

Modélisation numérique des poutres en béton armé renforcées avec des PRFC par la technique NSM

Ahmed Khene ^{1,2} ahmed.khene@yahoo.fr

¹ L.M.D.C., Université des frères Mentouri Constantine, Route Ain El-Bey, Constantine 25000 - Algérie.

² L.G.C.G.M., Université de Rennes 1, 20, Avenue des Buttes de Coësmes CS 14315 F - 35043 Rennes Cedex- France.

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. La méthode NSM a été utilisée ces dernières années pour le renforcement des poutres avec des polymères renforcés en fibre de carbone (PRFC). Une étude numérique a été effectuée sur des poutres en béton armé de sections rectangulaires, renforcées avec des PRFC en utilisant la technique NSM à travers le code de calcul ATENA 2D. Les simulations numériques par éléments finis ont été comparées avec des essais expérimentaux testés par d'autres chercheurs sur des échantillons renforcés avec des bandes en PRFC. Dans l'ensemble, les charges maximales prévisionnelles de modèle par éléments finis et les flèches à mi-portée concordaient assez bien avec les résultats expérimentaux correspondantes à tous les stades de chargement en flexion. Le modèle par éléments finis développé est adapté comme outil pratique et économique, en particulier dans les études paramétriques pour la modélisation et l'analyse précises du renforcement de la flexion des poutres en béton armée avec un renforcement NSM-PRF.

ABSTRACT. The NSM method has been used in recent years for the strengthening of RC beams with CFRP materials. A numerical study has been carried out on rectangular RC beams, strengthened with NSM-CFRP by using FE code ATENA. The numerical FE simulations were compared with experimental measurement tested by other investigators on specimen strengthened with NSM-CFRP strips. On overall, the predicted FE peak loads and mid-span deflection responses agreed quite well with the corresponding measured experimental tested data at all stages of flexural loading. Therefore, the developed FE model is suitable as a practical and economical tool especially in parametric studies for accurate modelling and analysis of flexural strengthening of RC members with NSM-FRP reinforcement.

MOTS-CLÉS: Poutre en béton armé, NSM, PRFC, Renforcement, Analyse par éléments finis, ATENA 2D.

KEYWORDS: RC Beam, NSM, CFRP, Strengthening, FE analysis, ATENA 2D.

1. Introduction

Les structures en génie civil sont conçues pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Cependant, plusieurs types de désordre viennent réduire cette période de vie prévisionnelle, tels que l'éclatement de la couche d'enrobage du béton ou la fissuration des éléments structuraux. Et maintenant un bâtiment sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des utilisateurs. Il existe diverses méthodes de renforcement, mais la plupart des anciennes techniques existantes ont des inconvénients tels que la difficulté de mise en œuvre et le faible gain de la capacité portante. Cependant, les techniques de renforcement utilisant des matériaux composites sont plus attrayantes car elles offrent de nombreux avantages du point de vue des propriétés mécaniques et la facilité d'exécution. Parmi les méthodes de renforcement disponibles, on retrouve la technique de renforcement externe (EBR), qui consiste au collage de feuilles ou de plaques de polymères renforcés en fibres de carbone (PRFC) sur la surface extérieure de l'élément structurel avec une résine époxydique appropriée [BIL 13], [GAM 07], [GRI 14], [MOS 13].

Il existe également la technique Near Surface Mounted (NSM), qui consiste à l'insertion de bandes ou de tiges PRFC dans des engravures effectuées précédemment sur la surface du béton tendu, puis rempli d'une résine époxydique pour la fixation. La méthode NSM peut être utilisée pour toutes les constructions et toutes les réparations structurelles du béton, du bois, aussi dans les zones éloignées et sur les formes de structures complexes. Elle peut être utilisée pour le renforcement de la flexion, du cisaillement, de la traction et pour le confinement [BAR 05], [ELH 04], [DEL 04]. D'autres travaux ont été investis par les auteurs pour comparer la méthode EBR et NSM [BIL 15], [RAS 10], [ROS 07] et ils ont démontré qu'avec la technique NSM le matériau composite est mieux optimisé en termes de performances, car il ralentit le décollement prématuré. Bien que les systèmes de renforcement NSM aient été étudiés de manière approfondie [ALM 10], [BIA 09], [HAW 12], [DEL 07], [OEH 08], [PAR 04], [RAH 11], [RIS 10], [SEN 04], [SHA 14], d'autres recherches expérimentales, analytiques et numériques sont nécessaires pour comprendre l'effet des différents paramètres de renforcement sur la performance en flexion des poutres en béton armé.

L'expérience a montré que les essais expérimentaux sont un processus très coûteux et qui nécessite beaucoup de temps et au cours des dernières années, l'accent a été mis davantage sur des tests par éléments fins et des simulations numériques. Avec le développement d'ordinateurs à haute vitesse et de modèles de matériaux constitutifs non linéaires plus sophistiqués, maintenant on est capables de simuler exactement ce qui se passe expérimentalement.

L'objectif de cet article est de développer numériquement un modèle d'éléments finis non linéaires 2D (FE) qui peut prédire avec précision la capacité de charge et la réponse des poutres en béton armé renforcées avec des bandes PRFC en utilisant la technique NSM. Les poutres sont soumises à un test de flexion de 4 points en utilisant le code de calcul par éléments finis ATENA 2D [CER 10]. Les modèles FE développés ont été validés en comparant des charges de rupture prédites et la flèche à mi-portée avec les données expérimentales obtenues à partir de recherches antérieures réalisées par Hongseok et al. [HON 09]. Les paramètres pris en compte sont la longueur intégrée des lamelles PRFC et le rapport de renforcement. Les résultats de cette étude ont montré la praticité et la validité de la méthode FE dans la modélisation des poutres en béton armé renforcées en flexion à l'aide du renforcement NSM-PRFC.

2. Détails expérimentaux

L'analyse numérique rapportée ici est basée sur les résultats expérimentaux réalisés par Hongseok et al. [HON 09] qui a évalué la réponse des poutres en béton armé renforcées avec des lamelles PRFC. Elles sont soumises à une flexion monotone à quatre points (deux points de chargement) jusqu'à la rupture des spécimens. Les résultats indiquent que l'utilisation de la technique NSM pourrait améliorer considérablement la performance en flexion des poutres en béton armé en augmentant leurs capacités de moment ultime et en limitant la flèche à la mi-portée des poutres.

Le programme expérimental consistait en dix poutres en béton armé renforcées, en plus de deux poutres non renforcées pour servir de poutre de références. Les Poutres avaient une longueur totale de 3000 mm et de section rectangulaire ayant respectivement une largeur et une profondeur de 400 mm et 250 mm. L'armature d'acier longitudinal comprenait deux et trois barres inférieures tendus de 16 mm respectivement pour les poutres de la série 01 et les poutres de la série 02 ainsi que deux barres de 10 mm de diamètre dans la zone de compression (barres supérieures). En outre, des étriers en acier de 8 mm de diamètre ont été utilisés comme renfort transversal espacés de 100 mm. L'enrobage en béton est de 40 mm.

Toutes les poutres de cette AMP ont été fabriquées en mai 2017 d'un béton de référence (emploi) avec une résistance à la compression de 30 MPa à 28 jours. Les barres d'acier ont un module élastique de 200 GPa et une limite d'élasticité de 350 MPa. Les lamelles en PRFC utilisées présentent une section transversale de 25 x 1,2 mm². Les détails du positionnement des renforts dans la section transversale sont illustrés à la figure 1. Les poutres de la série 01 comportent une seule lamelle de PRFC par contre les poutres de la série 02 ont deux renforts.

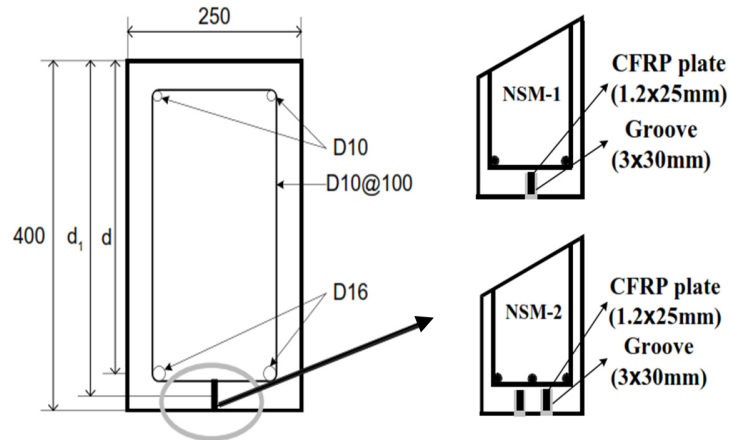


Figure 1. Détails de la section transversale des poutres et emplacement du renforcement.

Selon le fabricant, les propriétés des lamelles en PRFC sont les suivantes: 165 GPa pour le module d'élasticité, 3160 MPa pour la résistance à la traction et 2,0% pour l'allongement à la rupture. Les propriétés principales de la résine époxydique sont données dans le tableau I.

Tableau 1. Propriétés mécaniques de la résine époxy.

| Classification | Résultats |
|-----------------------------------|-----------|
| Résistance à la traction (MPa) | 25.7 |
| Résistance à la compression (MPa) | 85.6 |
| Module d'élasticité (MPa) | 2270 |

L'essai de flexion des poutres a été effectué dans une méthode de chargement à 4 points à travers une machine d'essai universelle hydraulique de l'entreprise MTS avec une capacité de 250kN et son contrôle de déplacement de 1mm / min a été exécuté. Le point de chargement a été positionné de manière à ce que a / d soit 3.7 afin d'induire une rupture par la flexion.

Les paramètres d'essai dans cette recherche sont la longueur de renforcement soit la longueur des PRFC (32%, 48%, 70%, 80% et 96% de la portée) et le nombre de PRFC (une à deux lamelles).

3. Modélisation et validation numériques

Afin d'évaluer la performance des poutres en béton armé renforcés par NSM-PRFC, une analyse numérique par EF a été effectuée à l'aide du logiciel ATENA [CER 10]. Le modèle de fracture était basé sur la formulation de fissure orthotrope classique et le modèle de bande de fissure. Le béton a été modélisé avec des éléments 2D non linéaires avec un modèle constitutif de fracture en plastique, comme le montre la figure 2. L'acier a été modélisé en fonction de la contrainte de loi bilinéaire, comme illustré à la figure 3, et les bandes CFRP supposées se comportent comme élastiques jusqu'à défaillance représenté sur la figure 4. Les propriétés des matériaux mesurés ont été utilisées dans le modèle par EF, à l'exception des bandes CFRP, dont les valeurs des fournisseurs ont été adoptées. Le composite est supposé d'avoir une connexion parfaite avec le béton.

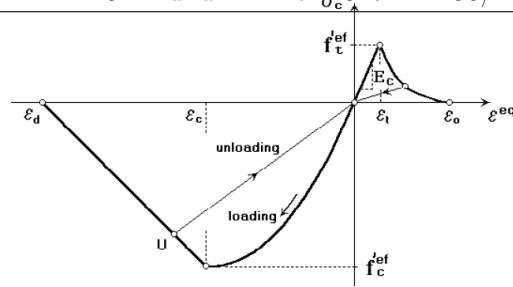


Figure 2. Loi de comportement utilisé dans la modélisation du béton.

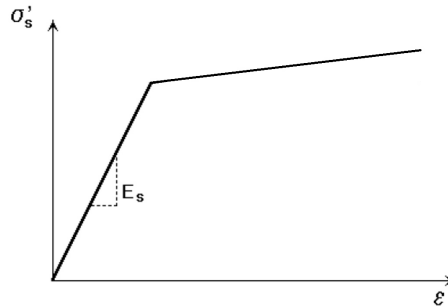


Figure 3. Loi de comportement utilisé dans la modélisation des aciers.

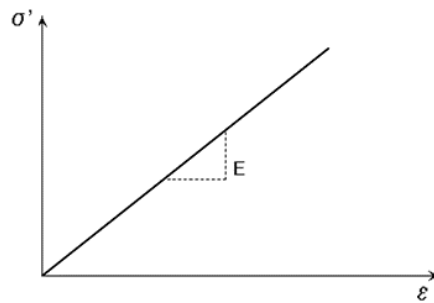


Figure 4. Loi de comportement utilisé dans la modélisation des lamelles en fibre de carbone.

Le modèle de la poutre en béton armé avec le maillage est représenté à la figure 5. La déformation prescrite a été imposée pour la poutre et une incrémentation étape par étape a été adoptée. Étant donné que la poutre est symétrique, la moitié de la poutre a été modélisée avec des conditions aux limites appropriées le long de la ligne de symétrie. Le modèle FE développé considère les non-linéarités du matériau en béton en termes de traction et de compression ainsi les armatures d'acier. Dans ce modèle les interfaces acier-béton et résine-lamelle ont une adhérence parfaite.

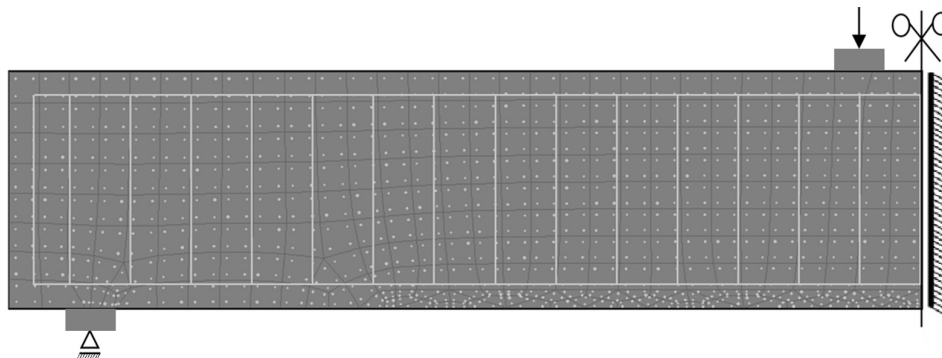


Figure 5. Le modèle par élément finis de la mi-poutre sans le renforcement.

Afin d'évaluer le modèle par éléments finis développé et testé, une comparaison (raisonnée) entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux de Hongseok et al. [HON 09] a été effectuée. La figure 6 montre une concordance entre les courbes charge-flèche obtenus expérimentalement et numériquement avec le code de calcul ATENA 2D.

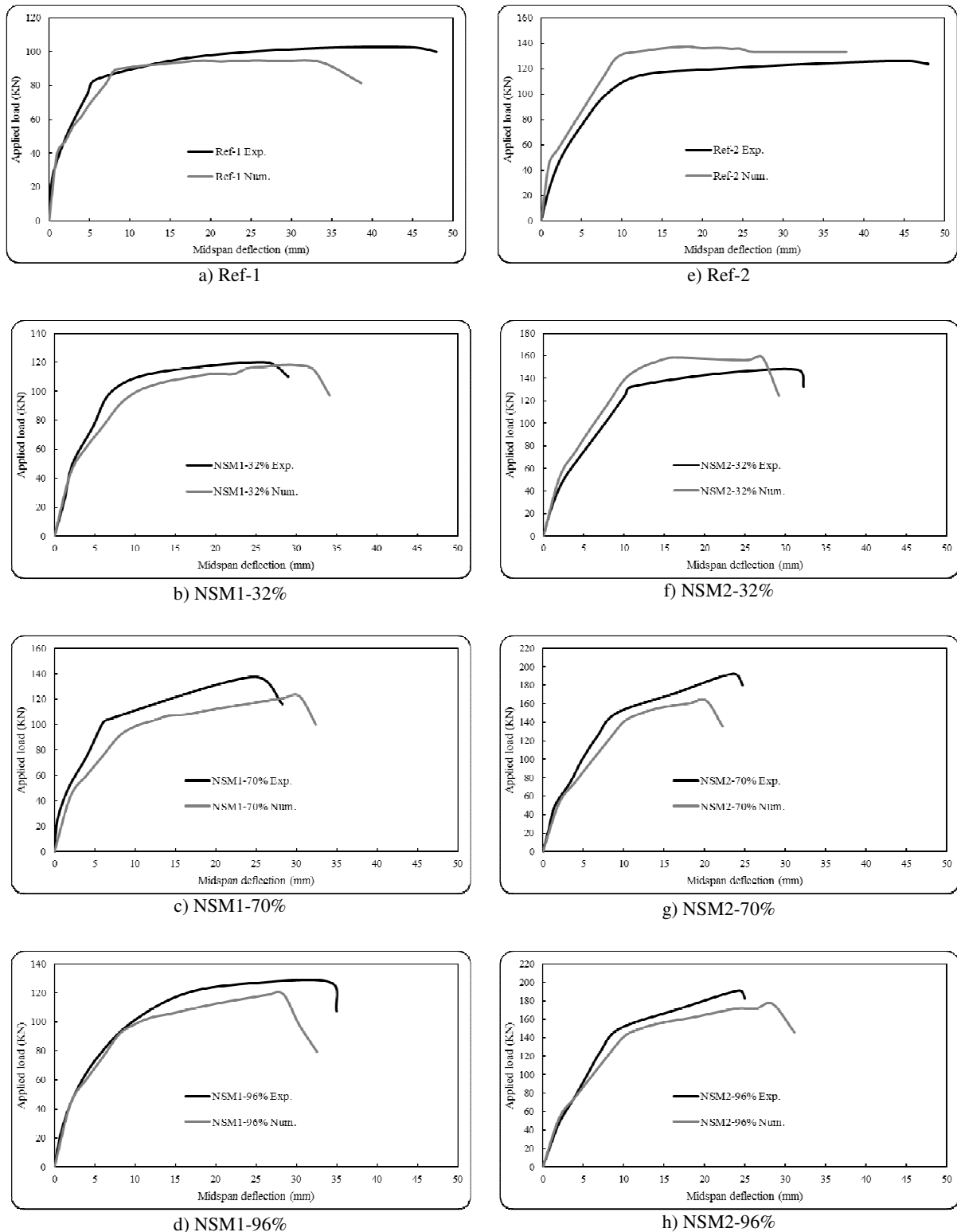


Figure 6. Comparaison entre les courbes charges-flèches expérimentales présentées par [HON 09] et les résultats de la simulation par élément finis avec ATENA 2D.

Il ressort clairement de la Figure 11 qu'il existe un assez bon accord entre les simulations numériques de FE prédites et les enregistrements expérimentaux à tous les stades de chargement jusqu'à la rupture des poutres de références et des poutres renforcées avec NSM-PRFC. Comme indiqué dans le tableau 3, l'écart maximal entre les résultats numériques expérimentaux prévus pour le chargement final est inférieur à 17% pour l'ensemble des spécimens, alors que pour la déviation maximale, il ne dépasse pas 20%. Le modèle développé est capable d'effectuer avec précision des études paramétriques sur différentes configurations de renforcement. Les résultats des tests ont mis en évidence le potentiel élevé des systèmes composite innovants pour les applications de renforcement de la flexion. Le renfort avec les lamelles NSM-PRFC a amélioré les performances des poutres en termes de charge-flèche.

Tableau 3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques des poutres renforcées.

| Séries | Spécimens | Charge de rupture | | Effet du renforcement | |
|----------|-----------|----------------------------|----------------|---------------------------|---------------|
| | | Expérimental Hongseob (KN) | Numérique (KN) | Expérimental Hongseob (%) | Numérique (%) |
| série 01 | Ref-1 | 104.00 | 94.96 | - | - |
| | NSM1-32 | 114.00 | 114.72 | 9.62 | 20.92 |
| | NSM1-48 | 122.40 | 119.88 | 17.69 | 26.38 |
| | NSM1-70 | 136.70 | 122.36 | 31.44 | 29.01 |
| | NSM1-80 | 141.20 | 120.50 | 35.77 | 26.90 |
| | NSM1-96 | 129.30 | 119.18 | 24.33 | 25.64 |
| série 02 | Ref-2 | 125.90 | 137.42 | - | - |
| | NSM2-32 | 147.00 | 158.96 | 16.76 | 15.67 |
| | NSM2-48 | 185.10 | 173.10 | 47.02 | 25.96 |
| | NSM2-70 | 192.60 | 163.44 | 52.98 | 18.93 |
| | NSM2-80 | 173.20 | 174.52 | 37.57 | 27.00 |
| | NSM2-96 | 191.80 | 176.66 | 52.34 | 28.55 |

Toutes les poutres renforcées ont montré une rigidité plus élevée que leurs poutres de références correspondantes. En tant que résultats d'analyse de la force ultime concernant la longueur du renforcement, une tendance à l'augmentation de la force ultime a augmenté généralement jusqu'à 0,70 L de longueur de renforcement, mais un phénomène de réduction de la force ultime a eu lieu dans le cas de 0,80L et 0,96L. La capacité de flexion de poutres renforcées augmente entre 36% pour une lamelle en PRFC et jusqu'à 53% pour deux lamelles de polymères renforcés en fibres de carbone.

Après validation du modèle, le code de calcul ATENA 2D nous permet de connaître les valeurs de la largeur des fissures dans les poutres en béton armé. Cela nous permet également de voir le réseau de fissures sur la moitié des travées des poutres modélisés. La figure 7 montre les iso-valeurs des ouvertures de fissure qui sont représentées en (mm), elles représentent également le réseau de fissuration et le positionnement de la fissure principale de chaque configuration de poutre. On constate que la largeur des fissures principales est faible dans les poutres renforcées par rapport aux poutres de références. Ceci est dû à la contribution des matériaux composites au comportement en flexion sur les poutres en béton armée.

La longueur du renforcement influence directement sur l'augmentation de la capacité portante des poutres en béton armé. Cela est due à l'augmentation de la surface de contact entre le composite et le béton ce qui réduit le risque de rupture prématurée. Parfois il y a des singularités de résultats pour les charges de rupture comme le cas de la poutre NSM2-70%. Elles peuvent être expliquées par une défaillance au niveau de l'interface entre le composite et le béton donc dans ce cas-là les polymères renforcés en fibre de carbone ne peuvent pas contribuer au maximum de leurs capacités.

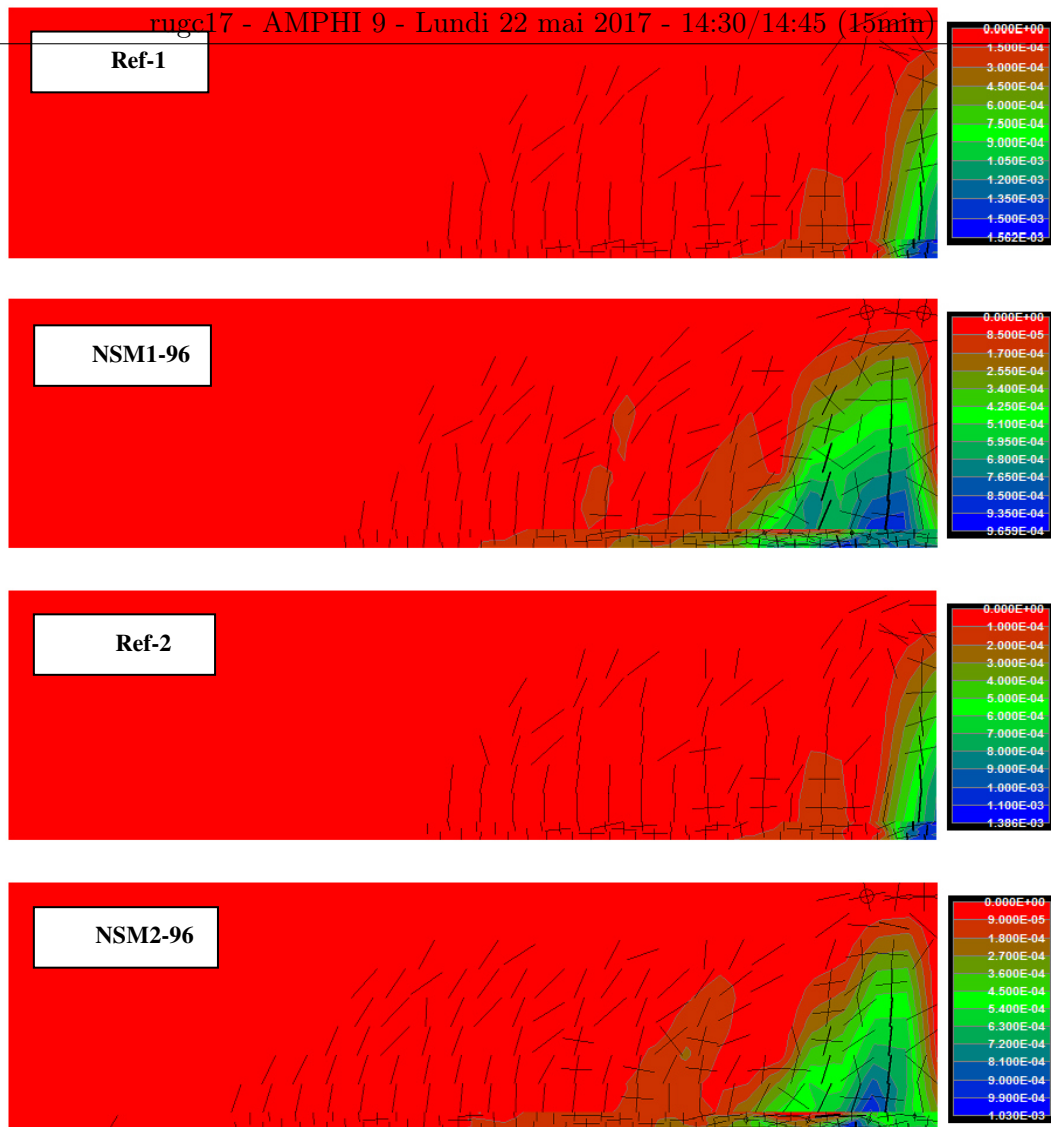


Figure 7. Les Iso-valeurs de la largeur de la fissure moyenne des modèles des poutres validées (mm).

4. Conclusion

Cette étude numérique a été menée pour évaluer la performance des poutres en béton armé renforcées à la flexion avec NSM-PRFC. Deux paramètres ont été considérés qui sont la longueur du renfort et le nombre des PRFC. Le modèle développé a été validé en comparant les résultats des simulations numériques par éléments finis avec leurs mesures expérimentales correspondantes disponibles dans la littérature [HON 09]. Selon les résultats, les observations suivantes peuvent être faites:

- Il existe une très bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques en termes de réponse charge-flèche à tous les stades de chargement en flexion jusqu'à la rupture des poutres.
- Le renforcement des poutres en béton armé avec NSM-PRFC augmente leurs capacités portantes vis-à-vis à la flexion. Leurs charges finales augmentent avec l'augmentation du nombre de bandes CFRP ainsi que l'augmentation de la longueur de renforcement.
- Le modèle d'éléments finis développé et validé présenté dans cette étude convient à la modélisation et à l'analyse des poutres en béton armé renforcées en flexion à l'aide de NSM-PRFC. Le modèle développé est capable de réaliser de manière précise et efficace des études paramétriques sur différentes configurations de renforcement utilisant la technique NSM avec des lamelles de carbone.

- [ALM 10] Al-Mahmoud F.; Castel A.; François R.L., Tourneur C.; RC beams strengthened with NSM CFRP rods and modeling of peeling-off failure. *Composite Structures* 92, Jul. 2010, 1923-1930.
- [BAR 05] Barros J., Fortes A.S., Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits, *Cem Concr Compos*, vol. 27, pp. 471-480, 2005.
- [BIA 09] Bianco V., Barros J.A.O., Monti G., Three dimensional mechanical model for simulating the NSM FRP strips shear strength contribution to RC beams, *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 815–826, 2009.
- [BIL 13] Bilotta A., Faella C., Martinelli E., Nigro E., Design by testing procedure for intermediate debonding in EBR FRP strengthened RC beams, *Engineering Structures*, vol. 46, pp. 147–154, 2013.
- [BIL 15] Bilotta A., Ceroni F., Nigro E., Pecce M., Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence, *Composite Structures*, vol. 124, pp. 163–175, 2015.
- [CER 10] Cervenka V., Jendele L., Cervenka J., *Atena Program Documentation*. Part. 1. Theory, Cervenka Consulting Ltd, Prague. 2010.
- [DEL 04] De Lorenzis L., Anchorage length of near-surface mounted fiber reinforced polymer bars for concrete strengthening – analytical modeling, *ACI Structural Journal*, vol. 101, pp. 375-386, 2004.
- [DEL 07] De Lorenzis L., Teng J.G., Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures. *Compos Part B* 2007; 38(2):119–43.
- [ELH 04] El-Hacha R., Rizkalla S.H., Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures, *ACI Structural Journal*, vol. 101, pp. 717-726, 2004.
- [GAM 07] Gamino A.L., Bittencourt T.N., Reinforced concrete beams strengthened with CFRP: experimental, analytical and numerical approaches, in *Proc. FRPRCS-8 Symposium*, Patras, 2007, pp. 1–10.
- [GRI 14] Gribniak V., Arnautov A.K., Kaklauskas G., Jakstaite R., Tamulenas V., Gudonis E., Deformation analysis of RC ties externally strengthened with FRP sheets, *Mechanics of Composite Materials* 50(5) (2014) 669–676.
- [HAW 12] Hawileh R.A., Nonlinear finite element modeling of RC beams strengthened with NSM FRP rods, *Construction and Building Materials*, vol. 27, pp. 461–471, 2012.
- [HON 09] Hongseob O., Jongsung S., Minkwan J., Hyunjoong K., The evaluation of structural performance for RC beams strengthened by NSM using CFRP plate, in *Proc. Second Official International Conference of International Institute for FRP in Construction for Asia-Pacific Region*, Seoul, 2009, pp. 525–532.
- [MOS 13] Mostofinejad D., Kashani A. T., Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams, *Composites: Part B*, vol. 45, pp. 1704–1713, 2013.
- [PAR 04] Parretti R., Nanni A., Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites: design overview. *Advances in Structural Engineering*, 2004, 7(6), pp. 469-83.
- [RAH 11] Rahal K.N., Rumaih H.A., Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars. *Eng Struct* 2011; 33 (1):53–62.
- [RAS 10] Rasheed H. A., Harrison R. R., Peterman R. J., Alkhrdaji T., Ductile strengthening using externally bonded and near surface mounted composite systems, *Composite Structures*, vol. 92, pp. 2379–2390, 2010.
- [RIS 10] Rizzo A, De Lorenzis L. Modeling of debonding failure of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement. *Construct. Build. Mater.* 2008; 23 (4):1568–77
- [ROS 07] Rosenboom O., Hassan T., Rizkalla S., Flexural behavior of aged prestressed concrete girders strengthened with various FRP systems, *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 764–776, 2007.
- [SEN 04] Sena-Cruz J.M., Barros J.A.O., Bond between near-surface mounted carbon fiber-reinforced polymer laminate strips and concrete. *J Compos Constr* 2004; 8(6):516–27.
- [SHA 14] Sharaky I.A., Torres L., Comas J., Barris C., Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composite Structures*, vol. 109, pp. 8–22, 2014.
- [OEH 08] Oehlers D.J., Rashid R., Seracino R., IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1574–1582, 2008.