

# ANALYSE PAR ELEMENTS FINIS DES POUTRES EN BETON ARME RENFORCEES PAR DES FIBRES DE CARBONE CFRP

BAROUR Sabiha et ZERGUA Abdesselam

Département de génie civil, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université des frères Mentouri Constantine1.  
Algerie.

Reçu le 18/04/2018 – Accepté le 02/02/2020

## Résumé

Le présent article concerne la modélisation par éléments finis des poutres en béton armé renforcées à l'extérieur par des fibres de carbone (PRFC). Les éléments Soild65, Link 180, Shell181 et Solide 185 qu'offre le logiciel ANSYS ont été utilisés pour modéliser ; le béton, le renfort en acier ; le polymère et le support des plaques d'aciers, respectivement. Cinq modèles pour cinq types de poutres on été validé et une étude paramétrique à savoir, l'effet de résistance à la compression du béton, l'effet du nombre de couches de PRFC et l'effet de différents modules d'élasticités de PRFC ainsi qu'une étude comparative avec des modèles analytiques ont été réalisées. Les résultats numériques des charges - déplacements ont été comparés aux données expérimentales mesurées. Il a été observé une bonne approximation à tous les stades de chargement pour les échantillons testés. Les différences entre les capacités des charges varient de 0.03% à 11.34%, et celles des déformations varient de 0.241% à 7.25 %. Ceci démontre la validité des modèles développés pour la prédiction du comportement des poutres renforcées.

**Mots clés** : modélisation, poutres renforcées, PRFC, ANSYS.

## Abstract

This paper presents a nonlinear finite element model to predict the response of an externally reinforced concrete beams using carbon fiber (CFRP). The elements Soild65, Link 8, Shell181 and Solid 185, that offers ANSYS software, were used to model; the concrete, the steel reinforcement; the polymer and the support of the steel plates, respectively. Five models were validated for five types of beams and a parametric study such as, the effect of compressive strength of concrete, the number of layers of CFRP and the effect of different modulus of elasticity of CFRP was performed. The numerical results were also compared to the experimental data. A good agreement was found between predictions and experimental data at all stages of loading for the tested samples. The differences between the load capacities were about 0.03% to 11.34%. However, they are about 0.241% to 7.25% for the strains. This demonstrates that the developed models can be used in predicting the reinforced beam behavior.

**Keywords**: modeling, reinforced beams, CFRP, ANSYS.

## المخلص.

تهتم هذه الورقة بنمذجة، بواسطة العناصر المحددة، لروافد الخرسانة المسلحة المقاومة خارجياً باستخدام المواد المركبة (PRFC). تم استخدام العناصر Soild65 و Link 180 و Shell181 و Solid 185 التي يوفرها برنامج ANSYS لنمذجة الخرسانة ، حديد التسليح. المواد المركبة ولوحات الدعم بالحديد ، على التوالي. لقد التحق من صحة خمسة نماذج لخمسة أنواع من الروافد وكذلك دراسة تأثير عدة عوامل كقوة الضغط للخرسانة ، وتأثير عدد طبقات PRFC وتأثير معامل مرونة PRFC. كما تم إجراء دراسة مقارنة للمعطيات التجريبية مع النماذج التحليلية. و تم مقارنة النتائج الرقمية للأحمال والإزاحات مع البيانات التجريبية المقاسة. و قد لوحظ تقارب جيد بين النتائج الرقمية و التجريبية في جميع مراحل التحميل للعينات التي تم اختبارها. تختلف الفروق بين سعة التحميل من 0.03% إلى 11.34% ، وتختلف الإزاحة من 0.241% إلى 7.25%. هذا ما يثبت إمكانية استخدام نموذج العناصر المحددة المقدم بهذا البحث للتنبؤ بسلوك رافدة الخرسانة المدعمة.

**الكلمات المفتاحية** : تصميم ، الروافد المسلحة ، ANSYS ، PRFC

## INTRODUCTION :

En général, les matériaux composites ont de bonnes propriétés physiques et mécaniques, telles qu'une haute résistance, une bonne capacité d'amortissement, une fabrication légère et facile à mettre en œuvre, ainsi qu'une haute résistance à la corrosion. [ 1 ]

De nombreuses études portant sur le renforcement en flexion des poutres en béton armé ont rapporté que le matériau composite (PRFC) augmente la résistance et la ductilité de ces éléments structurels. [ 2- 4 ]

Ashour et al. [5] ont testé 16 poutres continues en béton armé (BA). Les poutres avaient différentes barres d'acier et des stratifiés de polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Ils ont conclu que toutes les poutres renforcées présentaient des capacités plus élevées comparativement aux poutres de contrôle non renforcées. Ahmad et al. [6] ont constaté, quant à eux, une augmentation dans la rigidité de flexion et de la charge finale des poutres testées avec différents schémas de renforcement. L'augmentation de la résistance était évaluée de 41 à 125% selon Dong et al. [7]. Esfahani et al. [3] ont testé des poutres avec différents nombres de couches de PRFC ayant différentes dimensions. Ils ont conclu que la résistance à la flexion et la rigidité des poutres renforcées étaient plus élevées que celles des poutres non renforcées. De plus, les auteurs ont constaté que lorsque de faibles rapports de renforcement étaient utilisés, la résistance à la flexion des poutres était surestimée. Soudki et al. [8] ont étudié le comportement des poutres en béton armé renforcées de PRFC dans un environnement corrosif. Ils ont conclu que les poutres renforcées produisaient le double de la résistance des poutres non renforcées même lorsqu'elles étaient soumises à un environnement difficile. La ductilité à la flexion des poutres renforcées de PRFC ont fait l'objet de l'étude de Aboutaha et al. [9]. Les auteurs ont conclu que la ductilité en flexion s'améliorait en augmentant le renfort en acier. De plus, la fourniture d'ancrages dans le système de renforcement empêchait le délaminage des feuilles de PRFC qui augmentait la ductilité en flexion des poutres renforcées. Il existe de nombreuses autres études expérimentales sur le comportement en flexion des poutres renforcées avec des couches en PRFC, [10] - [11]. Ils ont tous indiqué que les modes de défaillance, y compris le délaminage PRFC, limitaient l'effet de renforcement.

L'analyse par éléments finis a également intéressé beaucoup de chercheurs. Amer et al. [12] ont utilisé le programme ANSYS pour simuler le comportement des poutres renforcées par des fibres de carbone. Les résultats des courbes de charge-déformation montrent un bon accord avec les données expérimentales disponibles dans la littérature. Les modes des ruptures, également, correspondent bien avec ceux observés dans l'expérimentation. Amer et al. [13] ont aussi modélisé des poutres renforcées extérieurement par des couches de PRF. Le modèle d'éléments finis était développé en utilisant une approche de fissuration répartie pour le béton. Les courbes charge-déformation de l'analyse par éléments finis concordaient bien avec les résultats

expérimentaux dans la gamme linéaire. Cependant, elles sont légèrement plus rigides que celles des résultats expérimentaux. Ramezani pour et al [14] ont montré l'efficacité du modèle numérique sous ANSYS pour étudier le renforcement des poutres par des plaques en PRF, collées extérieurement. Leur modèle par éléments finis a permis l'optimisation du mode de rupture dans ces poutres. Abbas et al. [15] ont utilisé ANSYS pour analyser la réponse des poutres renforcées par des plaques d'acier et de PRFC en termes de charge appliquée. Les courbes charge-déformation à mi-portée ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux et d'autres résultats numériques disponibles. Fathelbab et al. [16] ont analysé l'effet de la flexion, cisaillement et leur combinaison dans les poutres renforcées par différents schémas de feuilles de PRF. La comparaison des résultats a montré que les poutres renforcées ont plus de capacité et une amélioration notable de ductilité par rapport à la poutre de contrôle. Jayajothi et al. [17] ont réalisé des modèles d'éléments finis non linéaires des poutres renforcées en flexion et en cisaillement par des couches de polymère (PRF) et ont constaté que la capacité de charge limite de toutes les poutres renforcées était supérieure à celle des poutres de contrôle et que le comportement des poutres était similaire entre les modèles d'éléments finis et les résultats expérimentaux à toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine. Umesh et al. [18] ont travaillé sur des modèles d'éléments finis non linéaires en trois dimensions. Les poutres ont été renforcées extérieurement par des fibres de carbone renforcé les polymères (PRFC) ayant différentes longueurs.

Dans ce même contexte, le présent article expose le développement de modèles numériques des poutres en béton armé, sans étriers, renforcées par le matériau composite (PRFC). Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux rapportés par Ahmed K. El-Sayed [19]. Une bonne corrélation et un haut niveau de précision ont été observés. Une étude paramétrique, notamment, l'effet de la résistance à la compression du béton, l'effet de nombre de couches de PRFC et l'effet du module d'élasticité de PRFC a également été réalisé.

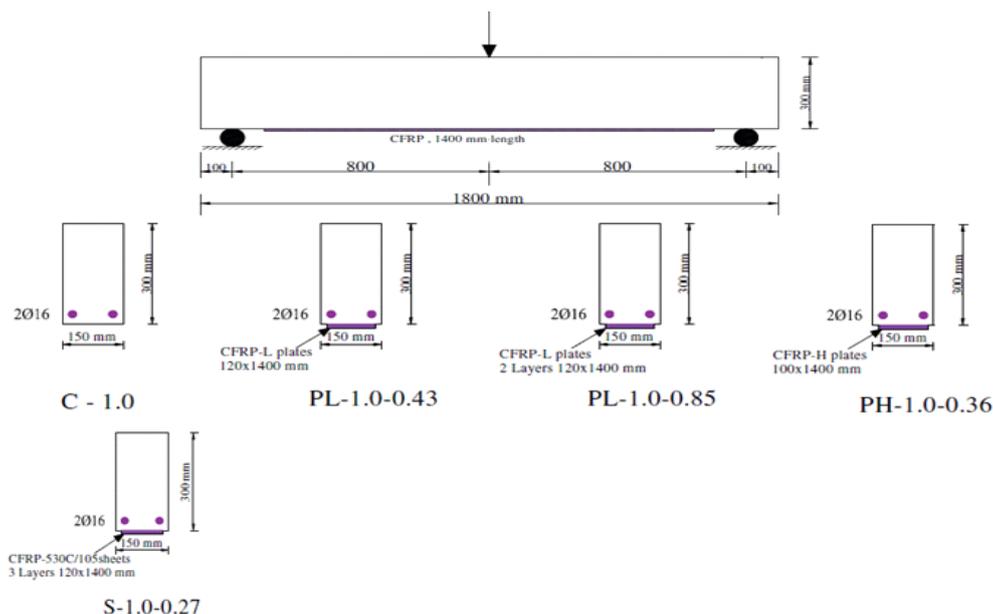
## 2. MODELISATION DES POUTRES

Le logiciel ANSYS 12.0 [20] est utilisé pour développer des modèles en élément finis des poutres en béton armé renforcées par des couches PRFC, soumises à la flexion trois points. Les poutres ont les mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques testées expérimentalement par Ahmed K. El-Sayed [19].

Au total cinq poutres en béton armé ont été construites et testées jusqu'à la rupture. Les poutres mesuraient 1800 mm de long, 150 mm de large et 300 mm de hauteur. Les poutres ont été divisées en fonction de la quantité de PRFC et du module d'élasticité. Cinq poutres renforcées avec deux barres d'acier 16 mm de diamètre comme armature principale de traction, donnant un taux de renforcement ( $\rho_s$ ) de 1,0% et des plaques en PRFC collées sur leurs faces tendues. Le tableau 1 et la figure 1 donnent les détails de ces poutres.

Poutres		Renforcement externe du PRFC			
		$E_f$ (GPa) du PRFC	Épaisseur (mm)	Nombre de couches	Largeur de la couche (mm)
Série I	C-1.0	-	-	-	-
	PL-1.0-0.43	165	1.4	1	120
	PL-1.0-0.85	165	1.4	2	120
	PH-1.0-0.36	300	1.4	1	100
	S-1.0-0.27	240	0.3	3	120

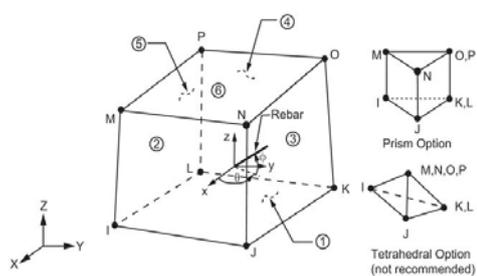
**Tableau 1** : Détails des poutres d'essai. Ahmed K. El-Sayed [19]



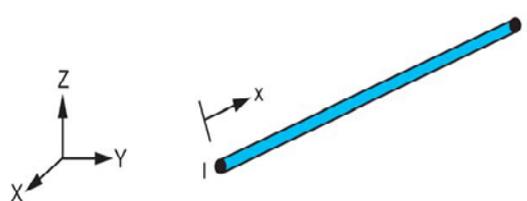
**Figure 1** : Détails du programme expérimental Ahmed K. El-Sayed [19].

### 2.1. Description des types d'éléments

ANSYS est un logiciel de modélisation par éléments finis utilisé pour résoudre une grande variété de problèmes, dont l'analyse structurelle (linéaire et non linéaire). dans ce travail (les poutres en béton renforcé par PRFC), il utilise les modèles à éléments finis ANSYS12. Plusieurs types d'éléments finis ont été utilisés. Le béton a été modélisé à l'aide de l'élément solide à huit nœuds avec trois degrés de liberté par nœud Solid65 [20]. Cet élément a la capacité de fissuration en tension et écrasement en compression. Un élément Link 180 a été utilisé pour modéliser le renfort en acier. Deux nœuds sont nécessaires pour cet élément. Chaque nœud possède trois degrés de liberté. L'élément est également capable d'avoir des déformations plastiques [20]. L'élément Shell181 est utilisé pour la modélisation de polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). C'est un élément à quatre nœuds à six degrés de liberté par nœud [20]. L'élément Solide185 est utilisé pour la modélisation de support des plaques d'acier défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté par nœud. Cet élément est capable d'avoir des déformations plastiques et de fluage [20].



a: Solid65



b: Link180

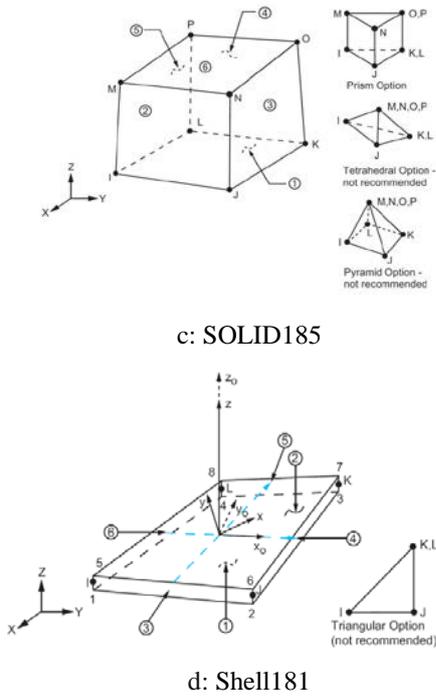
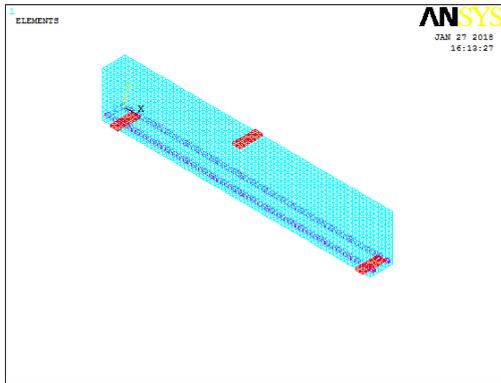
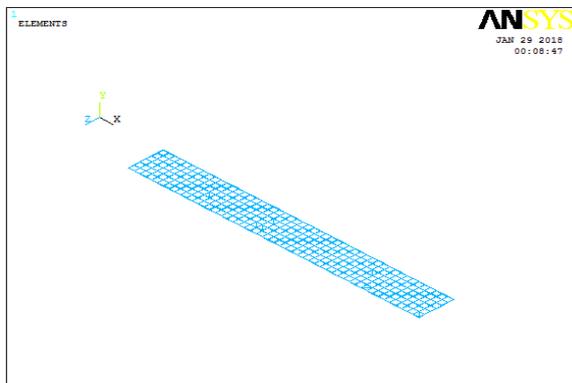


Figure 2 : Configuration des éléments utilisés

Les figures 3a et 2b présentent la modélisation des poutres étudiées.



(a) : Modélisation des poutres



(b) : Modélisation des PRFC

Figure 3 : Modélisation des poutres étudiées.

## 2.2. Propriétés des matériaux

### 2.2.1. Le Béton

Les propriétés mécaniques des différents matériaux utilisés dans les modèles d'éléments finis développés sont fournis dans le tableau 2 tel que rapporté par Ahmed K. El-Sayed [19].

	Propriété matérielle	Valeur
Béton	28 jours de résistance à la compression du béton	42.7 - 33.5 N/mm <sup>2</sup>
	Le coefficient de Poisson	0.2
L'acier	Module d'élasticité	200 000 N/mm <sup>2</sup>
	Le coefficient de Poisson	0.3
	Rendement limite	562 N/mm <sup>2</sup>

Tableau 2 : Propriétés matérielles du béton et de l'acier d'armature [19].

La relation contrainte-déformation uniaxiale en compression pour le modèle en béton est celle proposée par figure 4.

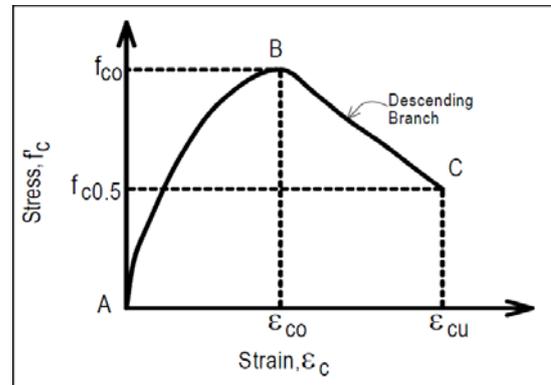
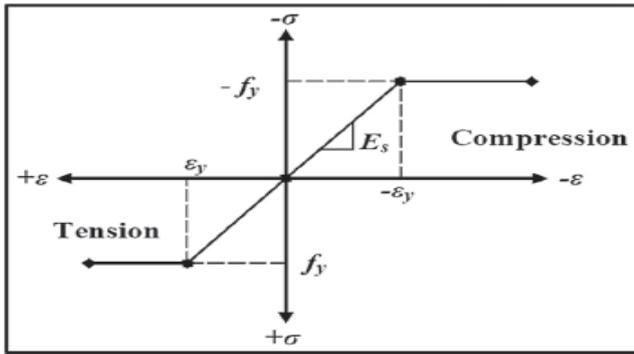


Figure 4 : Courbe de contrainte-déformation uniaxiale compressive simplifiée pour le béton .

### 2.2.2 .Acier

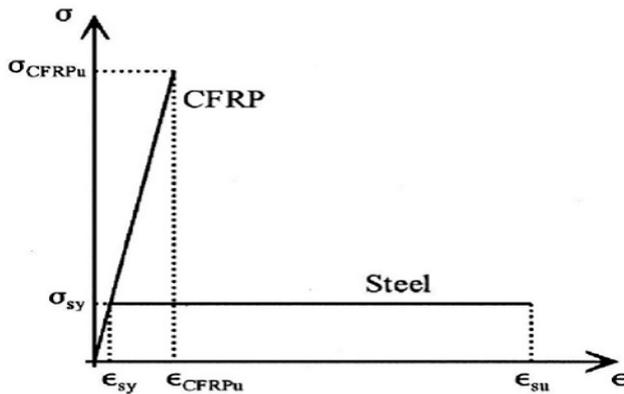
L'acier est supposé être un matériau élastique-parfaitement plastique avec un comportement identique en traction et en compression. Figure 5.



**Figure 5 :** Relation contrainte-déformation pour l'acier. [21]

**2.2.3. PRFC**

Les propriétés de traction de la plaque d'acier structurelle (utilisée pour les charges et les supports ci-dessus) sont montrées sur la figure 6 qui montre également les propriétés de tension unidirectionnelle des bandes CFRP utilisées (dans la direction des fibres) à des fins de comparaison [22].



**Figure 6:**Graphique comparatif de la relation contrainte-déformation idéalisée pour la plaque d'acier structurelle et le PRFC [22].

Le tableau 3 présente les propriétés de certains types des plaques (PRFC).

Type PRFC	$E_f$ (GPa)	Épaisseur (mm)	Nombre de couches
Plaques à faible module	165	1.4	1
Plaques à faible module	165	1.4	2
Plaques à haut module	300	1.4	1
Feuilles de carbone	240	0.3	3

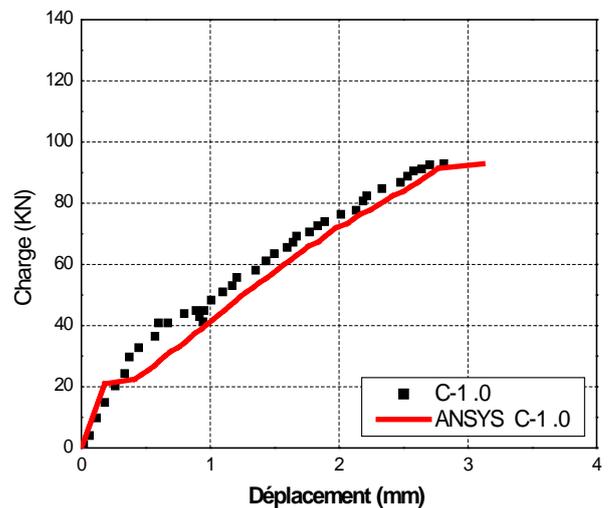
**Tableau 3 :** Propriétés matérielles du PRFC [19].

**3. RESULTATS ET DISCUSSION**

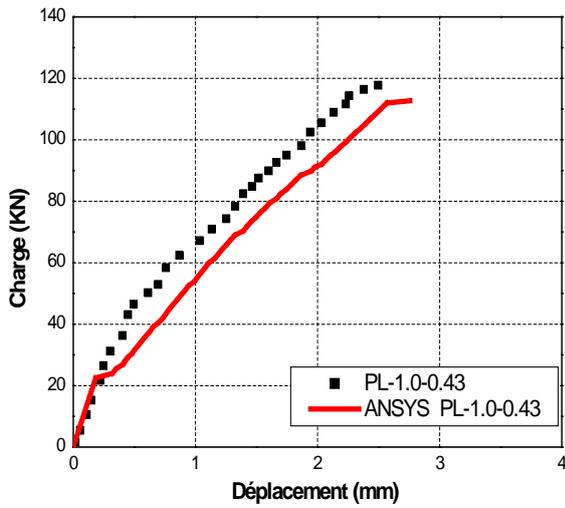
**3.1. Validation du modèle**

L'analyse non linéaire par éléments finis a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS pour un chargement incrémentiel statique. La liaison entre le béton et l'acier d'armature et le béton et la couche PRFC est supposée parfaite. Les déformations des poutres sont mesurées à mi-portée. Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux rapportés par Ahmed K. El-Sayed [19]. Les figures 7 (a-e) montrent une comparaison entre les courbes charge – déformation à tous les stades du chargement jusqu'à la ruine.

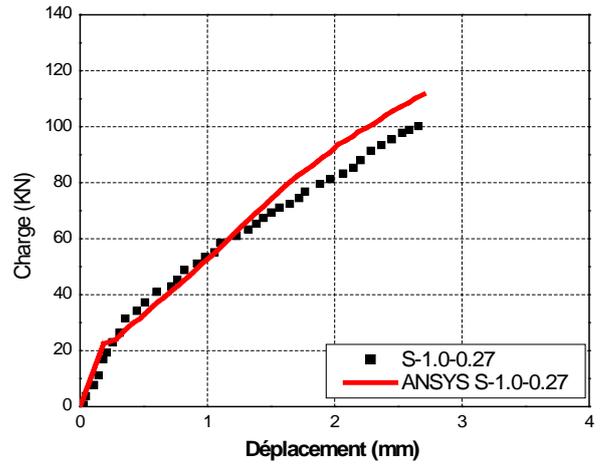
Le tableau 4 résume, respectivement, les valeurs des capacités des charges expérimentales et prédites et les déformations correspondantes des poutres testées. On constate à partir de ce tableau que la variation de la charge ultime numérique (prévue par le modèle d'éléments finis) par rapport à celle de l'expérimentation est de 0.03% à 11.34%, dépendamment du type de la poutre. Tandis que, cette variation est de 0.241% à 7.25 % pour le cas de la déformation. Les figures 7(a-e) et le tableau 4 montrent clairement un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux à toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine des poutres. Toutes les poutres renforcées ont montré un comportement plus rigide par rapport à la poutre non renforcée. Ainsi, les modèles d'éléments finis représentés par cette recherche sont capables de prédire la capacité de charge et le comportement des poutres testées.



(a) : Poutre C-1.0

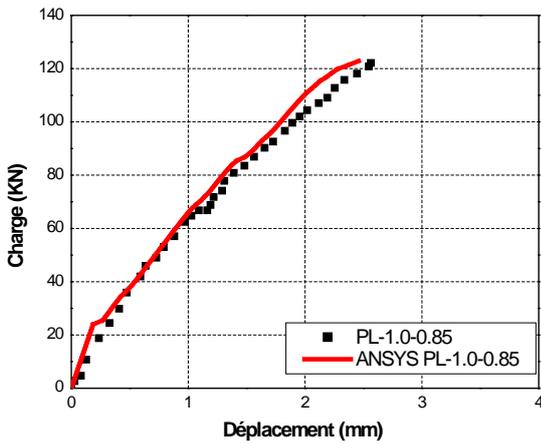


(b) : Poutre PL-1.0-0.43

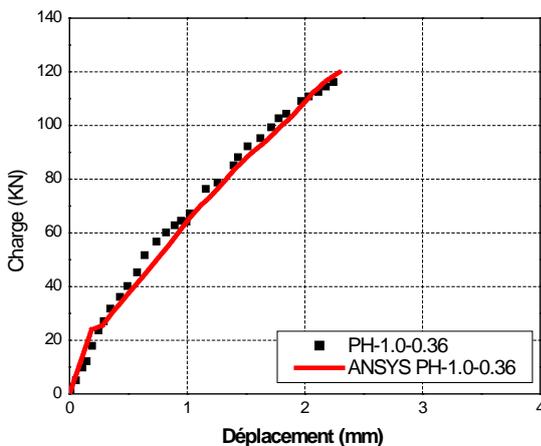


(e) : Poutre S-1.0-0.27

**Figure 7:** Courbes charges - déplacements pour différents types de poutres



(c) : Poutre PL-1.0-0.85



(d) : Poutre PH-1.0-0.36

Comparaison entre les données expérimentales et les résultats numériques.

Poutres	Logiciel ANSYS	Charge ultime (KN)		Différence % (Exp-Ansys) ×100/Exp	Déformation (mm)		Différence % (Exp-Ansys) ×100/Exp
		Exp	ANSYS		Exp	Anslys	
C-1.0	ANSYS C-1.0	92.905	92.876	0.03	2.814	3.116	-4.48
PL-1.0-0.43	ANSYS PL-1.0-0.43	117.760	112.724	4.27	2.497	2.757	2.08
PL-1.0-0.85	ANSYS PL-1.0-0.85	122.148	122.836	-0.56	2.564	2.459	6.57
PH-1.0-0.36	ANSYS PH-1.0-0.36	116.216	119.840	-3.11	2.243	2.2933	-7.25
S-1.0-0.27	ANSYS S-1.0-0.27	100.226	111.601	-11.34	2.659	2.7000	-0.241

**Tableau 4 :** Validation du modèle

### 3.2. Comportement du modèle numérique

Avoir un modèle d'éléments finis fiable et validé est avantageux par rapport aux données mesurées expérimentalement dans de nombreux cas. Les résultats expérimentaux sont généralement limités à ceux enregistrés par les jauges de contrainte et LVDT fixés à quelques points dans la poutre à un moment ou à une charge spécifiés. Pour cela, la modélisation par éléments finis présente un avantage par rapport aux essais expérimentaux. Elle permet également d'étudier différents cas qui ne peuvent être mesurés expérimentalement, y compris les valeurs de déformation à différents endroits le long des poutres.

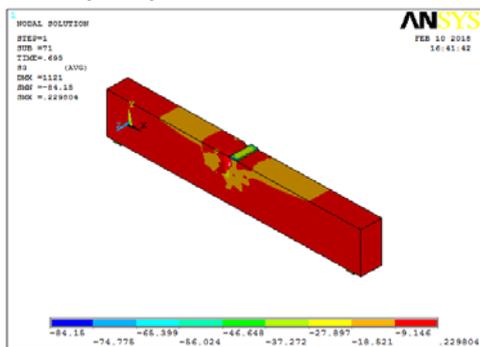
Le modèle numérique donne les déformations complètes et les contraintes tout au long des poutres. Le tableau 5 résume les valeurs des déformations des poutres testées pour différentes couches de PRFC. La poutre non

renforcée ANSYS C1.0 a montré la valeur de la déformation maximale à mi-portée de 2,94 mm à la charge de rupture.

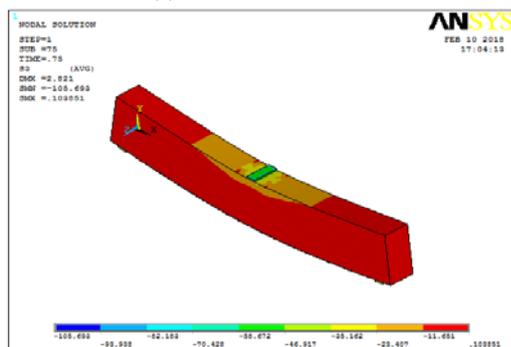
Les poutres renforcées par (PRFC)	Déformations (mm)
ANSYS C1.0	2.94
ANSYS PL-1.0-0.43	2.445
ANSYS PL-1.0-0.85	2.395
ANSYS PH-1.0-0.36	2.406
ANSYS S-1.0-0.27	2.665

**Tableau 5 :** Valeurs des déformations par logiciel ANSYS

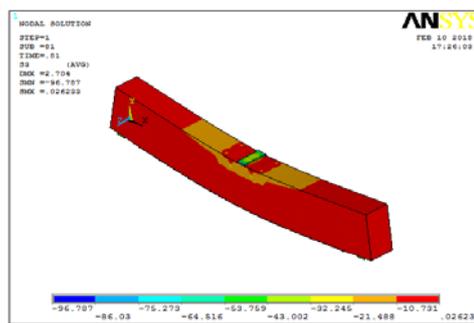
De plus, les modèles numériques développés peuvent fournir les résultats des champs complets des contraintes. La figure 8 montre la distribution de la contrainte principale dans toutes les poutres testées. La courbe de contour de la contrainte principale montre une forte concentration de contraintes de compression sur la face supérieure du modèle d'élément finis. D'autre part, les poutres renforcées par les couches de PRFC ont donné des valeurs maximales de contrainte à mi-portée. La poutre non renforcée a enregistré la plus faible valeur de la contrainte principale.



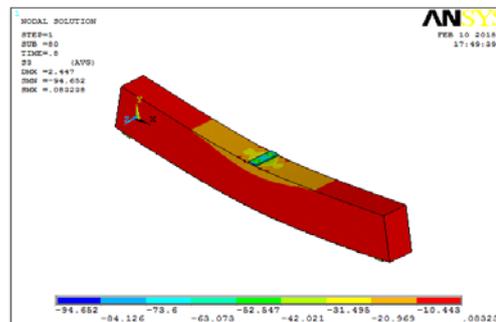
(a) : Poutre ANSYS C1.0



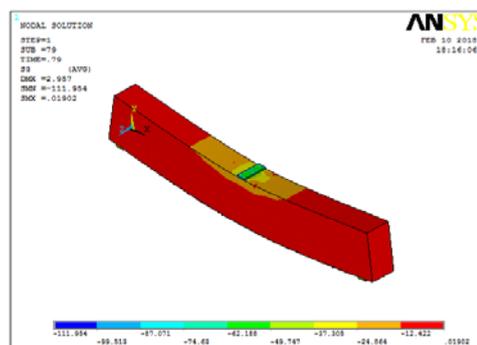
(b) : Poutre ANSYS PL-1.0-0.43



(c) : Poutre ANSYS PL-1.0-0.85



(d) : Poutre ANSYS PH-1.0-0.36



(e) : Poutre ANSYS S-1.0-0.27

**Figure 8 :** Répartition des contraintes principale à la rupture. - Poutres teste -

### 3.3. Evolution des fissures

Le logiciel ANSYS enregistre un modèle de fissure à chaque étape de chargement appliqué. Les figures (9) à (13) montrent l'évolution des modèles de fissures développées pour chaque poutre à différentes étapes de chargement. La validation des modèles a été effectuée en comparant la réponse déformation - charge à mi-portée prévue et la capacité de charge ultime avec celles des données expérimentales mesurées pour les poutres testées. Il peut être remarqué que la formation de fissures s'initie, pour toutes les poutres, à proximité de la de mi-portée où la contrainte de flexion est la plus élevée.

Avec la croissance de la charge, les fissures de flexion supplémentaires s'ouvrent à l'intérieur de la portée. Cependant, en raison de la prédominance des contraintes de cisaillement, les fissures sont devenues progressivement plus inclinées et propagées vers le point de charge menant finalement à une rupture de tension en diagonale.

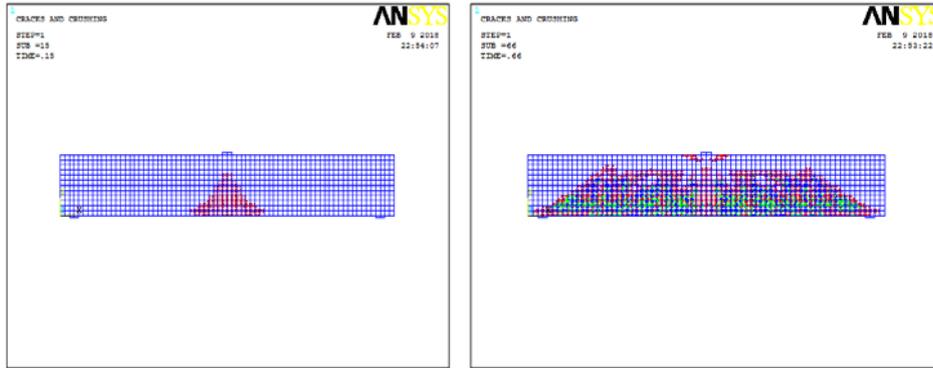


Figure 9: Propagation de fissures à différentes étapes de charge - poutre ANSYS C1 .0

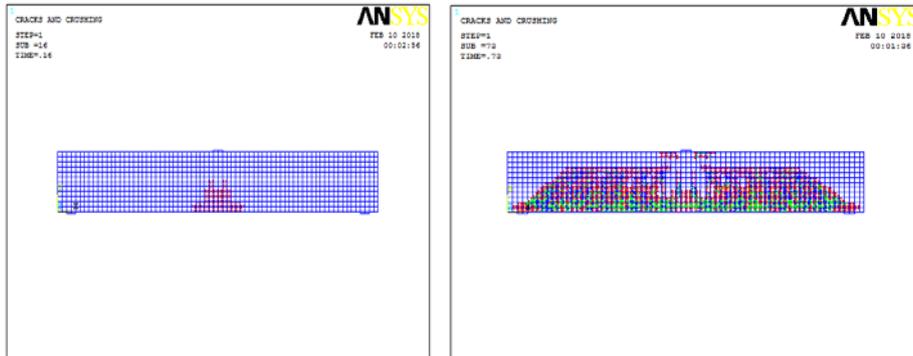


Figure 10: Propagation de fissures à différentes étapes de charge - poutre ANSYS PL-1.0-0.43

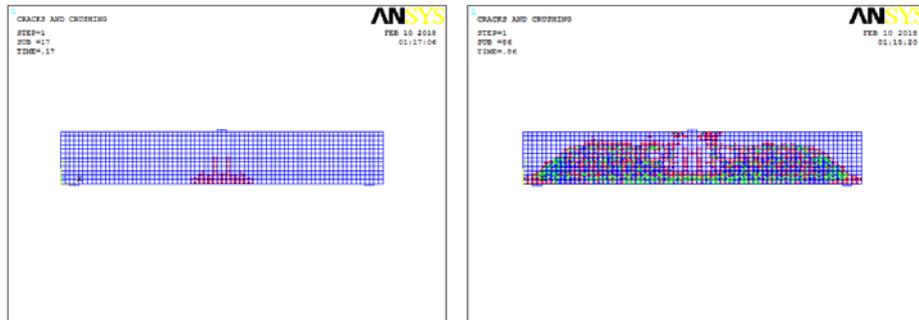


Figure 11: Propagation de fissures à différentes étapes de charge - poutre ANSYS PL-1.0-0.85

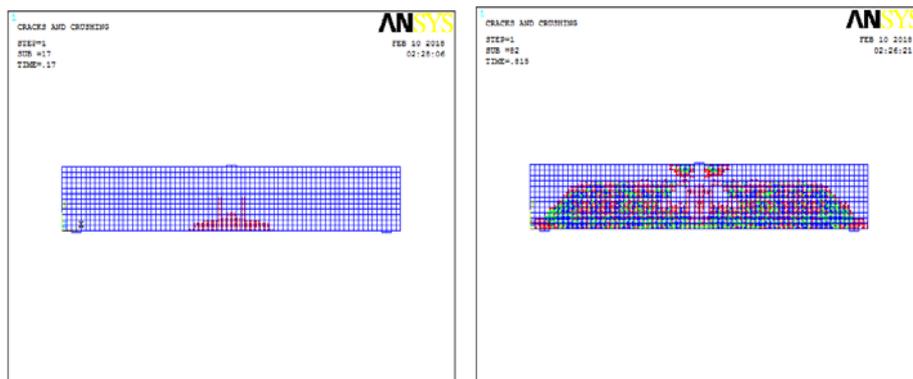
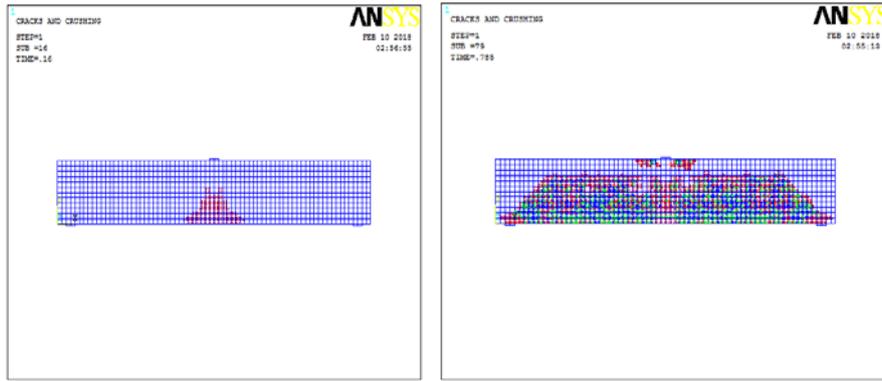


Figure 12: Propagation de fissures à différentes étapes de charge - poutre ANSYS PH-1.0-0.36



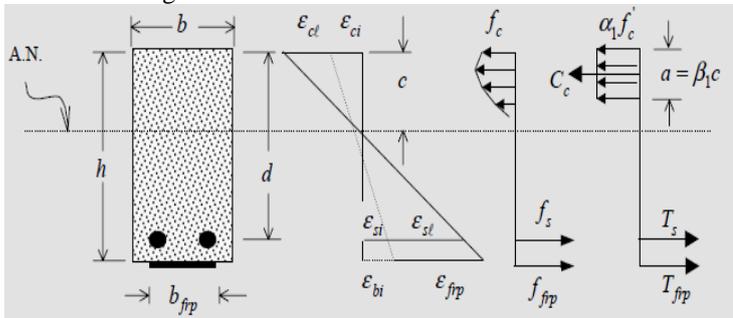
**Figure 13:** Propagation de fissures à différentes étapes de charge - poutre ANSYS S-1.0-0.27

**4. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET THEORIQUES PREDICTIONS**

Dans cette section, une analyse théorique est réalisée selon le modèle analytique du code ISIS Canada [23]. Ce code tend à estimer le comportement des poutres en béton armé renforcées extérieurement en PRFC. Le calcul se base sur l'estimation du moment ultime de flexion donné par la relation suivante.

$$M_u = \phi_s f_s A_s \left( d - \frac{a}{2} \right) + \phi_{f_{FRP}} E_{f_{FRP}} \epsilon_{f_{FRP}} A_{f_{FRP}} \left( h - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Les différents paramètres de la relation (1) sont présentés sur la figure 14.



**Figure 14 :** Distribution des contraintes et des déformations (armatures d'acier en tension seulement) [23]

**4.1. Évaluation du modèle analytique**

Les charges ultimes des poutres testées sont calculées à l'aide du code ISIS Canada [23]. Deux types de poutres en béton armé renforcées avec des couches de PRFC, sous flexion trois points, ont été étudiées. (Poutres : PL-1.0-0.43 et S-1.0-0.27). Le tableau 6 représente les valeurs des charges ultimes numériques et celles obtenues par le code ISIS. Il est clair qu'il existe un bon accord entre les deux approches.

Poutres	Charge ultime (KN) (ANSYS)	Charge ultime (KN) (ISIS)	Différence (%)
PL-1.0-0.43	112.7245	139.49	23.74
S-1.0-0.27	111.601	125.75	12.67

**Tableau 6 :** Comparaison des résultats numériques et analytiques

**5. ETUDE PARAMETRIQUE**

Après avoir établi la validité des modèles développés, on procède à une étude paramétrique où la résistance du béton, le nombre de couches en PRFC et l'effet des modules d'élasticité de PRFC sur le comportement des poutres ont été étudié

**5.1. Effet de résistance à la compression du béton**

Trois valeurs de la résistance à la compression du béton ( $f_c$ ) ont été prises en considération, à savoir : 42.7 MPa, 50 MPa et 55 MPa . La figure 15 montre les courbes charges - déplacements pour une poutre de type C-1.0 avec les trois valeurs de  $f_c$ . On peut voir sur la figure que la résistance du béton augmente la charge ultime du béton. L'augmentation est évaluée à environ 16.64% entre un beton de 47.2 MPa et 55 Mpa.

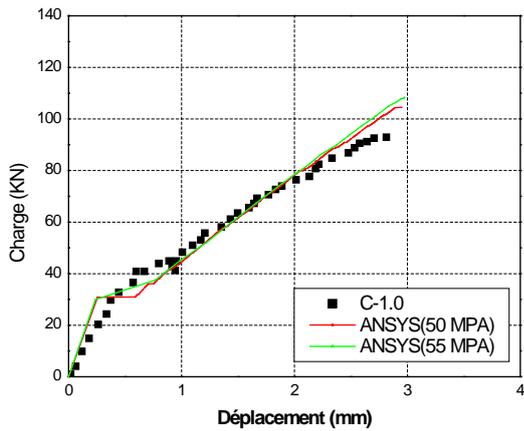


Figure 15 : Courbes charges - déplacements pour l'effet de résistance à la compression du béton

### 5.2. Effet du nombre de couches de PRFC

Quatre types de poutres ont été testés. Chaque poutre est renforcée par un nombre déterminé de couches de PRFC. On commence par une couche de 0.3 mm et on ajoutera une couche supplémentaire pour chaque poutre pour terminer avec quatre couches (1.2 mm d'épaisseur totale) pour la quatrième poutre. La largeur de la couche est de 120 mm, avec un module d'élasticité de 240 GPa. La figure 16 montre l'effet de différentes couches de PRFC sur la charge ultime de la poutre. Lorsque le nombre de couches augmente, la charge ultime augmente également. Cette différence est estimée à environ 23,74% entre la poutre non renforcée C-1.0 et la poutre ayant quatre couches de PRFC (1.2 mm). De même pour les déplacements. Plus le nombre de couches augmente, plus la rigidité de la poutre augmente et moins le déplacement est enregistré. La poutre ayant 4 couches de PRFC enregistre la plus grande rigidité et le plus faible déplacement.

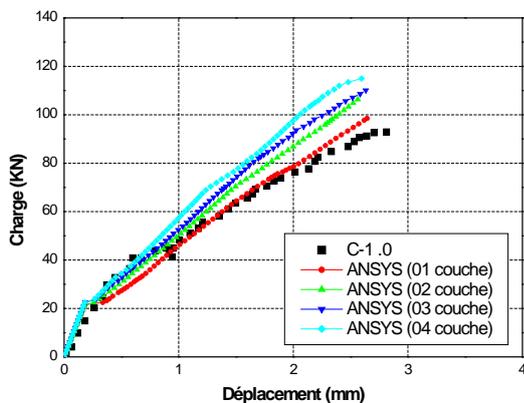


Figure 16 : Courbes charges - déplacements pour différents nombre de couches de PRFC

### 5.3. Effet de différent module d'élasticité de PRFC

Deux types de poutres ont été testés. Chaque poutre a les mêmes propriétés mécaniques et géométriques. Seuls les modules d'élasticité de PRFC changent. On prendra deux valeurs du module d'élasticité, soit 300GPa et 400GPa. La figure 17 montre que la charge ultime de la poutre augmente avec l'augmentation du module d'élasticité de la couche de renforcement. Comparé à la poutre PL-1.0-0.43 dont la couche PRFC ayant un module d'élasticité de 165 GPa, l'augmentation de la charge ultime induite par une couche PRFC ayant un module d'élasticité de 400 GPa est de 4.30%. Quant aux déplacements, il est clair que le module d'élasticité le plus faible induit le plus grand déplacement.

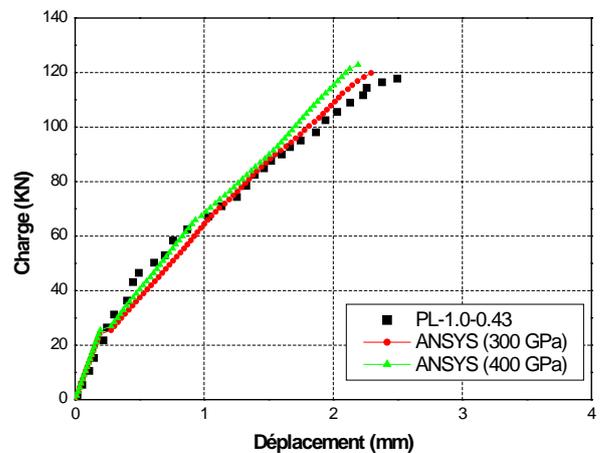


Figure 17 : Courbes charges - déplacements pour l'effet du module d'élasticité de PRFC

## 6. CONCLUSION

Cette étude a présenté le développement numérique d'un modèle pour simuler la réponse des poutres en béton armé renforcées extérieurement par des feuilles de PRFC soumises à un chargement statique.

Les observations et conclusions suivantes ont été tirées:

- Les modèles numériques peuvent prédire la charge ultime correspondant à la déformation maximale avec un niveau de précision raisonnable.
- Les différences entre les capacités des charges obtenues par le présent modèle et les données expérimentales varient entre 0.03% et 11.34% tandis que celles enregistrées pour les déformations varient entre 0.241% et 7.25 %.
- Les résultats des modèles numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux en termes de mécanisme de défaillance et de distribution structurale des fissures. Ils sont également en bon accord avec ceux du modèle analytique ISIS canada.

- Plus le nombre de couches de PRFC augmente, plus la rigidité de la poutre augmente par conséquent la charge de ruine augmente et le déplacement diminue.
- Plus le module d'élasticité de la couche de renforcement augmente plus la rigidité de la poutre augmente et moins est le déplacement.

## REFERENCES

[1] Hawileh, R. A., Naser, M. Z., & Abdalla, J. A. (2013). "Finite element simulation of reinforced concrete beams externally strengthened with short-length CFRP plates. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1722-1730.

[2] Riyad S. Aboutaha , "Ductility of CFRP Strengthened Concrete Flexural Members " Rehabilitating and Repairing the Buildings and Bridges of the Americas Conference, April 23-24, 2001

[3] M.R. Esfahani, M.R. Kianoush and A.R.Tajar, "Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets," *Eng. Structures*, vol. 29, no. 10, p. 2428–2444, Oct. 2007.

[4] FAREED, Shamsoon, et al. " Behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP wraps with and without end anchorages". *Procedia Engineering*, 2014, vol. 77, p. 123-130.

[5] A.F. Ashour, S.A. El-refaie , S.W.Garrity, "Flexural Strengthening of RC Continuous Beams Using CFRP Laminates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 7, pp. 765–775, Oct. 2004

[6] E. Ahmad and H. Sobuz, "Flexural Performance of CFRP Strengthened RC Beams with Different Degrees of Strengthening Schemes," *Int. J. Physical Sciences*, vol. 6, no. 9, pp. 2229–2238, May. 2011.

[7] J. Dong, Q. Wang and D. He Zhongwei Guan, "CFRP sheets for flexural strengthening of RC beams," *Multimedia Technology (icmt)*, Int. Conf., pp. 1000–1003, Jul. 2011.

[8] K. Soudki, E. El-salakawy and B.Craig, "Behavior of CFRP strengthened reinforced concrete beams in corrosive environment," *J. Composites for Construction*, vol. 11, no. 3, pp. 291–298, Jun. 2007.

[9] R. Aboutaha, P. Wattanadachachan and S.Kim, "Flexural Ductility of CFRP Strengthened Concrete Beams - Experimental Investigation," *ACI Special Publication*, vol. 213, no. 12, pp. 207–220, May 2003.

[10] P. Ritchie, D. Thomas, W.L. Lu and G. Connelly, "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics," *ACI Structural J.*, vol. 88, no. 4, pp. 490–500, Jul. 1991.

[11] A. Sharif, G. Al-sulaimani, I. Basunbul, M. Baluch and B. Ghaleb, "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates," *ACI Structural J.*, vol. 91, no. 2, pp. 160–168, Mar. 1994

[12] Amer M.Ibrahim , Wissam D.Salman , "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam

Strengthened with CFRP in Flexure", *Diyala Journal of Engineering Sciences*, Vol.2, No.2, pp.88-104. December 2009

[13] Amer. I, Mohammed .M, "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates", *European Journal of Scientific Research*, Vol.30, No.4, pp.526-541. (2009).

[14] Ramezaniyanpour A.A., Gharachorlou A. "Fracture optimization of RC beams strengthened with CFRP laminates with finite element and experimental methods", *concrete repair, rehabilitation and retrofitting II- Alexander et al*, Taylor and Francis Group, London, (2009), ISBN 978-0-415-46850-3.

[15] Abbas, A., , "Non-linear Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel and CFRP Plates", *Diyala Journal of Engineering Sciences*, pp. 249-256. (2010)

[16] F.A. Fathelbab, M.S. Ramadan, A. Al-Tantawy, " Finite Element Modeling of Strengthened Simple Beams using FRP Techniques: A parametric Study", *Concrete Research (LETTERS)*, Vol.2 (2), pp.228-240. June 2011

[17] P. Jayajothi, R. Kumutha and K. Vijai, "Finite Element Analysis of FRP Strengthened RC Beams Using ANSYS", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, Vol.14, No.4, pp.631-642.(2013)

[18] U. Basappa , A. Rajagopal, "Modeling of CFRP strengthened RCC beam using the nonlinear finite element method", Department of civil engineering, Indian institute of technology Hyderabad, India, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 40, no. 2, pp. 169-184.

[19] Ahmed K. El-Sayed, " Effect of longitudinal CFRP strengthening on the shear resistance of reinforced concrete beams" *J.Composites: Part B* 58 (2014) 422–429

[20] ANSYS – Release Version 12. A finite element computer software and user manual for nonlinear structural analysis. Canonsburg, PA: ANSYS 2007 Inc.

[21] Nawal Kishor Banjara , K. Ramanjaneyulu , " Experimental and numerical investigations on the performance evaluation of shear deficient and GFRP strengthened reinforced concrete beams" *J. Construction and Building Materials* 137 (2017) 520–534.

[22] Mustafa Mahmood Al-Ani et al , " Nonlinear Finite Element Analysis of RC Beams without Stirrups Strengthened by Longitudinal Soffit Bonded CFRP Strips for Shear", *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES)* Vol.20 No.4, 2017 pp.996-1004

[23] ISIS Canada. Strengthening reinforced concrete structures with externally-bonded fiber reinforced polymers. Design Manual, No. 4, 2001.