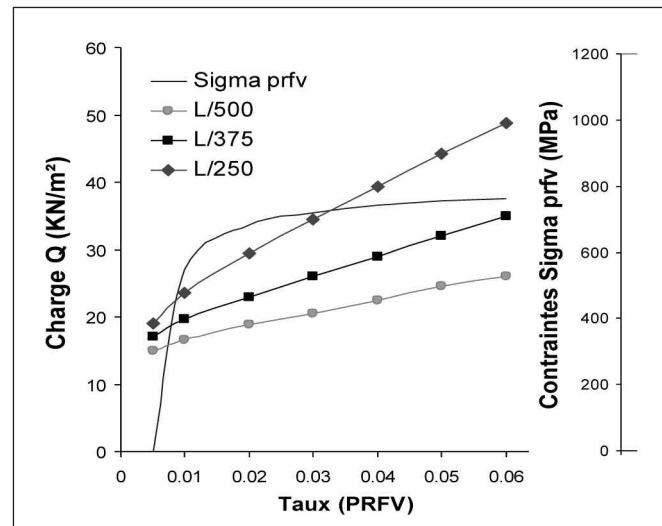


Figure 5 : Variation de la charge et de la contrainte en fonction du taux de renforcement en PRFV (L=10 m)

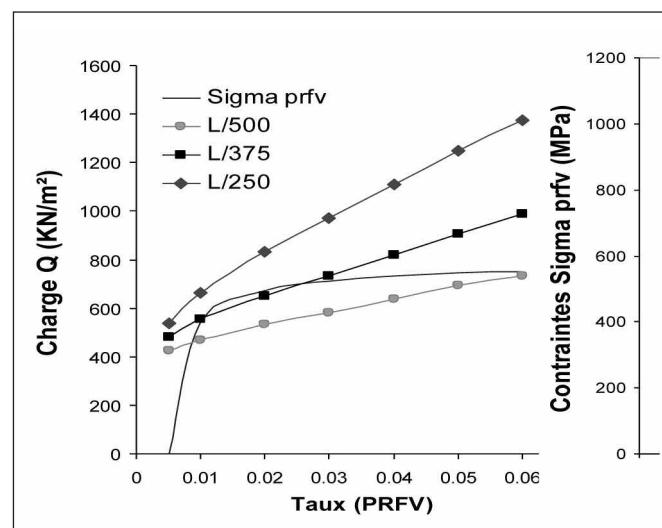


Figure 6 : Variation de la charge et de la contrainte en fonction du taux de renforcement en PRFV (L=5 m)

poutre en flexion. La figure 5 montre un cas où la flèche contrôle le dimensionnement (portée 10m) et la figure 6 montre un contre exemple où la flèche ne contrôle pas le dimensionnement (portée 5m).

Nous présentons sur la même figure 5, l'évolution de la contrainte dans la barre en PRFV en fonction du taux de renforcement. Ces courbes ont été développées pour des travées de 3m, 5m et 10m. La charge a été calculée en deux étapes. Le premier était de calculer Q en fonction du moment résistant de calcul M_{rc} et le second en fonction de la flèche.

Nous pouvons remarquer d'après la figure 6, que la flèche ne contrôle pas toujours le dimensionnement. Au delà d'un renforcement de 2% en armatures PRFV, la contrainte dans ces armatures n'affiche pas une grande variation. Autrement dit, il est inutile d'augmenter la section d'armatures en PRFV au delà de 2% étant donné qu'il n'y aura pas une augmentation considérable de la contrainte à l'intérieur des barres de renforcement.

Nous proposons en conséquence un taux de renforcement en armatures PRFV soit $A_{prfv}=2\%$ de la section du béton.

4.2. Proportionnalité charge/flèche

Nous avons pris une série de mesure des flèches pour l'ensemble des six poutres chargées et renforcées par des armatures en acier et en PRFV. Ceci est dans le but de vérifier en premier lieu la linéarité charge /flèche. Ce chargement correspond à un domaine de non dépassement de flèche limite réglementaire (L/250). La comparaison des comportements des deux poutres renforcées en acier et en PRFV est représentée par la figure 7.

Nous remarquons que pour des faibles valeurs de chargement, la variation de la flèche est proportionnelle à la variation de la charge appliquée sur la poutre. En comparaison avec les barres en aciers, les barres en PRFV développent une plus grande flèche. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'à une déformation 10%, les barres en PRFV ne développent que la moitié de leurs limites élastiques admissibles σ_{prfv} et c'est à 15%, que les barres en PRFV puissent développer à peu près 75% de σ_{prfv} (Figure 8). L'analyse des courbes montre que pour des valeurs de charges faibles, les deux types de poutres renforcées par des armatures en PRFV et en acier travaillent dans la phase linéaire.

Nous présentons dans la figure 9, la variation de la flèche en fonction de la charge pour des valeurs de chargement plus importants tout en restant dans la condition de ne pas dépasser la flèche limite (1/250).

Nous pouvons remarquer que le comportement des barres en acier et en PRFV présente deux branches :

- Une première branche qui montre un comportement linéaire c'est à dire les flèches sont proportionnelles aux chargements ;
- Une deuxième branche qui montre un comportement non linéaire ;

Toutefois les poutres renforcées en PRFV engendrent des flèches plus importantes que celles renforcées en acier.

4.3. Variation de la flèche dans le temps

Nous avons maintenu des charges constantes pendant 60 jours, avec des mesures régulières de la valeur de flèche. Nous avons remarqué que durant la période de chargement, la flèche des deux poutres en acier et en PRFV augmente légèrement vers une tendance à se stabiliser dans le temps (Figure 10).

Nous pouvons dire avec précaution (vue que le temps de chargement est court), que les poutres en PRFV sont moins marquées par le phénomène de flUAGE étant donné que sous un chargement constant les poutres en PRFV présentent une variation de flèche moins marquées que celles renforcées en acier.

5. CONCLUSION

A partir de l'étude expérimentale et analytique, nous pouvons dégager les conclusions suivantes :

- Les barres en PRFV ont un module d'élasticité plus faible, ce qui aboutit à une plus grande flèche, à charges et travées égales.

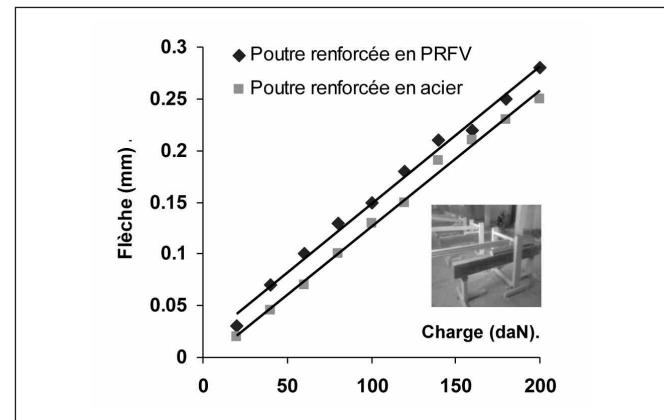


Figure 7 : Proportionnalité charge/flèche

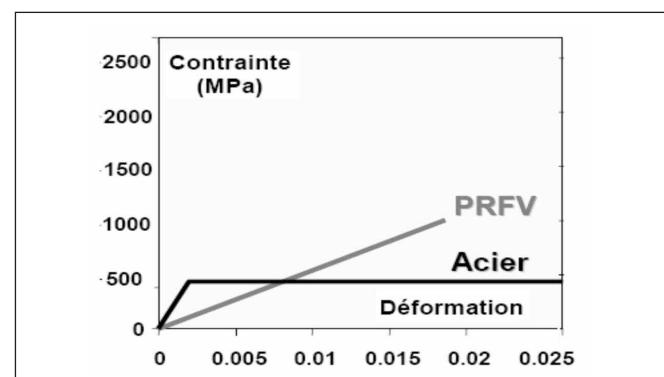


Figure 8 : Comportement en traction de l'acier et des PRFV

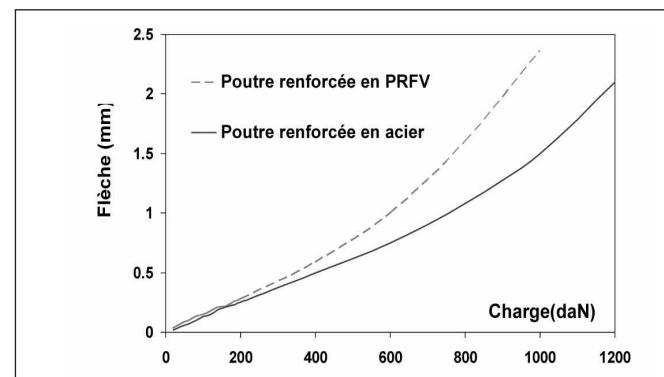


Figure 9 : Variation de la flèche en fonction de la charge

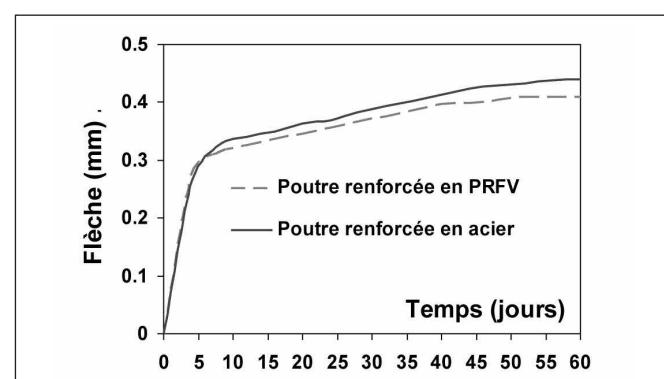


Figure 10 : Variation de la flèche dans le temps



- Pour des portées importantes, l'état limite de service (la flèche) pourrait contrôler le dimensionnement d'une poutre en flexion.
- Au déla d'un renforcement de 2% en armatures PRFV, la contrainte dans ces armatures n'affiche pas une grande variation. Par conséquence il est inutile d'augmenter la section d'armatures en PRFV au déla de 2% étant donné qu'il n'y aura pas une augmentation considérable de la contrainte à l'intérieur de ses barres de renforcement.
- Pour des faibles valeurs de chargement, la variation de la flèche est proportionnelle à la variation de la charge appliquée sur la poutre.
- Contrairement à l'acier qui développe le maximum de résistance à une déformation 10%, (phase plastique), les barres en PRFV ne développent que 75% de leurs résistances à une déformation 15%, (phase élastique).
- Les poutres en PRFV sont moins marquées par le phénomène de fluage étant donné que sous un chargement constant les poutres en PRFV présentent une variation de flèches moins marquées que celles renforcées en acier.
- Nous proposons dans les calculs de béton armé pour les sections soumises à la flexion, une valeur de 15% comme déformation pour les barres de renforcement en PRFV.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Sonobe, Y et al, *Design Guidelines for GFRP Reinforced Concrete building Structures* (1997) Journal of Composite for construction, V 1 No 3 Aug pp. 90-113
- [2] Theriault et al. (1998), *Effect of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behaviour on flexural of concrete beams. Journal of Composite for construction, V 2 No 1 Feb.* pp. 7-15.
- [3] Nanni.A (1993) *Flexural behaviour and design of RC members using FRP reinforcement Journal of structural engineering V.119 No 11 Nov 1993 pp. 3344-339*
- [4] Design Guidelines for GFRP Reinforced Concrete (1997) published by the ASCE Journal of Composites for Construction (Aug 1997 Vol.1 No 3 ISSN 1090-0268 Coden: JCCOF2)
- [5] ACI Committee 440-R-06, (1996) *State of the Art report on fiber reinforced plastic reinforced for concrete structures.* American Concrete Institute, Farmington Hills.Mich, 68p
- [6] ACI Committee 4401R-06, “*Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*”, American Concrete Institute, Farmington Hills. Branson,, McGraw-Hill, New York, 1977, 546pp
- [7] ACI Committee 435, “*State-of-the-Art Report, Deflection of Two Way Reinforced Concrete Floor Systems,*” ACI SP 43-3, Deflections of Concrete Structures, 1974, pp. 55-8182/23. Berkeley: EERC. University of California, CA., USA.
- [8] Nawy, E et al.(1971). *Fiberglass reinforced concrete slabs and beams ASCE journal of the structural division V.97. N° ST9 pp. 2203-2215*
- [9] Nawy, E et al.(1997). *Fiber glass reinforced concrete slabs and beams ASCE journal of the structural division V.103. N° ST2 pp. 421-428*
- [10] Faza, S et al (1993) *Theoretical and experimental correlation of behavior of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars.* Proceeding of international symposium SP 138. A Nanni and C.W. Dolan. eds. American concrete institute Famington Hills, Mich, 1993, pp. 599-614.
- [11] Benmokrane et al. (1996) *Flexural response of concrete beams reinforced with FRP Reinforcing bars* ACI Structural Journal V.93 N°.1 1996, pp46-55
- [12] Aboutaha R (2004) *Recommended Design for the GFRP Rebar Combarâ*, Syracuse University, Department of Civil and Environmental Engineering, Technical report, sponsored by Schok Bauteile GmbH, USA
- [13] 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 (2010), Page 775
- [14] Galati N., Nanni A., Dharani LR., Focacci F., Aiello MA., (2006), *Thermal Effects on Bond between FRP Rebars and Concrete*, Journ. of Compo., Part A, 37.pp.30-36.
- [15] Masmoudi A, Ben Ouezdou M, Masmoudi R, Daoud A. (2009) “*Durabilité à l'adhérence des barres PRFV sous hautes températures*” Annales des Bâtiments et Travaux Publics BTP France N°2- 09
- [16] Katz A., Berman N., Bank LC., (1999), *Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars.* ASCE J. of Comp. for Const. 3(2), pp.73-81.
- [17] Masmoudi A, Daoud A, Ben Ouezdou M, Masmoudi R.(2010) “*Long-term bond performance of GFRP bars in concrete under temperature ranging from 40°C to 80 °C*”. Construction and building materials. Elsevier.
- [18] Daoud A, Masmoudi A, Ben Ouezdou M, Masmoudi R. (2009) “*Effet 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)*”. Annales des Bâtiments et Travaux Publics BTP France N°2-09
- [19] ACI Committee 435, “*Allowable Deflections*”, ACI Journal, Proceedings V. 65, No. 6, 1968pp. 433-444.
- [20] Bank L. et al. (2003). *A Model Specification for Composites for Civil Engineering Structures.* Construction and Building Materials,vol. 17(6-7), pp.405-437.
- [21] EC2, Norme Européenne, Eurocode 2, (2008), *Calcul des structures en béton, Partiel1: règles générales et règles pour les bâtiments.*
- [22] 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.26p.*