



Renforcement de structures métalliques anciennes fissurées par collage de plats PRFC

Sylvain Chataigner, Emilie Lepretre

► To cite this version:

Sylvain Chataigner, Emilie Lepretre. Renforcement de structures métalliques anciennes fissurées par collage de plats PRFC. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623254

HAL Id: hal-01623254

<https://hal.science/hal-01623254>

Submitted on 25 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Renforcement des structures métalliques anciennes fissurées par collage de plats PRFC

Reinforcement of old cracked metallic structures by adhesively bonded CFRP laminates

Emilie Lepretre¹, Sylvain Chataigner², Lamine Dieng² et Laurent Gaillet²

1 : CEREMA
Adresse, F- code postale Ville Cedex 3
e-mail : emilie.lepretre@cerema.fr

2 : Département MAST, Laboratoire SMC
IFSTTAR
Route de Bouaye, 44 344 BOUGUENNAIS
e-mail : sylvain.chataigner@ifsttar.fr, lamine.dieng@ifsttar.fr, laurent.gaillet@ifsttar.fr

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.

Keywords : 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 [1] [2]. Dans le cas des structures métalliques, les recherches sur le sujet sont plus récentes et bien que de nombreux travaux existent dans la littérature [3], 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 [4].

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 anciens 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 [3, 5], 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 [6]. 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 au 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 [7].

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 [5]. 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.

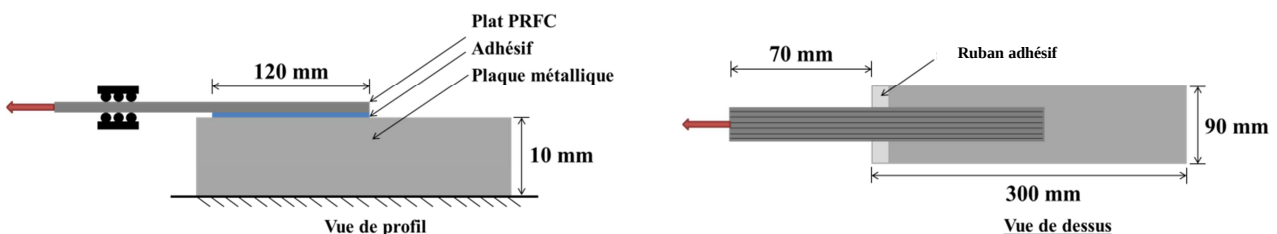


Fig. 1. Dispositif d'essai à simple recouvrement.

Pour chaque échantillon, les surfaces métalliques ont été traitées par sablage suivi d'un nettoyage soigneux à l'acétone avant collage, tandis que les surfaces des plats composites ont été traitées conformément aux préconisations des fournisseurs. La polymérisation a eu lieu dans les conditions environnementales de laboratoire pendant plus de 48h.

Echantillons	Matériau métallique	Procédé de renforcement	Plat composite (module élastique dans le sens des fibres, épaisseur et largeur)	Adhésif
S_NM_A	S235	A	E= 165 GPa, e=1,2mm, w=50 mm	Foreva
S_NM_B	S235	B	E= 210 GPa, e=1,2mm, w=50 mm	Sikadur 30
S_UHM_C	S235	C	E= 460 GPa, e=2,3mm, w=52 mm	Tyfo TC
F_NM_A	Fer puddlé	A	E= 165 GPa, e=1,2mm, w=50 mm	Foreva
F_NM_B	Fer puddlé	B	E= 210 GPa, e=1,2mm, w=50 mm	Sikadur 30
F_UHM_C	Fer puddlé	C	E= 460 GPa, e=2,3mm, w=52 mm	Tyfo TC

Tab. 1. Dénomination des échantillons étudiés.

2.3 Résultats et conclusions

Les résultats des essais de cisaillement à simple recouvrement sont donnés dans le tableau 2. On remarque dans un premier temps le mode de rupture obtenu pour chaque procédé, avec une rupture cohésive dans la colle dans le cas des procédés de renforcement dits MN (procédé A et B), et une rupture par délamination du plat composite dans le cas du procédé de renforcement dit UHM (procédé C). Ces observations permettent de vérifier la qualité des efforts d'adhésion liés à la préparation de surface des différents adhérents, cf. Figure 2. Dans un deuxième temps, il est intéressant de remarquer qu'il existe très peu de différences entre les résultats obtenus dans le cas de l'acier S235 et du fer puddlé, et ce quel que soit le procédé testé. La solution de renforcement proposée est donc bien envisageable pour tout type de structure métallique ancienne (même en présence de nombreuses inclusions ou irrégularités de surface comme c'est le cas pour le fer puddlé).

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	Délamination du composite
F_NM_A	Fer puddlé	A	40,6	675,9	Rupture cohésive dans la colle
F_NM_B	Fer puddlé	B	40,8	679,4	Rupture cohésive dans la colle
F_UHM_C	Fer puddlé	C	>90	751,1	Délamination du composite

Tab. 2. Résultats des essais de cisaillement à simple recouvrement.



Fig. 2. Photo des modes de rupture obtenus : (a) procédé A, (b) procédé B, (c) procédé C.

Les résultats obtenus grâce à l'instrumentation des essais précédents ont également permis la détermination des longueurs caractéristiques d'ancrage ainsi que la définition de modèles caractéristiques d'interface [7]. Dans le cas des procédés dits MN, des longueurs caractéristiques d'environ 80 mm ont été déterminées, tandis qu'une longueur caractéristique comprise entre 120 et 140 mm a été obtenue pour le procédé dit UHM. Ces résultats sont en accord avec d'autres études de la littérature dans le cas de matériaux métalliques actuels [8, 9].

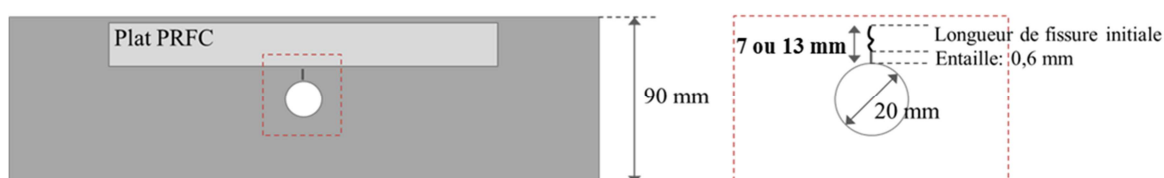
3. Le renforcement à la fatigue de structures métalliques anciennes

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 [6] [10-13]. 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 ouvrage riveté réel.

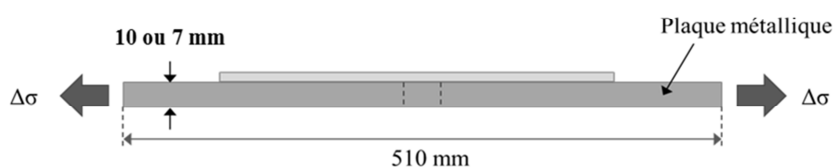
3.1 Géométrie des éprouvettes et protocole de suivi de fissuration

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 ainsi 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.

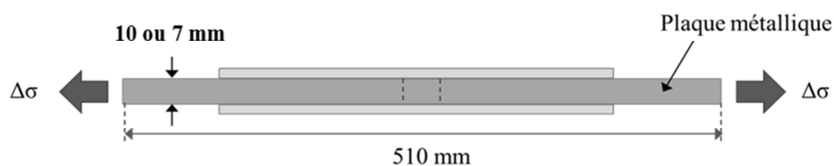
Les dimensions des plaques renforcées étudiées sont données en figure 3. Les plats composites ont été appliqués de manière non symétrique (collage sur une seule face de la plaque) ou de manière symétrique (collage sur les deux faces de la plaque). Dans tous les cas, le collage du renforcement a lieu 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.



(a) Vue plan



(b) Vue du côté: renforcement non symétrique sur une seule face de la plaque



(c) Vue du côté: renforcement symétrique sur les deux faces de la plaque

Fig. 3. Géométrie des plaques fissurées renforcées.

Dans le cas des éprouvettes en acier S235, le suivi de fissuration a été réalisé par marquage mécanique à l'aide d'un protocole d'essai spécifique détaillé dans [7]. 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 réalisées et testées pour chaque configuration de renforcement.

Les résultats obtenus en termes d'augmentation de la durée de vie sont donnés sur la Figure 4, sous la forme d'un diagramme représentant l'augmentation de la durée de vie en fonction de la longueur initiale de la fissure avant renforcement. Dans le cas des éprouvettes en acier doux (Figure 4.a), 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, ...) [14]. Pour toutes ces raisons, l'utilisation de plats composites à Ultra Haut Module semble être une solution intéressante (cf. Figure 4.a).

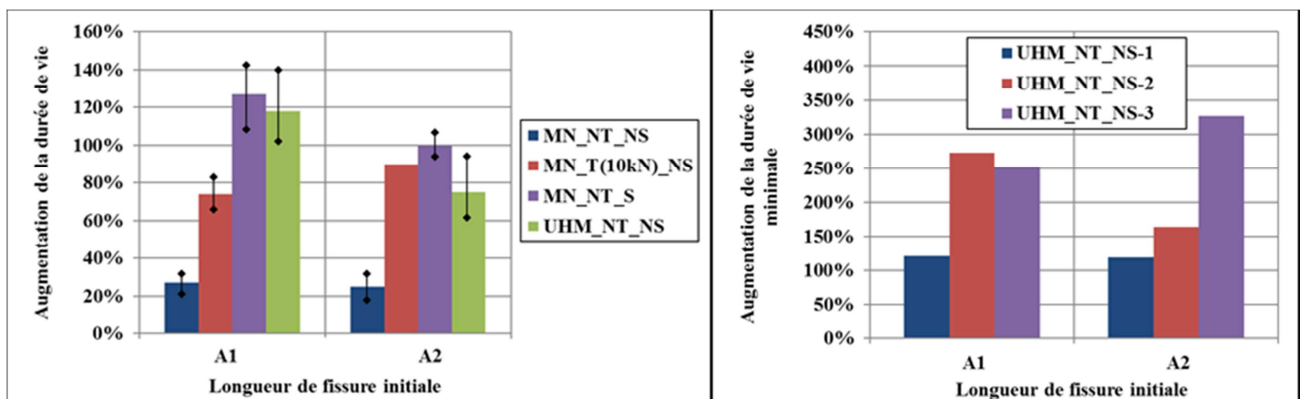


Fig. 4. Augmentation de la durée de vie obtenue expérimentalement : (a) cas acier doux; (b) cas fer puddlé.

Dans le cas des éprouvettes en fer puddlé (cf. Figure 4.b), les résultats associés à chaque éprouvette de même configuration sont présentés de manière distincts, 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 [7]. Quoi qu'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). Il semble toutefois que la méthode soit envisageable dans le cas des structures les plus anciennes pour lesquels la problématique de l'augmentation de la durée de vie est la plus critique.

3.3 Influence du renforcement sur la propagation des fissures

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 une augmentation du nombre de marquages dans le cas des éprouvettes renforcées attestant de l'effet significatif du renforcement et du ralentissement de la vitesse de propagation de la fissure. Par ailleurs, il est également intéressant d'observer la forme du front de fissure au cours de la propagation, qui évolue de manière non symétrique dans le cas d'un renforcement non symétrique. On notera que pour tracer les courbes de propagation des fissures, nous avons décidé de retenir la valeur à mi-épaisseur de la longueur de fissure.

On rappelle que dans le cas des éprouvettes en fer puddlé, l'avancée de la fissure n'a pu être suivie qu'en surface opposée au renforcement à l'aide des jauges de fissuration. Ceci permet toutefois de suivre correctement les vitesses d'avancée de fissure dans le matériau.

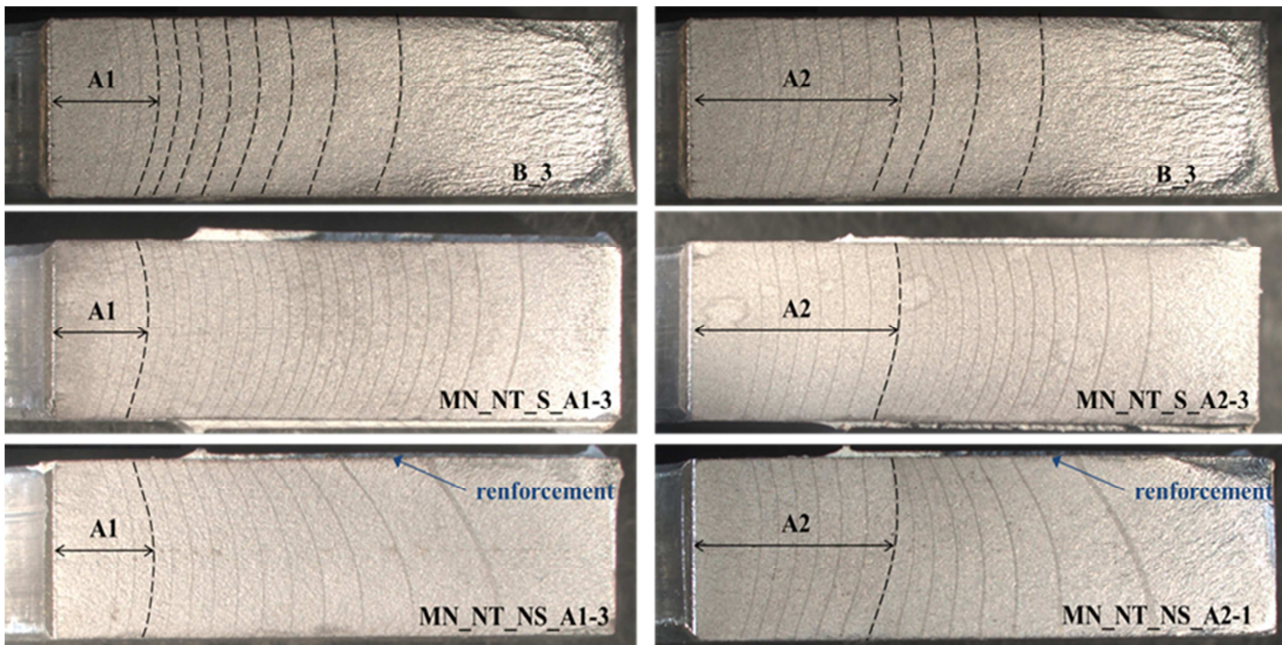


Fig. 5. Faciès de rupture obtenus pour les deux longueurs de fissure étudiées (A1 et A2) et pour éprouvettes brutes non renforcées (B) et éprouvettes renforcées par plats MN de manière symétrique (S) et non symétrique (NS).

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. Ceci signifie que le renforcement a en effet avant même que la fissure n'atteigne celui-ci. Il est donc envisageable de l'utiliser dans des approches préventives comme étudié dans [15].

Les résultats sur les éprouvettes en fer puddlé pour l'ensemble des éprouvettes testées sont donnés en figure 7. On y retrouve la dispersion des résultats dus à l'hétérogénéité du matériau. On constate cependant que le renforcement a en effet un rôle de ralentisseur de la propagation des fissures, et qu'il semble également avoir une influence avant que la fissure ne se propage sous le renforcement.

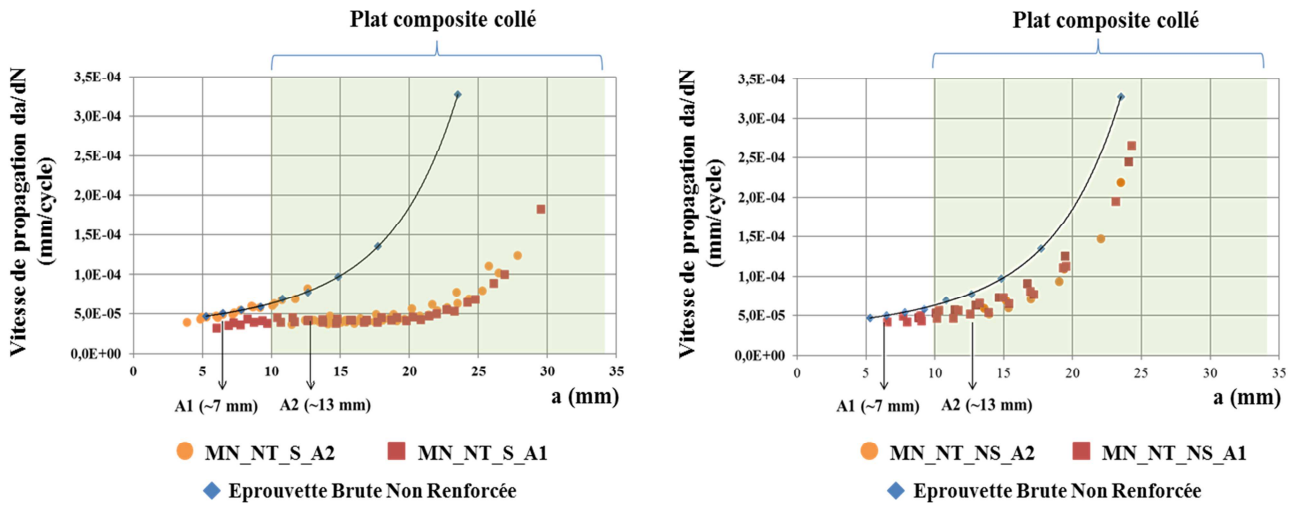


Fig. 6. Exemple de courbes de propagation obtenues expérimentalement dans le cas des éprouvettes en acier renforcées de manière symétrique (a) et non symétrique (b).

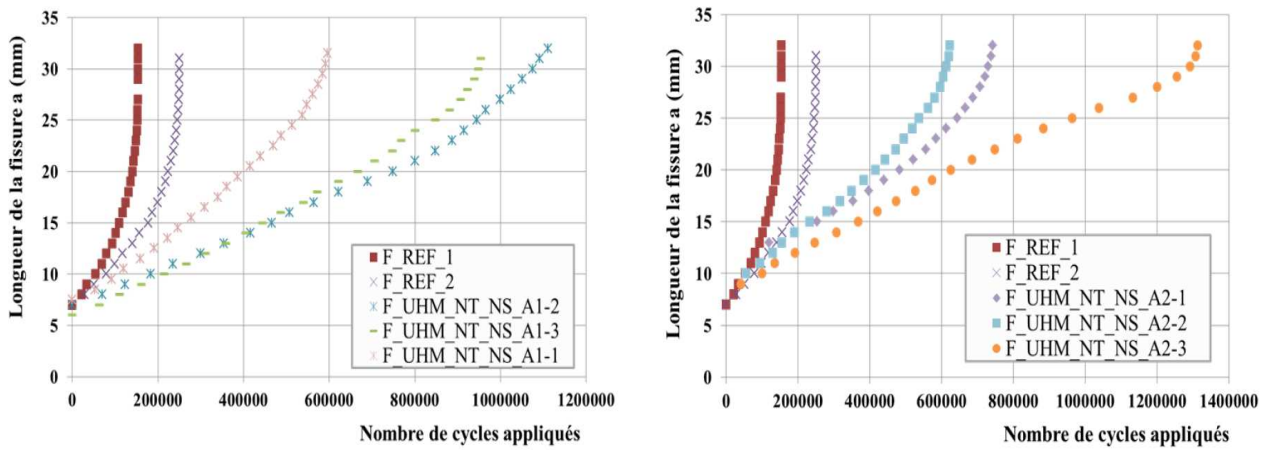


Fig. 7. Suivi de la propagation des fissures par jauge de fissuration dans le cas des éprouvettes en fer puddlé pour la fissure de longueur A1(a) et A2 (b).

L'ensemble des courbes de propagation obtenues dans les différents cas de renforcement testés sont disponibles dans [7]. Ils ont notamment permis la mise en place d'une approche de modélisation analytique et numérique présentée dans la partie suivante.

4. Mise en place d'un modèle tenant compte de l'effet du renforcement sur le facteur d'intensité de contraintes en pointe de fissure

L'utilisation de lois de propagation telle que la très connue loi de Paris [16] repose sur la détermination du facteur d'intensité de contraintes (FIC), ΔK , 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 constituée d'acier doux. Par la suite, la mise en place d'un modèle aux éléments finis, toujours dans le cas des éprouvettes en acier doux, a permis de valider les formulations précédentes, et de fournir un outil de transposition des résultats à d'autres géométries d'éléments renforcés. L'ensemble des modèles numériques sont réalisés sous le logiciel MSC Marc Mentat [17].

4.1 Etude expérimentale du FIC modifié et formulation

La méthode employée correspond à la méthode dite de James-Anderson [18] et repose sur trois étapes :

- Détermination des paramètres intrinsèques au matériau, C et m , définis dans la loi de Paris [1], via les éprouvettes brutes non renforcées (NR) :

$$(da/dN)_{NR} = C \cdot \Delta K^m \quad (\text{Eq.1})$$

- Réalisation des mêmes essais de fissuration sur éprouvettes renforcées (R) de différentes configurations et tracés des courbes de propagation :

$$(da/dN)_R = f(a) \quad (\text{Eq.2})$$

- Enfin, les éprouvettes renforcées étant régies par la même loi de propagation, avec les mêmes paramètres C et m intrinsèques au matériau métallique [19], il est alors possible de déterminer le FIC modifié, ΔK_R , correspondant à chaque configuration de renforcement étudiée :

$$\Delta K_R = [1/C \cdot (da/dN)_R]^{1/m} \quad (\text{Eq.3})$$

Suite à cette première étape, un premier facteur correctif empirique, F_{PRFC} égal au rapport $\Delta K_R/\Delta K_{NR}$, peut être proposé. Néanmoins, ce facteur correctif ne tient pas compte des différents paramètres du renforcement que sont : les modules, épaisseurs, largeurs de l'acier et des plats composites utilisés, ou encore la distance du plat composite collé à l'entaille initiale. Pour cela, et de manière similaire à l'étude de [11], deux facteurs correctifs F_P et F_{GD} ont été proposés à partir du facteur F_{PRFC} précédent. Le facteur F_P tient compte des propriétés mécaniques des plats composites, tandis que le facteur F_{GD} tient compte de la géométrie du renforcement (position du plat composite). La mise en place de ces facteurs et leur formulation sont présentées en détails dans [6]. Leur vérification et leur validation ont ensuite fait l'objet d'une approche par éléments finis.

4.2 Mise en place d'un modèle aux éléments finis

Dans un premier temps, le cas des éprouvettes de référence non renforcées est considéré afin de mettre en place le modèle de fissuration, nécessaire ensuite à l'étude des éprouvettes fissurées renforcées. Ce premier modèle repose sur l'utilisation de la loi de Paris avec prise en compte des paramètres matériau C et m déterminés expérimentalement dans la partie précédente. La propagation de la fissure sous l'action des cycles de fatigue, ainsi que le calcul du FIC en pointe de fissure sont réalisés grâce à l'utilisation de la méthode VCCT (« Virtual Crack Closure Technique ») décrite plus en détails dans [7, 20].

La modélisation de l'assemblage collé, et du joint de colle en particulier, ont fait l'objet de plusieurs investigations. Deux cas ont été considérés : le cas d'un joint de colle constitué d'un matériau isotrope au comportement élastique parfait (hypothèse retenue pour l'acier doux et le plat composite dans tous les cas), ce modèle est appelé « classique »; le cas d'un modèle de zone cohésive reposant sur la définition d'une loi de traction-séparation, et permettant l'observation de l'endommagement du joint de colle au cours de la propagation de la fissure, ce modèle est appelé « zone cohésive ».

La figure 7.a représente une comparaison des résultats expérimentaux, analytiques et EF, obtenus dans le cas des éprouvettes renforcées de manière non symétrique par plats MN non tendus. Très peu de différences sont alors observables entre les résultats issus de ces différentes analyses. Cette même remarque peut être faite pour les autres configurations étudiées dans [7], et tend à valider le modèle numérique mis en place. Il est également intéressant de constater la faible influence du choix entre modèle « classique » ou « zone cohésive » dans la prise en compte du joint de colle. Le principal avantage du modèle de zone cohésive reste l'observation de l'endommagement du joint de colle comparable et similaire à ce qui a pu être obtenu expérimentalement (cf. Figure 7.b).

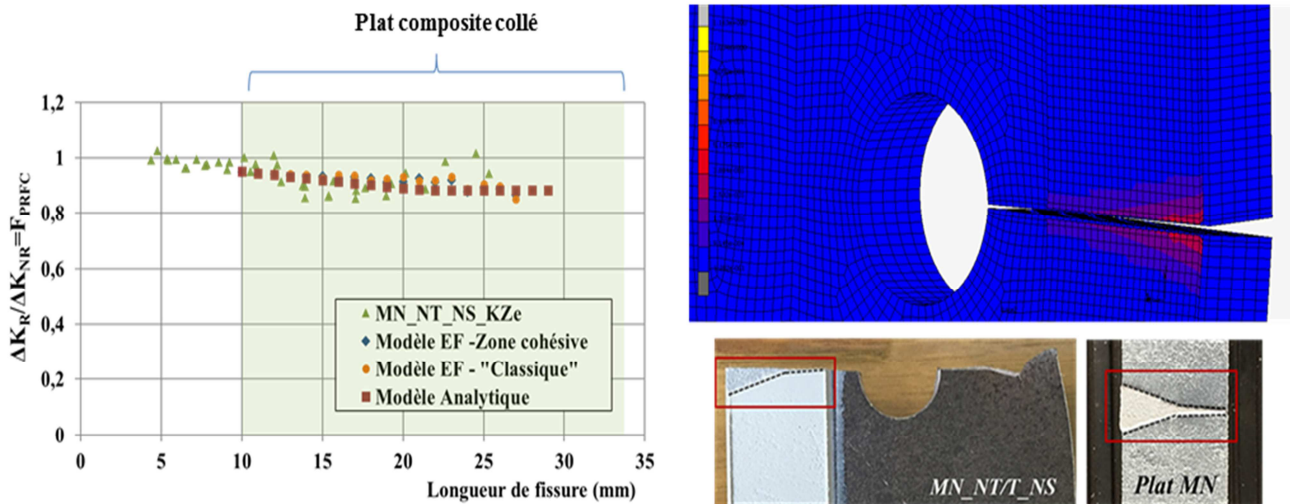


Fig. 7. Comparaison des résultats obtenus selon les différentes analyses (empirique, expérimentale et numérique) dans le cas des éprouvettes MN_NT_NS : (a) facteur correctif du FIC, F_{PRFC} ; (b) endommagement du joint de colle dans le cas du modèle « zone cohésive » (haut) et expérimentalement (bas).

5. Conclusions

L'étude présentée dans cet article et développée plus précisément dans [7] s'est attachée à évaluer la capacité du renforcement par composites collés pour la mise en sécurité ou l'augmentation de la durée de vie de structures métalliques anciennes pré fissurées.

La première partie nous a permis de vérifier les capacités du collage structural à transmettre les efforts entre matériau métallique ancien et renforcement composite que ce soit dans le cas de l'acier doux ou du fer puddlé et pour trois systèmes de renforcement commerciaux différents dont un présentant l'avantage de proposer un renforcement à très haut module. Ce travail nous a également permis de définir des modèles de zone cohésive utilisable dans des approches de type éléments finis. La seconde partie s'est attachée à la mise au point de protocoles expérimentaux d'évaluation des capacités de renforcement en terme de durée de vie mais aussi d'influence sur la propagation de la fissure pour différents procédés de renforcement, et différentes géométries. Les résultats ont permis de définir des facteurs d'intensité de contrainte modifiés valables pour la géométrie et les matériaux étudiés et permettant d'appréhender le pouvoir renforçant de cette technique. Afin de pouvoir transposer cette méthode à d'autres matériaux et d'autres géométries, il est toutefois nécessaire de proposer une approche plus complète comme celle développée dans la dernière partie et reposant sur l'utilisation de la méthode VCCT en éléments finis.

Le modèle proposé est encore en phase de validation, mais devrait permettre de réaliser des études paramétriques de ce type de technique de renforcement. En appui avec des travaux en cours sur le cas du renforcement avant fissuration vis-à-vis de la fatigue [15] et à condition de pouvoir appréhender la durabilité du transfert d'effort par collage, ces travaux devraient pouvoir permettre de proposer à terme des règles de conception et de dimensionnement de l'augmentation de la durée de vie des structures métalliques anciennes.

Remerciements

Nous tenons à remercier la SNCF pour leur contribution à cette étude, ainsi que les entreprises Freyssinet et Fyfe pour la fourniture des matériaux de renforcement.

Références

- [1] 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.
- [2] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL, *Renforcement parasismique de structures en béton armé par matériaux composites – Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, Juin 2015.
- [3] X.L. ZHAO, *FRP-strengthened metallic structures*, DCRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, 2014.
- [4] B. PLU, O. SCHOEN, M. LE MOINE, « La vie fragile des grands ouvrages métalliques anciens : le cas du viaduc de GARABIT », *Revue générale des chemins de fer*, juillet-août 2012.
- [5] S. CHATAIGNER S., J.F. CARON, K. BENZARTI, M. QUIERTANT, C. AUBAGNAC, « Use of a single lap shear test to characterize composite-to-concrete or composite-to-steel bonded interfaces », *Construction and Building materials*, vol. 25, pp. 468-478, 2011.
- [6] A. BASSETTI, *Lamelles précontraintes en fibres carbone pour le renforcement de ponts rivetés endommagés par fatigue*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2001.
- [7] E. LEPRETRE, *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.
- [8] S.H. XIA, J.G. TENG, « Behavior of FRP-to-steel bond joints », *Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*, Hong-Kong, pp. 419-426, 2005.
- [9] C. WU, X.L. ZHAO, W.H. DUAN, R. AL-MAHAIDI, « Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel », *Thin-Walled Structures*, vol. 51, pp. 147-157, 2012.
- [10] H.B. LIU, R. AL-MAHAIDI, X.L. ZHAO, « Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures », *Composites Structures*, vol. 90, n° 1, pp. 12-20, 2009.
- [11] C. WU, X.L. ZHAO, R. AL-MAHAIDI, W.H. DUAN, « 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, pp. 154-167, 2012.
- [12] P. COLOMBI, A. BASSETTI, A. NUSSBAUMER, « Analysis of cracked steel members reinforced by pre-stress composite patch », *Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct.*, Vol. 26, pp. 59-66, 2003.
- [13] B. TÄLJSTEN, C.S. HANSEN, J.W. SCHMIDT, « Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates », *Constr. Build. Mater.*, Vol. 23, pp. 1665-1677, 2009.
- [14] W.W. WANG, J.G. DAI, K.A. HARRIES, L. ZHANG, « Prediction of prestress losses in RC beams externally strengthened with prestressed CFRP sheets/plates », *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, n° 8, pp. 699-713, 2014.
- [15] S. CHATAIGNER, I. CALDERON, C. SSHULTE, « Presentation of the FASSTbridge project: FASSt and effective Solution for Steel bridges life-time extension », *proceedings of CICE*, Hong Kong, 2016.
- [16] P. PARIS, F. ERDOGAN, « A critical analysis of crack propagation laws », *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, Series D, vol. 85, n° 4, pp. 528-534, 1963.
- [17] A. Öschner, M. Öschner, *The finite element analysis program Msc Marc/Mentat: a first introduction*, Springer, 2016.
- [18] L.A. JAMES, W.E. ANDERSON, « A simple experimental procedure for stress intensity factor calibration », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 1, n° 3, pp. 565-568, 1969.
- [19] SHEN H., HOU C., « SIFs of CCT plate repaired with single-sided composite patch », *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 34, pp. 728-733, 2011.
- [20] R. KRUEGER, *The Virtual Crack Closure Technique : History, Approach and Applications*, ICASE Report n° 2002-10, Hampton, Virginia, 2002.