



HAL
open science

Evaluation de la résistance sous chargement monotone et vis-à-vis de la fatigue de patchs collés développés pour la réparation de structures métalliques offshore

Quentin Sourisseau, Emilie Lepretre, Sylvain Chataigner, Xavier Chapeleau,
Maxime Deydier, Stéphane Paboeuf

► To cite this version:

Quentin Sourisseau, Emilie Lepretre, Sylvain Chataigner, Xavier Chapeleau, Maxime Deydier, et al.. Evaluation de la résistance sous chargement monotone et vis-à-vis de la fatigue de patchs collés développés pour la réparation de structures métalliques offshore. JNC 2023 - Journées Nationales sur les Composites, AMAC, Jul 2023, Besançon, France. pp.1-8. hal-04331794

HAL Id: hal-04331794

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04331794>

Submitted on 8 Dec 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Evaluation de la résistance sous chargement monotone et vis-à-vis de la fatigue de patchs collés développés pour la réparation de structures métalliques offshore

Strength assessment under monotonic and fatigue loading of bonded composite repair on offshore steel structures

Sourisseau Quentin^{1,2,3}, Emilie Lepretre¹, Sylvain Chataigner¹, Xavier Chapeleau², Maxime Deydier³, Stéphane Paboeuf³

1: MAST-SMC

Université Gustave Eiffel

Route de Bouaye, F-44344 Bouguenais, France

E-mail : quentin.sourisseau@univ-eiffel.fr, emilie.lepretre@univ-eiffel.fr, sylvain.chataigner@univ-eiffel.fr

2: COSYS-SII, I4S Team (Inria)

Université Gustave Eiffel

Route de Bouaye, F-44344 Bouguenais, France

E-mail : xavier.chapeleau@univ-eiffel.fr

3 : Bureau Veritas Marine & Offshore, Research Department

4 rue Duguay-Trouin, 44818 Saint Herblain, France

E-mail : maxime.deydier@bureauveritas.com, stephane.paboeuf@bureauveritas.com

Résumé

Le nombre d'unités flottantes de production, de stockage et de déchargement (FPSO) est en augmentation continue et la problématique de la corrosion est un élément important pour ces unités. Il est nécessaire de proposer des solutions de réparation ayant un faible impact sur leur exploitation, évitant notamment les travaux à chaud. Pour ces raisons, l'utilisation de patchs en PRF (Polymère Renforcé de Fibres) collés apparaît comme une solution particulièrement intéressante. Cependant, de fortes problématiques existent concernant la définition de méthodologies de conception, la robustesse et la prise en compte de la durabilité pour la conception de ces réparations. Afin de développer une telle méthodologie, Bureau Veritas pilote un projet industriel conjoint appelé SBO (JIP Strength Bond Offshore) visant à définir une telle stratégie de conception. Le travail présente une partie des résultats obtenus via une application des principes de la mécanique de la rupture pour la caractérisation de la résistance d'assemblages collés composite-acier. Premièrement, les conclusions du dimensionnement sont présentées. La réalisation de la campagne d'essai expérimentale est ensuite détaillée (fabrication des éprouvettes, et réalisation des essais monotones en traction et flexion). Enfin, les résultats de la campagne d'essais de fatigue sont développés et comparés aux références normatives.

Abstract

The number of floating productions, storage and offloading (FPSO) units in the world is constantly increasing and the problem of corrosion is an important element for these units. There is a strong need to offer repair solutions with a low impact on their operation, in particular avoiding the hot work commonly encountered in the case of conventional repair methodologies. For these reasons, the use of adhesively bonded FRP (Fibre Reinforced Polymer) patches appears to be a particularly interesting solution. However, strong problems exist concerning the definition of design methodologies, robustness and the consideration of durability for the design of these repairs. In order to develop such a methodology, Bureau Veritas leads a joint industrial project called SBO (JIP Strength Bond Offshore) aiming at defining such a design strategy. The work presented is part of this project and consisted in applying the principles of fracture mechanics for the characterization of bonded composite-steel assemblies. First, the conclusions of the design are presented. The execution of the experimental test campaign is then detailed (manufacturing of the specimens and monotonic tests in traction and bending). Then, the results of the fatigue tests campaign are developed and compared to standards.

Mots Clés : Collage, Composite, Offshore, Renforcement, Fibre de carbone

Keywords: Bonding, Composite, Offshore, Reinforcement, Carbon fiber

1. Introduction

La corrosion des structures métalliques en milieu offshore est une menace permanente en raison des conditions de température et d'humidité élevées, surtout en milieu tropical. Une réparation collée de ces surfaces corrodées présente plusieurs avantages dont un temps d'arrêt court et un procédé de réparation non intrusif. Cependant, la réparation de zones corrodées sur de grandes structures marines par collage de patch PRF impose des contraintes importantes vis à vis de la conception. Le patch se trouve in fine dans une zone entièrement sollicitée (zone soumise à la flexion de l'unité), provoquant des contraintes élevées sur les bords du renfort. Plus généralement, les concepteurs et ingénieurs doivent faire face à plusieurs difficultés liées à la nature des assemblages acier-composite :

- discontinuité des matériaux (propriétés différentes des matériaux),
- propriétés matérielles non linéaires de l'adhésif,
- singularité de contrainte au bord du patch.

Une appréhension fine de la mécanique d'adhérence et de la résistance du patch sont essentielles pour concevoir des réparations composites hautement fiables. Ces difficultés tendent à limiter fortement les applications industrielles des renforts collés, particulièrement en milieu offshore. Il a cependant été prouvé en laboratoire que ces types de renforts peuvent avoir des effets très bénéfiques sur la durée de vie des structures renforcées [1][2][3].

Ainsi, dans le cadre du projet Joint Industrial Project (JIP) « Strength Bond Offshore » [4], il s'agit de répondre aux objectifs principaux suivant :

- valider une procédure de caractérisation des composants de l'assemblage collé,
- standardiser le processus de qualification pour les réparations composites collés en milieu offshore,
- définir une méthode robuste de prédiction de la résistance du patch collé,
- permettre une évaluation claire du coefficient de sécurité à prendre en compte dans l'estimation des charges de conception.

Les travaux présentés dans cet article visent à répondre à ce dernier objectif. Dans un premier temps, la conception du patch composite (fibres de carbone/fibres de verre/résine époxy) développé au cours du projet SBO sera détaillée [5]. La solution étudiée repose sur la réalisation et le collage de patchs composites par infusion en respectant un protocole de préparation de surface spécifique. Les investigations préalables menées à l'aide de la mécanique de la rupture pour le dimensionnement du patch collé sont présentées en détails dans [6][7]. Seuls quelques résultats significatifs seront rappelés dans cet article. Pour valider la conception du patch collé, des essais sous chargement monotone (traction/flexion), ainsi que des essais en fatigue (traction) ont été réalisés. Les résultats obtenus sont comparés à des calculs prédictifs pour des cas de chargement typiques rencontrés sur unités FPSO.

2. Conception du patch

Les charges appliquées sur la coque d'un navire sont liées principalement à l'effet des vagues et aux chargements du navire (charges en eau calme).

Étant donné qu'un navire possède une longueur importante par rapport à sa largeur et sa profondeur, il peut être considéré comme un élément de poutre et est ainsi soumis à un moment de flexion verticale/horizontale (généralisé par les vagues) et à des charges de cisaillement/flexion (générées par le poids propre du navire). Ces derniers induisent une grande amplitude de sollicitations dans le plan (traction, compression, cisaillement) pour les éléments longitudinaux de la structure: coque et cloisons. Pour les charges de houle, une loi de distribution de Weibull est définie dans les règles de Bureau Veritas pour les navires en acier (NR467 [8]) et les règles pour les unités offshores (NR445

[9]), avec des données issues des directives pour l'évaluation de la fatigue des navires en acier et des unités offshore (NI611 [10]). Les chargements réglementaires issus de ces notes peuvent être définis comme ponctuels ou globaux. Dans le cadre du dimensionnement d'un renfort collé de grandes dimensions, seuls les chargements globaux de la poutre navire sont définis comme dimensionnant. Ils peuvent être résumés comme suit (chargements dus aux vagues + en eaux calmes) :

- charges de traction/compression dans l'acier $s_{X1} = \pm 225$ MPa,
- charge de cisaillement dans l'acier $\tau_{xy} = 45$ MPa.

A noter que ces valeurs correspondent à un cas de chargement extrême, avec un niveau de probabilité de 10^{-8} .

Le patch collé doit donc satisfaire à ces critères de résistance tout en garantissant une rigidité maximale pour reprendre la raideur perdue de la structure causée par la corrosion. Dans le cadre de cette étude, la perte d'épaisseur d'acier devant être récupérée par le patch composite a été évaluée à environ 7 mm pour une tôle de 20 mm d'épaisseur (30% de perte). La conception du patch collé, dans ces conditions, a abouti à une proposition d'empilement de tissus composites détaillée dans la figure 1. Deux types d'angles (chanfreins long et court) en bord de patch sont proposés et l'influence de la variation de cet angle (concentration des contraintes) sur la résistance du patch est étudiée. Chaque empilement de plis unidirectionnel est représenté par une couleur sur la figure 1. Les couches de couleur gris/bleu/noir correspondent à des plis de fibres de carbone d'un angle donné (de 0° à 90°). Les couches vertes représentent des plis de fibres de verre orientés à $0^\circ/90^\circ$. Enfin, la couche orange correspond au substrat en acier. Il est à noter que les plis supérieurs en fibres de verre ne sont là que pour protéger la partie en carbone du patch des agressions extérieures.

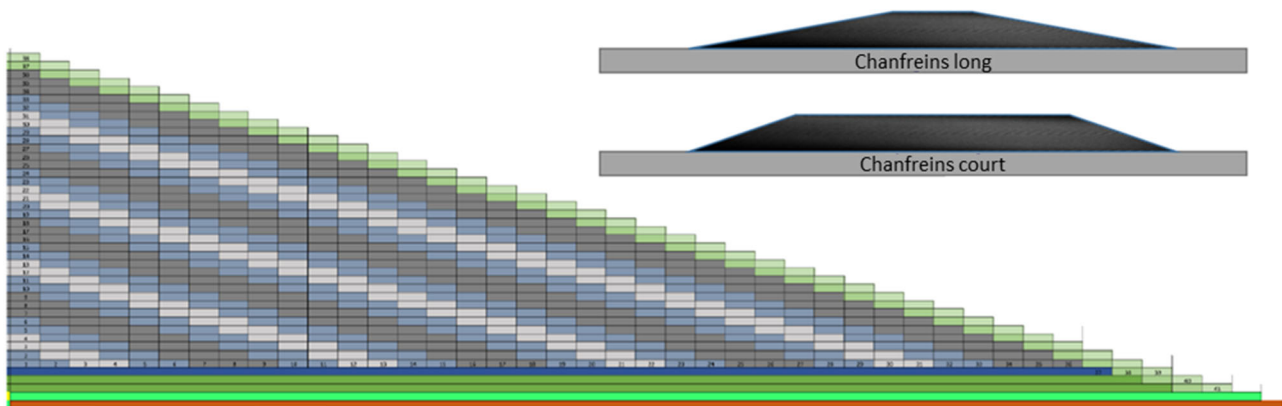


Fig. 1. Empilement des plis pour la réalisation du patch collé et types de chanfreins étudiés.

3. Fabrication

Le processus de fabrication choisi pour la réalisation des différents patches collés étudiés est basé sur la méthode d'imprégnation par infusion. La Fig. 2 présente le processus d'empilement des différents plis avant infusion. La résine utilisée est une résine époxy post-cuite (80°C pendant 16h). Afin d'obtenir plus d'informations sur l'état mécanique du patch lors des différents essais, des fibres optiques de mesure de déformation répartie ont été disposées à l'intérieur du patch (entre les deux premiers plis de fibres de verre, proche de la surface avec l'acier) ainsi que sur la surface du patch. La tôle en acier possède une haute limite élastique (900 MPa) pour garantir l'absence de plastification avant décollement du patch. Les éprouvettes grandes dimensions ainsi réalisées sont ensuite découpées au jet d'eau. Les dimensions des éprouvettes résultantes sont de 2000 mm de long et 50

mm de large. Le patch collé mesure environ 1400 mm de long après infusion, laissant une longueur libre de chaque côté de 300 mm (Fig. 3).

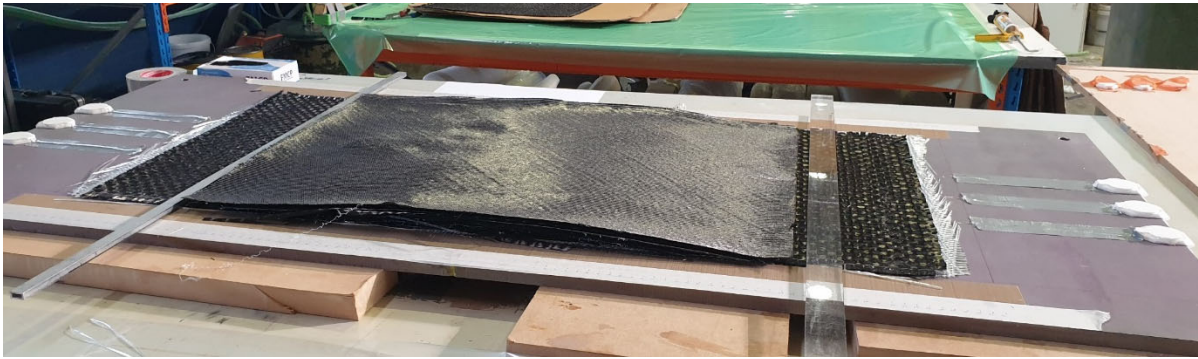


Fig. 2. Empilement de tissus avant infusion avec l'ajout de fibres optiques dans le patch.



Fig. 3. Epreuves après découpe au jet d'eau.

L'étude du processus d'infusion après découpe des éprouvettes a montré que certaines porosités pouvaient être retrouvées dans la partie centrale du patch (la plus épaisse). Leur positionnement dans la zone la moins chargée mécaniquement permet de limiter leur influence sur les propriétés mécaniques du patch.

4. Evaluation de la résistance du patch collé sous sollicitation monotone

La Fig. 4 présente les deux types d'essais statiques réalisés lors de nos investigations. A gauche, un essai de traction est réalisé sur une machine de traction Instron de capacité ultime 2500 kN tandis qu'à droite, un essai de flexion est réalisé sur une presse Losen de capacité 300 kN. Les distances entre appuis pour l'essai de flexion sont de 1450 mm.

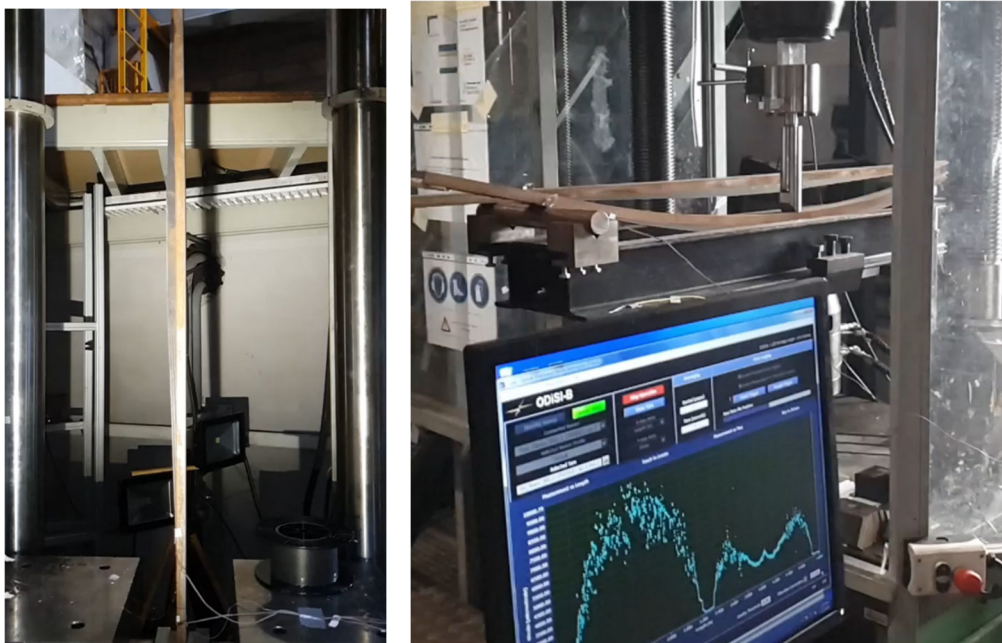


Fig. 4. Essais en traction et flexion 3 point sur assemblage patch composite/métal.

Ces essais ont permis d'obtenir les états de déformations à rupture dans les patches collés ainsi que les efforts à rupture pour les deux types de chanfreins (court et long) et les deux types d'essais effectués (traction et flexion). Le tableau 1 résume les efforts à rupture obtenus dans chaque cas. Le comportement à rupture observé est purement fragile avec un chargement élastique linéaire jusqu'à décollement brutal et total du patch.

Pour les éprouvettes avec un chanfrein court, la moyenne de l'effort à rupture en traction est de 490 kN et en flexion de 34 kN. Les résultats sont faiblement dispersés. En prenant en compte la partie en acier des éprouvettes (50 mm de largeur x 20 mm de hauteur), il est possible de calculer une contrainte équivalente dans l'acier pour une tôle renforcée. Cette valeur est de 490 MPa pour un effort à rupture de 490kN, ceci correspond à plus du double de celle recommandée par les règles de dimensionnement de Bureau Veritas (490 MPa versus 225 MPa).

Les essais sur éprouvettes possédant un chanfrein long montrent des efforts à rupture en traction plus importants, de l'ordre de 790 kN en moyenne (+60% par rapport aux éprouvettes avec un chanfrein court) et des efforts similaires (légèrement inférieurs) dans le cas de la flexion. Ces résultats tendent à démontrer que l'impact de la diminution de la pente du chanfrein en flexion est très limité voire quasi nul, pour les géométries d'éprouvettes étudiées, alors qu'en traction, il permet une nette amélioration de la résistance maximale du patch collé.

Force à rupture	Chanfrein long		Chanfrein court	
	Traction (kN)	Flexion (kN)	Traction (kN)	Flexion (kN)
Essai 1	840	32	477	35
Essai 2	790	29	500	31
Essai 3	795	30	491	36
Essai 4	740	29		
Essai 5	769			
Moyenne	787	30	489	34
Ecart type / Moyenne	3%	3%	2%	8%

Tab. 1. Efforts à rupture obtenus pour les éprouvettes comportant un « chanfrein court » et un « chanfrein long ».

Les résultats expérimentaux ont été comparés aux résultats obtenus pour des géométries similaires mais avec une solution de tôle en acier collée (cf. [7]). Ces résultats sont résumés dans le Tab. 2. Ils mettent en évidence un net gain vis-à-vis des efforts à rupture dans le cas d'une réparation par patch composite collé comparé à une réparation similaire (raideur équivalente) à l'aide d'une tôle en acier (6mm d'épaisseur). Ces résultats indiquent donc que pour une application réelle, le choix du grand chanfrein permettra de meilleures performances du patch composite collé avec un coefficient de sécurité d'environ 3.5 (790 MPa vs 225 MPa) sur les contraintes à rupture admissibles dans l'acier avant décollement du patch (NI611).

Type de renforcement collé	Contrainte équivalente dans l'acier (MPa, en traction)
Patch composite avec chanfrein court	495
Patch composite avec chanfrein long	790
Acier	250

Tab. 2. Contrainte à rupture moyenne en traction.

La figure 5 montre les faciès de rupture obtenus après les essais de traction pour des éprouvettes avec chanfrein long. On observe une rupture multi-interfaciale entre l'acier et la résine, le premier pli de fibres de verre et la résine, ainsi qu'un début de délamination entre les deux premiers plis de fibres de verre (zone blanche sur le patch). Ce même type de faciès a été obtenu pour les deux types de chanfreins, ainsi que pour les deux types d'essais réalisés (traction et flexion), témoignant d'un mode de rupture similaire. Les résultats obtenus ont permis de conclure que la méthode de dimensionnement développée dans [8] ne pouvait pas être appliquée directement à ce genre de renfort car les modes de ruptures ne sont pas similaires. De nouvelles éprouvette permettant de représenter ce type de rupture devront être développées pour pouvoir appliquer cette méthode. La faible dispersion des efforts à rupture obtenus, conjuguée à un faciès de rupture similaire pour tous les essais est un gage de répétabilité et de confiance dans le comportement global du patch.

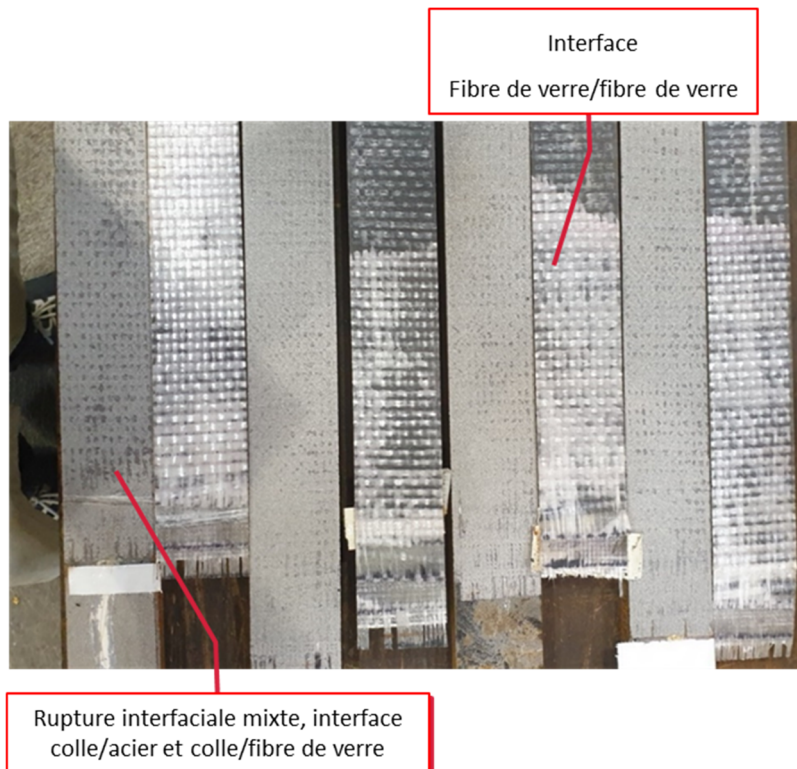


Fig. 5. Faciès de rupture des éprouvettes testées en traction avec un chanfrein long.

5. Evaluation de la résistance vis-à-vis de la fatigue du patch composite collé

Une campagne d'essais de fatigue (10 essais) a été réalisée suite aux résultats des essais statiques sur des éprouvettes à chanfrein long. Les niveaux de charge (en traction, avec un rapport de charge $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} = 0.1$) ont été définis pour obtenir un nombre de cycles compris entre 50 000 et 5 millions. La figure 6 montre les résultats de ces essais en termes de durée de vie, pour différentes amplitudes d'efforts. La droite de couleur noire sur la figure 6 représente la projection de la courbe moyenne de durée de vie obtenue. Les carrés orange correspondent aux résultats d'essais (à rupture) obtenus, et les flèches bleues aux essais n'ayant pas rompu pour un nombre de cycles correspondant à la base de la flèche. La courbe de fatigue est comparée à un histogramme de référence pour une unité FPSO calculé à partir de la norme NI611 [11]. Le trait vertical bleu correspond à l'objectif en durée de vie du patch de 20 ans soit 63 millions de cycles suivant la formule donnée en Eq. 1.

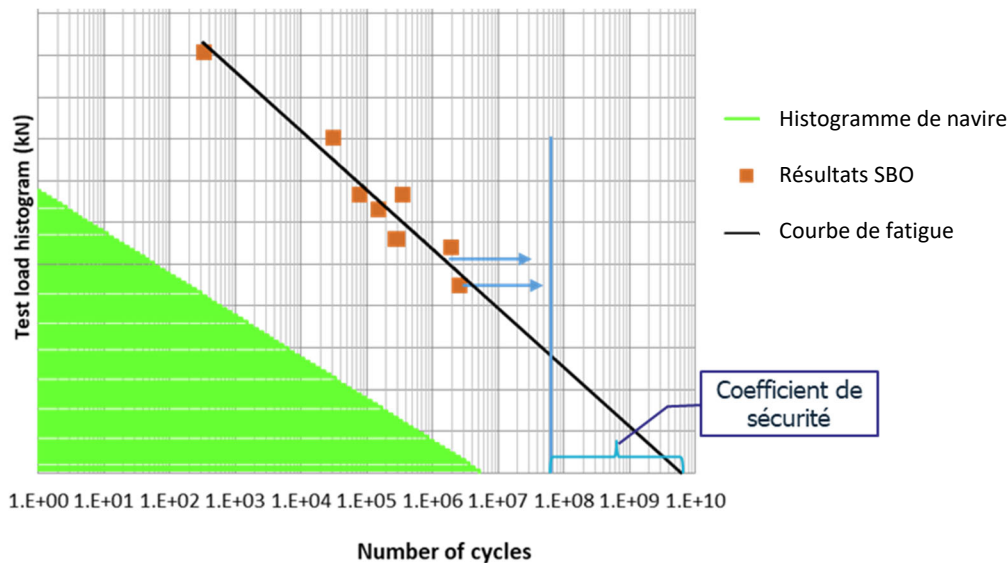


Fig. 6. Résultats obtenus lors de la campagne d'essais de fatigue (en traction) sur des éprouvettes avec chanfrein long.

$$N_{\text{cycles}} = D_{\text{vie}} F_{\text{houle}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec N_{cycle} correspondant au nombre de cycles à rupture, D_{vie} à la durée de vie attendue (20 ans) et F_{houle} à la fréquence moyenne de la houle, ici fixée à 0.1Hz.

On constate ainsi que la durée de vie du patch, obtenue pour différentes amplitudes de charges, est bien supérieure à celle de l'histogramme de référence (durée de vie théorique minimale du navire pour chaque niveau de charges possible). Ces résultats prédisent donc que la durée de vie du patch en conditions réelles d'utilisation et sans dégradations extérieures dépassera largement la durée de vie du navire. Le coefficient de sécurité (différence entre la durée de vie théorique et expérimentale) important permet un très bon niveau de confiance vis-à-vis de la tenue du patch collé en condition réelle.

6. Conclusion

Dans un premier temps, la conception du patch composite développé au cours du projet SBO a été détaillée. Ensuite, les investigations expérimentales menées sur un patch collé à échelle réelle ont été présentées.

Elles ont consisté à évaluer la résistance du patch collé pour plusieurs types de chargement monotone (traction et flexion). Les résultats obtenus ont été comparés aux cas de chargement typiques rencontrés sur unité FPSO. La conception retenue pour le patch en composite a ainsi permis d'obtenir des performances mécaniques deux à trois fois supérieures aux valeurs recommandées par les normes (en fonction de l'angle du chanfrein).

Par ailleurs, les résultats de la campagne d'essais de fatigue ont permis de montrer que les durées de vie sous chargement de fatigue seraient bien supérieures aux chargements de dimensionnement d'une unité FPSO. Ces résultats sont très prometteurs quant à l'utilisation de patches composites collés comme moyen de renfort de tôles corrodées en milieu offshore.

Néanmoins, ces résultats ne prennent pas en compte les possibles dégradations extérieures du patch causées par l'humidité ou les possibles endommagements suite à un impact. Les pertes de performances mécaniques issues de ces différentes dégradations seront à étudier pour garantir le bon fonctionnement du patch composite collé comme renfort durable d'unité FPSO.

Remerciements

Remerciements aux partenaires du projet StrengthBond Offshore (Bureau Veritas, Total, Petrobras, Naval Group, Siemens, ColdPad et Infracore) qui ont financé ces travaux.

Références

- [1] S. Chataigner, K. Benzarti, G. Foret, J.F. Caron, G. Gemignani, M. Brugiolo, I. Calderon, I. Pinero, V. Birtel, F. Lehmann, Design and evaluation of an externally bonded CFRP reinforcement for the fatigue reinforcement of old steel structures, *Engineering Structures*, Vol. 177, pp.556-565, 2018.
- [2] S. Chataigner, M. Wabeh, D. Garcia-Sanchez, K. Benzarti, V. Birtel, M. Fischer, L. Sopena, R. Boundouki, F. Lehmann, E. Martin, G. Gemignani, M. Zalbide, Preventive fatigue strengthening of steel structures with adhesively bonded CFRPs – efficiency demonstration on a real bridge, *Journal of Composites for construction*, Vol.24 (3), 2020.
- [3] E. Lepretre, S. Chataigner, L. Dieng, L. Gaillet, Fatigue strengthening of cracked steel plates with CFRP laminates in the case of old steel materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 174, pp. 421-432, 2018.
- [5] <https://marine-offshore.bureauveritas.com/strength-bond-offshore-assessing-strength-bonded-repairs>
- [6] S. Paboeuf, Q. Sourisseau, A-C. Goupil « Towards a Robust Offshore Bonded Repair Strength Evaluation » SNAME 26th Offshore Symposium, Apr 2021.
- [7] Q. Sourisseau, E. Lepretre, S. Chataigner, X. Chapeleau, S. Paboeuf, M. Deydier « Adhesively Bonded FRP Reinforcement of Steel Structures: Surface Preparation Analysis and Influence of the Primer », in : ASME 2022 - 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Jun 2022, Hamburg, Germany.p.1-9, 10.1115/OMAE2022-79079.
- [8] Q. Sourisseau « Development of a robust methodology for the design assessment of bonded reinforcements on steel structures », Ph.D. thesis, Université Gustave Eiffel, Nantes Université, 2022.
- [9] NI467, Rules for the classification of steel ships, Jul 2022, Bureau Veritas
- [10] NI445, Rules for the classification of offshore units, Nov 2022, Bureau Veritas
- [11] NI611, Guidelines for fatigue assessment of ships and offshore units, Nov 2020, Bureau Veritas