

Fiabilité et viabilité de polymères renforcés de fibres de lin pour la réparation d'ouvrages en béton armé

David Bigaud¹, Hassen Riahi¹, Karim Benzarti²

¹ Univ Angers, LARIS, SFR MATHSTIC, F-49000 Angers, david.bigaud@univ-angers.fr et hassen.riahi@univ-angers.fr

² Navier Lab, Univ Gustave Eiffel, ENPC, CNRS, F-77447 Marne-la-Vallée, karim.benzarti@univ-eiffel.fr

RESUME Les polymères renforcés de fibres (PRF) à base de fibres de carbone ou de verre sont des solutions efficaces pour la réparation des ouvrages de génie civil. Afin d'apporter une solution plus responsable sur le plan environnemental, nous étudions la durabilité et la fiabilité de PRF à base de fibres de lin (PRF-L). Une campagne d'essais de dégradation accélérée à deux facteurs, température et humidité, sur une période de trois ans a été menée. Des modèles de dégradation des caractéristiques en traction, cisaillement et arrachement considérant la compétition de deux mécanismes physiques sont développés. Sur cette base, les coefficients de réduction environnementale et de sécurité, présents dans le formalisme de trois guides de conception internationaux, sont calibrés en tenant compte de l'influence des conditions climatiques. La conclusion majeure consiste à démontrer la comparabilité des coefficients de réduction environnementale des PRF-L par rapport aux fibres de carbone et de verre.

Mots-clefs Composites, Fibres de lin, Fiabilité, Renforcement, Béton armé

I. INTRODUCTION

Les polymères renforcés de fibres (PRF), à base de fibres de carbone (PRF-C) ou de verre (PRF-V), sont utilisés depuis près de 30 ans [1] pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages du génie civil. Cependant, la fabrication de ces matériaux a une forte empreinte environnementale. Afin de proposer une autre option, certains travaux s'intéressent au potentiel des PRF à fibres naturelles [2]. Ces travaux sont consacrés principalement à l'amélioration de la formulation des PRF et des performances à court terme de ces matériaux alternatifs. Encore peu sont consacrés à l'étude de leurs propriétés à long terme. Les fibres de lin sont connues pour présenter de bonnes propriétés mécaniques spécifiques [3], sont largement disponibles en Europe et le sont encore plus dans les régions tempérées et subtropicales. Cependant les PRF à fibres de lin (PRF-L) ont une résistance et une rigidité plus faibles que les solutions basées sur des fibres synthétiques. Pour considérer la fibre de lin comme une alternative viable, il est nécessaire d'étudier le comportement des PRF-L sous les contraintes typiques auxquelles sont soumis les ouvrages de génie civil en service. L'extension attendue de leur durée de vie après renforcement par PRF est de plusieurs années – 20 à 100 ans - et le maintien de la capacité de renforcement sur cette durée dépend évidemment des propriétés à long terme des PRF utilisés. Il n'existe pas de retour d'expérience d'une ou deux décennies sur les PRF-L et il est impensable de réaliser des essais sur de longues durées. Une autre voie est de réaliser des essais accélérés en aggravant un ou plusieurs facteurs influençant la vitesse du vieillissement sous conditions environnementales. Des études antérieures ont montré que les PRF soumis à des

conditions de vieillissement hygrothermique peuvent subir divers processus de dégradation, avec des effets antagonistes ou synergiques sur les propriétés physiques et mécaniques du PRF [4]. Il est difficile alors d'établir un modèle de dégradation des performances qui intègre les effets des paramètres d'accélération, car les influences de ces derniers peuvent être non linéaires, ou les effets du couplage peuvent être variables en fonction du niveau des paramètres. Pour capturer toutes ces influences, compte tenu du temps d'expérimentation et pour des raisons d'optimisation économique, un plan de Hoke D1 à deux facteurs a été utilisé ici pour déterminer le modèle de dégradation qui, une fois caractérisé, permet de calibrer les coefficients de réduction environnementale et de sécurité que l'on retrouve dans trois codes de dimensionnement.

II. ESSAIS DE DÉGRADATION ACCÉLÉRÉS SUR LES PRF-L

A. Matériaux et conditions d'essais

Un vaste programme expérimental a été mené dans le cadre du projet ANR MICRO (ANR-15-CE22-0007-04). Le PRF-L de l'étude est un tissu unidirectionnel (UD) de fibres de lin, imprégné d'une matrice époxy biosourcée, fourni par la société française Groupe Depestele. La matrice époxy est un système bi-composant composé d'une résine biosourcée à 30% d'éther-DGEBA et d'un agent de durcissement amine 100% biosourcé dérivé du cardanol. Différents types de spécimens ont été fabriqués pour le programme expérimental réalisé par Chlela [5]:

- Des plaques composites UD en lin/bio-époxy, incorporant deux couches de tissus en fibres de lin de 200 g/m², ont été préparées en utilisant la technique de stratification au contact. Les échantillons sont découpés dans ces plaques pour des essais de traction et de cisaillement par flexion trois-points rapprochés.
- Des dalles de béton renforcées par des PRF-L ont également été préparées pour des essais d'adhésion (par arrachement des PRF-L de leur support en béton).

Tous les spécimens (plaques et dalles) ont été divisés en 7 séries placées dans des environnements différents, correspondant soit à des conditions accélérées (6 séries), soit à des conditions de vieillissement naturel (1 série). Les six conditions de vieillissement accéléré ("AAi" pour Accelerated Ageing) sont désignées par AA1 (20°C ; 50% d'humidité relative - HR), AA2 (20°C ; immergé), AA3 (60°C ; 50% HR), AA4 (40°C ; immergé), AA5 (60°C ; 75% HR) et AA6 (60°C ; immergé). Les températures de transition vitreuse des PRF-L après conditionnement à 40°C et 60°C sont évaluées à 70°C et 80°C respectivement après trois mois. Le vieillissement naturel d'échantillons de PRF-L, dans des conditions de vieillissement extérieur, a été entrepris à Lyon par le LMC². Les relevés climatologiques indiquent une température annuelle moyenne de 12,8°C et une humidité relative moyenne de 72,5%.

B. Essais

80 plaques rectangulaires en PRF-L et 40 dalles en béton armé avec PRF-L ont été préparées et conditionnées dans des chambres climatiques et des bains thermostatiques. Une totalité de 76 essais de traction (pour la capacité ultime en traction F_f et la rigidité tangentielle en traction K_f), 126 essais sur poutre courte (pour la résistance en cisaillement V_c) et 124 essais d'arrachement (résistance σ_p) ont été réalisés. Plus de détails sur les processus de test sont décrits dans [6].

C. Résultats des essais accélérés

Dans les figures 1a à 1d sont représentées les évolutions des différents indicateurs de performance normalisés autour de leur valeur moyenne initiale. Les points expérimentaux sont reliés entre eux par des courbes continues (en pointillés). Les courbes en traits épais sont obtenues par application du modèle utilisé dans l'étape de pré-traitement des données (équations 1a-c) qui permet, par sa forme, de reproduire un des trois profils typiques présentés dans la figure 2. Le premier profil correspond à une augmentation initiale de la performance suivie d'une dégradation différée après un pic (profil A). Ce profil est considéré comme représentatif, par exemple, de la force de traction F_f dans les conditions de vieillissement non immergées (voir la courbe en trait épais jaune de la figure 1a). Le deuxième profil (B) montre une diminution initiale des performances suivie d'une augmentation avant une nouvelle diminution. Un exemple de ce profil peut être trouvé dans la figure 1d pour la résistance à l'arrachement σ_p dans des conditions de vieillissement en immersion (voir la courbe en trait épais vert de la figure 1d). Ce phénomène, diminution-augmentation-diminution, a également été observé par Mukhtar *et al.* [7] pour la performance d'adhésion PRF-béton dans des conditions hygrothermiques accélérées. Le troisième profil correspond à un déclin continu des performances (C). Ce profil est représentatif pour la résistance au cisaillement V_c dans des conditions de vieillissement immergé (voir la courbe en trait épais bleu de la figure 1c).

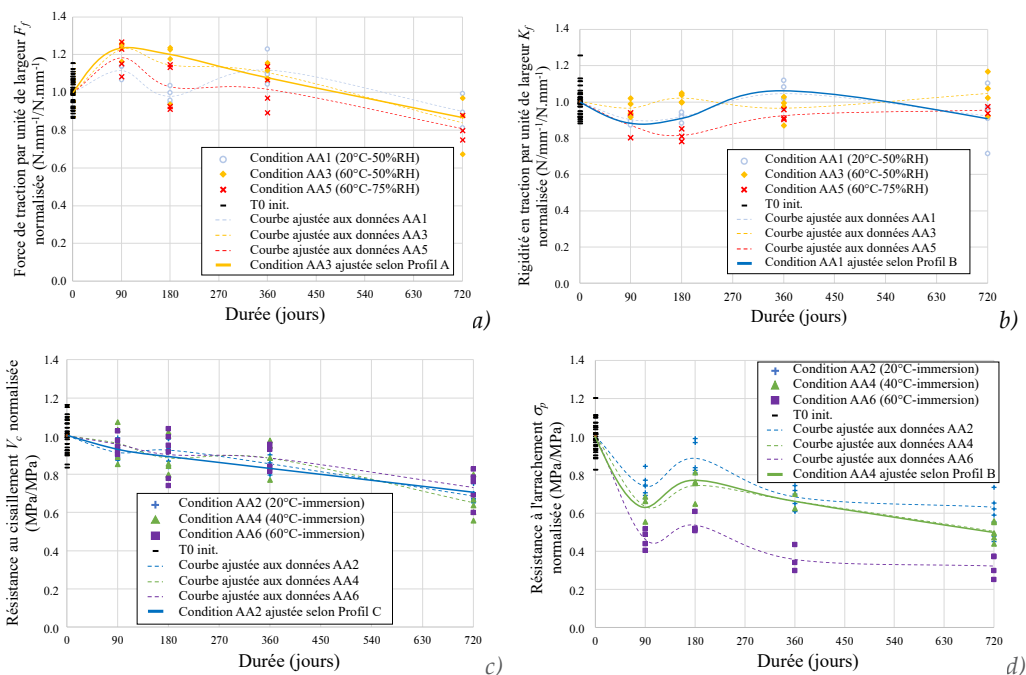


FIGURE 1. Résultats des essais de vieillissement accéléré sur (a) F_f puis (b) K_f pour des conditions non immergées AA1, AA3, AA5 - (c) V_c puis (d) σ_p pour des conditions immergées AA2, AA4, AA6.

Une telle variété de profils de dégradation n'était pas envisagée, néanmoins, il faut tirer le meilleur parti de ces données brutes pour définir un modèle de prédiction de durée de vie pour diverses conditions environnementales. Le défi est de trouver un formalisme mathématique unique qui puisse s'adapter, par l'estimation de ses paramètres, aux trois profils observés. Deux mécanismes de vieillissement concurrents seront considérés pour rendre compte des observations, et seule la partie associée à la dégradation sera retenue pour la prédiction de la durée de vie.

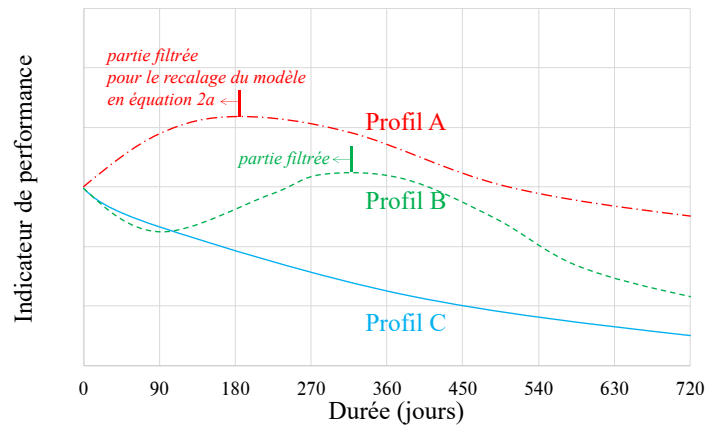


FIGURE 2. Profils typiques des courbes de vieillissement.

III. MODÈLES DE DÉGRADATION EN FONCTION DES CONDITIONS DE TEMPÉRATURE ET D'HUMIDITÉ RELATIVE

A. Modèles empiriques

Les modèles empiriques permettant l'estimation des indicateurs de performances F_f , K_f , V_c et σ_p sont construits en deux étapes. Dans une première, un modèle à deux mécanismes - correspondants aux branches a_{p_i} et d_{p_i} dans l'équation 1a - est ajusté pour reproduire les trois profils observables de dégradation. Dans une seconde étape, ce modèle est filtré afin d'éliminer la partie des courbes de dégradation avant pic, soit avant complète polymérisation de la matrice (voir figure 2).

Le modèle à deux mécanismes de la première étape adopte la forme :

$$\mathcal{N}_{P_i}(t) = \frac{P_i(t)}{\bar{P}_0} = 1 + a_{p_i}(t) - d_{p_i}(t) \quad (1a)$$

$$\text{avec } a_{p_i}(t) = \alpha_p \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{p_i}} \right) \right] \right\} \text{ pour la branche ascendante} \quad (1b)$$

$$\text{et, } d_{p_i}(t) = \delta_{p_i} \times \log(t + 1) \text{ pour la branche descendante, avec } t \in [0, +\infty[\quad (1c)$$

Dans les équations 1a-c, $P_i(t)$ est l'indicateur de performance suivi au temps t (en jours) pour la condition de vieillissement AAi ($i=1, \dots, 6$). \bar{P}_0 est la valeur moyenne initiale de l'indicateur de performance (à $t=0$). $\mathcal{N}_{P_i}(t)$ est donc l'indicateur de performance normalisé. Le paramètre α_p dans l'équation (1b) de la branche ascendante est un terme positif lié à la valeur maximale théorique atteignable pour un indicateur de performance donné si la polymérisation était complète. Le niveau théorique de polymérisation complète est supposé être spécifique au type de polymère et indépendant des conditions environnementales. Le paramètre τ_{p_i} dans l'équation (1b) est un facteur d'échelle, dépendant des conditions environnementales, associé à la durée des phénomènes de polymérisation. Le paramètre δ_{p_i} dans l'équation (1c) est relié à la vitesse de dégradation (en $\log(t)$).

Une fois les modèles complets de dégradation ajustés selon la loi de l'équation 1a (voir les courbes en traits continus épais dans les figures 1a-d), la seconde étape consiste à recalibrer la courbe en filtrant la partie avant pic. Ce recalage est suivi de l'ajustement des courbes de dégradation filtrée par un modèle avec une seule branche descendante du type :

$$\mathcal{N}_{P_i}^{corr}(t) = 1 - d_{p_i}^{corr}(t) \quad (2a)$$

Dans la littérature, la branche descendante présente souvent la forme traditionnelle $d_{P_i}^{corr}(t) = \delta_{P_i}^{corr} \times \log(t + 1)$. Une forme modifiée est proposée ici :

$$d_{P_i}^{corr}(t) = \delta_{P_i}^{corr} \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{\delta_{P_i}^{corr}}} \right)^{\beta_{\delta_{P_i}^{corr}}} \right] \right\} \times [\log(t + 1)], \text{ et } t \in [0, +\infty[\quad (2b)$$

Le multiplicateur entre crochets permet de considérer que le taux de dégradation observé peut être quasi nul au début des courbes de dégradation et augmenter progressivement au cours du temps pour se stabiliser à la valeur $\delta_{P_i}^{corr}$ à long terme. Le paramètre $\tau_{\delta_{P_i}^{corr}}$ est un facteur d'échelle de temps. Le paramètre $\beta_{\delta_{P_i}^{corr}}$ est utile pour un meilleur ajustement des données au début des courbes.

B. Influences des conditions de vieillissement sur les paramètres $\delta_{P_i}^{corr}$, $\tau_{\delta_{P_i}^{corr}}$ et $\beta_{\delta_{P_i}^{corr}}$

Les observations expérimentales ont prouvé que les mécanismes liés au vieillissement des PRF-L sont complexes et produisent des effets parfois synergiques, mais également antagonistes au cours du temps. Eyring a proposé une loi représentant l'influence de la température combinée avec de multiples contraintes supplémentaires. Etant donné la complexité des expressions des interactions entre contraintes, la loi d'Eyring n'est utilisée que pour considérer l'effet conjoint de la température T et d'une autre contrainte unique s (humidité, contrainte mécanique, contrainte électrique, etc.). La cinétique de dégradation est alors exprimée sous la forme générale par :

$$v(T, s) = \exp \left(A_v + \frac{B_v}{T} \right) \cdot \exp \left[f(s) \cdot \left(C_v + \frac{D_v}{T} \right) \right] \quad (3)$$

où $v(T, s)$ peut représenter les paramètres $\delta_{P_i}^{corr}$, $\tau_{\delta_{P_i}^{corr}}$ ou $\beta_{\delta_{P_i}^{corr}}$ de l'équation 2b, et où la contrainte s est l'humidité relative H . A_v , B_v , C_v et D_v sont des constantes spécifiques. T est exprimé en Kelvin (K) et H en pourcentage (%).

Dans le cas ici où la contrainte s correspond à l'humidité relative H , la loi d'Eyring prend la forme :

$$v(T, H) = \exp \left(A_v + \frac{B_v}{T} + C_v \cdot H + D_v \cdot \frac{H}{T} \right) \quad \text{avec } f(s) = H \quad (4)$$

Cette forme introduit un couplage possible entre les effets de la température et de l'humidité.

Les figures 3a et 3b confrontent, à titre d'illustration les données observées et les courbes du modèle corrigées pour la force de traction F_f sous les conditions de vieillissement AA1 et AA6. La qualité de la corrélation est variable et les deux cas des conditions AA1 et AA6 montrent deux situations extrêmes (corrélation médiocre pour AA1, bonne pour AA6). Cette corrélation reste satisfaisante au global sous les six conditions d'essais.

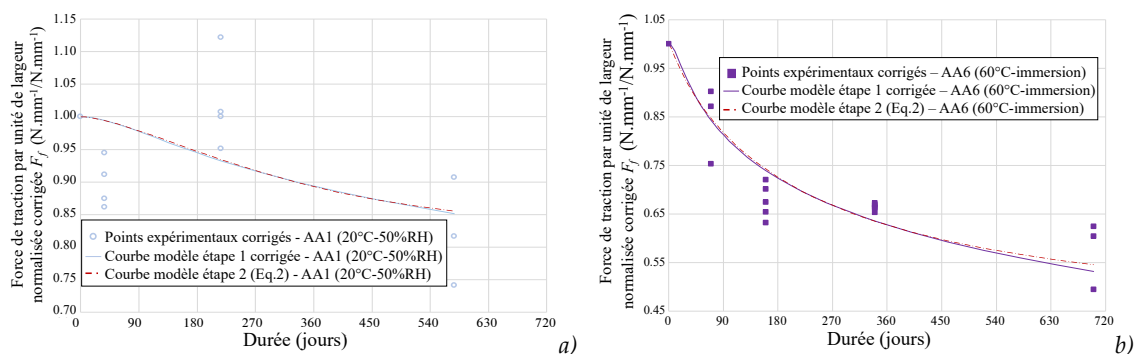


FIGURE 3. Comparaison entre les données observées décalées et les courbes du modèle corrigé pour l'indicateur de performance F_f dans les conditions de vieillissement (a) AA1, et (b) AA6.

Pour conclure cette discussion sur le modèle corrigé, des comparaisons entre les courbes simulées fournies par les modèles corrigés et les données collectées en vieillissement naturel sont proposées à titre d'illustration en figures 4a-b pour les indicateurs F_f et V_c .

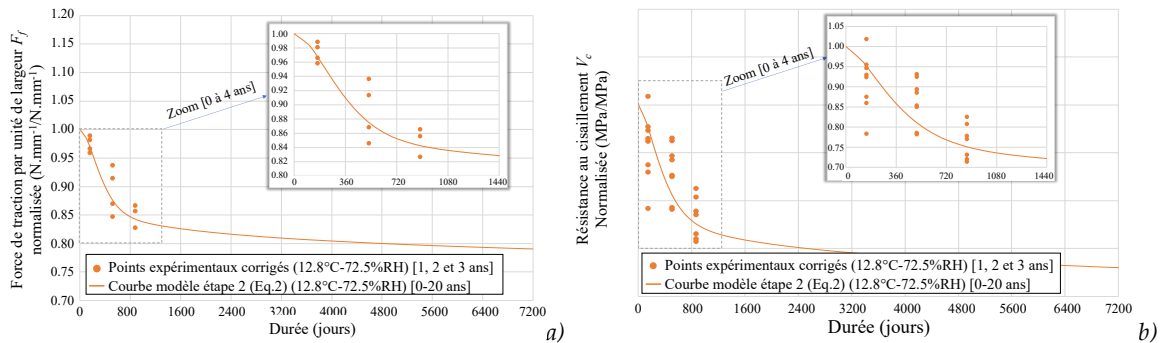


FIGURE 4. Comparaison entre les observations et les modèles corrigés pour le vieillissement naturel à Lyon, FR [12.8°C-72.5%RH] (a) pour F_f puis (b) V_c jusqu'à 20 ans.

Les comparaisons entre les modèles et les données sont satisfaisantes pour F_f , V_c et σ_p , moins pour K_f . Dans la suite, nous limitons notre étude à l'indicateur F_f .

IV. DEGRADATION ET DESIGN SOUS CONDITIONS CLIMATIQUES VARIABLES

A. Dégradation sous différentes conditions climatiques

Les conditions climatiques annuelles moyennes (\bar{T} et \bar{H}) d'un échantillon de 400 villes (140 d'entre elles sont représentées dans la figure 5a) ont été collectées [8] et comparées en termes de dégradations simulées sous conditions de température et humidité déterministes (\bar{T} et \bar{H}). Les villes dont la température annuelle moyenne \bar{T} est inférieure à 5°C sont exclues de l'analyse afin d'éviter une extrapolation éloignée de la condition de référence AA1 [20°C-50%RH]. La température annuelle moyenne \bar{T} varie entre 5°C et 30,6°C et l'humidité relative \bar{H} entre 30,6 et 85,2%. La figure 5a montre une subdivision de la carte en six zones climatiques ; subdivision inspirée de valeurs choisies par les codes de dimensionnement. La figure 5b montre les courbes de dégradation simulées de l'indicateur F_f sur une période de 20 ans pour 10 villes représentatives des zones climatiques considérées. Les simulations confirment logiquement que les dégradations les plus faibles de F_f seraient observées sous un climat continental froid et sec comme à Harbin. En revanche, c'est sous un climat chaud et humide (e.g., Singapour) que la dégradation des performances serait la plus marquée. Après 100 ans, la baisse de performance serait d'environ 20% et 35% pour Harbin et Singapour respectivement. La dégradation serait donc environ 40% moins importante dans un climat froid et sec (continental) que dans un climat chaud et humide (équatorial). Autrement dit, la conception d'un PRF-L pour un mode de défaillance impliquant l'indicateur de performance F_f sera beaucoup plus sévère pour les applications sous climat équatorial. Les résultats des simulations montrent également que les villes de Lyon, FR ($\bar{T}=12,8^\circ\text{C}$; $\bar{H}=72,5\%$) et Los Angeles, USA (17,6°C ; 52,7%), même si elles ont des conditions climatiques différentes, présentent des courbes de dégradation similaires. L'équivalence de la dégradation dans les villes de Saint-Georges, USA (17,7°C ; 30,6%) et Stanley, Falkland Islands (5,6°C ; 83%) est encore plus remarquable, même si elle est logique au regard des tendances observées expérimentalement.

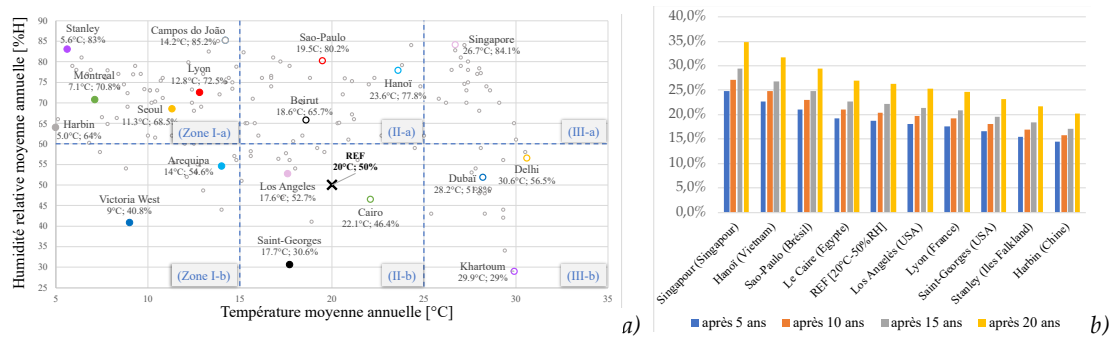


FIGURE 5. Conditions moyennes annuelles de température et d'humidité dans différentes villes du monde, subdivisées en 6 zones climatiques (a), et, évolution à long-terme de l'indicateur F_f sous différentes conditions climatiques.

B. Calibration de coefficients de réduction sous différentes conditions climatiques

Les guides de conception internationaux proposent des recommandations pour les PRF à base de fibres de carbone, de verre ou d'aramide, mais il n'en existe aucune pour les systèmes à base de fibres naturelles. Cette lacune doit être comblée. En outre, comme l'ont montré les sections précédentes, la dégradation dans le temps des PRF-L est fortement influencée par les conditions de température et d'humidité. Il est donc pertinent de proposer des facteurs de réduction environnementale et de sécurité dépendant du climat pour les durées de vie cibles et les probabilités de défaillance. Cela n'est pas proposé dans tous les guides de conception.

Dans la présente étude, trois guides de conception internationaux – le Fib Bulletin 40 [9], le code ACI 440.2R 2017 [10] et le guide de l'AFGC [11] - ont été sélectionnés (voir le tableau A1 en Annexe pour la définition des principaux paramètres et facteurs des équations de dimensionnement). Ils sont tous différents dans leurs approches. Le Fib Bulletin 40 considère deux facteurs de réduction : l'un, $\eta_{env,t}$, est variable en fonction de la durée de vie souhaitée uniquement, et l'autre, γ_f , dépend du niveau de fiabilité visé à la fin de la durée de vie. L'ACI 440.2R 2017 fusionne les deux concepts en un seul et propose un coefficient de réduction unique, C_E , qui est variable en fonction de la durée de vie et de la fiabilité souhaitées. Le guide de l'AFGC ne présente pas explicitement l'approche probabiliste, mais elle est sous-jacente ; sont considérés deux coefficients : un facteur de réduction environnemental, α_f , fonction de la durée de vie souhaitée, et un facteur de réduction partielle de la résistance à la traction, $\gamma_{f,d}$, pour un niveau de fiabilité ciblé en fin de vie.

Le processus de calibration des coefficients présents dans les différentes équations de dimensionnement est présenté en détail dans [12]. La finalité est de proposer différentes valeurs de ces coefficients selon la durée de vie souhaitée, le niveau de fiabilité ciblé, la qualité de la fabrication des PRF-L et des conditions de température et d'humidité relative représentatives de la localisation géographique de l'ouvrage à renforcer ou réparer. Un extrait des recommandations issues du projet ANR MICRO, pour le dimensionnement vis-à-vis de modes de défaillance mettant en jeu la résistance en traction du PRF-L est donné dans le tableau A1 porté en Annexe. Dans cet extrait sont présentés les coefficients de réduction des trois guides, pour une durée de vie souhaitée T^* de 100 ans, un indice de fiabilité requis β pris à 3 et pour les 6 zones climatiques prédéfinies.

Il est intéressant de comparer les valeurs estimées des coefficients pour les PRF-L de notre étude avec celles proposées par les codes pour les PRF-C et PRF-V. Le Fib Bulletin 40 prescrit une valeur

de 1,29 pour son coefficient de réduction environnementale $\eta_{env|0.5,100y}$ dans le cas des PRF-C et de 4,16 dans le cas des PRF-V. Pour le PRF-L, la présente étude conclut à une valeur comprise entre 1,28 et 1,52 en fonction des conditions climatiques. Ce coefficient de réduction est assez proche de celui prescrit pour les PRF-C. Cette proximité ne signifie pas que la fibre de lin est aussi performante que celle de carbone, car la résistance absolue de la première sera toujours inférieure à celle de la seconde, mais que leurs taux de dégradation dans le temps par rapport à la performance initiale sont comparables. En ce qui concerne le facteur de réduction partielle du matériau, $\gamma_{f|1.35E-3}$, la présente étude recommande d'adapter sa valeur en fonction de la qualité de fabrication du PRF-L : 1,08 à 1,72 pour un coefficient de variation pour F_f , CoV_{f_f} , de 5% à 20%. Quel que soit le type de fibres (C ou V), le Fib Bulletin 40 prescrit une valeur de 1,25, ce qui correspond à un CoV_{f_f} de 10%. Les résultats de la présente étude sont donc cohérents avec les prescriptions de la Fib. La comparaison avec le guide ACI conduit aux mêmes conclusions. Enfin, concernant le guide de l'AFGC, il faut noter l'écart important entre nos valeurs estimées de $\gamma_{f_d|1.35E-3}$ pour le PRF-L et celles prescrites par l'AFGC. Cet écart important est principalement dû au formalisme atypique (erroné) de l'équation de calcul du guide AFGC, qui n'intègre pas explicitement l'influence du coefficient de variation dans le calcul de la résistance de calcul, contrairement aux trois autres guides étudiés.

V. CONCLUSION

L'objectif principal du présent travail était de prouver la viabilité de l'utilisation de PRF-L à base d'une résine biosourcée pour le renforcement d'ouvrages. Pour la qualification à long terme de leurs performances mécaniques, des essais de vieillissement accéléré à deux facteurs ont été menés et un modèle physique temps-température-humidité relative "t-T-RH" a été proposé. Sur la base de ce modèle, les coefficients de réduction environnementale et de sécurité partielle présents dans trois codes de dimensionnement représentatifs ont été calibrés pour le cas des PRF-L. Il a été proposé de prendre en compte différentes zones climatiques pour la conception correcte des éléments en PRF-L, ce qui n'est pas systématiquement proposé dans les codes actuels et qui, selon nous, constitue une grande contribution aux communautés d'ingénieurs et de scientifiques.

La gamme des coefficients (ré)étalonnés est assez proche de celle spécifiée dans les principaux codes pour les cas des fibres de carbone et de verre plus traditionnelles, à la fois pour les coefficients de réduction environnementale et pour les coefficients de sécurité partielle. La comparabilité des coefficients de réduction environnementale entre les PRF-L et les PRF-C ou -V traditionnels reflète le fait que, même si leurs performances initiales sont intrinsèquement inférieures à celles des fibres de carbone et de verre, la dégradation des fibres de lin n'obère pas leur potentiel d'exploitation en tant que solution de renforcement ou de réparation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) pour son soutien important à travers le contrat n°ANR-15-CE22-0007-04 - "MICRO : Matériaux Innovants Composites pour la Réparation d'Ouvrages".)

REFERENCES

- [1] Siddika, A. Al Mamun, W. Ferdous, & R. Alyousef. (2020). Performances, challenges, and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, 111, 104480. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104480.
- [2] P.P. Bijlwan, L. Prasad, & A. Sharma. (2021) Recent advancement in the fabrication and characterization of natural fibre reinforced composite: A review. *Materials Today: Proceedings*, 44(1), 1718-22. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.878.
- [3] A. Hallonet, E. Ferrier, L. Michel, & B. Benmokrane. (2019). Durability and tensile characterization of wet lay-up flax FRP used for external strengthening of RC structures. *Construction and Building Materials*, 205, 679–98. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02. 040.
- [4] C. Helbling, M. Abanilla, L. Lee, & V.M. Karbhari. (2006). Issues of variability and durability under synergistic exposure conditions related to advanced polymer composites in the civil infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1102-10. doi: 10.1016/j.compositesa.2005.05.039.
- [5] R. Chlela. (2019). Durabilité d'un système composite biosourcé (matrice époxy-fibres de lin) pour applications de renforcement structural : Approches expérimentale et fiabiliste. Doctorat de l'Université Paris-Est. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02894653/document>.
- [6] R. Chlela, D. Bigaud, H. Riahi, M. Quiertant, L. Curtil, & K. Benzarti. (2022). Durability and Lifetime Prediction of Flax Fiber Reinforced Polymer Composites, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 198, 695-705. doi: 10.1007/978-3-030-88166-5_60.
- [7] F.M. Mukhtar & A. Peiris. (2020). FRP-concrete bond performance under accelerated hygrothermal conditions. *Construction and Building Materials*, 270, 121403. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121403.
- [8] <https://en.climate-data.org/>. consulté en Décembre 2021.
- [9] Fib Bulletin 40. (2007). FRP reinforcement in RC structures, 151 p. doi: 10.35789/fib.BULL. 0040.
- [10] ACI Committee 440. (2017). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, 112 p., ISBN: 9781945487590.
- [11] AFGC : Association Française de Génie Civil. (2011). Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites, Bulletin Scientifique et Technique de l'AFGC, 114 p.
- [12] D. Bigaud, W. Yan, H. Riahi, R. Chlela, & K. Benzarti. (2022). Probabilistic calibration of environmental reduction and partial safety factors for the design of reinforced concrete beams strengthened by flax fibre reinforced polymers based on two-factor accelerated degradation tests. *Construction and Building Materials*, 355, 129090. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129090.

ANNEXES

TABLEAU A1. Principes de conception de 3 guides de dimensionnement international avec les facteurs de sécurité et de réduction environnementale correspondants, et, Calibration des facteurs à utiliser pour le dimensionnement des PRF-L (selon ces 3 guides internationaux) pour un niveau cible de probabilité de défaillance $P_f^* = 1.35E-3$ (ou indice de fiabilité $n_\sigma = 3$) et pour une durée de vie désirée $T^* = 100$ ans.

Code ou guide	Formalisme des équations de conception	Définitions des paramètres des équations	Paramètres et coefficients clés	Valeurs des coefficients de réduction environnementaux et de sécurité	Valeurs de référence pour les PRF-C et PRF-V
Fib Bulletin 40 [9]	$f_{td} = \frac{f_k}{\eta_{env 0.5,T^*} \cdot \gamma_{ll} P_f^*}$ $f_k = f_{mo} - 1.56 \times \sigma_{f_0}$ $CoV_{f_r} = \sigma_{f_0} / f_{mo}$	f_{td} : valeur de conception de la résistance en traction du PRF. f_k : résistance réelle dépendante du temps. $\eta_{env 0.5,T^*}$: coefficient partiel de réduction environnemental pour une durée de vie désirée T^* . $\gamma_{ll} P_f^*$: coefficient partiel de sécurité pour une probabilité de défaillance cible P_f^* . f_{mo} : résistance en traction moyenne à l'état limite ultime au temps initial $t=0$. σ_{f_0} : écart-type de la résistance en traction. CoV_{f_r} : coefficient de variation.	$\mu_{f_r 0.5,T^*} = \frac{f_r(T^*)}{f_{mo}} = \frac{1}{\gamma_{ll} P_f^*} = \frac{1}{\gamma_{ll} \times CoV_{f_r}}$ $n_\sigma = \frac{\gamma_{ll} - 1}{\gamma_{ll} \times CoV_{f_r}}$ $\gamma_{ll} P_f^* = \frac{1 - 1.56 \times CoV_{f_r}}{1 - n_\sigma \times CoV_{f_r}}$	Zones climatiques I-a: T ∈ [5;15°C]; H > 60% I-b: T ∈ [5;15°C]; H ∈ [30;60%] II-a: T ∈ [15;25°C]; H > 60% II-b: T ∈ [15;25°C]; H ∈ [30;60%] III-a: T > 25°C; H > 60% III-b: T > 25°C; H ∈ [30;60%]	Exemples de facteurs de réduction standard pour 100 ans, environnement humide (exposition extérieure) avec une température moyenne comprise entre 5°C et 15°C. PRF-C: $\eta_{env 0.5,T^*} = 1.29$; $\gamma_{ll} = 1.25$ PRF-X: $\eta_{env 0.5,T^*} = 4.16$; $\gamma_{ll} = 1.25$
ACI 440 2R-17 [10]	$f_{fu} = C_{p1} 1.35E-3 T^* \times f_{fu}^*$ $f_{fu}^* = f_{fu0} - 3 \times \sigma_{f_0}$ $CoV_{f_r} = \sigma_{f_0} / f_{fu0}$	f_{fu} : valeur de conception de la résistance en traction du PRF. f_{fu}^* : résistance réelle dépendante du temps. $C_{p1} 1.35E-3 T^*$: coefficient de réduction environnemental garantissant une probabilité de défaillance égale à $1.35E-3$ au terme de la durée de vie désirée T^* . f_{fu}^* : valeur caractéristique de la résistance en traction. f_{fu0} : résistance en traction moyenne à l'état limite ultime au temps initial $t=0$. σ_{f_0} : écart-type de la résistance en traction. CoV_{f_r} : coefficient de variation.	$\mu_{f_r 0.5,T^*} = \frac{f_{fu}(T^*)}{f_{fu0}} = \frac{f_{fu}(T^*)}{f_{fu0}}$ $C_{p1} P_f^* T^* = \frac{1 - n_\sigma \times CoV_{f_r}}{1 - 3 \times CoV_{f_r}} \times \mu_{f_r 0.5,T^*}$	Zones climatiques I-a: T ∈ [5;15°C]; H > 60% I-b: T ∈ [5;15°C]; H ∈ [30;60%] II-a: T ∈ [15;25°C]; H > 60% II-b: T ∈ [15;25°C]; H ∈ [30;60%] III-a: T > 25°C; H > 60% III-b: T > 25°C; H ∈ [30;60%]	Exemples de coefficients de réduction environnemental standard pour exposition extérieure (ponts, piliers et garages de stationnement non fermés) à long terme (100 ans) Pour une exposition extérieure, les effets de la température sont inclus dans les valeurs de C_p . PRF-C: $C_{p1} 1.35E-3 T^* = 0.85$ PRF-X: $C_{p1} 1.35E-3 T^* = 0.65$
Guide de l'AFGC [12]	$f_{fu,d} = \frac{f_{fu0} \times \alpha_{f_0 0.5,T^*}}{\gamma_{ll} P_f^*}$	$f_{fu,d}$: valeur de conception de la résistance en traction du PRF. f_{fu0} : résistance en traction réelle dépendante du temps. $\alpha_{f_0 0.5,T^*}$: coefficient de réduction environnemental pour une durée de vie désirée T^* . $\gamma_{ll} P_f^*$: coefficient partiel de réduction de la résistance en traction pour une probabilité de défaillance cible P_f^* .	$\mu_{f_r 0.5,T^*} = \frac{f_{fu}(t)}{f_{fu0}} = \frac{\alpha_{f_0 0.5,T^*}}{\gamma_{ll} P_f^*}$ $n_\sigma = \frac{\gamma_{ll} P_f^* - 1}{\gamma_{ll} P_f^* \times CoV_{f_r}}$ $\gamma_{ll} P_f^* = \frac{1}{1 - n_\sigma \times CoV_{f_r}}$	Zones climatiques I-a: T ∈ [5;15°C]; H > 60% I-b: T ∈ [5;15°C]; H ∈ [30;60%] II-a: T ∈ [15;25°C]; H > 60% II-b: T ∈ [15;25°C]; H ∈ [30;60%] III-a: T > 25°C; H > 60% III-b: T > 25°C; H ∈ [30;60%]	Exemples de facteurs de réduction standard pour exposition extérieure à long terme (100 ans) PRF-C: $\alpha_{f_0 0.5,T^*} = 0.8$ PRF-X: $\alpha_{f_0 0.5,T^*} = 0.8$

* le coefficient de sécurité partiel dépend fondamentalement de la variabilité des performances (ici F_p) et donc est relié à la qualité de la fabrication du PRF. La première valeur de l'intervalle donné est estimée pour un coefficient de variation de 5% (ce qui correspondrait à une qualité supérieure de fabrication), la seconde valeur est estimée pour un coefficient de variation de 20% (qualité inférieure de fabrication). Les codes Fib Bulletin 40 et ACI 440 2R-2017 considèrent par défaut une valeur intermédiaire de 10% pour le coefficient de variation.