

Durabilité des armatures composites soumises à un vieillissement sous charge

Noémie Delaplanque^{a,b}, Maxime
Tharreau^b, Ludwig Battais^b, Sylvain
Chataigner^b, Karim Benzarti^c, Arnaud
Rolland^d, Marc Quiertant^e, Laurent
Gaillet^b, Xavier Bourbon^a

a) Andra

b) SMC-MAST, Univ Gustave Eiffel

c) Navier, Univ Gustave Eiffel

d) Cerema

e) ESTP (ex EMGCU-MAST, Univ Gustave Eiffel)

Plan de la présentation

I) Contexte de l'étude

II) Programme expérimental

III) Résultats obtenus

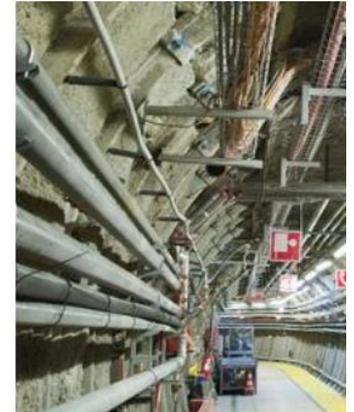
IV) Conclusions et perspectives

I) Contexte général de l'étude

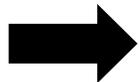
➤ Projet du site d'enfouissement des déchets nucléaires (Bure – Cigéo)

=> Problématique de la durée de vie sur le très long terme des structures enterrées (objectifs de **durabilité** et de réduction de maintenance, phase d'exploitation avant fermeture de 120 à 150 ans)

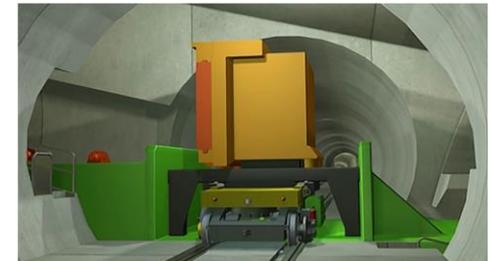
=> Problématique en **milieu confiné anoxique** après fermeture du site (minimiser les potentiels dégagements d'hydrogène dus à la corrosion des armatures métalliques)



©Andra



Recherche de solutions de béton armé avec des armatures alternatives aux armatures métalliques classiquement utilisées (voussoirs, soutènements/revêtements, radiers, génie civil interne).



©Andra

Rencontres Ouvrages d'Art 6 juin 2024

Utilisation d'armatures « composites » depuis plus de 25 ans à l'étranger en substitution des armatures métalliques (Etats-Unis, Canada, Japon) pour la fabrication d'éléments en béton armé :

- PRF à fibres longues (verre, basalte, aramide, carbone) et à matrice organique (vinylester, époxy),
- Traitement en surface par sablage ou usinage pour augmenter l'adhérence au béton,

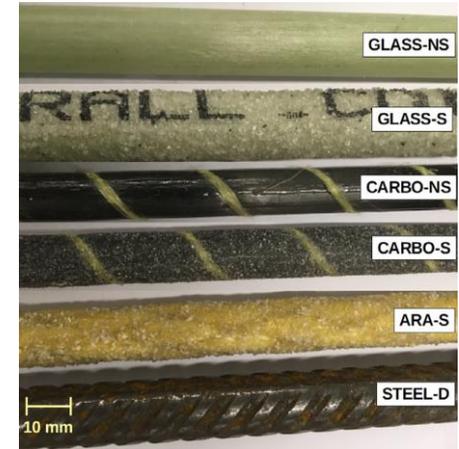
- Guide de recommandations nationales : AFGC (2021)
- Annexe R du futur Eurocode 2 (et son annexe nationale en cours de rédaction)

Avantages : insensibles à la corrosion, faible masse volumique, amagnétique, faible conduction thermique, ...

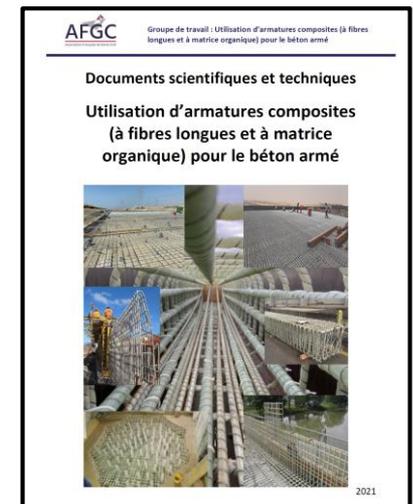
Inconvénients : comportement élastique fragile, REX plus limité, **sensibilité aux alcalins du béton (fibres de verre)**, faible rigidité des PRFV ...



Lancement d'un programme expérimental d'étude du vieillissement en milieu alcalin avec et sans chargement d'armatures composites (thèse de Noémie Delaplanque)



*Photo de différentes armatures
(Rolland, 2015)*



AFGC, 2021

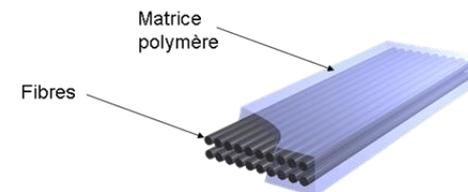
II) Programme expérimental

Choix des armatures étudiées :

- 2 types d'armatures étudiés (matrice vinylester, fibre de verre ou de carbone),
- Revêtement de surface : sablage
- Un seul diamètre : 10 mm

Choix des paramètres mécaniques et physico-chimiques étudiés :

- Observations microscopiques et sonde EDX,
- Température de transition vitreuse par DSC modulée,
- Résistance et module élastique en traction (ISO 10406-1),
- Résistance en cisaillement interlaminaire (ASTM D4475).



Structure des armatures PRF



*Armatures étudiées
(PRFC en haut/PRFV en bas)*

Propriétés des armatures PRF (données fournisseur)

	Diamètre (mm)	Aire effective (mm ²)	Résistance à la traction garantie (MPa)	Module d'élasticité en traction (GPa)
PRFV	10	71	900	46
PRFC	10	71	2000	150

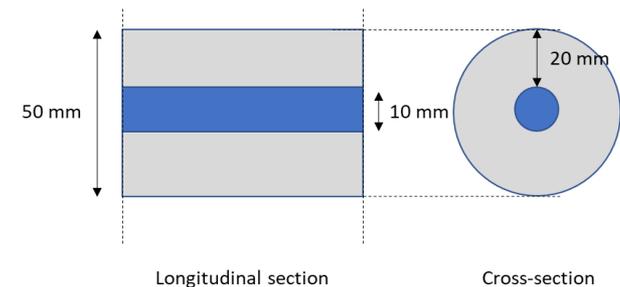
Vieillessement Sans Charge (VSC) :

- Enrobage de béton (CEM III, 80 MPa)
- Milieu alcalin (NaOH – KOH , pH ≈ 13,5)
- Différentes températures : 20, 40 et 60 °C
- 6 échéances : 30, 60, 90, 180, 360 et 540 jours

- Immersion indirecte de l'armature : création d'un enrobage de béton (20 mm)
- Vieillessement plus représentatif du vieillissement en conditions de service



Bains thermostatés pour vieillissement sans charge



Armature enrobée (longueur 1 m)

Viellissement Avec Charge (VAC) :

- Mêmes conditions que le VSC
- 2 niveaux de sollicitation : 20 et 40 % de la résistance en traction moyenne de l'armature (225 et 450 MPa)
- Echéances allant jusqu'à 90 jours

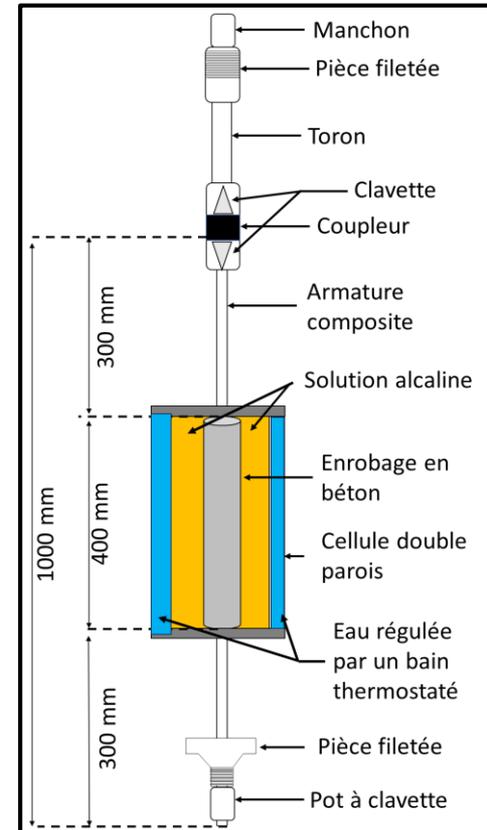
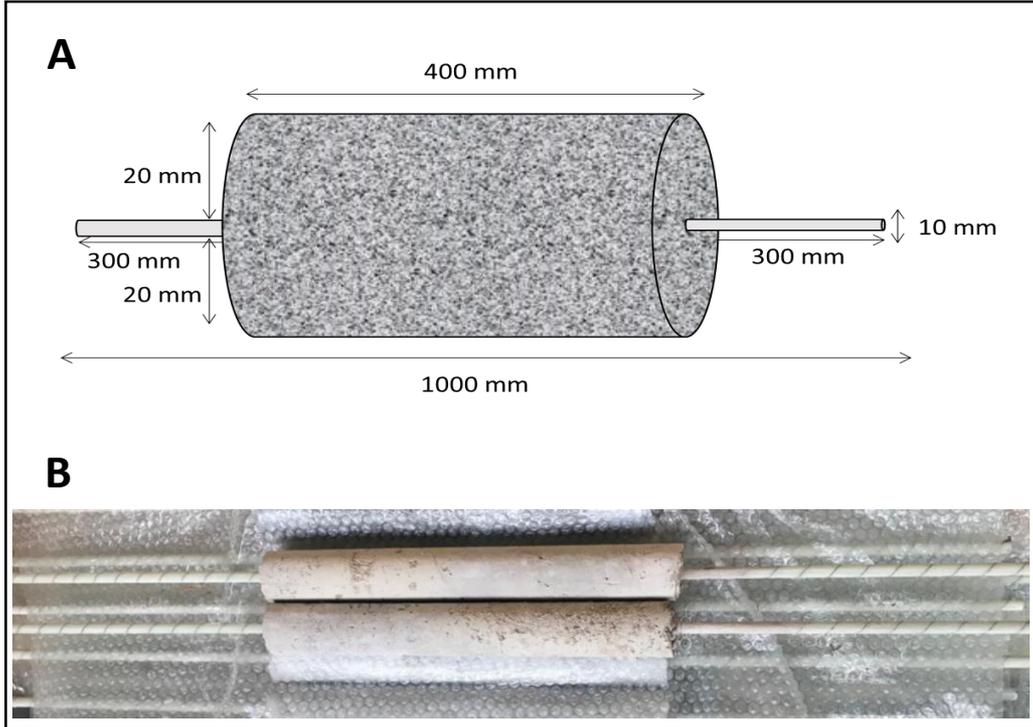


Schéma de principe du VAC

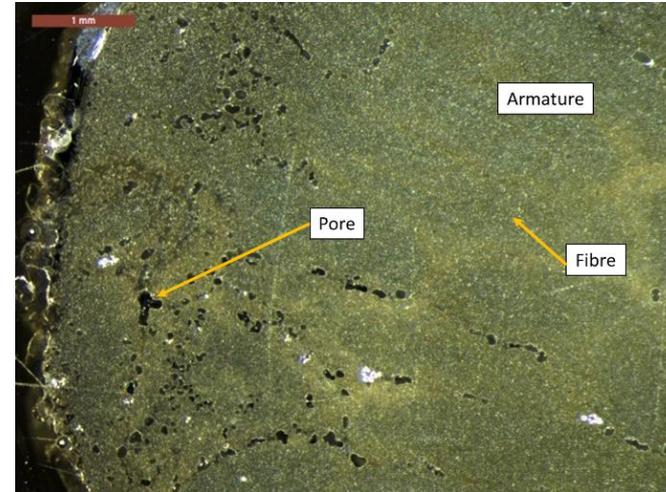
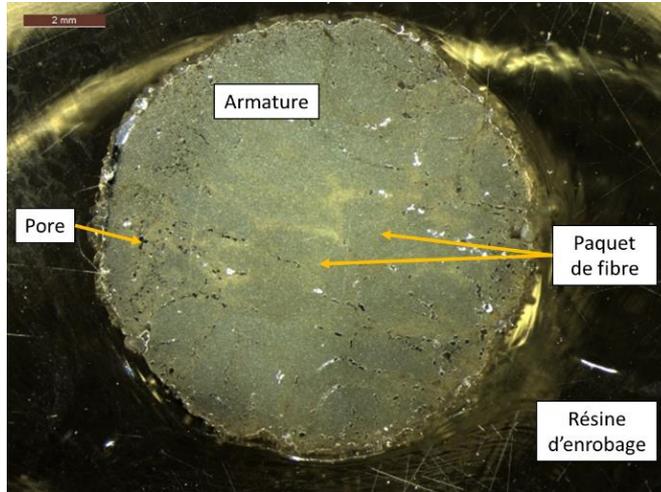


Bâti VAC

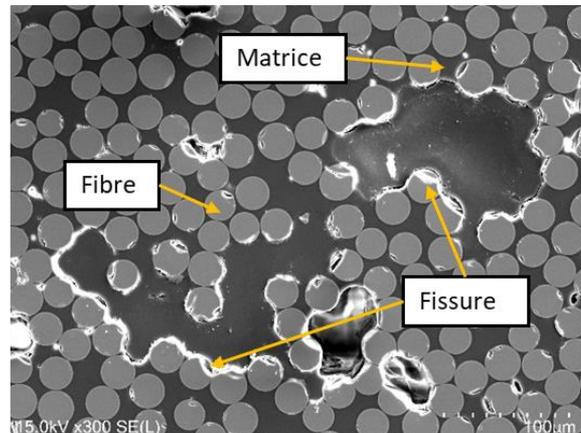
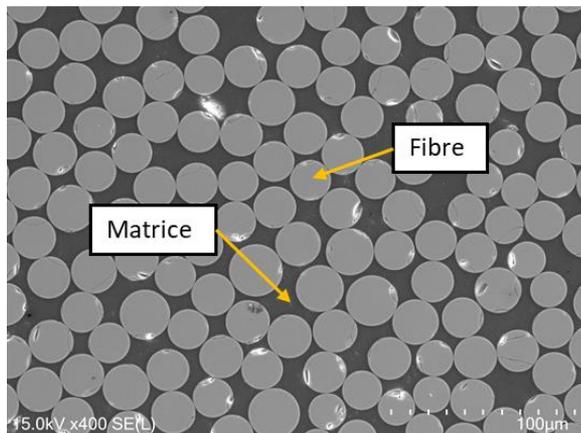
A) Schéma et B) photo d'une éprouvette VAC traction

III) Résultats obtenus (vieillessement sans charge)

Observation de la microstructure



Observation au microscope de l'état initial

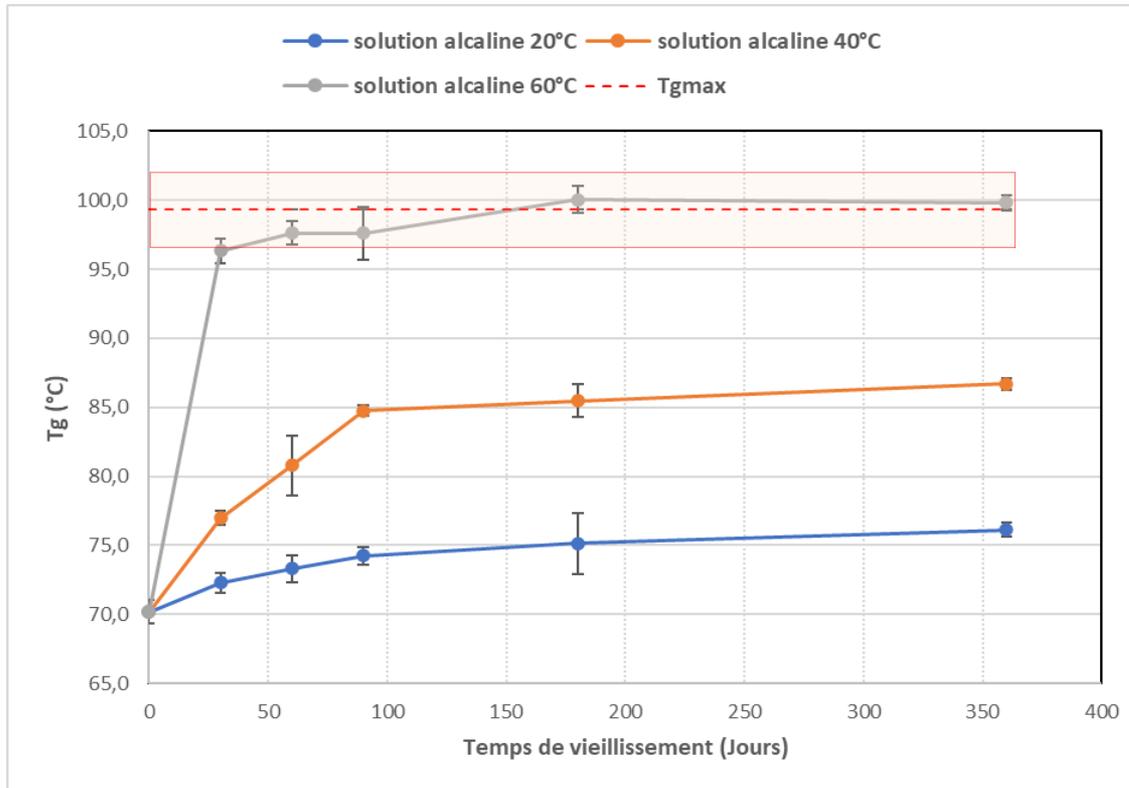


=> Peu d'évolution visible de la microstructure au cours du vieillissement. (quelques fissures interface fibre/matrice)

Observation MEB après vieillissement à 60°C après 30 jours (à gauche) et 360 jours (à droite)

III) Résultats obtenus (Vieillissement Sans Charge)

Evolution de la température de transition vitreuse (Tg)



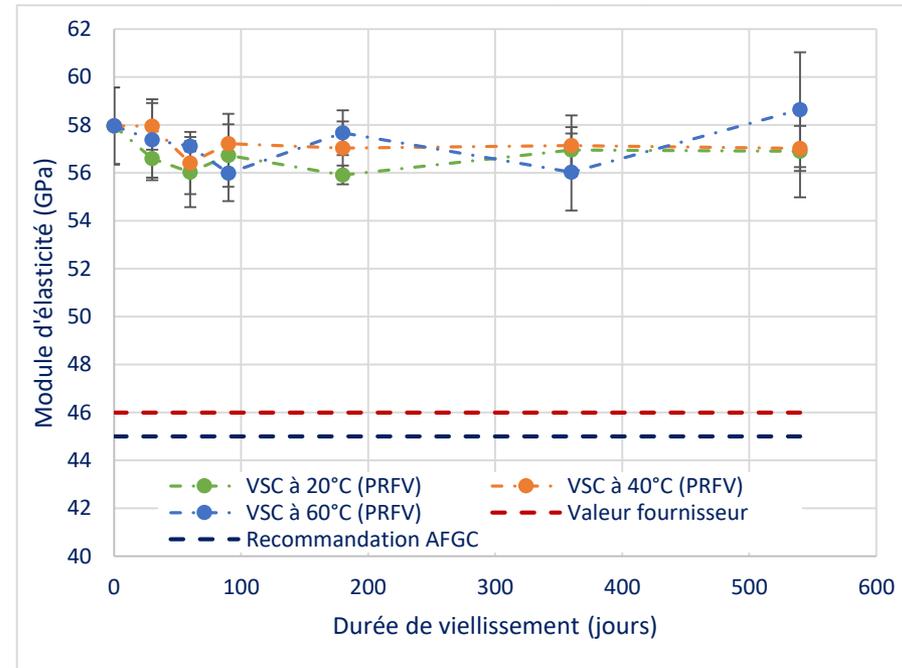
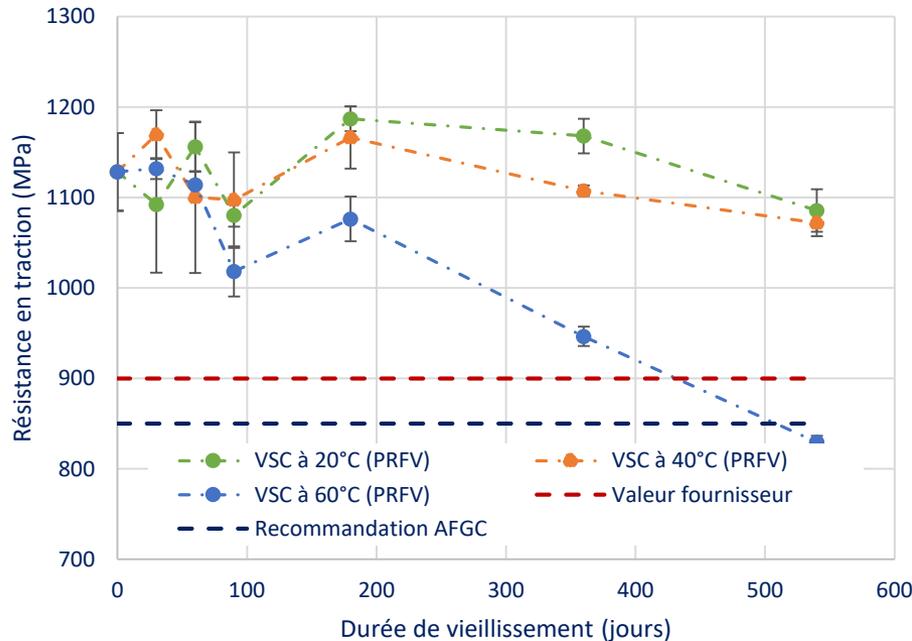
- Une température de transition vitreuse initiale faible : manque de réticulation pendant le process de fabrication (importance des contrôles qualité),
- Augmentation de la Tg au cours du vieillissement (post-réticulation).

III) Résultats obtenus (Vieillessement Sans Charge)

Evolution des propriétés en traction

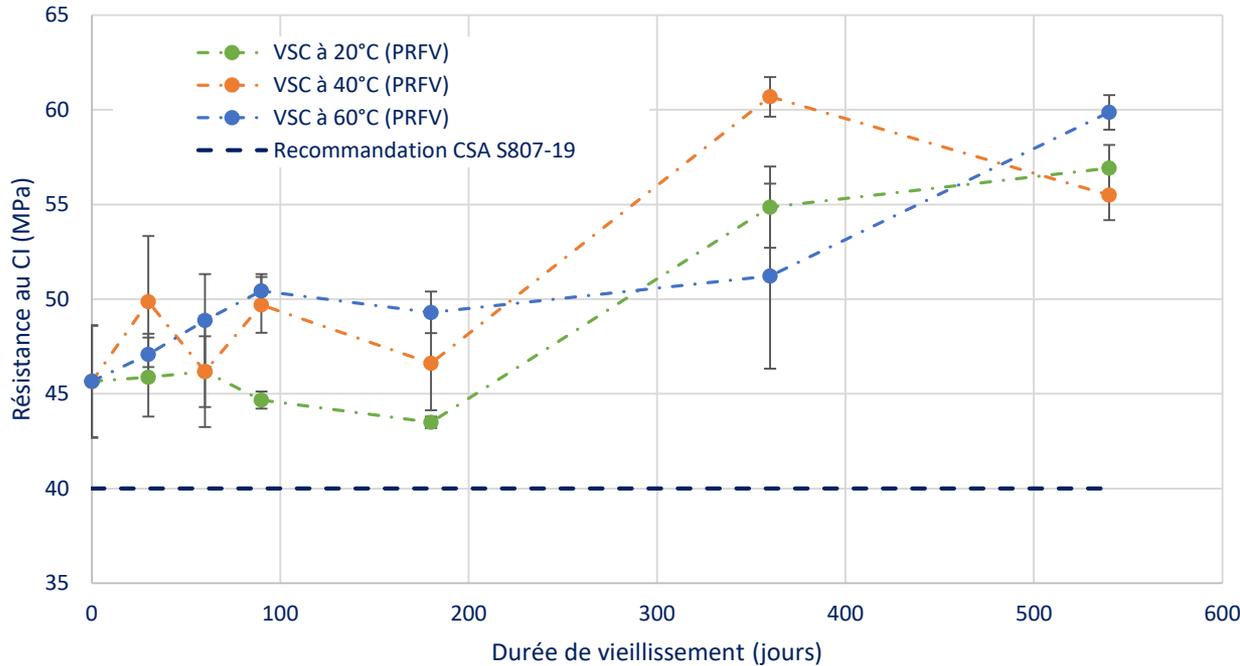


Photo d'un échantillon après rupture en traction



- Pas d'évolution du module élastique longitudinal
- Faible évolution de la résistance en traction, sauf à 60°C, (résistance inférieure aux seuils recommandés pour la résistance initiale près 540 jours de vieillissement).

Evolution des propriétés en cisaillement interlaminaire (Vieillessement Sans Charge)



- Une augmentation de la résistance au cisaillement interlaminaire au cours du vieillissement due à la post-réticulation
= amélioration de l'adhésion fibre/matrice!

$$\tau = \frac{0,849F}{d^2}$$

(Résistance apparente au cisaillement interlaminaire – Formule ASTM D4475)



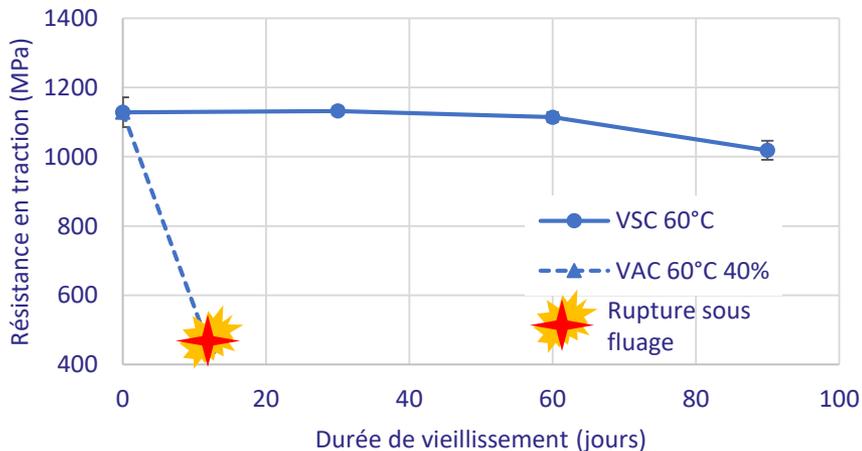
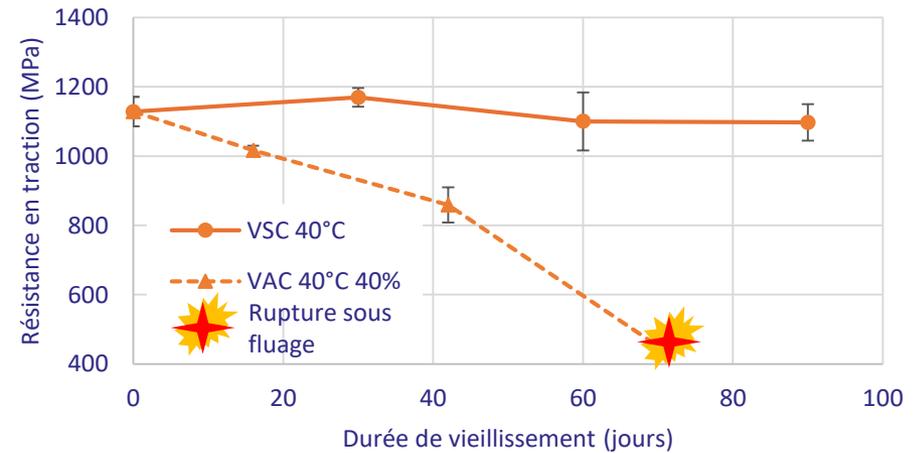
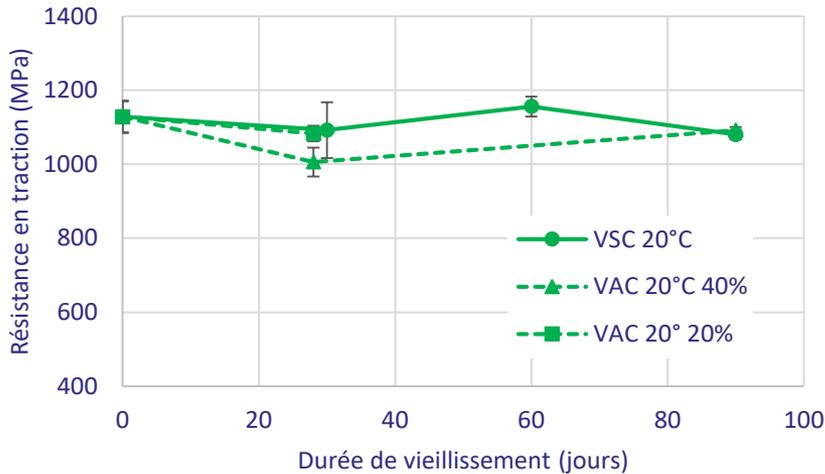
Essai de cisaillement interlaminaire



Eprouvette après essai de cisaillement interlaminaire

III) Résultats obtenus (Vieillessement Avec Charge)

Evolution des propriétés en traction



- Influence du couple charge/température sur les cinétiques de dégradation.
- Rupture sous fluage à 40°C/40% de la résistance moyenne en traction.
- Pas d'impact sur le module élastique.

IV) Conclusions

- . Armatures composites = alternative possible aux armatures métalliques avec un référentiel disponible pour la caractérisation et le dimensionnement de solutions avec ce type d'armatures,
- . Bien qu'on dispose d'un REX > 25 ans à l'étranger, il est encore nécessaire d'avancer sur le sujet de la compréhension/quantification de la durabilité, notamment sur l'influence du milieu alcalin (conditionne les coefficients partiels de sécurité pour le dimensionnement) !
- . Bonne reproductibilité de l'ensemble des mesures réalisées (maîtrise du process de fabrication des armatures), mais besoin d'un contrôle qualité renforcé de la Tg,
- . Etude de vieillissement sans charge après 540 jours en milieu indirect (avec enrobage béton):
 - Peu de dégradation visible de la microstructure,
 - Pas d'évolution du module élastique en traction (souvent dimensionnant),
 - Pas de dégradation de la température de transition vitreuse,
 - Pas de dégradation de la résistance au cisaillement interlaminaire,
 - Diminution de la résistance en traction à 60°C (lien avec le coefficient environnemental utilisé pour la détermination de la valeur de calcul de la résistance en traction + impact de la température de service => guide AFGC)

.Etude de vieillissement avec charge pour 20 et 40% de la résistance ultime :

- Pas d'évolution du module élastique longitudinal.
- Forts impacts du couple charge appliquée/température sur les cinétiques de dégradation de la résistance en traction (quelques ruptures sous fluage obtenues dès 40°C).
- Questionnement sur les protocoles d'essais présentés dans la littérature (maintien de déformation constante au lieu d'un effort constant).
- Lien avec les limitations en contraintes des règlements actuels (25% de la résistance caractéristique pour l'ELS quasi permanent=> guide AFGC).

V) Perspectives

- Poursuite des investigations sous charge en réalisant des essais pour des niveaux de charge plus faibles et des durées plus longues avec d'autres armatures disponibles,
- Poursuite des investigations pour mieux comprendre les mécanismes de dégradation chimiques et du couplage dégradations chimiques/dégradations mécaniques,
- Investigations en parallèle sur le sujet de l'adhérence armature composite/béton,
- Besoin d'essais sur prototypes permettant de réaliser des vieillissements sur site pour estimer les corrélations entre études en laboratoire et vieillissement sur site.

Pour aller plus loin!

A. Rolland, « Comportement mécanique et durabilité de structures en béton renforcées par des armatures composites internes », Thèse de Doctorat, Université Paris Est, 2015.

AFGC, « Documents scientifiques et techniques : Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé », 2021.

N. Delaplanque, « Durabilité des armatures composites en PRF (Polymère Renforcé de Fibres) et des structures en béton armé par PRF soumises à un vieillissement sous charge », Thèse de Doctorat, Université Gustave Eiffel, 2023.

A. Rolland, M. Quiertant, A. Khadour, S. Chataigner, K. Benzarti, P. Argoul, Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars,, Construction and Building materials, Vol.173, pp.136-148, 2018.

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, article 117160, 2020.

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.

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, EWSHM 2022, Palerme, Italy.

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, Under review, 2024.

Merci de votre attention



S. Chataigner

sylvain.chataigner@univ-eiffel.fr