
Adhérence de joncs et plats composites mis en place dans le béton selon la méthode NSM

Abdelghani Merdas ^{1*}, Bruno Fiorio ^{2*}, Nasr-Eddine Chikh ^{3*}

¹ Dépt GC, UFA SETIF, Algérie / L2MGC, Univ de Cergy-Pontoise, France.

² L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, France.

³ LMDC, Dépt de GC, Univ MM Constantine, Algérie.

* Abdelghani.merdas@yahoo.com, Bruno.fiorio@u-cergy.fr, chikh_ne@yahoo.fr

RÉSUMÉ. La technique Near Surface Mounted (NSM) a été utilisée ces dernières années pour le renforcement des poutres en béton armé. Elle consiste à l'insertion de plats ou de joncs de polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) dans des gravures effectuées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces correspondantes, remplies de résines époxydiques pour fixation. Pour caractériser le comportement d'adhérence des plats et des joncs de carbone avec le béton, des essais d'adhérence par flexion ont été effectués. La force d'arrachement dans le composite, le glissement aux extrémités libres et chargées ont été mesurés. Les influences de la résistance du béton, du type de colle et de la longueur ancrée sur le comportement d'adhérence entre ces trois matériaux (béton, résine, composite) ont été analysées.

ABSTRACT. The Near Surface Mounted (NSM) technique has been used in recent years for the strengthening of reinforced concrete beams. It involves the insertion of strips or rods of carbon fibers reinforced polymers (CFRP) in grooves made previously in the concrete cover of corresponding surfaces, filled with epoxy adhesive for fixation. In order to characterize the bond behavior of the laminate and rods to concrete, an experimental work of pullout-bending tests was carried out. The pullout force at the composite, the slip at the free and loaded ends were measured. The influences of the concrete strength, the strength of the bond, and the bond length on the bond behavior between the three materials (concrete, epoxy adhesive and CFRP) were analyzed.

MOTS-CLÉS: NSM / CFRP / Beam test / adhérence / glissement.

KEYWORDS: NSM / CFRP / Beam test / bond / slip.

1. Introduction

Parmi les techniques disponibles depuis plus d'une décennie dans le domaine de la réhabilitation, l'une des plus efficaces pour les désordres structuraux des structures en béton est le renforcement par matériaux composites par collage extérieur (EBR : External Bonded Reinforcement). Le processus de l'introduction de ces matériaux a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Ces fibres en carbone, verre ou aramide présentent en effet divers avantages : faible densité, pas de corrosion, bonnes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation (Rahimi, 2001). Cependant, l'utilisation du procédé EBR dans le cas des poutres conduit dans certaines situations à une rupture prématurée par décollement aux extrémités du renfort composite. Ce délaminage est dû à la présence d'une importante contrainte de cisaillement dans la colle (Charif, 1994 ; Taheri, 2002). Pour y remédier, une nouvelle technique de renforcement nommée Near Surface Mounted (NSM) a été utilisée ces dernières années pour le cas des poutres fléchies. Elle consiste à l'insertion de bandes de polymères renforcées de fibres de carbone (CFRP) dans des gravures effectuées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues (figure 1), remplies de résines époxydiques pour fixation (Barros, 2002 ; Yun, 2008).

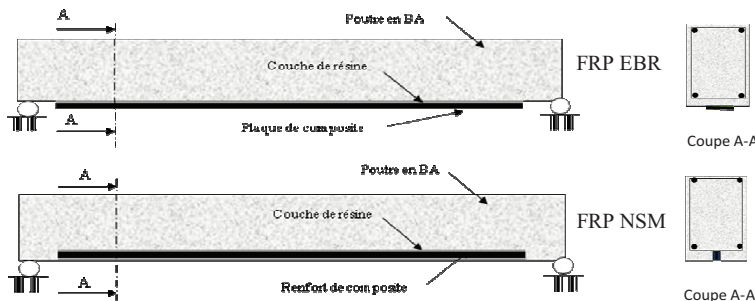


Figure 1. Principe de méthodes EBR et NSM

2. Etude expérimentale

2.1. Objectif de l'étude

Notre objectif est d'étudier l'effet des principaux paramètres de montage sur l'adhérence de renforts mis en place selon la méthode NSM. Nous avons pour cela utilisé des joncs (JL) et des plats (PL) lisses de carbone, associés à 3 bétons (deux

bétons ordinaires B30, B50 et un béton haute performance B75). Deux configurations ont été utilisées avec les plats : entièrement (PL1) ou partiellement (PL2) inséré dans la gravure. Cette dernière configuration évite de couper les cadres transversaux de la poutre en cas de faible enrobage des aciers.

Des essais d'adhérence par flexion ont été réalisés dans ces différentes configurations, en utilisant 2 types de résine et 3 longueurs ancrées (120mm, 80mm, 40mm). Des essais avec des renforts d'acier lisse (AL) et d'acier haute adhérence (AH) ont également été réalisés à titre de comparaison.

2.2. Méthodologie expérimentale

La disposition d'essai adoptée est similaire à celle proposée par la RILEM pour évaluer les caractéristiques conventionnelles d'adhérence des barres d'acier (RILEM, 1982). La Figure 2 montre le dispositif d'essai d'adhérence par flexion (pullout-bending) adopté dans le présent travail. Une poutre d'essai, constituée de deux blocs parallélépipédiques en béton (A et B), reliés en partie inférieure par le renfort CFRP dont on étudie l'adhérence, et en partie supérieure par une rotule en acier, est sollicitée en flexion simple (4 points) par deux forces égales et disposées symétriquement par rapport à la section médiane de la poutre.

Ce dispositif permet le calcul précis de l'effort de traction et des contraintes induites dans le renfort, à partir de la connaissance de l'effort appliqué et du bras de levier du moment interne qui ne dépend pas du niveau de charge appliquée.

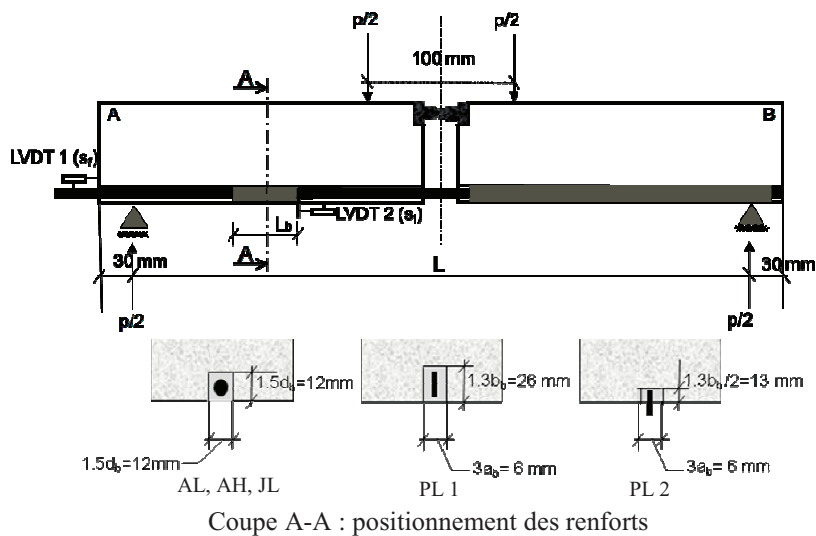


Figure 2. Essai d'adhérence par flexion (Pullout-bending test)

La zone d'adhérence testée est localisée dans le bloc A (longueur L_b variable). L'ancrage du renfort dans le bloc B est assuré par collage sur la longueur utile du bloc (320 mm). Deux capteurs de déplacement de 10 mm de course nominale ont été utilisés pour mesurer les glissements S_f et S_l , respectivement aux extrémités libre (LVDT1) et chargée (LVDT2) du renfort.

2.3 Caractéristiques des matériaux

Trois bétons ont été utilisés : deux bétons ordinaires (B30) et (B50) et un à haute performance (B75). La composition des bétons est indiquée dans le tableau 1.

Les plats et les joncs en carbone CFRP sont fournis par la société SOFICAR France®. Ce sont des CFRP composés de fibres de carbone unidirectionnelles, liées par une matrice adhésive époxyde (Module de traction 160 GPa, Résistance en traction 3000 MPa, Allongement à rupture 2.0%). Ces renforts ont tous une section de 50 mm².

Les colles époxy utilisées pour coller le composite CFRP au béton sont fournies par la société BOSTIK® sous le nom d'EPONAL 371 (E371), et EPONAL 380 (E380). Le tableau 2 donne les principales propriétés de ces colles.

Constituants	B30	B50	B75
Eau totale (l/m ³)	209	170	150
Ciment CEM I 52.5 N CE CP2 NF (kg/m ³)	336	400	500
Sable 0/4 SC NF (kg/m ³)	419	451	715
Sable 4/10 SC NF (kg/m ³)	471	507	/
Gravillon 6.3/20 (kg/m ³)	834	897.5	987
Superplastifiant (kg/m ³)	/	/	4.71
E/C	0.62	0.42	0.3
G/C	2.48	2.24	1.97
Résistance en compression f_{c28} (MPa)	37.5	57	73.5
Résistance en traction f_{t28} (MPa)	2.97	4.73	6.01
Module d'élasticité E_b (GPa)	33.55	40,56	47.88

Tableau 1. Propriétés mécaniques des bétons utilisés

Type d'époxy-adhésif		E 371	E 380
Traction	Resistance à la rupture (MPa)	31.7 ± 3.2	29.5 ± 1.0
	Allongement à la rupture (%)	1.2 ± 0.3	0.65 ± 0.1
	Module d'Young E (MPa)	3800 ± 130	4940 ± 170
Compression	Resistance à la compression (MPa)	76.8 ± 0.8	83.0 ± 1.6
	Compression en (%)	4.2 ± 0.2	4.3 ± 0.3
	Module d'Young E (MPa)	3400 ± 250	4200 ± 150

Tableau 2. Propriétés des colles époxy E 371 et E 380 (données fabricant)

3. Résultats expérimentaux

3.1 Comportement qualitatif

La force d'arrachement sur le CFRP (coté extrémité chargée), F_1 , est déterminée à partir de l'effort mesuré avec la cellule de charge (P) en prenant en compte le bras de levier interne (distance de la rotule au centre de gravité de la section transversale du CFRP).

On a :

$$F_1 = 1.86P \text{ (JL)}$$

$$F_1 = 2.13P \text{ (PL1)}$$

$$F_1 = 1.35P \text{ (PL2)}$$

Le tableau suivant reprend les résultats de différentes séries d'essais. Il donne également la rigidité à l'arrachement, calculée par régression linéaire pour les charges comprise entre 20% et 80% de la résistance à l'arrachement.

Renfort	Béton	Résine	Lb (mm)	F _{Imax} (kN)	ET* (kN)	CV* (%)	K1 (kN/mm)	ET* (kN/mm)	CV* (%)
JL	B30	E371	40	16.549	1.495	9.04	32.133	29.660	0.923
JL	B30	E371	80	22.710	0.077	0.34	68.054	9.955	0.146
JL	B30	E371	120	33.368	0.839	2.52	67.279	18.316	0.272
JL	B30	E380	120	38.342	1.003	2.62	72.886	33.265	0.456
JL	B50	E371	40	22.083	4.863	22.02	48.279	1.316	0.027
JL	B50	E371	80	30.574	4.135	13.53	57.500	13.435	0.234
JL	B50	E371	120	40.783	0.674	1.65	67.981	25.996	0.382
JL	B50	E380	120	33.043	0.900	2.72	69.006	5.556	0.081
JL	B75	E371	40	23.009	6.637	28.85	26.198	3.787	0.014
JL	B75	E371	80	34.516	4.140	12.00	55.112	19.800	0.359
JL	B75	E371	120	46.023	1.643	3.57	78.594	11.363	0.145
JL	B75	E380	120	36.485	2.943	8.07	74.877	6.107	0.081
AH	B30	E371	40	18.222	5.014	27.52	54.674	3.957	0.072
AH	B30	E371	80	26.600	2.591	9.74	72.653	3.932	0.054
AH	B30	E371	120	29.094	0.295	1.01	59.392	27.143	0.457
AH	B30	E380	120	29.970	2.462	8.21	152.288	26.142	0.172
PL1	B30	E371	40	21.349	0.002	0.01	64.060	13.002	0.203
PL1	B30	E371	80	31.552	2.179	6.91	83.382	4.411	0.053
PL1	B30	E371	120	41.704	0.023	0.05	44.028	3.645	0.083
PL1	B30	E380	120	46.594	2.240	4.81	79.718	9.593	0.120
PL1	B50	E371	40	27.657	3.059	11.06	45.670	5.988	0.131
PL1	B50	E371	80	36.932	0.857	2.32	61.046	29.300	0.480
PL1	B50	E371	120	44.650	2.976	6.66	67.472	5.180	0.077
PL1	B50	E380	120	46.207	1.345	2.91	118.762	22.395	0.189
PL1	B75	E371	40	29.118	0.144	0.49	60.383	19.911	0.330
PL1	B75	E371	80	37.219	2.879	7.74	79.109	48.064	0.608
PL1	B75	E371	120	47.618	2.355	4.95	65.661	5.893	0.090
PL1	B75	E380	120	54.011	3.089	5.72	87.655	5.869	0.067
PL2	B30	E371	40	17.394	0.314	1.80	65.700	5.699	0.087
PL2	B30	E371	80	30.124	3.896	12.93	81.581	1.459	0.018
PL2	B30	E371	120	36.533	2.597	7.11	80.693	6.985	0.087
PL2	B75	E371	80	34.007	0.005	0.01	267.942	188.577	0.704

* CV : Coefficient de variation, ET : Ecart type (3 éprouvettes par configuration)

Tableau 3. Résultats de différentes séries d'essais

3.1.1. Courbe d'adhérence type

La Figure 4 illustre l'évolution typique de la courbe charge–glissement mesurée aux extrémités libre **a**) (LVDT1) et chargée **b**) (LVDT2).

Les séquences observées sont comme suit :

Pour des niveaux de charge inférieurs à approximativement 40% de la charge maximale F_{max} , le glissement mesuré à l'extrémité chargée (LVDT2) évolue linéairement avec l'effort appliqué tandis que le glissement mesuré à l'extrémité libre (LVDT1) est négligeable. On n'observe aucune fissuration de la résine ou du béton.

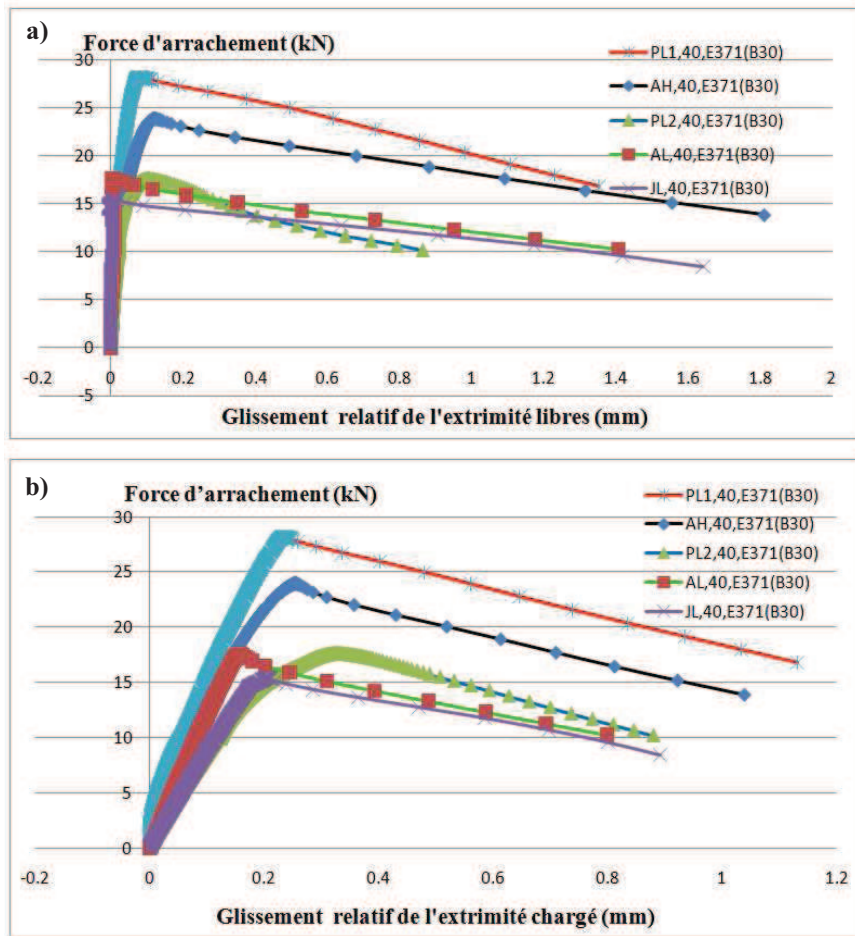


Figure 4. Courbes types Force d'arrachement en fonction du glissement pour 5 renforts ($L_b=40\text{mm}$).

Au-delà de 40% de F_{max} , le glissement coté libre s'amorce et le glissement coté chargé devient de plus en plus non linéaire. Cela peut s'expliquer par le

comportement non linéaire due à la plastification de la résine époxy qui se traduit par un processus de décollement à l'interface composite-résine et béton-résine.

Au pic, la force d'arrachement ultime est atteinte et le glissement se produit brutalement aux extrémités libre et chargée. Cette transition est due à la dégradation rapide de l'adhérence à l'interface composite-résine-béton. La brutalité du glissement est due au fait que l'essai n'est pas directement piloté par le glissement s_1 mais par la flèche de l'éprouvette.

3.1.2. Modes de rupture

Différents modes de rupture ont été constatés (figure 5) : rupture inter faciale résine-composite (IRC) ; rupture mixte inter faciale résine-composite et résine-béton (IRC-IRB) ; rupture du béton entourant la gravure (BB). Leur occurrence est fonction des paramètres considérés, et notamment de la longueur ancrée.

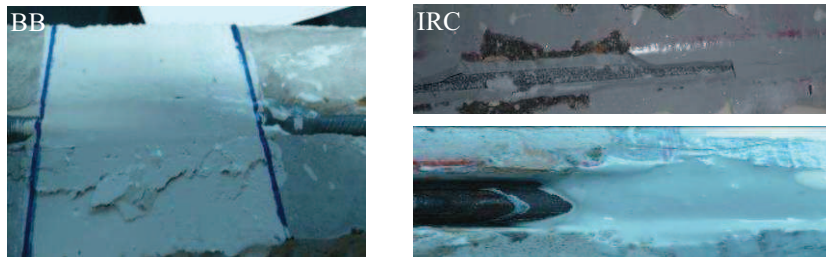


Figure 5. Modes de rupture de l'adhérence renfort / matrice.

3.2 Étude paramétrique

3.2.1. Effet du type de renfort sur la résistance maximum à l'arrachement

La figure 6 présente les résistances maximales obtenues pour les différentes configurations testées. On constate une meilleure performance générale des plats (PL1 et PL2) par rapport aux joncs. A section constante, le renfort PL1 offre une surface de contact plus grande permettant d'atteindre la force d'arrachement la plus élevée. Le montage PL2 présente approximativement la même surface de contact que les joncs. La meilleure résistance à l'arrachement dans ce cas est imputable à une épaisseur moyenne de colle plus réduite du fait de la meilleure correspondance géométrique du renfort et de l'engravure.

L'acier haute adhérence AH a une surface rugueuse permettant d'atteindre une adhérence plus importante par rapport à PL2, JL, et AL (dans ce cas, les bossages présents à la surface du renfort empêche la rupture du lien d'adhérence et c'est la résistance à la traction du renfort qui limite la force d'arrachement). Les renforts JL et AL présentent des comportements similaires, ce qui peut être expliqué par la

similitude de leurs surfaces de contact. Ces résultats montrent un fort effet de la micro-géométrie des renforts.

3.2.2. Effet de la longueur ancrée

La figure 6, montre l'évolution de la force d'arrachement maximale en fonction de la longueur ancrée L_b . On constate que la force d'arrachement augmente quasi-linéairement avec l'augmentation de la longueur ancrée pour les trois longueurs testées. L'utilisation de la résine E380 augmente sensiblement la force d'arrachement.

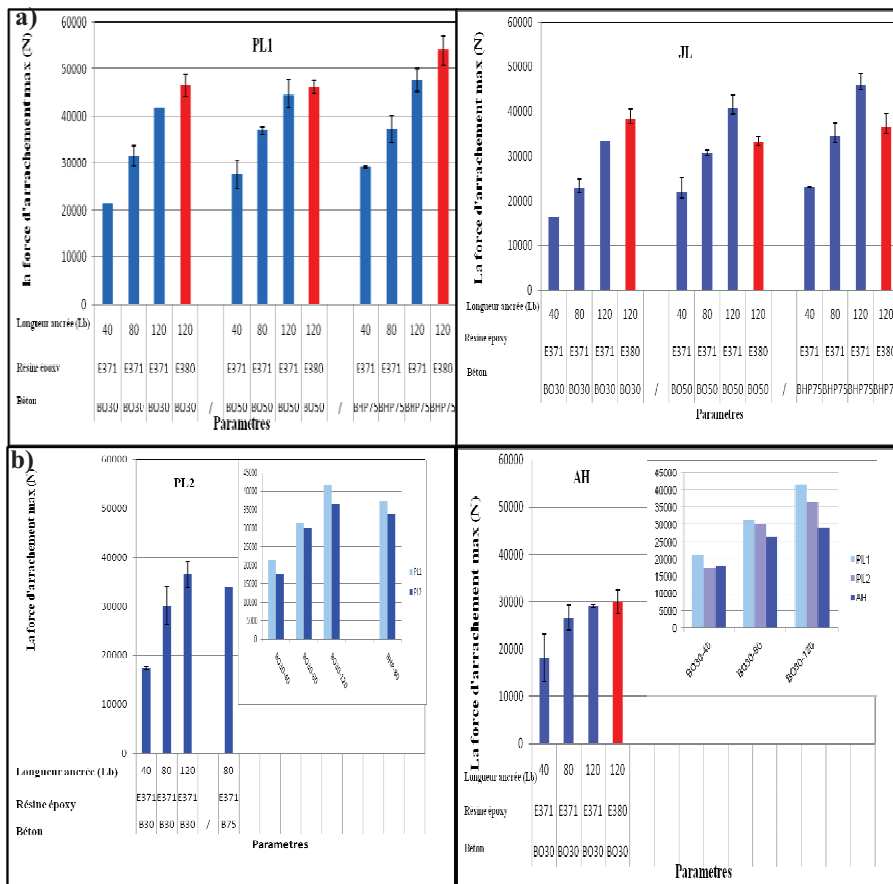


Figure 6. Effet de la longueur ancrée et de la résistance du béton sur F_{max} moyenne a) PL1, JL ; b) PL2, AH

3.2.3. Effet de la résistance du béton

Dans tous les cas, la résistance à l'arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance du béton (figure 6). L'influence de la résistance du béton sur la résistance à l'arrachement est plus prononcée pour les longueurs d'ancrage réduites (40mm) que pour les longueurs d'ancrage plus importantes. A partir de $L_b=120$ mm, l'optimum semble atteint et l'effet de la résistance du béton devient réduite. C'est la contrainte d'adhérence plus forte du coté chargé que du coté libre qui explique ce comportement.

4. Conclusions

Des essais d'adhérence par flexion ont été effectués pour caractériser le comportement d'adhérence de renforts de carbone positionnés dans le béton suivant la méthode NSM. Les essais réalisés montrent l'effet des paramètres de forme sur la résistance à l'arrachement du renfort. En particulier, les renforts sous forme de plat, qui donne une surface de contact avec la colle augmentée par rapport aux renforts cylindriques de même section, favorisent la résistance à l'arrachement.

Une configuration spécifique d'intégration partielle du renfort dans le béton a été testée dans le cas de renforts plats. Elle permet d'éviter la coupure des cadres transversaux s'ils sont proches de la surface et présente une meilleure performance par rapport aux aciers lisses ou HA et aux joncs lisses.

L'influence de la résistance du béton, de la longueur ancrée, du type de résine, a également été évaluée.

5. Bibliographie

- Barros, J.A.O., Fortes, A.S. « Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits », *Proceedings of 5^o Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Madrid, Spain, 16 pp., 2002.
- Sharif, A. Al-Sulaimani, G.J. « Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates », *ACI Structural journal*, (1994), vol 91, P. 160-168.
- Rahimi, H. Hutchinson, A. « Concrete beams strengthened with externally bonded FR », *journal of composite for constructions* (2001), vol 5, P. 44-56.
- RILEM. « Bond test for reinforcement steel », 1 Beam test TC9-RC, 1982.
- Taheri et al, « On the parameters influencing the performance of reinforced concrete beams strengthened with FRP plates », *Composite Structures*, vol 58 (2002), P. 217-226.
- Y. Yun, Y-F Wu and W C Tang., « Performance of FRP bonding systems under fatigue loading », *Department of Building and Construction City University of Hong Kong*, Hong Kong, May 2008.