

# Utilisation des renforcements par composites collés pour l'augmentation de la durée de vie en fatigue des structures métalliques anciennes

Lepretre Emilie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEREMA, DtecITM, CTOA/DGOI, Sourdun, France, [emilie.lepretre@cerema.fr](mailto:emilie.lepretre@cerema.fr)

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*RÉSUMÉ.* Après la corrosion, la fatigue représente la deuxième cause d'endommagement des structures métalliques anciennes. Celle-ci se manifeste par l'apparition puis la propagation de fissures dans les zones les plus fortement sollicitées. Dans le cas des assemblages rivetés, l'amorce des fissures a lieu préférentiellement en bord de perçage, rendant difficile leur détection. Dans ce contexte, l'objectif du travail réalisé a été d'étudier l'efficacité d'un renforcement par composites collés dans le cas de fissures émanant de trous de rivets. Des essais ont été réalisés sur éprouvettes de petites dimensions, constituées de matériaux métalliques anciens de l'époque, tels que le fer puddlé et l'acier doux, et renforcées à l'aide de différents procédés de renforcement par plats composites collés. Les résultats obtenus ont permis, d'une part, de quantifier le ralentissement de la propagation de fissures, et d'autre part de mener une analyse en terme de facteur d'intensité de contraintes. Un premier modèle analytique de propagation a pu être proposé, puis un modèle numérique a été mis en place afin de permettre la transposition des résultats à d'autres géométries d'éléments rencontrés sur ouvrage.

*ABSTRACT.* After corrosion, fatigue phenomenon is the main cause of damage in old metallic structures. Fatigue cracks appear in stress concentration area and can lead to the ruin of the bridge. In old metallic structures, fatigue cracks mainly occurs at the edge of the rivet hole and are thus difficult to detect. The main objective of the present work is to study the effectiveness of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) laminates in reinforcing fatigue crack emanating from the rivet hole. Thus, investigations on small-scale specimens were done, taking into account the old metallic materials such as puddled iron and mild steel, and different reinforcement processes. The main results showed firstly the efficiency of the different studied reinforcement configurations in slowing down crack propagation. The second part of this work was dedicated to a simple analytical formulation of the modified SIF corresponding to each reinforcement configurations. A numerical tool was proposed, so that the obtained results may be developed for different configurations.

*MOTS-CLÉS :* PRFC, fatigue, structures rivetées, mécanique de la rupture.

*KEY WORDS :* CFRP, fatigue, riveted structures, fracture mechanics.

---

## 1. Introduction

Le renforcement par composites collés est une méthode reconnue et couramment utilisée dans le domaine des structures en béton. Il permet d'augmenter la capacité portante de la structure (renforcement à la flexion ou à l'effort tranchant), de mettre en sécurité des ouvrages endommagés, ou encore de renforcer les structures vis-à-vis de risques sismiques [AFG 11] [AFG 15]. Dans le cas des structures métalliques, les recherches sur le sujet sont plus récentes et bien que de nombreux travaux existent dans la littérature [ZHA 14], la méthode reste encore peu utilisée dans la pratique. Cela s'explique sans doute par le manque d'études sur certaines thématiques comme le renforcement en fatigue, qui représente pourtant une des principales pathologies des structures métalliques anciennes, après la corrosion.

Dans ce contexte, le travail présenté ici a eu pour objectif d'étudier l'efficacité d'un renforcement par composites collés dans le cas de structures métalliques anciennes, en tenant compte des zones préférentielles d'amorce de fissures (les trous de rivets) et des matériaux métalliques de l'époque (le fer puddlé et les aciers doux). Différentes problématiques ont été abordées, à commencer par la question du transfert des efforts par collage sur matériaux métalliques anciens. Par la suite, la réalisation d'essais sur plaques métalliques fissurées et renforcées par différents plats PRFC collés (polymères renforcés de fibres de carbone) a permis de mettre en évidence et de quantifier l'efficacité de la technique de renforcement. Enfin, la dernière étape du travail a consisté à mettre en place un modèle EF des éprouvettes renforcées permettant une étude de l'influence des différents paramètres de renforcement (module, géométrie du renforcement), ainsi qu'une transposition des résultats à d'autres géométries.

## 2. Le transfert des efforts par collage entre matériaux métalliques anciens et plats PRFC

Bien que plusieurs études se soient attachées à caractériser le transfert des efforts par collage entre matériaux composites et acier de construction actuel [CHA 11] [ZHA 14], aucune étude ne s'est intéressée au cas des matériaux métalliques anciens de la construction, à savoir l'acier doux et le fer puddlé. Pourtant, dans la pratique, les structures métalliques anciennes sont celles nécessitant le plus de travaux de renforcement et/ou de réparation visant à augmenter leur durée de vie.

### 2.1. Matériaux de l'étude

Les deux matériaux métalliques étudiés sont : le fer puddlé, provenant d'un ouvrage déconstruit et fourni par la SNCF, et l'acier actuel S235 choisi pour ses propriétés proches des aciers doux de l'époque [BAS 01]. Trois procédés de renforcement par plats composites collés sont également étudiés : deux procédés dits MN correspondant à l'utilisation de plats à Module Normal ( $E=165$  GPa et  $E=210$  GPa) et associés à une résine époxy bi-composant propre à chaque procédé; et un procédé dit UHM correspondant à l'utilisation de plats à Ultra Haut Module ( $E=460$  GPa) également associés à une résine époxy bi-composant propre au procédé. Le choix de plats composites à fibres de carbone repose sur leur module élastique (dans le sens des fibres) proche voire supérieur au module élastique des matériaux métalliques. Plus de détails sur la caractérisation de ces différents matériaux sont disponibles dans [LEP 17].

### 2.2. Essais de caractérisation de l'interface

La caractérisation du comportement de l'assemblage collé métal/PRFC a été effectuée via des essais de cisaillement à simple recouvrement et selon une méthode initialement utilisée dans le cas des assemblages béton/PRFC [CHA 11]. La géométrie des éprouvettes testées est donnée sur la figure 1, tandis que le tableau 1 rappelle les différents couples métal/PRFC testés. A noter que pour chaque couple étudié, trois essais sont réalisés afin de s'assurer de la bonne répétabilité des résultats.

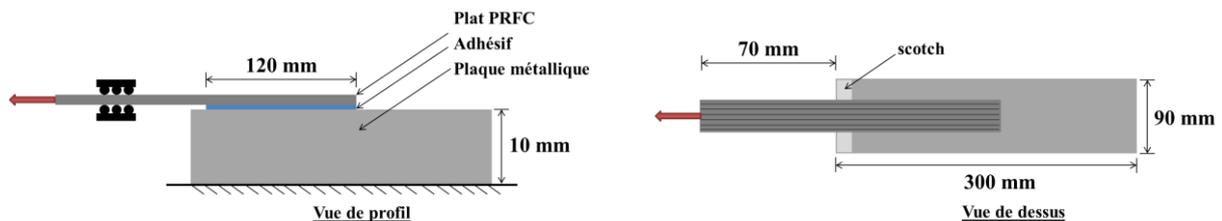


Figure 1. Dispositif d'essai à simple recouvrement.



### 3. Le renforcement à la fatigue de structures métalliques anciennes

Dans le cas d'un renforcement à la fatigue, les recherches de la littérature ont principalement concerné le renforcement de plaques métalliques à entaille centrale [BAS 01] [LIU 09] [WU 12b]. Dans ces conditions, l'efficacité maximale du renforcement composite est obtenue quand celui-ci est collé directement sur la partie fissurée et sur chaque face de l'élément entaillé. Dans le travail réalisé, nous nous sommes intéressés à une géométrie d'éléments et à des conditions de fissuration proches de ce qui est observable sur ouvrages rivetés réels. Pour cela des essais sur plaques percées présentant une unique fissure de fatigue en bord de perçage ont été réalisés. De même, la position et les dimensions du plat composite collé tiennent compte de la faisabilité d'application sur ouvrages rivetés réels.

#### 3.1. Géométrie des éprouvettes et protocole de suivi de fissuration

Les dimensions des plaques percées ont été choisies de sorte à être représentatives des dimensions rencontrées sur assemblages rivetés réels (éléments de type cornière ou semelles inférieures). Des plaques en acier doux (épaisseur de 10 mm) et en fer puddlé (épaisseur de 7 mm) ont été utilisées et deux longueurs de fissure initiale avant renforcement ont été étudiées. Cela permet de représenter deux stades d'endommagement : A1  $\approx$  7 mm (correspondant à une fissure se trouvant sous la tête de rivet et qui ne peut être détectée que par l'utilisation de techniques de contrôle non destructif adaptées); A2  $\approx$  13 mm (correspondant à une fissure propagée au-delà de la tête de rivet et pouvant être détectée par examen visuel ou par ressuage, magnétoscopie). L'obtention d'une unique fissure de fatigue en bord de perçage a nécessité deux étapes principales : 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 (une sollicitation mécanique de fatigue maîtrisée, et décroissant graduellement, a été appliquée afin de limiter la taille de la zone plastique en pointe de fissure). Suite à cette étape de pré-fissuration, la fissure dite longue (se trouvant en dehors de la zone affectée par le perçage) est propagée en fatigue sous amplitude de contrainte constante.

Les dimensions des plaques renforcées étudiées sont données sur la figure 3. Les plats composites ont été appliqués de manière non symétrique (collage sur une seule face de la plaque) ou de manière symétrique (collage sur les deux faces de la plaque). Dans tous les cas, le collage du plat composite a lieu uniquement du côté fissuré de la plaque et en respectant une distance de 10 mm à partir du bord du trou correspondant, dans la réalité, à l'emprise de la tête de rivet.

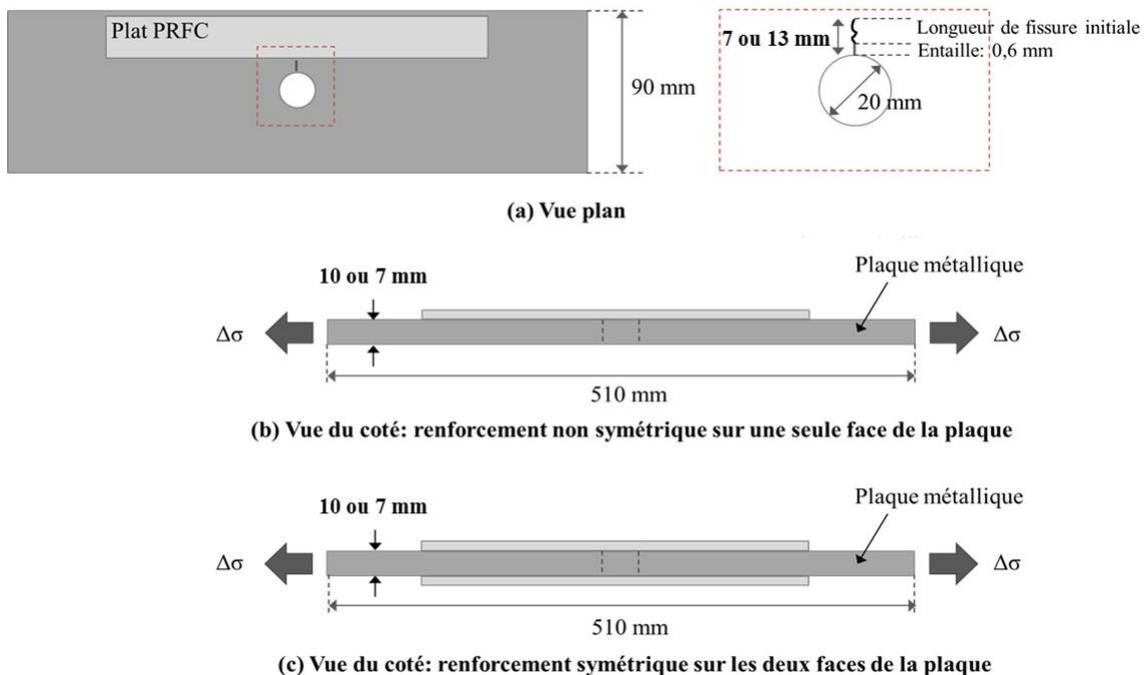


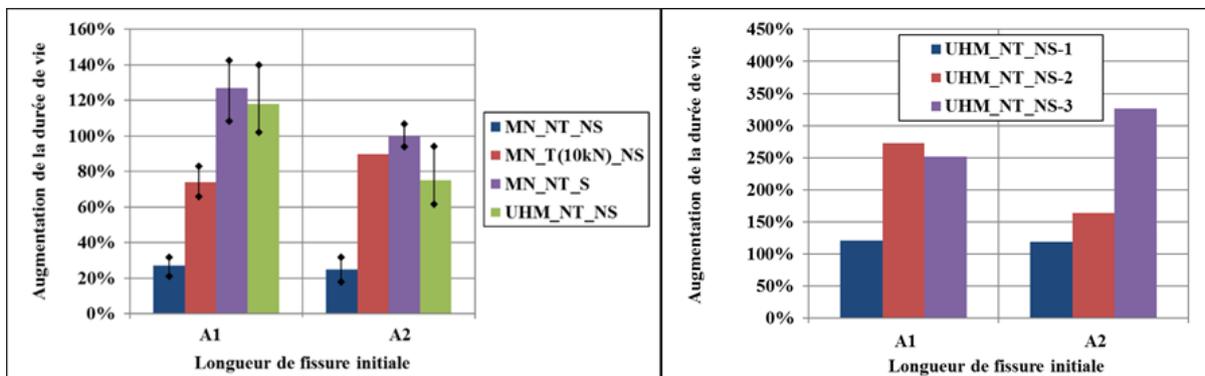
Figure 3. Géométrie des plaques fissurées renforcées.

Dans le cas des éprouvettes en acier doux, le suivi de la durée de vie a été réalisé (par marquage mécanique à l'aide d'un protocole d'essai spécifique détaillé dans [LEP 17]). Dans le cas des éprouvettes en fer puddlé, le comportement fragile du matériau ne permet pas de recourir à cette méthode de suivi. Pour cette raison, des jauges de fissuration spécifiques ont été utilisées. Celles-ci sont collées sur la plaque métallique (sur la face non renforcée) perpendiculairement au chemin de fissuration. Pour l'ensemble des éprouvettes renforcées, les essais de fatigue ont été menés à une fréquence constante de 10Hz, avec un ratio de charge  $R=0,1$  et une amplitude de contrainte de 90 MPa, permettant de rester cohérent avec les sollicitations réelles rencontrées sur ouvrage.

### 3.2. Efficacité du renforcement par composites collés

Dans le cas des éprouvettes en acier doux, plusieurs procédés et configurations de renforcement ont été étudiés : procédé de renforcement MN (procédé A de la partie précédente) disposé à la fois de manière symétrique (S) et non symétrique (NS), avec mise en pré-tension ou non du plat avant collage dans le cas non symétrique (T(10kN)\_NS); et procédé de renforcement UHM (procédé C de la partie précédente) disposé de manière non symétrique. Pour chaque configuration de renforcement testée, trois éprouvettes ont été réalisées afin de s'assurer de la bonne répétabilité des résultats. Dans le cas des éprouvettes en fer puddlé, suite aux premiers résultats obtenus sur éprouvettes en acier, et du fait de la faible quantité de matériau métallique disponible, il a été décidé de ne s'intéresser qu'au procédé de renforcement UHM, disposé de manière non symétrique. Une fois encore, trois éprouvettes ont été testées pour chaque configuration de renforcement.

La figure 4 présente, sous la forme d'un diagramme, l'augmentation de la durée de vie obtenue pour chaque configuration d'éprouvettes, en fonction de la longueur initiale de la fissure avant renforcement. Dans le cas des éprouvettes en acier doux (Figure 4 (gauche)), la dispersion des résultats (relative aux trois essais réalisés pour chaque configuration) reste relativement faible pour l'ensemble des configurations. Une augmentation de la durée de vie allant jusqu'à 127% est observée pour un renforcement par plats MN non tendus disposés de manière symétrique (MN\_NT\_S). Dans le cas d'un renforcement non symétrique par plat MN non tendu, l'augmentation de la durée de vie constatée reste peu significative. La mise en pré-tension du plat MN avant collage va alors permettre d'augmenter significativement l'efficacité du renforcement en accentuant les phénomènes de fermeture de fissure. Toutefois, la mise en pré-tension des plats composites avant collage soulève encore de nombreuses questions quant à la durabilité de l'assemblage collé (perte de précontrainte dans le temps, zone de concentration de contraintes, ...) [WAN 14]. Pour toutes ces raisons, l'utilisation de plats composites à Ultra Haut Module semble être une solution intéressante (cf. Figure 4 (gauche)).



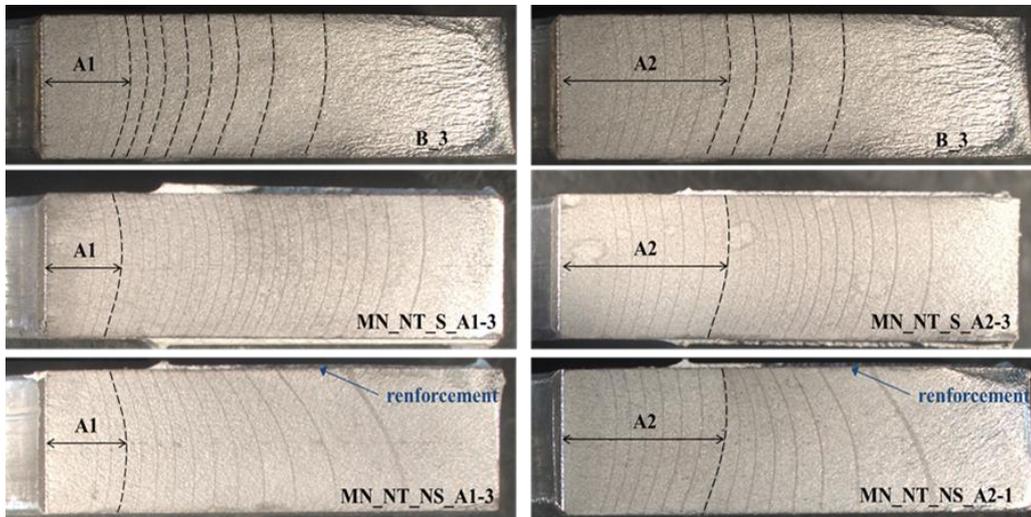
**Figure 4.** Augmentation de la durée de vie obtenue expérimentalement : (gauche) éprouvettes en acier doux; (droite) éprouvettes en fer puddlé.

Dans le cas des éprouvettes en fer puddlé (cf. Figure 4 (droite)), les résultats associés à chaque éprouvette de même configuration sont présentés de manière distincte, et ce pour les deux longueurs de fissure initiale considérées. Cela s'explique par la grande dispersion des résultats due à la forte hétérogénéité du matériau fer puddlé [LEP 17]. Quoiqu'il en soit, il est intéressant de noter que le renforcement par plat UHM (non tendu et disposé de manière non symétrique (UHM\_NT\_NS)) permet une augmentation de durée de vie supérieure à 100% dans tous les cas. Cette augmentation semble alors plus importante que l'augmentation en durée de vie constatée dans le cas des éprouvettes en acier doux, mais doit être mise en relation avec la différence d'épaisseur des plaques percées fissurées (7 mm pour le fer puddlé et 10 mm pour l'acier doux).

### 3.3. Influence du renforcement sur la propagation de fissures et conclusions

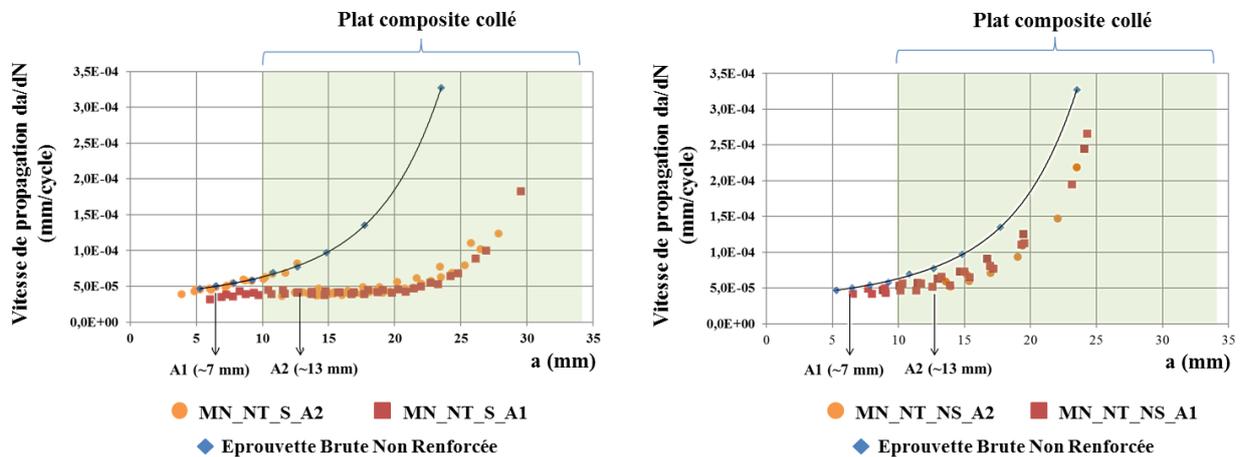
Un exemple de faciès de rupture obtenus dans le cas des éprouvettes en acier, utilisés ensuite pour le tracé des courbes de propagation, est donné sur la figure 5. On y constate alors une augmentation du nombre de marquages

dans le cas des éprouvettes renforcées latérales. L'essai de Paris [PAR 63] a permis de constater un ralentissement de la vitesse de propagation de la fissure. Par ailleurs, il est également intéressant d'observer la forme du front de fissure, qui évolue de manière non symétrique dans le cas d'un renforcement non symétrique.



**Figure 5.** Faciès de rupture obtenus pour les deux longueurs de fissure étudiées (A1 et A2) et pour éprouvettes brutes non renforcées (B) et éprouvettes renforcées par plats MN non tendus disposés de manière symétrique (S) et non symétrique (NS).

Un exemple de tracé de courbes de propagation dans le cas des éprouvettes en acier, renforcées par plats MN non tendus, disposés de manière symétrique et non symétrique, est présenté sur la Figure 6. L'étude des cinétiques de propagation permet de vérifier l'impact du renforcement, dès sa mise en place, sur la vitesse de propagation de la fissure. On constate ainsi un ralentissement de l'avancée de la fissure avant même que celle-ci n'ait atteint le bord du plat composite collé. L'ensemble des courbes de propagation obtenues dans les différents cas de renforcement testés sont disponibles dans [LEP 17]. Ils ont notamment permis la mise en place d'une approche de modélisation analytique et numérique présentée dans la partie suivante.



**Figure 6.** Exemple de courbes de propagation obtenues expérimentalement dans le cas des éprouvettes en acier renforcées de manière symétrique (gauche) et non symétrique (droite).

#### 4. Mise en place d'un modèle de modification du facteur d'intensité de contraintes dans le cas des éprouvettes renforcées

L'utilisation de lois de propagation telle que la très connue loi de Paris [PAR 63] repose sur la détermination du facteur d'intensité de contraintes (FIC),  $\Delta K$ , en pointe de fissure. Dans un premier temps, l'approche proposée a consisté à déterminer, de manière semi-empirique, une formulation du FIC dans le cas des éprouvettes renforcées constituées d'acier doux. Par la suite, la mise en place d'un modèle EF, toujours dans le cas des éprouvettes en acier doux, a permis de valider les formulations précédentes, et de fournir un outil de calcul



sont alors observables pour les ACPDHS issus de la série 2017a, 15.00/15.15 (15 mm) comparable pour les autres configurations étudiées dans [LEP 17], tend à valider le modèle numérique mis en place. Une faible influence du choix entre modèle « classique » ou « zone cohésive » dans la prise en compte du joint de colle est également constatée. Le principal avantage du modèle de zone cohésive reste toutefois l'observation de l'endommagement du joint de colle comparable et similaire à ce qui a pu être obtenu expérimentalement (cf. Figure 7 (droite)).

## 5. Conclusions

Le renforcement par composites collés semble particulièrement adapté au cas des structures métalliques anciennes dans le but d'augmenter leur durée de vie en fatigue. Aujourd'hui, cette technique n'est que rarement employée (davantage à l'étranger), bien que son efficacité ait déjà pu être démontrée. Dans le cadre de cette étude, plusieurs résultats intéressants ont pu être apportés notamment concernant la mise en place d'un modèle EF fiable pouvant par la suite être adapté à des géométries plus complexes (assemblages rivetés), en tenant compte de l'état de contraintes initial (contraintes résiduelles de rivetage). A ce stade, des études additionnelles restent néanmoins nécessaires afin de valider complètement la méthode proposée (prise en compte du fer puddlé, influence des paramètres, ...). De même, la question de la durabilité d'une telle technique de renforcement doit être davantage explorée.

## 6. Bibliographie

- [AFG 11] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL, *Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, Février 2011.
- [AFG 15] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL, *Renforcement parasismique de structures en béton armé par matériaux composites – Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, Juin 2015.
- [BAS 01] BASSETTI A., *Lamelles précontraintes en fibres carbone pour le renforcement de ponts rivetés endommagés par fatigue*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2001.
- [CHA 11] 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, 2011, p. 468-478.
- [JAM 69] JAMES L.A., ANDERSON W.E., « A simple experimental procedure for stress intensity factor calibration », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 1, n° 3, 1969, p. 565-568.
- [LEP 17] LEPRETRE E., *Efficacité du renforcement par composites collés vis-à-vis de la propagation de fissures de fatigue pour une application aux structures rivetées*, Thèse de doctorat, UBL - Ecole Centrale Nantes, 2017.
- [LIU 09] LIU H.B., AL-MAHAIDI R., ZHAO X.L., « Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures », *Composites Structures*, vol. 90, n° 1, 2009, p. 12-20.
- [PAR 63] PARIS P., ERDOGAN F., « A critical analysis of crack propagation laws », *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, Series D, vol. 85, n° 4, 1963, p. 528-534.
- [SHE 11] SHEN H., HOU C., « SIFs of CCT plate repaired with single-sided composite patch », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 34, 2011, p. 728-733.
- [WAN 14] WANG W.W., DAI J.G., HARRIES K.A., ZHANG L., « Prediction of prestress losses in RC beams externally strengthened with prestressed CFRP sheets/plates », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, n° 8, 2014, p. 699-713.
- [WU 12a] WU C., ZHAO X.L., DUAN W.H., AL-MAHAIDI R., « Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel », *Thin-Walled Structures*, vol. 51, 2012, p. 147-157.
- [WU 12b] WU C., ZHAO X.L., AL-MAHAIDI R., DUAN W.H., « Effects of CFRP bond locations on the Mode I Stress Intensity Factor of centre-cracked tensile steel plates », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 36, n° 2, 2012, p. 154-167.
- [XIA 05] XIA S.H., TENG J.G., « Behavior of FRP-to-steel bond joints », *Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*, Hong-Kong, 2005, p. 419-426.
- [ZHA 14] ZHAO X.L., *FRP-strengthened metallic structures*, DCRC Press, Taylor & Francis, Boca raton, 2014.