



HAL
open science

Utilisation d'armatures composites pour le béton armé : présentation du guide de recommandations de l'AFGC

Sylvain Chataigner, Laurent Michel, Karim Benzarti, Emmanuel Ferrier,
Elhem Ghorbel, Philippe Jandin, Anthony Pruvost, Marc Quiertant, Arnaud
Rolland

► To cite this version:

Sylvain Chataigner, Laurent Michel, Karim Benzarti, Emmanuel Ferrier, Elhem Ghorbel, et al.. Utilisation d'armatures composites pour le béton armé : présentation du guide de recommandations de l'AFGC. CFGC, AFGC - AUGC, May 2023, Gif sur yvette, France. hal-04331778

HAL Id: hal-04331778

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04331778>

Submitted on 8 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Utilisation d'armatures composites pour le béton armé : présentation du guide de recommandations de l'AFGC

Sylvain CHATAIGNER¹, Laurent MICHEL², Karim BENZARTI³, Emmanuel FERRIER², Elhem GHORBEL⁴, Philippe JANDIN⁵, Anthony PRUVOST⁶, Marc QUIERTANT⁷, Arnaud ROLLAND⁸

¹ Univ Gustave Eiffel, MAST-SMC, Bouguenais, France

² Université Lyon I, LMC2, Villeurbanne, France

³ Univ Gustave Eiffel, Ecole des Ponts, CNRS, Navier, Marne la Vallée, France

⁴ Univ de Cergy Pontoise, L2MGC, Cergy Pontoise, France

⁵ CEREMA, DTecITM, Tomblaine, France

⁶ CEREMA, DTecITM, Champs sur Marne, France,

⁷ Univ Gustave Eiffel, MAST-EMGCU, Marne la Vallée, France

⁸ CEREMA, DTer Ouest, Nantes, France

RESUME L'AFGC (Association Française du Génie Civil) a démarré il y a plusieurs années un groupe de travail visant à proposer des recommandations au niveau national sur l'utilisation des armatures en matériaux composites (PRF) pour le renforcement des ouvrages en béton armé. Ce groupe rassemble des académiques, des centres de recherche, des entreprises, des maîtres d'ouvrage, des bureaux d'étude ou de contrôle, des organismes de certification et des producteurs d'armatures composites. Un guide a été publié en 2021 en s'appuyant sur un état de l'art des référentiels et connaissances existants au niveau international. Celui-ci comprend une première partie consacrée à la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des armatures composites; une seconde partie portant sur leur durabilité et leur comportement vis-à-vis de la température et du feu; une troisième partie abordant la conception et le calcul d'éléments structurels en béton armé d'armatures en matériaux composites, vis-à-vis de la flexion, de l'effort tranchant, du poinçonnement, de la fatigue et du renforcement des poteaux; une quatrième partie présentant des exemples de dimensionnement détaillés; et une cinquième partie dédiée au contrôle qualité de la production des armatures et à leur mise en œuvre sur site. En annexe, quelques cas d'applications réels sont décrits et démontrent la maturité de la solution.

Mots-clefs Armatures composites PRF, recommandations, caractérisation, dimensionnement, durabilité

I. INTRODUCTION

Les armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) ou PRF (Polymères Renforcés de Fibres) peuvent présenter certains avantages vis-à-vis des solutions plus classiques (aciers HA ou aciers inoxydables) : elles peuvent ainsi être non conductrices et amagnétiques pour certaines,

sont plus légères, peuvent présenter des capacités mécaniques intéressantes vis-à-vis de l'application envisagée, et ne sont pas sujettes à la corrosion. Il existe de nombreux travaux et des pré-recommandations au niveau Européen sur l'utilisation de ces armatures pour le béton armé (CNR-DT, 2006 ; Fib, 2007) et au niveau international (CAN/CSA, 2012 ; ACI, 2014 ; AASHTO, 2018). Les commissions de normalisation européennes travaillent également à l'intégration de ces armatures dans le cadre de la révision en cours des Eurocodes. En France à ce jour, il n'existe pas de référentiel qui permettrait aux bureaux d'étude et aux maîtres d'ouvrage d'envisager l'utilisation de ce type d'armatures.

L'AFGC (Association Française du Génie Civil) a créé, il y a plusieurs années, un groupe de travail sur ce sujet visant à proposer des recommandations au niveau national. Ce groupe rassemble des académiques, des centres de recherche, des entreprises, des maîtres d'ouvrage, des bureaux d'étude ou de contrôle, des organismes de certification et des producteurs d'armatures composites. Une première version des recommandations a été finalisée et publiée en 2021.

Les sujets traités dans ce guide sont les suivants : la caractérisation des armatures composites, leur durabilité et leur comportement vis-à-vis de la température ; la conception de structures en béton armé avec armatures composites internes; le contrôle qualité et la mise en œuvre sur site ainsi que le retour d'expérience. Cet article a vocation à illustrer une partie de ces sujets. Nous invitons les lecteurs à se référer au document final pour plus d'informations (AFGC, 2021).

II. CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES ARMATURES COMPOSITES

Les armatures composites considérées dans le guide pour le renforcement du béton armé sont des armatures pultrudées à fibres longues et à matrice organique (Polymère Renforcé de Fibres : PRF). Elles sont fabriquées à partir de deux matériaux dont il convient d'assurer la traçabilité et l'identification : un ensemble de fibres et une matrice polymère.

Quatre principaux types de fibres sont aujourd'hui utilisés : le carbone (PRFC : Polymère Renforcé de Fibre de Carbone), l'aramide (PRFA : Polymère Renforcé de Fibre d'Aramide), le verre (PRFV : Polymère Renforcé de Fibre de Verre) et le basalte (PRFB : Polymère Renforcé de Fibre de Basalte). Pour chacun de ces types de fibre, il existe différentes qualités et donc différentes propriétés. Les propriétés mécaniques de la fibre utilisée ont un impact important sur les propriétés mécaniques finales des armatures (Fig. 1). Le choix de la fibre associée à son ensimage a également une influence sur la durabilité de l'armature.

La matrice a pour rôle d'assurer un transfert des efforts entre les fibres et donc une homogénéité de sollicitation de la section de l'armature, et de protéger celle-ci des conditions extérieures. Les matrices utilisées sont organiques et peuvent être classifiées en deux familles principales de polymères : les thermodurcissables (principalement utilisées actuellement) et les thermoplastiques. Ces dernières ont la capacité d'être malléables à température élevée, mais la fabrication des armatures est plus difficile avec ce type de matrice et il existe peu de retour d'expérience.

Afin d'améliorer les propriétés d'adhérence de l'armature PRF avec le béton, plusieurs techniques développées par les industriels sont utilisées : revêtement de sable sur l'armature, usinage, ajout

de fibre hélicoïdale, traitements mixtes, ... Dans le cas d'un revêtement de sable, notons qu'il est important que ce sable soit compatible avec le milieu cimentaire (Fig.2).

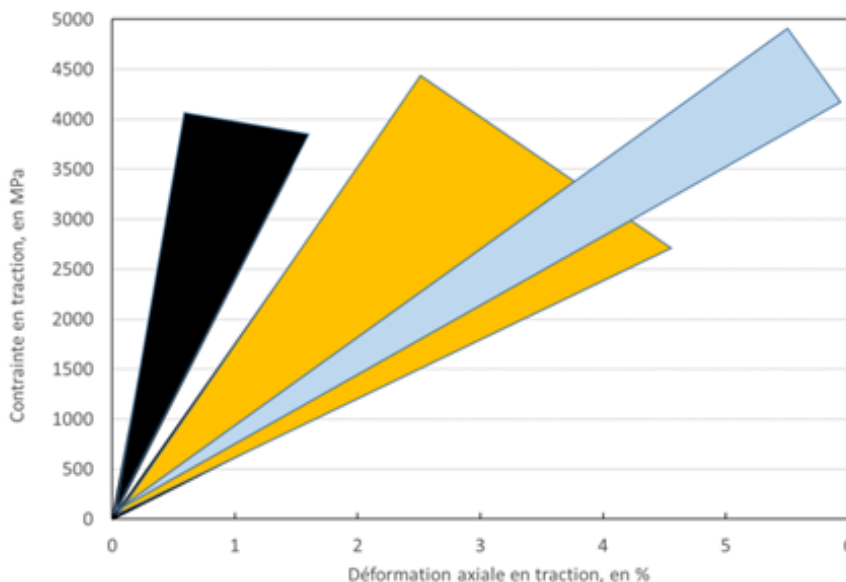


FIGURE 1. Domaines des lois de comportement mécanique en traction des principaux types de fibres utilisés pour la fabrication d'armatures composites (en noir : fibre de carbone, en orange : fibre d'aramide et en bleu ; fibre de verre et de basalte).

Il existe de nombreux procédés pour réaliser des matériaux composites. Dans le cas des armatures PRF pour le renforcement interne du béton, un procédé particulièrement bien adapté et largement utilisé consiste à tirer un ensemble de fibres le long d'une chaîne dite de « pultrusion ». Ces fibres vont passer successivement dans des bains de résines, des trémies permettant d'obtenir la géométrie de section souhaitée et des fours permettant la polymérisation (réticulation) de la résine thermodurcissable. Il s'agit donc d'un procédé en continu permettant la fabrication d'armatures rectilignes. Au cours de ce procédé de pultrusion, certains fabricants opèrent des traitements de surface.

On notera que la pultrusion ne permet pas la réalisation d'armatures courbes, ou d'armatures présentant des ancrages particuliers. Dans ce cas, les procédés de fabrication sont différents.

Le premier chapitre du guide de l'AFGC, dédié à la caractérisation des armatures, décrit un ensemble de méthodes de caractérisation ainsi que des préconisations (protocoles d'essais, valeurs seuils de performances, ...) qui concernent :

- des paramètres microstructuraux : fraction massique de fibres ou taux de fibres, porosité ou taux de vide, absorption d'eau ;
- d'autres paramètres physiques : densité, section effective ;
- des paramètres liés au comportement thermique : coefficients d'expansion thermique (longitudinal et transverse), température de transition vitreuse et degré de réticulation de la matrice ;
- les propriétés mécaniques des armatures : caractéristiques en traction et en compression, résistance au cisaillement transverse et au cisaillement interlaminaire, résistance en flexion ;

- les propriétés des assemblages : adhérence de l'interface armature/béton, résistance des coupleurs et systèmes d'ancrage (armature boutonnée ou barre coudée).

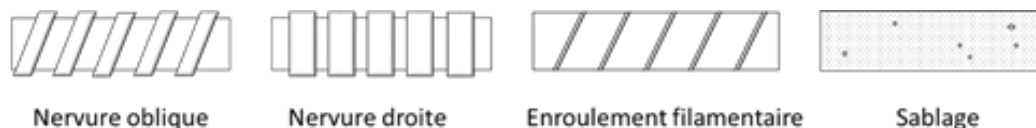


FIGURE 2. Exemple d'états de surface d'armatures PRF commercialisées.

III. DURABILITE DES ARMATURES PRF ET COMPORTEMENT VIS-A-VIS DE LA TEMPERATURE ET DU FEU

De manière générale, les matériaux PRF peuvent subir sous l'action d'agents agressifs extérieurs des altérations de la microstructure de la matrice, des fibres ou encore de l'interface fibre/matrice. Ces altérations peuvent ainsi conduire à des pertes de performances mécaniques significatives. De la même manière, les sollicitations mécaniques à moyen et long terme (fluage, fatigue) peuvent conduire à des endommagements et impacter la durabilité des PRF (Fig.3).

De nombreuses études de laboratoire se sont intéressées à la durabilité des PRFV (matériau présentant le potentiel économique le plus intéressant) au moyen d'essais de vieillissements accélérés, notamment par immersion dans des environnements alcalins (milieu représentatif du béton au jeune âge et potentiellement agressif pour les fibres de verre). Ces études ont permis de mettre au point des procédures d'évaluation et de qualification de la durabilité des armatures. Des développements ont ensuite été réalisés afin de corréliser ces résultats au vieillissement réel sur site. Sur ce point, bien que des avancées importantes aient été réalisées (meilleure représentativité de l'armature noyée, influence d'une charge de fluage appliquée lors du vieillissement), des verrous doivent encore être levés pour être en mesure de proposer des approches fiables prédictives de la cinétique de dégradation de ces armatures sur site. Des études complémentaires sont également nécessaires pour mieux appréhender la durabilité de l'interface PRF/béton.

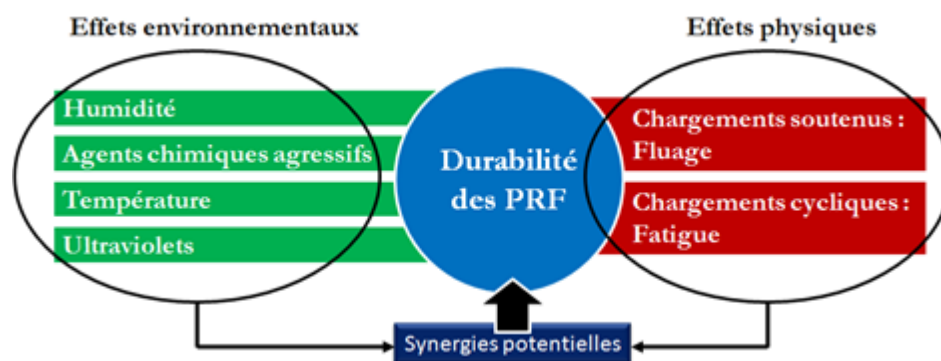


FIGURE 3. Interactions entre facteurs de dégradation environnementaux et mécaniques (ISIS, 2007)

Nous disposons aujourd'hui d'un retour d'expérience d'une vingtaine d'années sur le vieillissement in-situ des PRF dans des ouvrages en service. Il tend à démontrer que les conditions de vieillissement naturel sont bien moins agressives que les vieillissements accélérés de

laboratoire, et met en relief le caractère sécuritaire des référentiels nord-américains sur lesquels nous nous sommes appuyés pour construire ce guide. Par ailleurs, la qualité des armatures ayant fortement évolué depuis ces premières applications en Amérique du Nord, il est probable qu'il sera possible de réviser certains coefficients partiels de sécurité environnementaux lorsque de nouvelles investigations portant sur des durées de vieillissement plus importantes auront été réalisées.

En complément de la réalisation d'un état de l'art plus précis, le second chapitre du guide, dédié à la durabilité et au comportement en température des armatures en PRF, décrit un ensemble de méthodes de caractérisation et de préconisations (protocoles d'essais, valeurs seuils, ...) en ce qui concerne :

- la résistance en fatigue en traction ;
- le comportement en fluage en traction ;
- la sensibilité en milieu alcalin ;
- le comportement vis-à-vis de la température et plus particulièrement la détermination de la température de service maximale et l'évaluation de la résistance au feu.

IV. CONCEPTION ET CALCUL D'ÉLÉMENTS STRUCTURELS EN BETON ARME AVEC DES ARMATURES EN PRF

Le troisième chapitre du guide décrit un ensemble de méthodes de calcul pour :

- la détermination de l'épaisseur d'enrobage des armatures ;
- l'établissement des coefficients de sécurité pour le calcul des résistances des armatures ;
- les justifications en flexion (état limite ultime et état limite de service) ;
- les justifications vis-à-vis de l'effort tranchant ;
- le renforcement des poteaux (compression simple et flexion composée) ;
- les vérifications vis-à-vis du poinçonnement des dalles ;
- les vérifications vis-à-vis de la fatigue ;
- les dispositions constructives générales et spécifiques à chaque sollicitation.

Pour chaque partie, les recommandations s'appuient sur la méthodologie générale de l'Eurocode 2 avec des adaptations au cas des armatures PRF. On notera par exemple, qu'au vu du comportement élastique fragile de ces armatures, il n'est pas recommandé de prendre en compte de redistribution plastique dans la structure, ou encore qu'il convient de négliger la contribution des armatures en compression dans les justifications aux états limites.

Trois exemples de dimensionnement sont ensuite développés dans le guide : une poutre en T bi-appuyée (Fig.4), un mur de soutènement, et un poteau de parking aérien. On constate que pour les deux premiers cas, et en accord avec la littérature, les états limites de service sont souvent dimensionnants (ouverture de fissure et flèche) dans le cas des structures en béton armé avec armatures PRF (dans le cas des armatures en acier, ce sont généralement les états limites ultimes qui sont dimensionnants).

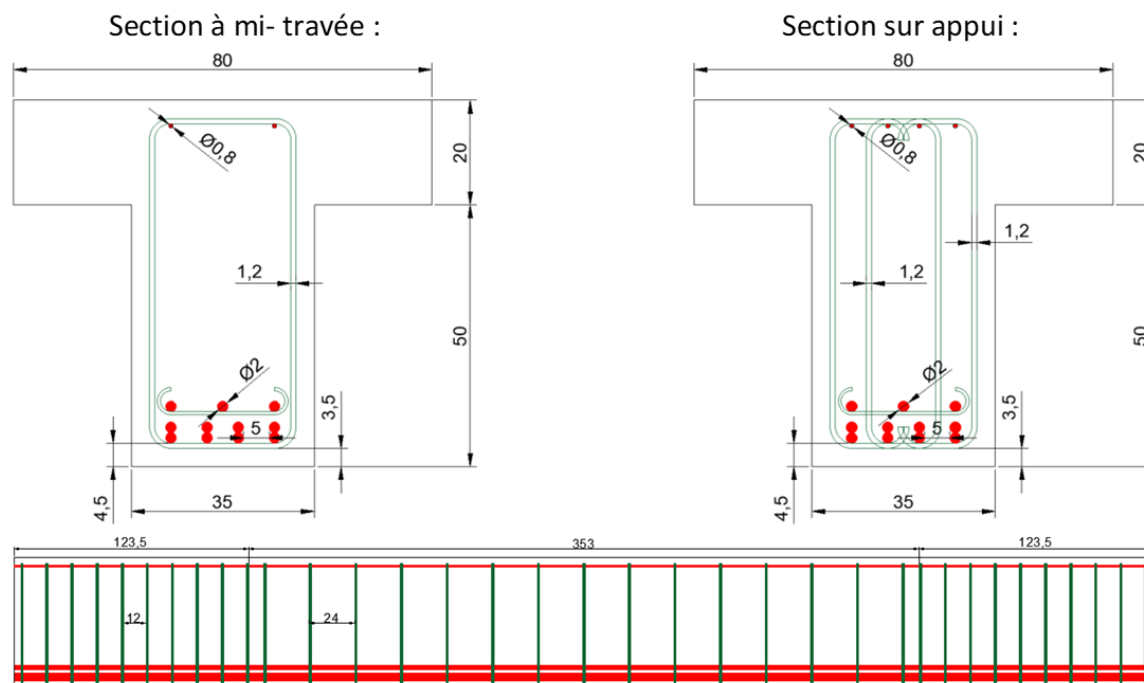


FIGURE 4. Disposition des armatures PRF longitudinales et transversales (effort tranchant) dans la section en T de la poutre étudiée à mi-travée et sur appuis issue de l'exemple du guide (AFGC, 2021)

V. CONTROLE QUALITE ET PROCEDURES DE MISE EN ŒUVRE SUR SITE

À ce jour en France, il n'existe pas de cadre réglementaire permettant de certifier des armatures en PRF ou d'apposer un marquage de type CE ou NF. Les recommandations proposées dans le guide s'inscrivent néanmoins dans la démarche générale de contrôle qualité pratiquée en Europe sur les produits de construction, décrite dans le Règlement Produits de Construction UE n°305/2011 (RPC) (UE, 2011). Cette démarche repose sur:

- Évaluation initiale des caractéristiques essentielles du produit qui consiste à déterminer les niveaux de performances associés à chacune des caractéristiques essentielles du produit. Cette évaluation est généralement réalisée par des essais, sous la responsabilité d'un organisme extérieur d'évaluation
- Évaluation continue et vérification de la constance des performances pour la mise en œuvre d'un programme de contrôle.

Ce programme définit en particulier :

- les tâches incombant au producteur lui-même (contrôle interne de production en usine) ;
- les tâches incombant à un organisme de contrôle extérieur (audits périodiques et essais sur échantillons prélevés).

Des contenus de programmes d'évaluation initiale et continu en interne ou par un tiers sont proposés dans le chapitre 5 (définition des lots, liste des caractéristiques, méthode d'évaluation, nombre d'échantillons, fréquence). Des préconisations en ce qui concerne le stockage, la manipulation, et la mise en œuvre sur site y sont également listées.

VI. CONCLUSIONS

Le guide développé a vocation à aider les ingénieurs et bureaux d'étude à dimensionner et vérifier les structures en béton armées avec des armatures en PRF. Il s'agit à ce stade de recommandations et le document n'a pas de vocation normative. Il est à noter que des référentiels sont cependant actuellement en cours de rédaction sur l'aspect dimensionnement et certification. À ce jour, les documents en vigueur sont essentiellement nord-américains (Etats-Unis et Canada). Le document pourra être révisé en fonction de l'avancement de ces référentiels, des référentiels européens en cours d'élaboration et des techniques associées.

Par ailleurs, des travaux concernant l'évaluation environnementale des armatures en PRF sont en cours. Un état des lieux sur le sujet a été réalisé en fin du guide et repris en Tableau 1. On pourra retenir que les armatures PRFV et PRFB sont celles ayant le plus faible impact sur le réchauffement climatique (en comparaison avec les armatures PRFC et PRFA). En outre, pour ces armatures, la résine a une influence importante sur l'impact global. L'impact des armatures PRFV par unité de masse est supérieur à celui des armatures en acier. Mais, il convient de noter que la densité des armatures en PRF est très largement inférieure à celle des armatures en acier (Tableau 2.). Dans le cas où on s'intéresse aux impacts par unité de volume, la conclusion est donc différente, puisque les PRFV et PRFB ont dans ce cas des impacts environnementaux plus faibles que ceux des aciers. Ceci a également été vérifié dans (Seacon, 2015) pour les impacts environnementaux suivants : réchauffement climatique, acidification, potentiel d'oxydation photochimique, et eutrophisation. Des études supplémentaires sur ce sujet sont cependant nécessaires afin de fiabiliser les bases de données utilisées.

Enfin plus globalement, afin d'améliorer les préconisations développées par le guide, des travaux de recherche supplémentaires semblent nécessaires sur plusieurs aspects.

En ce qui concerne les caractéristiques de ces armatures, nous avons identifié les besoins suivants non exhaustifs :

- Des travaux supplémentaires sur le sujet de la durabilité environnementale et mécanique de ces armatures (fluage, fatigue, durabilité en milieu alcalin et effets combinés) afin d'affiner les coefficients de sécurité proposés, et de vérifier l'adéquation des méthodes d'évaluation décrites dans le guide,
- Des études sur le comportement au feu et post-feu de ces armatures,
- Des développements sur le sujet des coupleurs et des systèmes d'ancrage afin de proposer des solutions adaptées pour toutes les géométries.

En ce qui concerne le dimensionnement des structures en béton armé avec ce type d'armatures, les études supplémentaires suivantes semblent utiles :

- Davantage de travaux sur le comportement à l'effort tranchant (dans le cas d'armatures droites, d'armatures coudées et de systèmes avec tête d'ancrage) et au poinçonnement,
- Des études sur le comportement des armatures en PRF dans les zones en compression pour améliorer les préconisations en flexion,
- Des travaux sur le comportement sismique de ces structures pour étudier les mécanismes de dissipation et leur réversibilité.

TABLEAU 1. Revue des impacts sur le réchauffement climatique et l'acidification des sols et de l'eau pour différents matériaux dans la littérature

Matériau	Sources	Impact sur le réchauffement climatique	Potentiel d'acidification des sols et de l'eau
Acier	(Inman et al., 2016), (Stoiber et al., 2020), (Perier et al., 2013)	0.8-2.8 (kgCO ₂ eq/kg)	16.7-27.3 (MJ/kg)
Béton classique	(Stoiber et al., 2020), (Perier et al., 2013)	232-431 (kgCO ₂ eq/m ³)	845-1567 (MJ/m ³)
Fibre de carbone	(Stoiber et al., 2020), (Perier et al., 2013), (Duflou et al., 2012)	11.4-31 (kgCO ₂ eq/kg)	265-704 (MJ/kg)
Fibre d'aramide	(Barker et al., 2016)	19.7 (kgCO ₂ eq/kg)	-
Fibre de verre	(Duflou et al., 2012)	2.6 (kgCO ₂ eq/kg)	45 (MJ/kg)
Résine époxy	(Inman et al., 2016), (Stoiber et al., 2020), (Duflou et al., 2012)	4.7-8.6 (kgCO ₂ eq/kg)	76-137 (MJ/kg)
PRFV	(Perier et al., 2013), (Barker et al., 2016)	2.6-4.8 (kgCO ₂ eq/kg)	-
PRFB	(Inman et al., 2016)	2.6 (kgCO ₂ eq/kg)	-
PRFC	(Stoiber et al., 2020), (Barker et al., 2016)	18.4-31 (kgCO ₂ eq/kg)	281-301 (MJ/kg)

TABLEAU 2. Densité des différents matériaux [kg/m³] *(Fib, 2007) ** (Brozda et al, 2017)

PRF	PRFC *	PRFA *	PRFV *	PRFB **	Acier *
Densité	1430-1670	1300-1450	1730-1760	1990-2260	7850

REFERENCES

AASHTO (2018). LRFD Bridge design guide specifications for GFRP reinforced concrete - 2nd edition.

ACI 440.1R-15 (2014). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.

AFGC (2021). Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé), 262p.

CSA (2012). S806-12, Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers.

C. Barker (2016). The feasibility of fibre reinforced polymers as an alternative to steel in reinforced concrete, McGill University, CCOM.

K. Brozda, J. Seledjak & P. Kotes (2017). Analysis of properties of the FRP rebar to concrete structures, Applied engineering letters.

CNR-DT (2006). 203, Guide for the design and construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars

J.R. Duflou, Y. Deng, K. Van Acker & W. Dewulf (2012). Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment based study, Materials research society bulletin, Vol.37. .

M. Inman, E.R. Thorhallsson & K. Azrague (2016). A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams, 8th International conference on sustainability in energy and buildings. Turin.

FIB (2007). Bulletin 40, FRP Reinforcement in RC Structures.

ISIS (2007). Design Manual 3: Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers, Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS), Manitoba, Canada, 150 p.

ISO 10406-1 (2014). Fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – test methods – Part 1: FRP bars and grids.

V. Perier, S. Chataigner & A. Pruvost (2013). Comparaison de différentes armatures utilisées pour le renforcement du béton, BOA du LCPC, pp. 51-62.

Seacon (2015). Seacon project, D5.3, Report on LCA, Report from Infravation project.

N. Stoiber, M. Hammerl & B. Kromoser (2020). Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: calculation basis and exemplary application, Journal of Cleaner production.

UE (2011). Règlement (UE) n°305/2011 du Parlement européen et du Conseil (RPC) établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil.