

Etude des propriétés d'adhérence entre les armatures composites à fibres de verre/matrice thermoplastique et le béton

Maha Fodda¹, Sylvain Chataigner², Ludwig Battais², Xavier Chapeleau³, Marc Quiertant⁴, Arnaud Rolland⁵ et Karim Benzarti¹

¹ Université Gustave Eiffel, Laboratoire Navier, Marne la Vallée, France

² Université Gustave Eiffel, MAST-SMC, Bouguenais, France

³ Université Gustave Eiffel, COSYS- SII-I4S, Bouguenais, France

⁴ ESTP, Institut de Recherche, Cachan, France

⁵ Cerema, Dter Ouest, Nantes, France

RESUME

Les barres d'armature en polymère thermoplastique renforcé de fibres de verre (notées TP-PRFV) sont actuellement développées par plusieurs fabricants. Ces barres sont destinées au renforcement de structures en béton, et présentent d'excellentes propriétés mécaniques ainsi qu'une résistance à la corrosion comparable à celle de leurs homologues à matrice thermodurcissable. En outre, elles offrent l'avantage d'être cintrables à haute température, ce qui permet de former des cages d'armature à façon en fonction des besoins du chantier. Cependant, plusieurs aspects restent à approfondir sur ces nouveaux matériaux, notamment leur adhérence dans le béton et leur durabilité en conditions de service. Cette étude présente un programme expérimental visant à évaluer le comportement interfacial entre des barres TP-PRFV et le béton. Une série d'essais d'arrachement (pull-out) a été réalisée sur des corps d'épreuve renforcés par différentes barres TP-PRFV à matrice thermoplastique Elium (Arkema). L'influence de divers paramètres sur les courbes charge-déplacement et sur la résistance moyenne au cisaillement a été analysée, notamment l'influence du diamètre et de la géométrie de surface des barres. Les résultats ont également été comparés à ceux obtenus pour des corps d'épreuve renforcés par des barres PRFV à matrice thermodurcissable et par des aciers à haute adhérence conventionnels. De plus, certaines éprouvettes d'arrachement ont été équipées d'un système de mesures réparties par fibre optique qui permet d'évaluer en temps réel les profils de déformation le long de l'interface pendant les essais d'arrachement. Ces informations locales sur le comportement d'interface pourraient servir à terme, à améliorer les méthodes de dimensionnement des structures en béton armé par TP-PRFV.

Mots-clés Armatures composites à matrice thermoplastique, Béton, Adhérence, Test d'arrachement, Capteur à fibre optique

I. INTRODUCTION

La corrosion des barres d'armature en acier est la première cause de dégradation des structures en béton armé. Une solution efficace pour pallier ce problème consiste à remplacer les armatures en acier par des barres en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) (AFGC, 2023). Les composites PRF sont généralement fabriqués par un procédé de pultrusion, à partir de fibres continues - le plus souvent en verre, mais aussi en carbone, aramide ou basalte - intégrées dans une matrice organique. Actuellement, les armatures en PRF disponibles dans le commerce sont fabriquées à partir de matrices thermodurcissables de type époxy ou vinylester, qui permettent de garantir une durabilité adaptée aux exigences de longévité des structures de génie civil.

Cependant, ces armatures ne peuvent pas être façonnées (i.e. pliées) sur site, et leur impact environnemental reste relativement élevé. Pour pallier ces limitations, plusieurs fabricants développent actuellement des armatures à fibres de verre et matrices thermoplastiques (désignées sous le terme TP-PRFV). Ces matrices présentent l'avantage d'être cintrables à chaud sur site, permettant ainsi de s'adapter de manière flexible aux besoins et aléas des chantiers. De plus, les matrices thermoplastiques facilitent le recyclage de l'armature en fin de vie, réduisant ainsi l'impact environnemental. Cependant, les armatures TP-PRFV ayant été introduites très récemment, on compte encore très peu d'études portant sur ce type de renforts (D'Antino et al., 2023) (Ibrahim et al., 2024). Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires, notamment pour évaluer le niveau d'adhérence de ces barres avec le béton et leur durabilité à long terme.

Cette étude se concentre sur l'évaluation des propriétés d'adhérence entre le béton et une sélection d'armatures TP-PRFV produites avec la résine thermoplastique Elium® (Arkema) (Zoller et al., 2019). Une première partie présente les armatures étudiées ainsi que le test d'arrachement utilisé pour caractériser le comportement mécanique de l'interface PRF-béton. Les résultats des essais d'arrachement sont ensuite analysés pour mettre en évidence les effets de la géométrie de surface et du diamètre des armatures sur les courbes charge-déplacement et sur la résistance de l'interface. Les performances d'adhérence des barres TP-PRFV sont également comparées à celles des armatures Haute Adhérence en acier (HA) et des PRFV thermodurcissables. Par ailleurs, certaines éprouvettes d'arrachement ont été équipées d'une instrumentation distribuée par fibres optiques, permettant de mesurer les profils de déformation le long de l'interface au cours des essais. Ces informations locales fournissent une base de données essentielle pour la validation des modèles de comportement d'interface.







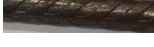
II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

A. Armatures et corps d'épreuves pour les essais d'arrachement

Les barres composites ont été fournies par trois fabricants, que l'on désignera par les appellations M1, M2 et M3 pour des raisons de confidentialité. Ces barres ont été produites par procédé de pultrusion, à partir de fibres de verre ECR (résistantes à la corrosion) et de résine thermoplastique Elium® C599 E (Arkema) (Zoller et al., 2019). Les géométries de surface des barres testées sont spécifiques à chaque fabricant : verrous pour M1, tissus texturés pour M2, et texture à pointes pour M3.

En vue d'examiner l'effet du diamètre, les fabricants M1 et M2 ont livré des barres TP-PRFV de diamètres nominaux de 12 et 16 mm ; en revanche, le fabricant M3 a fourni uniquement des barres de diamètre 13 mm. Le fabricant M1 a également fourni des barres PRFV ThermoDurcissables (TD) de diamètre 12 mm, fabriquées à partir de résine vinylester, qui serviront de référence dans cette étude. Des barres d'acier HA de 12 mm ont aussi été sélectionnées pour la comparaison. Pour toutes les barres, les diamètres effectifs ont été mesurés par la méthode de déplacement d'eau selon la norme (ISO-10406-1-2008). Les principales caractéristiques et la géométrie de surface des barres sont résumées dans le **Tableau 1** (côté gauche).

TABLEAU 1. Caractéristiques des différentes armatures utilisées et détail des corps d'éprouvette réalisés pour les essais d'arrachement.

Caractéristiques des armatures					Détails des éprouvettes de pull-out		
Matrice	Fournisseur	Diamètre d (mm)		Surface	Photo	Nombre	Nomenclature
		Nominal	Effectif				
TD	M1	12	12,37	Revêtement Sablé		3 sans FO	TD-M1-12
						2 avec FO	TD-M1-12-FO
TP	M1	12	11,92	Verrous		3 sans FO	TP-M1-12
		2 avec FO	TP-M1-12-FO				
	M2	16	16,17	Verrous		3 sans FO	TP-M1-16
		2 avec FO	TP-M1-16-FO				
	M2	12	11,13	Tissu texturé		3 sans FO	TP-M2-12
		2 avec FO	TP-M2-12-FO				
M2	16	15,56	Tissu texturé		3 sans FO	TP-M2-16	
	2 avec FO	TP-M2-16-FO					
M3	13	12,8	Texture à pointes		3 sans FO	TP-M3-13	
2 avec FO	TP-M3-13-FO						
Armature métallique (réf.)		12	11,75	Verrous		3 sans FO	Acier-12

Des échantillons cylindriques en béton dans lesquels ont été insérées les différentes barres d'armature ont également été fabriqués pour les essais d'arrachement (ou pull-out), à partir d'un béton C25/30 CEM IIB contenant des agrégats de granulométrie maximale 14 mm. Le béton a été coulé manuellement et vibré à l'aide d'une aiguille. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et soumis à une cure de 3 mois (un mois d'immersion dans de l'eau à 20 °C, puis deux mois de séchage à l'air). Les essais de caractérisation du béton à 28 jours ont permis de mesurer une résistance moyenne à la compression (R_c) de $37,5 \pm 0,9$ MPa, un module d'élasticité (E) de $37,0 \pm 0,9$ GPa, et un coefficient de Poisson (ν) de 0,2.

Pour chaque type de PRFV, cinq échantillons d'arrachement ont été fabriqués, dont deux équipés d'une instrumentation par Fibre Optique (FO) au niveau de l'interface béton/PRFV. Pour les armatures en acier, seuls trois échantillons d'arrachement sans instrumentation par FO ont été réalisés. La nomenclature des différentes séries d'échantillons est fournie dans le **Tableau 1** (colonne de droite)

B. Procédure expérimentale pour les essais d'arrachement

Pour évaluer l'adhérence entre les barres d'armature en PRFV et le béton, un protocole expérimental d'essais d'arrachement conforme aux normes ISO 10406-1 et ACI 440.3R-12 (ISO-10406-1-2008) (ACI PRC-440.3-12) a été retenu. Ce protocole a également été utilisé par de nombreux auteurs (voir par exemple (Rolland et al., 2021)).

La géométrie des échantillons d'arrachement et le dispositif d'essai sont illustrés dans la **Figure 1**. Les cylindres de béton, mesurant 16 cm de diamètre et 20 cm de hauteur, sont renforcés par une barre d'armature de 1,2 m de long. Avant le coulage du béton, des tubes en PVC (empêchant le contact entre l'armature et le béton) ont été insérés dans les moules en carton (**Figure 1.a**) pour délimiter une longueur d'adhérence de la barre dans le béton égale à cinq fois le diamètre de la barre, conformément aux recommandations actuelles (AFGC, 2023).

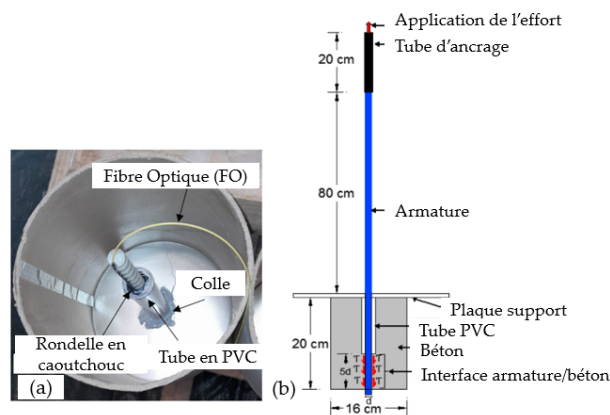


FIGURE 1. (a) Moule avant le coulage du béton (barre avec FO), et (b) schéma du dispositif d'arrachement.

Certains échantillons ont été équipés de câbles FO (diamètre extérieur 0,9 mm) insérés dans des rainures usinées à la surface des barres PRF (sur 30 cm de long, 1 mm de large et 2 mm de profondeur) (Quiertant et al., 2012) et scellés avec un adhésif époxy, comme illustré sur la **Figure 1.a**. Cette instrumentation permet d'évaluer en temps réel les profils de déformation le long de l'interface PRF/béton pendant les essais d'arrachement.

Pour les corps d'épreuve munis de barres de 12 mm et 13 mm de diamètre, les essais d'arrachement ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique Schopper 60 T / ZwickRoell équipée d'une cellule de force de 50 kN. L'extrémité chargée de l'armature a été ancrée par un dispositif pot/clavette. Dans le cas des éprouvettes avec des barres de 16 mm de diamètre, les essais ont été effectués sur une presse hydraulique Instron de 250 kN afin d'éviter tout glissement. Pour ces barres, un système d'ancrage spécifique a été utilisé, constitué de tubes en acier remplis de mortier expansif.

Un capteur laser, positionné à 16 cm de l'extrémité non chargée de la barre (**Figure 1.c**), a été utilisé pour mesurer le déplacement pendant l'essai. Après une précharge initiale de 0,2 kN, l'essai est réalisé en imposant une vitesse de déplacement constante de 1mm/min jusqu'à l'effort maximal (chute de l'effort). Après le pic, la fin de l'essai est réalisée à une vitesse de 5 mm/min jusqu'à extraction totale de la barre.

À partir de ces essais d'arrachement, la résistance moyenne en cisaillement de l'interface a été déterminée à l'aide de l'**Equation (1)** (AFGC, 2023)(ISO-10406-1-2008):

$$\tau_i = \frac{F_{max}}{\pi d L} \quad (1)$$

Avec F_{max} : la force maximale, d : le diamètre nominal de la barre et L : la longueur d'ancrage (5d).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Mode de rupture

Tous les échantillons testés ont présenté un mode de rupture par arrachement, comme illustré sur la **Figure 2**. Pour les échantillons TD-M1-12, cette rupture a eu lieu à l'interface sablage/PRF. Pour les échantillons TP-M1-12 et Acier-12, des morceaux de béton sont restés attachés entre les verrous sur les barres extraites. En revanche, la surface de la barre TP-M1-16 extraite était lisse, sans endommagement apparent ni traces de béton résiduel. Pour les échantillons TP-M2-12 et TP-M2-16, la rupture s'est produite à l'interface entre les tissus texturés externes et le composite, ces tissus étant très endommagés et arrachés. Un comportement similaire a été observé pour les échantillons TP-M3-13, dont la texture superficielle à pointes a été partiellement endommagée et arrachée pendant l'extraction.

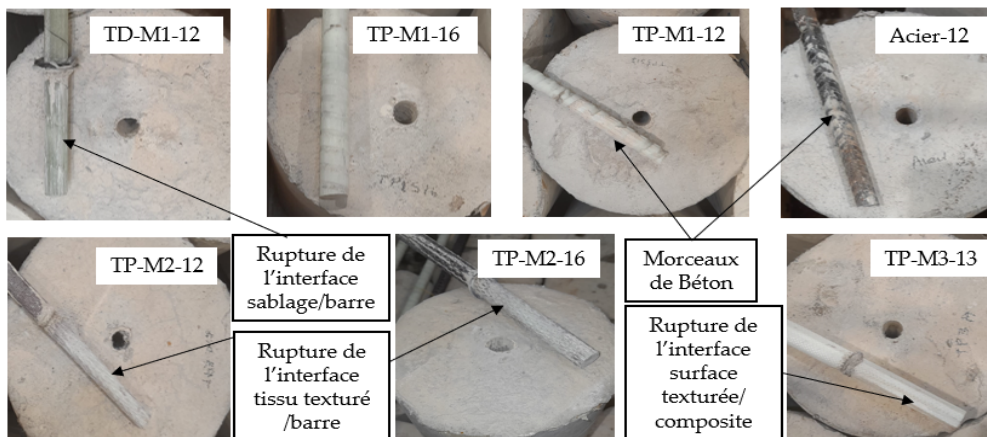


FIGURE 2. Photos des ruptures des différents échantillons après essais d'arrachement

B. Résistance d'adhérence moyenne

La résistance moyenne d'interface pour chaque série d'éprouvettes est présentée sur la **Figure 3**. Les valeurs indiquées sur le diagramme correspondent à la moyenne calculée à partir de cinq essais par type de barre, à l'exception de la valeur de la série Acier-12, qui est basée sur trois essais. Les barres d'erreur correspondent aux écarts types des distributions.

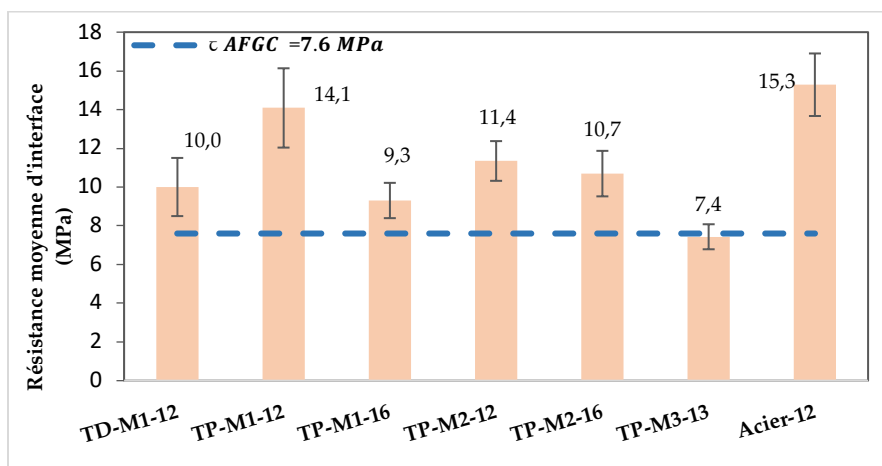


FIGURE 3. Résistances moyennes d'interface obtenues pour les différentes séries d'éprouvettes d'arrachement

Il ressort que toutes les valeurs de résistance sont supérieures à la préconisation minimale de 7,6 MPa (pointillés bleus sur le graphique) spécifiée dans les recommandations de l'AFGC (AFGC, 2023), sauf pour la série TP-M3-13, qui présente une valeur légèrement inférieure (7,4 MPa).

La série TP-M1-12 présente une résistance d'interface de $14,1 \pm 2,1$ MPa, proche de celle obtenue pour la série Acier-12 ($15,3 \pm 1,7$ MPa). Ceci est attribué au fait que dans les deux cas, les barres présentent une géométrie de type verrou, et le mode de rupture implique des fragments résiduels de béton entre les verrous des barres extraites.

En comparant les résistances d'interface des différentes barres PRFV ayant des diamètres effectifs proches de $12,0 \pm 0,9$ mm, il apparaît que les valeurs décroissent dans l'ordre suivant : 14,1 MPa pour la série TP-M1-12 ; 11,4 MPa pour la série TP-M2-12 ; 10,0 MPa pour la série TD-M1-12 et 7,4 MPa pour la série TP-M3-13. Ce classement suggère les observations suivantes :

- Le type de matrice (TD ou TP) a peu d'impact sur la résistance d'interface,
- Parmi les différentes géométries de surface, la géométrie de type verrou semble la plus efficace, suivie par les tissus texturés, le revêtement sablé et la texture à pointes.
- L'adhésion entre le revêtement de surface (cas du tissu texturé et du revêtement sablé) et le composite joue également un rôle significatif.

De plus, des mesures optiques et un traitement des images selon la norme NF EN ISO 15630-1 ont également été réalisés à l'aide d'un dispositif spécifiquement prévu pour caractériser le profil, la profondeur et l'espacement des verrous sur les barres d'armature crénelées. Ces mesures ont été effectuées pour les barres des séries TP-M1-12, TP-M1-16 et Acier-12, comme illustré sur la **Figure 4.a**. Des mesures supplémentaires portant sur la profondeur et l'espacement des motifs de surface des barres dans les séries TP-M2-12, TP-M2-16 et TP-M3-13 (avec tissu texturé ou texture à pointes) ont été réalisées à l'aide d'un microscope Keyence VHX. Cet appareil permet la reconstruction d'images 3D, comme illustré sur les **Figures 4.b** à **4.d**. Les résultats de ces mesures sont regroupés dans le **Tableau 2**, et permettent d'approfondir l'analyse des tests d'arrachement.

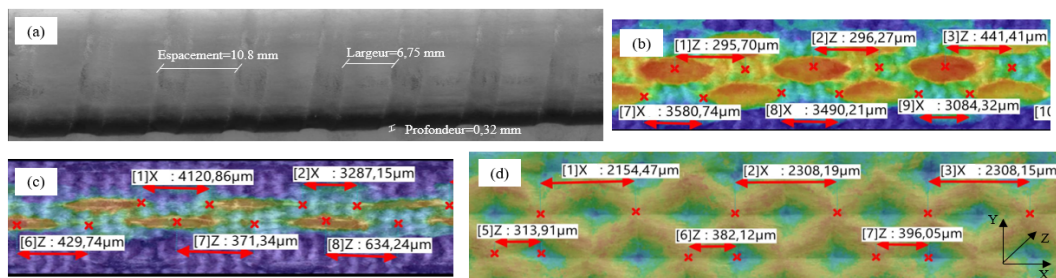


FIGURE 4. Analyse quantitative des images de surface pour les séries (a) TP-M1-16, (b) TP-M2-16, (c) TP-M2-12 et (d) TP-M3-13. Le terme « Z » désigne les mesures de profondeur, tandis que « X » fait référence à l'espacement dans la direction longitudinale.

La **Figure 3** montre que la résistance d'interface de la série **TP-M1-16** (9,3 MPa) est nettement plus faible que celle de la série **TP-M1-12** (14,1 MPa), bien que ces deux séries utilisent des barres d'armature avec verrous provenant du même fabricant. Cette différence ne peut pas être attribuée à la variation sur le diamètre des barres, mais semble plutôt liée aux caractéristiques des verrous, comme indiqué dans le **Tableau 2**. Plus précisément, les verrous de la série **TP-M1-16** ont une profondeur environ deux fois plus faible et des têtes plus larges par rapport aux verrous de la série **TP-M1-12**. Des verrous profonds avec des têtes étroites semblent donc améliorer la résistance d'interface en assurant un meilleur ancrage mécanique de la barre dans le béton environnant. Cette hypothèse est d'ailleurs corroborée par les observations des barres extraites : en effet, des résidus

de béton restent attachés entre les verrous profonds et étroits de la série **TP-M1-12**, tandis que les barres **TP-M1-16** présentent des surfaces lisses et propres (**Figure 2**). De la même manière, les séries **TP-M2-12** et **TP-M2-16** affichent des résistances d'interface comparables (respectivement 11,4 MPa et 10,7 MPa), ce qui est cohérent avec leurs géométries de surface similaires (espacements entre les motifs du tissu texturé et profondeurs pics/vallées comparables, selon les valeurs du **Tableau 2**).

Enfin, la série **TP-M3-13**, dont les barres présentent une texture de surface à pointes, possède la résistance d'interface la plus faible (**7,4 MPa**) parmi toutes les séries d'éprouvettes. Ce résultat est cohérent avec les caractéristiques géométriques de surface de la barre concernée, en particulier avec les valeurs de l'espacement moyen entre motifs (**2,23 mm**) et de la profondeur moyenne pic/vallée (**0,35 mm**), qui sont les plus faibles parmi l'ensemble des barres étudiées (**Tableau 2**).

En conclusion, les caractéristiques géométriques de surface des armatures influencent fortement la résistance d'interface entre les TP-PRFV et le béton, souvent bien plus que le diamètre des barres.

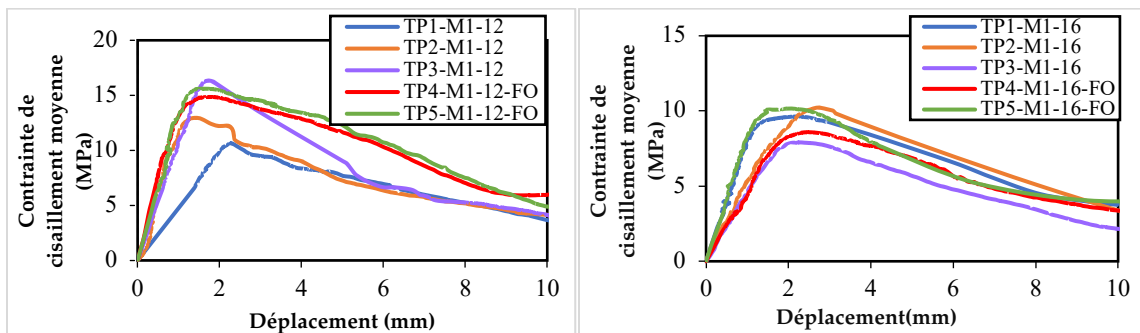
TABLEAU 2. Caractéristiques géométriques de la surface des barres d'armature (valeurs moyennes basées sur 6 mesures effectuées par analyses d'images)

Type de finition de surface / Série de barres d'armature		Espacement longitudinal des motifs (mm)	Profondeur (hauteur pic/vallée en mm)	Largeur de la tête des verrous (mm)
Verrous	TP-M1-12	10,70 ± 0,01	0,70 ± 0,11	4,98 ± 0,35
	TP-M1-16	10,80 ± 0,04	0,32 ± 0,06	6,75 ± 0,29
	Acier-12	6,70 ± 0,04	0,40 ± 0,04	2,30 ± 0,25
Tissu texturé	TP-M2-12	3,80 ± 0,42	0,44 ± 0,09	-
	TP-M2-16	3,33 ± 0,17	0,43 ± 0,16	-
Texture à pointes	TP-M3-13	2,23 ± 0,06	0,35 ± 0,04	-

C. Courbe contrainte-déplacement

La Figure 5 montre les courbes contrainte-déplacement lors des essais d'arrachement, pour les différentes séries d'éprouvettes contenant des barres TP-PRFV provenant des fabricants M1 et M2, y compris celles équipées d'une instrumentation FO.

Toutes les courbes présentent une phase initiale quasi-linéaire, suivie d'une branche hyperbolique jusqu'au pic de contrainte de cisaillement maximal, puis une phase post-pic dépendant du type de barre testé. Il est important de noter que la présence de l'instrumentation FO n'affecte pas significativement le comportement d'interface, comparé aux éprouvettes non instrumentées. Ce résultat souligne donc le caractère faiblement intrusif de cette méthode d'instrumentation.



(a) Série TP-M1-12

(b) Série TP-M1-16

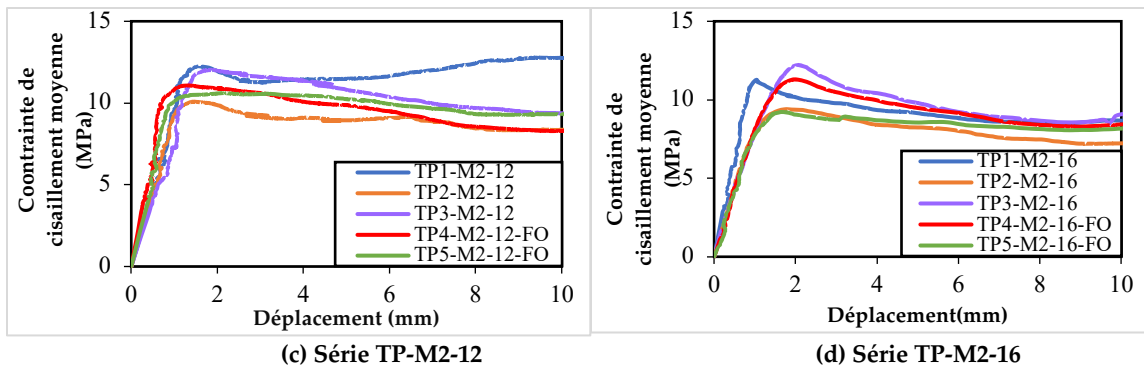


FIGURE 5. Courbes contrainte-déplacement enregistrées pendant les essais d'arrachement, pour les séries d'éprouvettes avec barres TP-PRFV des fabricants M1 et M2

La **Figure 6** compare les comportements typiques en phase post-pic (jusqu'à un déplacement de 60 mm) des différentes séries d'échantillons, y compris les séries avec des barres TD-PRFV et des barres de référence en acier. Immédiatement après le pic de contrainte, les séries TP-M1-12, TP-M1-16 et Acier-12 – dont les barres présentent une géométrie de surface à verrous – font apparaître une chute brutale de contrainte suivie d'un comportement oscillatoire. On notera que la période des oscillations est du même ordre de grandeur que l'espacement longitudinal des verrous rapporté dans le **Tableau 2**. La série TP-M3-13, avec des barres dont la surface possède une texture à pointes, présente également un comportement post-pic oscillatoire, mais avec une période plus courte et une amplitude plus faible, en lien avec l'espacement resserré et la profondeur restreinte des motifs à pointes sur la surface.

En revanche, les séries TP-M2-12 et TP-M2-16, avec des barres dont la surface est constituée d'un tissu texturé, montrent un plateau post-pic presque horizontal avec une contrainte résiduelle relativement élevée, attribuée à la persistance du processus de friction pendant l'extraction de la barre. La série TD-M1-12, avec des barres à revêtement sablé, présente aussi un plateau post-pic horizontal, mais avec une contrainte résiduelle inférieure à celle des séries TP-M2-12 et TP-M2-16.

Ces observations montrent que la géométrie de surface joue un rôle à la fois sur la résistance d'interface et sur le comportement post-pic. On peut estimer que le plateau de contrainte résiduelle observé avec les barres TP-PRFV dotées d'un tissu texturé constitue une réponse post-pic plus sécuritaire, comparé à la réponse post-pic décroissante observée pour les barres avec verrous.

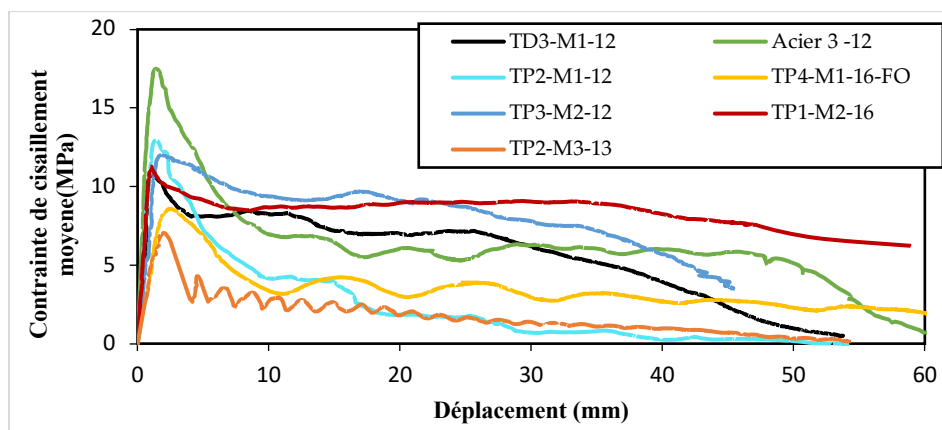


FIGURE 6. Courbes contrainte-déplacement lors des essais d'arrachement, incluant le comportement post-pic pour les différentes séries d'éprouvettes.

D. Profils de déformation locaux issus des mesures distribuées par fibres optiques

La **Figure 7.a** illustre les profils de déformation le long de l'interface barre/béton, mesurés à différents niveaux de charge lors des essais d'arrachement (entre 6,45 et 100 % de la charge ultime, F_{max}) pour l'échantillon TP-M1-12-FO. On distingue clairement la zone d'ancrage, caractérisée par un gradient de déformation qui reflète le processus de transfert de charge entre la barre d'armature et le béton. On peut également identifier la zone non adhérente, caractérisée par une déformation constante associée à une sollicitation homogène de traction uniaxiale de la barre dans cette zone.

La **Figure 7.b** compare les gradients de déformation des différentes séries d'éprouvettes dans la zone d'ancrage, pour une charge correspondant à 100% de F_{max} lors des essais d'arrachement. La plupart des profils présentent des pics de déformation positionnés à intervalles réguliers le long de l'interface, probablement associés à des dommages localisés du béton près des motifs géométriques à la surface des barres (verrous ou pointes). L'intensité de ces pics, et donc l'endommagement du béton, augmente d'ailleurs avec le niveau de charge appliqué (**Figure 7.a**).

Dans l'ensemble, ces profils de déformation FO constituent une base de données précieuse, pouvant servir à valider des modèles d'interface dans des travaux ultérieurs.

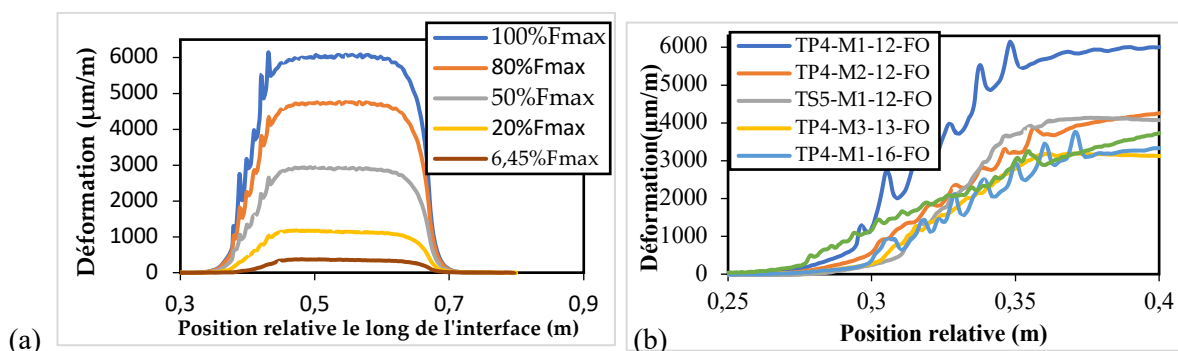


FIGURE 7. (a) Profils de déformation FO le long de l'interface armature/béton lors des essais d'arrachement sur l'échantillon TP4-M1-1-FO, à différents niveaux de charge. (b) Comparaison des profils de déformation dans la zone d'ancrage pour les différentes séries d'échantillons, à 100 % de F_{max} .

IV. CONCLUSIONS

Cette étude, centrée sur le comportement d'interface entre des barres d'armature TP-PRFV et le béton, a permis d'obtenir les résultats suivants :

- La résistance d'interface des barres thermoplastiques testées est supérieure à la valeur minimale de 7,6 MPa spécifiée par le guide AFGC, sauf dans le cas des barres fournies par le fabricant M3 (prototypes fabriqués spécifiquement pour la recherche).
- La résistance d'interface est fortement impactée par la géométrie de surface des barres. Les géométries avec verrous permettent d'obtenir les meilleures performances, avec des valeurs de résistance pouvant se rapprocher de celles de l'interface acier/béton. De plus, les caractéristiques géométriques des verrous (espacement, profondeur, largeur) influent significativement sur les résultats.
- Le diamètre des barres semble exercer un impact beaucoup plus faible sur la résistance d'interface, comparé à la géométrie de surface. Les performances semblent diminuer légèrement avec l'augmentation du diamètre.

- Le comportement post-pic est aussi influencé par la géométrie de surface des barres. L'utilisation d'un tissu de surface texturé (barres du fabricant M2) permet de conserver un palier de contrainte résiduel lors de l'extraction de la barre. Les géométries à verrous induisent en revanche une diminution progressive de la contrainte résiduelle post-pic.
- L'instrumentation des éprouvettes au moyen de câbles à fibres optiques semble peu intrusive sur les tests d'arrachement, et permet d'accéder aux profils de déformation locaux à l'interface barre/béton, fournissant ainsi une base de données précieuse en vue de futurs travaux de modélisation.

RÉFÉRENCES

- ACI PRC-440.3-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures [WWW Document], n.d. URL https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=440312&Language=English&Units=US_AND_METRIC.
- D'Antino, T., Bertolli, V., Pisani, M.A., Poggi, C., 2023. Tensile and interlaminar shear behavior of thermoset and thermoplastic GFRP bars exposed to alkaline environment. *Journal of Building Engineering* 72, 106581. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106581>
- Ibrahim, B., Iraqy, A., Cousin, P., Benmokrane, B., 2024. Physical and Mechanical Properties and Durability Characteristics of New Pultruded GFRP Bars with Thermoplastic Resin. *J. Compos. Constr.* 28, 06024001. <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4607>
- ISO 10 406-1 « Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods », 2008
- Quiertant, M., Baby, F., Khadour, A., Marchand, P., Rivillon, P., Billo, J., Lapeyriere, R., Toutlemonde, F., Simon, A., Cordier, J., Renaud, J.C., 2012. Deformation Monitoring of Reinforcement Bars with a Distributed Fiber Optic Sensor for the SHM of Reinforced Concrete Structures, in: 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, May 22-24, 2012 - Seattle, Washington, USA. <https://www.ndt.net/?id=14798>
- Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures, AFGC. <https://www.afgc.asso.fr/publication/recommendations-for-the-use-of-frp-fibre-reinforced-polymer-rebars-for-reinforced-concrete-structures/>.
- Rolland, A., Argoul, P., Benzarti, K., Quiertant, M., Chataigner, S., Khadour, A., 2020. Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete. *Construction and Building Materials* 231, 117160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117160>
- Rolland, A., Benzarti, K., Quiertant, M., Chataigner, S., 2021. Accelerated Aging Behavior in Alkaline Environments of GFRP Reinforcing Bars and Their Bond with Concrete. *Materials* 14, 5700. <https://doi.org/10.3390/ma14195700>
- Zoller, A., Escalé, P., Gérard, P., 2019. Pultrusion of Bendable Continuous Fibers Reinforced Composites With Reactive Acrylic Thermoplastic ELIUM® Resin. *Front. Mater.* 6, 290. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00290>