



GC'2017

CACHAN

15 et 16 mars

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

**Sylvain Chataigner, Emilie Lepretre,
Laurent Gaillet, Lamine Dieng
IFSTTAR**

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

S. Chataigner, E. Lepretre, L. Gaillet, L. Dieng,

Laboratoire SMC/ Département MAST/ IFSTTAR Nantes

GC 2017, 15-16 Mars 2017.



IFSTTAR

Plan



1. Introduction
2. Le transfert des efforts par collage
3. Le renforcement de structures métalliques fissurées
4. Le renforcement de structures non fissurées
5. Conclusion



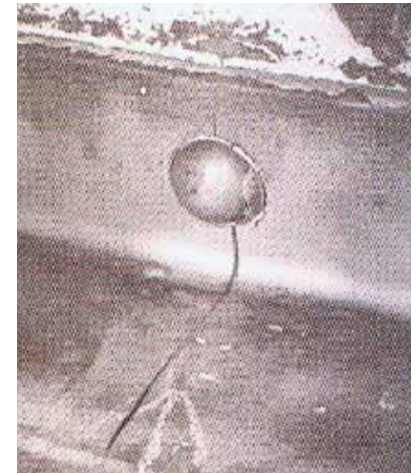
1) Introduction

• Contexte

- Un patrimoine de structures métalliques vieillissant avec des matériaux métalliques anciens (fer puddlé, acier doux).
 - Deux pathologies principales: la corrosion et la **fatigue**.
 - Méthode du renforcement par composites collés reconnue et largement utilisée pour les structures en béton (AFGC, 2011; 2015).
- => Besoin d'étudier les potentialités offertes par le transfert de la technique sur les structures métalliques, notamment pour la fatigue.

• Verrous

- Qualité et durabilité du transfert des efforts par collage pour le cas des structures métalliques
- Capacité de renforcement en fatigue pour les deux stades existants:
 - Stade après amorçage de la fissuration (thèse E. Lepretre)
 - Stade avant amorçage de la fissuration (Projet Européen FASSTbridge en cours)



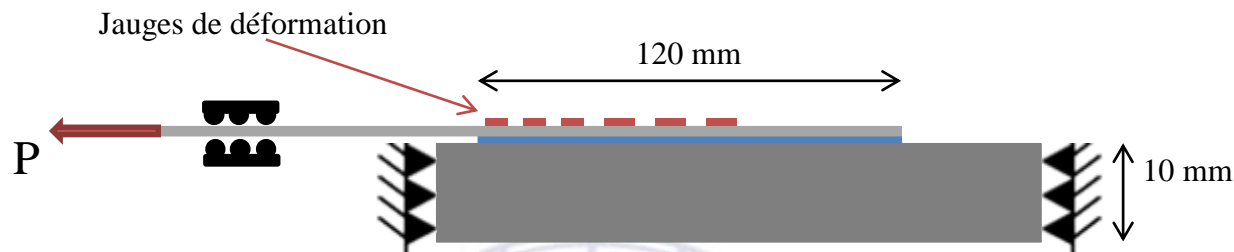
Y.E.Zhou, Assessing remaining fatigue life of existing riveted steel bridges, Recent Developments in Bridge Engineering, 2003

*... le transfert par collage sur
matériaux métalliques
anciens...*



2) Transfert des efforts par collage

- Caractérisation du transfert des efforts entre composite et matériaux métalliques modernes par collage (Chataigner et al., 2011)
 - Élément faible de l'assemblage: résine de collage structural
 - Existence d'une longueur de transfert
 - Durabilité en milieu humide vérifiée pour un système pendant deux ans (40°C, > 95%HR)
- Cas du collage sur des matériaux métalliques anciens (E. Lepretre, 2017)
 - Etude de trois procédés de renforcement différents A, B et C (Module normal: 165 -210 GPa, et Ultra Haut Module: 460 GPa)
 - Utilisation de l'essais à simple recouvrement en collaboration avec le CEREMA (Méthode d'essai LPC n°72)



- Résultats des essais de cisaillement:

- Bonne répétabilité des essais
- Mode de rupture cohésif dans la colle pour les deux procédés MN
- Mode de rupture par délaminage du composite pour le procédé UHM
- Contrainte ultime obtenue bien supérieure aux limites élastiques des matériaux anciens

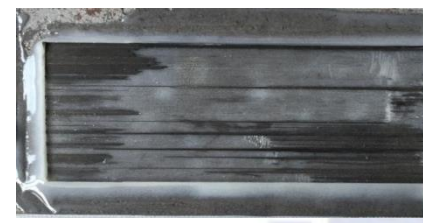
Echantillons	Matériau métallique	Procédé de renforcement	Capacité ultime moyenne (kN)	Contrainte ultime moyenne (MPa)	Mode de rupture
S_NM_A	S235	A	44,5	741,1	Rupture cohésive dans la colle
S_NM_B	S235	B	39,7	660,9	Rupture cohésive dans la colle
S_UHM_C	S235	C	93,6	782,7	Délaminage du composite
I_NM_A	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



Mode de rupture procédé A

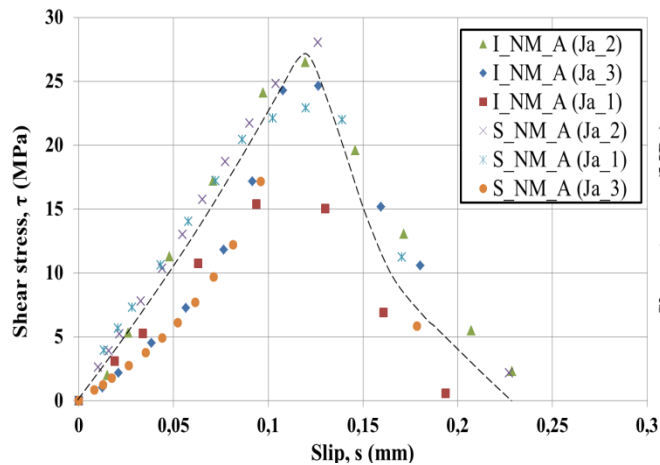


Mode de rupture procédé B

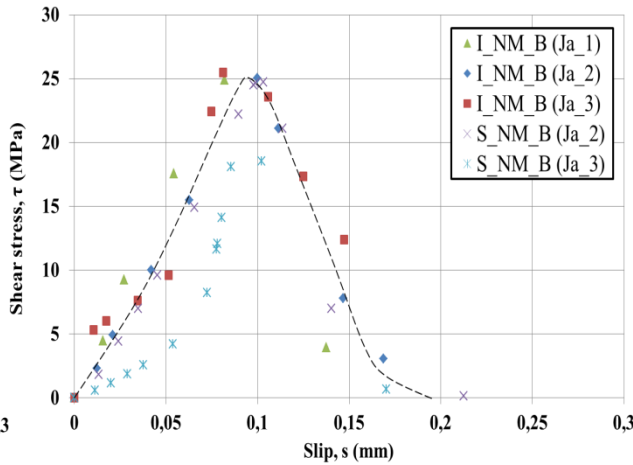


Mode de rupture procédé C

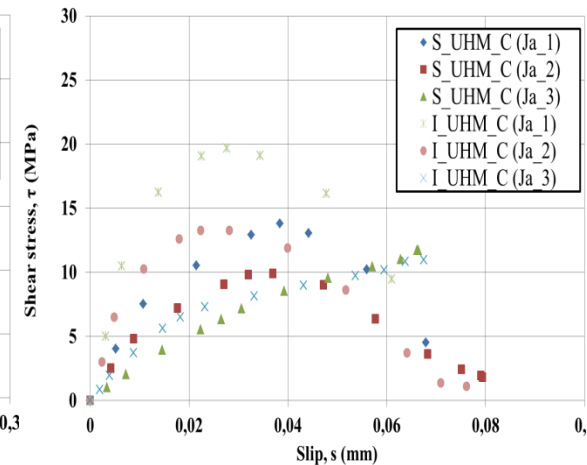
- Exploitation en terme de longueur d'ancrage:
 - Longueur de transfert d'environ 80 mm pour les procédés A et B et jusqu'à 140 mm pour le procédé C
 - Possibilité de déterminer des modèles d'interface équivalents



MN CFRP (A)



MN CFRP (B)



UHM CFRP (C)

=> Capacité du collage structural à transmettre les efforts pour les niveaux de contrainte rencontrés sur ouvrages (durabilité à vérifier même si on dispose déjà de nombreux éléments + protection)

*... efficacité du renforcement
après l'amorçage de la
fissuration...*



3) Renfort de structures fissurées (E. Lepretre, 2017; en collaboration avec la SNCF)

- Renforcements de structures préfissurées par collage de matériaux composites
 - **Mise en sécurité d'ouvrage** après détection d'une fissure et avant une intervention plus lourde
 - Adaptés pour le cas des ouvrages **avec matériau métallique ancien**
- Mise au point d'un protocole d'essai de suivi de fissuration en laboratoire
 - Mode I
 - Suivi de la cinétique de propagation de fissure par marquage mécanique pour l'acier doux
 - Suivi par jauge de fissuration collée en surface pour le fer puddlé



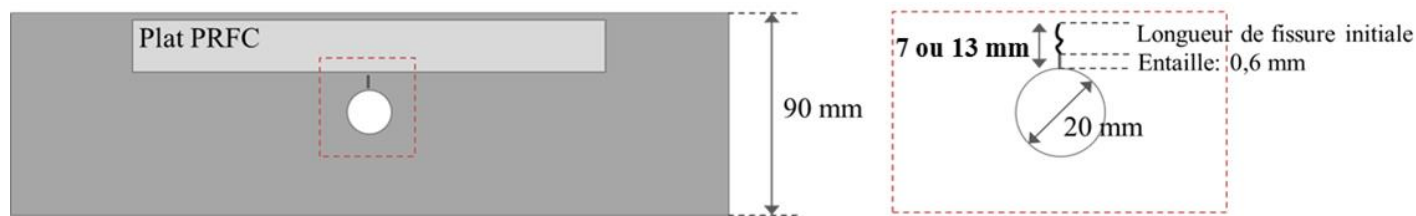
Photo d'un marquage mécanique



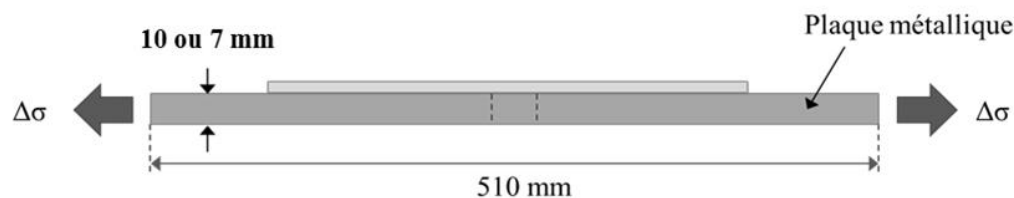
Photo de la jauge de fissuration
www.ifsttar.fr

• Choix d'une géométrie d'éprouvette et de procédés de renforcement

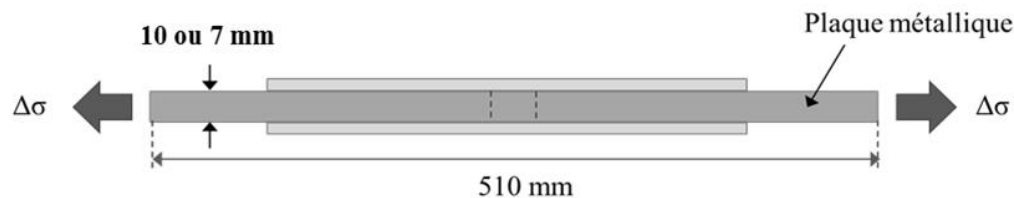
- Etude réalisée à partir de plaques métalliques trouées
- Fissuration initiée par électro-érosion, puis pré-fissuration en fatigue maîtrisée
- Deux longueurs de fissures initiales avant renforcement (A1: non visible sous rivet, et A2: visible)
- Cas de l'acier doux (épaisseur 10 mm): Symétrique ou non symétrique, Module Normal tendu ou Non tendu, Ultra Haut module
- Cas du fer puddlé (épaisseur 8 mm): Ultra Haut Module non symétrique uniquement



(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

Résultats des essais en terme d'augmentation de durée de vie

- Augmentation de la durée de **20% à 120%** en fonction du procédé de la géométrie, de la présence de pré-tension et du délai d'intervention pour l'acier doux
- Augmentation de **100% à 300%** pour le fer puddlé avec des résultats beaucoup plus dispersés (attention épaisseur plus faible)

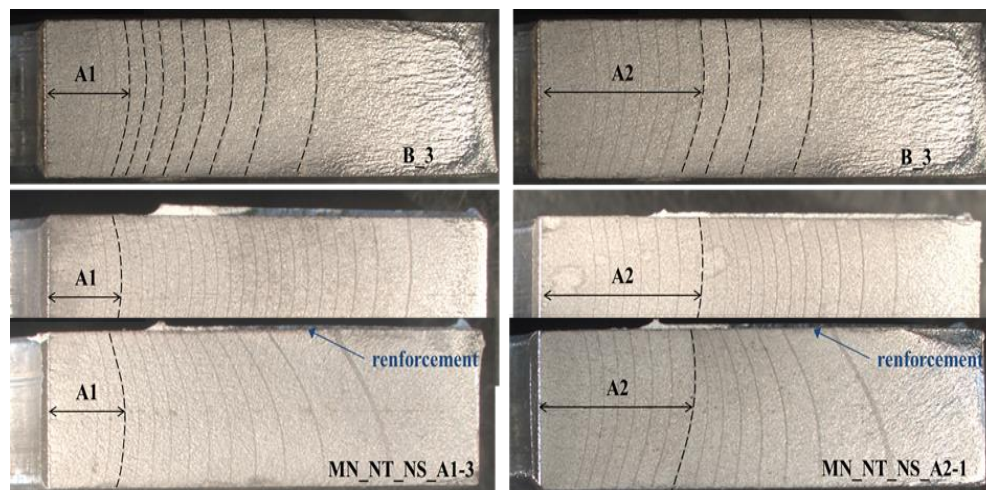
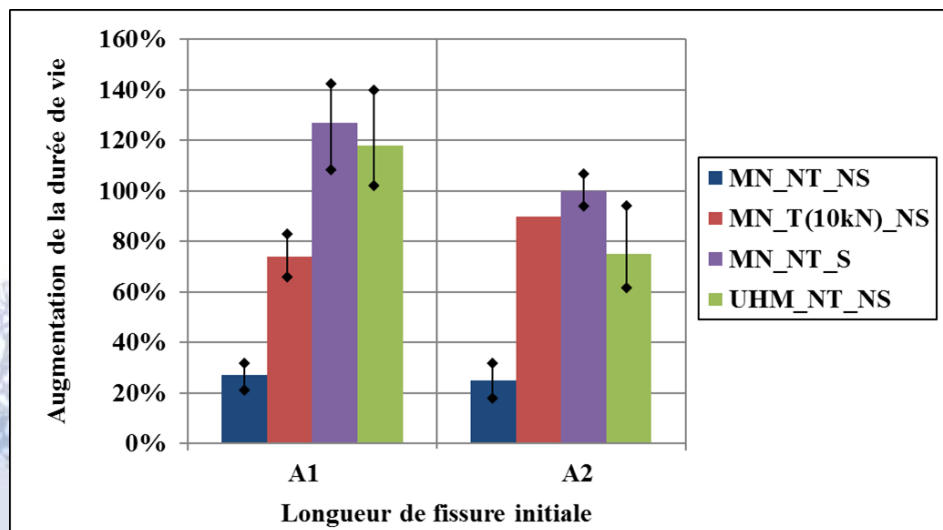
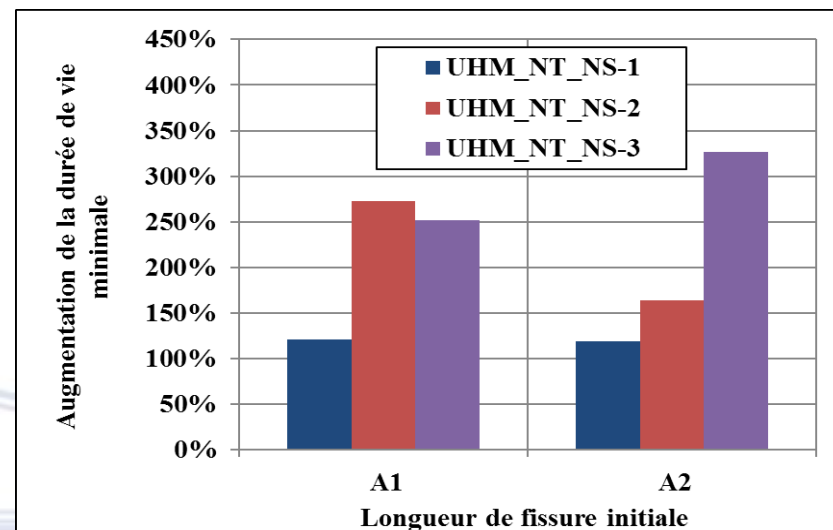


Photo de marquages sur acier doux

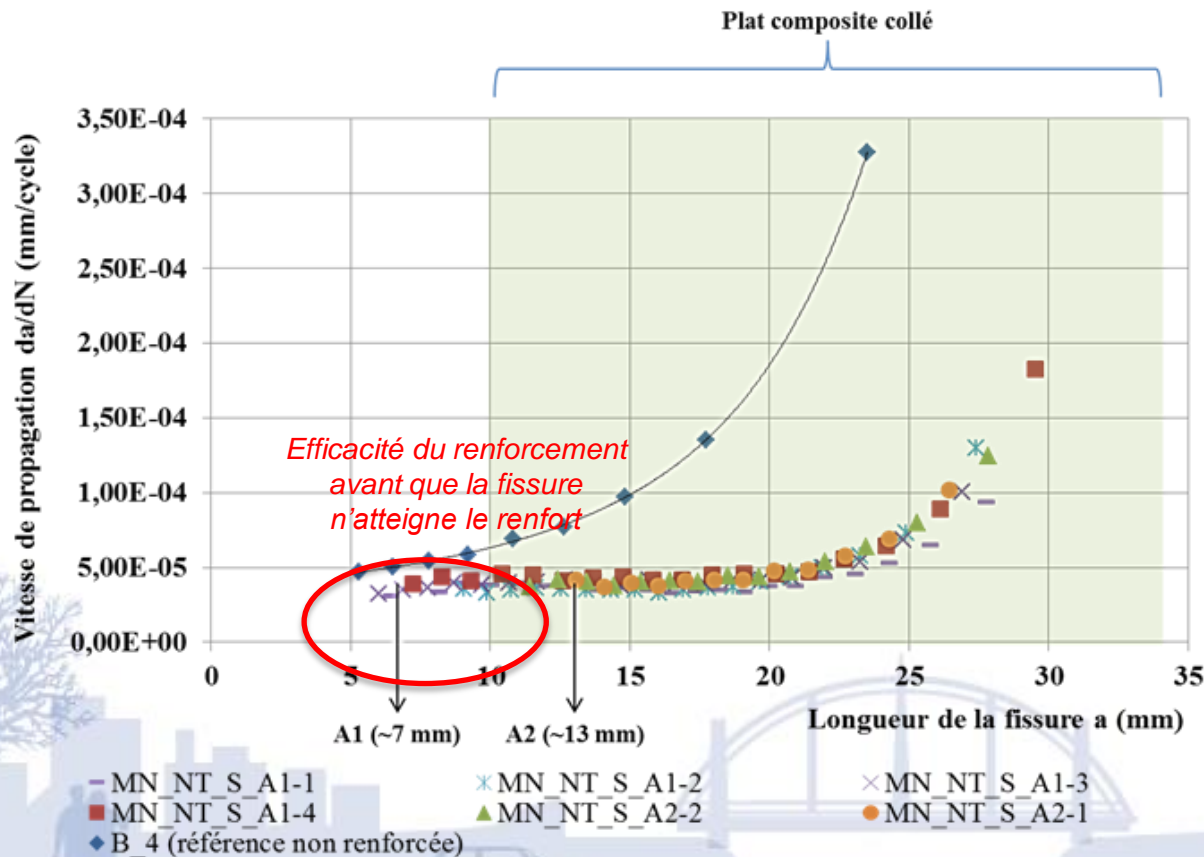


Cas des éprouvettes en acier doux



Cas des éprouvettes en fer puddlé

- Influence du renforcement sur la propagation de fissures et perspectives
 - Possibilité de tracer les courbes de **cinétique de propagation de fissures** pendant l'essai
 - Détermination possible des nouveaux **Facteurs d'Intensité de Contrainte** après renforcement (proposition de modèles analytiques dans E. Lepretre, 2017)
 - Mise en place d'un **modèle Élément fini** spécifique pour déterminer ces facteurs pour d'autres géométries ou propriétés de renforcement => *Stage en cours au laboratoire SMC*



$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m$$

Loi de Paris

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\Delta K_I = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

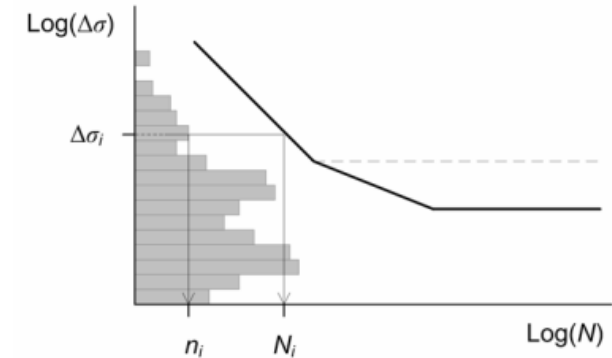
Facteur d'intensité de contrainte

*... efficacité du renforcement
avant l'amorçage de la
fissuration...*

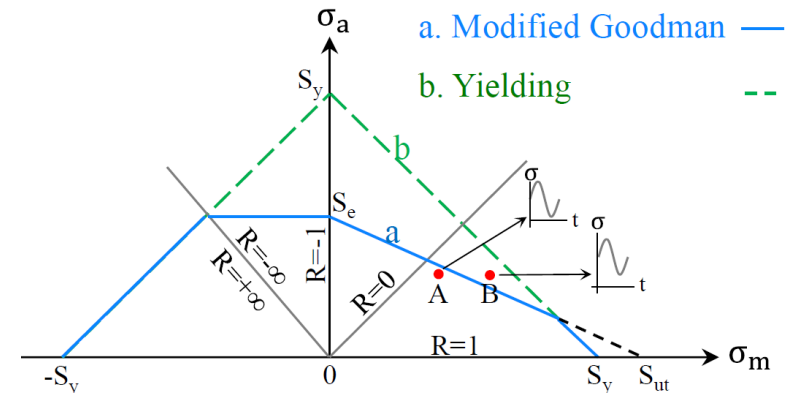


4) Renforcement de structures non fissurées

- Application du renforcement avant fissuration pour participation à la reprise locale des efforts
 - Augmentation de la durée de vie en fatigue d'un détail structural
 - Deux procédés possibles pour un fonctionnement optimal:
 - Utilisation de renforts à ultra haut module collés
 - Utilisation de renforts précontraints collés ou ancrés mécaniquement
- Verrous
 - Besoin de systèmes de renforcements répondant aux contraintes des structures métalliques (notamment concernant la température de service)
 - Besoin d'une méthodologie intégrant l'évaluation de la durée de vie résiduelle des ouvrages, la conception du renforcement et son application/maintenance
 - Besoin de procédures de vérification de la durabilité des systèmes de renforcements
 - Besoin de référentiels normatifs et/ou de certification sur ce sujet

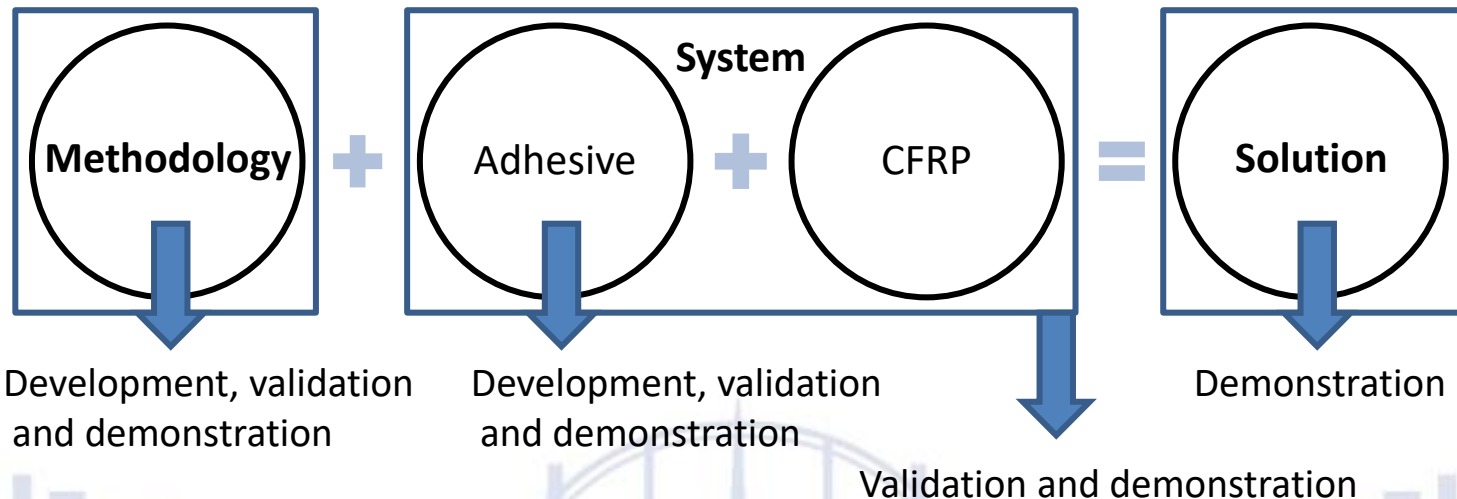


Kühn B, Lukic M., Nussbaumer A., Günther H.P., Helmerich R., Herion S., Kolstein M.H., Walbridge S., Androic B., Dijkstra O., Bucak O.: *Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*. Joint Research Centre Report. 2008.



Ghafoori E., Motavalli M., Nussbaumer A., Herwig A., Prinz G.S., Fontana M.: Design criterion for fatigue strengthening of riveted beams in a 120-year-old railway metallic bridge using pre-stressed CFRP plates, *Composites Part B: Engineering*, Volume 68 (2015), p. 1–13.

- Présentation du projet Européen FASSTbridge (Fast and effective strengthening solution for steel bridges lifetime extension)
 - Projet Infravation (2015-2018)
 - Piloté par Tecnalia (Espagne) et ayant comme partenaires: Dragados, Communauté de communes de Madrid (Espagne), Collanti (Italie), LAP, MPA Stuttgart (Allemagne), Altavista (Etats-Unis), IFSTTAR (France)
 - Implication de plusieurs laboratoires au niveau de l'IFSTTAR (SMC, EMMS – M. Quiertant, SDOA – A. Orcesi, Navier – K. Benzarti, J.F. Caron, G. Foret, A. Feraille)
- Développement d'une solution complète:



- Sélection des composants du renforcement et perspectives

- Utilisation de renforts composites à haut module: accord avec la société Epsilon Composites
- Développement de l'adhésif par Collanti: époxy bi-composant
- Plan d'investigations expérimentales en cours de réalisation sur la résine et l'assemblage
- Développement en parallèle d'une solution de monitoring adaptée
- Développement des méthodologies d'évaluation de la solution en cours
- Application sur site envisagée fin 2017 (Pont de Jarama)



5) Conclusion

- Renforcements par composites collés sur structures métalliques:
 - Technique envisageable pour **l'augmentation de la durée de vie** en fatigue ou la **mise en sécurité** d'ouvrages fissurés (transfert des efforts par collage viable, durabilité à vérifier mais premiers éléments satisfaisants, démonstration des capacités de renforcement sur éléments fissurés, démonstration à venir sur structure avant fissuration: FASSTbridge)
 - Technique bien adaptée au cas des **structures anciennes** (contrairement aux techniques de parachèvement par exemple): A intégrer au panel des techniques envisageables sur structure métallique.
 - Nécessite toutefois de recourir à des **procédés de renforcement différents** de ceux appliqués sur béton (module élastique dans le sens des fibres plus élevés, ou utilisation de matériaux précontraints, adhésifs plus critiques, ...)
- Besoins
 - Méthodologie de choix de la technique à utiliser en fonction du type d'ouvrage métallique
 - Mise au point de référentiels sur le renforcement par composites collés et d'agrément sur les procédés de renforcement
 - Applications sur ouvrages réels ?

Merci de votre attention.

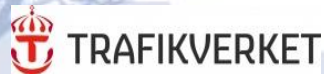
Merci à nos nombreux partenaires sur ces thématiques:

Thèse E. Lepretre: SNCF, CEREMA, Freyssinet, Sika, Fyfe, ADS

Projet FASSTbridge: Epsilon Composites, financeurs

sylvain.chataigner@ifsttar.fr

This work is part of the FASSTBRIDGE project. This project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no 31109806.0008. FASSTBRIDGE is co-funded by Funding Partners of the ERA-NET Plus Infravation and the European Commission.



www.ifsttar.fr