

## **Etude expérimentale concernant l'adhérence entre armatures en PRFV à matrice thermoplastique et béton**

### ***Experimental study on the bond behaviour between thermoplastic GFRP rebars and concrete***

**Maha Fodda<sup>1</sup>, Sylvain Chataigner<sup>2</sup>, Ludwig Battais<sup>2</sup>, Xavier Chapeleau<sup>3</sup>, Marc Quiertant<sup>4</sup>, Arnaud Rolland<sup>5</sup> et Karim Benzarti<sup>1</sup>**

1 : Laboratoire Navier, Université Gustave Eiffel,  
6-8 Av Blaise Pascal, 77 420 Champs sur Marne  
e-mail : [maha.fodda2@univ-eiffel.fr](mailto:maha.fodda2@univ-eiffel.fr) et [karim.benzarti@univ-eiffel.fr](mailto:karim.benzarti@univ-eiffel.fr)

2 : MAST-SMC, Université Gustave Eiffel  
Allée des Ponts et Chaussées, 44 344 Bouguenais  
e-mail : [sylvain.chataigner@univ-eiffel.fr](mailto:sylvain.chataigner@univ-eiffel.fr) et [ludwig.battais@univ-eiffel.fr](mailto:ludwig.battais@univ-eiffel.fr)

3 : COSYS/SII-I4S (Inria), Université Gustave Eiffel  
Allée des Ponts et Chaussées, 44 344 Bouguenais  
e-mail : [xavier.chapeleau@univ-eiffel.fr](mailto:xavier.chapeleau@univ-eiffel.fr)

4 : Institut de recherche, ESTP  
28 Av. Président Wilson, 94 230 Cachan  
e-mail : [mquiertant@estp.fr](mailto:mquiertant@estp.fr)

5 : DTer Ouest, Cerema,  
9 Rue R. Viviani, 44 200 Nantes  
e-mail : [arnaud.rolland@cerema.fr](mailto:arnaud.rolland@cerema.fr)

### **Résumé**

Les armatures en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) à matrice thermoplastique sont actuellement en cours de développement. Celles-ci présentent d'excellentes propriétés mécaniques et ne sont pas sujettes à la corrosion, tout comme les armatures PRF à matrice thermodurcissables. Elles présentent l'avantage de pouvoir être courbées sur site à chaud. Cependant, plusieurs de leurs caractéristiques restent encore en cours d'investigation, notamment leur adhérence avec le béton et leur durabilité en conditions de service. Dans cette étude, un programme expérimental est mené pour évaluer le comportement de l'interface entre les armatures PRF à fibre de verre et matrice thermoplastique (PRFV-TP) et le béton. Une série d'essais d'arrachement ou pull-out a été réalisée sur des corps d'épreuve en béton renforcés par des armatures PRFV à matrice TP Elium<sup>®</sup> (résine développée par Arkema). L'influence de plusieurs paramètres sur les la relation force-déplacement et sur la résistance moyenne à l'arrachement a été étudiée, notamment le rôle du diamètre et de la géométrie de surface des armatures. Ces résultats ont été comparés à des investigations similaires réalisées sur des corps d'épreuve armés par des PRFV à matrice thermodurcissable (PRFV-TD) et par des aciers conventionnels. Certaines éprouvettes ont été équipées de câbles à fibre optique permettant de mesurer en temps réel les profils de déformation le long de l'interface pendant les essais d'arrachement.

### **Abstract**

Thermoplastic fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcing bars (rebars) are currently under development. These rebars exhibit excellent mechanical properties and corrosion resistance, similar to their thermosetting counterparts. Additionally, they offer the unique advantage of being bendable onsite at elevated temperatures. However, several aspects of these new materials are still under investigation, including their bond behavior with concrete and their durability under service conditions. In the present study, an experimental program was conducted to investigate the interfacial behavior between thermoplastic Glass FRPs (TP-GFRPs) and concrete. Pull-out tests were performed on concrete specimens reinforced with TP-GFRP rebars made from Elium<sup>®</sup> TP resin (Arkema). The influence of various parameters, such as rebar diameter and surface finish, on the load-displacement curves and average shear strength was examined. The results were also compared to those obtained with regular thermosetting GFRPs and conventional steel rebars. Additionally, the pull-out specimens were equipped with distributed fiber optic instrumentation, allowing for the assessment of strain profiles along the interface at any stage of the pull-out tests.

**Mots Clés :** Armatures PRFV à matrice thermoplastique, Béton, Essais d'arrachement, Instrumentation par fibre optique.

**Keywords:** Thermoplastic GFRPs, Concrete, Bond, Pull-out tests, Fiber Optic sensors.

## 1. Introduction

Une des principales pathologies rencontrées sur les structures en béton armé est la corrosion des armatures métalliques. Une des solutions envisageables pour répondre à cette problématique est d'utiliser des armatures en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) [1]. Ces armatures sont le plus souvent réalisées par procédé de pultrusion, à partir de fibres longues (le plus souvent des fibres de verre, mais potentiellement aussi des fibres de carbone, d'aramide ou de basalte) et d'une matrice organique. Les matrices actuellement utilisées dans les armatures commerciales sont des résines thermodurcissables (époxy et vinylester) qui permettent d'atteindre d'excellentes performances en termes de durabilité, en adéquation avec les durées de vie requises pour les structures de génie civil. Ce type de barre ne peut en revanche pas être façonné sur site pour réaliser des coudes ou des angles, et présente également un impact environnemental relativement important. Plusieurs producteurs d'armatures développent donc actuellement des solutions d'armatures en PRF à fibre de verre avec des matrices thermoplastiques, qui offriraient l'avantage d'être cintrables à chaud sur chantier, et qui pourraient également faciliter le recyclage en fin de vie et donc réduire l'impact environnemental.

Le travail présenté porte sur l'évaluation des propriétés d'armatures composites récemment développées à partir de la résine thermoplastique Elium<sup>®</sup> (Arkema), et plus précisément sur l'évaluation expérimentale de l'adhérence entre ces armatures et le béton. La première partie détaillera les matériaux étudiés, les paramètres analysés, ainsi le protocole utilisé pour la caractérisation mécanique de l'interface armature/béton. La seconde partie s'attachera à décrire les résultats obtenus en termes de mode de rupture, de résistance d'interface moyenne et de courbe force-déplacement. Afin de pouvoir apprécier les performances obtenues avec ces nouvelles armatures, une comparaison est également réalisée avec des corps d'épreuve en béton renforcé par des armatures à matrice thermodurcissable et des armatures métalliques HA couramment utilisées sur chantier.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1 Matériaux et corps d'épreuve







Deux fabricants d'armatures composites ont fourni des échantillons pour notre programme expérimental. Pour des raisons de confidentialité, ils sont anonymisés par les sigles M1, et M2. Toutes les armatures composites mises à disposition sont constituées de fibres de verre de type ECR (résistantes à la corrosion). Deux types d'armatures PRFV à matrice thermoplastique TP (résine Elium<sup>®</sup> C599 E produite par Arkema) ont été livrées, l'une par le fournisseur M1 et l'autre par M2, avec des géométries de surface différentes (verrous ou tissu d'arrachage texturé, respectivement). Le fabricant M1 a également fourni des armatures PRFV à matrice thermodurcissable (TD) vinylester, de manière à disposer d'un produit de référence déjà commercialisé. Enfin, des aciers HA traditionnels ont également été utilisés à titre de comparaison.

Pour toutes les armatures, les diamètres effectifs ont été mesurés selon la norme ISO 10406-1 [2]. Les caractéristiques et la géométrie de surface des barres sont décrites dans le Tableau 1.

Des corps d'épreuve spécifiques en béton renforcé par les différents types d'armature ont également été fabriqués en vue de la réalisation des essais d'arrachement. Ces éprouvettes ont été fabriquées à partir d'un béton C25/30 de classe XC1, avec un diamètre maximal des granulats de 14 mm. Le coulage du béton a été effectué manuellement avec une vibration par aiguille vibrante. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après coulage, et la cure a ensuite consisté en une période d'immersion dans l'eau à 20°C de 1 mois, suivie d'un séchage à l'air pendant deux mois. Les caractérisations à 28 jours du béton ont fourni une résistance moyenne en compression de 37.5 MPa et un module d'Young de 37 GPa.

On précise également que pour chaque type d'armature PRF, 5 éprouvettes d'arrachement ont été réalisées, dont 2 ont été équipées d'une instrumentation par fibre optique (FO) au niveau de l'interface béton/PRF. Dans le cas des armatures acier HA, seules 3 éprouvettes de pull-out sans instrumentation FO ont été fabriquées. La nomenclature de ces différentes séries d'éprouvettes est mentionnée dans le Tableau 1.

Tab. 1. Caractéristiques des différentes armatures utilisées et détail des corps d'éprouvette de pull-out réalisés

| Caractéristiques des armatures |             |                 |          |                 | Détails des éprouvettes de pull-out  |                        |                         |
|--------------------------------|-------------|-----------------|----------|-----------------|--|------------------------|-------------------------|
| Type de matrice                | Fournisseur | Diamètre d (mm) |          | Etat de surface | Photo des armatures  | Nombre d'éprouvettes   | Nomenclature            |
|                                |             | Nominal         | Effectif |                 |  |                        |                         |
| TD                             | M1          | 12              | 12,37    | Sablage         |  | 3 sans FO<br>2 avec FO | TD-M1-12<br>TD-M1-12-FO |
| TP                             | M1          | 12              | 11,92    | Verrous         |  | 3 sans FO<br>2 avec FO | TP-M1-12<br>TP-M1-12-FO |
|                                |             | 16              | 16,17    | Verrous         |  | 3 sans FO<br>2 avec FO | TP-M1-16<br>TP-M1-16-FO |
|                                | M2          | 12              | 11,13    | Tissu texturé   |  | 3 sans FO<br>2 avec FO | TP-M2-12<br>TP-M2-12-FO |
|                                |             | 16              | 15,56    | Tissu texturé   |  | 3 sans FO<br>2 avec FO | TP-M2-16<br>TP-M2-16-FO |
| Armature métallique (réf.)     |             | 12              | 11,75    | Verrous         |  | 3 sans FO              | Acier-12                |

## 2.2 Protocole expérimental pour les essais d'arrachement

Pour évaluer l'adhérence entre les armatures PRF et le béton, nous avons retenu le protocole expérimental proposé par plusieurs auteurs [3-7]. La géométrie des éprouvettes d'arrachement est décrite sur la Figure 1. Les cylindres de béton de diamètre 16 cm et de hauteur 20 cm sont renforcés par une armature de longueur 1,2m. Avant coulage du béton, des tubes en PVC ont été insérés dans les moules en carton afin de délimiter une longueur adhérente PRF/Béton égale à 5 fois le diamètre de l'armature, comme recommandé dans [1,2]. En ce qui concerne les éprouvettes instrumentées par fibre optique, la FO est scellée en amont dans une engravure réalisée à la surface des armatures (largeur et profondeur de 2mm, sur une longueur de 30 cm), au moyen d'un adhésif époxy DP490 (3M), conformément à la méthode décrite dans les références [5, 8]. Cette instrumentation par FO répartie permet de mesurer en temps réel les profils de déformation locaux à l'interface PRF/béton pendant les essais d'arrachement.

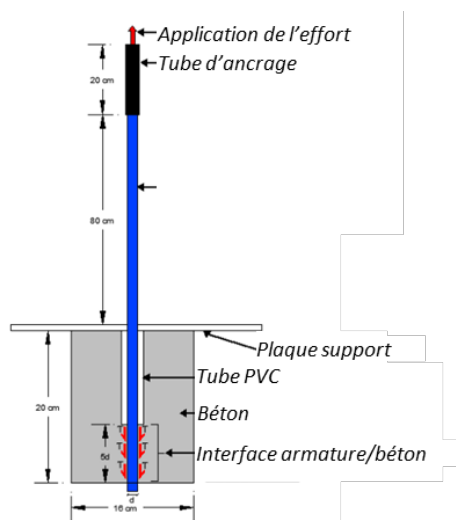


Fig. 1. Schéma de l'essai d'arrachement

Les essais d'arrachement ont été réalisés conformément à la norme ISO 10406-1 [2] et au guide AFGC [1]. Dans le cas des armatures de diamètre 12 mm, l'effort de traction est appliqué à l'aide d'un dispositif pot/clavette. Dans le cas des armatures de diamètre 16 mm, des ancrages spécifiques via un tube métallique et du ciment expansif ont été utilisés. Dans les deux cas, un bâti spécifique a été utilisé. Un capteur de

déplacement laser permet de mesurer le déplacement de l'armature au niveau de l'extrémité non chargée. L'essai est réalisé à une vitesse de déplacement constante de 1mm/min jusqu'à l'effort maximal (chute de l'effort). La fin de l'essai est réalisée à une vitesse de 5 mm/min jusqu'à extraction de la barre.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1 Modes de rupture

Les modes de rupture obtenus lors des essais d'arrachement sont représentés sur la Figure 2. Aucune rupture en traction des armatures n'a été relevée. Les armatures à matrice thermodurcissable ont rompu à l'interface sablage/PRF, en accord avec les observations d'autres auteurs [4-7]. Dans le cas des armatures à verrous, des morceaux de béton sont présents entre les verrous pour les armatures de diamètre 12 mm. Dans le cas des armatures TP-M1-16, aucune trace de béton n'est cependant relevée entre les verrous après rupture. Pour les armatures dont la surface comporte un tissu d'arrachage, la rupture a lieu à l'interface entre ce tissu et le béton.

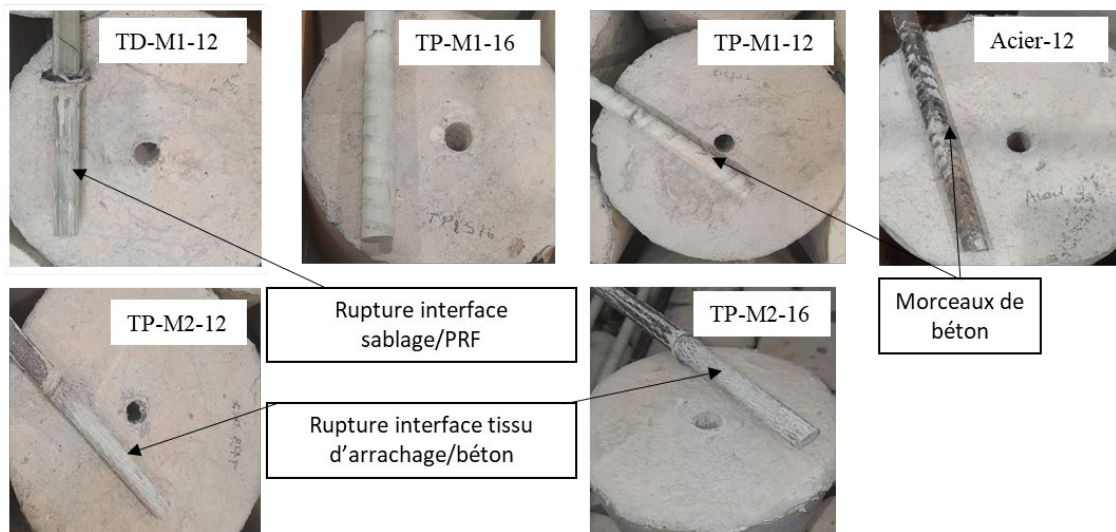


Fig. 2. Images montrant les modes de rupture obtenus lors des essais d'arrachement, en fonction des types d'armatures.

#### 3.2 Résistance d'interface moyenne

Les résistances d'interface moyennes calculées selon l'Equation 1 sont représentées sur le diagramme de la Figure 3. Ces valeurs correspondent à la moyenne obtenue pour chaque série d'essais d'arrachement. Les barres d'erreur (correspondant aux écart types) permettent de visualiser la dispersion sur les 5 essais réalisés.

$$\tau_{moy} = \frac{F}{\pi dL} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec  $F$  l'effort maximal appliqué,  $d$  le diamètre nominal de l'armature et  $L$  la longueur adhérente (5d).

On constate que l'ensemble des résistances d'interface moyennes est supérieur au seuil recommandé par le guide AFGC [1], à savoir 7,6 MPa (ligne en pointillé rouge sur le diagramme). Par ailleurs, les résistances d'interface des armatures métalliques et des armatures PRFV-TP à verrous de diamètre 12 mm sont comparables. Dans ces deux cas, les géométries de surface des barres sont assez proches et les modes de rupture mettent en jeu des bielles de compression. On note également que la géométrie de surface de type verrou semble plus performante que les autres géométries de surface dans le cas de cette étude. De plus, on remarque une diminution de la résistance lorsque le diamètre des armatures TP augmente. Néanmoins, cet effet est beaucoup plus marqué pour les barres du fournisseur M1 que pour celles du fournisseur M2, ce qui laisse penser que d'autres facteurs rentrent en jeu dans les résultats (notamment la profondeur des verrous pour les barres du fournisseur M1, qui était plus importantes sur les barres de 12mm que sur celles de 16 mm). L'effet du diamètre doit donc être analysé en lien avec la géométrie de surface de l'armature. Enfin, on peut conclure que les niveaux d'adhérence obtenus pour les différentes armatures PRFV à matrice thermoplastique (TP) sont équivalents voire supérieurs à la valeur obtenue avec les barres thermodurcissables (TD).

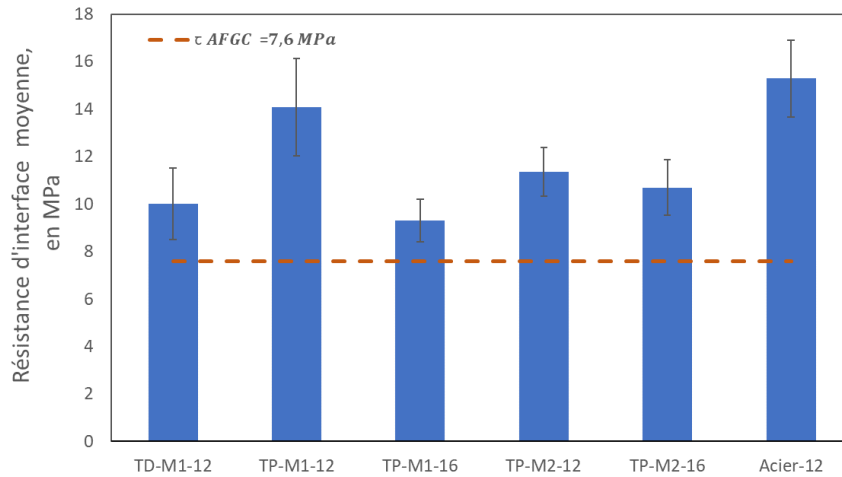


Fig. 3. Résistances moyennes d'interface obtenues lors des essais d'arrachement

Pour les éprouvettes instrumentées par fibres optiques, il n'a pas été observé de variation significative de l'adhérence par rapport aux éprouvettes non instrumentées. Cela semble indiquer que le mode d'insertion des FO utilisé est peu intrusif sur les résultats d'arrachement. L'analyse des profils de déformation enregistrés par les capteurs FO n'est pas abordée dans cet article.

### 3.3 Courbe Force-Déplacement

Si la résistance en cisaillement moyenne est un paramètre pertinent pour évaluer le comportement de l'interface entre armature et béton, il est également intéressant d'examiner l'ensemble du comportement mécanique de l'assemblage, et plus particulièrement la rigidité d'interface initiale et le comportement post-pic. Une assez bonne reproductibilité des courbes force-déplacement a été obtenue lors des essais d'arrachement, et l'on a donc tracé sur la Figure 4, une courbe unique représentative pour chaque type d'éprouvettes testé.

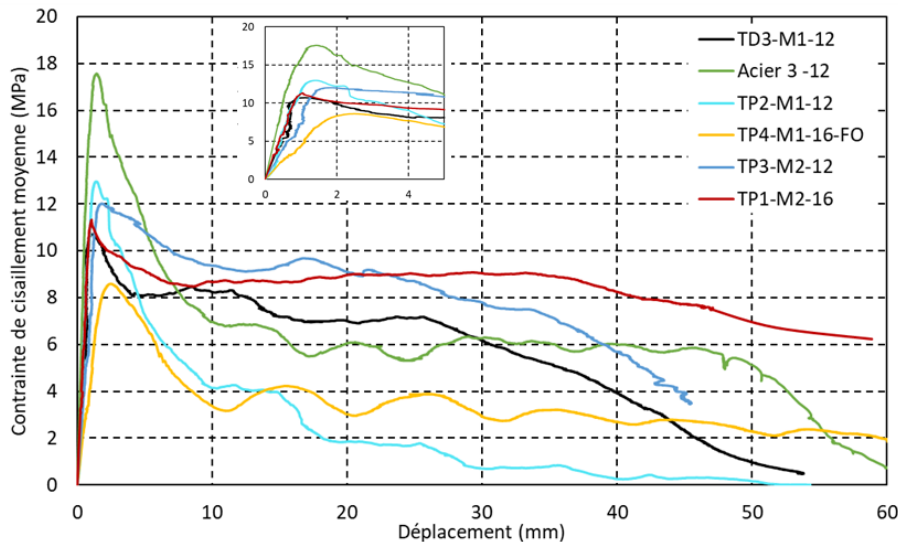


Fig. 4. Comparaison des courbes contrainte de cisaillement moyenne à l'interface/déplacement pour les différents types de corps d'éprouve (une courbe représentative par série)

On constate que la rigidité d'interface initiale est assez comparable pour les différents systèmes, sauf pour les éprouvettes TP4-M1-16 (avec l'armature à matrice thermoplastique de diamètre 16 mm du fournisseur M1). Pour l'ensemble des corps d'éprouve, la contrainte de cisaillement chute fortement après le pic. Elle semble ensuite atteindre un plateau pour les éprouvettes avec armatures PRFV-TP du fournisseur M2 (surface constituée d'un tissu texturé), ainsi que dans le cas des armatures PRFV-TD et métalliques. Ce comportement peut correspondre à une contrainte résiduelle de friction lors de l'extraction des barres. Dans le cas des

armatures PRFV-TP du fournisseur M1 (géométrie de surface à verrous), on constate plutôt une diminution graduelle de la contrainte d'interface en fonction du déplacement, avec une oscillation dont la période semble correspondre à l'espacement entre verrous.

De manière générale, le comportement post-pic présentant un palier de contrainte résiduelle (obtenu pour les éprouvettes avec barres PRFV-TD, PRFV-TP du fabricant M2 et acier HA) peut apparaître plus sécuritaire que le comportement à contrainte décroissante observé avec les armatures PRF-TD à verrous du fabricant M1.

#### 4. Conclusions

Les investigations présentées avaient pour objectif d'évaluer le comportement mécanique de l'interface entre les armatures PRFV à matrice thermoplastique et le béton. Deux principaux types d'armature PRFV-TP ont été étudiés, présentant des états de surface différents (géométrie à verrous, ou tissu d'arrachage texturé). Deux diamètres différents (12 et 16mm) étaient également disponibles pour ces armatures. Les résultats des essais d'arrachement ont été comparés à ceux obtenus avec des armatures PRFV à matrice thermodurcissable (TD) et des aciers HA couramment utilisés sur chantier.

Nous avons pu constater que les modes de rupture obtenus lors des essais pull-out sont très dépendants de la géométrie de surface, et dans une moindre mesure du diamètre de l'armature. En ce qui concerne la résistance d'interface entre les PRFV-TP et le béton, les performances les plus élevées ont été obtenues avec la géométrie de surface de type verrous et un diamètre 12 mm. Ces capacités se sont révélées proches de la valeur obtenue avec les armatures métalliques HA et légèrement supérieures à celle obtenue avec les armatures PRF-TD recouvertes d'un sablage. Ces performances d'adhérence sont toutes conformes aux préconisations de l'AFGC (supérieures au seuil de 7,6 MPa) [1]. En ce qui concerne le comportement post-pic, les armatures présentant une surface constituée de tissu texturé ont présenté un palier de contrainte résiduelle (probablement lié à la friction lors de l'extraction des barres), légèrement supérieur à celui observé avec les armatures métalliques.

Ces premières investigations serviront de référence dans une campagne de vieillissement en cours, visant à évaluer la durabilité de l'adhérence entre les armatures PRFV-TP et le béton [9]. Dans un premier temps, seuls des vieillissements accélérés en milieu alcalin seront considérés. Par la suite, il est envisagé de s'intéresser au vieillissement sous charge de l'interface en utilisant les protocoles expérimentaux développés dans [10].

#### Références

- [1] AFGC « Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures », Association Française de Génie Civil (AFGC), France, 2023.
- [2] ISO 10 406-1 « Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods », 2008.
- [3] ACI 440.3R-12 « Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening of concrete structure », Farmington Hills, MI, USA : American Concrete Institute (ACI), 2012.
- [4] M. Baena, L. Torres, A. Turon, C. Barris « Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test », *Composites Part B*, Vol. 40, pp. 784-797. 2009.
- [5] A. Rolland, P. Argoul, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner, A. Khadour « Analytical and numerical modeling of bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete », *Construction and Building Materials*, Vol. 231, 117160, 2020.
- [6] S. Solyom, G.L. Balazs, « Analytical and statistical study of the bond of FRP bars with different surface characteristics », *Composite Structures*, Vol. 268, 2021.
- [7] F. Yan, Z. Lin, M. Yang « Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: a review », *Composites Part B*, Vol. 98, 2016.
- [8] N. Delaplanque, S. Chataigner, L. Gaillet, M. Quiertant, K. Benzarti, A. Rolland, X. Chapeleau, A. Saravia Flores, « Durability in alkaline environment of a fiber optic sensor bonded at the surface of reinforcing rebars for distributed strain measurements in concrete structures », *Lecture Notes in Civil Engineering*, pp. 506-515, 2023.
- [9] G. Feng, D. Zhu, S. Guo, M.Z. Rahman, Z. Jin, C. Shi, « A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions », *Cement and Concrete Composites*, Vol.134, 104758, 2022.
- [10] N. Delaplanque, M. Tharreau, S. Chataigner, M. Quiertant, K. Benzarti, L. Battais, A. Rolland, L. Gaillet, X. Bourbon, « Durability of partially cured GFRP reinforcing bars in alkaline environments with or without sustained tensile load », *Construction and Building Materials*, Vol. 442, 137603, 2024.