

OFFRE DE THESE

Sujet : Evaluation des performances mécaniques et de la durabilité d'armatures composites à matrice thermoplastique recyclée destinées au renforcement interne de structures en béton

Société NANOVIÀ, en partenariat avec l'Université Gustave Eiffel et Nantes Université (GeM)

Contexte et enjeux

Les armatures en polymères renforcés de fibres (PRF) font l'objet d'une utilisation croissante pour le renforcement interne de structures en béton armé (BA), du fait de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur résistance à la corrosion. En substitution des armatures classiques en acier, elles permettent en effet de réduire fortement la maintenance et le coût d'exploitation global des ouvrages en BA, voire d'allonger la durée de vie de ces infrastructures [1]. L'AFGC (Association Française de Génie Civil) vient par ailleurs de publier un guide de recommandations technique sur l'utilisation des armatures PRF [2] ; ce référentiel était très attendu par les maîtres d'ouvrages et devrait permettre d'accélérer encore davantage le développement de cette solution constructive en France dans les prochaines années.

Pour l'heure, la grande majorité des armatures composites utilisées en construction sont des barres PRF renforcées de fibres de verre (PRFV), fabriquées par procédé de pultrusion à partir d'une matrice polymère thermodurcissable de type vinylester. Ces armatures offrent un très bon rapport performances mécaniques/coût mais présentent néanmoins plusieurs inconvénients : elles ne peuvent pas être façonnées à chaud sur chantier pour former des barres courbes, ne sont pas recyclables en fin de vie, et présentent un bilan environnemental défavorable comparé à celui des acier classiques (lié surtout à l'impact de la matrice polymère pétro-sourcée). Depuis peu, des barres PRF à matrices thermoplastiques (TP) commencent à apparaître sur le marché, offrant de nouvelles perspectives en termes d'aptitude au façonnage à chaud et de recyclabilité. On notera en particulier le développement de barres à base de résine TP Elium® produite par la société Arkema [3]. Cependant, l'impact environnemental de ces armatures reste élevé car la matrice est toujours issue de la filière pétrochimique.

Dans ce contexte, la société NANOVIÀ cherche à développer et à produire de nouvelles barres PRF à matrice thermoplastique destinées au secteur de la construction et présentant un bilan carbone plus favorable. Ce développement s'appuie sur l'utilisation de matrices TP 100% recyclées (et éventuellement d'origine bio-sourcées), apportant ainsi une réponse à la problématique d'augmentation des déchets plastiques et à l'entrée en vigueur de nouvelles dispositions législatives (directive SUP et loi AGEC) [4, 5] visant à promouvoir le recyclage des déchets et leur réincorporation dans de nouveaux matériaux. Le renfort privilégié est la fibre de verre, mais l'utilisation de fibres recyclées ou d'origine végétale pourra aussi être explorée afin de minimiser l'empreinte carbone de l'armature. En outre, la possibilité d'intégrer une fibre optique au sein de la barre PRF est également une perspective intéressante pour des applications en monitoring de structures (mesures distribuées le long de la barre pour le suivi des profils de déformation ou de température dans des structures en BA par exemple).

Ce travail de thèse visera donc à accompagner NANOVIÀ dans le développement et l'évaluation de ces barres PRF à matrice TP recyclée. Les principaux objectifs de l'étude seront les suivants :

- Dans une phase préalable, il s'agira notamment d'identifier des couples matrice TP recyclée / fibre de renfort susceptibles d'être employés pour la réalisation des barres, en vérifiant leur compatibilité et en tenant compte des contraintes techniques liées au processus de fabrication. Le traitement de surface des barres devra également faire l'objet d'une attention particulière car il s'agit d'un paramètre clé affectant l'adhérence ultérieure entre le PRF et le béton.
- On évaluera ensuite les propriétés physiques et le comportement mécanique (à l'échelle du matériau et de l'armature) des produits candidats qui seront mis en œuvre par NANOVIÀ, en vérifiant que les caractéristiques obtenues sont conformes aux spécifications minimales requises pour une application de renforcement interne du béton (cf. guide AFGC [2]). Le niveau d'adhérence PRF/béton sera également évalué par des tests spécifiques.
- L'aptitude au façonnage à chaud des barres PRF candidates sera aussi abordée. Les caractéristiques mécaniques des armatures coudées seront évaluées.

- Il s'agira également d'évaluer la durabilité des barres candidates dans leur environnement de service. En effet, dans les infrastructures en BA, les barres PRF sont exposées à l'environnement alcalin du béton qui peut induire des dégradations physico-chimiques sur le long terme (attaque alcaline des fibres de verre dans le cas des PRFV, voire altération chimique de la matrice pour certains types de polymères [6-7]). Une campagne de durabilité sera donc mise en œuvre pour suivre sur plusieurs mois les évolutions de propriétés mécaniques et les évolutions microstructurales des barres PRF exposées en milieu alcalin. Des prédictions à plus long terme pourront être réalisées au moyen d'une approche de type Arrhenius si les conditions le permettent.
- Enfin, l'objectif principal étant de minimiser l'impact carbone des barres PRF, une analyse du cycle vie (ACV) sera réalisée pour la solution PRF retenue.

Travaux antérieurs / compétences des partenaires du projet

La société NANOVIÀ développe et distribue dans le monde entier une gamme premium de filaments thermoplastiques, composites, métalliques et céramiques pour la fabrication additive et l'injection dédiées aux applications industrielles. NANOVIÀ possède les équipements de production par extrusion de thermoplastiques. Le procédé de fabrication des barres PRF à matrice TP a déjà été mis au point dans le cadre d'un projet spécifique (projet Rodfib toujours en cours) et comporte 2 étapes successives :

1 – Production d'un film TP renforcé avec 70% v/v de fibres continues au moyen d'un dispositif d'imprégnation des fibres (filière d'enduction). A ce stade, ce dispositif est validé avec des fibres de verre ou de carbone.

2- Re-conformation par pultrusion/extrusion du film pour former la barre de renfort (10 à 30 mm de diamètre – Longueur 6 à 12 mètres).

Par ailleurs, le travail de thèse sera réalisé en partenariat étroit avec l'Université Gustave Eiffel, qui a participé à l'établissement du guide de recommandation de l'AFGC dédié à l'utilisation des armatures composites pour le renforcement des structures en BA [2] et qui s'est dotée d'un ensemble complet de moyens de caractérisation mécanique et physicochimique des barres d'armatures PRF et de l'interface PRF/béton [6, 7].

Le Laboratoire GeM de Nantes Université, qui dispose de compétences reconnues dans le domaine de la durabilité des composites industriels et d'une plateforme étendue d'essais mécaniques et physicochimiques de ces matériaux, sera également impliqué dans cette étude doctorale.

Approche envisagée

- La partie préliminaire de la thèse qui doit permettre de sélectionner des couples matrice TP/ fibres s'appuiera sur une étude bibliographique, sur des tests d'imprégnation et sur des caractérisations mécaniques et physicochimiques à l'échelle du film composite (essais de traction, DMA, DSC). Les solutions retenues feront ensuite l'objet d'une mise en œuvre complète par NANOVIÀ, incluant l'étape de re-conformation par extrusion des barres PRF.
- Les armatures ainsi produites seront alors caractérisées par différents tests mécaniques (essais de traction, short-beam test) et l'adhérence PRF/Béton sera évaluée par essais d'arrachement. Des analyses physico chimiques et microstructurales (DMA, DSC, MEB, évaluation du taux de porosité et de la cinétique de sorption) seront également réalisées sur les PRF.
- Une procédure de cintrage à chaud des barres PRF sera mise au point, et des caractérisations mécaniques, microstructurales et physicochimiques seront menées sur les barres coudées.
- La campagne de durabilité consistera à immerger des barres PRF et des éprouvettes spécifiques destinées aux tests d'adhérence PRF/béton dans des solutions alcalines à différentes températures. Des caractérisations mécaniques seront réalisées à échéances régulières sur les éprouvettes vieillies afin de suivre l'évolution des propriétés mécaniques résiduelles. Les données obtenues aux différentes températures permettront d'extrapoler des évolutions à long terme par la méthode d'Arrhenius. Des analyses complémentaires (observations MEB, IRTF) permettront d'appréhender les mécanismes d'endommagement des PRF.

- L'analyse ACV des solutions PRF pourra s'appuyer sur les données relatives aux impacts environnementaux associées aux matériaux constitutifs et aux phases de fabrication des PRF telles que disponibles dans les bases internationales (Ecoinvent ou Granta Edupack, par exemple)

L'étendue du travail scientifique à conduire est vaste et les champs disciplinaires concernés touchent à la fois à la mécanique et à la physico-chimie des matériaux. Le candidat devra présenter une solide formation dans ces domaines, et des connaissances spécifiques sur les matériaux polymères.

Références

[1] Cadenazzi, T et al., Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge, *Structure and Infrastructure Engineering* 2020, 16:4, 787-802

[2] Guide AFGC, *Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé*, 2021. <https://www.afgc.asso.fr/publication/utilisation-darmatures-composites-a-fibres-longues-et-a-matrice-organique-pour-le-beton-arme/>

[3] Benmokrane, B et al., Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures, *Construction and Building Materials* 2021, Vol. 276, 122200

[4] Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, 2020. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/>

[5] Directive (UE) 2019/904 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement, 2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX:32019L0904>

[6] Rolland, A.; Benzarti, K.; Quiertant, M.; Chataigner, S. Accelerated Aging Behavior in Alkaline Environments of GFRP Reinforcing Bars and Their Bond with Concrete. *Materials* 2021, 14, 5700. <https://doi.org/10.3390/ma14195700>

[7] Rolland, A. Comportement Mécanique et Durabilité de Structures en béton Renforcées Par des Armatures Composites Internes. Ph.D. Thesis, Université Paris-Est, Ifsttar, France, 2015. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01223307>

Lieux de réalisation du travail de thèse

Les travaux de recherche du doctorant seront principalement réalisés dans les laboratoires de l'Université Gustave Eiffel (UGE site de Nantes) et au GeM de Nantes Université. Des séjours au sein de l'entreprise NANOVIÀ (Louargat, Côtes d'Armor) seront également organisés ponctuellement, de manière à ce que le doctorant acquiert une bonne connaissance de l'ensemble du processus de fabrication des barres composites et puisse contribuer activement aux développements industriels en cours.

Durée

3 ans en contrat CIFRE (Convention industrielle de formation par la recherche). Démarrage au 1^{er} octobre 2022.

Statut du doctorant

Le doctorant sera salarié par la société NANOVIÀ pendant la durée du contrat (salaire brut annuel : 25 keuros).

Contacts

Directeur de thèse :	Sylvain Chataigner (UGE)	Email : sylvain.chataigner@univ-eiffel.fr
Co-directeur :	Karim Benzarti (UGE)	Email : karim.benzarti@univ-eiffel.fr
Conseillers d'étude :	Marion Girard (GeM)	Email : marion.girard@univ-nantes.fr
	Erwan Leneveu (NANOVIÀ)	Email : contact@nanovia.tech

Etablissement d'inscription : Nantes Université, Ecole doctorale SPI (Sciences pour l'Ingénieur)

Modalités de candidature (au plus tard le 30 avril) :

Envoyer CV + notes de Master + lettre de motivation aux contacts ci-dessus