

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/272479022>

Etude du comportement mécanique des poutres corrodées réparées à l'effort tranchant par l'insertion des joncs de c....

Conference Paper · July 2015

CITATION

1

READS

312

4 authors:



Béal Almassri

Palestine Polytechnic University

15 PUBLICATIONS 37 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Joaquim A.O. Barros

University of Minho

473 PUBLICATIONS 3,730 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Firas Al-Mahmoud

University of Lorraine

37 PUBLICATIONS 321 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Raoul Francois

Institut National des Sciences Appliquées de ...

149 PUBLICATIONS 2,857 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Behavior of Recycled Coarse and Fine Aggregates concrete columns under eccentric loads [View project](#)



A FEM model to study the behaviour of corroded RC beams shear-repaired by ETS FRP rods technique [View project](#)

16^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

EPFL, Lausanne, Suisse
9-10 juillet 2015

Etude du comportement mécanique des poutres corrodées réparées à l'effort tranchant par l'insertion des joncs de carbone

B. Almassri^A, F. Al Mahmoud^B, J.O.A. Barros^C, R. Francois^A

A Université de Toulouse; UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), Toulouse, France

B Institut Jean Lamour, UMR 7198, CNRS, Université de Lorraine, Nancy, France

C ISISE, Dep. Civil Eng., Minho University, Guimarães, Portugal

RÉSUMÉ : Cette communication présente les caractéristiques principales d'un modèle par Eléments Finis (EF) développé en utilisant le logiciel FEMIX afin de prévoir le comportement de poutres en béton armé corrodées réparées à l'effort tranchant par l'insertion des joncs de carbone par la technique NSM (Near-Surface Mounted reinforcement). Cette technique consiste à sceller les joncs de carbone dans des engravures déjà préparées sur les surfaces inférieure et latérale de la poutre corrodée à réparer. Les résultats expérimentaux et ceux de la modélisation numérique en mode 3D sont présentés en terme de courbe charge-flèche et mode de ruine pour quatre poutres courtes: deux poutres corrodées (A1CL3-B et A1CL3-SB) et deux poutres témoins (A1T-B et A1T-SB), les poutres avec « -B » sont réparées seulement en flexion avec un jonc de carbone par la technique NSM, tandis que celles avec « -SB » sont réparées à la fois en flexion et à l'effort tranchant. La corrosion des barres d'acier tendues et son effet sur la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé sont discutés. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre les prédictions par le modèle EF en terme de courbe expérimentale charge-flèche, fissuration et mode de ruine.

1. INTRODUCTION

La détérioration des structures en béton armé est un problème majeur pour de nombreux pays, car il pourrait mettre en cause la sécurité publique et le coût élevé de réparation de ces structures pourrait directement peser sur l'économie (Tayeh et al., 2012), la corrosion de l'acier est l'une des préoccupations majeures car elle peut conduire à une réduction significative en terme de capacité ultime et entretien des structures en béton armé (Al-Sulaimani et al., 1990; Andrade et al., 1991). De nombreuses études ont présenté l'effet de corrosion de l'acier sur le comportement en flexion des structures en béton armé (Rodriguez et al., 1997; Torres-Acosta et al., 2007), cependant, très peu d'études ont montré l'effet de la corrosion sur la résistance à l'effort tranchant des structures en béton armé. En outre, la littérature disponible porte principalement sur les systèmes de corrosion accélérée (Wang et al., 2012; Xia et al., 2011), tandis que des études très limitées et récentes ont été basées sur des systèmes de corrosion naturelle à long terme (Khan et al., 2014; Zhu et al., 2013).

Une technique de renforcement prometteuse pour augmenter la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé est la technique NSM (Near-Surface Mounted reinforcement). Cette technique consiste à sceller les joncs de carbone dans des engravures déjà préparées sur les surfaces latérales de la poutre à réparer. L'efficacité de cette technique pour améliorer la résistance à l'effort tranchant a été étudiée par de nombreux chercheurs (De Lorenzis and Nanni, 2001; Rizzo and De Lorenzis, 2009). D'autres chercheurs ont utilisé les bandes stratifiées (NSM) à la place des joncs composites (Dias and Barros, 2010; Omran and El-Hacha, 2012). (Bilotta et al., 2011) ont montré l'efficacité de la technique NSM comparée à la technique par collage extérieur des matériaux composites (la technique EBR). (Dias and Barros, 2010) ont constaté aussi une augmentation de la capacité maximale par la technique NSM après la formation des fissures de l'effort tranchant.

Les études disponibles ont montré que la prédiction par des modèles basés sur la méthode des éléments finis par l'analyse non linéaire des structures en béton armé est très liée au modèle constitutif utilisé pour simuler le transfert des contraintes de cisaillement dans le béton fissuré (Rots and De Borst, 1987; Suryanto et al., 2010). Récemment, un modèle tenant compte de la fissuration multidirectionnelle a été élaboré par (Barros et al., 2011) afin de simuler le comportement des poutres renforcées à l'effort tranchant. (Barros et al., 2013) ont étudié les limites de l'efficacité de la technique NSM pour le renforcement à l'effort tranchant des poutres en béton armé. (Nanni et al., 2004) ont prédit par un modèle analytique la contribution des systèmes NSM à la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé, mais cette prédiction était basée uniquement sur l'hypothèse que la ruine se produit par pull-out des bandes (perte d'adhérence). (Bianco et al., 2007) ont élaboré un modèle analytique pour prédire la contribution des systèmes NSM à la résistance à l'effort tranchant en fonction de différents modes de ruine possibles: pull-out des matériaux composites; rupture en traction du béton.

Il existe peu d'études expérimentales ou numériques portant sur les modes de fonctionnement des poutres en béton armé corrodées réparées à l'effort tranchant par la technique NSM. Cette communication étudie la performance des poutres en béton armé à courte-portée corrodées puis réparées avec la technique NSM à travers un modèle EF élaboré en utilisant le code informatique FEMIX. Deux poutres ont été réparées seulement en flexion et deux autres ont été réparées à la fois en flexion et à l'effort tranchant. Toutes les poutres ont été testées expérimentalement par l'essai flexion trois points jusqu'à la rupture. La corrosion des barres d'acier tendues et son effet sur la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton armé sont discutés. Les modèles EF ont étudié les modes de ruine et la capacité portante à l'effort tranchant des poutres en béton armé. La capacité à l'effort tranchant des poutres courtes corrodées réparées à l'effort tranchant et en flexion a été comparée à celle des poutres similaires non réparées.

2. PROGRAMME EXPÉMENTALE

2.1. Procédure expérimentale

Un programme expérimental a été lancé au LMDC (Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions) en 1984 visant à comprendre les effets de la corrosion de l'acier sur le comportement structural des éléments en béton armé. Plusieurs études expérimentales ont été effectuées sur ces poutres pour évaluer le développement de la fissuration provoquée par la corrosion, mesurer la teneur en chlorure et analyser le changement du comportement mécanique (Castel et al., 2000; Vidal et al., 2007). Les détails du système de l'environnement naturellement agressif peuvent être trouvés dans (Kreit et al., 2011).

Les quatre poutres courtes en béton armé (80cm) étudiées dans la présente communication ont été coupées de deux poutres longues; deux poutres courtes corrodées ont été extraites de la poutre longue (300cm) corrodée (A1CL3-R) et deux poutres témoins ont été extraites de la poutre longue non corrodée (A1T-R), les deux poutres longues ont été réparées en flexion avec un jonc de carbone de 6mm de diamètre et testées avec l'essai de flexion trois points jusqu'à la rupture, plus de détails sur les poutres longues sont disponibles dans (Almassri et al., 2014b). Deux poutres courtes; une corrodée A1CL3-SB et une témoin A1T-SB ont été réparées à l'effort tranchant par des joncs de carbone avec la technique NSM tandis que deux autres; une corrodée A1CL3-B et une témoin A1T-B ont été réparées en flexion. La disposition des armatures des poutres longues et des quatre poutres courtes est illustrée dans la figure 1.

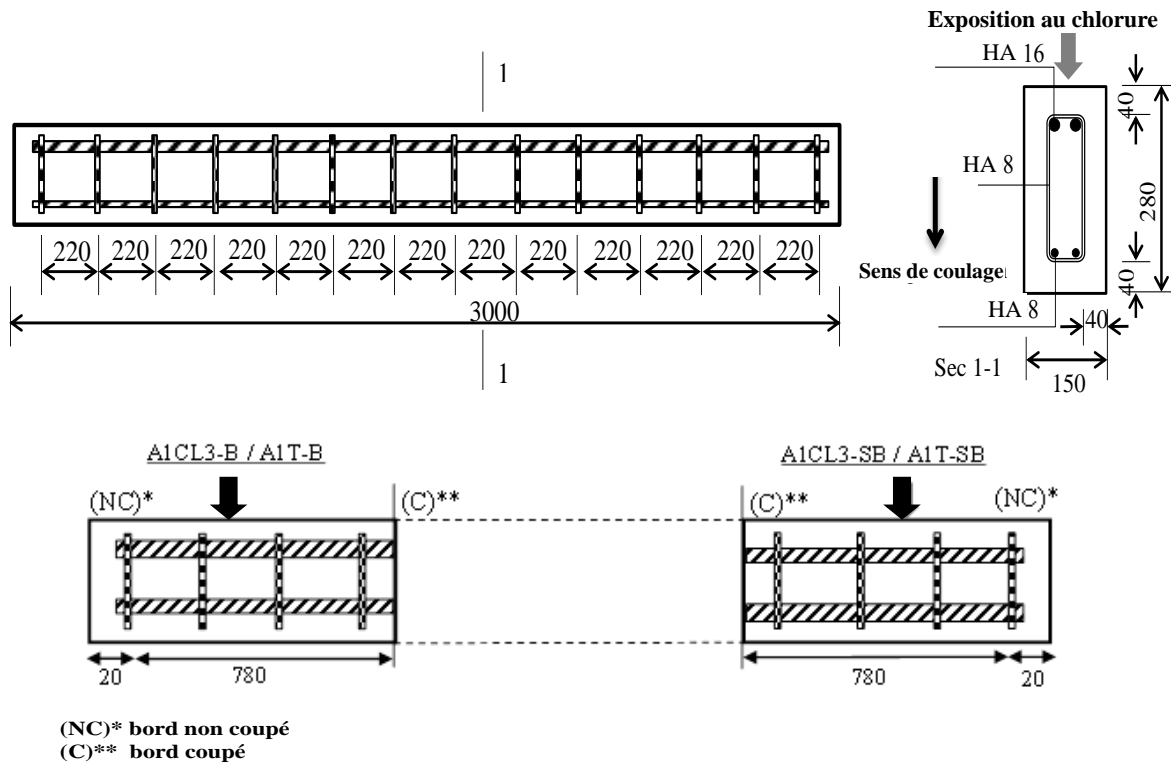


Figure 1 Plan de ferrailage des poutres longues (toutes les dimensions en mm).

2.2. Résultats expérimentaux

2.2.1 Corrosion

Après l'extraction des barres d'acier tendues des deux poutres longues corrodées et leur nettoyage avec une solution de Clark ANSI/ASTM G1-72, la perte de diamètre a été mesurée en utilisant la méthode de perte de masse due à la forte irrégularité de forme de corrosion qui ne peut pas être mesurée avec un pied à coulisse. La figure 2 montre que la perte maximale de diamètre mesurée pour la poutre A1CL3-B est de 18% alors que celle pour la poutre A1CL3-SB est de 9%.

2.2.2 Charges ultimes et modes de ruine

Le comportement des quatre poutres testées a été comparé à celui des deux autres poutres; une corrodée A2CL2-A et une autre poutre témoin (Control-Dang) de 75 cm de longueur testées par (Dang, 2013). La figure 3 montre les courbes expérimentales charge-flèche pour toutes les poutres courtes testées. Le renforcement à l'effort tranchant a augmenté la capacité à l'effort tranchant des poutres témoins, alors qu'aucune augmentation n'a été observée pour les poutres corrodées.

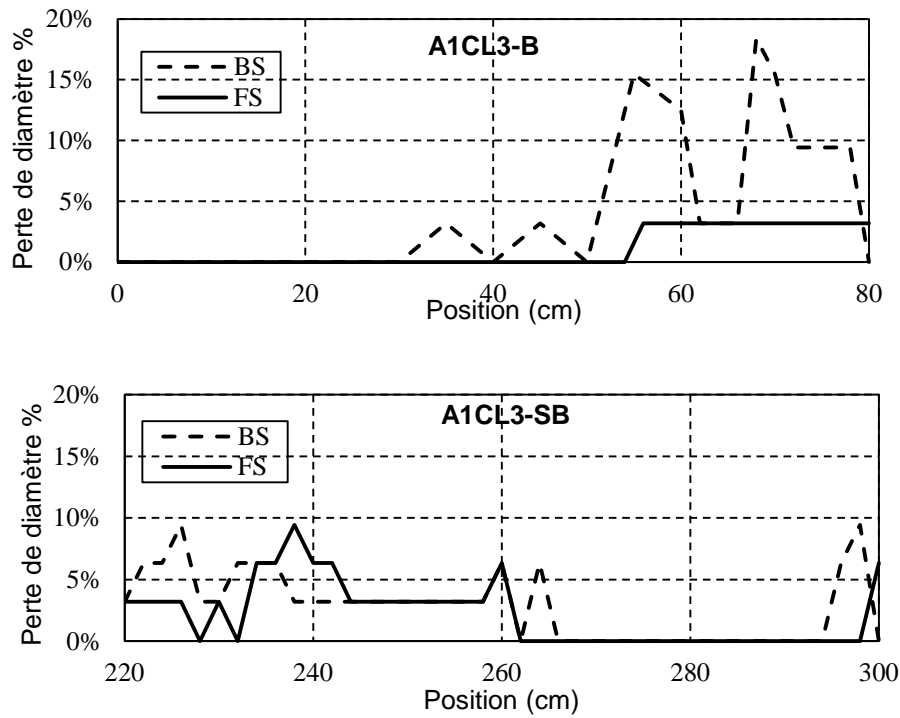


Figure 2 Pourcentage de perte de diamètre pour les barres d'acier tendues dans les poutres corrodées ; FS: Armature antérieure, BS: Armature postérieure.

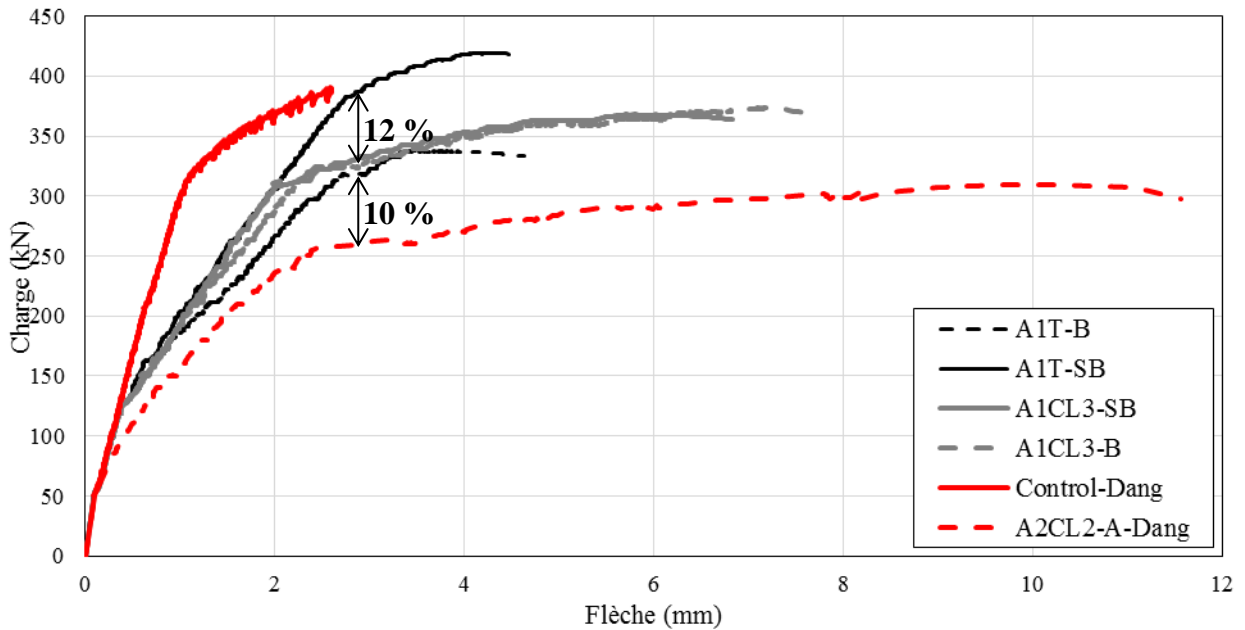
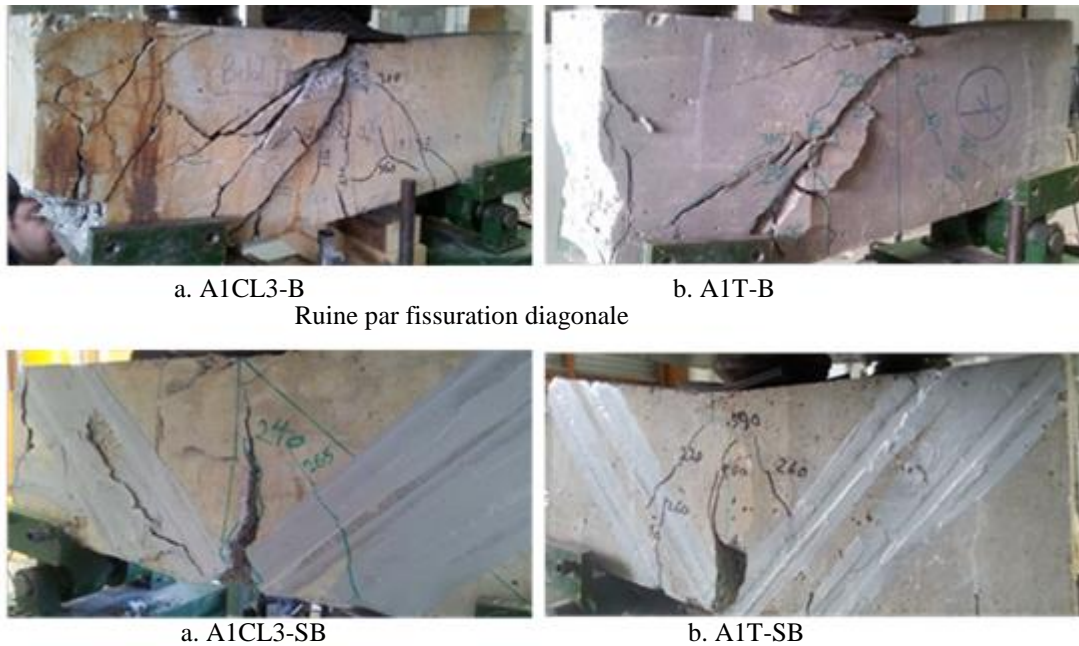


Figure 3 courbes charges-flèche pour toutes les poutres

La différence de la charge de plastification des barres d'acier entre la poutre témoin A1T-SB et celle corrodée A1CL3-SB réparées à l'effort tranchant est due à une perte de section transversale de 12% au milieu de la poutre corrodée A1CL3-SB, tandis que la diminution de la charge de plastification des barres d'acier pour la poutre corrodée non réparée à l'effort tranchant A2CL2-A comparée aux poutres non réparée à l'effort tranchant (témoin, A1T-B et A1CL3-B) est due à une perte de section de 10% au milieu de la poutre corrodé A2CL2- A (Dang, 2013). Les résultats expérimentaux ont montré également que la réparation à l'effort tranchant avec la technique NSM a changé le mode de ruine de la formation d'une fissure diagonale due au glissement des barre d'acier tendues (pour les poutres non-réparées A1T-B et A1CL3-B), à la formation d'une large fissure de flexion à mi-travée suivie de

l'écrasement du béton comprimé (pour les poutres réparées A1T-SB et A1CL3- SB) comme le montre la figure 4.



a. A1CL3-B
Ruine par fissuration diagonale
b. A1T-B

a. A1CL3-SB
b. A1T-SB

Ruine par écrasement du béton comprimé (large fissure au milieu de la poutre)

Figure 4 Modes de ruine des poutres testées

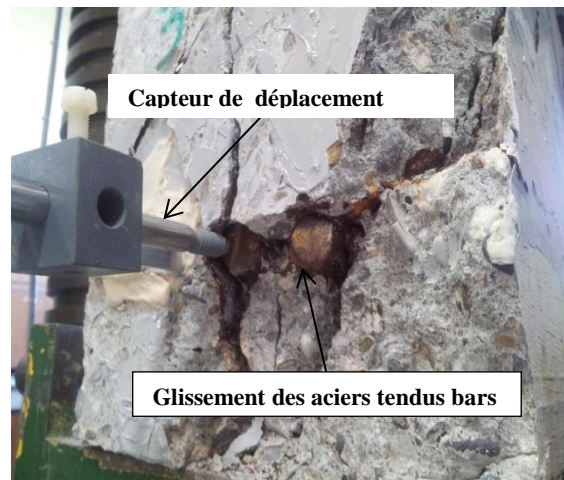


Figure 5 Glissement des barres d'acier pour les poutres non réparées à l'effort tranchant A1T-B and A1CL3-B

Le glissement des barres d'acier de traction s'est produit sur le bord non corrodée de la poutre corrodée A1CL3-B, un glissement des barres d'acier de traction a été également observé dans la poutre non corrodée A1T-B. Cela signifie que la corrosion de l'acier n'était pas la cause de glissement ce qui est en accord avec les résultats trouvés par (Khan et al., 2014). La figure 5 montre le glissement des barres d'acier de traction dans les deux poutres testées A1T-B et A1CL3- B.

Il est également important de noter que pour les poutres réparées à l'effort tranchant A1T-SB et A1CL3-SB, de nombreuses fissures de séparation se sont produites à la mi-travée de la poutre, comme indiqué sur la figure 6, ces fissures étaient claires sur la partie inférieure de la poutre et aux bords près des appuis. Plus de détails sur le programme expérimental sur les poutres courtes et les résultats expérimentaux sont disponibles dans (Almassri et al., 2014a).



Fissures de séparation

Figure 6 Glissement des barres d'acier tendues pour les poutres A1T-SB et A1CL3-SB

3. DESCRIPTION DU MODÈLE (EF)

Un modèle multidirectionnel «smeared crack model» est utilisé pour simuler le comportement des poutres dont la ruine est due à l'effort tranchant. Le principal aspect important dans ce modèle constitutif est d'utiliser le mode de rupture du béton II en prenant en compte un diagramme adoucissant afin de simuler les contraintes aux fissures de cisaillement, figure 7. Des éléments solides de trois dimensions avec 20 nœuds (quadratiques) ont été utilisés pour simuler le comportement du béton dans ce modèle numérique; les propriétés du béton utilisées sont présentées dans le tableau 1. Les barres d'acier ont été modélisées avec un comportement élasto-plastique. Le coefficient de Poisson utilisée est de 0.3 tandis que le module d'élasticité et la limite élastique des barres d'acier et des étriers sont utilisés comme dans le tableau 2. Le comportement post-plastification des barres d'acier est modélisé comme le montre la figure 8.

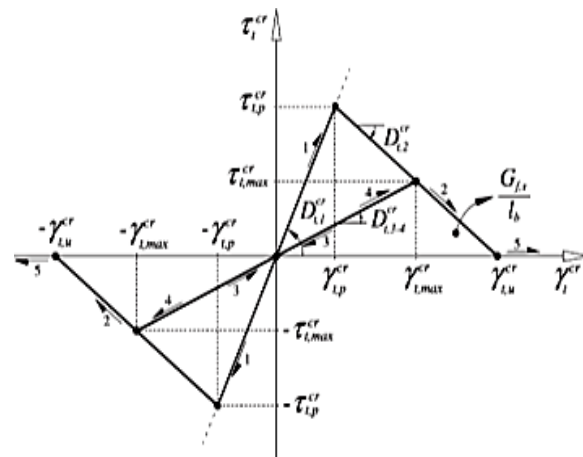


Figure 7 Le modèle multidirectionnel «smeared crack model»

Tableau 1 Les propriétés du béton

Coefficient de Poisson	$\nu_c = 0.20$
Module d'élasticité	$E_c = 30\,000 \text{ N/mm}^2$
Résistance en compression	$f_c = 60 \text{ N/mm}^2$
Diagramme adoucissant tri-linéaire	$f_{ct} = 4.5 \text{ N/mm}^2$, $G_f = 0.09 \text{ N/mm}$ $\xi_1 = 0.005$, $\alpha_1 = 0.5$, $\xi_2 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.2$
Paramètre de l'énergie de fracture mode I pour la nouvelle fissure	$P_2 = 1$
Paramètres de cisaillement	$\tau_{t,p}^{cr} = 3 \text{ N/mm}^2$, $G_{f,s} = 0.1 \text{ N/mm}$, $\beta = 0.1$
Angle de seuil	$\alpha_{th} = 30^\circ$

Tableau 2 Les propriétés des aciers

Type d'échantillon	Module d'élasticité (GPa)	Limite élastique (MPa)	Contrainte ultime (MPa)	Déformation ultime
Echantillon d'acier	200	550	604	0.08

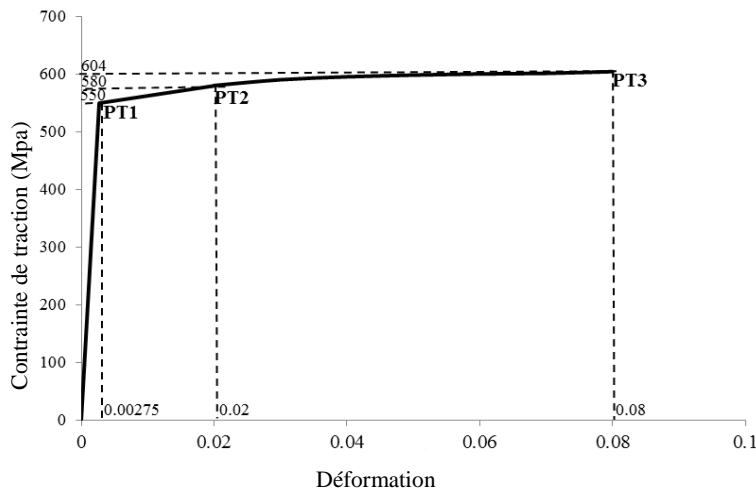


Figure 8 Comportement post-plastification des barres d'acier

Pour modéliser les joncs de carbone, une relation contrainte-déformation linéaire élastique a été adoptée. Le tableau 3 présente les valeurs utilisées pour le modèle constitutif pour les joncs de carbone selon les spécifications du fabricant.

Tableau 3 Caractéristiques des joncs de carbone

Contraite ultime (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
2300	150000

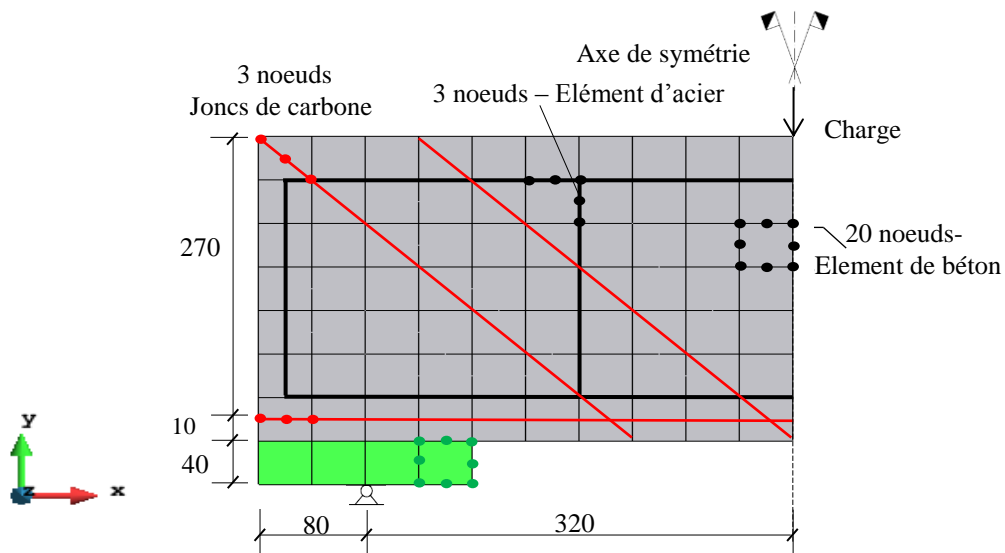


Figure 9 Les conditions limites et les dimensions

4. LES COURBES CHARGE-FLÉCHE

Un modèle EF a été élaboré pour les deux poutres non-réparées à l'effort tranchant A1CL3-B et A1T-B. La figure 10 montre une bonne corrélation dans le comportement charge-flèche entre les résultats numériques (EF) et ceux expérimentaux. Les courbes charge-flèche des deux modèles (EF) élaborés

pour les poutres réparées à l'effort tranchant avec la technique NSM et celles expérimentales sont présentées dans la figure 11. La différence de la charge de plastification des barres d'acier entre les deux poutres est due à la corrosion au milieu de la poutre corrodée qui représente 12% de perte de section.

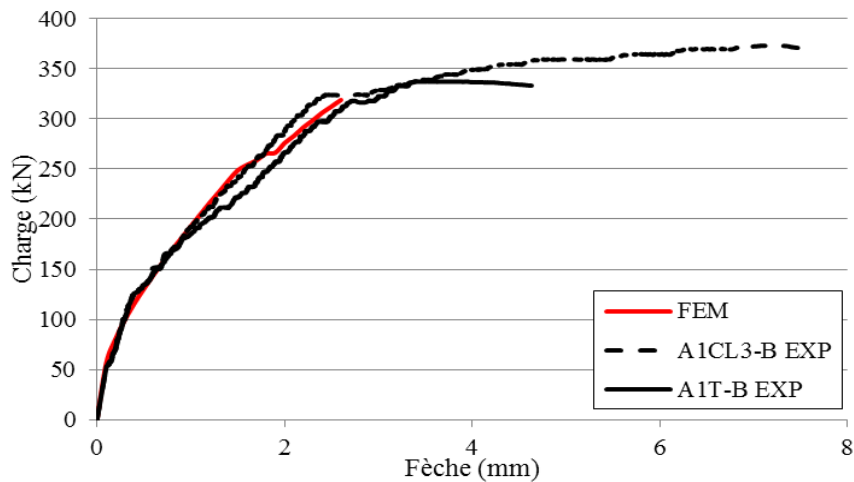


Figure 10 courbes charges-flèche pour les poutres A1CL3-B et A1T-B et le modèle EF

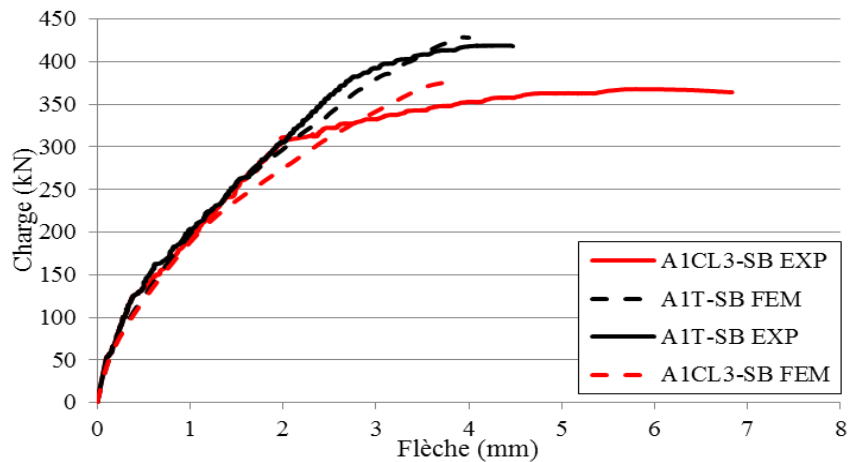


Figure 11 courbes charges-flèche pour les poutres A1CL3-SB et A1T-SB et le modèle EF

5. MODES DE RUINE

La figure 12 présente la carte de fissuration pour les deux poutres non-réparées à l'effort tranchant obtenue par le modèle numérique EF. La fissure de cisaillement diagonale ouverte indiquée dans la figure 12 en couleur pourpre représente les modes de ruine par fissuration diagonale qui coïncide avec ce qui a été constaté expérimentalement (voir figure 4). Les fissures diagonales suivent la position des barres d'acier à proximité des appuis (40mm d'enrobage). Les modes de fissuration obtenus par le modèle EF en trois dimensions sur le plan x-y présenté sur la figure 13 montre qu'une grande fissure ouverte (en pourpre) s'est produite au milieu de la poutre, le même effet de la réparation à l'effort tranchant avec la technique NSM a été constaté expérimentalement : la réparation à l'effort tranchant avec la technique NSM a changé le mode de ruine de la formation d'une fissure diagonale due au glissement des barres d'acier tendues à la formation d'une large fissure de flexion à mi-travée suivie de l'écrasement du béton comprimé comme le montre la figure 13.

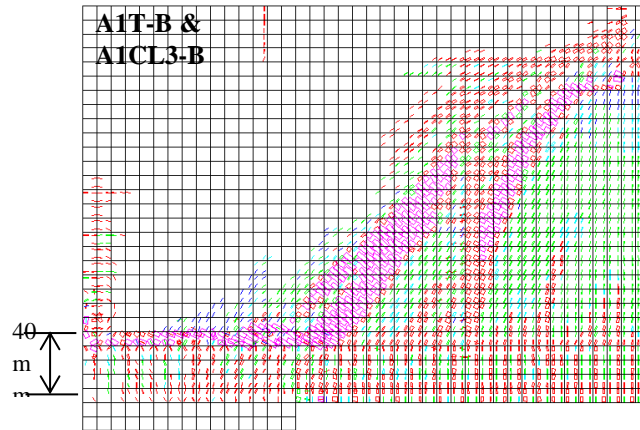


Figure 12 Carte de fissuration pour les deux poutres non-réparées à l'effort tranchant obtenue par le modèle numérique EF (A1CL3-B et A1T-B)

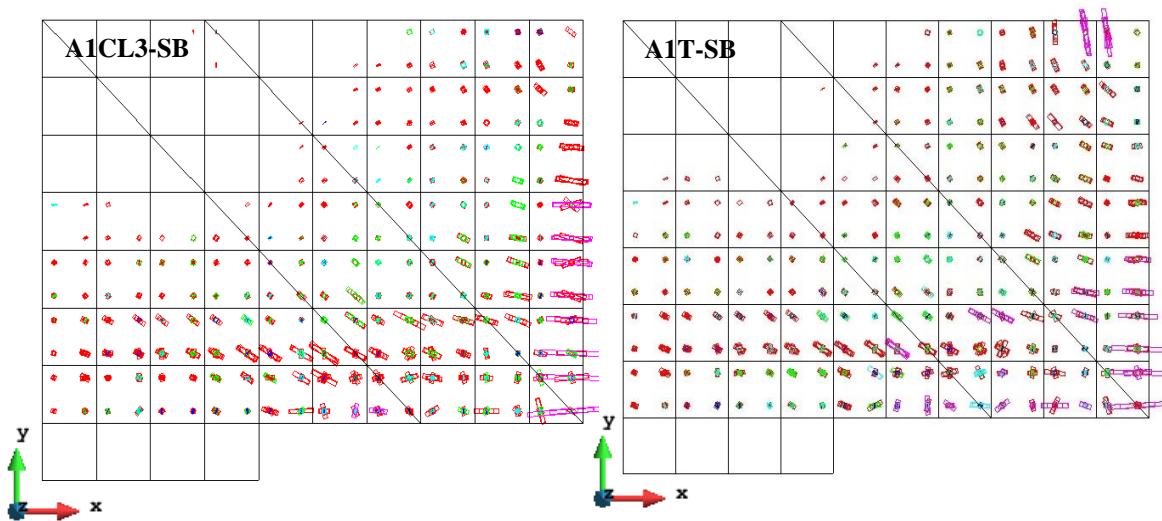


Figure 13 Cartes de fissuration pour les deux poutres réparées à l'effort tranchant obtenue par le modèle numérique EF (A1CL3-SB et A1T-SB)

6. CONCLUSIONS

Selon les résultats de la présente étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- La comparaison entre les résultats de la modélisation par EF et ceux expérimentaux a montré une bonne corrélation en terme de courbe charge-flèche et fissuration.
- La perte de section des barres d'acier a été bien montrée par les modèles EF ainsi que la réduction de la charge de plastification des barres d'acier.
- L'efficacité de la technique NSM a été limitée par l'effet semi-conique de la contribution de chaque jonc de carbone qui a conduit à des fissures de séparation au milieu des poutres réparées à l'effort tranchant.
- Un modèle EF numérique prenant en compte à la fois la réduction de section transversale des barres d'acier corrodées et le comportement d'adhérence entre des barres d'acier corrodées et le béton est nécessaire.

7. RÉFÉRENCES

- Almassri, B., Kreit, A., Al Mahmoud, F., Francois, R., 2014a. Behaviour of corroded shear-critical Reinforced Concrete beams repaired with NSM CFRP rods. *Compos. Struct.*
- Almassri, B., Kreit, A., Mahmoud, F.A., François, R., 2014b. Mechanical behaviour of corroded RC beams strengthened by NSM CFRP rods. *Compos. Part B Eng.* 64, 97–107.
- Al-Sulaimani, G., Kaleemullah, M., Basunbul, I., 1990. Rasheeduzzafar,(1990)“Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members” *ACI Structural Journal*, 87 (2), 220-231. ASTM G1.
- Andrade, C., Alonso, C., Garcia, D., Rodriguez, J., 1991. Remaining lifetime of reinforced concrete structures: Effect of corrosion on the mechanical properties of the steel.
- Barros, J.A., Baghi, H., Dias, S.J., Ventura-Gouveia, A., 2013. A FEM-based model to predict the behaviour of RC beams shear strengthened according to the NSM technique. *Eng. Struct.* 56, 1192–1206.
- Barros, J.A., Costa, I.G., Ventura-Gouveia, A., 2011. CFRP flexural and shear strengthening technique for RC beams: experimental and numerical research. *Adv. Struct. Eng.* 14, 551–571.
- Bianco, V., Barros, J.A., Monti, G., 2007. A new approach for modelling the NSM shear strengthening contribution in reinforced concrete beams. *J. Compos. Constr.*
- Bilotta, A., Ceroni, F., Di Ludovico, M., Nigro, E., Pecce, M., Manfredi, G., 2011. Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members. *J. Compos. Constr.* 15, 757–772.
- Castel, A., François, R., Arliguie, G., 2000. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams—Part 1: experimental study of corroded beams. *Mater. Struct.* 33, 539–544.
- Dang, V.H., 2013. Initiation and propagation phases of re-bars corrosion in pre-cracked reinforced concrete exposed to caronation or chloride environment. PhD thesis at l’Institut National des Sciences Appliquees de Toulouse, France.
- De Lorenzis, L., Nanni, A., 2001. Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods. *ACI Struct. J.* 98.
- Dias, S.J., Barros, J.A., 2010. Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates. *Eng. Struct.* 32, 373–384.
- Khan, I., François, R., Castel, A., 2014. Experimental and analytical study of corroded shear-critical reinforced concrete beams. *Mater. Struct.* 1–15.
- Kreit, A., Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R., 2011. Repairing corroded RC beam with near-surface mounted CFRP rods. *Mater. Struct.* 44, 1205–1217.
- Nanni, A., Di Ludovico, M., Parretti, R., 2004. Shear strengthening of a PC bridge girder with NSM CFRP rectangular bars. *Adv. Struct. Eng.* 7, 297–309.
- Omran, H.Y., El-Hacha, R., 2012. Nonlinear 3D finite element modeling of RC beams strengthened with prestressed NSM-CFRP strips. *Constr. Build. Mater.* 31, 74–85.
- Rizzo, A., De Lorenzis, L., 2009. Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement. *Constr. Build. Mater.* 23, 1555–1567.
- Rodriguez, J., Ortega, L., Casal, J., 1997. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Constr. Build. Mater.* 11, 239–248.
- Rots, J.G., De Borst, R., 1987. Analysis of mixed-mode fracture in concrete. *J. Eng. Mech.* 113, 1739–1758.
- Suryanto, B., Nagai, K., Maekawa, K., 2010. Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields. *J. Adv. Concr. Technol.* 8, 239–258.
- Tayeh, B.A., Abu Bakar, B., Megat Johari, M., Voo, Y.L., 2012. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. *Constr. Build. Mater.* 36, 538–548.
- Torres-Acosta, A.A., Navarro-Gutierrez, S., Terán-Guillén, J., 2007. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. *Eng. Struct.* 29, 1145–1152.
- Vidal, T., Castel, A., François, R., 2007. Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment. *Cem. Concr. Res.* 37, 1551–1561.
- Wang, X.-H., Li, B., Gao, X.-H., Liu, X.-L., 2012. Shear behaviour of RC beams with corrosion damaged partial length. *Mater. Struct.* 45, 351–379.
- Xia, J., Jin, W., Li, L., 2011. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment. *Corros. Sci.* 53, 1794–1805.
- Zhu, W., François, R., Coronelli, D., Cleland, D., 2013. Effect of corrosion of reinforcement on the mechanical behaviour of highly corroded RC beams. *Eng. Struct.* 56, 544–554.