



Article

Structures résilientes et durables grâce au SHM basé sur EMI

Évaluation d'une corde C-FRP innovante

Technique de renforcement

Nikos A. Papadopoulos *, Maria C. Naoum

, George M. Sapidis et Constantin E. Chalioris

Laboratoire de conception en béton armé et sismique des structures, Département de génie civil, École d'ingénierie, Université Démocrite de Thrace, 67100 Xanthi, Grèce ; mnaoum@civil.duth.gr (MCN) ; gsapidis@civil.duth.gr (GMS) ; chaliori@civil.duth.gr (CEC)

* Correspondance : nikpapad@civil.duth.gr

Résumé : Les éléments en béton armé (RC) dans les structures BA existantes sont sensibles au cisaillement critique en raison de leur conception sous-renforcée. Ainsi, la mise en œuvre d'une technique de modernisation est essentielle pour éliminer les pertes qui pourraient survenir lors d'effondrements soudains et catastrophiques dus à la fragilité de ces éléments. Parmi les autres techniques proposées, l'utilisation de cordes en polymères renforcés de fibres de carbone (C-FRP) pour augmenter la résistance au cisaillement des éléments structurels RC s'est avérée être une application de renforcement prometteuse. De plus, une méthode d'impédance électromécanique (basée sur les EMI) utilisant du titanate de zirconate de plomb (compatible PZT) a été utilisée pour évaluer l'efficacité du programme de renforcement. Initialement, la technique proposée a été appliquée à une corde C-FRP soumise à des tests d'arrachement. Ainsi, une corrélation entre la résistance à la traction de la corde et les réponses EMI du patch PZT a été obtenue à l'aide de l'indice métrique Root Mean Square Deviation (RMSD). Par la suite, la méthode a été appliquée aux données acquises expérimentalement sur les câbles C-FRP, utilisés comme renfort de cisaillement dans une poutre profonde rectangulaire. Les câbles ont été installés à l'aide du schéma Embedded Through Section. En outre, une approche pour évaluer la capacité portante résiduelle en cisaillement basée sur les réponses EMI acquises en étant encastrées et liées aux PZT des cordes a été tentée, démontrant des résultats prometteurs et une bonne précision par rapport à la prédiction analytique des cordes C-FRP. contribution à la résistance au cisaillement .



Référence : Papadopoulos, NA ;

Naoum, MC; Sapidis, directeur général ; Chalioris, CE Résilient et

Des structures durables grâce à Évaluation SHM basée sur EMI d'un

Technique innovante de renforcement des cordes C-FRP. Appl. Mécanique. 2024, 5, 405-419. <https://doi.org/10.3390/applmech5030024>

Reçu : 28 avril 2024

Révisé : 30 mai 2024

Accepté : 5 juin 2024

Publié : 21 juin 2024



Copyright : © 2024 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/>).

Mots-clés : surveillance de la santé des structures (SHM) ; impédance électromécanique (EMI) ; transducteur piézoélectrique (PZT) ; Corde C-FRP ; technique de modernisation par cisaillement ; extraire

1. Introduction

Une partie importante des éléments en béton armé (BA) au sein des structures BA existantes souffrent souvent d'un sous-armature contre le cisaillement, principalement en raison de dispositions de conception obsolètes et inadéquates. Ces éléments sont vulnérables aux fissures critiques au cisaillement, posant un risque de rupture fragile en raison de leur capacité de résistance et de leur capacité de déformation insuffisantes [1,2]. En conséquence, la mise en œuvre de techniques de modernisation pour renforcer la capacité portante en cisaillement devient impérative pour atténuer les pertes potentielles résultant d'effondrements soudains et catastrophiques de ces éléments RC fragiles [3,4].

Parmi la gamme de techniques de modernisation disponibles, le revêtement RC est un choix populaire pour remédier aux déficiences des éléments RC au sein des sous-assemblages structurels existants [5,6]. De nombreuses études ont mis en évidence les avantages du revêtement RC conventionnel pour augmenter la capacité portante [7], la rigidité et l'efficacité globale de la réponse structurelle [8,9].

Cependant, malgré son efficacité, le revêtement RC conventionnel présente des limites. Des défis tels que des modifications des caractéristiques dynamiques structurelles résultant d'augmentations significatives de la masse et de la rigidité et de la nature laborieuse du processus ont incité les chercheurs à explorer des techniques alternatives de modernisation utilisant des matériaux alternatifs. Cette dynamique d'innovation vise à pallier les inconvénients liés aux systèmes conventionnels.

Gainage RC tout en améliorant efficacement l'intégrité structurelle et les performances des éléments RC existants [10-12].

Une autre vulnérabilité des structures BA érigées dans le cadre de réglementations obsolètes est leur susceptibilité aux problèmes morphologiques résultant d'un manque de sensibilisation à la conception sismique [13]. La construction d'éléments structurels courts introduit des risques pour la réponse sismique de la structure. Les éléments courts, tels que les poteaux courts et les poutres profondes, sont susceptibles de présenter des modes de rupture fragiles, réduisant ainsi leur contribution à la ductilité globale de la structure [14]. Les poutres-voiles, principalement, sont des éléments structurels critiques dans les structures BA en raison de leur fort comportement en cisaillement [15].

En général, la rupture par cisaillement dans les structures BA peut entraîner des effondrements soudains et inattendus de sections ou même de la structure entière, mettant ainsi en péril l'intégrité et la sécurité des occupants [16]. Ces déficiences structurelles soulignent le besoin urgent de mesures de modernisation et de renforcement pour améliorer la résilience sismique des structures RC existantes et atténuer les risques associés posés par les ruptures induites par le cisaillement.

Une poutre est classée comme profonde ou courte en fonction de son rapport de cisaillement, qui est déterminé à l'aide de l'équation (1). Plus précisément, si le rapport de cisaillement, tel que calculé par l'équation (1), tombe en dessous de 2,5, la poutre est classée comme profonde. Cette classification est cruciale en ingénierie des structures, car elle permet d'identifier les poutres présentant un comportement de cisaillement distinctif, éclairant ainsi les considérations de conception et les stratégies de modernisation pour garantir l'intégrité et la sécurité structurelles.

$$\alpha_s = \frac{\alpha_v}{d} = \frac{M}{Vd} \leq 2,5 \quad (1)$$

où α_v représente la portée de cisaillement de l'élément, d signifie la hauteur statique, et M et V désignent respectivement les amplitudes du moment de flexion et de la force de cisaillement de la section transversale. Selon le principe de Saint-Venant, l'application d'une charge externe induit des zones perturbées au sein des poutres profondes, dans lesquelles les appuis se chevauchent, annulant ainsi les zones où le principe de Bernoulli s'applique à la poutre en flexion. Par conséquent, l'analyse des poutres-voiles nécessite l'adoption de techniques de simulation d'entretoises et d'attaches, dans lesquelles le béton assume la responsabilité du transfert des forces de compression tandis que le renforcement longitudinal gère les forces de traction.

La réponse mécanique des poutres-voiles est étroitement influencée par leurs propriétés géométriques, les conditions de chargement et la présence de renfort transversal. Dans les structures BA, les poutres-voiles posent un besoin pressant d'interventions de renforcement en raison de leur ductilité limitée et de l'insuffisance de renforcement transversal.

L'incapacité de réhabiliter en profondeur les infrastructures et les structures existantes a stimulé le développement de nouvelles méthodologies de suivi et de renforcement. Ces approches innovantes visent à combler les lacunes des structures RC existantes tout en améliorant leur résilience et leur longévité face aux charges dynamiques et aux défis environnementaux.

2. Innovation proposée et objectif de l'étude Au cours des

dernières décennies, les polymères renforcés de fibres (FRP) liés extérieurement avec des résines époxy sont apparus comme des solutions incontournables pour la réhabilitation [17-19], le renforcement, la modernisation et la réparation du béton armé (RC) structures. Ces applications couvrent divers éléments structurels [20], y compris les poutres renforcées par cisaillement [21, 22], les poutres renforcées par torsion [23] et les sous-assemblages poutre-colonne renforcés par cisaillement [24], en raison de leurs innombrables avantages. Ces avantages incluent une résistance élevée à la traction et à la fatigue, des propriétés de légèreté et une résistance exceptionnelle à la corrosion [25,26]. Notamment, les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) se distinguent par leurs performances supérieures dans ces propriétés par rapport aux autres FRP.

De plus, les CFRP présentent une rigidité élevée, leur permettant de répondre aux demandes de renforcement des structures en béton tout en s'adaptant à la déformation des éléments structurels [27]. Cette fonctionnalité améliore leur adéquation aux applications de modernisation où le maintien de l'intégrité structurelle dans diverses conditions de charge est primordial.

Cependant, malgré les nombreux avantages offerts par les matériaux FRP, des préoccupations subsistent quant à leur application dans des contextes structurels réels. Des problèmes tels que le délaminage prématuré

la défaillance et la faible résistance au feu ont été soulevées, ce qui a incité à un examen attentif lors de leur mise en œuvre [28]. La cohésion réduite observée dans la zone interfaciale entre le composite FRP et la surface du béton peut conduire à une réponse en déformation inférieure à celle prévue, diminuant par conséquent l'efficacité de la modernisation des FRP appliqués en raison d'un décollement prématuré [29,30].

Répondre à ces préoccupations et optimiser les performances des matériaux FRP dans les applications structurelles restent des domaines critiques de recherche et de développement. En améliorant la force de liaison interfaciale, en améliorant les propriétés de résistance au feu et en explorant des techniques de modernisation innovantes, il est possible d'exploiter tout le potentiel des PRF pour améliorer la durabilité et la résilience des structures RC.

En outre, des recherches approfondies dans la littérature existante ont systématiquement identifié le mode de défaillance prédominant dans les éléments RC modernisés utilisant des composites FRP à liaison époxy externe comme un décollement ou un délaminage prématuré de la couche FRP du substrat en béton. Ce mode de défaillance est généralement induit par des concentrations de contraintes élevées et est associé à une rupture fragile [31]. Ce phénomène est particulièrement répandu dans les éléments BA en forme de T soumis à des schémas de renforcement en forme de U, où la présence de la dalle restreint l'applicabilité de l'enroulement FRP autour de la section transversale et limite l'accessibilité pour la bonne mise en œuvre de l'ancrage d'extrémité, exacerbant ainsi le problème. risque de rupture prématurée du décollement.

Dans ce contexte, Chalioris et al. ont étudié les avantages potentiels d'une nouvelle technique de renforcement pour améliorer la capacité de cisaillement et la ductilité des poutres profondes RC critiques en cisaillement [27]. L'étude s'est concentrée sur le renforcement transversal utilisant uniquement des câbles C-FRP. Deux configurations différentes ont été explorées pour la mise en œuvre des câbles C-FRP : section traversante intégrée (ETS) pour les poutres à section rectangulaire et montage proche de la surface (NSM) pour les poutres profondes à brides en forme de T. Dans les deux cas, les performances expérimentales de la technique de renforcement par cisaillement appliquée ont donné des résultats prometteurs, car les poutres critiques en cisaillement examinées ont finalement subi une rupture par flexion. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de l'approche de renforcement proposée pour améliorer les performances structurelles des poutres profondes en BA et atténuer le risque de rupture induite par le cisaillement.

Par conséquent, l'utilisation de câbles C-FRP pour renforcer la résistance au cisaillement des éléments structurels RC apparaît comme une technique de renforcement prometteuse. La polyvalence des dispositions d'ancrage de ces câbles permet d'exploiter pleinement leur haute résistance à la traction, offrant ainsi une flexibilité dans les stratégies de conception de modernisation. De plus, les câbles C-FRP peuvent être déployés dans plusieurs configurations, y compris dans des encoches pré-rainurées le long de la hauteur de la poutre (NSM) [32,33] ou intégrés dans l'âme de la poutre (ETS). Cette adaptabilité permet aux ingénieurs d'adapter l'approche de renforcement aux exigences et contraintes spécifiques de chaque élément structurel, maximisant ainsi l'efficacité de l'intervention de renforcement.

Bien que les techniques proposées présentent des avantages potentiels, des inconvénients importants nécessitent une exploration plus approfondie. Les recherches antérieures se sont principalement concentrées sur la détection précoce des dommages dans les renforts FRP à liaison époxy, proposant des méthodologies de tests non destructifs (CND), en particulier pour le renforcement des structures RC avec des matériaux composites FRP. Cependant, bon nombre de ces méthodes s'avèrent peu pratiques pour les structures grandes et complexes, en raison des limitations structurelles et de la nécessité de connaître au préalable l'emplacement des dommages. De plus, la plupart des approches CND se caractérisent par des procédures longues, des coûts élevés, des exigences d'accès sur site et un manque de capacités de surveillance continue en temps réel. Ces limitations soulignent la nécessité de techniques plus robustes et plus polyvalentes pour relever efficacement les défis de surveillance des structures et de détection des dommages [16].

Comme souligné ci-dessus, assurer l'intégration transparente des éléments structurels existants avec des matériaux de renforcement présente un défi à multiples facettes et semé d'incertitudes. Par conséquent, la surveillance de l'intégrité structurelle des éléments structurels modernisés est jugée bénéfique pour prolonger en toute sécurité leur durée de vie. De nombreux chercheurs se sont penchés sur le domaine des techniques de surveillance de l'état des structures (SHM) applicables aux éléments en béton [34-36]. Cependant, des investigations ciblant spécifiquement le SHM des matériaux renforcés de fibres

les bétons incorporant des macrofibres synthétiques dispersées [37,38], les composites FRP [39-41] et les études axées sur les éléments structuraux renforcés par C-FRP sont relativement rares dans la littérature [42-45].

Bien que l'importance du SHM dans l'amélioration de la durabilité et de la sécurité des structures en béton soit largement reconnue, il reste une lacune notable dans la recherche concernant l'application de ces techniques au béton fibré et aux éléments renforcés de FRP.

Comblant cette lacune grâce à des recherches approfondies sur les méthodologies SHM adaptées à ces matériaux présente un grand potentiel pour faire progresser le domaine de la surveillance des structures et garantir la performance à long terme des structures rénovées.

La phase expérimentale de cette étude impliquait la mise en œuvre d'un nouveau système de surveillance sur une poutre renforcée en cisaillement soumise à une charge de flexion en quatre points, visant à évaluer l'efficacité de la technique de renforcement des câbles C-FRP. La méthode SHM proposée utilisait un système basé sur l'impédance électromécanique (EMI) activé par des capteurs piézoélectriques en zirconate-titanate de plomb (PZT) pour la surveillance de l'impédance sans fil (WiAMS) [46].

Dans cette configuration expérimentale, les réponses tension-fréquence des patchs PZT positionnés le long du périmètre de la corde C-FRP ont été enregistrées sous différents niveaux de charge appliquée. Ces conditions de chargement correspondaient à différents états de santé ou conditions d'endommagement des structures. De plus, des efforts ont été déployés pour évaluer quantitativement la contribution des câbles C-FRP à la résistance au cisaillement de la poutre RC. Cette évaluation a été facilitée par l'analyse des valeurs statistiques de l'indice de dommage dérivées des données de surveillance. En corrélant la réponse du système de surveillance avec la charge appliquée et les conditions de santé structurelle, des informations précieuses sur les performances et l'efficacité de la technique de renforcement des cordes C-FRP ont été glanées.

Dans le cadre de cette étude expérimentale, l'objectif principal était d'évaluer la faisabilité de l'EMI en tant que méthode SHM appliquée pour surveiller l'intégrité structurelle, l'efficacité et les performances des câbles C-FRP utilisés comme technique de modernisation dans une poutre rectangulaire profonde. Des capteurs piézoélectriques ont été intégrés aux côtés des cordes lors de l'installation pour atteindre cet objectif. Les réponses en tension de ces PZT dans le domaine fréquentiel ont ensuite été capturées à différents états de charge appliquée et dans les conditions de santé structurelle correspondantes (niveaux de charge).

De plus, une évaluation des performances de la technique de modernisation a été réalisée aux niveaux de charge examinés. Cette évaluation a été réalisée à l'aide de valeurs dérivées de l'écart quadratique moyen (RMSD), un indice statistique de dommage couramment utilisé. Un aspect unique de cette étude implique la mise en place d'une méthodologie combinée, qui intègre les réponses des patchs PZT intégrés dans les cordes C-FRP lors des tests d'arrachement comme données d'homogénéisation de base. En intégrant les données de la configuration expérimentale et des tests d'arrachement, une évaluation complète des performances de la corde C-FRP dans diverses conditions de charge a été réalisée.

3. Programme expérimental

3.1. Caractéristiques de la poutre

profonde La poutre profonde R possédait une section transversale rectangulaire sur toute sa longueur, mesurant $L = 1,6$ m, avec une largeur de $b = 150$ mm et une hauteur de $h = 300$ mm. Le renfort longitudinal de la poutre R-Deep Beam a été disposé symétriquement, comprenant des barres 2Ø14 placées à la fois dans les zones de compression et de tension. De plus, des étriers de Ø8/50 ont été positionnés uniquement aux extrémités de la poutre-profonde R, à proximité des supports, pour sécuriser le renfort longitudinal et empêcher l'effritement du béton.

La portée de cisaillement de la poutre était de $\alpha = 400$ mm et l'enrobage total en béton était de 35 mm, ce qui correspondait à une profondeur effective de 265 mm. Par conséquent, le rapport de cisaillement α/d a été calculé à 1,51. Un câble C-FRP à maillon unique a été installé verticalement sur la travée de cisaillement droite, tandis que sur la travée de cisaillement gauche, le câble a été inséré dans un trou foré à une inclinaison d'environ 52° . Les deux câbles ont été installés comme renfort ETS. Tous les détails de la poutre sont illustrés sur la figure 1.

Remplissage des trous avec de la résine époxy pour éliminer les vides et améliorer la cohérence entre les matériaux encastrés.

- Application d'une légère tension à l'extrémité des cordes pour réaliser l'ancrage final formation.
- Ajout de plus de résine époxy à la surface des poutres pour obtenir une finition plus lisse. rainures.

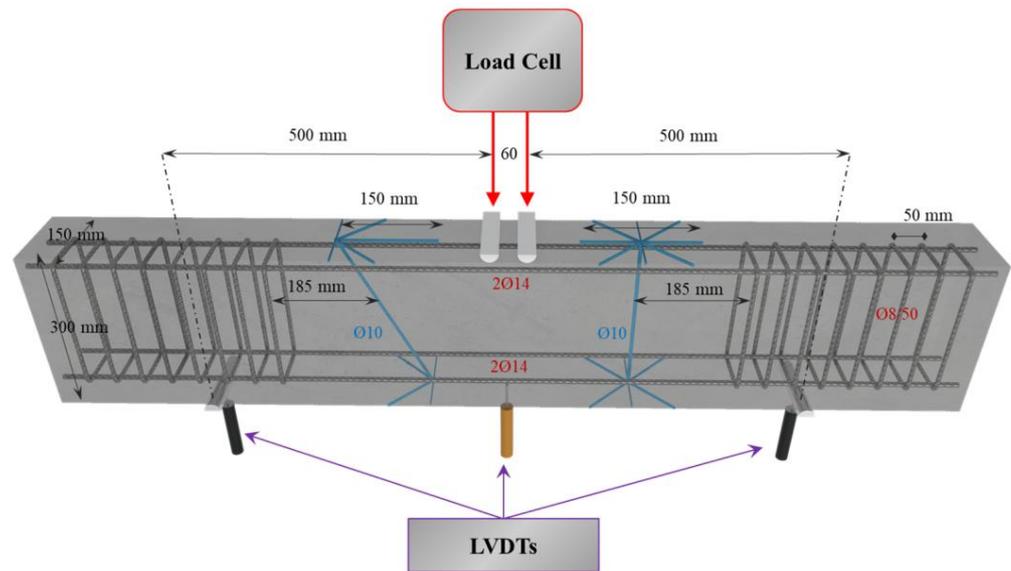


Figure 1. Détails de géométrie et de renforcement de la poutre R-Deep Beam.

L'installation du processus ETS pour les cordes C-FRP en « R-FRP » s'est déroulée comme suit :

3.2. Matériaux

- Formation des pompons d'ancrage et perçage des trous dans l'âme de la poutre.
- Utilisation d'air comprimé et d'une brosse à outils particulière pour éliminer la poussière emprisonnée à l'intérieur.
- Les spécifications fournies par le fabricant comprenaient une section transversale des trous percés d'environ 28 mm², un allongement minimum avant rupture de 1,6%, et une rigidité (module d'élasticité) de 240 GPa pour les fibres non imprégnées.
- Par la suite, la corde a subi une saturation avec de la résine époxy (Sikadur-52, SIKA Hellas Kryoneri, Grèce), avec les propriétés décrites dans le tableau 1. Ce processus visait à améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité de la corde C-FRP. De plus, la pâte époxy (Sikadur-330, SIKA Hellas, Kryoneri, Grèce) a été utilisée pour remplir et sceller les rainures percées pour la configuration expérimentale, garantissant une bonne adhérence et une intégrité structurelle.
- Ajout de plus de résine époxy à la surface des poutres pour obtenir des rainures plus lisses.

3.2. Matériaux

L'étude a utilisé une corde C-FRP fabriquée à partir de fibres de carbone flexibles unidirectionnelles. Les spécifications fournies par le fabricant incluaient une section transversale d'environ 28 mm², un allongement minimum avant rupture de 1,6%, et une rigidité (module d'élasticité) de 240 GPa pour les fibres non imprégnées.

Par la suite, la corde a subi une saturation avec de la résine époxy (Sikadur-52, SIKA Hellas Kryoneri, Grèce), avec les propriétés décrites dans le tableau 1. Ce processus visait à améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité de la corde C-FRP. De plus, la pâte époxy (Sikadur-330, SIKA Hellas, Kryoneri, Grèce) a été utilisée pour remplir et sceller les rainures percées pour la configuration expérimentale, garantissant une bonne adhérence et une intégrité structurelle.

Pour évaluer les propriétés mécaniques du béton, des cylindres de béton standards mesurant 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur ont été soumis à des tests de compression et de résistance à la fissuration. Le jour des essais, la moyenne des poutres en béton les résistances à la compression et à la traction ont été mesurées à 28,0 MPa et 2,70 MPa, respectivement. Le mélange de béton utilisé dans les expériences contenait un maximum de particules d'agrégat avec un diamètre de 16 mm.

Les barres d'armature en acier déformées (14 mm) avaient une limite d'élasticité de 580 MPa, tandis que les barres d'armature en acier doux les étriers en acier (8 mm) avaient une limite d'élasticité de 310 MPa.

Les barres d'armature en acier déformées (14 mm) avaient une limite d'élasticité de 580 MPa, tandis que les barres d'armature en acier doux les étriers en acier (8 mm) avaient une limite d'élasticité de 310 MPa.

Tableau 1. Propriétés mécaniques des cordes C-FRP.

Matériel	Propriétés mécaniques des cordes C-FRP			
Corde C-FRP SikaWrap FX-50C (Stratifié)	SikaWrap FX-50C (Stratifié)	Résistance à la traction (TS)	2100 GPa	2100 GPa
		Module élastique en traction	230 GPa	230 GPa
Sikadur 300	Sikadur 300	Allongement à la rupture en traction	0,87%	0,87%
		Module élastique en traction	3,5 GPa	3,5 GPa
Sikadur 330	Sikadur 330	TS	45 MPa	45 MPa
		Module élastique en traction	3,5 GPa	3,5 GPa
Sika Anchorfix 3+	Sika Anchorfix 3+	TS	30 MPa	30 MPa
		Module élastique en traction	4,5 GPa	4,5 GPa
Sika Anchorfix 3+		Résistance à la compression	114 MPa	114 MPa

3.3. Configuration des tests

La poutre a été testée en utilisant une configuration de flexion en quatre points, comme illustré en 3.3. Configuration des tests. Un actionneur hydraulique, contrôlé par une machine servocommandée, a appliqué une charge (force appliquée) sur la surface supérieure des flexions à travers deux points sur un vérin hydraulique, comme illustré dans la Figure 2. Les tests ont été effectués sur des poutres en acier et en béton de 60 mm. La poutre était soutenue sur ses bords, augmentant la charge (force appliquée) sur la surface supérieure des poutres à travers deux éléments uniformément espacés de 60 mm. La poutre était soutenue sur ses bords par deux supports à rouleaux en acier espacés de 60 mm. Une cellule de pesée, offrant une haute précision avec une précision de 0,05 kN, a mesuré la force appliquée avec la plus grande précision. En plus de la mesure de la charge, trois capteurs, spécifiquement linéaires, à différence variable de 0,05 kN, ont mesuré la force appliquée avec la plus grande précision.

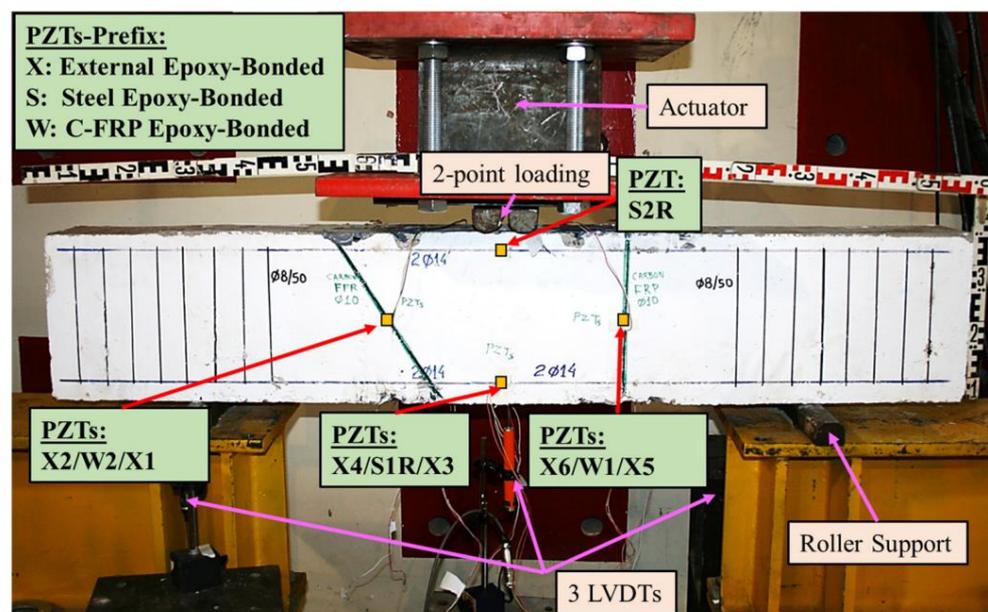


Figure 2. Configuration de test, instrumentation et configuration des PZT.

En plus de la mesure de la charge, trois capteurs, spécifiquement linéaires, à différence variable de 0,05 kN, ont mesuré la force appliquée avec la plus grande précision. Des transducteurs (EMI) ont été utilisés pour mesurer les déflexions des faisceaux.

3.4. Technique d'impédance électromécanique (EMI)

La technique EMI utilise des transducteurs PZT, tirant parti des propriétés avantageuses du phénomène piézoélectrique. Lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques, les transducteurs PZT génèrent une charge électrique superficielle, et inversement, l'application d'un champ électrique induit des vibrations mécaniques. Ainsi, en exploitant ce phénomène, l'EMI active et induit des vibrations dans des transducteurs PZT liés ou intégrés au sein d'une structure hôte. N'importe lequel des changements dans l'impédance mécanique (ou l'admittance inverse) de la structure se reflète dans des modifications du signal électrique extrait du PZT (soit en tension, soit en fréquence de réponse). L'interaction entre le PZT et la structure d'accueil est représentée comme une signature d'admission comprenant une partie réelle (conductance) et une partie imaginaire (suspension).

vibrations mécaniques. Ainsi, en exploitant ce phénomène, l'EMI active et induit des vibrations dans des transducteurs PZT liés ou intégrés au sein d'une structure hôte. Tout changement dans l'impédance mécanique (ou l'admittance inverse) de la structure se reflète dans les modifications du signal électrique extrait du PZT (soit en tension, soit en réponse en fréquence). L'interaction entre le PZT et la structure hôte est représentée comme une signature d'admission comprenant une partie⁴¹¹ réelle (conductance) et une partie imaginaire (susceptance). Ces interactions manifestent des caractéristiques structurelles au sein de la signature, comme décrit par l'équation (2) pour l'admittance complexe du patch PZT apposé, ce terme). Ces interactions manifestent des caractéristiques

$$Y = G + Bj = 4\omega j \frac{2}{h} \frac{1}{\epsilon_{33}} - \frac{2j}{h} \frac{2}{\epsilon_{33}} \frac{310U}{(1-\nu)} + \frac{2j}{h} \frac{2}{\epsilon_{33}} \frac{310U}{(1-\nu)} \frac{Z_{s,eff}}{Z_{s,eff} + Z_{a,eff}} \frac{\text{réservoirL}}{kL} \quad (2)$$

où : tension alternative harmonique fournie au circuit, : courant traversant le PZT, G : conductance (la partie réelle de l'admittance), B : susceptance (la partie imaginaire de où V : tension alternative harmonique fournie au circuit, I : courant passant à travers l'admission), j : unité imaginaire, ω : fréquence angulaire, L : demi-longueur du patch, h : PZT épais, G : conductance (la partie réelle de l'admittance), B : susceptance (la partie imaginaire de l'admission), j : unité imaginaire, ν : pulsation, L : demi-longueur du patch, h : épaisseur du patch, d_{31} : coefficient de déformation piézoélectrique du PZT, $Z_{s,eff}$: impédance mécanique effective, $Z_{a,eff}$: impédance structurelle effective, n : coefficient de Poisson, k : nombre lié à la fréquence angulaire, ϵ_{33} : module d'élasticité complexe du patch PZT le long du : module d'élasticité de Young complexe sous

champ électrique constant, et ϵ_{33} : permittivité électrique complexe du patch PZT le long de l'axe à toute modification de la poutre BA, telle que des modifications de ses propriétés de masse et de rigidité, entraînera inévitablement des modifications des paramètres structurels, affectant par conséquent toute modification de la poutre BA, telle que des modifications de ses propriétés de masse et de rigidité, l'impédance structurelle effective. Ces altérations entraîneront également des modifications des paramètres structurels, affectant par conséquent l'admission telle que définie par l'équation (2), indiquant ainsi l'état de santé de l'élé- l'impédance structurelle effective. Ces modifications entraîneront également des modifications dans le ment. l'admission Y, telle que définie par l'équation (2), indiquant ainsi l'état de santé de l'élément.

Dans cette étude expérimentale, l'approche sélectionnée pour détecter les changements dans l'installation. Dans cette étude expérimentale, l'approche sélectionnée pour détecter les changements dans l'installation des cordes C-FRP bloquées impliquaient l'utilisation de transducteurs PZT excités par une harmonique sinusoïdale de 2,5 V dans une plage de fréquence spécifique allant de 10 à 250 kHz, avec des incréments de 1 kHz par pas. Servant à la fois d'actionneurs et de capteurs, le PZT transmet le signal et capture les signatures EMI, qui ont ensuite été traitées par un appareil sans fil conçu sur mesure connu sous le nom de WiAMS [40,46]. Cet appareil est l'étape est équipé d'une puissance de traitement élevée, permettant des calculs rapides et approfondis, et

et peut être utilisé à distance, comme illustré à la figure 3. peut être utilisé à

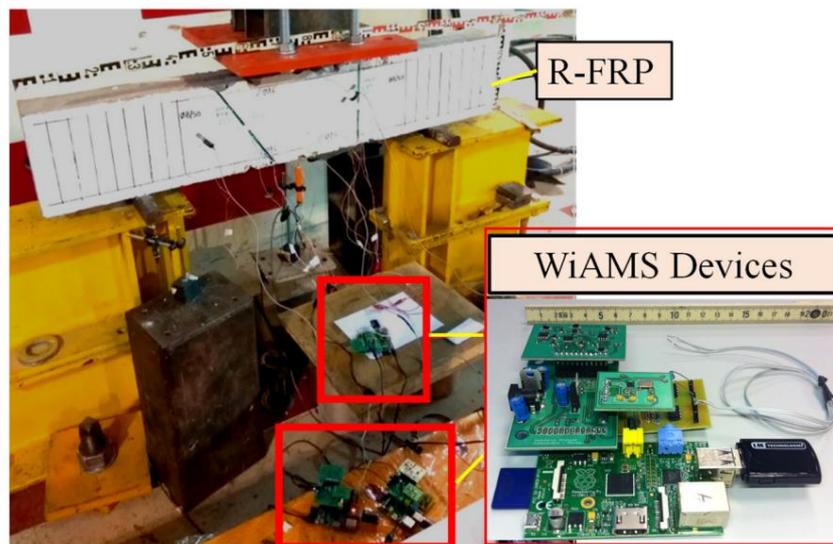


Figure 3. Figure 3. Apparatus for WiAMS devices using the SHM proposed.

Au départ, les mesures EMI ont été effectuées sur le faisceau dans son état d'origine. état, établissant une base de référence pour son état de santé déclaré. Par la suite, ces mesures ont été répétées dans divers scénarios de dommages potentiels, simulant les conditions cela pourrait compromettre l'intégrité structurelle. Les résultats obtenus ont ensuite été minutieusement par rapport pour évaluer les écarts à l'aide de mesures statistiques, en particulier la moyenne racine Écart carré (RMSD). Cette analyse comparative a permis de détecter et d'évaluer les changements structurels, fournissant ainsi des informations précieuses sur l'état de santé de la poutre et intégrité dans différentes conditions de chargement. À ce stade, il convient de mentionner que

ont été analysés et évalués dans ce contexte à l'aide de l'indice statistique RMSD. L' expression de l'indice est fournie ci-dessous dans l'équation (3).

$$RMSD = \frac{\sum_{r=1}^M Vp(fr) \sum D - Vp(fr) \sum 0}{\sum_{r=1}^M Vp(fr) \sum 0} \quad (3)$$

où $Vp(fr)$ fait référence à la réponse en tension à l'état initial initial, tandis que $Vp(fr)$ fait référence aux réponses en tension dans tout état ultérieur.

4.4. Évaluation de l'efficacité de la technique de

modernisation Sur la base des résultats obtenus à partir du test d'arrachement et des valeurs de l'indice RMSD extraites à des niveaux de charge spécifiques jusqu'à la rupture finale du câble C-FRP (comme le montre la figure 9), l'évaluation du cisaillement résiduel la capacité portante de résistance a été tentée. Cette évaluation a été réalisée selon une approche d'homogénéisation, qui impliquait de corrélérer les valeurs RMSD de l'essai d'arrachement avec celles acquises à partir de la poutre profonde.

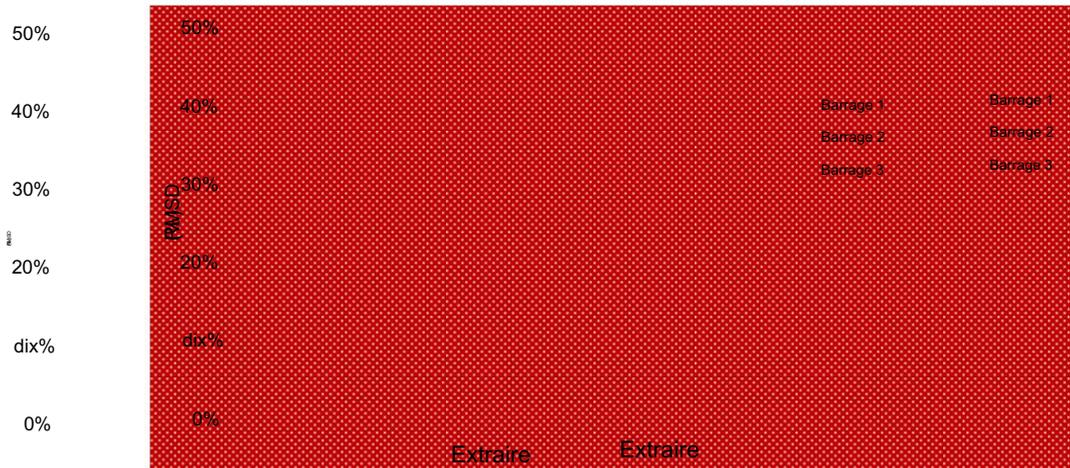


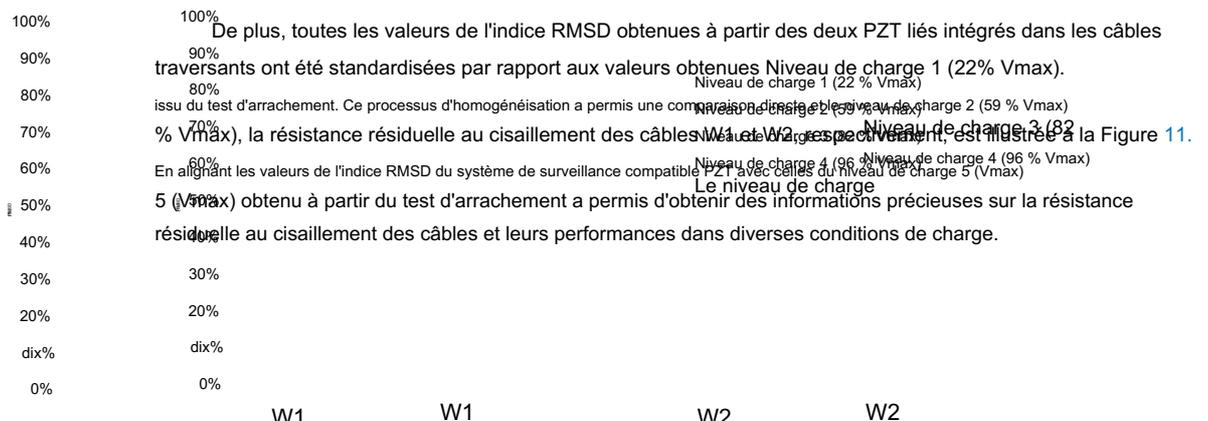
Figure 9. Valeurs RMSD du PZT lors d'un test d'arrachement de la corde C-FRP.

La charge d'arrachement ultime enregistrée était d'environ 27 kN, correspondant à un déplacement de section traversante de 45 mm. Les valeurs obtenues dans les câbles ont été standardisées par rapport aux valeurs obtenues. La valeur de l'indice à l'état de rupture de l'essai d'arrachement a été standardisée à un rapport de 100% à partir du test d'arrachement. Ce processus d'homogénéisation a permis une comparaison directe et représente un échec total. À l'inverse, les valeurs 100% - RMSD au point de perte de la résistance résiduelle au cisaillement des câbles W1 et W2, respectivement, sont de 0% en tant que rupture finale et en alignant les valeurs de l'indice RMSD du système de surveillance compatible PZT avec celui obtenu lors de l'essai d'arrachement a permis d'obtenir des informations précieuses sur le cisaillement résiduel des câbles obtenus lors de l'essai d'arrachement, des informations précieuses ont été obtenues sur les câbles coupés en deux morceaux en cas de rupture, comme le montrent leur résistance et leurs performances dans diverses conditions de charge. leur résistance et leurs performances dans diverses conditions de charge.

La figure 10 valide davantage cette approche.



Figure 10. Mode de rupture finale de la corde C-FRP.



De plus, toutes les valeurs de l'indice RMSD obtenues à partir des deux PZT liés intégrés dans les câbles traversants ont été standardisées par rapport aux valeurs obtenues Niveau de charge 1 (22% Vmax). issu du test d'arrachement. Ce processus d'homogénéisation a permis une comparaison directe et représente un échec total. À l'inverse, les valeurs 100% - RMSD au point de perte de la résistance résiduelle au cisaillement des câbles W1 et W2, respectivement, sont de 0% en tant que rupture finale et en alignant les valeurs de l'indice RMSD du système de surveillance compatible PZT avec celles du niveau de charge 5 (Vmax) obtenu à partir du test d'arrachement a permis d'obtenir des informations précieuses sur la résistance résiduelle au cisaillement des câbles et leurs performances dans diverses conditions de charge.

Figure 10. Mode de rupture finale de la corde C-FRP.

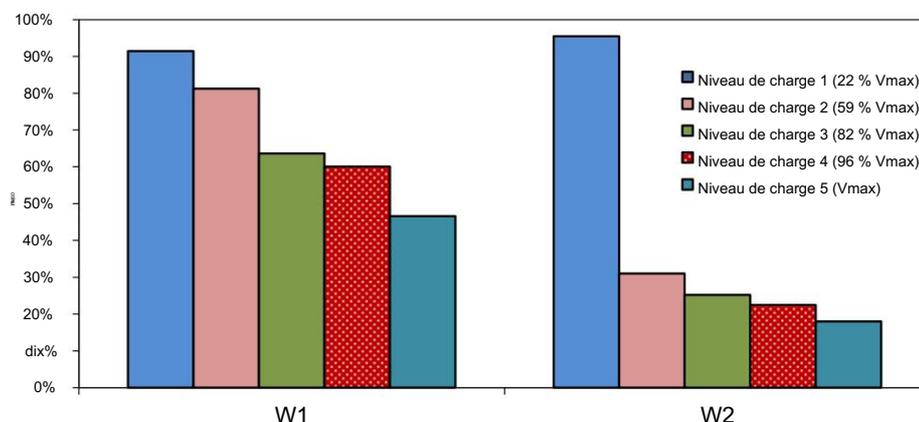


Figure 11. Capacité résiduelle de résistance au cisaillement des câbles C-FRP intégrés.

Sur la figure 11, la réduction progressive de la capacité de résistance au cisaillement du câble W1 peut être observée, attribuée principalement à la formation de la première fissure de cisaillement dans la travée droite. À mesure que la charge augmente, cette fissure continue à s'allonger, ce qui entraîne la absorption du béton. À un stade important des restrictions de cisaillement des poutres. Raconséquent, la contribution d'une corde de droite diminue progressivement. À l'inverse, la positionnement de la corde de gauche par rapport à la W2 se avantagé au point de vue de la résistance au cisaillement. Cette observation est corroborée par les résultats de la figure 10. Il est évident que les premières fissures de cisaillement se produisent dans la travée de gauche au chargement 4.

De plus, cela se reflète dans les valeurs du compteur de fissures à gauche, où l'ouverture de fissure était notablement réduite par rapport à celle de la travée droite. Ainsi, jusqu'à ce niveau de chargement, le câble a perdu environ 78 % de sa résistance totale estimée au cisaillement. Ces idées jettent lumière sur l'interaction dynamique entre les éléments de renforcement et la structure comportement, soulignant l'importance d'un positionnement réfléchi et de considérations de conception dans l'optimisation des performances et de la résilience contre les mécanismes de rupture induits par le cisaillement.

Pour évaluer davantage l'efficacité de la technique de renforcement innovante, le modèle analytique proposé par Mofidi et al. [47] a été appliqué pour calculer la contribution des cordes à la résistance totale au cisaillement de la poutre à l'état de rupture. De plus, il est crucial de veiller à ce que la contrainte effective des cordes C-FRP ne dépasse pas 0,4 % pour obtenir un verrouillage suffisant des granulats du béton et intercepter l'ouverture des fissures, comme recommandé par ACI 440.2R-08 [48].

En mettant en œuvre tous les calculs proposés décrits dans les travaux pertinents de Chalioris et coll. [27], les valeurs suivantes ont été dérivées :

$$V_{f,ETS}, R_{corde} = 39,6 \text{ kN}$$

$$V_{f,ETS}, L_{corde} = 53,3 \text{ kN}$$

De plus, sur la base de l'hypothèse selon laquelle la résistance moyenne à la traction du stratifié de la corde était d'environ 2000 N/mm², la résistance résiduelle totale au cisaillement du câble W1 était calculé comme $V_{f,ETS}, Rope = 31,8 \text{ kN}$. De même, pour le câble W2, la résistance résiduelle au cisaillement était calculé comme $V_{f,ETS}, Rope = 49,2 \text{ kN}$, démontrant une proximité remarquable de 92,3 % avec le résultats analytiques calculés. Ces résultats soulignent l'efficacité du projet proposé technique de renforcement et mettre en évidence son potentiel pour estimer avec précision le résiduel résistance au cisaillement dans des applications à échelle réelle.

5. Conclusions

Dans ce projet expérimental, une enquête sur l'efficacité d'un système innovant technique de renforcement impliquant l'utilisation de câbles C-FRP comme renfort transversal de cisaillement a été réalisée. Cette évaluation a été réalisée en mettant en œuvre une méthode basée sur l'EMI activé par les capteurs PZT. De plus, une application modifiée de la métrique de l'indice statistique Le RMSD a été utilisé pour évaluer l'efficacité de la technique de renforcement.

Contrairement à l'utilisation conventionnelle de l'indice RMSD pour exprimer les niveaux de dommages ou les impacts de chargement, cette étude a utilisé les valeurs de l'indice RMSD à 100 % pour décrire le cisaillement résiduel.

capacité de force. Cette nouvelle approche a évalué les performances de la technique de renforcement, démontrant une convergence et une précision prometteuses avec les prédictions analytiques. Cette analyse comparative améliore la compréhension de l'efficacité de la technique de renforcement et fournit des données précieuses pour une optimisation et un raffinement ultérieurs des stratégies de renforcement structurel.

De plus, les résultats obtenus grâce à la méthode appliquée basée sur l'EMI présentent une opportunité significative de servir d'outil supplémentaire fiable pour diagnostiquer les défauts de dommages et évaluer l'efficacité des matériaux à base de fibres dans des scénarios en temps réel.

Il convient de noter que la présence de résine époxy dans les trous forés peut avoir un léger impact sur la précision des résultats expérimentaux obtenus grâce à l'approche PZT basée sur l'EMI.

De plus, bien que cette étude montre un alignement prometteur avec les prédictions analytiques concernant la contribution de la corde à la résistance au cisaillement, des travaux expérimentaux supplémentaires sont justifiés pour évaluer davantage et améliorer la fidélité de la méthodologie d'évaluation proposée. En entreprenant des expérimentations plus poussées, l'objectif est de garantir la robustesse et la fiabilité de cette nouvelle approche pour des applications à l'échelle réelle, faisant ainsi progresser le domaine des techniques de renforcement structurel.

Contributions des auteurs : conceptualisation, NAP, MCN et GMS ; méthodologie, NAP et MCN ; analyse formelle, NAP et GMS ; enquête, CEC, NAP et GMS ; conservation des données, NAP et MCN ; rédaction : préparation de l'ébauche originale, NAP et MCN ; rédaction – révision et édition, NAP et CEC ; visualisation, MCN ; supervision, CEC 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 contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article, des demandes complémentaires peuvent être adressées aux auteurs correspondants.

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

Les références

- Zhang, T. ; Visintin, P. ; Oehlers, DJ Résistance au cisaillement des poutres RC avec étriers en acier. *J. Structure. Ing.* 2016, 142, 04015135. [\[Réf. croisée\]](#)
- Zararis, PD Rupture de compression par cisaillement dans les poutres profondes en béton armé. *J. Structure. Ing.* 2003, 129, 544-553. [\[Référence croisée\]](#)
- Godat, A. ; L'Hady, A. ; Chaallal, O. ; Neale, KW Comportement des liaisons de la méthode de renforcement au cisaillement des barres ETS FRP. *J. Compos. Constr.* 2012, 16, 529-539. [\[Référence croisée\]](#)
- Azam, R. ; Soudki, K. ; Ouest, JS ; Noël, M. Comportement des poutres RC critiques en cisaillement renforcées avec CFRCM. *J. Compos. Constr.* 2018, 22, 04017046. [\[Réf. croisée\]](#)
- Karayannis, CG ; Sirkelis, GM Renforcement et réhabilitation des joints poutres-colonnes RC à l'aide d'un revêtement en carbone-PRF et Injection de résine époxy. *Terreq. Structure de génie. Dynam.* 2008, 37, 769-790. [\[Référence croisée\]](#)
- Karayannis, CG ; Naoum, MC Comportement en torsion des structures à ossature RC à plusieurs étages en raison de l'interaction sismique asymétrique. *Ing. Structure.* 2018, 163, 93-111. [\[Référence croisée\]](#)
- Tsonos, AG Efficacité des gaines CFRP dans la modernisation post-séisme et pré-séisme des sous-assemblages poutre-colonne. *Structure. Ing. Mécanique.* 2007, 27, 393-408. [\[Référence croisée\]](#)
- Lampropoulos, AP ; Dritsos, SE Modélisation de colonnes RC renforcées avec des vestes RC. *Earthq Engng Struct Dyn* 2011, 40, 1689-1705. [\[Référence croisée\]](#)
- Ma, C.-K. ; Apandi, Nouveau-Mexique ; Sofrie, CSY ; Ng, JH ; Voilà, WH ; Awang, Arizona ; Omar, W. Réparation et réhabilitation de structures en béton par confinement : une revue. *Constr. Construire. Maître.* 2017, 133, 502-515. [\[Référence croisée\]](#)
- Azam, R. ; Soudki, K. ; Ouest, JS ; Noël, M. Renforcement des poutres RC critiques en cisaillement : alternatives aux feuilles CFRP liées extérieurement. *Constr. Construire. Maître.* 2017, 151, 494-503. [\[Référence croisée\]](#)
- Ferreira, D. ; Oller, E. ; Mari, A. ; Bairán, J. Analyse numérique des poutres RC critiques en cisaillement renforcées en cisaillement avec des feuilles de FRP. *J. Compos. Constr.* 2013, 17, 04013016. [\[Réf. croisée\]](#)
- Baggio, D. ; Soudki, K. ; Noël, M. Renforcement des poutres RC critiques en cisaillement avec divers systèmes FRP. *Constr. Construire. Maître.* 2014, 66, 634-644. [\[Référence croisée\]](#)
- Aguilar, V. Résistance au cisaillement des éléments en béton : défis, développements récents et possibilités. *Av. Civ. Ing. Technologie.* 2020, 4, 1-2. [\[Référence croisée\]](#)
- Işık, E. ; Uluta, S. H. ; Harirchian, E. ; Avci, F. ; Aksoylu, C. ; Arslan, MH Évaluation basée sur les performances du bâtiment RC avec des colonnes courtes en raison des différents principes de conception. *Bâtiments* 2023, 13, 750. [\[CrossRef\]](#)

15. Poêle, Z. ; Li, B. Évaluation des méthodologies de conception de résistance au cisaillement pour les poutres RC minces critiques au cisaillement. *J. Structure. Ing.* 2013, 139, 619-622. [\[Référence croisée\]](#)
16. Papadopoulos, NA ; Naoum, MC; Sapidis, directeur général ; Chalioris, CE Identification des fissures et du décollement des fibres de poutres profondes en béton renforcées avec des cordes C-FRP contre le cisaillement à l'aide d'un système de surveillance en temps réel. *Polymères* 2023, 15, 473. [\[CrossRef\]](#)
17. Bilotta, A. ; Ceroni, F. ; Di Ludovico, M. ; Nigro, E. ; Pecce, M. ; Manfredi, G. Efficacité des liaisons des systèmes FRP EBR et NSM pour le renforcement des éléments en béton. *J. Compos. Constr.* 2011, 15, 757-772. [\[Référence croisée\]](#)
18. Seo, S.-Y. ; Féo, L. ; Hui, D. Force de liaison de la plaque FRP montée près de la surface pour la rénovation des structures en béton. *Composer. Structure.* 2013, 95, 719-727. [\[Référence croisée\]](#)
19. Breveglieri, M. ; Avril, A. ; Barros, JAO Technique de renforcement au cisaillement intégré à section traversante à l'aide de barres en acier et en CFRP dans les poutres RC de différents pourcentages d'étriers existants. *Composer. Structure.* 2015, 126, 101-113. [\[Référence croisée\]](#)
20. Li, P. ; Wang, H. ; Nie, D. ; Wang, D. ; Wang, C. Une méthode pour analyser les performances de durabilité à long terme des structures souterraines de ponceaux en béton armé sous des charges mécaniques et environnementales couplées. *J. Intell. Constr.* 2023, 1, 9180011. [\[Référence croisée\]](#)
21. Dit, M. ; Adam, MA ; Mahmoud, AA; Shanour, AS Évaluation expérimentale et analytique du cisaillement de poutres en béton renforcées avec des barres de polymères renforcés de fibres de verre. *Constr. Construire. Maître.* 2016, 102, 574-591. [\[Référence croisée\]](#)
22. Naoum, M. ; Sapidis, G. ; Papadopoulos, N. ; Golias, E. ; Chalioris, C. Surveillance de l'état structurel des joints poutre-colonne en béton armé à l'aide de transducteurs piézoélectriques. Dans les actes de la conférence internationale RILEM sur la synergie des expertises en faveur de la durabilité et de la robustesse des matériaux à base de ciment et des structures en béton, Milos, Grèce, 14-16 juin 2023 ; J. edrzejewska, A., Kanavaris, F., Azenha, M., Benboudjema, F., Schlicke, D., Eds.; Bibliothèque RILEM. Springer Nature : Cham, Suisse, 2023 ; Volume 43, pages 945 à 956. [\[Référence croisée\]](#)
23. Turner, L. ; Davies, VC Béton brut et armé en torsion, avec une référence particulière aux poutres en béton armé. *Sel. Ing. Bouillie.* 1934, 1, 165. [\[Réf. croisée\]](#)
24. Chalioris, CE; Papadopoulos, NA; Sapidis, G. ; Naoum, MC; Golias, E. Méthode de surveillance basée sur l'EMA des joints poutre-colonne renforcés. Dans Actes de la conférence internationale ISCRAM, Omaha, NE, États-Unis, 28-31 mai 2023 ; pp. 853-873. [\[Référence croisée\]](#)
25. Alam, P. ; Mamalis, D. ; Robert, C. ; Floreani, C. ; Bradaigh, CMÓ. La fatigue des plastiques renforcés de fibres de carbone : une revue. *Composer. Partie B Ing.* 2019, 166, 555-579. [\[Référence croisée\]](#)
26. Zhu, X. ; Abe, H. ; Hayashi, D. ; Tanaka, H. Caractéristiques comportementales des poutres RC avec corrosion non uniforme le long du renforcement. *J. Intell. Constr.* 2023, 1, 9180019. [\[Réf. croisée\]](#)
27. Chalioris, C. ; Kosmidou, P.-M. ; Papadopoulos, N. Enquête sur une nouvelle technique de renforcement des poutres profondes RC utilisant Cordes en carbone FRP comme renforts transversaux. *Fibres* 2018, 6, 52. [\[CrossRef\]](#)
28. Bazli, M. ; Abolfazli, M. Propriétés mécaniques des polymères renforcés de fibres à des températures élevées : un aperçu. *Polymères* 2020, 12, 2600. [\[Réf. croisée\]](#)
29. Kytinou, VK; Gribniak, V. ; Zapris, AG; Chalioris, CE Une approche innovante de surveillance de la santé pour le diagnostic de décollement de polymères renforcés de fibres grâce à des tests d'arrachement et de cisaillement. En Méthodes analytiques et expérimentales en génie mécanique et civil ; Springer : Cham, Suisse, 2024 ; Volume 28, p. 228-239. [\[Référence croisée\]](#)
30. Ju, S. ; Couvercle.; Jia, J. Enquête expérimentale et évaluation des dommages d'un nouveau type d'ancrage de liaison pour la fibre de carbone Tendons en polymère renforcé. *J.Civ. Structure. Surveillance de la santé.* 2023, 13, 117-132. [\[Référence croisée\]](#)
31. El-Sissi, AA ; El-Emam, HM; El-Kholy, AE-MI ; Ahmad, SS ; Sallam, SM ; Salim, HA Comportement structurel des poutres RC contenant des ouvertures percées non renforcées avec et sans renforcement CFRP. *Polymères* 2022, 14, 2034. [\[CrossRef\]](#)
32. Baena, M. ; Jahani, Y. ; Torres, L. ; Barris, C. ; Perera, R. Performances de flexion et prévision du décollement final des poutres en béton armé renforcé de PRF de carbone NSM sous différentes températures de service. *Polymères* 2023, 15, 851. [\[CrossRef\]](#)
33. Perera, R. ; Gil, A. ; Torres, L. ; Barris, C. Diagnostic du renforcement NSM FRP dans le béton à l'aide de modèles à effets mixtes et Approches EMI. *Composer. Structure.* 2021, 273, 114322. [\[Réf. croisée\]](#)
34. Pellone, L. ; Ciminello, M. ; Mercurio, U. ; Apuléo, G. ; Concilio, A. Un système de surveillance de l'état structurel pour la détection des défauts de ligne de liaison sur un démonstrateur de section de caisson d'aile à grande échelle. *Appl. Mécanique.* 2024, 5, 36-57. [\[Référence croisée\]](#)
35. Ai, D. ; Mo, F. ; Yang, F. ; Zhu, H. Détection des dommages structurels en béton basée sur l'impédance électromécanique à l'aide de l'analyse en composantes principales intégrée au réseau neuronal. *J. Intell. Maître. Système. Structure.* 2022, 33, 2241-2256. [\[Référence croisée\]](#)
36. Ai, D. ; Zhang, D. ; Zhu, H. Localisation des dommages sur une structure de dalle en béton armé à l'aide d'une technique d'impédance électromécanique et d'un algorithme d'imagerie pondéré en probabilité. *Constr. Construire. Maître.* 2024, 424, 135824. [\[Référence croisée\]](#)
37. Sapidis, directeur général ; Kansizoglou, I. ; Naoum, MC; Papadopoulos, NA; Chalioris, CE Une approche d'apprentissage en profondeur pour l'identification autonome des dommages de compression dans le béton renforcé de fibres à l'aide de transducteurs piézoélectriques en titane et zirconate de plomb. *Capteurs* 2024, 24, 386. [\[CrossRef\]](#)
38. Wang, Z. ; Chen, D. ; Zheng, L. ; Huo, L. ; Song, G. Influence de la charge axiale sur l'impédance électromécanique (EMI) des systèmes embarqués Transducteurs piézocéramiques dans le béton à fibres d'acier. *Capteurs* 2018, 18, 1782. [\[CrossRef\]](#)
39. Naoum, MC; Papadopoulos, NA; Voutetaki, MOI ; Chalioris, CE Surveillance de l'état structurel de prismes en béton renforcé de fibres avec des macrofibres de polyoléfine à l'aide d'un réseau de matériaux piézoélectriques sous diverses contraintes induites par des charges. *Bâtiments* 2023, 13, 2465. [\[CrossRef\]](#)

40. Naoum, MC; Sapidis, directeur général ; Papadopoulos, NA; Voutetaki, ME Une application basée sur l'impédance électromécanique pour la surveillance en temps réel des contraintes de flexion et des dommages induits par la charge dans le béton renforcé de fibres. *Fibres* 2023, 11, 34. [\[Référence croisée\]](#)
41. Khatir, A. ; Capozucca, R. ; Kathir, S. ; Magagnini, E. ; Benaïssa, B. ; Cuong-Le, T. Une amélioration efficace du gradient pour la déformation prédiction dans le faisceau RC renforcé NSM FRP. *Devant. Structure. Civ. Ing.* 2024, sous presse.
42. Reddy, Pennsylvanie ; Kavyateja, BV ; Jindal, BB Méthodes de surveillance de la santé structurelle, dispersion des fibres, propriétés micro et macro structurelles , détection et propriétés mécaniques du béton à détection automatique — Une revue. *Structure. Concr.* 2021, 22, 793-805. [\[Référence croisée\]](#)
43. Perera, R. ; Huerta, MC; Baena, M. ; Barris, C. Analyse des poutres en béton armé renforcé de FRP à l'aide d' une technique d'impédance électromécanique et d'un système de corrélation d'images numériques. *Capteurs* 2023, 23, 8933. [\[CrossRef\]](#)
44. Li, D. ; Zhou, J. ; Ou, J. Damage, évaluation non destructive et réhabilitation de la structure composite-RC FRP : un examen. *Constr. Construire. Maître.* 2021, 271, 121551. [\[Réf. croisée\]](#)
45. Khatir, A. ; Capozucca, R. ; Khatir, S. ; Magagnini, E. ; Benaïssa, B. ; Le Thanh, C. ; Wahab, MA Un nouvel hybride PSO-YUKI pour le double identification de fissures dans une poutre en porte-à-faux en CFRP. *Composer. Structure.* 2023, 311, 116803. [\[Référence croisée\]](#)
46. Providakis, C. ; Tsistrakis, S. ; Voutetaki, M. ; Tsompanakis, J. ; Stavroulaki, M. ; Agadakos, J. ; Kampianakis, E. ; Pentis, G. ; Liarakos, E. Une plate-forme de détection active innovante pour la surveillance sans fil des dommages aux structures en béton. *Curr. Mère intelligente.* 2016, 1, 49-62. [\[Référence croisée\]](#)
47. Mofidi, A. ; Chaallal, O. ; Benmokrane, B. ; Neale, K. Tests expérimentaux et modèle de conception pour les poutres RC renforcées en cisaillement Utilisation de la méthode FRP intégrée à travers la section. *J. Compos. Constr.* 2012, 16, 540-550. [\[Référence croisée\]](#)
48. ACI (Institut américain du béton). Guide pour la conception et la construction de systèmes FRP à liaison externe pour le renforcement du béton Structures ; ACI-440.2R-08 ; American Concrete Institute (ACI) : Farmington Hills, MI, États-Unis, 2008 ; p. 76.

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.