

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES NOEUDS POTEAU-POUTRE EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉS PAR TISSU DE FIBRES DE CARBONE

L. HAKIMI* & M.IDDIR*
laabedh@yahoo.fr, mridi@yahoo.fr,
*Chargé de Recherches (CNERIB)
Email : cnerib@wissal.dz

CONTEXTE INDUSTRIEL DE LA RECHERCHE

Cette recherche s'inscrit dans un contexte à la fois industriel et réglementaire. En effet, le marché de la réparation et de renforcement des structures existantes est de plus en plus important et ce en raison de la vétusté du patrimoine bâti d'une part, et l'endommagement de certains ouvrages dû à certains phénomènes (séisme, environnement, etc.).

La technique utilisant les matériaux composites en polymères renforcés de fibres (FRP), est devenue très compétitive, dans de nombreuses situations, par rapport aux méthodes traditionnelles. Cependant, en Algérie, on ne dispose pas, de documents réglementaires permettant la sélection, le dimensionnement et la mise en œuvre de ces produits composites. Ces produits sont mis sur le marché, le plus souvent par importation de différents pays étrangers, d'où la nécessité de connaître leurs caractéristiques et leurs qualifications aux usages auxquels ils sont destinés.

La recherche effectuée a permis de dégager quelques conclusions pratiques à l'intention des bureaux d'études qui ont la charge de vérifier par le calcul les performances d'une opération de renforcement utilisant ce type de matériaux.

INTRODUCTION

La réhabilitation et la réparation des constructions existantes sont devenues, ces dernières années, une préoccupation majeure des gestionnaires d'ouvrages, nécessitant, le plus souvent, une attention particulière. Un nombre important de situations nécessite l'augmentation de la capacité de résistance d'un bâtiment ou partie de bâtiment à cause des effets de l'environnement avoisinant, de l'action de charges supplémentaires, de l'âge, et des erreurs dans la conception et l'exécution. Par ailleurs, les coûts des opérations de réparation et de remplacement des structures sont en augmentation continue. Aussi, les délais nécessaires pour ces travaux de réparation peuvent s'avérer longs et entraînant ainsi une perturbation et arrêt de fonctionnement de ces ouvrages et ce même dans le cas de disponibilité de ressources financières.

Les méthodes traditionnelles de réparation/renforcement, telles que le chemisage, la construction mixte, la précontrainte extérieure, ont largement été utilisées avec des matériaux conventionnels. Les développements récents dans le domaine des matériaux composites en polymères renforcés de fibres ont permis une nouvelle alternative efficace dans le domaine de la réparation/renforcement. La

résistance de ces composites provient essentiellement de la résistance des fibres, essentiellement des fibres de carbone, de glace ou d'aramide. Ils présentent l'avantage d'être légers, non corrosifs, et de grande résistance à la traction. De plus, ces matériaux, en lamelles rigides et en tissus souples, peuvent s'adapter à des usages variés.

La présente investigation se propose d'évaluer, par une approche numérique, les performances consécutives à une adjonction d'un composite en polymère renforcé de fibres, sur la résistance et la déformabilité des nœuds poteaux poutres en béton armé, souvent considérés comme zones critiques dans les systèmes de contreventement en portiques.

Les simulations numériques effectuées sont basées sur la méthode des éléments finis dans l'environnement du code industriel de calcul ANSYS, en prenant en considération le comportement non linéaire des matériaux. L'évolution de la propagation de la fissuration, des déformations, de l'épuisement de résistance des matériaux et de la variation de la capacité d'absorption d'énergie sont les paramètres mesurés.

MÉTHODOLOGIE

Pour la création du modèle étudié, le logiciel général de calcul aux éléments finis ANSYS a été utilisé.

Compte tenu de la symétrie du chargement et des conditions d'appuis, et pour optimiser le temps de calcul (calcul non linéaire), seule la moitié de la structure est considérée. L'analyse effectuée est de type statique non linéaire dont le chargement est appliqué en plusieurs paliers afin de garantir la convergence de la solution. Chaque palier est exécuté à la fin du palier précédent en utilisant la commande *restart*.

Les valeurs de contrôle utilisées pour la convergence de la solution sont celles fixées par défaut dans ANSYS à l'exception des tolérances pour la force et déplacement respectivement prises égales à 0.005 et 0.05

L'application du chargement sous forme de loadstep est effectuée de manière incrémentale selon la procédure de Newton Raphson.

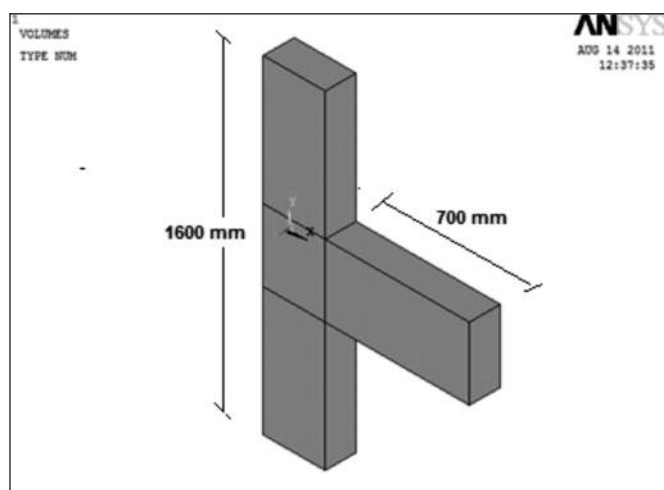


Figure 1 : Géométrie de la zone nodale

DESCRIPTION DU MODÈLE

Le nœud poteau poutre considéré dans la présente analyse est constitué d'une portion de poteau en porte à faux, et une portion de poteau comme il est montré par la figure 1. Le poteau a une section rectangulaire de 300 mm x 300 mm et une longueur totale de 1600 mm tandis que la poutre a une section rectangulaire de 300 mm x 350 mm et une longueur totale du poteau à faux de 700 mm

Le ferrailage longitudinal du poteau et de la poutre est constitué de 8T12, supposé, concentré dans les 04 angles de la section ce qui revient à considérer une section de 226 mm² par angle. Le ferrailage transversal est, quant à lui, constitué de cadres dont la section est de 100.48 mm² espacés de 100mm. (Figure 2)

Les deux extrémités de la portion du poteau sont supposées articulées alors que la portion de la poutre est en porte à faux (libre).

Différentes formes de renforcement de nœuds poteaux poutres sont possibles [7] :

Forme en L appliquée sur la partie supérieure du nœud ; (Figure 3a)

Forme en U appliquée sur les faces latérales et la sous face des extrémités de la poutre (Figure 3b) ;

Enveloppe en fibre appliquée sur les faces latérales des extrémités de la poutre (Figure 3c) ;

Enveloppe appliquée sur le poteau (Figure 3d).

Dans le cas présent un renforcement, par un tissu de fibre de carbone de toutes les faces la zone nodale, a été appliqué. Ce renforcement couvre la partie délimitée par la figure 4.

Modèle Numérique

Les éléments finis utilisés dans la modélisation sont l'élément Solid65 pour le béton non armé et l'élément Link8 pour les armatures longitudinales et transversales, tandis que le tissu de fibre de carbone a été modélisé par l'élément Shell181. Une description sommaire de ces éléments est donnée dans ce qui suit.

L'élément Solid65 [2] est un élément à 08 nœuds, et 3ddl de translation dans les directions x, y, et z à chaque nœud.

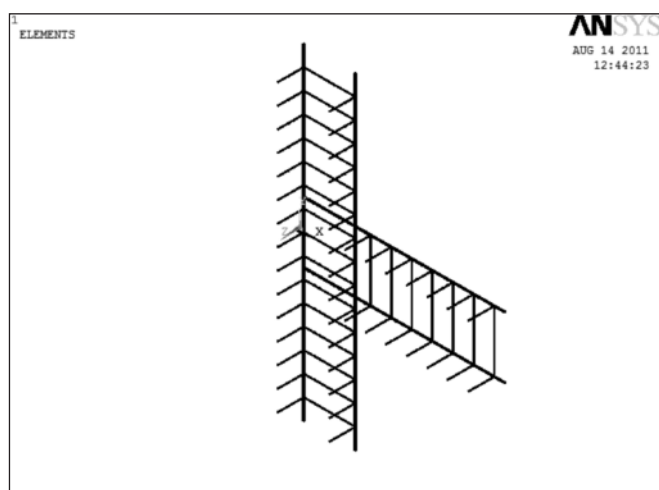


Figure 2 : Ferrailage de la zone nodale

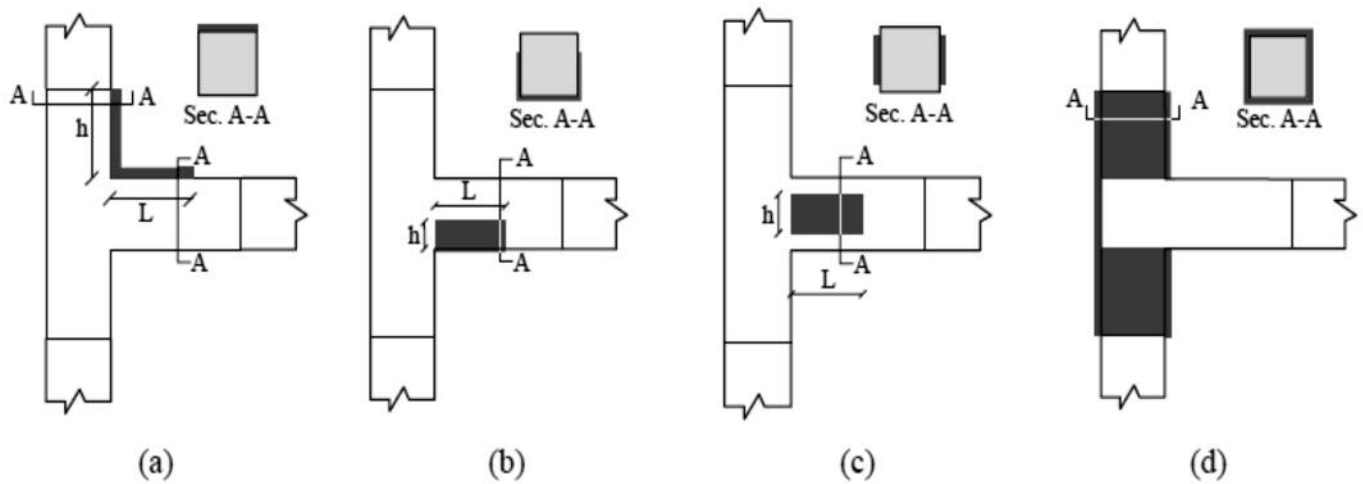


Figure 3 : Formes de renforcement des nœuds poteaux poutres

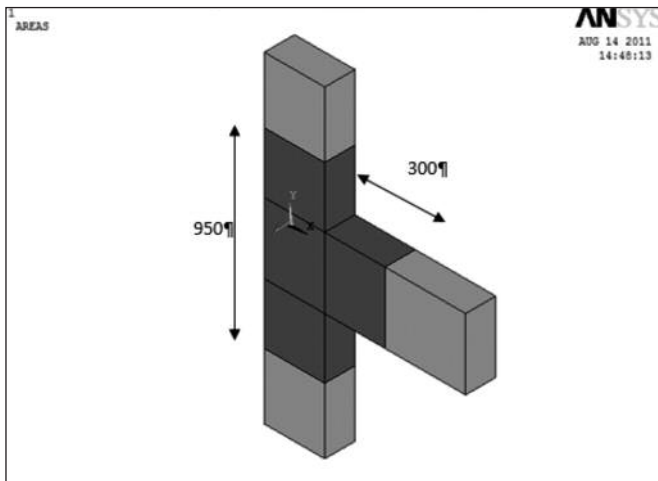


Figure 4 : Zones de renforcement de la zone nodale

Cet élément est capable de se déformer plastiquement, et peut reproduire la fissuration et l'écrasement dans les 03 directions orthogonales. Une représentation schématique de l'élément est donnée par la figure 2.

Les armatures de la poutre en B.A sont modélisées par des éléments linéaires ; même si l'élément solid65 peut accepter la simulation d'une section d'armature sous une autre méthode dite méthode de l'élément reparté en béton.

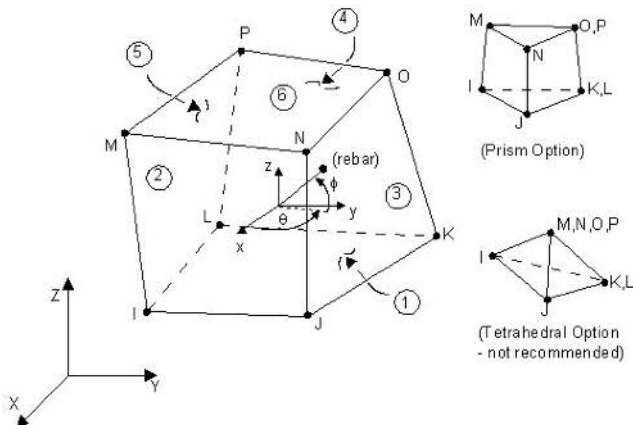


Figure 5 : Élément Solid65 (Ansys)

L'élément Link8 [2] est un élément 3D ayant 02 nœuds à 03 d.d.l de translation dans les trois directions modales x , y , z . Cet élément est aussi capable de reproduire des déformations plastiques. La figure 4 illustre cet élément.

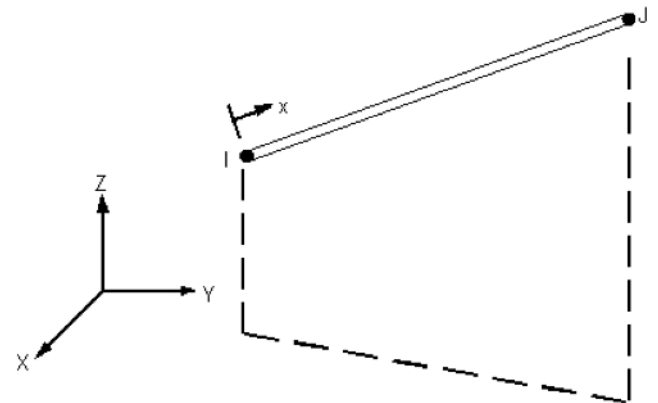


Figure 6 : Élément Link8 (Ansys)

Définition des "real constants"

Pour chaque « type élément » le logiciel ANSYS définit différentes constantes.

Les "réal constants" pour l'élément « solid65 » sont tous considérés nuls pour la raison que les armatures sont représentées par des éléments Link8 et par conséquent l'élément solid65 représente un élément en béton non armé.

Deux « real constants » sont définis pour l'élément Link8. Ces « real constants » définissent l'aire de la section droite de la barre, et la déformation initiale.

Les "real constants" définis pour l'élément Link8 et l'élément shell181 sont donnés par le tableau 1.

Le type d'élément fini utilisé pour la modélisation des tissus de fibre de carbone est l'élément shell181, lequel est un élément approprié pour la modélisation des éléments minces. C'est un élément à 4 nœuds avec 4 d.d.l dans chaque nœud. La géométrie et la position des nœuds de cet élément sont illustrées par la figure 7.

Real constants	Type d'élément	Constantes	
2	Link8	Cross sectional area (mm ²)	226
		Initial Strain	0
3	Link8	Cross sectional area (mm ²)	100,48
		Initial Strain	0
4	Shell181	Epaisseur (mm)	0.13
		Initial Strain	0

Tableau 1 : Résistance des matériaux acier et béton

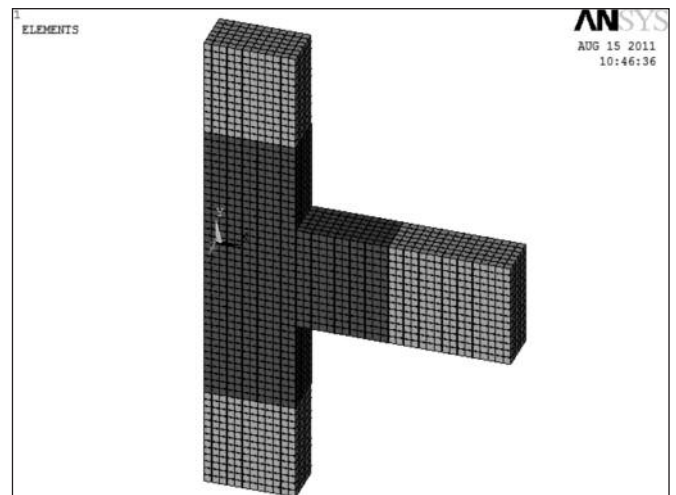


Figure 8 : Maillage de la zone nodale

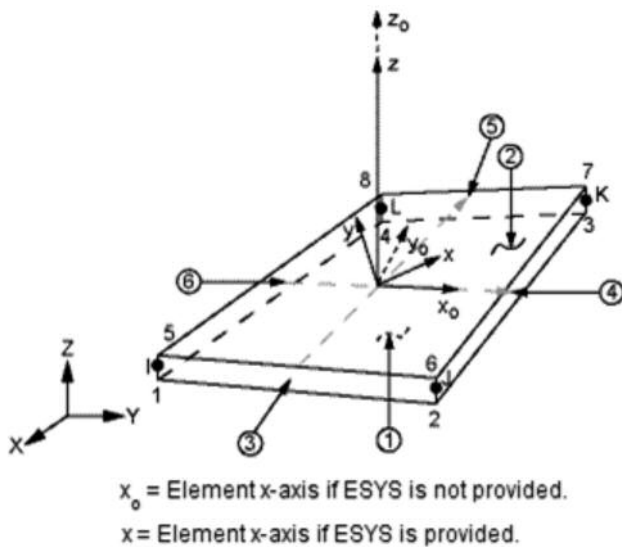


Figure 7 : Élément Shell181 (Ansys) [2]

Afin de tenir compte d'un collage parfait entre les tissus de fibre de carbone et la face de la poutre en BA les éléments finis des tissus sont créés dans le modèle de telle sorte que les nœuds coïncident avec les nœuds de la poutre.[1,3,4].

Maillage

Le maillage est réalisé de tel sorte que tous les nœuds des matériaux de renforcement (acier et composite) sont connectés (à l'aide de la commande Merge) aux nœuds de l'assemblage poteau poutre et ce afin de réaliser l'hypothèse de l'adhérence parfaite entre ces composants. Une vue d'ensemble de l'assemblage étudié est donnée par la figure 8.

PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

Trois types de modèles de matériaux sont définis :
 Modèle de matériaux numéro 1 qui se réfère à l'élément solid65,
 Modèle de matériaux numéro 2 qui se réfère à l'élément Link8,
 Modèle de matériaux numéro 3 qui se réfère à l'élément Shell 181.

L'élément Solid65 est constitué d'un matériau ayant des propriétés linéaires isotropiques utilisant le critère de rupture de Von Mises et le modèle de Willam Warnke pour la définition de la rupture dans le béton.

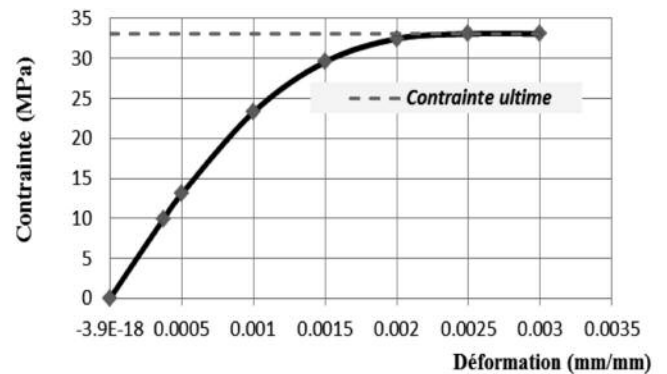


Figure 9 : Relation contrainte déformation du matériau béton

La figure 9.montre la relation, $\sigma - \epsilon$ définie par l'équation : [1,3].

$$\sigma = \frac{E_c \cdot \epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2} \quad \text{Avec} \quad \epsilon_0 = \frac{2 f_{c28}}{E_c}$$

$E_c = \sigma/E$ Où

- σ : est la contrainte correspondant à une déformation ;
- E_c : Module de Young du béton ;
- ϵ_0 : est la déformation correspondant à la contrainte de rupture

Pour définir le premier point de la courbe multilinéaire il est nécessaire d'utiliser la loi de HOOKE : $E = \sigma/\epsilon$ avec $\sigma = 0,3f_{c28}$

L'élément Link8 est constitué d'un matériau ayant une loi de comportement bilinéaire isotropique basée sur un critère de rupture de VON MISES.

Pour l'élément Shell181 utilisé pour le renforcement, le modèle utilisé est un modèle linéaire isotrope défini par son module de Young, son coefficient de Poisson et sa contrainte limite de calcul ainsi que sa déformation limite. Les valeurs de l'ensemble des paramètres et contraintes nécessaires pour la définition des caractéristiques des matériaux sont consignées dans le tableau 2.

N° du matériau	Type d'élément	Propriétés des matériaux	
1	Solid65	Ex (MPa)	27228
		ν (PRXY)	0.3
		Paramètres du modèle	
		ShrCf-Op	0.3
		ShrCf-CI	1
		UnTenSt	3.52
		UnComprSt	0
		HydroPrs	0
		BiCompSt	0
		UnTebSt	0
		TenCrFac	0
2	Link 8	Ex (MPa)	200000
		ν (PRXY)	0.3
		Limite d'écoulement (MPa)	400
		Module tangeant (MPa)	0
3	Shell181	Ex (MPa)	230000
		ν (PRXY)	0.22
		Déformation admissible	0.012
		Contrainte de calcul (MPa)	3500

Tableau 2 : Paramètres de définition des matériaux

Chargement appliqué

Le chargement est appliqué par paliers successifs jusqu'à épuisement total de la résistance. Dans chaque palier les critères de convergence doivent être satisfaits. Pour éliminer les problèmes de décohésion du tissu de fibres de carbone dans l'analyse par éléments finis, c'est-à-dire l'effet de la rupture locale due à une concentration de contraintes normale ou de cisaillement, la déformation dans le tissu de fibres est vérifiée en s'assurant qu'elle reste toujours inférieure à une valeur limite fixée au préalable ($\epsilon_{fd} < 0.012$) [6, 7, 8].

La charge est supposée agir uniformément sur la largeur de la partie supérieure de la poutre à une distance de 25mm du bord libre.

RÉSULTATS

Relation force déplacement avant renforcement du nœud

La relation force déplacement obtenue jusqu'à la charge ultime est illustrée par la figure 10.

La charge de première fissuration est de 17356 N. La première fissuration est localisée approximativement au voisinage de la liaison poteau – poutre de la face tendue

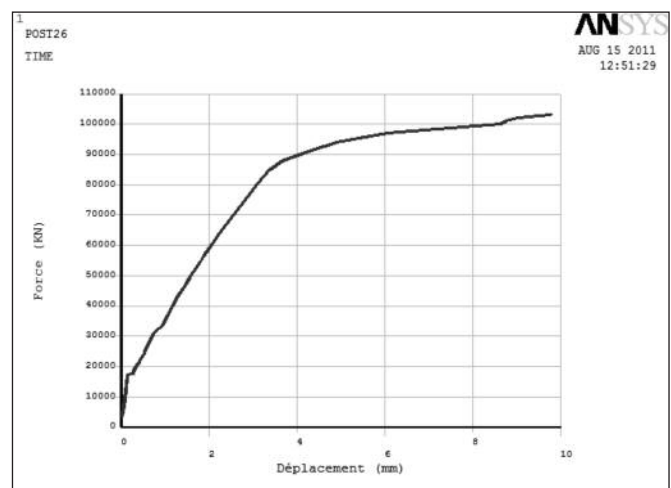


Figure 10 : Relation force déplacement avant renforcement

(figures 11 et 12). Au fur et à mesure que la charge augmente d'autres fissures font leurs apparitions.

La charge d'écoulement de l'acier est 88000 N pour une flèche de 3.719mm et la charge de rupture est de 103000 N

Relation force déplacement pour le nœud renforcé

La relation force déplacement, obtenue après renforcement est illustrée par la figure 13.

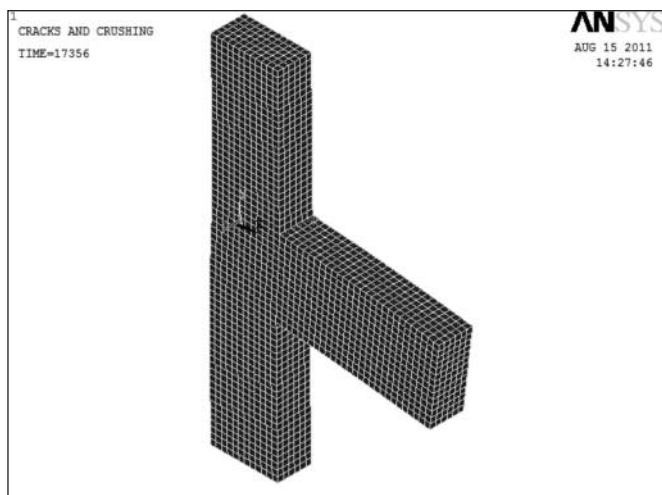


Figure 11 : Localisation de la première fissuration

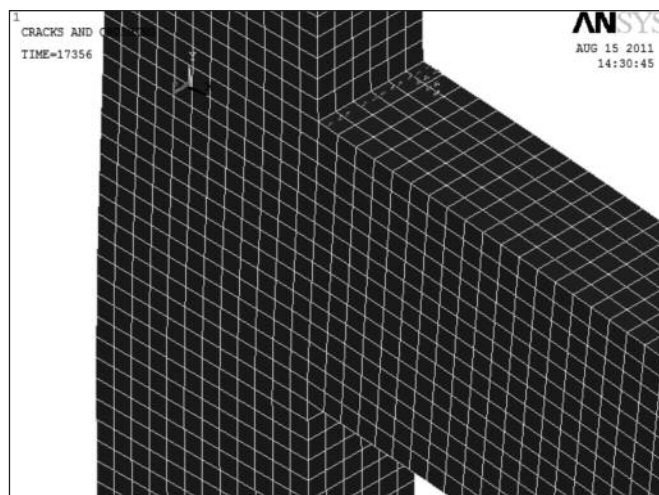


Figure 12 : Zoom Localisation de la première fissuration

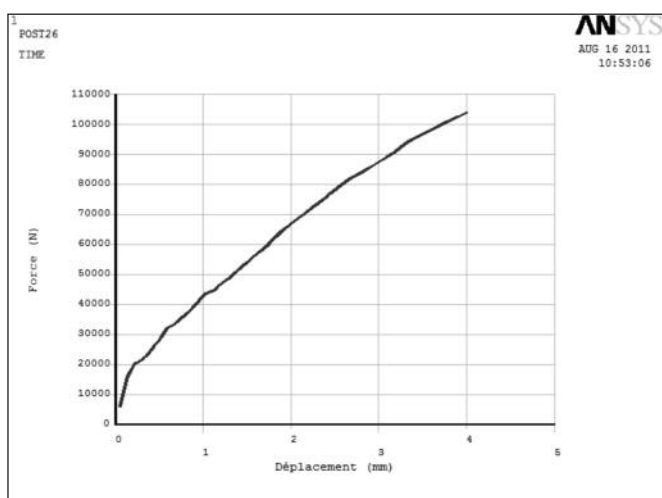


Figure 13 : Relation force déplacement après renforcement

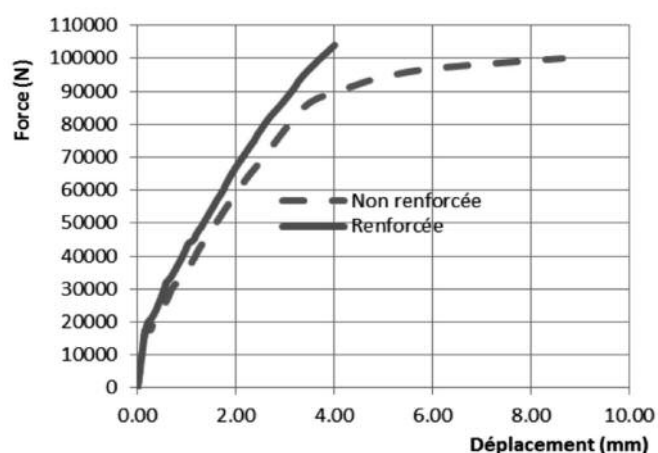


Figure 14 : Relation force déplacement avant et après renforcement

La superposition des courbes des figures 8 et 9 est donnée par la figure 14.

Le tableau 3 donne les valeurs de la flèche et la capacité d'absorption de l'énergie (C.A.E) dans les deux cas.

Spécimen	Flèche (mm) sous charge de 103000 N	% de réduction	C.A.E jusqu'à 4mm	% d'augmentation de la C.A.E
Non renforcé	9.7654		255865	–
Renforcé	3.934	59.71	225760	13.34

Tableau 3 : Flèche et capacité d'énergie avant et après renforcement

Amélioration de la rigidité flexionnelle du nœud

Les relations moment – rotation du nœud avant et après renforcement ont été évaluées et comparées. Une augmentation de la rigidité flexionnelle du nœud a été observée et représentée (figure15). Dans cette figure, la rotation q est

calculée comme étant le rapport de la différence entre les déplacements verticaux, des points A et B, à la distance horizontale entre ces deux points. Il est important de mentionner que la distance, entre les points A et B, doit être, suffisamment, longue pour inclure la zone de formation de la rotule plastique [8].

DISCUSSION ET CONCLUSION

Il ressort des résultats obtenus que le renforcement de la zone nodale par le tissu de la fibre de carbone permet à la fois une réduction de la flèche de la poutre et une amélioration de la résistance du nœud aux efforts de cisaillement. Ainsi, en raison du module de Young élevé, du matériau composite utilisé, une augmentation de la rigidité globale est obtenue.

La détermination de la rigidité additionnelle est très utile dans le cas des études de renforcement des nœuds de portiques. En effet, le tissu de fibre de carbone peut être représenté dans un logiciel de calcul sous forme d'un élément dont la loi de comportement non linéaire sera donnée par la relation moment rotation telle qu'évaluée précédemment.

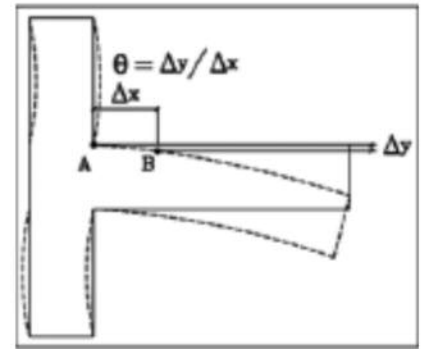
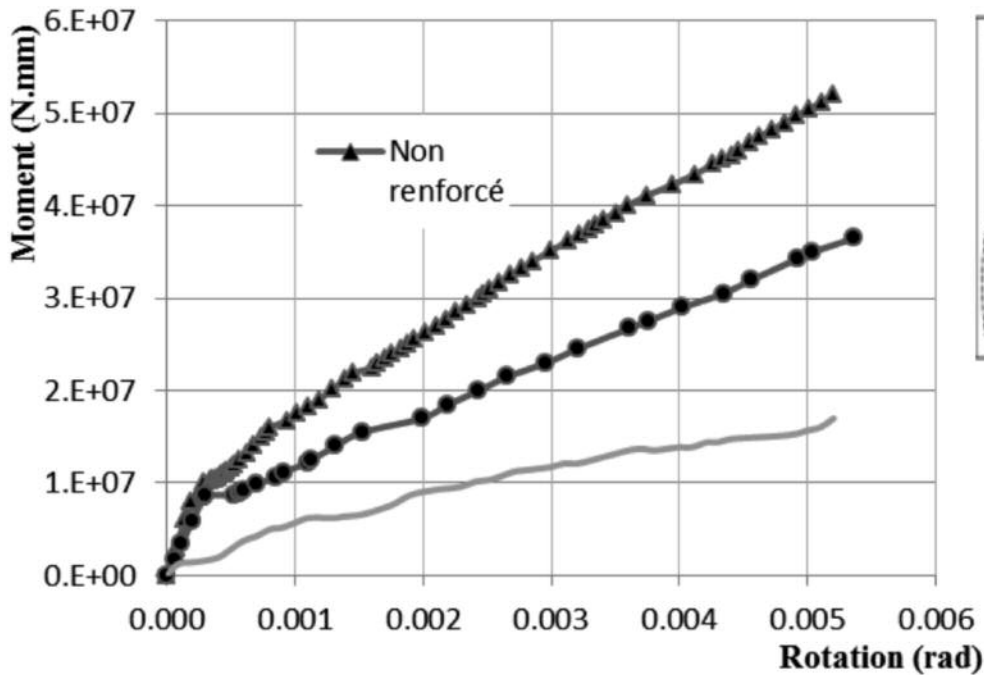


Figure 15 : Amélioration de rigidité flexionnelle du nœud renforcé

Le travail effectué a permis de mettre en évidence la puissance des outils numériques dans l'étude du comportement des structures en béton armé dans le domaine non linéaire. Aussi, l'étude a montré l'efficacité du renforcement des nœuds de portiques par des matériaux composites en résine renforcées de fibres de carbone. Les performances mesurées peuvent être utilisées à des fins pratiques d'évaluation de structures dans différentes situations (défection des matériaux, erreurs de conception, réhabilitation parasismique etc.)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anthony J. Wolanski, B.S. "Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis"; A Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, Marquette University, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Mai 2004.
 "ANSYS User's Manual; Revision 5.5", Swanson Analysis System, Inc., Houston, PA, 1998.

- I. Saifullah, et al. "Experimental and Analytical Investigation of flexural behavior of reinforced Concrete Beam", International journal of Engendering and technology IJET – IJENS Vol. 11, N° 11 February 2011.
- Abolghasem Nezamian & Sujeeva Sentenge: "Case Study of Application of FRP Composites in Strengthening the Reinforce Concrete Headstock of Bridge Structure", journal of composites for construction ASCE September /October 2007.
- R. Balamuralikrishman & C. Anatomy Jeyasehar: "Retrofitting of RC Beams with Externally Bonded Simcon Laminates" The open Civil Engineering Journal, 2009, 3, 34-40.
- ACI Committee 440 "Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" American Concrete Institute, 2002;
- Robert Ravi.S 1 , Prince Arulraj.G "Finite Element Modeling on behavior of Reinforced Concrete Beam- Column Joints Retrofitting with Carbon Fiber Reinforced Polymer", International Journal Of Civil And Structural Engineering, Volume 1, No 3, 2010;
- A. Niroomandi, A .Maheri & al, "Seismic Performance of ordinary RC frames Retrofitting at Joints by FRP Sheets", Engineering Structures 32 (2010) 2326- 2336, Elsevier Ltd.