
Le renforcement et la réparation de console courte en béton armé par la technique de collage de matériaux composites

IVANOVA Ivelina¹, ASSIH Jules¹, Alex LI¹, Dimitar DONTCHEV², Yves DELMAS¹

¹ Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France ; UFR Sciences Exactes et Naturelles, Moulin de la Housse - BP 1039, 51687 Reims Cedex 2 FRANCE; Laboratoire Génie Civil; ivalina_ivanova82@hotmail.com.

² Université de Technologie Chimique et de Métallurgie Sofia, Bulgarie ; 8 Bld. St. Kliment Ohridski, p.c.1756 Sofia, Bulgarie.

RÉSUMÉ.

Cette étude expérimentale porte sur les consoles courtes en béton armé renforcées par collage de matériaux composites sur les deux faces. L'objectif est de montrer l'influence du nombre de couches et l'influence du type de matériau composite en fibre de carbone utilisé (tissus composites en fibres de carbone unidirectionnelles et lamelles Sika CarboDur) sur la charge ultime et sur le comportement mécanique de consoles renforcées. Le nombre de couches étudié est de 1, 2 et 3. Les résultats des essais expérimentaux présentés permettent entre autre de définir un nombre de couches optimal. Le renforcement a permis d'augmenter la charge portante de 6 à 55% selon la nature et la géométrie du renfort. Les mécanismes de déformation globale et locale au voisinage des interfaces composite/béton, les mécanismes d'endommagement, la fissuration et la propagation des fissures afin d'identifier les modes de rupture, sont observés. Les trois modes de rupture de la console courte en béton armé renforcée sont: rupture du matériau composite, rupture par fendage et décollement de la plaque en tissu de carbone, rupture par compression et décollement de la plaque lamelle.

ABSTRACT.

This experimental study investigates the strengthening of reinforced concrete short corbels bonded by composite materials on both sides. The objective is to show the influence of carbon fiber fabrics layer number in thickness of plate on ultimate load of strengthened corbels. Also, the influence of the type of carbon fiber composite material (unidirectional carbon fiber fabrics or strip of CarboDur) on mechanical behavior of specimen. The investigated number was 1, 2 and 3 layers. The results showed an optimal number of layers of 2. Other side, the results indicated an increase of ultimate load from 6 to 55% according to strengthening of reinforced concrete corbel. The global and local strain mechanisms around interface of composite/concrete are identified. Cracking and crack propagation are also examined to identify collapse modes. Three failure modes of strengthened reinforced concrete short corbel are found: failure of composite material, splitting and peeling off carbon fiber plate, compression failure and peeling off strip.

MOTS-CLÉS : renforcement, console courte, collage, comportement mécanique, fibre de carbone, béton armé.

KEY WORDS: strengthening, short corbel, bonding, mechanical behavior, carbon fiber, reinforced concrete.

1 Introduction

La console courte en béton armé est un élément de structure qu'on retrouve régulièrement dans les ouvrages comme dans les ponts, dans les garages ou dans les bâtiments. Grand nombre de ces structures ont été construites juste après la 2^{ème} guerre mondiale. Sachant que la durée de vie de ces structures varie de 50 à 100 ans, alors on peut comprendre que l'état de détérioration de ces structures dans certaines régions du monde, peut atteindre des proportions alarmantes à tous les niveaux. En effet, certain de ces structures ont déjà fait ou devront faire l'objet de travaux de reconstruction ou de renforcement par collage [BOU 01] de matériaux composites en particulier [COR 01], [ELG 05], [ANI 12] et [IVA 13].

Les travaux de renforcement par le collage répondent bien au problème particulier et actuel des industries du bâtiment et des travaux publics. Ils répondent également bien au problème d'exploitation et de rénovation des constructions en béton armé endommagées par la corrosion, le changement de charge, le changement d'utilisation de la structure, le changement des normes de conception et en particulier l'endommagement par le séisme et les catastrophes naturelles (inondation ou sécheresse, tsunami etc...).

L'utilisation des matériaux composites dans le domaine de Génie Civil permet d'augmenter la durée de vie des structures. Les raisons pour lesquelles les matériaux composites en fibres de carbone sont de plus en plus utilisés comme matériaux de renforcement sont: immunité à la corrosion, faible poids (ce qui facilite l'application dans un espace confiné), la réduction des coûts de main-d'œuvre, résistance à la traction très élevée, raideur (qui peut être adaptée aux exigences de conception), résistance à la fatigue, une grande capacité de déformabilité et de la disponibilité de dimensions illimitées (une adaptabilité géométrique remarquable).

Il est parfois difficile sinon impossible de renforcer une structure par la technique du bandage, alors le collage de plaque composite directement sur les faces à des endroits judicieusement bien choisis, s'impose. Raison pour laquelle, nous avons choisi d'étudier le renforcement par collage des plaques composites sur les faces. La liaison entre le béton et les plaques est réalisée au moyen d'une colle époxy comme dans le cas des plaques en acier. De plus, les lamelles présentent d'autres atouts: elles peuvent être stockées, enroulées sur elles-mêmes et dimensionnées à n'importe quelle longueur; ce qui rend les joints superflus.

Dans cet article, nous présentons l'influence du nombre de couches et du type du renfort (plaque en tissu de fibres de carbone ou en lamelle Sika CarboDur) sur la charge ultime et sur le comportement mécanique de consoles courtes en béton armé renforcées par la technique du collage. Les différents modes de fissuration et de rupture sont aussi décrits.

2 Programme expérimental

2.1 Modèle expérimental

Le modèle expérimental représente deux consoles courtes en forme trapézoïdale encastées dans un poteau symétriquement par rapport à son axe vertical. Les cinq consoles courtes testées ont la même géométrie avec une épaisseur de 15 cm. Le poteau a une dimension de 15 x 30 x 100 cm et il est suffisamment rigidifié par des armatures longitudinales et transversales afin d'assurer une transmission des efforts verticaux aux consoles. Dans une console courte en béton armé, on a des armatures supérieures appelées armatures "tirant" et des armatures réparties sous forme de cadres horizontaux. Les "tirants" sont destinés à résister aux contraintes de traction développées par la flexion. Les cadres horizontaux servent à frotter la bielle inclinée comprimée du béton pour minimiser la fissuration et éviter la rupture fragile.

La console courte en béton armé sans renforcement est notée "**C0**", la lettre "C" désigne Console et "0" (zéro) veut dire sans renforcement. Pour les autres consoles : la première lettre "C" désigne toujours Console. La deuxième lettre représente le type de renforcement (par exemple: **P** pour **Plaque**). Ensuite, le chiffre indique le nombre de couches (par exemple: 1, 2 ou 3). Enfin, la petite lettre indique le type de matériau composite (par exemple **u** pour **un**idirectionnelle). L'échantillon renforcé avec des lamelles Sika CarboDur est noté par **CPC** (Console renforcée avec des **Plaq**ues CarboDur).

2.2 Matériaux

Les cinq consoles ont été élaborées avec un béton normal de type C30/35, dosé à 400kg/m³ de ciment CPJ-CEM II/A 32,5 R avec du sable roulé de classe 0/4 et de gravillon roulé de classe 4/12,5. La résistance du béton à 28 jours est de 33 MPa, avec un Module d'Young de 30 GPa et un coefficient de Poisson de 0,25. Deux barres d'acier HA 10 sont utilisées comme tirants, sur lesquelles, on a réalisé les essais de traction simple. Les résultats

obtenus montrent une résistance à la rupture de 610 MPa, une limite d'élasticité de 520 MPa, un Module d'Elasticité de 200 GPa et un coefficient de Poisson de 0,30. Les barres d'acier lisses de 6 mm de diamètre ont été utilisées comme cadres.

Le tissu de renforcement est à base de fibres de carbone unidirectionnelles orientées de 0° dans le sens de la longueur du tissu avec un module d'élasticité de 94000 MPa et un coefficient de Poisson de 0,40. Les plaques composites à base de ces tissus en fibres de carbone ont un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture comme le montre la Figure 1.

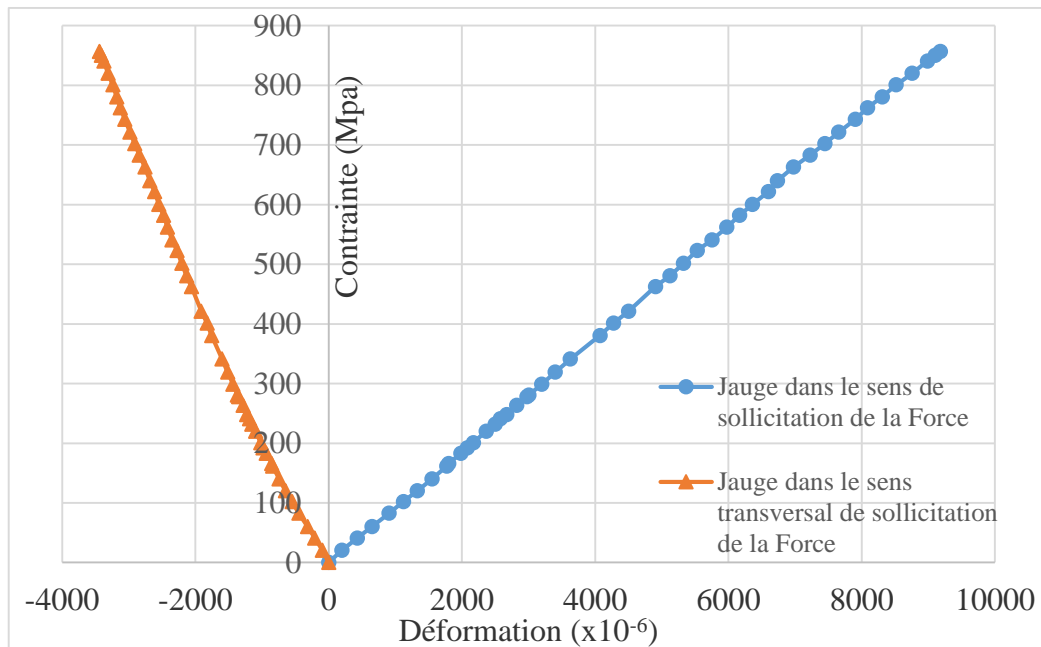


Figure 1. Comportement d'une plaque composite en tissu de fibres de carbone

Les caractéristiques mécaniques dans les sens longitudinal et transversal, sont déterminées à l'aide de jauges de déformation "rosette". Les lamelles de carbone "Sika CarboDur S" sont des Polymères Renforcés de Fibres de Carbone pultrudées, à base de fibres de carbone noyées dans une matrice de résine époxydique. Elles se présentent sous forme de lamelles préfabriquées, avec une épaisseur de 1,25 mm, largeur 5 cm et un module d'élasticité 165000 MPa. Nous avons utilisé également deux types de colles (Sikadur-330 et Sikadur-30). La Sikadur-330 bicomposante est utilisée pour coller directement les tissus en fibres de carbone unidirectionnelles.

2.3 Préparation des surfaces

La technique du collage [DEL 85] et celle du renforcement sont validées déjà par plusieurs travaux [ASS 98] dans le domaine du collage couplé avec la technique de mesure acoustique [GIL 78].

La préparation des surfaces qui va recevoir les plaques composites est d'une importance primordiale et demande beaucoup de soins. Les surfaces de béton sont préparées par l'élimination de toute matière comme : l'huile, la graisse, etc... La technique utilisée est le sablage à l'aide de sable de grains fins de diamètre de l'ordre du micron. Toutes les consoles courtes en béton armé ont été sablées. Les empreintes de ces grains de sable sur la surface qui va recevoir après application de l'adhésif, des charges contribuent grandement à la résistance mécanique de l'ensemble collé.

La préparation de la surface doit être effectuée juste avant l'opération de collage pour empêcher toute contamination. La surface du béton est sablée et présente un aspect un peu rugueux. Elle est prête à recevoir le matériau composite. La résine et le durcisseur ont été soigneusement mélangés dans un rapport de 4:1. Le mélange est appliqué en premier sur le béton et ensuite on pose le tissu en fibres de carbone ou la lamelle Sika CarboDur. Une pression doit être appliquée pour faire sortir l'excès de colle.

3 Résultats et discussions

3.1 Charge ultime

3.1.1 Influence du nombre de couches sur la charge ultime

Quatre consoles dont trois renforcées par collage de plaques en tissu de fibres de carbone unidirectionnelles d'épaisseur variant de 1, 2 et 3 couches ont été testées. Les charges ultimes des consoles renforcées sont présentées sur la figure 2. La charge ultime de la console de référence c'est-à-dire non renforcée, est égale à 357 kN. F_u représente la charge ultime des consoles renforcées. Les résultats de tests montrent une valeur optimale de la charge ultime de la console CP2u ($F_u = 552$ kN soit un gain de 55 %).

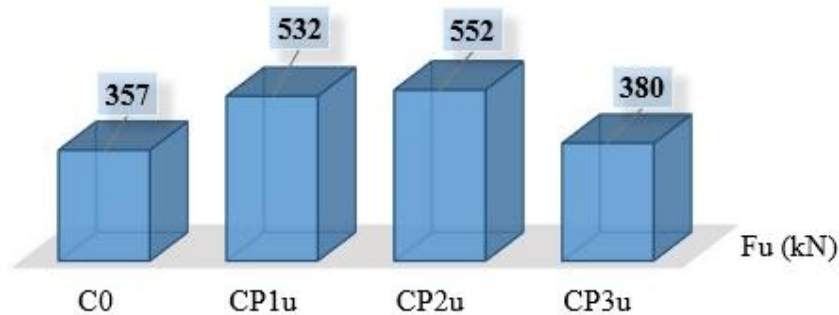


Figure 2. Influence du nombre de couches sur la charge ultime

En effet, la capacité portante de la structure augmente au fur et à mesure que le nombre de couches augmente. On observe une rupture de la plaque composite pour une couche de tissu en fibres de carbone. Mais les essais montrent un arrachement de la plaque composite avec le béton à partir de la deuxième couche. Ce phénomène s'accroît encore plus lorsque l'épaisseur de la plaque augmente, donc l'efficacité du renforcement est bien limitée. En revanche, lorsque l'épaisseur de la plaque est de trois couches, en plus du phénomène précédent, on observe une diminution de la charge de rupture. En effet, lorsque l'épaisseur de la plaque augmente, la console renforcée devient plus rigide et provoque une ruine de façon prématurée par un décollement de celle-ci ses extrémités.

En conclusion, les résultats des essais montrent qu'on obtient les valeurs optimales de 2 couches pour le cas de renforcement d'une console en béton armé par collage de plaques en tissu en fibres de carbone directement sur les deux faces.

3.1.2 Influence du type de matériaux composites

L'épaisseur de la plaque étant déterminée, on la compare avec d'autres matériaux comme les lamelles «Sika CarboDur ». La lamelle «Sika CarboDur » est plus rigide, donc elle peut engendrer un décollement de la plaque de façon prématurée, ce qui donne des résistances plus faibles par rapport aux consoles renforcées par plaque en tissu de fibres de carbone.

En effet, les résultats montrent que la charge ultime de rupture de la console courte renforcée par plaque de tissu est supérieure de 32% à celle renforcées par des lamelles collées «Sika CarboDur ».

3.2 Étude du comportement mécanique des consoles courtes renforcées

La technique basée sur l'extensométrie à jauges électriques a été appliquée. Cette technique permet de mesurer les déformations locales du matériau composite, du béton et de l'acier à l'aide des jauges collées sur leurs surfaces.

3.2.1 Influence du renforcement sur le comportement de la console

Les déformations locales obtenues par les jauges collées dans la section d'encastrement sur l'acier au point « G1 » et sur le matériau composite au point « GC1 » sont comparées sur les Figures 3, 4 et 5.

Les courbes « Force-Déformation » montrent les variations des déformations en fonction de la charge appliquée. Avant l'apparition des fissures dues à la flexion, l'allure des courbes de quatre consoles est similaire.

Ensuite sur la console de référence "C0", on distingue deux paliers à 150 kN et à 235 kN. Ces paliers sont caractérisés par l'apparition de la fissure de flexion et de la fissure oblique. Dans les cas des consoles renforcées, le premier palier n'apparaît pas à cause de l'existence de la plaque composite qui reprend les déformations de la structure. La figure 3 montre les déformations de l'acier tendu dans la section encastrement en fonction de l'épaisseur des plaques composites. Les déformations sont identiques jusqu'à 140 kN au point « G1 » pour les trois consoles renforcées CP1u, CP2u et CP3u. Au-delà de 140 kN, on observe le palier caractéristique de l'apparition de la fissure oblique. En effet, on observe une valeur optimale à partir de laquelle la charge de rupture commence par diminuer. Les résultats des essais indiqueraient que c'est à partir de CP2u qu'on observe cette diminution. Une plaque composite de 2 couches de tissu en fibres de carbone suffirait pour rendre efficace le renforcement de la console. Le renforcement permet aussi de retarder l'apparition des fissures obliques.

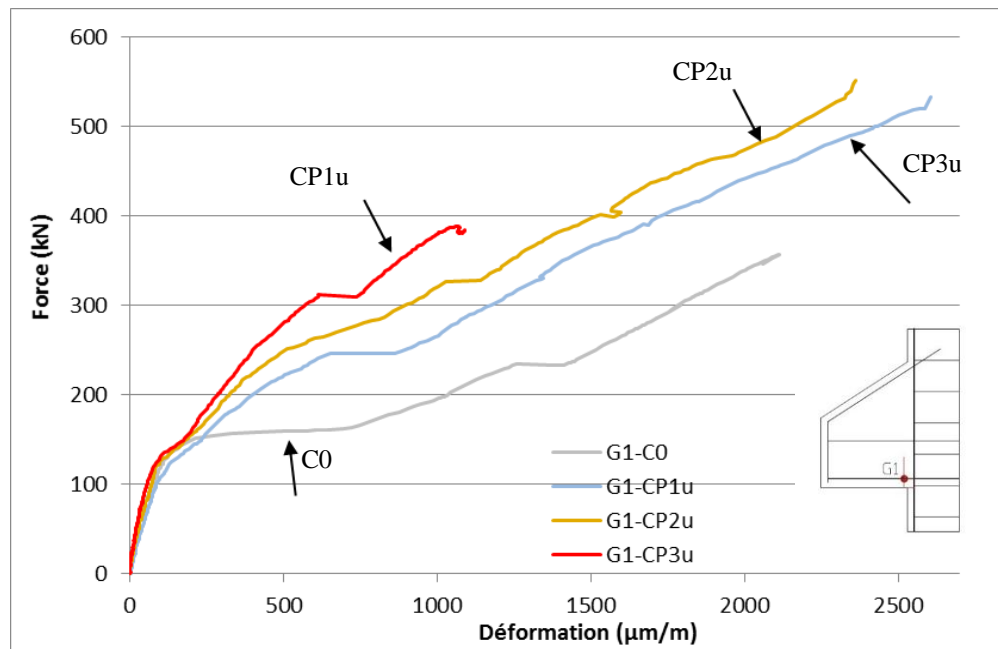


Figure 3. Comparaison des déformations du tirant au point G1 en fonction de l'épaisseur de plaque composites

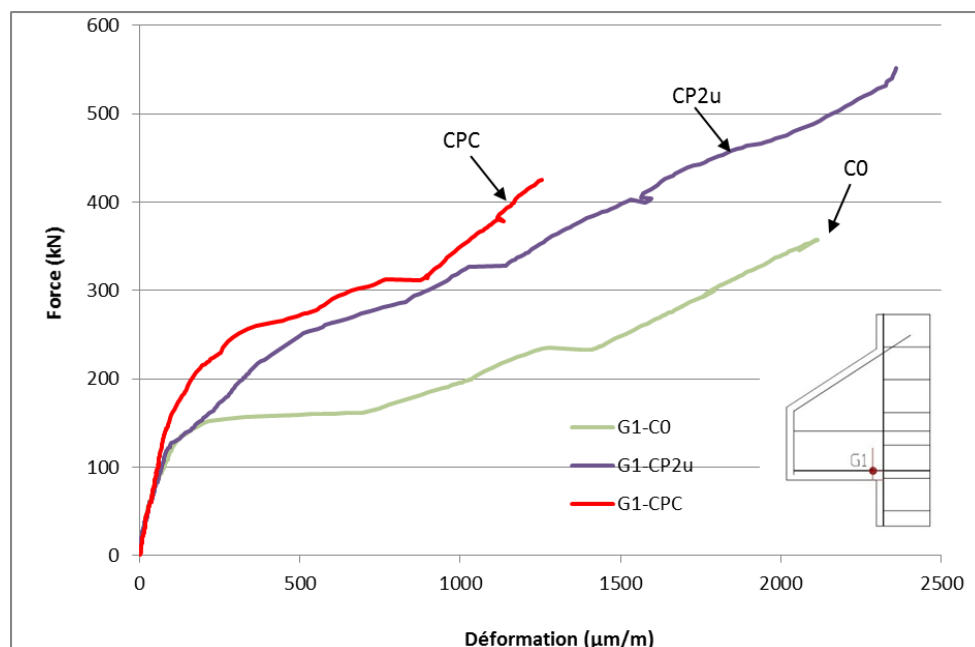


Figure 4. Comparaison des déformations du tirant au point G1 en fonction du type de plaques composites.

Sur la Figure 4 on compare les déformations des différents types de matériaux composites (CP2u et CPC), par rapport à celles de la console non renforcée (C0). La contribution de lamelles « Sika CarboDur » à la résistance est très importante. On constate que l'apparition prématurée des premières fissures obliques se produit à une charge de 310 kN environ. Les résultats montrent également que la console renforcée par des lamelles « Sika CarboDur » se déforme moins ($2800 \cdot 10^{-6}$ comme le montre sur la Figure 5) que celle renforcée par les tissus en fibres de carbone CP2u ($9500 \cdot 10^{-6}$).

La Figure 5 présente l'influence du type de plaque composite sur les déformations locales au point GC1 de la console. Les jauges sont collées sur le matériau composite au point « GC1 » dans la section d'encastrement des différentes consoles renforcées CP2u, CP3u et CPC. On constate que le premier palier est presque similaire pour les trois spécimens. De grandes différences de comportement apparaissent entre la console CP2u et les consoles CP3u et CPC après le premier palier.

La Figure 5 montre que l'augmentation de la rigidité entraîne également le décollement de la plaque composite à ses extrémités. La rupture est fragile. Les charges de rupture enregistrées sont: 380 kN pour CP3u, 440 kN pour CPC et 552 kN pour CP2u. Les gains en charge par rapport à la console de référence C0 sont respectivement 6 %, 33 % et 52 %.

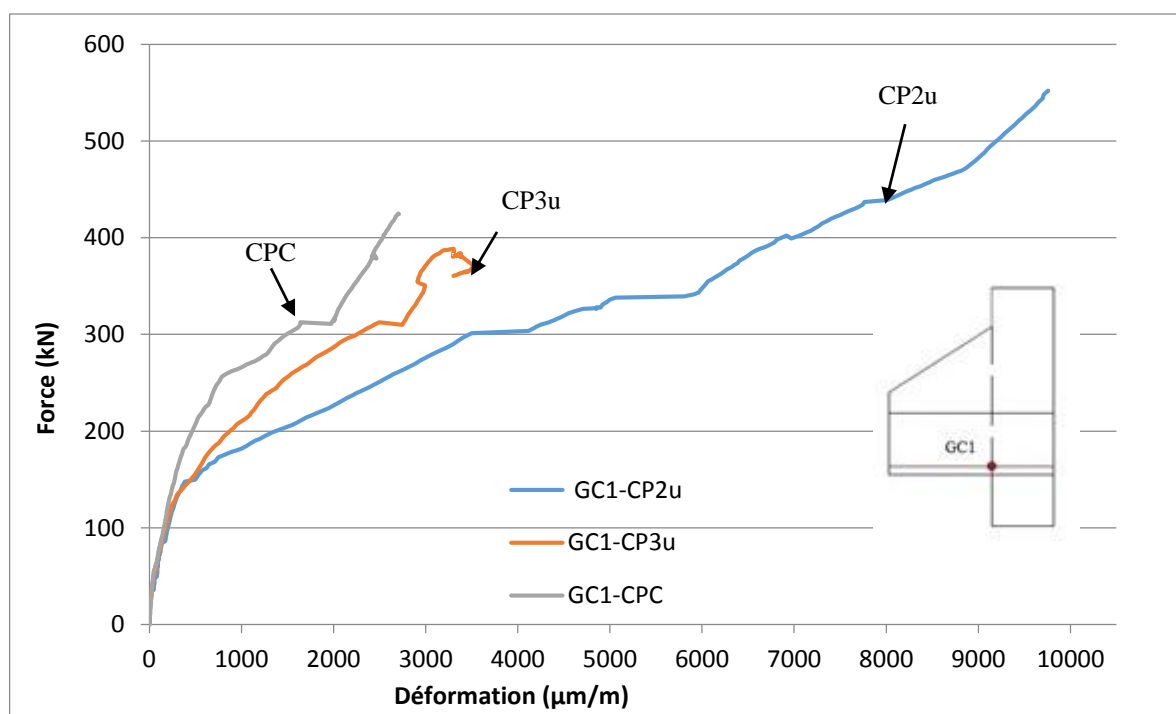


Figure 5. Comparaison des déformations des différentes plaques composites au point GC1

3.2.2 Différents domaines de comportement des consoles renforcées

Les résultats obtenus montrent principalement 3 domaines de comportement différents :

- ◆ Le domaine élastique où les déformations de l'acier, du béton et du tissu en fibres de carbone croissent de manière linéairement en fonction de la charge appliquée.
- ◆ Le deuxième domaine est caractérisé par l'apparition des premières fissures dans le béton tendu.
- ◆ Dans le troisième domaine, on a l'apparition des fissures diagonales due à l'effet de l'effort tranchant.

L'apparition des paliers marque aussi le changement de comportement de la structure. Parallèlement aux mesures de charge et de déformations, nous avons suivi l'évolution de la fissuration des corps d'éprouve.

3.3 Modes de rupture des consoles renforcées

Le Tableau 1 présente les modes de ruptures, les valeurs de charge à laquelle apparaissent la première fissuration, la fissure oblique et la charge ultime.

Tableau 1. Charges caractéristiques et types de ruptures des consoles renforcées par plaques sur les 2 faces

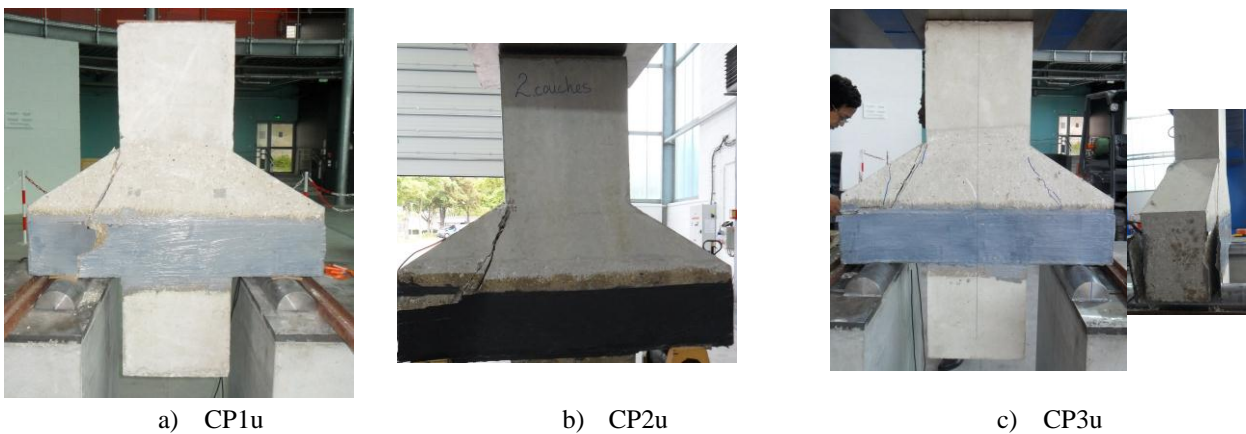
Notation	F ₁ (kN)	F ₂ (kN)	F _u (kN)	Mode de rupture
C0	60	235	357	Rupture par fendage diagonal
CP1u	140	246	532	Rupture de la plaque
CP2u	145	325	552	Rupture par fendage diagonal + décollement de la plaque
CP3u	145	310	380	Rupture par fendage diagonal + décollement de la plaque
CPC	150	309	440	Rupture compression + décollement de la plaque

F₁=charge correspondant à l'apparition de la Première fissuration,
 F₂=Charge correspondant à l'apparition de la fissure oblique,
 F_u=charge ultime.

La rupture fragile de la console de référence (**C0**) survient par fendage diagonal, comme indique la figure 7a. La première fissure s'amorce dans la partie supérieure entre la console et le poteau à partir de 60 kN. Par contre, la fissure oblique commence au niveau de l'appui à partir de 235 kN et se propage vers la partie supérieure de la section d'encastrement. Il s'agit comme le montre la figure 7a, de la fissure de flexion verticale jusqu'au niveau de l'axe neutre puis s'inclinant à 65 degrés. En revanche, la figure 6a présente le mode de rupture de la console CP1u, qui se solde par la rupture de la plaque composite. On atteint la limite admissible du tissu en fibres de carbone. La fissure s'initie verticalement puis s'incline de 67 degrés environ. La charge correspondante aux premières fissures a augmentée de plus du double grâce à l'effet du renforcement.

Dans le cas du renforcement par plaques de deux cotés (CP2u), la ruine se produit par décollement de la plaque à ses extrémités. La charge des premières fissures augment également grâce à l'effet du renforcement. En revanche, la charge F₂ (Figure 6b) à l'apparition de la fissure diagonale est supérieure du tiers à celle de la console non renforcée. Notons par ailleurs que la rupture de la console CP3u s'est produite par décollement de la plaque à ses extrémités, voir Figure 6c. L'augmentation de la charge des premières fissures est presque identique à celle de CP2u. Par contre, on note une diminution de la charge F₂ correspondant à l'apparition de la fissure diagonale.

En conclusion, on peut dire que plus l'épaisseur de la plaque composite croit et plus apparait de façon prématurée le décollement de la plaque.

**Figure 6.** Ruptures des consoles renforcées

Pour la console renforcée avec des lamelles «Sika CarboDur» (**CPC**), la rupture est provoquée par une compression du béton dans la partie supérieure de la section d'encastrement suivie d'une fissure diagonale et des décollements des lamelles à leurs extrémités, Figure 7b. Le décollement de la plaque est prématuré à cause probablement de la rigidité des lamelles « Sika CarboDur ».



a) C0

b) CPC

Figure 7. Ruptures des consoles C0 et CPC

4 Conclusion

Le renforcement des consoles courtes en béton armé par collage des tissus en fibres de carbone, augmente très sensiblement la charge portante de 6 à 55% selon les différents paramètres étudiés.

Cette étude expérimentale sur l'influence de l'épaisseur du tissu composite en fibres de carbone montre qu'une plaque de 2 couches de tissus en fibres de carbone soit environ 3 mm permet un renforcement efficace.

Le choix des matériaux est important et permet d'obtenir une charge ultime maximale.

Trois domaines de fonctionnement d'une console renforcée sont mis en évidence: domaine élastique, domaine d'initiation et de propagation des fissures et le domaine instable caractérisé par l'apparition de la fissure diagonale.

On observe principalement 3 types de ruptures: rupture par plaque composite en fibres de carbone, rupture par fendage diagonal + décollement de la plaque, rupture par compression + décollement.

5 Bibliographie

- [ANI 12] ANIS A. M-A, MUHAMMAD A. A., « Experimental behaviour of reinforced concrete corbels strengthened with carbon fibre reinforced polymer strips », *Basrah Journal for Engineering Science*, 2012. pp 31-45.
- [ASS 98] ASSIH J. "Contribution à l'étude du Renforcement et de la Réparation de Poutre en Béton Armé par Collage de Plaques Composites en Fibres de Carbone", Thèse de doctorat, UFR Sciences de Reims, 1998.
- [BOU 01] BOURGET M., DELMAS Y. and TOUTLEMONDE T., « Experimental study of the behavior of reinforced high-strength concrete short corbel », *Materials and Structures*, Vol.34, April 2001, pp. 155-162.
- [COR 01] CORRY R.W., DOLAN C.W. « Strengthening and Repair of a Column Bracket Using a Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabric », *PCI JOURNAL*, January-February 2001
- [DEL 85] DELMAS Y., Contribution à l'étude théorique et expérimentale du collage de tubes métalliques par l'intermédiaire de résines époxydes; Thèse de Doctorat 3ème cycle, U.E.R. Sciences de Reims, 1985
- [ELG 05] ELGAWADY, M. A., RABIE M., MOSTAFA M.T., « Strengthening of corbels using CFRP an experimental program », *Building and Structural Engineering* 2005 Cairo University, Giza, Egypt.
- [GIL 78] GILBERT Y., "Contribution à l'étude de l'adhésivité des matériaux collés par l'intermédiaire de résines époxydiques", Thèse ès Sciences Physiques, U.E.R. Science s des Reims, 1978.
- [IVA 13] IVANOVA I. " Comportement mécanique des consoles courtes en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composites", Thèse de doctorat, UFR Sciences de Reims, 2013.