

Durabilité en milieu alcalin d'armatures composites à matrice thermoplastique pour le renforcement du béton

Maha Fodda¹, Sylvain Chataigner², Ludwig Battais², Marc Quiertant³, Arnaud Rolland⁴, Karim Benzarti¹

¹Laboratoire Navier, Université Gustave Eiffel

²MAST-SMC, Université Gustave Eiffel

³Institut de Recherche de la Construction, ESTP

⁴DTer Ouest, Cerema

RESUME Les armatures en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) à matrice thermoplastique présentent d'excellentes propriétés mécaniques et sont insensibles à la corrosion, tout comme leurs homologues à matrice thermodurcissable. Elles offrent en outre la possibilité d'être courbées à chaud sur site. Cependant, plusieurs de leurs caractéristiques restent à investiguer, notamment l'évolution à long-terme de leurs performances mécaniques en conditions de service. Dans cette étude, un programme expérimental est mené pour évaluer la durabilité en milieu alcalin d'armatures PRF à fibres de verre et matrice thermoplastique (PRFV-TP). Les armatures sont soumises à des vieillissements accélérés par immersion dans des solutions alcalines à différentes températures, et des caractérisations mécaniques (traction et cisaillement interlaminaire) sont réalisées après différentes durées d'exposition (jusqu'à 6 mois, la campagne étant toujours en cours). Les résultats montrent que les propriétés initiales en traction des barres PRF-TP sont supérieures aux spécifications minimales recommandées par l'AFGC, tandis que la résistance au cisaillement interlaminaire reste inférieure à celle des barres thermodurcissables, suggérant une adhésion fibre/matrice plus faible. Après vieillissement alcalin, les premières caractérisations révèlent une diminution notable de la résistance et du module d'Young en traction avec l'augmentation du temps d'exposition, particulièrement aux températures les plus élevées. Les propriétés résiduelles en traction passent progressivement en dessous des seuils préconisés par l'AFGC. Ces observations sont globalement cohérentes avec les résultats rapportés dans la littérature pour les barres thermodurcissables, mais doivent être relativisées compte tenu de la sévérité des vieillissements accélérés par immersion directe en solution alcaline par rapport aux conditions in situ. L'évolution de la résistance au cisaillement interlaminaire ne présente en revanche pas de tendance claire à ce stade.

Mots-clefs Armatures composites, matrice thermoplastique, durabilité, milieu alcalin

I. INTRODUCTION

Les armatures en Polymère Renforcé de Fibres (PRF) ont émergé comme une solution alternative viable aux armatures métalliques fer carbone traditionnellement utilisées pour le renforcement du béton armé. Elles ne sont en effet pas sensibles à la corrosion, et disposent de caractéristiques mécaniques adaptées. La plupart des armatures commercialisées sont fabriquées par pultrusion et comportent des fibres de verre résistantes à la corrosion (ECR) et une matrice de nature thermodurcissable (TS) (époxy ou vinylester) (AFGC, 2023). Récemment, Arkema a développé

une matrice thermoplastique (TP) à l'aide de réactifs acryliques (résine Elium[®]), compatible avec le procédé de pultrusion et ouvrant la voie à la fabrication de barres thermoplastiques. (Zoller et al, 2019). Ce nouveau type d'armatures offre l'avantage de pouvoir être cintré à chaud afin de fabriquer des cages d'armatures à façon sur chantier, et d'être recyclable après utilisation.

Plusieurs études se sont intéressées aux propriétés mécaniques de ces nouvelles armatures à matrice thermoplastique (PRF-TP) et ont démontré qu'elles étaient comparables à celles des armatures à matrice thermodurcissable (PRF-TS) (Benmokrane et al., 2021). Leur durabilité reste cependant un sujet d'investigations, car des résultats contradictoires sont rapportés dans la littérature récente en ce qui concerne les investigations en laboratoire (D'Antino et al, 2023) (Xian et al, 2024) et aucun retour d'expérience sur site n'est à ce stade disponible.

Cette étude vise à évaluer l'évolution à long-terme des propriétés mécaniques d'armatures thermoplastique (PRF-TP) en milieu alcalin. Elle porte sur des armatures produites par trois fournisseurs utilisant tous la même matrice thermoplastique Elium[®], avec différents diamètres et traitements de surface. La première partie détaillera les matériaux sélectionnés, ainsi que les méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation et le vieillissement accéléré des armatures. La seconde partie présentera les résultats obtenus, relativement complets en ce qui concerne la caractérisation initiale et partiels en ce qui concerne le vieillissement puisque les investigations se poursuivent. Ces résultats sont comparés aux performances minimales recommandées par l'AFGC pour les armatures composites thermodurcissable (AFGC, 2023).

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Les armatures testées proviennent de 3 fabricants (M1, M2 et M3). Elles sont toutes produites par pultrusion avec des fibres de verre ECR (résistantes à la corrosion chimique) et la matrice thermoplastique Elium[®] C599 E développée par Arkema. Trois diamètres différents ont été testés dans le cas du producteur M1, deux dans le cas du producteur M2 et un dans le cas du producteur M3 (Tableau 1). On notera que les traitements de surface varient en fonction de la matrice utilisée et du producteur (Figure 1).

TABLEAU 1. Caractéristiques des armatures étudiées et nomenclature adoptée

Type de matrice		TS	TP					
Fournisseur		M1	M1			M2		M3
Diamètre [mm]	Nominal	12	10	12	16	12	16	13
	Effectif	12.37	9.61	11.92	16.17	11.13	15.56	12.8
Conditions de surface		Sablée	Verrous			Textile/résille		Textile
Nomenclature		TS-M1-12	TP-M1-10	TP-M1-12	TP-M1-16	TP-M2-12	TP-M2-16	TP-M3-13

La nomenclature adoptée est également décrite dans le tableau 1 : TS est utilisé pour la matrice thermodurcissable, TP pour la matrice thermoplastique. Pour chaque armature, le diamètre nominal ainsi que le diamètre effectif mesurés via la norme ISO 10406-1 sont indiqués (ISO, 2015).

Lors de la détermination des propriétés mécaniques, ce sont les diamètres effectifs qui sont utilisés.

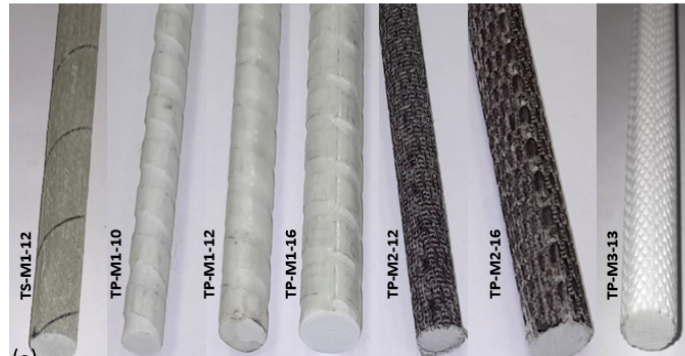


FIGURE 1. Photos des armatures testées montrant les différents traitements de surface. Le diamètre (en mm) correspond au dernier chiffre dans la désignation des barres

B. Méthodes d'essais utilisées pour la caractérisation initiale

Afin de bien appréhender l'état initial des armatures PRF, des caractérisations physico-chimiques et mécaniques sont réalisées sur l'ensemble des armatures à l'état non vieilli.

En ce qui concerne les propriétés physico-chimiques, les investigations portent ainsi sur la fraction massique de fibres, la température de transition vitreuse (T_g) et l'observation de la microstructure des armatures. La fraction massique de fibres est déterminée via des essais de perte au feu selon la norme NF EN ISO 1172 :2023 (ISO, 2023), au moyen d'un appareillage d'analyse thermogravimétrique (ATG), et en effectuant une rampe de la température ambiante à 600°C avec une vitesse de chauffe de 10°C/min, sur des échantillons de 20 à 40 mg extraits du cœur des armatures. Neuf essais sont réalisés par type d'armature. La température de transition vitreuse (T_g) est déterminée à l'aide d'un calorimètre différentiel à balayage (DSC) selon la norme ISO 11357-2 (ISO, 2020). Les investigations sont réalisées via deux rampes successives à 10°C/min entre 0 et 200°C, sur des échantillons d'environ 20 mg prélevés dans le cœur des armatures. La méthode de la demi-hauteur est utilisée pour déterminer la valeur de T_g à partir du saut de chaleur spécifique ; deux valeurs de T_g sont déterminées lors des passages successifs : T_{g1} au premier passage, caractéristique du matériau dans l'état de réception, et T_{g2} au second passage, caractéristique du matériau après réticulation complète. Neuf échantillons sont analysés par type armature. Enfin, les observations microstructurales sont réalisées à l'aide d'un microscope optique Keyence sur des surfaces polies.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, les propriétés en traction et la résistance au cisaillement interlaminaire sont déterminées. Les essais de traction sont réalisés selon la norme ISO 10406-1 et les recommandations de l'AFGC (ISO, 2015) (AFGC, 2023). Les armatures testées ont une longueur de 1,1 m et des ancrages tubulaires métalliques sont disposés de part et d'autre sur des longueurs de 0,2 m et scellés à l'aide de mortier expansif. La mesure de déformation est réalisée avec un vidéo-extensomètre et les essais sont réalisés à une vitesse de 5 mm/min. Le module élastique est déterminé comme étant la pente de la courbe contrainte/déformation entre des déformations de 0.001 et 0.003 (la section effective est utilisée pour la détermination de la contrainte). La résistance en traction longitudinale (essentiellement liée aux propriétés des fibres)

est déterminée par le rapport entre la force à rupture et la section effective. Cinq échantillons sont testés par armature. La résistance au cisaillement interlaminaire est déterminée selon la norme ASTM D4475-21 (ASTM, 2021) en utilisant un dispositif d'essais de flexion 3 points avec appuis rapprochés. La longueur des échantillons est de dix fois le diamètre nominal ($10d$) et la portée entre appuis est de $5d$. L'essai est réalisé à une vitesse de 1 mm/min et la résistance au cisaillement interlaminaire τ_i (liée à l'adhésion fibre/matrice) est déterminée à l'aide de l'équation (1), avec F_i l'effort maximal, et d , le diamètre nominal. Six échantillons sont testés par armature.

$$\tau_i = 0.849 \cdot \frac{F_i}{d^2} \quad (1)$$

C. Vieillessement en milieu alcalin

Afin d'accélérer le vieillissement en milieu alcalin des armatures étudiées, un protocole similaire à ce qui a été réalisé dans (Rolland et al., 2021) et (Delaplanque et al., 2024) a été adopté. Celui-ci consiste à immerger à trois températures différentes les armatures dans une solution alcaline et à tester à échéances régulières leurs capacités mécaniques résiduelles. La solution utilisée est composée de NaOH ($0,1 \text{ mol/L}$), et de KOH ($0,5 \text{ mol/L}$). Le pH de la solution est maintenu constant à environ $13,5$. Les trois températures utilisées sont les suivantes : 20°C (température ambiante), 40°C et 55°C (bien inférieur aux températures de transition vitreuse mesurées).

Les investigations de durabilité présentées dans cet article portent sur une seule des armatures étudiées, i.e. l'armature TP-M1-12 (produite par le fabricant M1, avec une matrice thermoplastique et un diamètre nominal de 12 mm). Trois échéances de vieillissement ont pu être réalisées en plus de la caractérisation initiale (30, 60, et 180 jours). A chaque échéance de vieillissement, les propriétés mécaniques résiduelles des barres sont évaluées (résistance et module en traction, résistance au cisaillement interlaminaire).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Fraction massique de fibre des armatures

Les résultats des mesures par analyse thermogravimétrique (ATG) sont présentés sur la Figure 2.

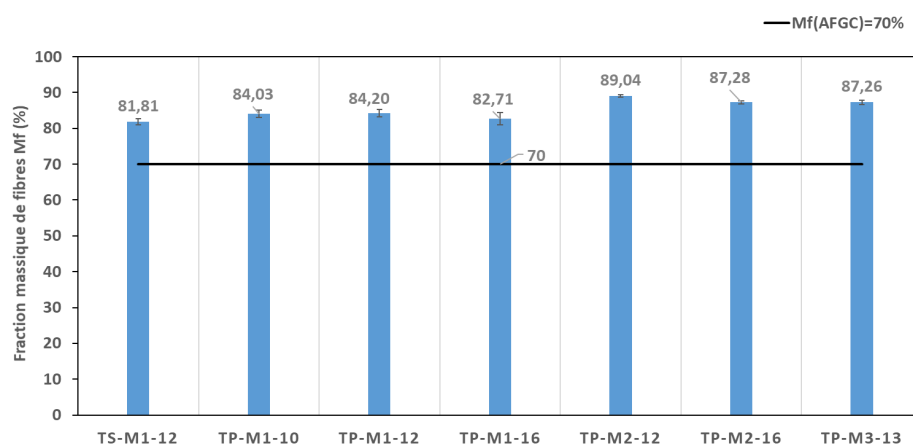


FIGURE 2. Résultats des mesures de fraction massique de fibres sur les armatures étudiées

On constate que toutes les fractions massiques mesurées sont supérieures au seuil minimal de 70% recommandé par l'AFGC. On constate également que les fractions massiques des armatures à matrice thermoplastique sont toutes supérieures à celle mesurée sur l'armature à matrice thermodurcissable. Il ne semble pas y avoir de corrélation forte entre le diamètre de l'armature et la fraction massique de fibre. Les analyses ATG permettent aussi d'évaluer les températures de dégradation. Dans le cas des armatures fournies par M2 et M3, deux pics peuvent être distingués à 290 et 390°C. Dans le cas des armatures PRF-TP fournies par M1, un pic additionnel peut être identifié à 180°C sans doute associé à des additifs spécifiques. Dans le cas de l'armature à matrice thermodurcissable, le pic de dégradation est rencontré pour une température plus élevée : 425°C.

B. Température de transition vitreuse

Les résultats obtenus en ce qui concerne les températures de transition vitreuse à l'état reçu (Tg1) et après post-cuisson (Tg2) sont présentés en figure 3. On constate que, pour toutes les armatures, la température de transition vitreuse initiale est inférieure (légèrement dans le cas des armatures à matrice thermoplastique) au seuil minimal recommandé par l'AFGC (100°C). Après post-cuisson, toutes les armatures présentent une température de transition vitreuse supérieure à ce seuil, sauf l'armature TP-M1-16 (98,6°C). Les différences observées entre Tg1 et Tg2 peuvent indiquer que le processus de fabrication n'est pas encore optimisé, notamment pour les producteurs M2 et M3 dans le cas de la matrice thermoplastique et M1 dans le cas de la matrice thermodurcissable. On constate également que les températures de transition vitreuse mesurées sont largement supérieures à la température maximale d'immersion en solution alcaline (55°C).

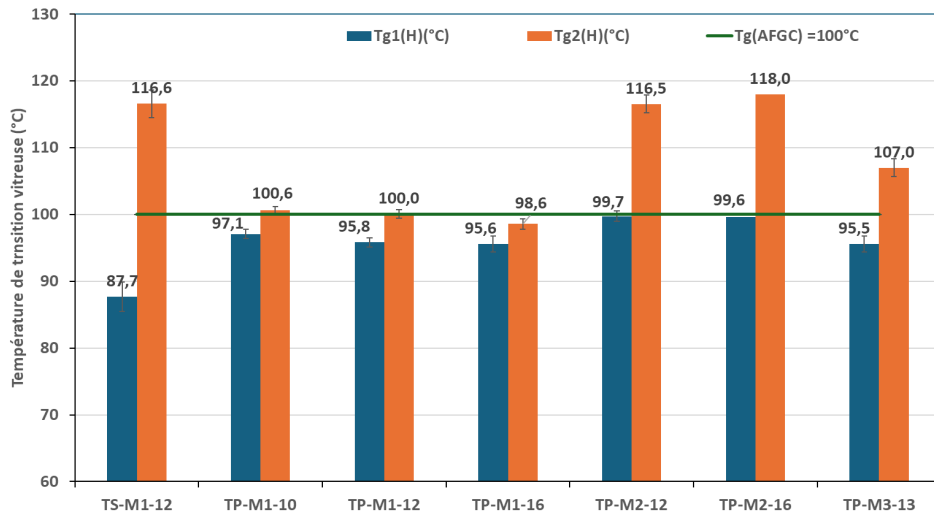


FIGURE 3. Résultats des mesures de température de transition vitreuse sur les armatures étudiées

C. Microstructure

Les observations des sections polies des armatures sont présentées en figure 4. On peut constater que les armatures PRF-TS étudiées présentent des porosités plus importantes que les armatures PRF-TP étudiées. On constate également une moins bonne homogénéité de répartition des fibres dans le cas des armatures à matrice thermoplastique où on peut identifier les paquets de fibres initiaux.

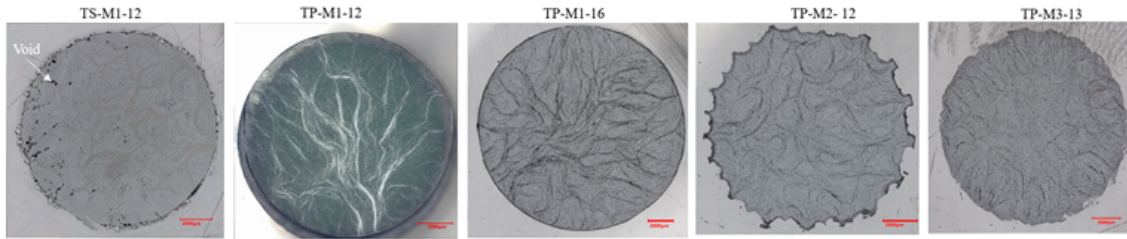


FIGURE 4. Photos des observations microstructurales des sections des armatures étudiées. Le diamètre (en mm) correspond au dernier chiffre dans la désignation des barres

D. Propriétés initiales en traction

Les résultats des investigations initiales en traction sont présentés en figure 5. L'ensemble des résistances moyennes en traction est supérieur au seuil minimal recommandé par l'AFGC (800 MPa), sauf celle des armatures TP-M1-16 (716 MPa). Dans le cas du fournisseur M1, on constate que la résistance en traction de l'armature à matrice thermodurcissable est largement supérieure à celle des armatures à matrice thermoplastique. On note également que pour tous les fournisseurs, la résistance en traction diminue avec le diamètre de l'armature.

En ce qui concerne le module élastique, l'ensemble des valeurs obtenues est supérieur au seuil minimal recommandé par l'AFGC (45 GPa). Les valeurs obtenues pour l'ensemble des armatures sont d'ailleurs assez proches. On constate que les modules élastiques des armatures du fournisseur M2 sont légèrement supérieurs, en cohérence avec les mesures de fraction massique de fibre réalisées. Toutes les armatures ont présenté un comportement élastique fragile, avec une rupture en plumeau caractéristique de la rupture des armatures PRF.

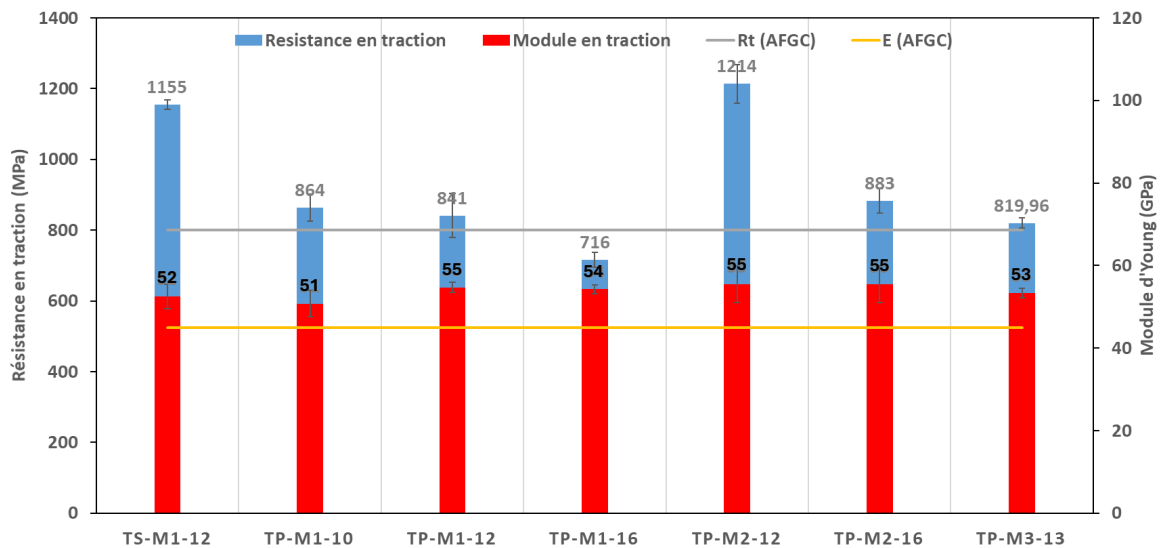


FIGURE 5. Résultats des essais de traction initiale sur les armatures étudiées : résistance en traction et module d'Young

E. Résistance au cisaillement interlaminaire initiale

Les mesures initiales de résistance au cisaillement interlaminaire sont présentées en figure 6. Les modes de rupture obtenus sont caractéristiques d'un délaminage à l'interface fibre/matrice. On

constate que le seuil minimal recommandé dans le guide AFGC (40 MPa) n'est pas toujours atteint dans le cas des armatures à matrice thermoplastique ce qui pourrait traduire un niveau d'adhésion plus faible à l'interface entre la fibre et la matrice TP. Les résultats obtenus sont variables entre les diamètres et les fournisseurs. On constate en outre une forte dispersion des résultats pour l'armature TP-M1-10.

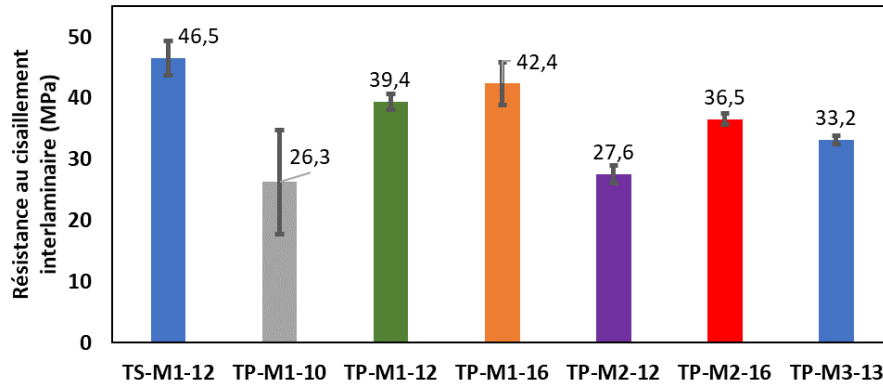


FIGURE 6. Résistance initiale au cisaillement interlaminaire des armatures étudiées

F. Résultats préliminaires concernant l'évolution des propriétés mécaniques après vieillissement en milieu alcalin

Les résultats des essais de traction réalisés après vieillissement en milieu alcalin pour l'armature TP-M1-12 sont présentés en figure 7 (résistance en traction) et figure 8 (module élastique) pour les trois échéances réalisées (E1 : 30, E2 : 60 et E3 : 180 jours) et les trois températures étudiées (20°C, 40°C et 55°C). Aucune modification du mode de rupture n'a été observée.

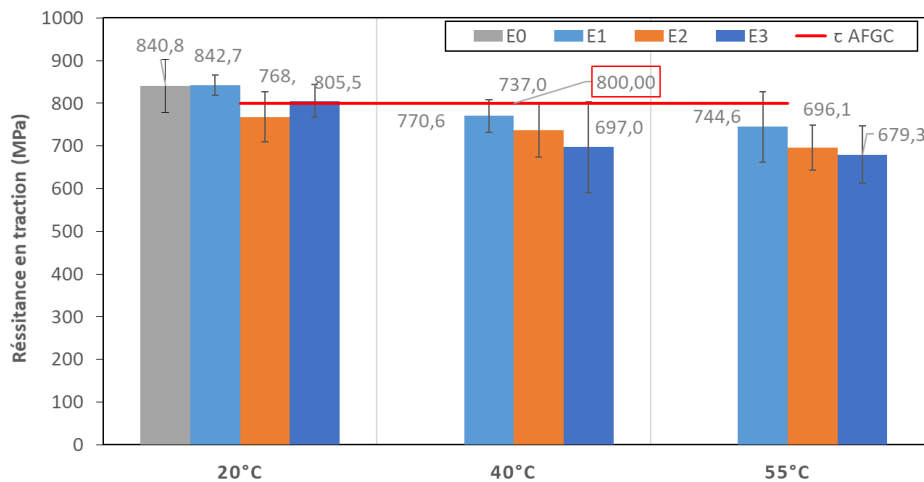


FIGURE 7. Evolution de la résistance en traction des armatures TP-M1-12 au cours du vieillissement en milieu alcalin jusqu'à 180 jours

Concernant la résistance en traction de l'armature PRF-TP, on constate une diminution au cours du vieillissement, qui tend à s'accroître avec la température d'exposition. Cette tendance est cohérente avec les résultats de la littérature pour les armatures à matrice thermodurcissable

soumises à une immersion directe en solution alcaline (Rolland et al., 2021). La diminution de la résistance en traction conduit à des valeurs inférieures au seuil recommandé par l’AFGC.

En ce qui concerne le module élastique en traction, il est plus difficile d’observer une évolution claire. A 20°C, le module ne semble pas évoluer pour la durée observée. A 40 et 55°C, on observe une diminution du module élastique au cours du vieillissement qui tend à se stabiliser. Ceci n’est pas observé en général dans le cas des armatures à matrice thermodurcissable et devra être confirmé par les prochaines échéances d’essai.

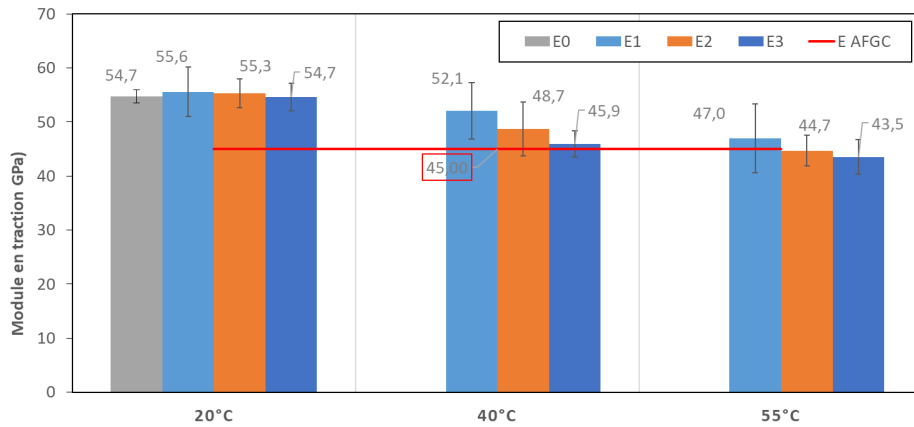


FIGURE 8. Evolution du module élastique en traction des armatures TP-M1-12 au cours du vieillissement en milieu alcalin jusqu’à 180 jours

Enfin, les résultats des mesures de résistance au cisaillement interlaminaire réalisées après vieillissement en milieu alcalin pour l’armature TP-M1-12 sont présentés en figure 9 pour les trois échéances d’essais (30,60 et 180 jours) et les trois températures étudiées (20° C, 40°C, et 55°C). Aucune modification du mode de rupture n’a été observée.

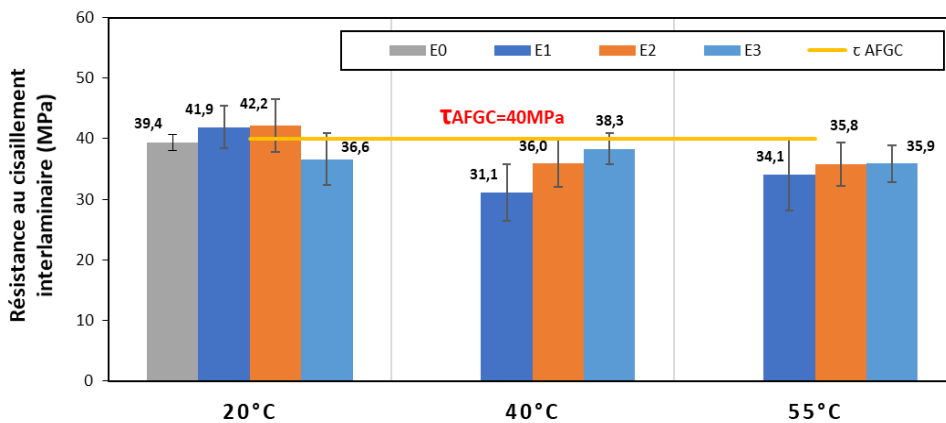


FIGURE 9. Evolution de la résistance en cisaillement interlaminaire des armatures TP-M1-12 au cours du vieillissement en milieu alcalin jusqu’à 180 jours

Il semble plus difficile d’interpréter l’évolution de la résistance au cisaillement interlaminaire au cours du vieillissement. A 20°C, on ne constate pas de tendance pour la durée étudiée. A 40 et

55°C, on observe une forte diminution initiale (échéance E1) suivie par une légère augmentation. Les prochaines échéances devraient permettre de mieux appréhender ces évolutions.

IV. CONCLUSION

L'étude présentée a permis d'investiguer le comportement initial de nouvelles armatures PRF à matrice thermoplastique en le comparant au comportement d'une armature PRF à matrice thermodurcissable et aux seuils recommandés dans le guide de l'AFGC (AFGC, 2023). On pourra retenir que les propriétés obtenues sont supérieures aux seuils recommandés, à l'exception de la résistance au cisaillement interlaminaire, ce qui témoignerait d'une moindre qualité d'adhésion fibre/matrice, comparé aux armatures PRF-TS. On notera également que, dans certains cas, les résistances en traction obtenues sont très proches du seuil minimum recommandé (800 MPa), et que l'écart entre les valeurs de Tg1 et Tg2 mesurées par DSC lors des deux rampes successives indique qu'une amélioration des process de fabrication est envisageable.

Les premiers résultats d'une étude de durabilité menée sur l'une des armatures PRF-TP ont également été présentés, afin de suivre les évolutions des propriétés mécaniques résiduelles (résistance et module d'Young en traction, résistance au cisaillement interlaminaire) au cours de vieillissements accélérés dans des solutions alcalines à différentes températures. On a ainsi pu observer une dégradation des propriétés en traction (résistance et module d'élasticité) en fonction de la durée d'exposition. Dans le cas de la résistance en traction, ceci est cohérent avec les études existantes sur la durabilité des armatures PRF à matrice thermodurcissable. Dans le cas du module élastique, il conviendra de vérifier si cette observation est confirmée lors des prochaines échéances de vieillissement. En ce qui concerne l'évolution de la résistance au cisaillement interlaminaire, les évolutions observées restent pour le moment difficiles à expliquer.

L'étude présentée est toujours en cours. Il est prévu de réaliser des échéances de vieillissement additionnelles, des investigations sur le sujet de l'adhérence entre les armatures PRF-TP et le béton (Fodda et al, 2025a), et des investigations sur le comportement des armatures PRF-TP après coulage à chaud (Fodda et al, 2025b). L'ensemble de ces éléments contribuera à améliorer les connaissances sur le comportement de ces nouvelles armatures à matrice thermoplastique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les fournisseurs d'armatures composites qui ont participé à cette étude.

REFERENCES

A. Zoller, P. Escalé, et P. Gérard, « Pultrusion of Bendable Continuous Fibers Reinforced Composites With Reactive Acrylic Thermoplastic ELIUM® Resin », *Front. Mater.*, vol. 6, p. 290, déc. 2019, doi: 10.3389/fmats.2019.00290.

AFGC, « Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures », 2023. <https://www.afgc.asso.fr/publication/recommendations-for-the-use-of-frp-fibre-reinforced-polymer-rebars-for-reinforced-concrete-structures/>

« ASTM D4475-21, Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method. ASTM standard method, 2021.

B. Benmokrane, S. Mousa, K. Mohamed, et M. Sayed-Ahmed, « Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures », *Construction and Building Materials*, vol. 276, p. 122200, mars 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122200.

T. D'Antino, V. Bertolli, M. A. Pisani, et C. Poggi, « Tensile and interlaminar shear behavior of thermoset and thermoplastic GFRP bars exposed to alkaline environment », *Journal of Building Engineering*, vol. 72, p. 106581, août 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106581.

M. Fodda, S. Chataigner, L. Battais, X. Chapeleau, M. Quiertant, A. Rolland, K. Benzarti, Experimental investigation on the bond behaviour between thermoplastic GFRP rebars and concrete, CICE conference, Lisbonne, Portugal, 2025a.

M. Fodda, S. Chataigner, L. Battais, B. Terrade, M. Quiertant, A. Rolland, K. Benzarti, Mechanical and microstructural characterization of straight and bent thermoplastic FRP reinforcing bars, Fib Symposium, Antibes, France, 2025b.

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 environment with or without sustained tensile load, *Construction and Building Materials*, 442, 137603, 2024.

« ISO-10406-1:2015, Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods. Part 1: FRP bars and grids.» ISO standard, 2015.

« ISO 11357-2:2020 », *Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC). Part 2: Determination of glass transition temperature and step height.* ISO standard, 2020.

« NF EN ISO 1172:2023, Plastiques renforcés de verre textile — Préimprégnés, compositions de moulage et stratifiés — Détermination des taux de verre textile et de charge minérale par des méthodes calcination ». ISO standard, 2023.

A. Rolland, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner, Accelerated aging behavior in alkaline environments of GFRP reinforcing bars and their bond with concrete, *Materials*, Vol. 14, 5700, 2021.

G. Xian et al., « Long-term properties evolution and life prediction of glass fiber reinforced thermoplastic bending bars exposed in concrete alkaline environment », *Journal of Building Engineering*, vol. 91, p. 109641, août 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.109641.