



UTILISATION DES RENFORCEMENTS PAR COMPOSITES COLLÉS POUR L'AUGMENTATION DE LA DURÉE DE VIE DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

USE OF ADHESIVELY BONDED COMPOSITE REINFORCEMENT TO EXTEND STEEL STRUCTURES SERVICE LIFE

S. CHATAIGNER^{(1)*}, E. LEPRETRE⁽²⁾, L. GAILLET⁽¹⁾, L. DIENG⁽¹⁾

⁽¹⁾IFSTTAR, Département MAST, Laboratoire SMC, Bouguenais,

⁽²⁾CEREMA, DTecTM, CTOA/DGIO, Sourdun, France

* Correspondant : sylvain.chataigner@ifsttar.fr

1. INTRODUCTION

Le renforcement par composites collés est une méthode reconnue et couramment utilisée dans le domaine des structures en béton. Il permet de pouvoir augmenter la capacité portante d'une structure (en flexion ou à l'effort tranchant), de mettre en sécurité des ouvrages endommagés ou encore de les renforcer vis-à-vis de risques sismiques (AFGC, 2011) (AFGC, 2015). Dans le cas des structures métalliques, bien que de nombreux travaux existent dans la littérature (Zhao, 2014) et que la méthode soit citée dans quelques référentiels techniques (Kühn *et al.*, 2008), la méthode reste encore peu utilisée et peu de référentiels internationaux existent actuellement sur ce sujet (Moy, 2001 ; Cadei *et al.*, 2004 ; NRC, 2007 ; Schnerch *et al.*, 2007). Ceci trouve peut-être son origine dans le manque d'études sur cette thématique, mais peut être aussi par un besoin d'adaptation de la méthode aux problématiques des structures métalliques.

Il convient en effet de noter que plusieurs différences existent entre le renforcement par composites collés de structures en béton et la même technique appliquée aux structures métalliques. Tout d'abord, la problématique du collage semble plus critique dans le cas des structures métalliques puisque l'élément faible de l'assemblage ne sera plus la peau du béton. Ensuite, il est important de noter que des méthodes de réparation/renforcement pertinentes recourant à la soudure existent déjà pour les structures métalliques, même si ces méthodes peuvent ne pas être adaptées dans certains cas (matériaux métalliques anciens peu soudables, contraintes de charge de limitation de poids propre, contraintes de mise en œuvre, etc.). Par ailleurs, il est important de souligner que les pathologies des structures métalliques sont également très différentes de celles des structures en béton. En effet, si des problématiques de manque de capacité portante peuvent être rencontrées, les deux principales pathologies auxquelles les gestionnaires de ce type de structures



font face restent la corrosion et la fatigue. Pour cette seconde pathologie, il convient de noter qu'il existe deux stades : avant et après amorçage de la fissuration.

La communication proposée s'attache à présenter des études finalisées ou en cours qui tendent à répondre aux questions soulevées concernant l'utilisation du renforcement par composites collés des structures métalliques vis-à-vis de l'endommagement en fatigue, avec la particularité de s'intéresser à deux stades de renforcement : avant et après apparition de fissures de fatigue. Différentes problématiques seront abordées à commencer par la question du transfert des efforts par collage sur matériaux métalliques anciens. Puis la seconde partie sera consacrée à la présentation d'une partie des résultats des travaux de la thèse d'E. Lepretre (Lepretre, 2017) sur la réparation d'éléments métalliques fissurés par composites collés. Enfin, la troisième partie sera consacrée à la présentation d'un projet en cours sur le renforcement préventif des structures métalliques vis-à-vis de la fatigue avant le début de fissuration (*fasstbridge.eu*).

2. LE TRANSFERT DES EFFORTS PAR COLLAGE ENTRE COMPOSITE ET MATÉRIAUX MÉTALLIQUES ANCIENS

Si plusieurs études se sont déjà attachées à caractériser le transfert des efforts par collage entre matériaux composites et acier de construction actuel (Chataigner *et al.*, 2011) (Zhao, 2014), peu d'études se sont attachées à le caractériser dans les cas des aciers métalliques anciens, à savoir l'acier doux et le fer puddlé. Ce sont pourtant les structures les plus anciennes qui nécessitent le plus de travaux de renforcement ou de réparation visant à augmenter leur durée de vie. Dans le cadre de la thèse d'E. Lepretre, nous avons donc décidé d'évaluer le transfert des efforts par collage de plusieurs procédés de renforcement dans le cas de matériaux métalliques anciens (Lepretre *et al.*, 2016 a).

2.1. Matériaux étudiés

Les deux matériaux métalliques étudiés sont : un matériau proche de l'acier doux dénommé aujourd'hui S235, et des éléments en l'acier actuel S235 qui a été choisi pour ces propriétés proches des aciers doux de l'époque, et le fer puddlé provenant d'un ouvrage déconstruit et fournis par la SNCF. Trois procédés de renforcement différents ont également été étudiés associant plat composite pultrudé à fibres de carbone et résine époxy bi composant (deux procédés dits MN, « à module Normal », et un procédé dit UHM, à « Ultra Haut Module »). Il a été décidé de ne travailler que sur des procédés de plats composites à fibre de carbone car le module élastique dans le sens des fibres de ce type de matériau composite est le seul à être proche voire supérieur au module élastique des aciers de construction. On pourra trouver plus de détails sur la caractérisation de ces deux matériaux dans (Lepretre, 2017).

Pour chaque couple matériau métallique/procédé de renforcement, trois essais de caractérisation ont été réalisés. Les surfaces métalliques ont été traitées par sablage, dépolissées et dégraissées avant collage. Les surfaces des plats composites ont été traitées conformément aux préconisations des fournisseurs. La polymérisation a eu lieu en conditions laboratoire pendant plus de 48h. Les couples testés sont rappelés dans le tableau 1.

2.2. Caractérisation du comportement de l'interface

La caractérisation du comportement de l'assemblage collé a été réalisée par essai de cisaillement à simple recouvrement en collaboration avec le CEREMA (Chataigner *et al.*, 2011) selon une méthode utilisée pour la caractérisation des renforcements composites collés sur béton (Figure 1).

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 2. On constate dans un premier temps que les modes de rupture observés sont tous de nature cohésifs : avec une rupture dans la colle dans le cas des procédés de renforcements à module dit normal, et une rupture par délaminage dans le composite dans le cas du

Tableau 1. Dénomination des échantillons étudiés pour le transfert des efforts par collage entre composite et matériau métallique ancien

Echantillons	Matériau métallique	Plat composite (module élastique dans le sens des fibres, épaisseur et largeur)	Adhésif
S_NM_A	Acier doux	E = 165 GPa, e=1,2 mm, w=50 mm	Foreva
S_NM_B	Acier doux	E = 210 GPa, e=1,2 mm, w=50 mm	Sikadur 30
S_UHM_C	Acier doux	E = 460 GPa, e=2,3 mm, w=52 mm	Tyfo TC
I_NM_A	Fer puddlé	E = 165 GPa, e=1,2 mm, w=50 mm	Foreva
I_NM_B	Fer puddlé	E = 210 GPa, e=1,2 mm, w=50 mm	Sikadur 30
I_UHM_C	Fer puddlé	E = 460 GPa, e=2,3 mm, w=52 mm	Tyfo TC

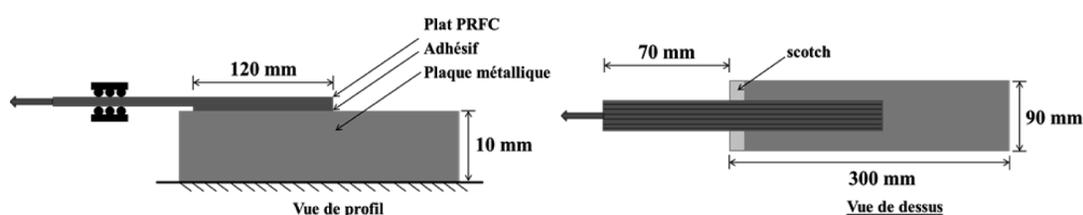


Figure 1. Dispositif d'essai à simple recouvrement



Tableau 2. Résultats des essais de caractérisation de l'assemblage collé composite/métal

Echantillons	Matériau métallique	Procédé de renforcement	Capacité ultime moyenne (kN)	Contrainte ultime moyenne (MPa)	Mode de rupture
S_NM_A	S235	A	44,5	741,1	Rupture cohésive dans la colle
S_NM_B	S235	B	39,7	660,9	Rupture cohésive dans la colle
S_UHM_C	S235	C	93,6	782,7	Délaminage du composite
I_NM_A	Fer puddlé	A	40,6	675,9	Rupture cohésive dans la colle
I_NM_B	Fer puddlé	B	40,8	679,4	Rupture cohésive dans la colle
I_UHM_C	Fer puddlé	C	>90	751,1	Délaminage du composite

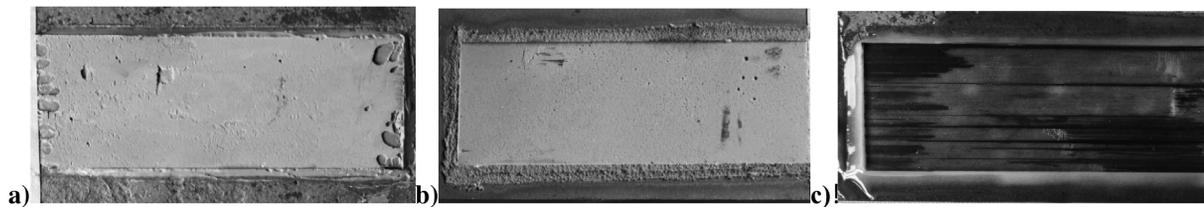


Figure 2. Photo du mode rupture obtenu sur le procédé A (cohésif dans la colle), le procédé B (cohésif dans la colle) et le procédé C (délaminage du composite)

procédé dit « ultra haut module » (Figure 2). Ceci permet de vérifier la qualité des efforts d'adhésion qui confirment le choix des méthodes de préparation de surface.

On constate ensuite que pour tous les cas étudiés, la contrainte ultime dans le matériau composite est autour de 700 MPa, bien au-dessus de la limite élastique ou à rupture des matériaux métalliques étudiés. Ceci signifie que ce type de procédé de renforcement collé est bien envisageable dans le cas des structures métalliques.

Enfin, on constate qu'il y a peu de différences entre les résultats obtenus sur acier doux et sur fer puddlé. La solution est donc bien envisageable pour tout type de structure ancienne, et la présence de nombreuses inclusions dans le fer puddlé ne semble pas entraîner de délaminage du matériau métallique ou de défauts d'adhésion.

Les longueurs caractéristiques d'ancrage ainsi que les modèles caractéristiques d'interface ont également pu être défini dans (Lepretre, 2017). Ainsi, des longueurs caractéristiques d'environ 80 mm ont été déterminées pour les procédés A et B, tandis qu'une longueur caractéristique entre 120 et 140 mm a été obtenue pour le procédé C. Ces résultats sont en accord avec d'autres résultats de la littérature dans le cas de matériaux métalliques actuels.

2.3. Conclusions et perspectives

La technique de renforcement par composites collés est donc envisageable sur les structures métalliques anciennes même dans le cas particulier du fer puddlé. Par ailleurs, il est également possible de caractériser le comportement et la résistance de l'assemblage en utilisant l'essai de cisaillement sur joint à simple recouvrement (Chataigner *et al.*, 2011). On constate que les contraintes ultimes dans les renforts composites sont très supérieures aux contraintes de service dans les structures métalliques anciennes. En outre, les longueurs additionnelles

pour l'ancrage du renforcement sont inférieures à 150 mm pour les trois procédés testés.

Bien qu'il reste des besoins en terme d'étude de durabilité de ce transfert par collage, il est intéressant de noter que les systèmes de renforcement peuvent être protégés de l'humidité par des revêtements anti-corrosion. Certaines études ont également montré qu'ils constituaient eux-même une protection anti-corrosion du substrat métallique (Chataigner *et al.*, 2012). Des études de durabilité additionnelles sont actuellement en cours, mais il semble que la solution d'assemblage par collage soit bien envisageable pour le renforcement des structures métalliques.

3. LE RENFORCEMENT DE STRUCTURES MÉTALLIQUES FISSURÉES

Une des applications possibles du renforcement par composites collés de structures métalliques peut consister dans le cas de structures anciennes à la mise en sécurité d'ouvrages fissurés en fatigue. Ceci pourrait permettre de disposer de davantage de temps avant une intervention plus lourde sur l'ouvrage ou avant son remplacement. Dans le cadre du travail de thèse d'E. Lepretre, nous avons mis au point une procédure de suivi de fissuration en laboratoire dans le cas d'éléments métalliques anciens, nous ayant ensuite permis d'évaluer la capacité de renforcement de différents procédés de composites collés (E. Lepretre, 2016 b).

3.1. Mise au point d'un protocole d'essai de suivi de fissuration

Le travail réalisé a porté sur la réparation d'une plaque trouée et fissurée à un seul bord du trou. Deux longueurs de fissure initiale avant renforcement (A1 et A2) ont été étudiées, afin de



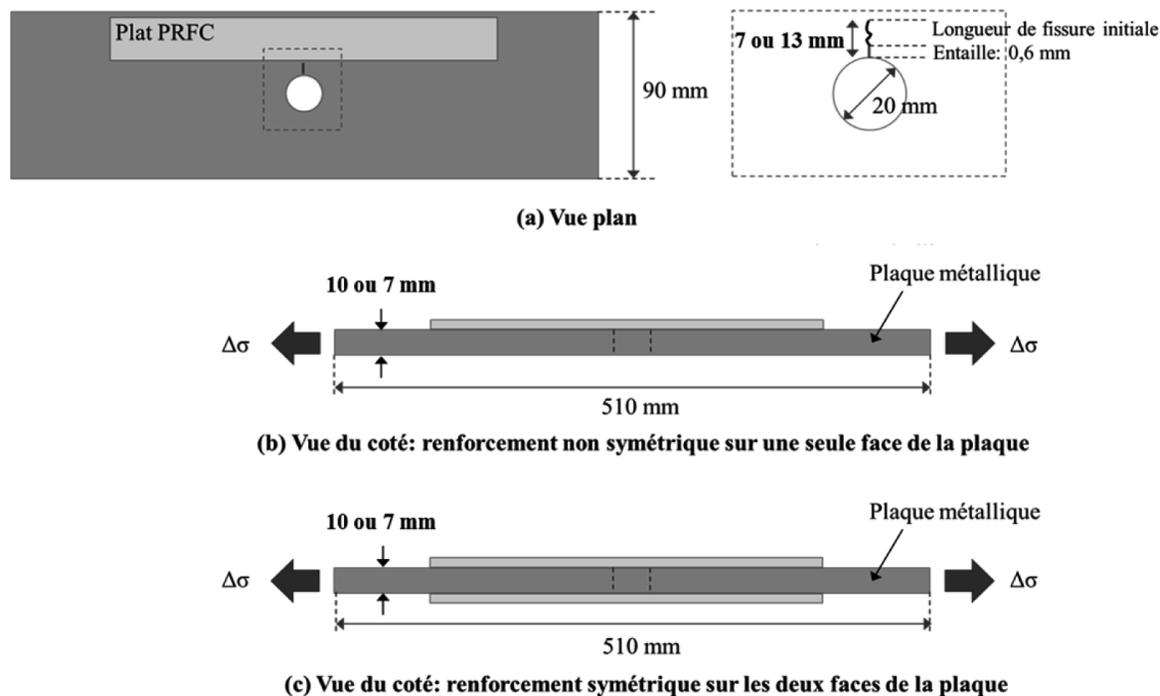


Figure 3. Géométrie des plaques et des pré-fissures étudiées ainsi que des configurations de renforcement

pouvoir évaluer l'intérêt d'un renforcement en aval de la fissure. L'obtention de la fissure initiale a nécessité deux étapes : la réalisation d'une entaille par électroérosion permettant de localiser l'amorce de la fissure, suivi d'une étape de pré-fissuration en fatigue permettant d'obtenir une fissure aigüe de longueur suffisante. La pré-fissuration consiste alors en une sollicitation mécanique de fatigue maîtrisée et décroissant graduellement pour limiter la taille de la zone plastique en pointe de fissure. Des plaques en acier doux (épaisseur de 10 mm) et en fer puddlé (épaisseur de 7 mm) ont été utilisées pour cette étude. Les dimensions des plaques renforcées étudiées sont données en figure 3.

Les renforcements composites ont été appliqué soit en aval de la fissure (longueur A1 \approx 7 mm) ou directement sur la fissure (A2 \approx 13 mm) et ont été disposés de manière non symétrique (collage sur une seule face de la plaque) ou de manière symétrique de part et d'autre de la plaque. Dans tous les cas, le renforcement n'a été réalisé que du côté fissuré de la plaque.

Dans le cas des éprouvettes en acier doux, le suivi de fissuration a été réalisé par marquage mécanique (permis par la ductilité du matériau) à l'aide d'un protocole d'essai spécifique détaillé dans (Lepretre, 2017). Ceci permet d'accéder à la forme de front de fissure et sa vitesse d'avancée pendant l'ensemble de l'essai après examen des faciès de rupture. Dans le cas des éprouvettes en fer puddlé, il n'est pas possible de recourir à cette méthodologie en raison du comportement fragile du matériau. Nous avons donc utilisé des jauges de fissuration spécifiques collées sur la face accessible de la plaque et perpendiculaires au chemin de fissuration.

L'ensemble des essais de fissuration a été réalisé à une fréquence de 10 Hz, avec un ratio de charge R de 0.1 et une amplitude de contrainte de 90 MPa afin de rester proches de procédures d'essais adoptées dans la littérature et proches des sollicitations réelles rencontrées sur ouvrage.

3.2. Résultats du renforcement par composites collés en terme d'augmentation de durée de vie

Dans le cas de l'acier doux, plusieurs procédés de renforcements ont été étudiés : procédé de renforcement à module normal (MN) (procédé A de la partie précédente) disposé de manière non symétrique ou symétrique (NS ou S), avec également l'étude de la mise en pré-tension du plat avant collage dans le cas non symétrique (T(10kN)) ; et procédé de renforcement à ultra haut module (UHM) (procédé C de la partie précédente) disposé de manière non symétrique (NS). Dans le cas du fer puddlé, seul le procédé UHM a été testé avec un renforcement non symétrique (NS).

Un exemple de faciès de rupture obtenu pour le cas de l'acier doux est donné en figure 4. On y constate que le renforcement a effectivement un effet non négligeable sur le nombre de marquages et donc la vitesse de propagation de fissure. Cet effet est non symétrique dans le cas d'un renforcement non symétrique. Dans un premier temps, les résultats obtenus en terme d'augmentation de la durée de vie sont donnés sur la figure 5. Dans le cas de l'acier doux, on constate qu'il est possible d'augmenter la durée de vie jusqu'à 127 % dans le cas d'un renforcement symétrique par collage de plats MN non tendus. Pour chaque procédé de renforcement, trois essais ont été réalisés, ce qui permet de visualiser la dispersion des résultats qui reste relativement faible dans le cas des plaques en acier. Le renforcement non symétrique à module normal, bien que plus représentatif de ce qui peut être mis en œuvre sur site, reste peu efficace en comparaison d'un renforcement symétrique. Toutefois, il est possible d'augmenter son efficacité en réalisant une précontrainte du composite avant collage (cf. figure 5 gauche). L'utilisation de plats composites à ultra haut module (procédé UHM), dans le cas d'un renforcement non symétrique, montre également



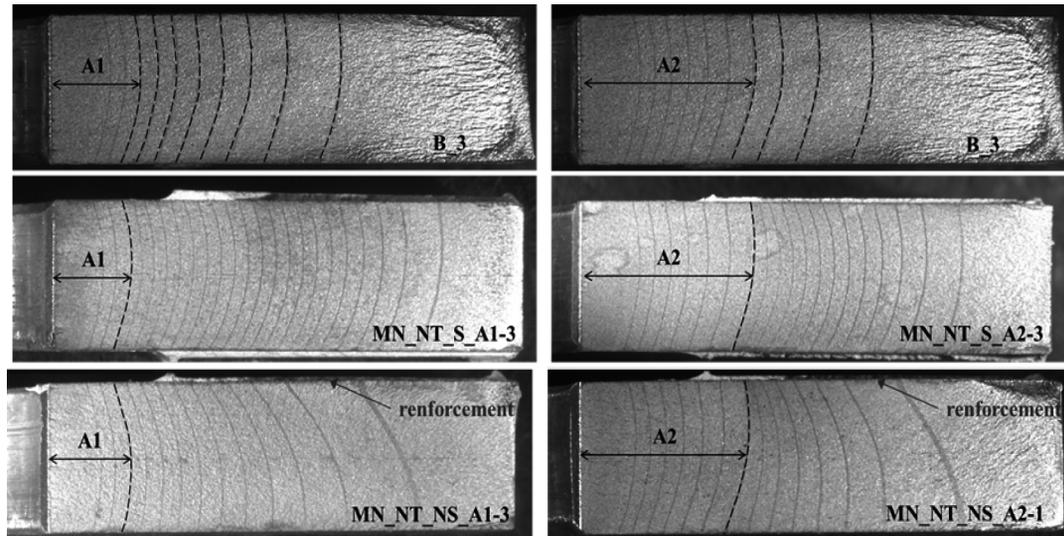


Figure 4. Faciès de rupture obtenus pour les deux longueurs de fissures étudiées (A1 et A2) et pour éprouvettes brutes non renforcées (B) et éprouvettes renforcées MN_NT (plat de module normal non tendu) dans le cas d'un renforcement symétrique (MN_NT_S) et non symétrique (MN_NT_NS)

des augmentations en durée de vie significatives comparables au cas d'un renforcement par plat MN tendu avant collage. Dans le cas du fer puddlé, seul le procédé UHM a été testé et pour une configuration de renforcement non symétrique. Pour chaque longueur de fissure initiale, les résultats sont donnés en figure 5. Comme pour les éprouvettes en acier, trois essais ont été réalisés pour chaque série et ces trois essais sont présentés de manière distincte permettant d'observer la grande dispersion des résultats due à la plus forte hétérogénéité du matériau fer puddlé. Cependant, dans tous les cas, le renforcement permet une augmentation de durée de vie supérieure à 100 %. Cette augmentation semble plus importante que l'augmentation de durée de vie sur acier doux, mais il convient de noter que les épaisseurs des plaques étaient différentes (7 mm pour le fer puddlé et 10 mm pour l'acier doux).

3.3. Influence du renforcement sur la propagation de fissure et perspectives

L'influence du renforcement sur la vitesse de propagation des fissures a également pu être étudiée dans les différents cas précédents. Ces résultats sont présentés dans (Lepretre, 2017) et

ne sont pas détaillés ici. On pourra toutefois noter que l'étude des cinétiques de propagation de fissure permet de vérifier que le renforcement a un impact avant que la fissure n'atteigne la zone renforcée. Un exemple de résultat expérimental est donné sur la figure 6 où on constate que, dès le début de l'essai après mise en place du renforcement, la cinétique de propagation de fissure est diminuée et ce, avant même que la pointe de fissure n'ait atteint le bord du plat composite collé.

Des études additionnelles sont en cours afin de proposer des approches de modélisation de l'effet du renforcement, qui pourraient permettre ensuite de concevoir ce dernier en fonction de la structure étudiée et des contraintes résiduelles existantes (Lepretre *et al.*, 2016 c). Ces études s'appuient sur les modèles analytiques et les modèles numériques développés dans (Lepretre, 2017).

4. LE RENFORCEMENT DE STRUCTURES NON FISSURÉES

L'efficacité du renforcement collé avant que la fissure n'atteigne la zone renforcée s'explique par la participation du renfort à la reprise locale des efforts. Il est donc possible d'imaginer

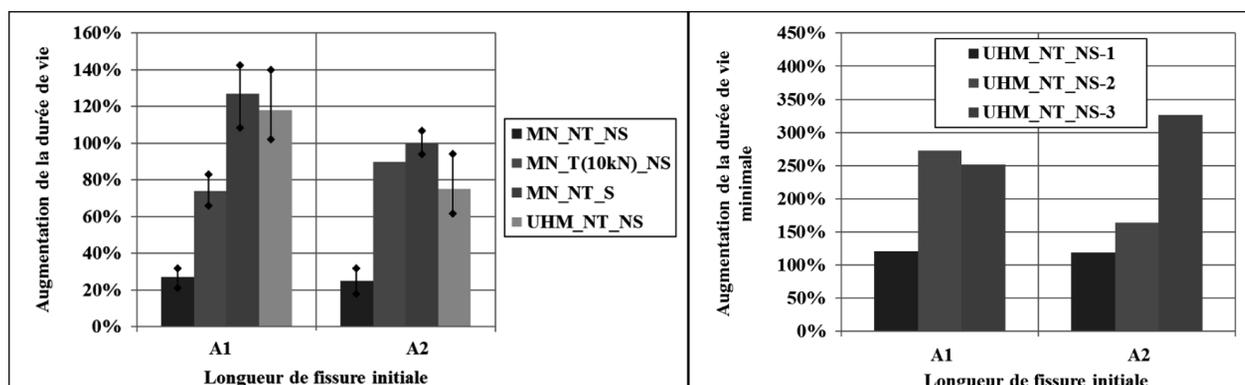


Figure 5. Augmentation de la durée de vie obtenue expérimentalement dans le cas de l'acier doux (à gauche) et dans le cas du fer puddlé (à droite)



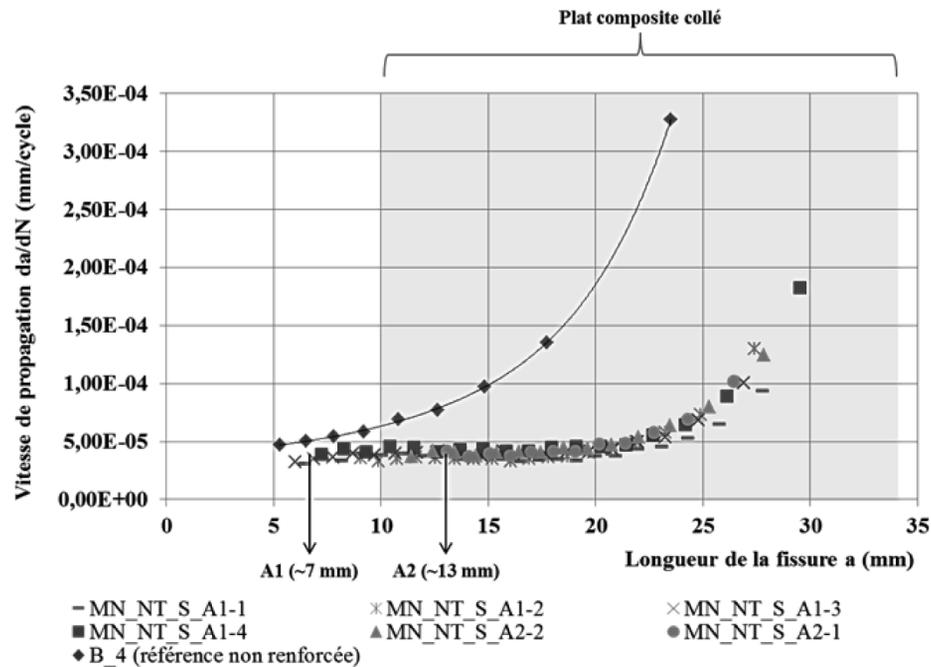


Figure 6. Exemple de courbe expérimentale obtenue reliant la vitesse de propagation de fissure à sa longueur dans le cas de plaques en acier doux renforcées de manière symétrique par plats MN non tendus (MN_NT_S)

l'application de ce type de renforcement avant fissuration en vue d'augmenter la durée de vie d'un détail ou d'une structure en fatigue. C'est la démarche que nous poursuivons actuellement dans le cadre du projet Européen FASSTbridge piloté par Tecnalia et en partenariat avec Dragados, la Communauté de communes de Madrid (Espagne), Collanti (Italie), LAP, MPA Stuttgart (Allemagne), et Altavista (Etats-Unis).

4.1. Présentation du projet FASSTbridge

Le projet FASSTbridge (Fast and effective strengthening solution for steel bridges life-time extension) vise à proposer une solution complète intégrant la méthodologie d'évaluation de la structure existante, de dimensionnement du renforcement et de son application sur site avec instrumentation ainsi que le développement d'un système de renforcement par composite collé spécifique pour le projet (Figure 7). L'ensemble de la solution sera appliquée sur un ouvrage réel de la communauté de

communes de Madrid. On pourra trouver davantage d'informations sur fastbridge.eu ou encore (Chataigner *et al.*, 2016).

4.2. Sélection des composants du système de renforcement et perspectives

Afin que le renforcement soit efficace vis-à-vis de la fatigue, deux solutions pertinentes existent : utiliser un renforcement précontraint ou utiliser un renforcement à haut module de façon à ce qu'il participe de manière significative à la reprise des efforts locaux. Dans le cadre de ce projet, nous avons décidé d'adopter la seconde stratégie et d'utiliser des composites à ultra haut module fournis par l'entreprise Epsilon Composites. La résine époxy a été spécifiquement formulée pour le projet par Collanti et est actuellement en cours de qualification au vu des contraintes spécifiques des structures métalliques. Le système entier sera ensuite qualifié tant du point de vue de ses capacités mécaniques que de sa durabilité avec une campagne expérimentale

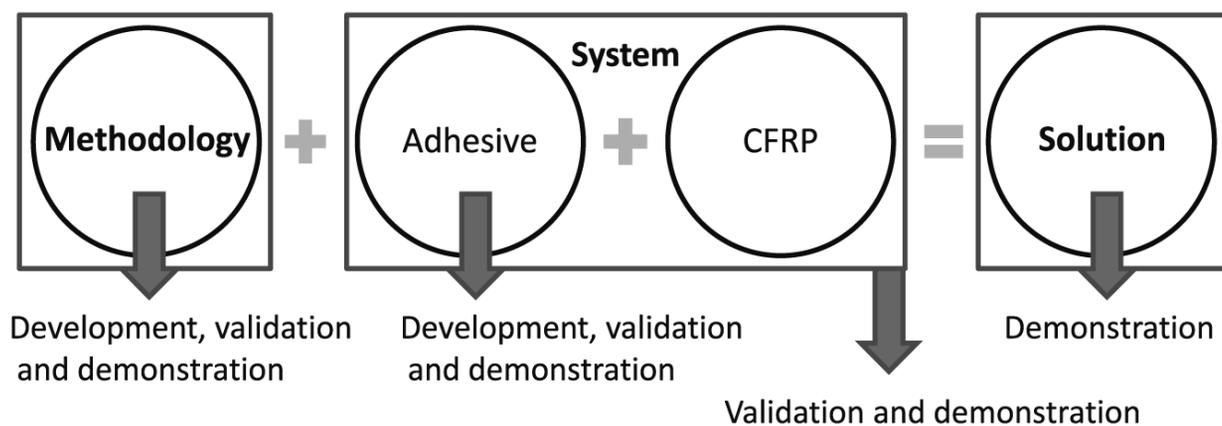


Figure 7. Schéma des objectifs du projet FASSTBridge





Figure 8. Pont métallique de la communauté de Madrid sur lequel la solution FASSTbridge sera mise en œuvre

importante. Le système sera ensuite mis en œuvre sur site sur l'ouvrage métallique présenté en figure 8.

5. CONCLUSION

L'utilisation des renforcements par composites collés pour augmenter la durée de vie en fatigue des structures métalliques, bien que peu utilisée, est une des techniques disponibles pour les maîtres d'ouvrage au même titre que d'autres techniques comme le parachèvement par grenailage par exemple (Dieng *et al.*, 2017). Chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients et il convient en amont d'étudier précisément la problématique et les contraintes de l'ouvrage pour choisir la technique qui sera la plus adaptée.

Le renforcement par composites collés semble particulièrement adapté au cas des structures métalliques anciennes et nous avons pu vérifier que le transfert des efforts par collage était possible dans ce cas. Bien qu'il reste des travaux à réaliser sur la question de la durabilité, nous avons également dans cette communication mis en avant deux applications possibles de ce type de renforcement dans le cas de la fatigue.

La première application concerne le cas des structures fissurées et devrait permettre d'augmenter les délais d'intervention ou d'inspection. La détection de la pointe de fissure nécessaire pour la méthode du trou d'arrêt n'est dans ce cas pas aussi critique puisque nous avons pu montrer que le renforcement agissait même si la fissure n'avait pas encore traversé la zone renforcée. La seconde application concerne l'augmentation de la durée de vie des structures existantes non fissurées pour laquelle le projet FASSTbridge en cours devrait apporter une méthodologie complète et la tester sur un ouvrage réel. On retiendra également que deux solutions de renforcements par composites collés semblent particulièrement pertinentes dans le cas des structures métalliques : l'utilisation de composites à ultra haut module et l'utilisation de composites précontraints. Ce dernier sujet nécessite toutefois encore de nombreux travaux notamment concernant la durabilité du joint de colle sous charge.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les entreprises Freyssinet, SIKA, Fyfe et la SNCF ainsi que le CEREMA pour leurs contributions aux études concernant le renforcement de structures fissurées (Lepretre, 2017).

Les auteurs tiennent également à remercier l'ensemble des participants au projet FASSTbridge (fasstbridge.eu) qui est cofinancé par les partenaires d'ERA-NET Plus Infravation et la Commission Européenne (FP7 - no 31109806.0008). Les partenaires d'Infravation 2014 sont :

MINISTERIE VAN INFRASTRUCTUUR EN MILIEU, RIJKSWATERSTAAT, BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG, DANISH ROAD DIRECTORATE, STATENS VEGVESEN VEGDIREKTORATET, TRAFIKVERKET – TRV, VEGAGERDIN, MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, CENTRO PARA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO INDUSTRIAL, ANAS S.p.A., NETIVEI, ISRAEL - NATIONAL TRANSPORT INFRASTRUCTURE COMPANY LTD, FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION USDOT.

RÉFÉRENCES

- Association Française de Génie Civil, *Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, Février 2011.
- Association Française de Génie Civil, *Renforcement parasismique de structures en béton armé par matériaux composites – Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, Juin 2015.
- Cadei JMC, Stratford TJ, Hollaway LC, Duckett WG (2004) Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers (C595). CIRIA Design Guide, London, ISBN 0-86017-595-2.
- Chataigner S., Caron J.F., Benzarti K., Quiertant M., Aubagnac C., Use of a single lap shear test to characterize composite-to-concrete or composite-to-steel bonded interfaces, *Construction and Building materials*, Vol.25: 468-478, 2011.
- Chataigner S., Gagnon A., Quiertant M., Benzarti K., Aubagnac C., Durabilité de l'interface collée entre un renfort composite et un support métallique. *Revue des composites et des matériaux avancés*. Numéro spécial Matériaux composites pour le renforcement des structures de Génie Civil. Volume 22(2) - p. 155-170. 2012.
- Chataigner S., Calderon I., Schulte C., Presentation of the FASSTbridge project: FASt and effective Solution for Steel bridges life-time extension, proceedings of CICE 2016, Hong Kong.





- Dieng L., Amine D., Falaise Y., Chataigner S., Parametric study of finite element modeling of shot peening on welded joints, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.130, pp. 234-247, 2017.
- Kühn B., Lukic M., Nussbaumer A., GPunther H.P., Helmerich R., Herion S., Kolstein M.H., Walbridge S., Androic B., Dijkstra O., Bucak O., *Assessment of existing steel structures : recommendations for estimation of remaining fatigue life*, JRC Scientific and Technical Report, EUR 23252, 2008.
- Lepretre E., Chataigner S., Dieng L., Gaillet L., Gagnon A., Roth J., LeRoy C., Experimental Characterization of different adhesively bonded composite reinforcement processes for old steel structures, proceedings of Structural Faults and Repair, Edinburgh, 2016 a.
- Lepretre E., Chataigner S., Dieng L., Gaillet L., Reinforcement of old steel structures by CFRP bonding, modified mode I stress intensity factor, proceedings of CICE 2016, Hong Kong, 2016 b.
- Lepretre E., Chataigner S., Dieng L., Gaillet L., Cannard H., Numerical and experimental investigations of hot driven riveting process on old steel structures, *Engineering Structures*, Vol.127, pp. 583-593, 2016 c.
- Lepretre E., Efficacité du renforcement par composites collés vis-à-vis de la propagation de fissures de fatigue pour une application aux structures rivetées, Phd Thesis, UBL - Ecole Centrale Nantes, 2017.
- Moy S.S.J., Guidelines FRP Composites: Life extension and strengthening of metallic structures: ICE design and practice guide, 2001, Thomas Telford.
- National Research Council, Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures – Metallic structures – Preliminary study, CNR DT 202/2005, Rome, 2007.
- Schnerch D., Dawood M., Rizkalla S., Sumner E., « Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials », *Construction and building materials*, vol. 21, 2007, p. 1001-1010.
- Zhao X.L.: *FRP-strengthened metallic structures*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2014.