



Recommandations AFGC sur l'emploi d'armatures composites internes dans les structures en béton

Arnaud ROLLAND, Anthony PRUVOST, Karim BENZARTI, Sylvain CHATAIGNER, Emmanuel FERRIER, Elhem GHORBEL, Philippe JANDIN, Laurent MICHEL, Marc QUIERTANT

Association Française de Génie Civil (AFGC)

- Création d'un GT au sein de l'AFGC en 2018 sur ce sujet visant à proposer des recommandations sur l'utilisation de ce type d'armatures.
- Environ 50 personnes (centres d'études/universités, producteurs d'armatures, entreprises du BTP/maîtres d'ouvrage, bureaux d'études et de contrôle).
- Publication du guide fin 2021, traduction en anglais en cours.



Groupe de travail : Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé

Documents scientifiques et techniques

Utilisation d'armatures composites
(à fibres longues et à matrice
organique) pour le béton armé



2021

Contexte

La corrosion des aciers

La corrosion des aciers est la principale cause de pathologies des ouvrages en béton



« Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion ».
AFGC, 2003

« Le vieillissement des ouvrages en béton armé est relativement lent et résulte essentiellement de la corrosion des aciers suite à la dégradation du béton d'enrobage des aciers passifs par pénétration d'agents agressifs (carbonatation, ions chlorures) [...] »

« Surveillance et entretien des ouvrages d'art - Usage de l'instrumentation pour les ouvrages du réseau routier national – Notion sur les ponts connectés ». Rapport interne DGITM, 2020

La corrosion des aciers

Principales approches dans la prévention contre la corrosion des aciers

- Protéger les armatures
 - . Qualité du béton
 - . Enrobage
 - . Revêtements sur armatures ...
- Employer des armatures résistantes à la corrosion
 - . Aciers inoxydables
 - . Matériaux composites

Les armatures en PRF

Polymères Renforcés de Fibres (PRF)

Couramment appelées en France « composites »

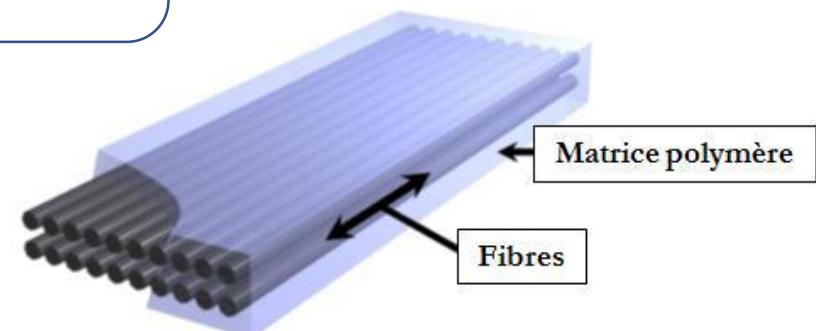
Matrice polymère

- Généralement de type thermodurcissable
- Vinylester, époxy ,...



Fibres

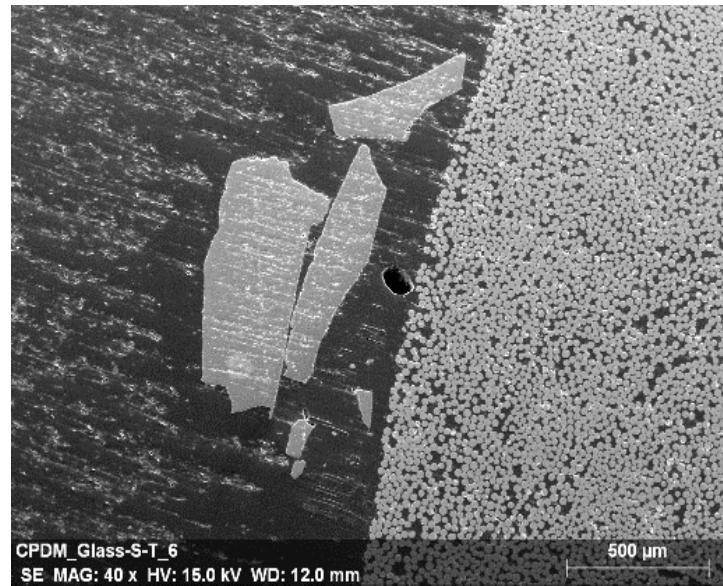
- Verre (PRFV)
- Basalte (PRFB)
- Carbone (PRFC)
- Aramide (PRFA)



ISIS EC Module No. 2. "An introduction to FRP Composites for Construction". ISIS Canada, 2006.

Les armatures en PRF

Polymères Renforcés de Fibres (PRF)



Coupe transversale d'une armature en PRF
(Thèse A. Rolland, 2015)



Exemples d'armatures en PRF présentes sur le marché

Etat de l'art

Applications depuis plus de 30 ans dans
de nombreux domaines



Pont route – Etats-Unis, 1992
(ACI 440R-96)



Passerelle piétonne – Japon, 1993
(ACI 440R-96)



Passerelle piétonne – Royaume-Uni, 1996
(Fib Bulletin 40)

Etat de l'art

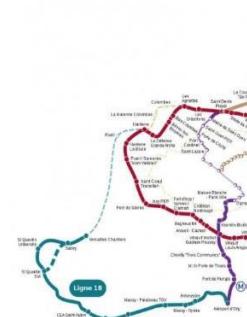
Applications depuis plus de 30 ans dans de nombreux domaines



Canal de prévention d'inondation
– Arabie Saoudite, 2019
(AFGC, 2021)



Métro de Melbourne - Australie, 2020
(AFGC, 2021)



Grand Paris Express – Future ligne 15 Sud (T2B)
(AFGC, 2021)

Etat de l'art

Référentiels existants dans le monde

Règles de dimensionnement

- ACI 440-1R-15, 2015 (USA)
- AASHTO LRFD Bridge Design Guide Spec. for GFRP-Reinf. Concrete, 2018 (USA)
- CAN/CSA S806-12, 2012 (Canada)
- CAN/CSA S6-19, 2019 (Canada)
- JSCE-97, 1997 (Japon)
- CNR DT 205/2007, 2008 (Italie)
- FIB Bulletin 40 « FRP reinforcement in RC structures », 2007 (Europe)
- FIB Bulletins 65 & 66 « Model Code 2010 », 2012 (Europe)



Eurocode 2 en cours de révision

Etat de l'art

Référentiels existants dans le monde

Spécifications produits

- CSA S807-19, 2019 (Canada)
- ACI SPEC-440.5-22, 2022 (USA)
- ASTM D7957/D7957M-17, 2017 (USA)



Document d'Evaluation Européen EAD 260023-00-0301, 2023 (Europe)



Ouvre la possibilité de marquage **CE**
volontaire sur les armatures

Contenu du guide

Contenu du guide



Chapitre 1 :

Caractérisation des armatures composites



Chapitre 2 :

Durabilité et comportement en température des armatures composites



Chapitre 3 :

Conception de structures en béton armé avec des armatures composites



Chapitre 4 :

Exemples de dimensionnement



Chapitre 5 :

Contrôles qualité et procédures de mise en œuvre



ANNEXE 1 :

Etudes de cas



ANNEXE 2 :

Exemple d'obtention des caractéristiques mécaniques à long terme

ANNEXE 3 :

Détails des hypothèses de calcul à l'ELU

ANNEXE 4 :

Application au dimensionnement d'un hourdis de pont mixte

Méthodes de caractérisation des armatures et spécifications produits

Exemples de spécifications

Extraits du guide

1.2.1.1 Fraction massique de fibres ou taux de fibre M_f

La fraction massique de fibres M_f correspond à la masse des fibres divisée par la masse totale du matériau. Elle représente donc la quantité de fibres au sein du matériau. On la détermine en général par un essai de perte au feu selon la norme ISO 14127 : 2008 ([1-21], 2008) (Méthode A) pour les composites à fibre de carbone et NF EN ISO 1172 ([1-28], 1996) pour les composites à fibre de verre. Dans le cas où les armatures sont recouvertes de sable, on veillera à retirer la masse du sable externe (tombé au fond du creuset) après réalisation de la pyrolyse. On notera également que les charges doivent également être séparées des fibres avant pesée finale.

Le guide CSA S807-19 ([1-15], 2019) et le référentiel américain ASTM D7957/D7957M ([1-10], 2017) sur les armatures composites à fibres de verre imposent aux armatures composites utilisées pour le renforcement du béton une fraction massique de fibre supérieure à 70%. Le guide CNR-DT 203/2006 ([1-13], 2006) restreint son applicabilité aux armatures ayant une fraction volumique de fibres supérieure à 50%.

Nota : dans le cas des fibres aramide, il n'existe pas de référentiels pour obtenir ce taux de fibre. Il revient dans ce cas aux entreprises de proposer une méthode adaptée. Dans le cas des armatures composites à fibre de basalte, la méthode NF EN ISO 1172 ([1-28], 1996) sera utilisée.

AFGC

⇒ Nous recommandons l'utilisation d'armatures ayant une fraction massique de fibre M_f supérieure à 70 %.

1.2.3.2 Température de transition vitreuse de la matrice polymère T_g

Dans le cas des matrices thermodurcissables, il existe une température caractéristique au-delà de laquelle le comportement passe de « vitreux » à « caoutchoutique ». Il s'agit de la température de transition vitreuse T_g . Il est recommandé de déterminer la température de transition vitreuse en utilisant la méthode DSC (Calorimètre à Balayage Différentiel) selon la norme NF EN ISO 11357-2 ([1-32], 2020).

Il est recommandé de réaliser cet essai sur 3 échantillons avec une vitesse de chauffage de 20°C/min. La détermination sera effectuée par la méthode du point d'inflexion sur le premier cycle de chauffage. On veillera à effectuer le prélèvement entre le centre et la périphérie de l'armature.

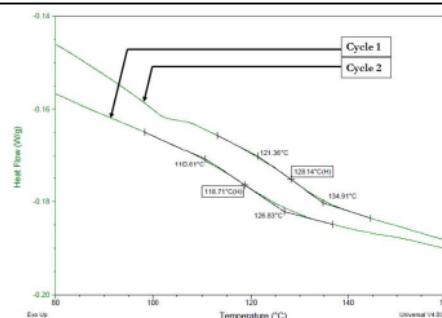


Figure 1.6 : Exemple de thermogrammes obtenus par DSC sur armatures composites ([1-46], 2015)

Le guide CSA S807-19 ([1-15], 2019) impose des valeurs minimales de transition vitreuse en fonction de la classe de durabilité de l'armature. Dans le cas de la classe D2, elle est de 80°C par DSC et 90°C par DMA. Dans le cas de la classe D1, elle est de 100°C par DSC et 110°C par DMA.

Le référentiel ASTM D7957/D7957M ([1-10], 2017) recommande une valeur minimale de température de transition vitreuse de 100°C déterminée par DSC par la méthode du point d'inflexion.

AFGC

⇒ Nous recommandons d'adopter la méthode DSC pour la détermination de la température de transition vitreuse T_g . Une valeur minimale de 100°C par DSC (méthode du point d'inflexion) est recommandée.

Exemples de spécifications

Extraits du guide

1.3.1 Caractéristiques de l'armature en traction (f_u , E_t , ε_u)

Il est nécessaire de déterminer les propriétés finales de l'armature en traction : résistance en traction f_u , module élastique en traction E_t et déformation ultime ε_u . Pour ce faire, on pourra s'appuyer sur la norme ISO 10406-1 chapitre 6 ([1-20], 2014).

1.3.1.1 Dispositif d'ancre de l'armature composite pour l'essai de traction

On notera que contrairement aux armatures métalliques, un dispositif d'ancre spécifique est nécessaire afin de s'assurer d'un mode de rupture en traction dans la partie courante de l'éprouvette dans le cas des armatures composites (Figure 1.7.). La norme ISO 10406-1 ([1-20], 2014) impose ainsi l'obtention d'une rupture située hors des zones d'ancre.



Figure 1.7 : Photo d'une

De nombreux dispositifs (Figure 1.8.). Ils consistent à fixer l'armature via une résine ou un mortier pour limiter l'endommagement

AFGC

⇒ La norme ASTM D7205 ([1-08], 2016) propose des dimensions minimales pour ces ancrages. Les entreprises sont libres d'utiliser des dimensions différentes à partir du moment où la rupture a bien lieu hors des zones d'ancre.

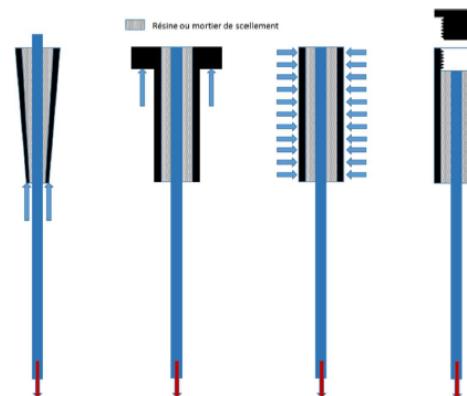


Figure 1.8 : Proposition de dispositifs d'ancre ([1-37], 1998)

1.3.5 Caractéristiques de l'armature en cisaillement interlaminaire τ_i

L'essai de détermination de la résistance au cisaillement interlaminaire de l'armature consiste à réaliser un essai de flexion 3 points de très courte portée. On pourra se référer à la norme ASTM D4475 ([1-05], 2016) pour les barres et la norme NF EN ISO 14130 ([1-36], 1998) pour les armatures plates. Cet essai est utilisé dans le cadre du contrôle qualité.

Il est recommandé d'avoir une longueur entre appuis comprise entre 3 et 6 fois le diamètre nominal et une longueur d'éprouvette égale à 10 fois le diamètre nominal. Cinq échantillons doivent être testés par lot. L'essai est réalisé à une vitesse de 1,3 mm/min.

La résistance au cisaillement interlaminaire τ_i est déterminée à partir de l'effort à rupture P_i à l'aide de la formule de l'équation Eq. 1-6 suivante :

$$\tau_i = 0,849 \cdot \frac{\pi}{\phi_{PRF}^2} \quad \text{Eq. 1-7}$$

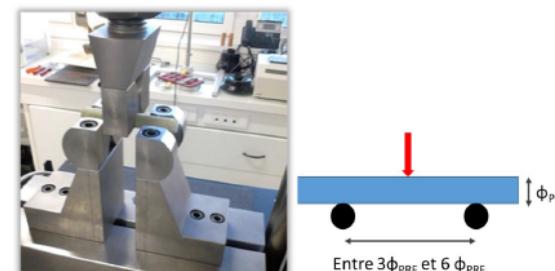


Figure 1.13 : Schéma de l'essai de cisaillement interlaminaire (Rolland et al., 2015).

Le guide CSA S807-19 ([1-15], 2019) recommande des résistances minimales de 40, 45 et 50 MPa pour respectivement les grades I, II et III.

AFGC

⇒ On recommande d'utiliser une valeur entre appui égale à 5 fois le diamètre.

Exemples de spécifications

Extraits du guide

1.4.1 Résistance de l'interface armature/béton τ_b

Pour le cas de l'évaluation du transfert entre armature et béton, il existe plusieurs méthodes d'essais dont la plus couramment utilisée est celle de l'essai d'arrachement ou essai « pull-out » (ISO 10406-1 chapitre 7 ([1-20], 2014)). Cet essai consiste à réaliser un essai de traction sur une armature dont une extrémité est ancrée dans un bloc béton. On notera que différents procédés sont utilisés pour augmenter l'adhérence des armatures composites dans le béton : l'addition de sable en surface de l'armature, le rainurage, l'utilisation de tresses, ou encore l'ajout de fibres helicoïdales en surface.

Cet essai peut être réalisé à partir de cubes (cf dimensions données dans la norme ISO 10406-1 ([1-20], 2014)) ou de cylindres béton (cf dimensions NF EN 206/CN ([1-25], 2014)). L'essai est ensuite réalisé avec un taux de chargement compris entre 10 et 20 MPa/min (contrainte de traction dans l'armature). Les résultats relevés sont le mode de rupture et la résistance de cisaillement τ_b .

$$\tau_b = \frac{P}{\pi \cdot \emptyset_{PRF} \cdot l} \quad \text{Eq. 1-8}$$

avec P la charge maximale, en N ; \emptyset_{PRF} , le diamètre nominal en mm, et l la longueur scellée en mm.

AFGC

- ⇒ On recommande de réaliser au minimum 5 essais,
- ⇒ L'essai peut être réalisé avec un cube (cf dimensions ISO) ou un cylindre (dimensions 16cm x 32 cm) pour la partie béton,
- ⇒ Une longueur de scellement de $5 \cdot \emptyset_{PRF}$ pourra être adoptée,
- ⇒ On préconise de réaliser l'essai sur deux types de bétons (C25/30 et C50/60 par exemple).

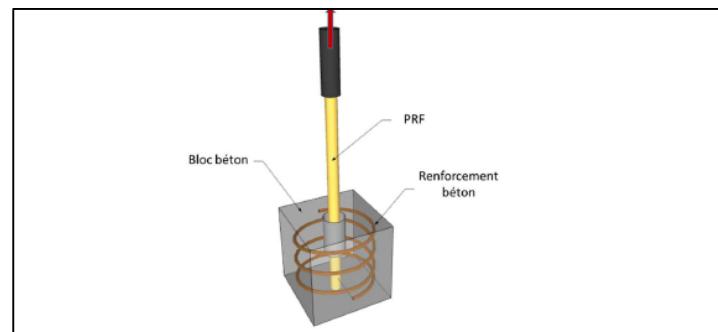


Figure 1.15 : Extrait de la norme ISO 10406-1 chapitre 7 ([1-20], 2014).

Tableau 1.12 : Dimensions des éprouvettes recommandées dans ISO 10406-1 chapitre 7 ([1-20], 2014) pour l'essai d'arrachement.

Diamètre nominal de l'armature \emptyset_{PRF} [mm]	Taille du cube béton * [mm]	Longueur de recouvrement	Diamètre extérieur de la spirale métallique d_{sh} [mm]
< 17	100 X 100 X 100	4 X \emptyset_{PRF}	$80 \leq d_{sh} \leq 100$
17 to 30	100 X 100 X 100	4 X \emptyset_{PRF}	$120 \leq d_{sh} \leq 150$

* Si $\emptyset_{PRF} > 30$ mm, il conviendra d'augmenter la taille du bloc béton en conséquence.

Le référentiel ASTM (D7957/D7957M ([1-10], 2017)) sur les armatures composites à fibre de verre recommande une résistance minimale de l'interface armature /béton de 7,6 MPa. Le référentiel CSA S807-19 ([1-15], 2019) impose une résistance minimale de l'interface armature/béton de 10 MPa ainsi qu'un glissement inférieur à 0,5 mm du côté chargé.

AFGC

- ⇒ On recommande une résistance minimale de l'interface armature/béton $\tau_b = 7,6$ MPa.
- ⇒ On recommande de vérifier que le mode de rupture obtenu est bien caractéristique de la résistance d'interface.

Exemples de spécifications

Extraits du guide

2.2.3 Sensibilité au milieu alcalin

Les normes traitant de la durabilité des armatures composites immergées dans des solutions liquides sont les suivantes :

- ISO 10406-1 ([2-18], 2014), CSA-S806-12 ([2-19], 2012), ASTM D7705 / D7705M-12 ([2-25], 2019) pour les alcali-réactions et ASTM D570 ([2-26], 2018) pour l'absorption d'eau et ACI 440.1R-15 ([2-24], 2014).
- ACI 440.1R-15 fait référence à l'ASTM D7705 et à de nombreux travaux de la littérature concernant différents types d'armatures exposées à des solutions alkaliennes ou salines ou à des milieux humides et ultraviolets.

2.2.3.1 Sensibilité au milieu alcalin sans charge

On étudie la sensibilité des armatures aux milieux alcalins en les immergeant dans une solution alcaline pendant une durée déterminée et en testant leurs capacités résiduelles.

2.2.3.1.1 Réalisation du vieillissement des armatures en milieu alcalin

Le Tableau 2.3. compare les différentes méthodes de vieillissement existantes.

Tableau 2.3. Comparaison des méthodes de caractérisation de la résistance au milieu alcalin sans charge (ISO 10406-1, CSA S806-12, ASTM D7957/D7957M)

ISO 10406-1, chapitre 11 ([2-18], 2014)	CSA S806-12 annexe M ([2-19], 2012)	ASTM D7705/D7705M-Procedure A ([2-25], 2019)
Milieu : $pH_{initial} \geq 13$ correspondant à celui des solutions interstitielles dans les bétons	Milieu : $pH = 13$ Solution de même composition que la solution poreuse trouvée dans béton.	Milieu : pH entre 12,6 et 13 représentatif du pH de l'eau interstitielle du ciment Portland des bétons
Composition pour 1 litre d'eau:	Composition pour 1 litre d'eau :	Composition pour 1 litre d'eau :

0,8 g NaOH & 22,4 g KOH Eau déminéralisée $T(^{\circ}\text{C}) = 60^{\pm 3}$ Durée de l'immersion : 1 mois	118,5 g de Ca(OH) ₂ avec 0,9 g de NaOH et 4,2 g de KOH Eau déminéralisée $T(^{\circ}\text{C}) = 60^{\pm 3}$	118,5 g de Ca(OH) ₂ avec 0,9 g de NaOH et 4,2 g de KOH Eau du robinet. $T(^{\circ}\text{C}) = 60^{\pm 3}$
Eprouvettes : Nbre d'éprouvettes ≥ 5 (par lot et 3 lots) Embutis protégés par de la résine pour éviter les infiltrations et longueur : $L(\text{mm}) = \max(40\phi_{PRF}, 100)$	Eprouvettes : 24 essais de 3 lots de production de diamètres 10, 13, 15, 20, 25 et 32 mm ou uniquement les tailles fabriquées par le fournisseur. Les deux extrémités d'une éprouvette doivent être revêtues de résine époxy afin d'éviter les infiltrations de la solution.	Eprouvettes : 24 essais (par lot de 8) provenant de 3 ou plus lots de production différents.
Essais de caractérisation après vieillissement : Mesure du pH de la solution Pesée de la masse résiduelle Mesure de la longueur Essai de traction	Conduite de l'essai : Durée de l'essai de 3 mois	Conduite de l'essai : Durée de l'essai : 3 mois La solution alcaline doit être recouverte avant et pendant l'essai pour éviter toute interaction avec le CO ₂ atmosphérique et pour éviter l'évaporation

AFGC	⇒ On recommande de : <ul style="list-style-type: none"> - réaliser 5 échantillons par type et diamètre d'armature testé ; - protéger les embouts par de la résine pour éviter les infiltrations ; - adopter une longueur des armatures telle que: $L(\text{mm}) = \max(40\phi_{PRF}, 100)$; - utiliser un milieu de vieillissement ayant un pH supérieur à 13 correspondant au pH des solutions interstitielles du béton. On propose la composition suivante pour 1 L d'eau déminéralisée : 0,8 g NaOH & 22,4 g KOH. La température de la solution doit être de 60°C +/- 3°C ; <p>⇒ La durée de vieillissement doit être de 3 mois.</p>
------	--

Recommandations sur le contrôle qualité

Qualification initiale du produit

N°	Caractéristique	Méthode d'évaluation	Nb. min échantillons
Caractéristiques générales			
1	Section transversale effective $A_{PRF,eff}$	Poussée d'Archimède – ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	15 (3 lots différents) pour chaque diamètre
2	Température de transition vitreuse de la matrice T_g	Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) – NF EN ISO 11357-2 ([5-04], 2020)	9 (3 lots différents) pour les diamètres min, moyen et max
3	Coefficient d'expansion thermique longitudinal a_L	Analyse thermomécanique (TMA) - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	9 (3 lots différents) pour les diamètres min, moyen et max
4	Coefficient d'expansion thermique transverse a_T	Analyse thermomécanique (TMA) - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	9 (3 lots différents) pour les diamètres min, moyen et max
5	Taux d'absorption d'eau	NF EN ISO 62 (50°C à saturation) ([5-05], 2008)	9 (3 lots différents) pour les diamètres min, moyen et max
6	Résistance à la traction $f_{PRF,k}$	Essai de traction - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	24 (3 lots différents) pour chaque diamètre
7	Module d'élasticité en traction E_{PRF}		
8	Déformation ultime en traction e_u		
9	Résistance en compression (optionnel)	ASTM D 695 ([5-06], 2015)	15 (3 lots différents) pour chaque diamètre
10	Module d'élasticité en compression (optionnel)		
11	Résistance à l'arrachement t_b	Essai d'arrachement - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	5 pour chaque diamètre
12	Résistance au cisaillement transverse t_s	Essai de cisaillement transverse - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	24 (3 lots différents) pour chaque diamètre
13	Résistance au cisaillement inter-laminaire t_i	Essai « Short beam » - ASTM D 4475 ([5-07], 2016)	24 (3 lots différents) pour chaque diamètre
14	Déformation en fluege à 1000h	Essai de fluege - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	Min 3 échantillons / taux de charge pour diamètre min, moyen et max Min 5 taux de charge
15	Charge limite de rupture différée par fluege		
16	Résistance à la fatigue à 2×10^6 cycles (optionnel)	Essai de fatigue - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	Min 3 échantillons / taux de charge pour diamètre min, moyen et max Min 3 taux de charge
17	Résistance en traction résiduelle après vieillissement sous charge à en milieu alcalin	Essai d'alcali-résistance - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	5 pour diamètre min, moyen et max
18	Résistance en cisaillement interlaminaire en milieu alcalin – vieillissement sous charge	Vieillissement – ISO 10406-1 Essai de cisaillement interlaminaire - ASTM D 4475 ([5-07], 2016)	5 pour diamètre min, moyen et max
Caractéristiques spécifiques – armatures courbes			
19	Résistance en traction de la portion droite	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	24 (3 lots différents) pour chaque diamètre
20	Module d'élasticité en traction de la portion droite		
21	Déformation ultime en traction de la portion droite		
22	Résistance de la portion courbe	CSA S807-19 ([5-02], 2019)	5 pour chaque diamètre
Caractéristiques spécifiques – armatures boutonnées			
23	Résistance à l'arrachement des armatures boutonnées	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	24 (3 lots différents) pour chaque diamètre

Contrôle interne de production en usine

N°	Type de contrôle	Méthode d'évaluation	Nb. min échantillons	Fréquence min.
1	Matériaux d'approvisionnement	Vérification *	-	1 par lot de matériau
2	Décompte des fils	Vérification	1/lot	2 par jour
3	Vérification des paramètres de pultrusion	Vérification (vitesse, température, effort, traitement de surface, ...)	1/machine	2 par jour
4	Section transversale effective $A_{PRF,eff}$	Poussée d'Archimède – ISO 10406-1 ([5-03], 2014)		5 par lot
5	Fraction massique de fibres M_f	ISO 14127 méthode A pour les PRFC ([5-08], 2008) NF EN ISO 1172 pour les PRFV ([5-09], 1996)	5	1 par lot
6	Température de transition vitreuse de la matrice T_g	NF EN ISO 11357-2 ([5-04], 2020)	1 par machine	2 par jour
7	Degré de réticulation de la matrice $C_{\%}$			
8	Taux d'absorption d'eau	NF EN ISO 62 (50°C à saturation) ** ([5-05], 2008)	5	1 par lot
9	Résistance à la traction $f_{PRF,k}$	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	5	1 par lot
10	Module d'élasticité en traction E_{PRF}			
11	Déformation ultime en traction e_u			
12	Résistance de la portion courbe	CSA S807-19 ([5-02], 2019)	5	1 par lot
13	Résistance au cisaillement transverse t_s	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	5	1 par lot

Contrôle extérieur périodique (audits)

N°	Type de contrôle	Méthode d'évaluation	Nb. min échantillons	Fréquence min.
Caractéristiques générales				
1	Section transversale effective $A_{PRF,eff}$	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	5 pour un diamètre	1 / an
2	Température de transition vitreuse de la matrice T_g	NF EN ISO 11357-2 ([5-04], 2020)	3	1 / an
3	Taux d'absorption d'eau	NF EN ISO 62 (50°C à saturation) ([5-05], 2008)	15 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1/an
4	Résistance à la traction $f_{PRF,k}$	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	15 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1 / an
5	Module d'élasticité en traction E_{PRF}			
6	Déformation ultime en traction e_u			
7	Résistance au cisaillement transverse t_s	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	9 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1 / an
8	Résistance au cisaillement inter-laminaire t_i	ASTM D 4475 ([5-07], 2016)	9 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1 / an
9	Résistance à l'arrachement t_b	Essai d'arrachement - ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	5 pour un diamètre	1/an
Caractéristiques spécifiques – armatures courbes				
10	Résistance en traction de la portion droite	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	15 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1 / an
11	Module d'élasticité en traction de la portion droite			
12	Déformation ultime en traction de la portion droite			
13	Résistance de la portion courbe	CSA S807-19 ([5-02], 2019)	15 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1 / an
Caractéristiques spécifiques – armatures boutonnées				
14	Résistance à l'arrachement des armatures boutonnées	ISO 10406-1 ([5-03], 2014)	15 de 3 lots (si possible diamètres différents)	1 / an

Règles de calcul et exemples

Règles de calcul et Exemples

Généralités sur les armatures PRF

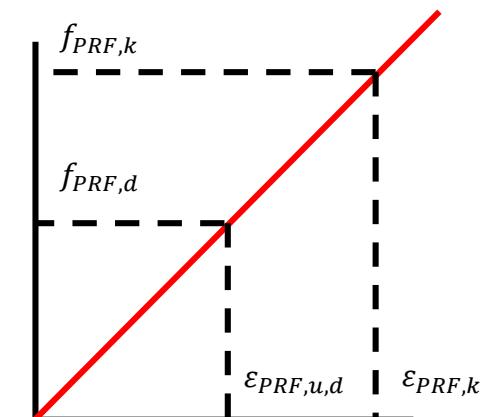
Enrobage = paramètre d'adhérence

$$C_{min} = \max(2\phi_{PRF}; 10) \leq \begin{cases} 50 \text{ mm} & \text{Armatures principales} \\ 38 \text{ mm} & \text{Armatures de cisaillement} \end{cases}$$

Résistance de calcul à la traction :

$$f_{PRF,d} = \alpha_{PRF} \frac{f_{PRF,k}}{\gamma_{PRF}} \quad \text{avec } \gamma_{PRF} = \begin{cases} 1,3 \text{ ELU} & \text{Fondamental} \\ 1,1 \text{ ELU} & \text{Accidentel} \end{cases}$$

Classe d'exposition	Type de fibre	α_{PRF}
X_0	Carbone	1
	Aramidé, Verre, Basalte	0,9
Autres classes	Carbone	0,9
	Aramidé, Verre, Basalte	0,8



Règles de calcul et Exemples

Généralités sur les armatures PRF

Résistance de calcul à la traction des barres coudées :

$$f_{PRF,w,lim} = \min(\alpha_{bend} f_{PRF,w,d} ; E_{PRF,w} \varepsilon_{PRF,w,lim})$$

$$\alpha_{bend} = \min\left(1 ; 0,3 + 0,05 \frac{r_{bend}}{\emptyset_{PRF,w}}\right) \quad \varepsilon_{PRF,w,lim} = 4\%$$

Mode de rupture dans la partie courbe

Dimensionnement ELU à la flexion simple

Principe quasi identique à un dimensionnement en Béton Armé

Ratio ELU d'armature aux pivots B et PRF : $\rho_{B,PRF}$

$$\rho_{PRF} \leq \rho_{B,PRF} \leftrightarrow \text{Pivot PRF}$$

$$\rho_{PRF} > \rho_{B,PRF} \leftrightarrow \text{Pivot B}$$

Règles de calcul et Exemples

Vérifications aux ELS

Limitations des contraintes

- Les limitations sur le béton sont conformes à l'EC2
- Pour les armatures PRF : $\sigma_{PRF} = k * f_{PRF,k}$

Type de fibre	ELS QP	ELS CARA	Fatigue (CARA)
PRFV et PRFB	0,25	0,55	0,30
PRFA	0,40	0,55	0,45
PRFC	0,60	0,70	0,65

Limitations des ouvertures de fissures :

Classe d'exposition X0 $\Rightarrow w_{lim} = 0,7 \text{ mm}$ *Autres classes $\Rightarrow w_{lim} = 0,5 \text{ mm}$*

Limitations des flèches : *Conformes à l'EC, $f_{lim} = l/250, l/500, \text{etc}$*

Règles de calcul et Exemples

Exemple tablier de pont :

Données du problème

- C35/45, XC4 et **XS1**, 100 ans, enrobage compact => S5
 - Section mi-travée $h = 31 \text{ cm}$
 - PRFV => $\alpha_{PRF} = 0,80$ $E_{PRF} = 45 \text{ GPa}$ $\emptyset_{PRF} = 20 \text{ mm}$ $\emptyset_{PRF,w} = 12 \text{ mm}$
 $f_{PRF,d} = 750 \text{ MPa}$ $f_{PRF,w,d} = 480 \text{ MPa}$

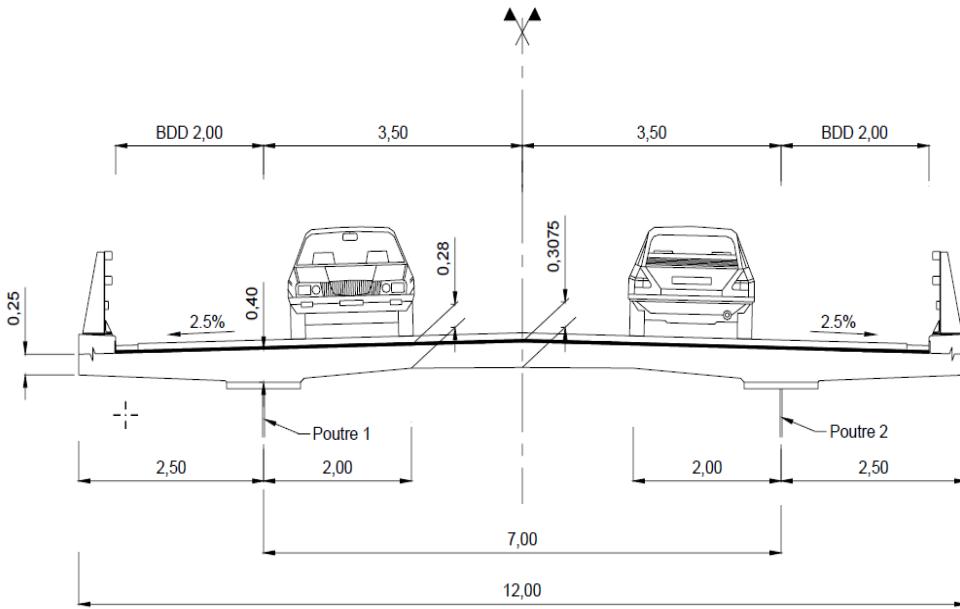
Calcul des sollicitations

$$\text{ELU : } M_{Ed} = 213 \text{ kNm}$$

$$\text{ELS : } M_{cara} = 158 \text{ kNm}$$

$$M_{freq} = 115 \text{ kNm}$$

$$M_{QP} = 24 \text{ kNm}$$



Règles de calcul et Exemples

Exemple tablier de pont

Critères dimensionnement	PRF	ACIER
Enrobage	40 mm	50 mm
Dim ELU	$26 \text{ cm}^2 = 9\Phi20$	$29 \text{ cm}^2 = 10\Phi20$
Contraintes ELS CARA	PRF => 234 et 240 MPa à CT et LT Béton => 33 et 21 MPa à CT et LT	/
Dim ELS	$82,5 \text{ cm}^2 = 26\Phi20$ à CT $30,2 \text{ cm}^2 = 10\Phi20$ à LT	/
Solutions	L'augmentation du diamètre n'est pas une solution Augmenter d ou fck => h = 33 cm APRF = $60,8 \text{ cm}^2 = 20\Phi20$	Rappel : h = 31 cm
Contraintes ELS CARA	PRF => 104 et 110 MPa à CT et LT Béton => 21 et 14 MPa à CT et LT	Acier => 234 et 246 MPa à CT et LT Béton => 17 et 13 MPa à CT et LT
Contraintes ELS QP	PRF => 16 et 17 MPa à CT et LT Béton => 4 et 3 MPa à CT et LT	/
Ouverture de fissure	$0,1 \text{ mm} < 0,5 \text{ mm}$	$0,1 < 0,3 \text{ mm}$

Les états limites de service sont dimensionnants

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Un document se voulant le plus complet possible

- Aborde à la fois les spécifications matériaux, la durabilité, la conception et le calcul, le contrôle qualité.

Un document compatible et complémentaire au référentiel européen actuel

- Complète le Document d'Evaluation Européen (EAD) en définissant des seuils sur les caractéristiques des armatures.
- Approche basée sur des adaptations de l'Eurocode 2 en vigueur (en attendant la fin de la révision).

Vers une visibilité internationale

- Traduction anglaise en cours.

Merci de votre attention



Recommandations
AFGC sur l'emploi
d'armatures composites
internes dans les
structures en béton

Contact : arnaud.rolland@cerema.fr
anthony.pruvost@cerema.fr

Arnaud ROLLAND, Anthony PRUVOST, Karim BENZARTI, Sylvain CHATAIGNER, Emmanuel FERRIER, Elhem GHORBEL, Philippe JANDIN, Laurent MICHEL, Marc QUIERTANT