

Article

Enquête sur la technique de réparation des fissures pour retarder la fracture Initiation des éléments en acier soumis à une fatigue à faible cycle

Sampath Abeygunasekara ^{1,*}, Jeeva Chandanee Pushpakumari Gamage ¹ et Sabrina Fawzia ²

¹ Département de génie civil, Faculté d'ingénierie, Université de Moratuwa, Katubedda 10400, Sri Lanka ; kgamage@uom.ac.lk École de génie civil

² et environnemental, Université de technologie du Queensland, Brisbane 4000, Australie ; sabrina.fawzia@qut.edu.au

* Correspondance : abeygunasekarasampath@gmail.com

Résumé : Les concentrations de contraintes sont devenues un phénomène courant dans les éléments en acier lors de l'arrêt d'une fracture en mettant en œuvre la technique CSH (Crack Stop Hole). L'intégration du CSH avec un polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) améliore la durée de vie en fatigue en retardant les fractures tout en obtenant une récupération de rigidité grâce aux caractéristiques mécaniques supérieures du matériau CFRP. Par conséquent, le comportement à faible fatigue cyclique (LCF) de 90 éprouvettes CSH renforcées et non renforcées a été examiné dans ce contexte. Ces éprouvettes ont été soumises à une plage de 0 à 10 000 cycles de charge de fatigue à une fréquence de 5 Hz. À la fin de l'exposition à la fatigue, la résistance moyenne à la traction a été mesurée dans chaque cas. L'application d'un patch CFRP sur le CSH a efficacement récupéré les pertes de résistance tout en améliorant la résistance de l'ordre de 32 % à 45 % par rapport aux échantillons non renforcés. Le modèle numérique développé basé sur la technique J-intégrale cyclique est en accord avec les résultats des tests. Cette étude a introduit des lignes directrices de conception liées à la géométrie pour cette nouvelle technique hybride CSH.

Mots-clés : éléments en acier ; trou d'arrêt de fissure (CSH) ; Composite hybride CHS/CFRP ; fatigue à faible cycle ; résistance moyenne à la traction



Citation : Abeygunasekara, S. ;

Gamage, JCP; Fawzia, S.

Enquête sur la technique de réparation
des fissures pour retarder

l'initiation de la fracture des éléments en
acier soumis à une fatigue à faible cycle.

Bâtiments 2023, 13, 2958. <https://doi.org/10.3390/buildings13122958>

Rédacteurs académiques : Baiqiao Chen,
Youde Wang, Liang Zong et
Zongxing Zhang

Reçu : 17 septembre 2023

Révisé : 25 octobre 2023

Accepté : 2 novembre 2023

Publié : 28 novembre 2023



Copyright : © 2023 par les auteurs.

Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès
distribué selon les termes et
conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Les structures vieillissantes sont vulnérables à la fatigue due à la dégradation des matériaux et aux lourdes charges résultant de l'augmentation de la demande de service actuelle. La fatigue provoque généralement des fractures au niveau microstructural, qui ne peuvent pas être observées visuellement [1]. Selon les études précédentes, 90 % des défaillances structurelles sont dues à des ruptures de fatigue [2]. Cependant, la fatigue n'est pas un problème d'ingénierie puisqu'elle est liée au comportement de tout matériau dû aux fluctuations de contraintes. L'effet cyclique provoque une modification des propriétés mécaniques d'un matériau, ce qui entraîne une rupture qui se produit en dessous de la limite d'élasticité du matériau ductile.

Il est intéressant de noter qu'une défaillance rapide et soudaine se produit sans aucun avertissement préalable et dans un délai très court, entraînant des pertes de vies et de biens en raison de la fatigue. Par conséquent, les réparations liées à la fatigue des structures en acier sont très importantes pour continuer leurs services dans les limites de sécurité. Traditionnellement, les plaques d'acier sont reliées aux éléments fissurés à l'aide de soudage ou d'écrous et de boulons comme technique de réparation. Cependant, ces méthodes présentent des limites, notamment un équipement lourd, une main-d'œuvre qualifiée, une augmentation du poids propre, une modification de la microstructure d'un matériau due à la chaleur, une discontinuité de la section transversale, une utilisation difficile en cas d'urgence et des temps d'arrêt élevés.

Fisher et al., en 1980, ont proposé une technique de placement de trous pour le contrôle des fissures [3]. La technique CSH présente un grand potentiel pour surmonter la majorité des inconvénients mentionnés ci-dessus. Cette technique pourrait être considérée comme une méthode rapide, simple et rentable. Le procédé de la technique CSH consiste à percer un trou à l'extrémité du fond de fissure pour transformer la fissure en entaille. Le résultat est une réduction des contraintes sur les éléments structurels fissurés.

Cette technique est utilisée avec succès dans l'industrie aéronautique depuis 1950 [4] et, à l'heure actuelle, les applications de réparation de ponts en acier ont également introduit cette méthode. Cependant,

le CSH commence à se refisser en raison des charges de service continues ainsi que de la diminution de la résistance moyenne de la section transversale due à l'enlèvement de matière du CSH. Il devrait donc exister une solution pour améliorer les performances de cette technique. La taille du CSH est un débat majeur en ce qui concerne la technique CSH et nécessite une ligne directrice de conception appropriée pour décider de la taille du CSH.

Une étude réalisée par Fish et al. ont recommandé une plage de diamètre CSH comprise entre 50 mm et 100 mm pour des performances efficaces [5], tandis qu'Ishikawa et al. recommandé une plage de diamètre comprise entre 6 mm et 25 mm [6]. La taille minimale du trou doit être inférieure à 25 mm pour les ponts routiers typiques [3]. Dextor et Oce ont confirmé qu'une taille minimale du CSH est de 25 mm de diamètre [7]. Une formule a été développée par Rolfe et Barsom en 1977 pour estimer la taille du CSH [8]. Fisher et coll. introduit une corrélation pour estimer la taille du CSH [3]. Cela indique clairement que la taille du CSH est un débat majeur concernant cette technique et que certaines lignes directrices de conception appropriées sont nécessaires pour décider de la taille du CSH en fatigue. Brown et coll. ont suggéré que le CSH placé à l'aide de mèches émoussées entraînerait une fatigue similaire à celle des trous de perforation [9]. Les matériaux CFRP ont été appliqués avec succès pour restaurer des structures en acier dégradées depuis 1980 [10] en raison de leur résistance à la corrosion, de leur légèreté et de leur remarquable durabilité à la fatigue [11]. Les enquêtes menées par Bocciarelli et al. ont prouvé que le CFRP présente de meilleures performances en fatigue que les méthodes à plaques de recouvrement soudées [10]. Yuana et coll. et Liu et al. ont également confirmé les performances en fatigue d'une technique de renforcement basée sur le CFRP à travers leurs études de recherche [12,13]. Tang et Kalavagunta et al. ont affirmé la capacité du CFRP à améliorer la durée de vie et à augmenter la capacité de fatigue des éléments structurels [14]. Les études de recherche réalisées par Kalavagunta et al. ont également étudié la capacité de la section en acier à gagner en résistance avec le CFRP [15]. Selon Cadei et al., les feuilles et bandes CFRP pourraient être utilisées efficacement pour renouveler la capacité perdue d'un matériau [16]. Gite et al. ont montré que le CFRP est capable de réduire d'un tiers le gain de poids et de renforcement par cinq par rapport à l'acier [17]. Par conséquent, le renforcement du CSH à l'aide d'un matériau CFRP présente un grand potentiel pour arrêter la fissure et peut améliorer les performances en fatigue en raison des retards dans la fissuration par nature. Cette enquête s'est concentrée sur l'évaluation du comportement en fatigue d'un système hybride CSH/CFRP tout en introduisant une formule de conception pour la technique CSH.

2. Méthodologie

Une revue de la littérature a été réalisée pour résumer les investigations existantes liées aux trous d'arrêt de fissure ainsi que les techniques renforcées par le CFRP et pour identifier les lacunes dans la recherche. Un appareil de chargement en fatigue a été conçu et fabriqué sur la base de commandes électrohydrauliques avec une capacité de charge de 10 kN. Un programme d'essais expérimentaux a été réalisé avec quatre séries d'essais pour étudier les mesures liées à la fatigue du CSH. Le FEM a été développé à l'aide d'un logiciel d'analyse par éléments finis (ABAQUS 6.14), avec une configuration de test similaire avec des tests en laboratoire. Le modèle a été utilisé pour comparer les résultats des tests de laboratoire à des fins de validation. Les résultats du modèle ont été utilisés pour mener une étude paramétrique afin d'estimer les effets des paramètres inconnus sur les performances du CSH. Les résultats des tests et les résultats FEM ont été présentés avec des directives de conception et des recommandations pour la technique CSH.

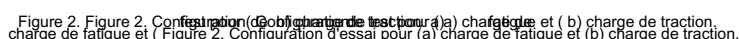
3. Configuration et matériel de test

Au total, quatre-vingt-dix spécimens classés en sept séries ont été testés.
les détails sont répertoriés dans le tableau 1.

Les échantillons d'essai ont été conçus conformément à la norme ASTM D 790 [18] avec les dimensions sions de 40 mm (largeur) × 5 mm (épaisseur) × 280 mm (portée) (Figure 1).

Les surfaces à renforcer ont été préparées par sablage et la couche humide. Les surfaces à renforcer ont été préparées en deux étapes : apparition du saillage et la méthode de stratification humide a été suivie dans le processus de renforcement. La méthode des échantillons préparés a été suivie dans le processus de renforcement de chaque machine dans les machines de renforcement. Les échantillons préparés ont été laissés durcir pendant 7 jours avant d'être conditionnés (Figure 1). Une charge de fatigue a été appliquée avec une cure continue à un cylindre pendant 7 jours avant le conditionnement (Figure 1). Une charge de fatigue a été appliquée avec une amplitude de 2 kN et une fréquence de 5 Hz dans une durée prédéfinie selon l'amplitude ASH et la fréquence de 5 Hz dans une durée prédéfinie selon les directives ASTM D-790 [18]. Après conditionnement avec un nombre prédéterminé de cycles de charge (Figure 2a), la machine d'essai universelle fixe pour l'essai de fatigue est fixée à l'échantillon. L'échantillon a été retiré de la machine d'essai universelle et fixé à la machine d'essai unitaire (UTM) pour une série d'essais de traction pour appliquer une charge de traction comme montré dans la figure 2b. Cette procédure a été répétée, ainsi que la valeur moyenne de la traction de chaque éprouvette. La variation de déformation a été mesurée pour trois essais sous une même charge de traction. La variation de déformation a été mesurée pour chaque échantillon. La variation de déformation au CSH de la charge d'échantillon a été enregistrée pendant l'exposition à une charge de fatigue a été enregistrée à l'aide d'un enregistreur de données.

pendant l'exposition à une charge de fatigue a été enregistrée à l'aide d'un enregistreur de données.



Le module d'élasticité et la résistance à la traction de l'acier et du matériau CFRP ont été déterminés expérimentalement à l'aide d'un test sur coupon. La résistance à la traction et le module élastique de l'acier ont été mesurés selon les normes ASTM D 3039 [19]. En fait, une résistance à la traction de 583 MPa et un module élastique moyen de 200 GPa ont été rapportés. Traction Le module d'élasticité et la résistance à la traction de l'acier et du matériau CFRP ont été mesurés selon les normes ASTM D 3039 [19]. En fait, une résistance à la traction de 583 MPa et un module élastique moyen de 200 GPa ont été rapportés. Traction Le module d'élasticité et la résistance à la traction de l'acier et du matériau CFRP ont été rapportés à 175 MPa et déterminés 1575 MPa, respectivement. Les fabricants ont fourni des données comparées aux mesures propriétés des matériaux, conformément à la norme ASTM D 3039/3039 M, qui sont répertoriées dans le tableau 2. Une résistance de 583 MPa et un module élastique moyen de 200 GPa ont été rapportés. Traction la résistance et un module élastique moyen du matériau CFRP ont été rapportés à 175 MPa et déterminés 1575 MPa, respectivement. Les fabricants ont fourni des données comparées aux mesures propriétés des matériaux, conformément à la norme ASTM D 3039/3039 M, répertoriées dans le tableau 2.

Propriété du matériau	Acier	Adhésif époxy	CFRP
Résistance à la traction	583 MPa	175 MPa	1575 MPa
Module élastique	200 GPa	175 MPa	1575 MPa

Tableau 2. Propriétés des matériaux mesurées et fournies par le fabricant [11,20].

Propriété du matériau	Acier	Adhésif époxy 0,579	CFRP
Module élastique moyen (GPa)	200		175
Résistance à la traction moyenne (MPa)	583	25	1575
Coefficient de Poisson moyen	0,3	0,3	0,3
Module élastique moyen (GPa)	200	0,579	175
Coefficient de Poisson	0,3	0,3	0,3

moven 4. Resultats

4. Résultats

4.1. Effets du diamètre CSH 4.1.

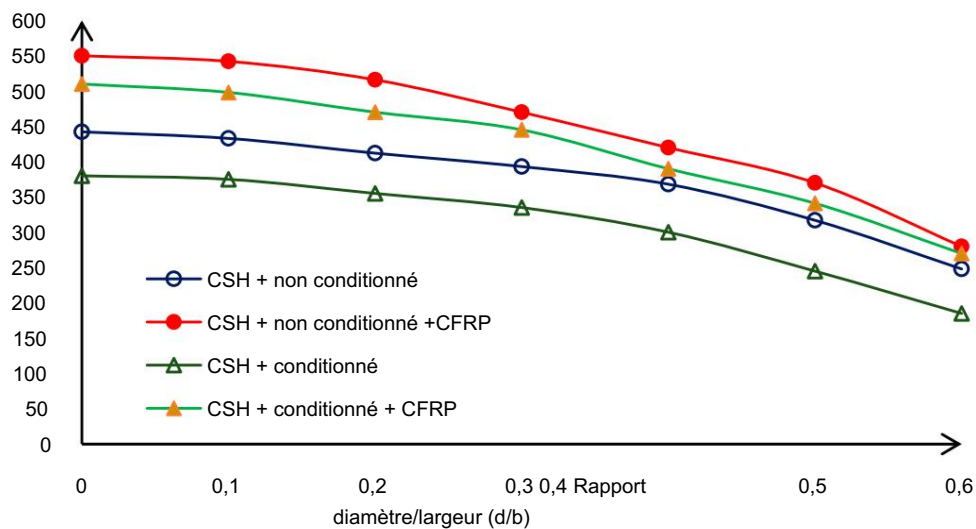
[illegible]

Figure 3. Pertes de résistance dues à la fatigue et gains de résistance du CFRP.

En moyenne, une perte de résistance de 14 % a été constatée dans l'éprouvette en raison des effets de fatigue. En moyenne, une perte de résistance de 14 % a été constatée dans l'éprouvette en raison des effets de fatigue, même sans CSH. Ceci est principalement dû à la dégradation des matériaux provoquée par des actions répétitives, sans le CSH. Ceci est principalement dû à la dégradation des matériaux provoquée par les actions répétitives de chargement et de déchargement (fatigue). En moyenne, une perte de résistance de 13 à 25 % a été constatée lors des actions de chargement et de déchargement (fatigue). En moyenne, une perte de résistance de 13 à 25 % a été constatée lorsque le rapport d/b variait de 0,1 à 0,6 à la fin de l'exposition en fatigue des éprouvettes. Lorsque le rapport d/b variait de 0,1 à 0,6 en fin d'exposition en fatigue dans les éprouvettes avec le CSH. En général, le CSH provoque une réduction de la rigidité due à la suppression des liaisons. Avec le CSH, En général, le CSH provoque une diminution de la rigidité due aux changements dans la microstructure des matériaux à proximité du trou sont avec le CSH. En général, le CSH provoque une diminution de la rigidité due aux changements dans la microstructure des matériaux à proximité du trou sont matériaux. D'autre part, les changements dans la microstructure des matériaux à proximité du trou sont dus aux effets de fatigue. La variation de la capacité de traction moyenne du matériau est réglée en raison des effets de fatigue, la déformation et la distribution des liaisons de matériaux, vers le du matériau est réglée par les effets mouvements vers l'arrière des dislocations et déformation plastique le long des plans de glissement des métaux

par effets d'écoulement plastique, imperfections dans le réseau cristallin du matériau, effets d'écoulement vers l'avant des adhésifs, imperfections de la surface de la plaque de ciment, etc. [21]. Tous ces facteurs sont gravement affectés par un impact important responsable de dommages cycliques [21]. Tous ces facteurs sont gravement affectés par un impact important responsable de dommages cycliques [21]. Tous ces facteurs sont gravement affectés par un impact important responsable de dommages cycliques [21].

Enfin, les résultats de la présente étude ont permis de constater que la technique de réparation hybride CSH/CFRP a le potentiel d'améliorer la capacité portante à la fatigue du matériau. Par conséquent, la capacité proposée du matériau en même temps la capacité portante à la fatigue du matériau. Par conséquent, la technique de réparation hybride CSH/CFRP a le potentiel d'améliorer la capacité portante à la fatigue du matériau. Par conséquent, la technique de réparation hybride CSH/CFRP a le potentiel d'améliorer la capacité portante à la fatigue du matériau. Par conséquent, la technique de réparation hybride CSH/CFRP a le potentiel d'améliorer la capacité portante à la fatigue du matériau.

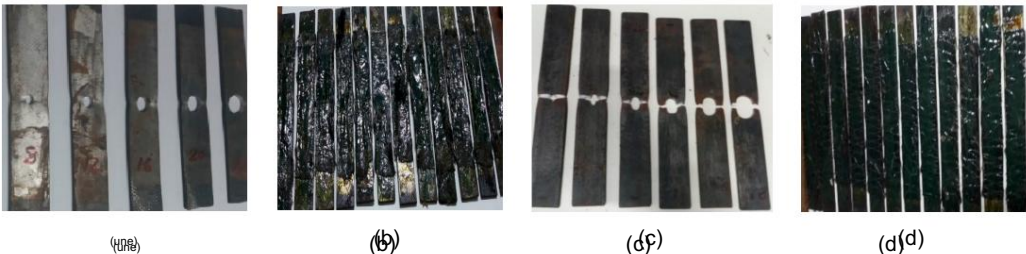


Figure 4. Mode de défaillance du CSH: (a) non fatigué et non renforcé, (b) non fatigué et renforcé, (c) fatigué et non renforcé, (d) fatigué et renforcé, (e) renforcé (c)

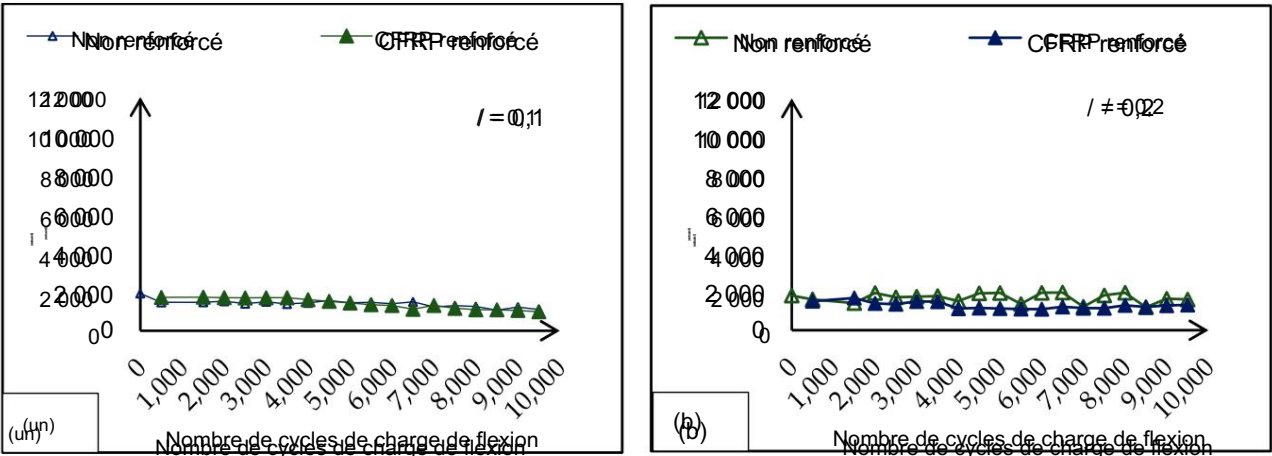


Figure 5. Suite.

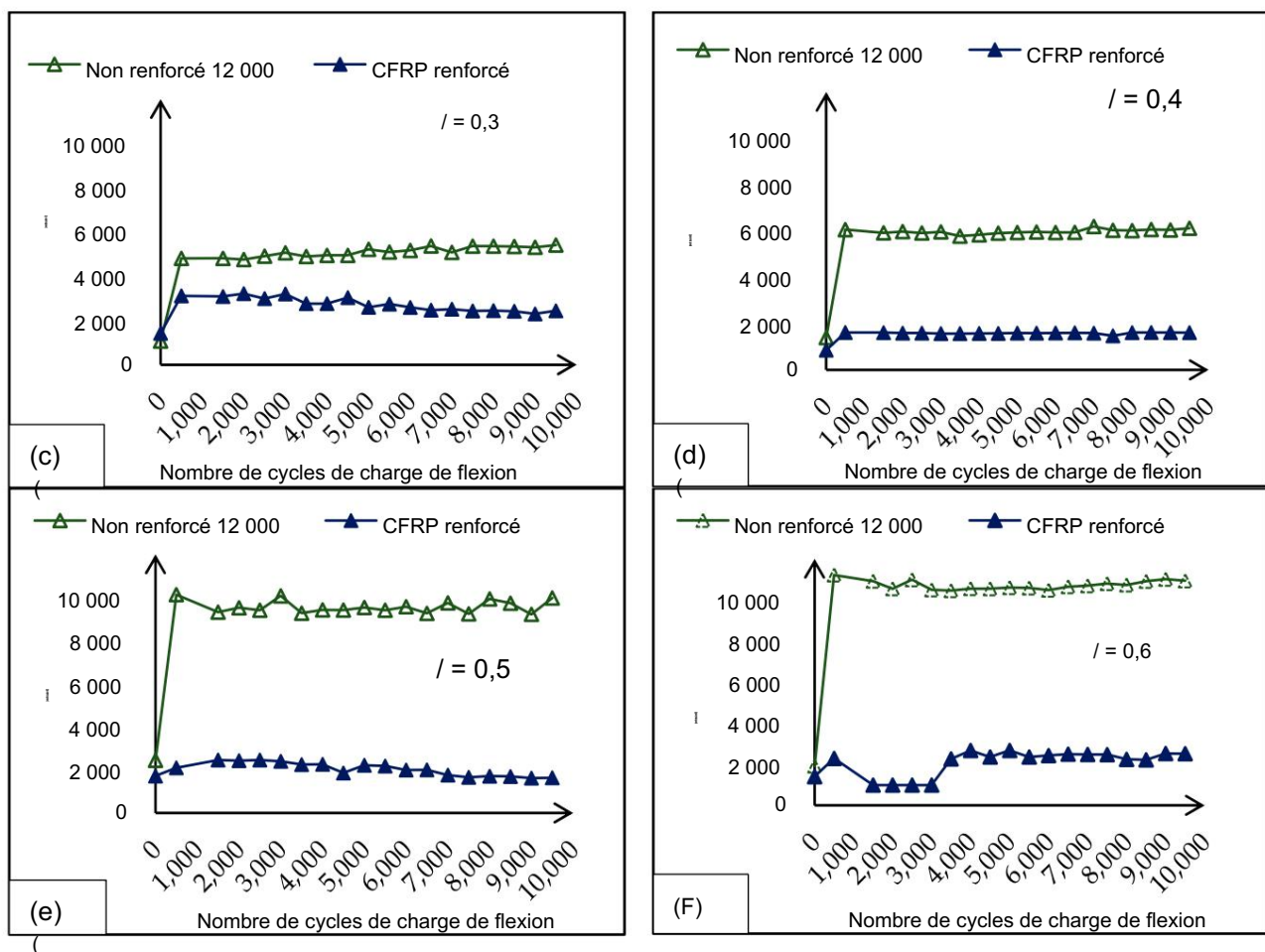


Figure 5. Variations de déformation pendant le conditionnement lorsque l est (a) 0,1, (b) 0,2, (c) 0,3, (d) 0,4, (e) 0,5 et (f) 0,6.

D'après la Figure 5a,b, aucun écart significatif n'a été constaté en renforcé et non renforcé. La contribution du matériau CFRP est négligeable, ainsi que celle des échantillons substrat en acier pour résister aux effets de la fatigue. Lorsque le rapport d/b passe de 0,3 à 0,6, la réduction de la déformation sur le substrat en acier des échantillons CFRP indique une réduction significative de la déformation de versant par rapport au CSH non renforcé comme le montre la figure 5c. Cela est dû à la capacité efficace de partage de charge de la couche CFRP attachée. Les résultats sous tension contribuent au contrôle des déformations retardant encore davantage la propagation des fissures dans le CSH. D'où la variation de déformation mesurée indique l'efficacité de la technique de réparation hybride proposée pour réduire les éléments de la fatigue exposés à la fatigue par rapport au CSH traditionnelle.

4.2. Effets de la distance de décalage du CSH

Après les éprouvettes d'essai, les échantillons de CSH ont été conditionnés. Au total, 36 jusqu'à 10 000 cycles de charge avec une amplitude de 2 kN et une fréquence de 5 Hz. Dix-huit d'entre eux étaient réparés avec une couche CFRP de 200 mm de long et les résultats restants n'ont pas été réparés. Les échantillons considérés comme échantillons contrôlés. Pour les deux séries de tests, la distance entre la grande charge ponctuelle CSH a été considérée comme la variable principale. La distance entre le CSH a été placée aux emplacements prédéterminés de l'échantillon de l'échantillon. La distance CSH a été placée au milieu de la traverse médiane variée de 20 mm à 100 mm par pas de 20 mm. Au bout de la fatigue de 10 000 cycles, la résistance au chargement à la fatigue des échantillons a été déterminée à l'aide d'un appareil d'essai de traction universel, et les résultats sont représentés sur la figure 6.

L'objectif principal de cette série de tests était de comparer la résistance à la traction conservée après exposition à la charge de fatigue pour quantifier l'efficacité du CFRP sur la distance jusqu'au CSH à partir de la mi-portée. Une tendance de l'écart de variation de la résistance à la traction moyenne retenue avec

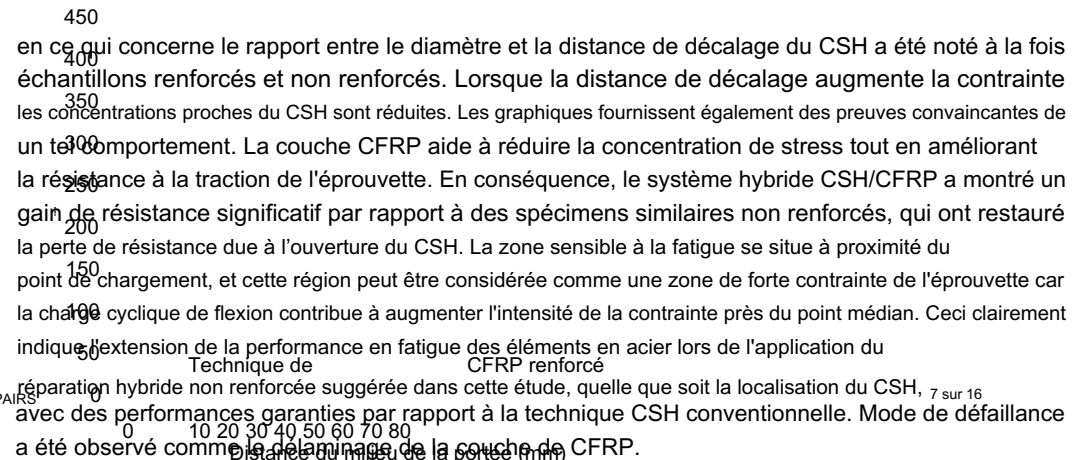


Figure 6. Comparaison de la variation de résistance moyenne avec la position CSH.

L'objectif principal de cette série de tests était de comparer la résistance à la traction conservée après exposition à une charge de fatigue afin de quantifier l'efficacité du CFRP sur la distance jusqu'au CSH 350. à partir de la mi-portée. Une tendance de l'écart de variation de la résistance à la traction moyenne retenue par rapport au rapport entre le diamètre et la distance de décalage du CSH a été notée à partir des échantillons renforcés et non renforcés. Lorsque la distance de décalage augmente, les concentrations de contraintes à proximité du CSH sont réduites. Les graphiques fournissent également des preuves convaincantes d'un tel comportement. La couche CFRP contribue à réduire la concentration des contraintes tout en améliorant la résistance à la traction de l'éprouvette. En conséquence, le système hybride CSH/CFRP a montré un gain de résistance significatif par rapport à des échantillons similaires non renforcés, ce qui a restauré la perte de résistance due à l'ouverture du CSH. La zone sensible à la fatigue est proche du CFRP le point de chargement, et cette région peut être considérée comme une zone de contrainte élevée de l'éprouvette car la charge cyclique de flexion contribue à augmenter l'intensité de la contrainte près du point médian. Cela indique clairement l'extension des performances en fatigue des éléments en acier lors de l'application de la technique de réparation hybride suggérée dans cette étude, quel que soit l'emplacement. Figure 6. Comparaison de la variation de résistance moyenne avec la position CSH.

Le mode de défaillance a été observé comme le délaminage de la couche CFRP. La fixation des jauges de contrainte à proximité des éprouvettes, comme le montre la figure 7. La moyenne des jauges de contrainte ont été fixées à proximité des éprouvettes, comme le montre la figure 7. L'exposition à la fatigue a été mesurée à la fin de chaque cycle de chargement prédéterminé, à partir de la mi-portée. La variation moyenne de déformation pendant la fatigue a été mesurée à la fin de chaque cycle de chargement prédéterminé, comme le montre la figure 8, en fonction de la distance jusqu'au CSH à partir du point médian. Lorsque le CSH est proche de la travée médiane, il est soumis à de fortes contraintes, qui se dissipent à travers le substrat en acier. En conséquence, il existe une contrainte comparativement plus faible dans le substrat en acier du centre vers le support. La contrainte de fatigue diminue également. D'où la résistance à la traction de l'éprouvette. En conséquence, le système hybride CSH/CFRP a montré des variations de contrainte similaires dans les systèmes renforcés et non renforcés. Cela indique clairement que l'arrangement hybride CSH/CFRP proposé pourrait avec succès la déformation à proximité du CSH du CSH.

Des jauges de contrainte ont été fixées à proximité des éprouvettes, comme le montre la figure 7. La variation moyenne de déformation pendant la fatigue a été mesurée à la fin de chaque cycle de charge prédéterminé, comme le montre la figure 8, en fonction de la distance au CSH à partir du milieu. indiquer. Lorsque le CSH est proche de la travée médiane, il est soumis à de fortes contraintes, qui se dissipent à travers la feuille CFRP. En conséquence, il existe une contrainte comparativement plus faible dans le substrat acier de la configuration hybride (b) par rapport à la configuration CSH conventionnelle. Lorsque la position du CSH se déplace du centre vers le support, la contrainte de fatigue diminue également. D'où la figure 7. Jauges de contrainte fixées, (a) éprouvette non renforcée et (b) éprouvette renforcée au CFRP avec des variations de déformation similaires ont été observées dans les CSH sans-offset renforcés et non renforcés s'il vous plaît. Cela indique clairement que l'arrangement hybride CSH/CFRP proposé pourrait s'adapter avec succès à la souche proche du CSH.

Figure 10 consists of five subplots (a-e) showing the evolution of the maximum load (P_{max}) in kN versus the number of loading cycles (0 to 10,000) for different CFRP reinforcement ratios (20%, 40%, 60%, 80%, 100%). Each plot compares 'Non renforcé' (green line with triangles) and 'CFRP renforcé' (blue line with triangles). The y-axis ranges from 0 to 12,000 kN. The x-axis ranges from 0 to 10,000 cycles. In all cases, the CFRP reinforced specimens show a significantly lower and more stable P_{max} compared to the non-reinforced specimens, which exhibit a slight increase in load over time.

simuler les interfaces entre deux rouleaux de support et la surface inférieure de la plaque et le nez de chargement sur le plan médian de la plaque d'acier. Chaque modèle d'échantillon a été chargé

entre deux rouleaux de support et la surface inférieure de la plaque et le nez de chargement sur le plan médian de la plaque d'acier. Chaque modèle d'échantillon a été chargé avec le mode LCF utilisant une option cyclique directe et une entrée de 10 000 avec le mode LCF utilisant une option cyclique directe et une entrée de 10 000 cycles. Quand le taille du maillage est très petite, elle entraîne la génération d'un point singulier à la surface de la plaque. Lorsque la taille du maillage est très petite, elle entraîne la génération d'un point singulier à la surface de la plaque. La contrainte aux points est singulièrement considérée comme l'infini. Par conséquent, compte tenu de tout les facteurs ci-dessus, un résultat FEM d'un maillage de 2 mm a été sélectionné comme taille appropriée dans une taille appropriée pour cette analyse, comme le montre la figure 9.

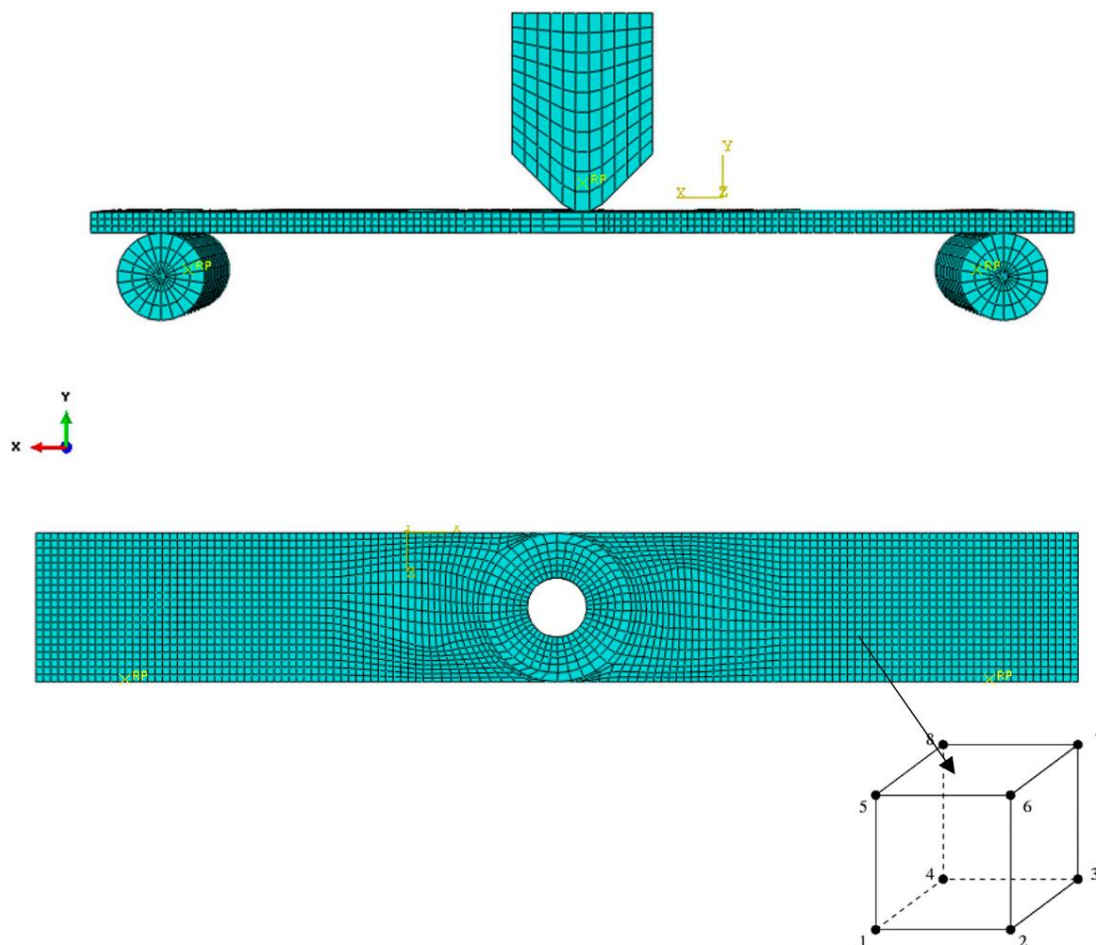
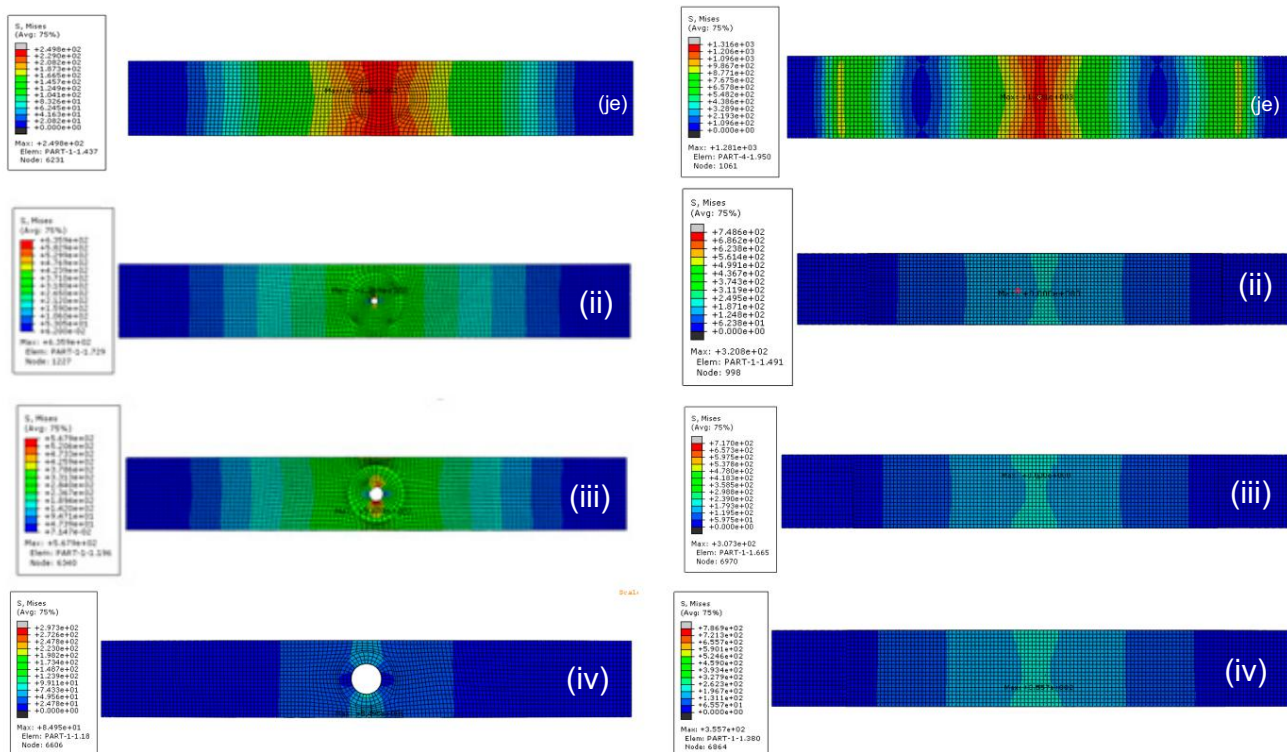
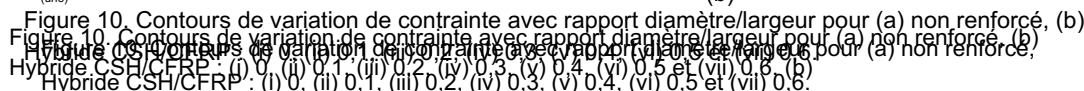


Figure 9. Le modèle d'essai en traction du spécimen.

L'ampleur de la pression appliquée au sommet du nez de chargement a été sélectionnée comme 1,25 N/mm² (2 kN) et la fréquence des charges a été fixée à 5 Hz. En considérant les conditions limites, deux cylindres de support ont été fixés pour éviter les deux rotations et traduction. La vitesse de chargement a été maintenue constante à une vitesse fixe de 0,2 mm/min tout au long de l'analyse. L'option de dommages Hashin a été utilisée pour modéliser le tissu CFRP. Le coefficient de frottement a été pris comme 0,15 entre chaque surface. Options spéciales ont été utilisées pour créer la fissure, tandis que la direction d'extension a été sélectionnée à l'aide du vecteur q. La direction d'extension a été sélectionnée à l'aide de l'option vectorielle q. Le modèle avait les mêmes configurations que le modèle de test en laboratoire. Chaque module d'échantillon a été chargé avec le mode LCF à l'aide d'une option cyclique directe. Un rayon de 8 mm d'une option cyclique directe a été appliqué sur le nez de chargement de la plaque d'acier. La plaque d'acier a été modélisée en utilisant l'option élastique plane avec des conditions de durcissement (1350 MPa) et des éléments de bords de 10 mm. Toutes les autres conditions de durcissement (1350 MPa) ont été utilisées pour modéliser la plaque d'acier. Toutes les propriétés matérielles du tableau 2 ont été utilisées pour améliorer le niveau de précision avec la taille du maillage. Le calcul du temps et l'amélioration du niveau de précision avec la taille du maillage devraient être optimisés dans cette situation. Le raffinement du maillage est le plus important méthode vitale pour jouer de la taille du maillage, et elle peut être classée comme maillage grossier, moyen, maille ou maille fine. Réduire la taille des éléments est la stratégie de raffinement de maillage la plus simple, avec tailles d'éléments réduites dans tous les domaines de modélisation. Cette approche est intéressante en raison

Figure 10. Suite.





L'effet du rapport diamètre/largeur du CSH a été pris en considération comme L'effet du rapport diamètre/largeur du CSH a été pris en considération

une variable primordiale dans cette analyse. Les résultats prédits pour les éléments non renforcés et une variable principale dans cette analyse. Les résultats prévus pour les systèmes non renforcés et

Les hybrides CSH/CFRP (après exposition à la fatigue) ont été comparés aux tests de laboratoire pertinents. Les hybrides CSH/CFRP après exposition à la fatigue ont été comparés avec des données de laboratoire pertinentes. Les résultats expérimentaux n'ont pas montré d'écart important par rapport aux distances de confinement constantes pour les non-renforcés ou renforcés, comme le montre la figure 9. Contours de variation de contrainte avec décalage Les distances pour les systèmes hybrides non renforcés et CSH/CFRP sont indiquées respectivement dans les figures 12a et 12b. Les systèmes hybrides renforcés AC et CSH/CFRP sont représentés respectivement sur les figures 12a et 12b.

d'après les graphiques, les résultats du modèle et les résultats expérimentaux étaient raisonnables pour le D après le rapppap sélectionnée du rapport diamètre/largeur du CSH. D'autre part, la déformation sélectionnée du rapport diamètre/largeur du CSH était raisonnable, la déformation sélectionnée du rapport diamètre/largeur du CSH était raisonnable

rapport du diamètre/largeur du CSH. D'autre part, la déformation sélectionnée du rapport diamètre/largeur du CSH était raisonnable

en bien accord avec les résultats CFRP communément montrés à la figure h-1. bien

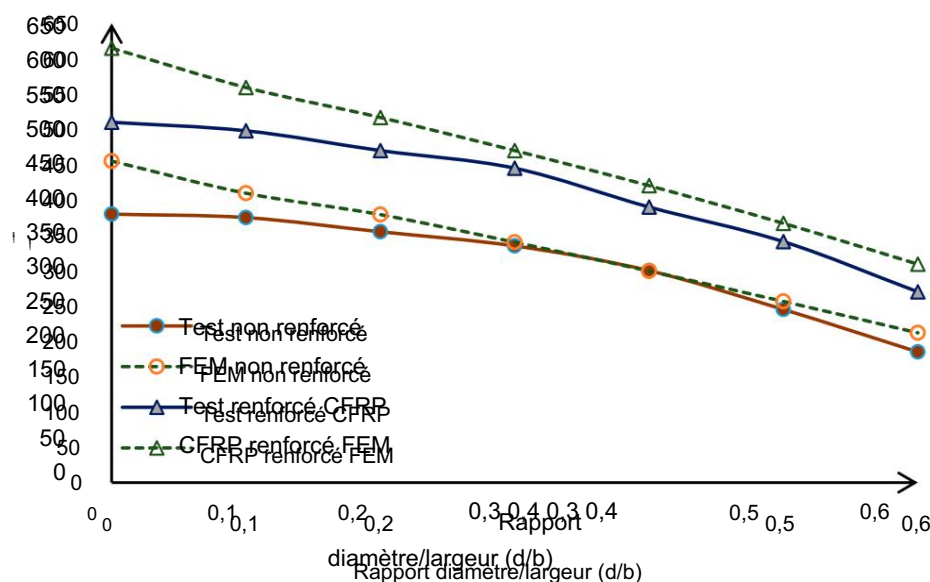
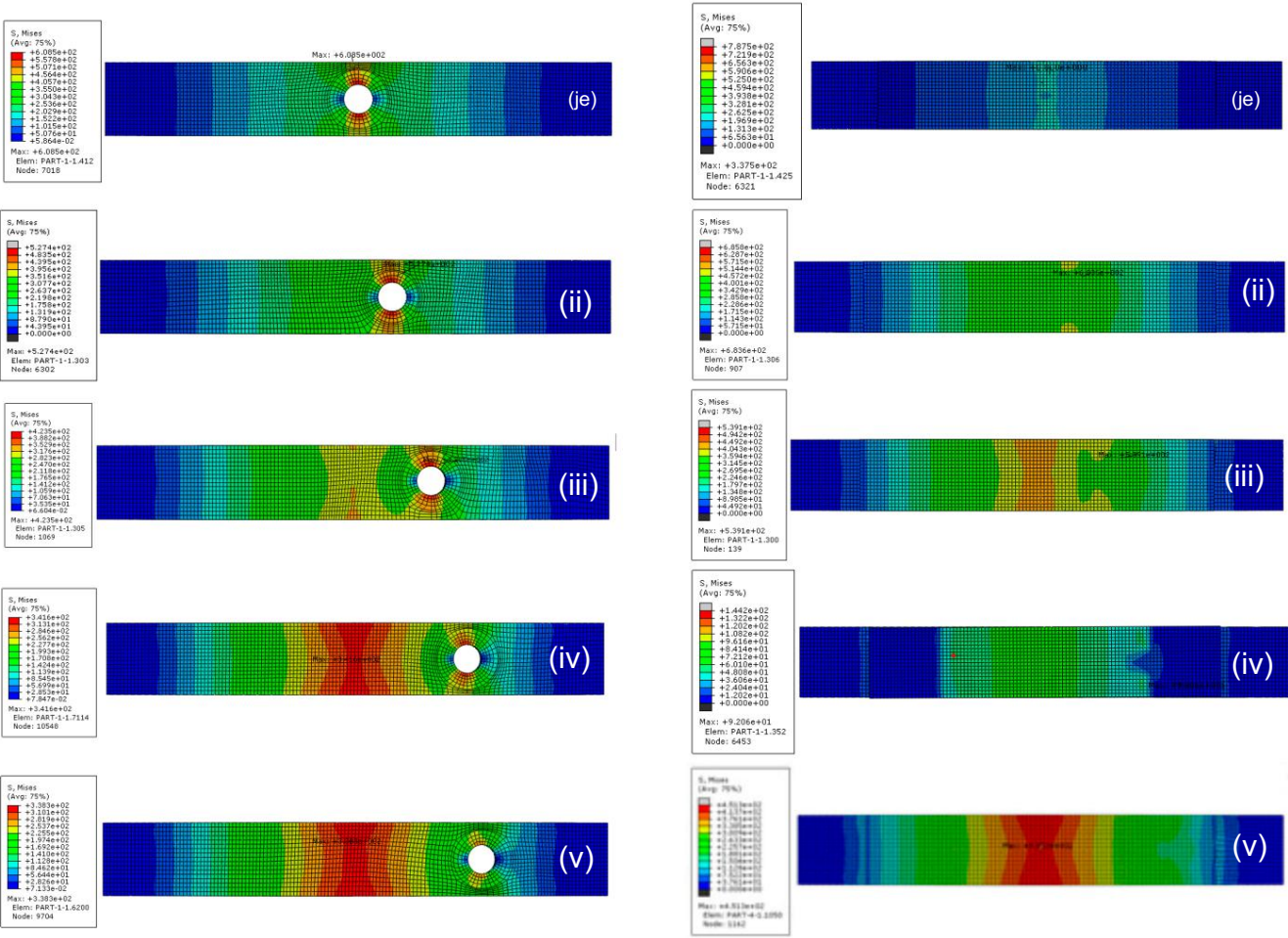


Figure 11. Comparaison entre les résultats expérimentaux et FEM

L'effet de la distance de décalage du CSH a été pris en compte comme facteur principal. variable, et elle variait de 0 à 80 par pas de 20 mm. Les résultats prédits appartenant à les groupes non renforcés et renforcés par CFRP (après exposition à la fatigue) ont été comparés avec des résultats expérimentaux pertinents, comme le montre la figure 13.



(un)

(b)

Bâtiments 2023, 13, x POUR EXAMEN PAR LES PAIRS 13 sur 16 Figure 12. Contours de variation de contrainte avec distance de décalage pour (a) non renforcé, (b) CSH/CFRP Figure 12. Contours de variation de contrainte avec distance de décalage pour (a) non renforcé, (b) système hybride : (i) zéro, (ii) 20 mm, (iii) 40 mm, (iv) 60 mm et (v) 80 mm. système hybride : (i) zéro, (ii) 20 mm, (iii) 40 mm, (iv) 60 mm et (v) 80 mm.

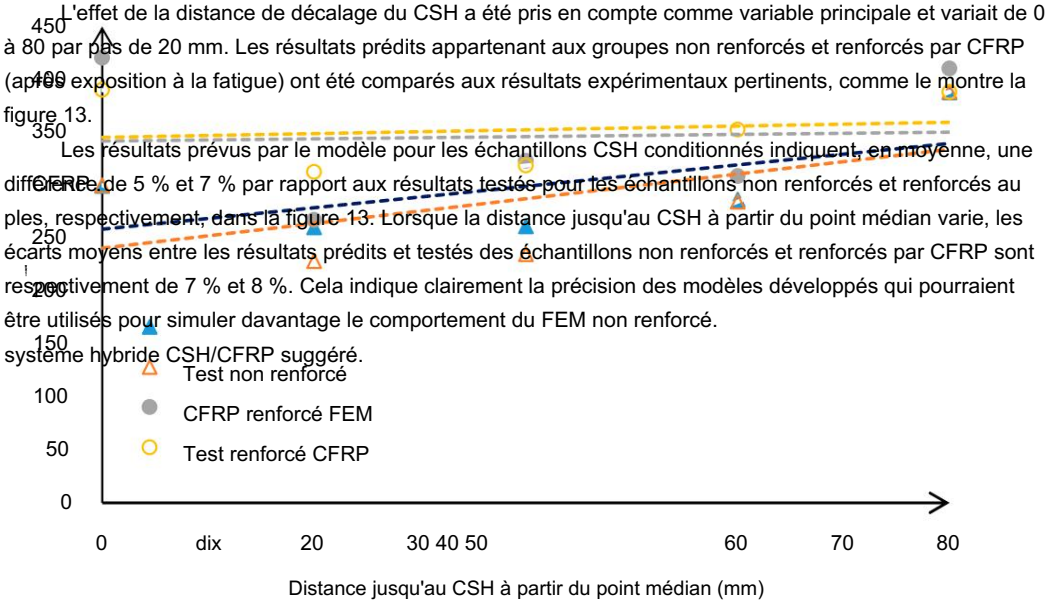


Figure 13. Comparaison entre les résultats expérimentaux et FEM.

5.1. Validation

Les propriétés mécaniques du matériau jouent un rôle essentiel dans la prise en compte de la fatigue. La limite d'élasticité et la résistance à la traction sont les deux principales propriétés des matériaux prises en compte dans l'analyse de fatigue des matériaux ductiles. Ces propriétés du matériau représentent la résistivité à la rupture due à la déformation et à la fracture respectivement. Résistance à l'élasticité et résistance à la traction

Les résultats prévus par le modèle pour les échantillons CSH conditionnés indiquent, en moyenne, une différence de 5 % et 7 % par rapport aux résultats testés pour les échantillons non renforcés et renforcés au CFRP, respectivement, dans la figure 13. Lorsque la distance au CSH à partir du milieu -point varie, les écarts moyens entre les résultats prédits et testés des échantillons non renforcés et renforcés au CFRP sont respectivement de 7 % et 8 %. Cela indique clairement la précision des modèles développés qui pourraient être utilisés pour simuler davantage le comportement du système hybride CSH/CFRP suggéré.

5.1. Validation

Les propriétés mécaniques du matériau jouent un rôle essentiel dans la prise en compte de la fatigue. La limite d'élasticité et la résistance à la traction sont les deux principales propriétés des matériaux prises en compte dans l'analyse de fatigue des matériaux ductiles. Ces propriétés du matériau représentent respectivement la résistivité à la rupture due à la déformation et à la fracture. La limite d'élasticité et la résistance à la traction représentent différentes significations liées à la fatigue. La limite d'élasticité représente la contrainte maximale juste avant la déformation permanente, et les données de traction représentent la contrainte maximale avant la rupture du matériau. Lorsque l'on considère la valeur d'élasticité du matériau ductile, elle est importante et le matériau fragile concerne la résistance à la traction. Comme le matériau fragile n'atteint pas la charge d'élasticité, lors de l'exécution de charges de traction, il se transforme soudainement en fractures. Par conséquent, cette étude a utilisé un essai de traction pour déterminer la limite d'élasticité (contrainte de fatigue) du CSH à la fin de l'état afin de mesurer toute limite d'élasticité retenue.

Cette étude a retenu une limite d'élasticité moyenne du matériau (rapport entre la charge d'élasticité et la surface de la section transversale), qui a été estimée à la fin des charges de fatigue comme limite d'élasticité retenue, ce qui indique les effets de la fatigue sur l'éprouvette CSH. Le FEM développé a également estimé la limite d'élasticité à la fin de la fatigue, et elle a été mesurée en utilisant la contrainte au bord du CSH. Cette valeur représente près de trois fois la charge appliquée sur l'éprouvette. Cette approximation est une extension de la théorie développée par Inglis en 1913. L'auteur a introduit une technique de calcul des contraintes au plus près du trou. De plus, la courbe contrainte-déformation sous le modèle de visualisation dans les données de sortie sur le terrain pourrait également être utilisée pour estimer la limite d'élasticité. La distribution des déformations à proximité du CSH a été mesurée et comparée aux résultats FEM, comme le montrent les figures 11 et 13. D'après les graphiques, les résultats du modèle et les résultats expérimentaux étaient raisonnables pour la plage sélectionnée du CSH. La variation de déformation dans les résultats des tests CSH renforcés par CFRP concordait bien avec les résultats FEM.

5.2. Étude paramétrique

Un modèle numérique a été utilisé pour étudier les influences paramétriques sur le CSH. Dans cette étude, l'épaisseur des éléments, la longueur des fissures et la distance de décalage ont été sélectionnées comme ayant une influence critique sur les paramètres géométriques dans la plage considérée. Selon le programme expérimental, le diamètre du CSH et la position des effets du CSH ont été étudiés expérimentalement, et les résultats des tests ont confirmé des effets significatifs pour ces paramètres. Les résultats de cette étude pourraient être résumés comme suit : • Cette enquête a rapporté des pertes de résistance qui étaient de l'ordre de 13 % à 25 % par rapport au CSH non conditionné avec un diamètre allant de 4 mm à 25 mm.

- Cette enquête a révélé une amélioration de la résistance à la traction avec le CFRP qui est de l'ordre de 32 % à 45 % par rapport au CSH non renforcé avec un changement de plage de diamètre de 4 mm à 25 mm.
- Cette étude a enregistré une augmentation de la force en ce qui concerne la distance de décalage, qui était de l'ordre de 36 % à 131 % par rapport au CSH au point médian.
- Les CSH renforcés en CFRP ont rapporté un gain de résistance significatif et leur variation a été enregistrée entre 19 % et 42 % en ce qui concerne la distance de décalage.
- Le mode de défaillance a été observé comme un délaminage de la couche de CFRP avec la charge ainsi que la charge de traction.

- Un modèle numérique solide a été développé, basé sur les propriétés des matériaux, capable de simuler le comportement en fatigue du CSH soumis à un chargement de flexion cyclique.
- Lignes directrices de conception pour la technique CSH résumées dans le tableau 3.

Tableau 3. Lignes directrices de conception liées à la fatigue pour le CSH.

Catégorie	Paramètre	Plage de fonctionnement
Géométrie	Rapport diamètre/largeur (d/b)	$d \leq 0,2 b$
	Rapport épaisseur/diamètre (t/b)	$\frac{t}{d} \leq 0,5$
	Rapport diamètre/longueur de fissure (d/L)	$\frac{d}{L} \geq 0,4$
	Rapport diamètre/distance de décalage (d/x)	$\frac{d}{x} \leq 0,2$

6. Implications techniques

Selon les résultats des tests en laboratoire, les résultats FEM ont été utilisés pour mettre en œuvre les directives de conception de la technique CSH. Cette méthode pourrait remplacer les techniques conventionnelles de réparation par fatigue et réinstaller les pertes de résistance des structures vieillissantes. En fin de compte, cela peut contribuer à des retards dans les réparations ou les remplacements ainsi que dans les intervalles d'inspection. De plus, cela pourrait permettre de surmonter les inconvénients liés aux méthodes de réparation conventionnelles. En conséquence, cela contribue à économiser de l'argent avec des demandes de service continues en fonction de la demande actuelle.

7. Conclusions et recommandations

Les simulations expérimentales et numériques détaillées menées sur la nouvelle technique hybride développée pour contrôler les fissures dans les éléments en acier dans les infrastructures de génie civil ont donné les conclusions suivantes : • Introduction

de lignes directrices de conception pour décider de la taille appropriée du CSH pour le contrôle des fissures sur les structures en acier dues à la fatigue. • Le CSH

recupère efficacement les pertes de résistance de l'ordre de 32 % à 45 % avec par rapport à la condition non renforcée.

- La méthode proposée présente une amélioration significative de la capacité de contrôle des fissures, et elle est fortement recommandée pour améliorer la durée de vie des infrastructures en acier sous charge

de fatigue. • Ce modèle numérique développé peut être utilisé efficacement pour estimer les effets de paramètres inconnus du CSH sous une réponse en fatigue.

8. Travaux futurs

La fatigue est régie par la microstructure d'un matériau due à des contraintes externes ou internes. Par conséquent, il devrait y avoir une analyse microscopique concernant la disposition des grains, la dislocation et les informations concernant les atomes manquants du matériau avec des paramètres critiques. Le modèle par éléments finis ne permet pas de modéliser les effets des facteurs environnementaux sur la performance des obligations. Cela pourrait être considéré comme une lacune importante dans les techniques FEM. En outre, l'évaluation des études liées à la performance des liaisons à long terme du système hybride CSH/CFRP afin de confirmer la durabilité de cette technique pourrait également être réalisée à l'avenir.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, SA et JCPG ; méthodologie, SA; logiciels, SA; validation, SA, JCPG et SF ; analyse formelle, SA ; enquête, SA; ressources, JCPG ; conservation de données , SA ; rédaction – préparation du projet original, SA ; rédaction – révision et édition, JCPG ; visualisation, SF; supervision, JCPG; administration du projet, JCPG Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : les données sont contenues dans l'article.

Remerciements : Nous souhaitons également exprimer ma gratitude à tous les membres du personnel académique du Département de génie civil de l'Université de Moratuwa, Sri Lanka, pour leur précieux soutien. DMNL Dissanayaka, responsable technique au Laboratoire d'essais de structures, Yohan responsable technique au Laboratoire de mécanique computationnelle, Charaka Satharasinghe, responsable technique au Laboratoire informatique pour leur précieux soutien apporté tout au long de la période de recherche. De plus, nous tenons à remercier Airow Solution (PVT) Ltd. pour la fourniture de matériel et Randana de Silva, Pramod Karunaratna et Varakini pour leur aimable soutien tout au long de cette période. Enfin, nous souhaitons remercier Thanuja et Sanjalee Abeygunasekara, pour leur amour, leur soutien émotionnel et leurs encouragements. Les auteurs remercient chaleureusement le soutien du personnel du laboratoire d'essais de structures, ainsi que du personnel du laboratoire informatique du Département de génie civil de l'Université de Moratuwa, Sri Lanka, pour leur précieux soutien.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Wijesuriya, HS Prédiction de la propagation des fissures de fatigue de fretting à l'aide de l'analyse par éléments finis. Dans Actes de la Moratuwa Engineering Research Conference 2018 (MERCon), Moratuwa, Sri Lanka, 30 mai-1er juin 2018.
2. Comité sur la fiabilité en matière de fatigue et de rupture du Comité sur la sécurité et la fiabilité des structures de la Division des structures, American Society of Civil Engineers. Fiabilité à la fatigue : Développement de critères de conception. J. Structure. Div. 1982, 108, 71-88.
[Référence croisée]
3. Fisher, JW; Barthélemy, BM ; Mertz, DR ; Edinger, JA Comportement en fatigue des attaches de pont soudées à grande échelle ; Rapport NCHRP 227 ; Conseil de recherche sur les transports, Conseil national de recherches : Washington, DC, États-Unis, 1980.
4. Sveinsdottir, SL Recherche expérimentale sur le renforcement des poutres en béton par l'utilisation d'un adhésif époxy et d'un matériau de liaison à base de ciment. Mémoire de maîtrise, Haskolinn, Reykjavik University Islande, Reykjavik, Islande, 2012.
5. Poisson, P. ; Schröder, C. ; Connor, RJ ; Sauser, P. Bibliothèque de fatigue et de fracture pour l'inspection, l'évaluation et la réparation des ponts en acier pour véhicules ; Université Purdue : West Lafayette, Indiana, États-Unis, 2015.
6. Ishikawa, T. ; Matsumoto, R. ; Hattori, A. ; Kawano, H. ; Yamada, K. Réduction de la concentration des contraintes au bord du trou d'arrêt par surface de fissure de fermeture. J. Soc. Maître. Sci. 2013, 62, 33-38. [Référence croisée]
7. Dexter, RJ ; Ocel, Manuel JM pour la réparation et la modernisation des fissures de fatigue dans les ponts en acier (n° FHWA-IF-13-020) ; Autoroute fédérale Administration : Washington, DC, États-Unis, 2013.
8. Rolfe, ST; Barsom, JM Contrôle des fractures et de la fatigue dans les structures : applications de la mécanique des fractures ; ASTM International : West Conshohocken, PA, États-Unis, 1977.
9. Brown, JD; Lubitz, DJ; Cekov, YC ; Frank, KH ; Keating, PB Évaluation de l'influence de la réalisation de trous sur les performances des plaques d'acier structurelles et des connexions (n° FHWA/TX-07/0-4624-1). 2007. Disponible en ligne : <https://trid.trb.org/view/849447> (consulté le 12 août 2022).
10. Bocciarelli, M. ; Colombie, P. ; Fava, G. ; Poggi, C. Performances en fatigue des éléments en acier de traction renforcés avec des plaques CFRP. Composer. Structure. 2009, 87, 334-343. [Référence croisée]
11. Chandrathilaka, ERK ; Gamage, JCPH; Fawzia, S. Caractérisation mécanique de la liaison CFRP/acier durcie et testée à des températures élevées température. Composer. Structure. 2019, 207, 471-477. [Référence croisée]
12. Yuan, H. ; Teng, JG ; Seracino, R. ; Wu, ZS; Yao, J. Comportement complet des joints collés FRP-béton. Ing. Structure. 2004, 26, 553-565. [Référence croisée]
13. Liu, HB; Zhao, XL ; Al-Mahaidi, R. L'effet de la charge de fatigue sur la force d'adhérence des joints de plaques d'acier liées au CFRP. Dans Actes du Symposium international sur le comportement des obligations des FRP dans les structures, Hong Kong, Chine, 7-9 décembre 2005 ; pp. 459-464.
14. Tang, JH ; Sridhar, moi.; Srikanth, N. Analyse de rupture statique et par fatigue de joints composites épais à recouvrement unique collés de manière adhésive. Composer. Sci. Technologie. 2013, 86, 18-25. [Référence croisée]
15. Kalavagunta, S. ; Naganathan, S. ; Mustapha, KNB Colonnes en acier chargées axialement renforcées avec du CFRP. Jordan J.Civ. Ing. 2014, 8, 58-69. [Référence croisée]
16. Cadei, JC; Stratford, Tennessee ; Duckett, GT ; Hollaway, LC Renforcement des structures métalliques à l'aide de fibres renforcées à liaison externe Polymères ; Ciria : Londres, Royaume-Uni, 2004.
17. Gite, BE; Margaj, MSR; La fibre de carbone comme matériau récent utilisé dans la construction. Portail du génie civil. 2013. Disponible en ligne : <https://www.engineeringcivil.com/carbon-fibre-as-a-recent-material-use-in-construction.html> (consulté le 14 juillet 2022).
18. ASTM D790-17 ; Méthodes d'essai standard pour les propriétés de flexion des plastiques non renforcés et renforcés et des isolants électriques matériaux. Normes ASTM : West Conshohocken, PA, États-Unis, 1997.
19. ASTM D3039/D3039M-08 ; Méthode d'essai standard pour les propriétés de traction des matériaux composites à matrice polymère. Normes ASTM : West Conshohocken, PA, États-Unis, 2014.

20. Silva, MAL; Dedigamuwa, KV ; Gamage, JCPH Performance des connexions dalles plates-colonnes en béton armé gravement endommagées, renforcées avec du polymère renforcé de fibres de carbone. *Compos. Structure*. 2021, 255, 112963. [\[Réf. croisée\]](#)
21. Coffin, LF, Jr. Une étude des effets des contraintes thermiques cycliques sur un métal ductile. *Trans. Suis. Soc. Mécanique. Ing.* 1954, 76, 931-949. [\[Référence croisée\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.