

PERFORMANCE DES BARRES D'ARMATURE DE TYPE PRFV À LONG TERME  
DANS LEUR MILIEU NATUREL ET PROPOSITION D'UN PLAN DE RECHERCHE  
POUR CARACTÉRISER LA DÉGRADATION

DEVIS R782.1

RAPPORT FINAL

Franck Armel Tchitembo Goma

Ahmed El Refai

Mario Fafard

Département de génie civil et génie des eaux  
Université Laval

Mars 2017

## Résumé

Ce rapport traite de la durabilité à long terme des barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) dont la durée de vie minimale pour une utilisation répandue dans les ouvrages d'art du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) doit être de 75 ans. D'une part, nous avons effectué une revue et une analyse critique de la littérature sur la durabilité de ces barres et de leur interface avec le béton lorsqu'elles sont soumises à des conditions environnementales de laboratoire et réelles (en service). De l'autre, nous avons exploré les techniques de caractérisation de la durabilité et proposé différents types d'analyses afin de caractériser les barres « dégradées ». Des conclusions et recommandations ont été données.

Le vieillissement direct en solution alcaline et aqueuse est beaucoup plus critique que le vieillissement indirect. La première approche ne simule pas les conditions environnementales naturelles. Elle représente par ailleurs **la pire condition** qu'une armature en PRFV ne pourrait rencontrer en service et ne reflète pas la réalité des barres en milieu naturel.

Le modèle d'Arrhenius de prédiction de la durabilité à long terme se base sur une extrapolation de données obtenues à court terme; on prédit des propriétés mécaniques sur une durée de plus de 27 000 jours à partir de données obtenues sur moins de 360 jours. On ne peut donc pas garantir que ce modèle fournisse des propriétés mécaniques fiables de ces barres sur une telle période. De plus, le guide (*ACI440.9R-15*) recommande que les résultats des essais de campagne de vieillissement accéléré ne soient pas utilisés pour prédire la durée de vie en service tant que la corrélation entre la performance en service et les conditions de vieillissement accéléré n'est pas proprement établie.

À ce jour, les analyses physico-chimiques indiquent qu'aucune dégradation significative des barres en PRFV à matrice vinylester n'a été observée au moment de certaines expertises conduites sur les barres mises en service dans les ouvrages d'art. La durée de vie la plus longue observée est de 13 années sur les barres prélevées du pont Crowchild Trail (Alberta). Cependant, ces analyses n'ont pas été corrélées aux propriétés mécaniques.

Les auteurs du présent rapport proposent d'aborder la durabilité réelle des barres en PRFV à partir des informations pouvant être obtenues de prélèvement de petits échantillons de ces barres utilisées dans des ouvrages d'art. La méthodologie proposée consiste à créer une banque de données issue des essais de laboratoire avec vieillissement accéléré (vieillissement direct ou indirect) qui mettrait en corrélation les propriétés physico-chimiques et mécaniques avec un index (ou des index) de dégradation quantifiable sur de petits échantillons. Cette valeur quantitative de la dégradation varierait disons, de 0 (état parfait) à 1 (état complètement dégradé), et doit être mesurable sur des petits échantillons prélevés sur la structure existante. Naturellement, il serait aussi possible d'obtenir cet index (ou ces index) de dégradation à partir des échantillons conditionnés en laboratoire.

En procédant ainsi, on pourrait également établir une corrélation indirecte entre le temps de dégradation accéléré en laboratoire et le temps réel *in situ* permettant d'atteindre le même niveau de dégradation.

En définitive, les auteurs du présent rapport croient que les barres d'armature en PRFV ont un avenir probant et recommandent de poursuivre la construction d'ouvrages d'art incorporant ce type de barre, tel que le MTMDET le spécifie dans son devis type « Construction et réparation des structures » (réf. devis type édition 2015 produit par la Direction des structures), afin de continuer le développement des connaissances mais assujetti à un suivi de ces structures.

## Table des matières

Résumé.....	i
Liste des figures .....	v
Liste de table .....	vi
1 Introduction .....	1
2 Revue de la littérature sur la durabilité des barres d'armature en PRFV .....	5
2.1 Introduction .....	5
2.2 Mécanismes de dégradation .....	5
2.2.1 Généralité.....	5
2.2.2 Dégradation des fibres de verre .....	6
2.2.3 Dégradation de la matrice polymère .....	7
2.2.4 Dégradation de l'interface fibres / matrice .....	8
2.3 Principe du vieillissement accéléré et prédiction de la durée de vie des barres d'armature en PRFV .....	9
2.3.1 Processus du vieillissement accéléré .....	9
2.3.2 Prédiction de la durée de vie .....	10
2.4 Revue de la littérature .....	12
2.4.1 Immersion directe des barres d'armature en PRFV dans des solutions aqueuses et alcalines .....	12
2.4.2 Immersion indirecte des barres d'armature en PRFV dans des solutions aqueuses et alcalines .....	17
2.4.3 Durabilité des barres en PRFV exposées aux conditions environnementales réelles	22
2.4.4 Exposition des barres d'armature en PRFV aux cycles de gel-dégel et/ou mouillage-séchage .....	32
2.4.5 Étude de la durabilité de l'interface armature / béton.....	36
2.4.6 Effet de la haute température sur les barres d'armature en PRFV .....	38
2.4.7 Coefficient d'expansion thermique (CET).....	42
3 Méthodes de caractérisation et d'analyse des barres d'armature en PRFV.....	43
3.1 Généralités.....	43
3.2 Caractérisation et analyse des propriétés physico-chimiques et de la microstructure.....	44

3.2.1	Généralités .....	44
3.2.2	Propriétés physico-chimiques .....	44
3.2.3	Microstructure et endommagement .....	49
3.3	Caractérisation et analyse des propriétés mécaniques.....	53
3.3.1	Introduction.....	53
3.3.2	Résistance en traction, module élastique, dureté .....	53
3.3.3	Résistance au cisaillement inter-laminaire.....	55
3.3.4	Comportement de l'interface armature/béton .....	56
3.3.5	Le fluage .....	59
3.3.6	La fatigue .....	61
4	Conclusion et recommandations.....	63
5	Références .....	74
6	Annexe.....	82

# Liste des figures

<b>FIGURE 1 : MÉCANISMES DE DÉGRADATION DES BARRES EN PRFV EN PRÉSENCE D'UN MILIEU AGRESSIF (WON ET AL. 2008).</b>	9
<b>FIGURE 2 : COURBES MAITRESSES DE PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE À PARTIR DU MODÈLE D'ARRHENIUS : (A) BARRES EN PRFV IMMERGÉES DANS LA SOLUTION 1 ET (B) BARRES EN PRFV IMMERGÉES DANS LA SOLUTION 2 (CHEN ET AL. 2006).</b>	16
<b>FIGURE 3 : EXEMPLE DE DISPOSITIF MONTRANT LES BARRES D'ARMATURE EN PRFV NOYÉES DANS DU BÉTON (ALMUSALLAM AND AL-SALLOUM 2006, EL-MAADDAWY ET AL. 2015).</b>	17
<b>FIGURE 4 : COURBE MAITRESSE DE PRÉDICTION DE LA DURÉE DE VIE À PARTIR DU MODÈLE D'ARRHENIUS (TEMPÉRATURE MOYENNE DE 6°C) (ROBERT ET AL. 2009).</b>	20
<b>FIGURE 5 : OUVRAGES CANADIENS INVESTIGUÉS : A) LE PONT CHATHAM ET B) LE PONT WATERLOO CREEK (MUFTI, BANTHIA, ET AL. 2007).</b>	25
<b>FIGURE 6 : OUVRAGES CANADIENS INVESTIGUÉES : A) QUAI HALL'S HARBOR, B) PONT JOFFRE ET C) PONT CROWCHILD TRAIL (MUFTI, BANTHIA, ET AL. 2007).</b>	28
<b>FIGURE 7 : PONT SUR L'AUTOROUTE B3 À FRIEDBERG, ALLEMAGNE (MURPHY 2013).</b>	29
<b>FIGURE 8 : MICROGRAPHIE MEB MONTRANT LA DÉTÉRIORATION DES ARMATURES EN PRFV DANS DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS.</b>	32
<b>FIGURE 9 : MÉTHODE PERMETTANT D'EXPLOITER LES THERMO-GRAMMES AFIN DE DÉTERMINER LA TG. ....</b>	45
<b>FIGURE 10 : ILLUSTRATION DE L'INSTRUMENTATION ET DE LA GÉOMÉTRIE DES SPÉCIMENS (MASMOUDI ET AL. 2005).</b>	47
<b>FIGURE 11 : INSTRUMENTATION DES SPÉCIMENS ET CHAMBRE ENVIRONNEMENTALE: (A) BARRES EN PRFV INSTRUMENTÉES AVEC DES JAUGES DE DÉFORMATION ET DES THERMOCOUPLES; (B) SPÉCIMENS EN PRFV SCELLÉS DAN DU BÉTON; (C) CHAMBRE ENVIRONNEMENTALE (MASMOUDI ET AL. 2005).</b>	47
<b>FIGURE 12 : A) IMAGE MEB PERMETTANT D'IDENTIFIER LA PÉNÉTRATION DES ALCALINS (GOORANORIMI ET AL. 2017) ET B) CARTOGRAPHIE EDX RÉALISÉES SUR DES SECTIONS TRANSVERSALES POLIES DES BARRES PRFV DE RÉFÉRENCE OU VIEILLIES (A. ROLAND 2015).</b>	50
<b>FIGURE 13 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE : A) DU LASER ET DU SYSTÈME OCT; B) DE L'ORIENTATION DU LASER ET LES DIRECTIONS D'ÉCHANTILLONNAGE EN FONCTION DU COMPOSITE (DUNKERS ET AL. 1999).</b>	52
<b>FIGURE 14 : ILLUSTRATION SCHÉMATIQUE DE L'EXPÉRIMENTATION AVEC LA TECHNIQUE D'ÉMISSION ACOUSTIQUE (DOKUN ET AL. 2000).</b>	53
<b>FIGURE 15 : PROPOSITIONS D'ANCRAGES POUR ESSAIS DE TRACTION SUR LES BARRES D'ARMATURE EN PRF (ACI440.3R-04).</b>	54
<b>FIGURE 16 : QUELQUES DISPOSITIFS D'ESSAIS SHORT-BEAM TROUVÉS DANS LA LITTÉRATURE (MICELLI AND NANNI 2004, CHEN ET AL. 2007, KIM ET AL. 2008).</b>	56
<b>FIGURE 17 : BANC D'ESSAI PULL-OUT ET PRINCIPE D'INSTRUMENTATION (ROBERT AND BENMOKRANE 2010C).</b>	57
<b>FIGURE 18 : SCHÉMA REPRÉSENTANT LE PRINCIPE DE L'ESSAI BOND BEAM (ACI440.3R-04).</b>	59
<b>FIGURE 19 : DÉTAILS DU DISPOSITIF DE PRÉHENSION (ASTM-D7205/D7205M 2006).</b>	62

## Liste de table

<b>TABLEAU 1 : RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS DES ESSAIS SHORT-BEAM. ....</b>	<b>55</b>
<b>TABLEAU 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE DANS LES CONDITIONS D'IMMERSION DIRECTE EN SOLUTION AQUEUSE OU ALCALINE. ....</b>	<b>83</b>
<b>TABLEAU 3 : REVUE DE LA LITTÉRATURE DANS LES CONDITIONS D'IMMERSION INDIRECTE EN SOLUTION AQUEUSE OU ALCALINE. ....</b>	<b>84</b>
<b>TABLEAU 4 : SÉLECTION DE LA REVUE DE LA LITTÉRATURE DANS LES CONDITIONS RÉELLES EN SERVICE. ...</b>	<b>85</b>
<b>TABLEAU 5 : SÉLECTION DES DIFFÉRENTS PROJETS DES PONTS EN PRFS DANS LE MONDE (MURPHY 2013). ..</b>	<b>87</b>

# 1 Introduction

Une des missions du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) est de construire et d'entretenir des infrastructures routières. Cependant, outre le maintien d'ouvrages sécuritaires sur le réseau routier québécois, une des principales préoccupations du MTMDET concernant ses infrastructures est celle liée à la durée de vie de celles-ci, car ces infrastructures sont régulièrement soumises, dans le temps, à une gamme variée des conditions environnementales, parfois très sévères, et couplées à des sollicitations de service. Ainsi, le milieu dans lequel ces infrastructures sont utilisées contribue inéluctablement à leur détérioration (*Nishizaki and Meiarashi 2002, Chen et al. 2006*).

Bien que l'acier soit toujours utilisé comme renfort interne dans ce domaine, son sempiternel problème lié à la corrosion reste la cause majeure de la détérioration des ouvrages d'art en béton renforcés par ce matériau. Une telle détérioration requiert des coûts supplémentaires d'inspection et d'entretien. Face à cette problématique, les constructeurs de telles infrastructures ont été amenés à trouver d'autres types de matériaux susceptibles de remplacer avantageusement les aciers traditionnels. Ces matériaux devraient être alors insensibles à la corrosion et aussi offrir d'autres propriétés attrayantes. À cet effet, durant ces dernières années, la demande pour la construction et la réhabilitation en service des infrastructures avec des matériaux composites en polymères renforcés de fibres (PRF) n'a cessé d'augmenter. Un tel engouement est, de façon évidente, lié aux performances thermomécaniques bénéfiques des PRFs comparativement aux matériaux conventionnels, tel que l'acier ou le béton armé d'acier. Les armatures en PRF trouvent leur place dans les structures en béton grâce à leur grande légèreté, une rigidité similaire à celle du béton, une résistance élevée à la traction, des bonnes propriétés en fatigue, et principalement leur résistance à la corrosion (*Uomoto et al. 2002*). Cependant, à cause des applications versatiles du béton dans plusieurs domaines de la construction (ponts, immeubles, structures marines, pavements d'autoroute, etc.), les structures armées en PRF sont souvent exposées, particulièrement dans les conditions environnementales québécoises, à des cycles de mouillage et de séchage, à des conditions de gel et dégel, à des sels de déglacage ainsi qu'à des températures extrêmes (basse et haute).

Notons que de tous les renforts en polymère qui existent, ce sont essentiellement ceux renforcés de fibre de verre (PRFV) qui sont les plus utilisés dans les structures de béton grâce principalement à leur faible coût et à leurs bonnes performances comparativement au ratio coût/performance des autres types de fibre (ex. carbone, aramide, basalte). Nonobstant cela, ils sont sujets à être dégradés par les solutions interstitielles du béton dont les pH sont très élevés (11,5-13,5) (Neville 1996). Cette dégradation réduit inévitablement la durée de vie de ces armatures.

Le MTMDET vise à ce que ses ouvrages d'art aient une durée de vie minimale de 75 ans. Toutefois, le manque de consensus sur la durabilité et la performance à long-terme des armatures en PRFV fait en sorte que leur utilisation reste encore très limitée.

Dans ce contexte ce rapport comprend deux objectifs principaux:

- ✓ *Émettre un avis d'expert externe sur les résultats de tests effectués à ce jour sur la durabilité des armatures en PRFV à base de résine vinylester publiés dans la littérature accessible ainsi que dans la documentation remise par le MTMDET au responsable du projet : ces tests permettent-ils de garantir de façon satisfaisante que la durée de vie des armatures en PRFV est supérieure à celle de l'infrastructure ayant été construite avec des barres d'acier?*
- ✓ *Explorer les techniques de caractérisation de la durabilité et proposer différents types d'analyses afin de caractériser les barres « dégradées ».*

Ce rapport se divise alors en deux parties. La première s'attaque au premier objectif et la deuxième partie élabore justement sur le deuxième objectif. Par ailleurs, la première partie du rapport comporte les deux étapes suivantes qui répondent aux objectifs généraux et spécifiques cités précédemment :

**Étape 1 :** Une revue et une analyse critique de la littérature ont été effectuées sur le sujet pour bien cerner les connaissances existantes.

**Étape 2 :** Comparer les tests effectués sur les barres PRFV entre eux par différents chercheurs dans le monde et faire des recoupements afin d'émettre une opinion.

Pour répondre à cette problématique, nous présentons dans cette partie l'état des connaissances sur la durabilité des armatures en PRFV. Il s'agit d'effectuer une revue et une analyse critique de la littérature afin de mieux cerner les connaissances existantes. La démarche consiste à évaluer la dégradation de ces armatures en comparant les propriétés physico-chimiques et mécaniques, avant et après que ces armatures aient été exposées à un environnement pouvant refléter leur milieu de service. Toutefois, pour des raisons liées aux objectifs du projet, nous nous limiterons aux polymères renforcés de fibre de verre dont le vinylester est la matrice polymère. Ceci nous permettra de présenter une étude bibliographique beaucoup plus concise et focalisée sur un type de fibre qui est associé à un type de matrice. Rappelons aussi que le MTMDET, pour des raisons de durabilité, recommande l'utilisation d'une matrice à base de vinylester au lieu de celle à base de polyester car elle est la plus performante des deux en termes de température de service ( $T_g$  : température de transition vitreuse élevée et réticulation optimisée) et de cohésion fibre/matrice (meilleure résistance au cisaillement inter-laminaire) (*Benmokrane et al. 2015*).

De plus, dans l'optique où les barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) sont utilisées comme renfort interne dans les structures des ouvrages d'art du MTMDET, la performance à long terme de celles-ci devrait inéluctablement répondre à la condition de la durée de vie minimale de 75 ans pour leurs ouvrages d'art. Autrement dit, la principale performance que ces barres devraient exhiber est leur capacité à résister à une longue période d'exposition à un environnement agressif sans pour autant perdre leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. Rappelons tout de même que ces propriétés physico-chimiques, mécaniques, ou d'interface avec le béton des barres en PRFV sont susceptibles de changer sous l'effet des facteurs environnementaux. Il a été souligné que l'environnement de laboratoire, plus critique, diffère de celui en service, et la corrélation du niveau de dégradation entre ces deux environnements reste difficile à établir (*Tchitembo Goma et al. 2016*). Ceci est dû en partie à la difficulté de générer des estimations de la durée de vie précise de ces barres lorsqu'elles sont soumises à ces environnements. Bien que dans les conditions de laboratoire, certains auteurs ont extrapolé la durée de vie de ces barres sans pour autant répondre clairement à l'épineuse question de la durée de vie de 75 ans (*Chen et al. 2006, Robert et al. 2009, Robert and Fam 2012*), dans le cas de conditions

d'exposition à un environnement naturel, on penserait plutôt à exposer les barres dans un ou plusieurs sites extérieurs pendant plusieurs années afin de générer un historique de performance. Il est à noter que les données de performance recueillies à l'issue d'une telle expérience, à la différence des conditions expérimentales en laboratoire, sont loin d'être répétables ou reproductibles car les conditions environnementales ne sont pas contrôlables et ne se répètent pas à l'identique dans une période de temps ou d'une région quelconque à l'autre. Ceci revient à dire que la notion de performance à long terme de ces barres doit être intimement liée à l'environnement de la région dans laquelle elles sont utilisées. Tandis que pour les barres exposées aux conditions expérimentales en laboratoire, les propriétés mécaniques ainsi que les propriétés physico-chimiques sont évaluées également en laboratoire, pour celles exposées dans des conditions environnementales réelles, ce sont essentiellement, à l'heure actuelle, les propriétés physico-chimiques qui sont analysées. Toutefois, celles-ci ne semblent pas se détériorer après une période de service de 11 ans (*Loranger and Nazair 2016*) et 13 ans (*Mufti et al. 2011*).

La deuxième partie de ce rapport s'inscrit dans le contexte de la suite de la première partie. Il comprend par ailleurs l'étape suivante qui répond également aux objectifs généraux et spécifiques de l'ensemble du projet :

**Étape 3** : Explorer les techniques de caractérisation de la durabilité et proposer différents types d'analyses afin de caractériser les barres « dégradées ».

Dans la suite du rapport concernant cette deuxième partie nous présentons tout d'abord, à partir d'un certain nombre d'études existantes dans la littérature, les guides et les standards, les techniques et les méthodes de caractérisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques qui permettent d'évaluer la dégradation. Cette partie a pour but de prendre connaissance de différentes techniques de caractérisation utilisées dans ce domaine et d'identifier d'éventuels manquements. Ensuite, une proposition de nouvelles approches de méthodes de caractérisation des barres en PRFV sera faite.

Enfin, une partie comprenant une conclusion et les recommandations incluant un récapitulatif des objectifs du présent rapport, une synthèse des conclusions se rapportant au premier objectif et les propositions permettant de caractériser la dégradation sera présentée.

## 2 Revue de la littérature sur la durabilité des barres d'armature en PRFV

### 2.1 Introduction

La compréhension approfondie de la durabilité des armatures en PRFV placées dans leur milieu de service constitue encore un défi majeur à relever. Dans ce milieu, les armatures sont régulièrement confrontées, entre autres, à l'humidité et aux ions hydroxydes libres provenant d'une solution interstitielle du béton très riche en alcalins. Ces éléments, à travers différents mécanismes (*Nishizaki and Meiarashi 2002*), diffusent dans la matrice pour ensuite dégrader la barre d'armature (matrice polymère, fibres, interface fibres/matrice). La dégradation a pour conséquence la perte des propriétés mécaniques et la détérioration des propriétés physico-chimiques des armatures. Elle altère également l'adhérence de l'interface barre/béton.

Cette revue de la littérature décrit en premier lieu les mécanismes de dégradation des barres d'armatures en PRF. Ensuite, nous décrivons le principe du vieillissement accéléré et la méthode usuelle permettant d'estimer la durée de vie de ces barres. De plus, seront abordés quelques travaux dans lesquels les barres nues sont soumises à un vieillissement accéléré dans un environnement simulant le milieu alcalin (immersion directe). L'autre aspect du vieillissement accéléré (immersion indirecte) qui consiste à noyer les barres d'armatures en PRFV dans un milieu cimentaire qui est lui-même immergé ou non dans un environnement agressif sera également abordé. S'ajoute à ces deux cas de vieillissement, l'impact d'une sollicitation soutenue ou des cycles environnementaux (humidité/séchage, gel/dégel, basses températures). La durabilité de ces barres soumises aux conditions environnementales en services est aussi abordée. Les études portant sur l'évaluation de l'adhérence de l'interface barre/béton sont aussi abordées. Enfin, nous réviserons les études consacrées à l'effet de la température sur ces barres.

### 2.2 Mécanismes de dégradation

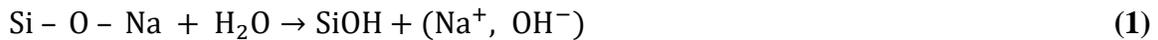
#### 2.2.1 Généralité

La dégradation des barres d'armature en PRFV est causée par la présence des agents agressifs provenant de leur environnement de service. L'humidité et les ions hydroxydes

constituent les principaux facteurs responsables du vieillissement de ces barres (*Chen et al. 2006*). Dans les paragraphes qui suivent, nous allons décrire l'effet de ces deux agents agressifs sur les éléments constituant les barres d'armatures en PRFV (matrice polymère, fibres, interface fibres/matrice).

### 2.2.2 Dégradation des fibres de verre

Les fibres de verre sont susceptibles de se dégrader lorsqu'elles sont exposées à l'humidité. La dégradation a lieu suite à l'absorption d'eau à la surface des fibres. Ceci se caractérise par l'hydratation des oxydes alcalins qui se trouvent initialement sur la surface du verre. Ce processus, aussi connu par lixiviation, se traduit par une réaction de dissolution des fibres dans l'eau et la diffusion d'ions alcalins ( $\text{Na}^+$ ) hors de la structure du verre (*Ishai 1975, Chen et al. 2007*) d'après l'équation (1). Une hydrolyse des ponts siloxane pourrait se produire suite à la formation des groupes hydroxyles ( $\text{OH}^-$ ), ce qui aurait pour conséquence la dégradation du réseau silicique qui se traduit selon les réactions présentées dans les équations (2) et (3). Lixiviation (l'échange ionique) et l'hydrolyse constituent les principaux mécanismes de dégradation des fibres de verre. Ces mécanismes sont accentués par la quantité d'alcalis présente dans la structure de verre et la température de l'environnement.



En ce qui concerne le milieu alcalin, deux principaux mécanismes combinés expliquent la dégradation des fibres de verre. Il s'agit des mécanismes qui se traduisent de la façon suivante :

- Les ions hydroxyles libres attaquent chimiquement le verre. Cette attaque, par une réaction de clivage comme explicité dans l'équation (2) permet de briser les ponts Si-O-Si du réseau. A l'issue de cette réaction, il y a la formation des ions  $\text{SiO}^-$  qui réagissent à leur tour avec de l'eau pour former ainsi des nouveaux ions  $\text{OH}^-$  selon la réaction définie par l'équation (3). Une augmentation de la température ou une

exposition prolongée va inévitablement amplifier ce mécanisme tendant à détériorer le réseau silicique.

- La concentration et la croissance des produits d'hydratation entre les filaments individuels de verre, conduisant ainsi à la fragilisation des fibres à cause de la nucléation de l'hydroxyde de calcium à la surface des fibres.

L'hydroxylation peut provoquer une piquuration et une rugosité à la surface des fibres. Celles-ci (piquuration et rugosité) agissent comme des défauts susceptibles de réduire significativement les propriétés mécaniques des fibres en présence d'eau (*Chen et al. 2006*).

### 2.2.3 Dégradation de la matrice polymère

La matrice polymère absorbe de l'eau en forme d'humidité, et cette eau se localise dans le réseau polymère et affecte la microstructure. A l'issue de ce processus le polymère se dégrade. Cette dégradation se caractérise alors par plusieurs mécanismes physiques et chimiques que l'on peut aisément énumérer ci-dessous.

- *La plastification*

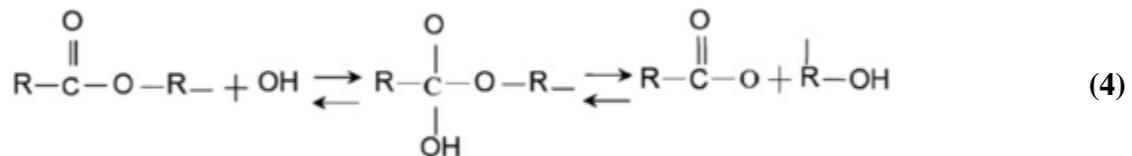
La plastification est un phénomène physique qui est réversible car il permet de réorganiser la morphologie du réseau et d'établir, entre les molécules d'eau et le polymère, les liaisons secondaires (liaisons H). Le principe repose sur le fait que les molécules d'eau, une fois dans le réseau polymère, brisent les liaisons secondaires entre groupes polaires portés par les chaînes pour donner place aux liaisons préférentielles (*Verdu 2000*). Ce mécanisme implique une diminution de la température de transition vitreuse ( $T_g$ ), de la cohésion du réseau et une augmentation de la mobilité des chaînes de polymères. De manière générale, ce phénomène entraîne la diminution des propriétés mécaniques de la matrice, à savoir : la rigidité, la résistance à la compression et au cisaillement. Il sied de rappeler que cette perte des propriétés mécaniques est réversible si l'on déshumidifie le matériau via une dessiccation.

- *L'hydrolyse*

L'hydrolyse peut être vue comme la réaction de l'eau sur les chaînes de polymères qu'elle est susceptible de briser. Elle se caractérise par la diminution des propriétés mécaniques.

Ce mécanisme dépend de la température et de la durée de l'exposition du polymère dans l'eau car à température ambiante, le mécanisme est lent et les effets néfastes de l'eau sont détectables qu'après une longue durée d'exposition (*Verdu 2000*).

Pour ce qui concerne le milieu alcalin, le béton constitue l'environnement naturel dans lequel les armatures en PRFV sont placées. Ce milieu est fortement alcalin (avec un pH variant entre 11,5 et 13,5) (*Neville 1996*), formé d'une solution interstitielle généralement composée d'hydroxydes de calcium [Ca(OH)<sub>2</sub>], de sodium (Na OH) et de potassium (KOH). Chen et al. (*Chen et al. 2007*) explique (voir équation (4)) que les ions hydroxyles libres OH<sup>-</sup> qui diffusent dans la matrice polymère agissent sur les groupes esters par hydrolyse alcaline suivant la réaction ci-après. Cette réaction contribue à la dégradation de la matrice polymère. A cet égard, il est à noter que la matrice polymère portant moins de liaisons esters (par exemple la matrice vinylester avec un important encombrement stérique) serait moins sensible à ce phénomène.



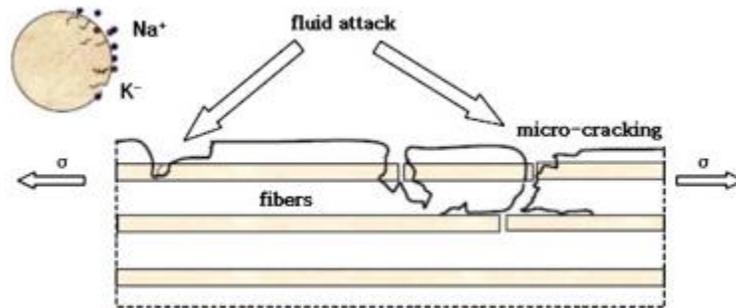
#### 2.2.4 Dégradation de l'interface fibres / matrice

L'interface représente une zone hétérogène séparant les fibres et la matrice, elle joue un rôle très important dans le transfert de charge entre la matrice et les fibres. Cette interface de près d'un micromètre constitue la zone la plus faible et susceptible de se dégrader facilement. En présence d'eau, les principaux mécanismes de dégradation sont les suivants :

- Par l'hydrolyse ou condensation de l'agent de couplage (silanes) de l'ensimage, il se produit une diminution des propriétés cohésives de l'interface.
- Sous l'effet des gonflements différentiels ou de la pression osmotique, il y a formation de microfissures et décohésions interfaciales. La dégradation se manifeste aussi par la délamination de l'interface.

La figure 1 représente les mécanismes de dégradation des barres d'armature en PRFV en présence des agents chimiques agressifs. En résumé, les effets néfastes tels que la

décohésion de l'interface fibre/matrice et la perte de résistance mécanique du composite induits par l'absorption de l'humidité et/ou par l'attaque des ions hydroxyles jouent un rôle sur l'évaluation de la durabilité lorsque les barres d'armatures en PRFV sont longtemps exposées à un environnement humide. Il est à signaler que dépendamment de la chimie du polymère, le degré de détérioration varie; conduisant ainsi à des changements thermiques, physique, mécaniques et/ ou chimiques réversibles et/ou irréversibles (Verdu 2000).



**Figure 1:** Mécanismes de dégradation des barres en PRFV en présence d'un milieu agressif (Won et al. 2008).

## 2.3 Principe du vieillissement accéléré et prédiction de la durée de vie des barres d'armature en PRFV

### 2.3.1 Processus du vieillissement accéléré

Le vieillissement accéléré se caractérise par une dégradation rapide des armatures en PRF lorsqu'elles sont immergées nues dans un environnement agressif simulant le milieu de service. De plus, sous l'effet de la température, les mécanismes responsables de la dégradation des barres s'accélèrent. Une température trop élevée pourrait donc aggraver la dégradation. Il est alors important, lors des campagnes de vieillissement accéléré, de limiter la température à 60°C comme le recommande l'ACI (ACI440.3R-04). Par ailleurs, les travaux de Robert et al. (Robert et al. 2008, Robert et al. 2010) ont montré qu'au-delà de 60°C les mécanismes de vieillissement accéléré ne sont pas caractéristiques de ceux ayant proprement cours dans les conditions de service. D'autres phénomènes se manifestant au voisinage de la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) (oxydation du polymère par exemple) aggravent la dégradation du matériau, ce qui peut ainsi permettre de surestimer les effets du vieillissement et, de facto, sous-estimer la durée de vie des armatures.

Les essais destinés au vieillissement accéléré ont pour objectif, en augmentant la température, d'accélérer la cinétique de dégradation lorsque les barres d'armature en PRFV sont exposées dans un environnement agressif quelconque. Les données obtenues à l'issue de ces essais de courte durée sont utilisées au moyen d'un modèle pour *extrapoler* le comportement à long terme et prédire la durée de vie des barres d'armatures en PRFV.

### 2.3.2 Prédiction de la durée de vie

Rappelons que l'approche couramment utilisée de nos jours pour estimer la durée de vie des barres d'armatures en PRFV repose sur le modèle d'Arrhenius. Dans ce modèle le taux de dégradation est exprimé de la manière telle qu'établie dans l'équation (5) :

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

où  $k$  est une constante associée à la cinétique de dégradation (inverse du temps : 1/temps);  $A$  est une constante du matériau et du processus de dégradation;  $E_a$  l'énergie d'activation de la réaction de dégradation;  $R$  la constante universelle des gaz parfaits; et  $T$  la température (en °K).

Pour ce modèle, on admet que le seul mécanisme qui gouverne la dégradation du matériau ne change pas avec le temps et la température durant la période d'exposition des armatures. Toutefois, le taux de dégradation augmente à mesure que la température augmente (*Chen et al. 2006, Huang and Aboutaha 2010*). De plus, l'équation d'Arrhenius peut être transformée comme suit :

$$\ln\left(\frac{1}{k}\right) = \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} - \ln(A) \quad (6)$$

Cette relation n'est autre qu'une fonction linéaire en  $1/T$  dont  $E_a/R$  est la pente et  $\ln(A)$  est une ordonnée à l'origine.

Pour prédire la durée de vie des barres d'armature en PRFV au moyen de ce modèle, on définit d'abord la relation qui existe entre la résistance en traction résiduelle (le ratio de la résistance initiale en traction sur celle d'après la dégradation) de ces barres et le temps d'exposition. Cette relation est exprimée par l'équation (7) :

$$Y = 100 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (7)$$

avec  $Y$  valeur de la résistance résiduelle en traction (%) ;  $t$  la durée de l'exposition ; et  $\tau = 1/k$ . Ensuite, on trace pour différentes valeurs du pourcentage résiduel de résistance en traction du matériau, le logarithme du temps en fonction de l'inverse de la température (équation (6)). A partir de cette équation on explicite enfin la droite d'Arrhenius à l'aide des régressions linéaires des nouvelles séries de points, en admettant que le taux de dégradation est fonction du temps. À cet effet, la pente  $E_a/R$  est évaluée. Ce qui permet ainsi d'en déduire le facteur d'accélération entre deux températures  $T_0$  et  $T_1$ , lequel facteur est appelé *Time Shift Factor (TSF)* et se définit comme suit (Huang and Aboutaha 2010) :

$$TSF = \frac{t_0}{t_1} = \frac{k_1}{k_0} = \exp \left[ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (8)$$

$t_1$  et  $t_0$  sont définis comme étant les temps nécessaires pour qu'une propriété quelconque atteigne sous l'effet du vieillissement les valeurs instantanées qu'elle présenterait respectivement aux températures  $T_1$  et  $T_0$ .

Note :

Il importe de comprendre que la loi d'Arrhenius (équation 7), qui n'est rien d'autre qu'une loi exponentielle, donne une prédiction de force résiduelle égale à zéro lorsque le temps tend vers l'infini. Le comportement mathématique idéal et, *a fortiori*, réel, serait que la force résiduelle tende vers une valeur plateau

$$Y = C + 100 \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right) \quad (9)$$

Ce que l'on souhaiterait donc est d'effectuer des tests sur une période assez longue qui permettraient d'identifier la valeur limite  $C$  qui représenterait la valeur résiduelle minimale. Cela suppose cependant que les barres d'armature en milieu naturel arrêteraient de se dégrader après un certain temps. Si ce n'est pas le cas, il faudrait avoir des données qui montrent que l'on tend vers une pente très faible de cette loi (taux de dégradation faible égale à  $-1/\tau$ ) après une période de temps réel de test qui ferait consensus dans la communauté scientifique.

## 2.4 Revue de la littérature

Cette revue de la littérature présente l'étude de la durabilité des barres d'armature en PRFV lorsqu'elles sont exposées à différentes conditions environnementales. 6 sections ont été nécessaires pour subdiviser cette revue. La première section s'intéresse à l'immersion directe de ces barres dans des solutions aqueuses et alcalines. La deuxième section tient compte de ces mêmes environnements de laboratoire, mais les barres sont au préalable scellées dans du béton avant d'être exposées à ces environnements (immersion indirecte). Quant à la troisième section, elle est consacrée à la durabilité de ces barres lorsqu'elles sont soumises aux conditions environnementales réelles. La quatrième section est consacrée à l'étude de la durabilité de ces barres soumises aux cycles de gel-dégel et ceux de mouillage-séchage. Quant à la cinquième section, elle s'intéresse à la durabilité de l'interface armature en PRFV/béton. En fin, la sixième section se consacre à la dégradation de ces barres sous l'effet de la haute température. Un récapitulatif d'une sélection de la revue de la littérature effectuée est présenté dans les tableaux 2 et 3 indiqués en annexe.

### 2.4.1 Immersion directe des barres d'armature en PRFV dans des solutions aqueuses et alcalines

Dans la littérature il existe plusieurs études (*Benmokrane et al. 2002, Rajan Sen and Tom 2002, Nkurunziza et al. 2003, Gilbert Nkurunziza and Radhouane 2005, Debaiky et al. 2006, Chen et al. 2006, Kim et al. 2008, Al-Salloum et al. 2013, Benmokrane et al. 2015*) dont les travaux se sont focalisés sur le vieillissement accéléré des barres d'armature en PRFV, lesquelles barres étaient directement immergées soit dans des solutions aqueuses et/ou alcalines. Durant cette campagne de vieillissement accéléré, certains auteurs ont soumis les armatures en PRFV à des sollicitations soutenues. La durabilité de ces barres est pour la plupart caractérisée en comparant la perte de résistance mécanique avant et après vieillissement.

Dans cette optique, Benmokrane et al. (*Benmokrane et al. 2002*) ont étudié la durabilité des différents types d'armatures en PRFV (fibres verre-E et verre-AR ou Alkali-Résistantes). Celles-ci avaient été exposées dans une solution alcaline (solution préconisée par l'ACI à pH = 12,8) sous une charge soutenue de 30 % de leur résistance ultime en traction, et à une température de 22 °C. Les auteurs avaient alors observé, après 140 jours

d'exposition, des chutes allant jusqu'à 17 % de la résistance en traction pour les armatures verre-E comparativement aux armatures verre-AR qui n'avaient montré aucune perte notable de la résistance en traction. Cette bonne performance des armatures en PRFV-AR pourrait être attribuée aux teneurs élevées en oxyde de zirconium ( $ZrO_2$ ) que comportent ces fibres, ce qui leur confère une bonne résistance chimique en milieu alcalin.

Sen et al. (*Rajan Sen and Tom 2002*) ont de leur côté mené une campagne de vieillissement accéléré sur des spécimens issus des armatures en PRFV. A cet effet, une solution alcaline [8,33 g NaOH, 23,3 g KOH et 10 g de  $Ca(OH)_2$  dilués dans 1 L d'eau distillée], dont le pH = 13,5, avait été utilisée pour immerger, à température ambiante, pendant 9 mois (270 jours) les spécimens destinés à cette étude. Afin de comparer l'effet de la charge soutenue sur les propriétés mécaniques de ces armatures, les spécimens avaient été, d'une part, sollicités sous chargement soutenu à 10 % de la résistance ultime des armatures et de l'autre, aucune charge soutenue n'avait été appliquée durant l'exposition. A l'issue de cette campagne de vieillissement, les auteurs avaient noté une diminution de 70 % de la résistance en traction pour les spécimens soumis à une charge soutenue, tandis qu'une perte de 63 % de la résistance ultime en traction avait été observée pour les spécimens non sollicités pendant le vieillissement. Les auteurs expliquent que la perte de la résistance mécanique pour les spécimens soumis à aucun effort soutenu indiquerait que la solution interstitielle simulant le béton diffuse dans la matrice vinylester et facilite la dégradation des fibres. Cependant, la différence sur la perte de résistance entre les spécimens soumis au chargement soutenu et ceux n'ayant subi aucune sollicitation, serait associée à la fissuration de la résine qui jouerait un rôle important dans le processus de dégradation.

Dans les travaux de Nkurunziza et al. (*Nkurunziza et al. 2003*) les armatures en PRFV de types ISOROD avaient été directement exposées pendant deux (2) mois (60 jours), une durée assez courte, dans deux solutions distinctes : de l'eau déminéralisée (simulant 100 % d'humidité relative (HR) et ayant un pH = 7) et une solution alcaline [1185 g  $Ca(OH)_2$ , 9 g NaOH et 42 g KOH dans 10 L d'eau déminéralisée ; pH = 13,11]. Dans les deux conditions, la température de l'exposition variait entre 55 et 75 °C, et les spécimens étaient soumis, durant l'exposition, à des chargements soutenus variant entre 30 et 40 % de la résistance ultime des barres. Après exposition, les résultats des essais de traction ont

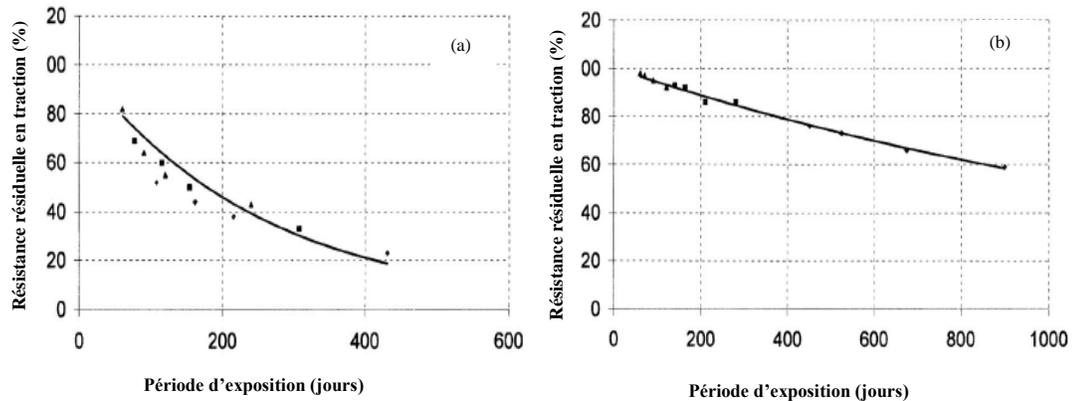
montré, respectivement, une perte de 4 % et de 11 % de la résistance initiale pour les armatures en PRFV exposées dans l'eau déminéralisée et pour celles immergées dans la solution alcaline. Les auteurs avaient alors estimé que le niveau de la réduction de la résistance à la traction dans les deux milieux serait négligeable puisque les valeurs obtenues sont comprises dans l'intervalle indiquant l'écart type des résultats des essais de traction. De plus, la température, le niveau de charge soutenue et l'environnement d'exposition avaient été contrôlés par la procédure développée pour mener les tests, ce qui explique entre autre que la dégradation soit alors minimale. Cependant, la question qu'on se poserait est celle de savoir comment se comporteraient ces barres dans les mêmes solutions vis-à-vis d'une durée d'exposition largement supérieure à 60 jours ?

Dans la même vision, Nkurunziza et Radhouane (*Gilbert Nkurunziza and Radhouane 2005*) ont fait vieillir de façon accélérée les mêmes types de barres en PRFV pendant 417 jours (10,000 h) dans deux environnements ayant particulièrement les mêmes conditions que l'étude (*Nkurunziza et al. 2003*). Rappelons tout simplement que dans ces conditions le pH de la solution alcaline était cette fois ci égale à 12,8 et le vieillissement avait été réalisé à température ambiante sous deux niveaux de chargement soutenu à 29 et 38 % de la résistance ultime. Les résultats obtenus n'ont prouvé aucune différence majeure sur la résistance en traction avant et après l'exposition des barres en PRFV dans l'eau déminéralisée. Cependant, dans la solution alcaline, des pertes de résistances avaient été observées. Les auteurs avaient respectivement quantifié des diminutions 12 et 32 % de la résistance en traction sous des niveaux de chargement de 29 et 38 % de la résistance garantie. A la lumière de ces résultats il est à noter que dans l'eau déminéralisée le niveau de contrainte appliqué n'a pas eu d'effet majeur sur la dégradation des barres. Par ailleurs, l'effet combiné de la solution alcaline et du niveau de contrainte le plus élevé (38 % de la résistance ultime) a causé la plus grande perte de résistance en traction. La température de l'exposition n'étant pas plus élevée (température ambiante), la durée d'exposition (417 jours) jouerait alors un rôle important sur le processus de dégradation si l'on compare à l'étude (*Nkurunziza et al. 2003*) (60 jours d'exposition). Par contre, les auteurs avaient reporté que l'élongation ultime résiduelle ainsi que le module d'élasticité résiduel n'avaient pas été affectés après le vieillissement.

Debaiky et al. (*Debaiky et al. 2006*) ont effectué leur campagne de vieillissement dans les mêmes solutions que celles utilisées dans (*Gilbert Nkurunziza and Radhouane 2005*) pour immerger les barres en PRFV pendant 4 mois (120 jours). Dans cette étude les barres avaient été mécaniquement sollicitées pendant le vieillissement sous des niveaux de chargement soutenu variant entre 19 et 29 % de la résistance ultime en traction. En outre, l'exposition avait été faite à différentes températures, soit une température modérée (température ambiante de 22 °C) et des températures considérées hautes (variant entre 45 et 73 °C). Après l'exposition dans les environnements dédiés à vieillir les barres en PRFV, des réductions allant jusqu'à 15 % de la résistance en traction ultime pour des barres exposées dans l'eau et 17 % pour celles mises dans la solution alcaline ont été respectivement notées par les auteurs. Cependant, aucun changement significatif n'avait été noté sur le module élastique à l'issue de la campagne de vieillissement.

Dans leur étude, Chen et al. (*Chen et al. 2006*), ont prédit la durabilité des barres en PRFV en utilisant des données des essais de vieillissement accéléré à court-terme. A cet effet, ils ont immergé les barres en PRFV dans deux solutions alcalines pour une durée de 240 jours (8 mois). Une des solutions (solution 1) avait la composition ci-après : [2,4 g/L Na(OH) ; 19,6 g/L K(OH) ; 2 g/L Ca(OH)<sub>2</sub> ; pH = 13,6]. L'autre solution (solution 2) avait pour composition : [0,6 g/L Na(OH) ; 1,4 g/L K(OH) ; 0,0037 g/L Ca(OH)<sub>2</sub> ; pH = 12,7]. Dans les deux cas de figure et durant l'exposition, les solutions étaient maintenues sous différentes températures (20,40 et 60 °C). Les résultats obtenus montrent une perte de résistance en traction de 80 % pour les barres immergées dans la solution 1 à 60 °C. Dans la solution 2, on observe une perte de résistance en traction de 40 % à la même température. Selon les prédictions des auteurs, basées sur le modèle d'Arrhenius (voir figure 2), et pour une température moyenne de 20 °C, une dégradation de plus 80 % au bout d'un (1) an pour les barres immergées dans la solutions 1 a été estimée. Alors qu'au bout de deux (2) ans et demi, les auteurs prédisent une dégradation de 40 % des barres exposées dans la solution 2. Remarquons que le faible taux d'alcalinité dans la solution 2, comparativement à la solution 1, serait probablement moins agressif pour les barres en PRFV exposées. Ce qui reviendrait à dire que différentes concentrations de solution alcaline causeraient des taux de dégradation différents. De plus, les milieux permettant de simuler la dégradation des

barres d'armature en PRFV dans les conditions en service semblent être très critiques, ce qui expliquerait la très forte dégradation de ces barres.



**Figure 2** : Courbes maitresses de prédiction de la durée de vie à partir du modèle d'Arrhenius : (a) barres en PRFV immergées dans la solution 1 et (b) barres en PRFV immergées dans la solution 2 (Chen et al. 2006).

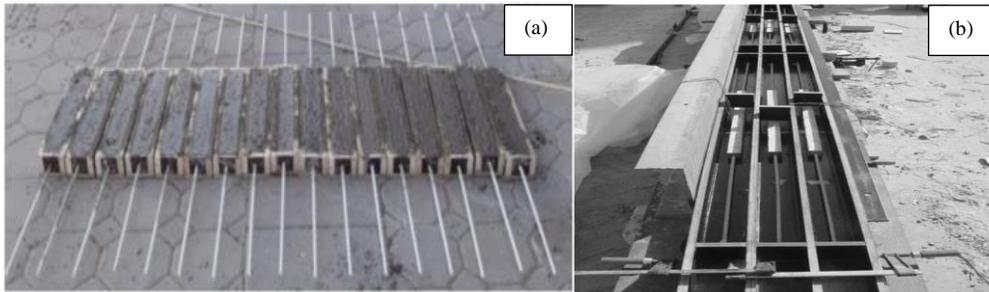
Alsalloum et al. (Al-Salloum et al. 2013) ont investigué l'effet des conditions environnementales sévères sur les propriétés en traction des barres d'armatures en PRFV. Ces barres avaient été exposées pendant 18 mois dans trois différentes solutions : de l'eau du robinet (température ambiante et 50 °C), de l'eau marine (température ambiante et 50 °C) et une solution alcaline (pH 12,5-13) à 50 °C. L'évaluation de la résistance en traction a permis aux auteurs de noter les pertes des résistances dans chaque milieu environnemental. A cet égard, des pertes de 24,5 % de résistance en traction avaient été notées pour les barres exposées dans l'eau du robinet à 50 °C. Dans l'eau marine, les barres avaient perdu 12 % de leur résistance en traction à 50 °C, alors que dans la solution alcaline elles avaient perdu 24,04 % de leur résistance en traction. De plus, les auteurs soulignent que les barres testées dans cette étude exhibaient une bonne résistance en traction dans l'eau et dans la solution alcaline comparativement à d'autres barres existantes dans la littérature. Cette bonne performance est la conséquence directe des améliorations apportées dans la fabrication de la nouvelle génération des barres d'armature en PRFV.

Tout récemment, la solution alcaline [118,5 g Ca(OH)<sub>2</sub>], 0,9 g NaOH et 4,2 g KOH dans 1 L d'eau déminéralisée ; pH = 12,6 à 13,11] a été utilisée par Benmokrane et al. (Benmokrane et al. 2015) afin d'immerger les barres d'armatures en PRFV pendant une durée de 5,000h (208 jours) à la température de 60 °C. Les résultats des essais mécaniques

conduits après l'exposition montrent une diminution d'environ 7 % de la résistance en flexion. Dans cette étude, la durabilité des autres types de barres (PRFB avec matrice vinylester d'une part et matrice époxy de l'autre), vieillies dans les mêmes conditions, avait été comparée à celles faites en PRFV. Pour cela, des pertes d'environ 37 et 39 % de la résistance en flexion avaient été respectivement notées pour les barres en fibres de basalte avec matrice vinylester et matrice époxy. Ces observations indiquent que les barres en PRFV sont celles qui se dégradent le moins.

#### 2.4.2 Immersion indirecte des barres d'armature en PRFV dans des solutions aqueuses et alcalines

L'immersion directe des barres d'armatures en PRFV nues ne reflète pas les conditions réelles dans lesquelles elles sont régulièrement maintenues en service. Pour une évaluation réaliste de la durabilité, le prisme de béton ou de mortier dans lequel sont scellées les armatures en PRFV servent au mieux de milieu représentant les conditions de service. La figure 3 montre des barres d'armatures en PRFV scellées dans du béton.



**Figure 3** : Exemple de dispositif montrant les barres d'armature en PRFV noyées dans du béton (*Almusallam and Al-Salloum 2006, El-Maaddawy et al. 2015*).

Certains auteurs utilisent alors ce dispositif qu'ils immergent ensuite dans une solution alcaline ou aqueuse, laquelle solution n'est donc pas en contact directe avec les barres d'armatures en PRFV. Toutefois, la diffusion de cette solution se fait progressivement à travers les pores du béton pour ainsi probablement dégrader les armatures (*Benmokrane et al. 2002, Chen et al. 2007, Robert et al. 2009*). On pourrait ainsi appeler cette méthode comme étant un processus de vieillissement indirect.

Dans l'étude de Benmokrane et al. (*Benmokrane et al. 2002*) les barres d'armatures en PRFV avaient été noyées dans du béton. Cet ensemble avait d'abord été

maintenu dans l'eau pour le traiter à température ambiante pendant deux (2) mois avant les essais. Cette eau, dont le pH mesuré à 10,5, avait été utilisée pour immerger l'ensemble (barre d'armature dans le béton) pendant 140 jours et le soumettre à des chargements mécaniques soutenus variant entre 25 et 68% de leur résistance en traction. Les observations faites par les auteurs ont permis de souligner qu'il existait un seuil de chargement entre 25 et 30 % de la résistance en traction, en dessous duquel les barres d'armatures ne se dégradent pas et qu'aucune rupture ne survient.

Almusallam et Al-salloum (*Almusallam and Al-Salloum 2006*) ont investigué l'effet de la charge soutenue sur la durabilité des barres d'armatures en PRFV noyées dans du béton. Ces barres avaient été exposées dans deux environnements dissimilaires, en l'occurrence l'eau du robinet et l'eau marine, à la température de 40°C. La durée totale de l'exposition était de 16 mois (480 jours). Pendant la campagne de vieillissement une charge soutenue de 20 à 25 % de la résistance ultime avait été appliquée aux barres. Pour mieux cerner l'effet de cette charge soutenue, d'autres échantillons de ces mêmes barres noyées dans du béton mais dépourvues de tout effort mécanique avaient été vieillis dans les mêmes conditions. Après ces campagnes de vieillissement, les barres d'armatures avaient été testées en traction et une comparaison des résultats avait été effectuée entre les barres soumises au chargement soutenu et celles étant libres de tout effort mécanique pendant le vieillissement. Les auteurs avaient alors tiré les conclusions suivantes :

- Dans l'eau du robinet, les barres libres de tout effort mécanique avaient perdu 16,3 % de leur résistance en traction, alors que celles soumises au chargement soutenu avaient perdues 47,1 % de leur résistance en traction ;
- Dans l'eau marine on pouvait noter une perte de 19,7 % de la résistance en traction pour les barres dépourvues de toute charge soutenue contre 47,9 % dans le cas où une charge soutenue avait été appliquée aux barres.

Les résultats de cette étude indiquent clairement que la dégradation des barres d'armature en PRFV est importante lorsqu'elles sont soumises à une charge soutenue pendant le vieillissement dans l'eau du robinet et dans l'eau marine.

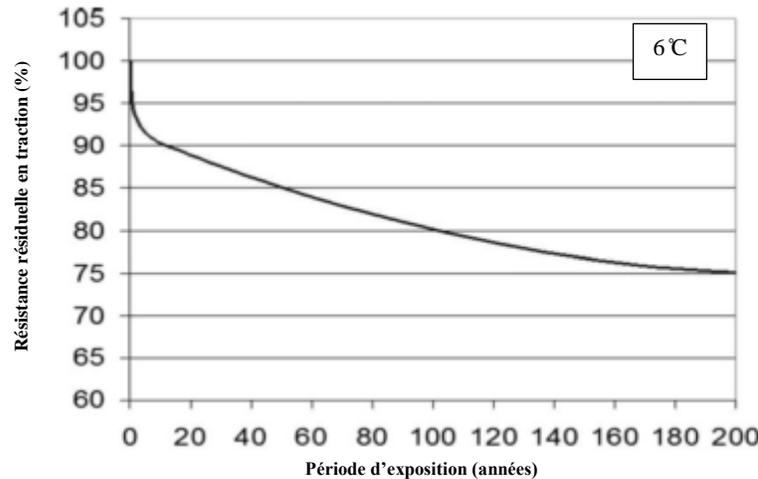
Des barres d'armatures en PRFV noyées dans du béton avaient été immergées dans une solution alcaline par Chen et al. (*Chen et al. 2007*) pour évaluer leur durabilité. La durée

de l'immersion et la température au cours de celle-ci étaient respectivement de 90 jours et de 60°C. A l'issue des campagnes de vieillissement et après les essais de traction, les auteurs avaient observé une réduction de 27 % de la résistance en traction. Rappelons que pour les mêmes barres d'armature directement immergées dans la même solution alcaline mais pendant seulement 60 jours et à la même température, les mêmes auteurs avaient reporté une diminution de 37 % de la résistance en traction. Au regard de ces résultats, il sied de mentionner que les armatures en PRFV se dégradent plus rapidement lorsqu'elles sont exposées directement dans la solution alcaline que lorsque celles-ci sont d'abord scellées dans du béton avant d'être immergées dans la solution alcaline.

Kim et al. (*Kim et al. 2008*) ont pour leur part utilisé trois solutions distinctes (eau du robinet à 100 % HR ; solution 3 % NaCl et une solution alcaline [1,4 % KOH, 1,0 % NaOH, 0,16 % Ca(OH)<sub>2</sub>, pH = 13]) pour laisser vieillir des barres en PRFV pendant 60 jours (2 mois) à une température de 40°C. Ces barres avaient été au préalable noyées dans du béton. Après la campagne de vieillissement, les barres ont été testées en traction. Les résultats de ces tests ont alors révélé des pertes de résistance en traction d'environ 15 % pour les barres immergées dans l'eau du robinet et dans la solution de chlorure de sodium, et d'environ 29,6 % pour celles exposées dans la solution alcaline. Ces résultats renseignent qu'indépendamment de la solution utilisée, la résistance en traction se trouve être réduite. En particulier, l'environnement alcalin est celui qui cause plus de dégradation que les deux autres environnements.

Des barres d'armature en PRFV recouvertes d'un enrobage de mortier avaient été considérées dans les travaux de Robert et al. (*Robert et al. 2009*). De l'eau du robinet à 20, 40 ou 50°C avait alors permis de faire vieillir ces barres d'armatures jusqu'à une durée de 8 mois (240 jours). Les observations faites, pour la température d'exposition de 50°C, n'ont montré aucun effet sur le module élastique des barres vieilles de façon indirecte. De plus, à la même température (50°C), de faibles pertes de résistance en traction de l'ordre de 16 % avaient été notées. Les auteurs confirment que ces chutes de résistance en traction sont beaucoup plus faibles que celles notées dans d'autres études (*Benmokrane et al. 2002, Chen et al. 2006*) dans lesquelles les barres d'armature en PRFV dépourvues de tout recouvrement sont directement exposées dans une solution alcaline. De plus, en extrapolant

les résultats expérimentaux et en utilisant le modèle d'Arrhenius (voir figure 4), les auteurs prédisent une perte de 25 % de la résistance en traction de ces barres d'armature en PRFV après une durée de près de 200 ans dans les conditions de service (température moyenne de 6°C).



**Figure 4 :** Courbe maîtresse de prédiction de la durée de vie à partir du modèle d'Arrhenius (température moyenne de 6°C) (Robert et al. 2009).

Au regard de ce résultat, on serait tenté de conclure que la problématique sur la performance à long terme des barres d'armatures en PRFV aurait trouvé une réponse adéquate. Seulement, force est de constater que la controverse entourant cette question demeure d'actualité. La validité de ce modèle prédisant la durée de vie de ces barres devrait en quelque sorte s'appuyer sur des données issues des campagnes de vieillissement pour de plus longues durées d'exposition. Il est donc évident qu'il manque de données à long terme pour valider ce modèle. Il convient alors de souligner qu'il est nécessaire de rester prudent par rapport aux prédictions données par cette approche, et que les chercheurs dans ce domaine devraient être à mesure de déterminer combien d'années de service correspondent à une durée quelconque d'exposition en laboratoire pour une armature.

Afin d'étudier l'effet potentiel d'une pré-fissuration sur la cinétique de dégradation des barres d'armatures en PRFV, Robert et Benmokrane (Robert and Benmokrane 2010b) ont préalablement chargées ces armatures à 20, 40, 60 et 80 % de leur résistance en traction. Après la pré-charge, les armatures avaient été ensuite noyées dans un mortier humide et vieillies pratiquement dans des conditions similaires à celles opérées dans l'étude (Robert et al. 2009). Cependant, la durée du processus de vieillissement était de 240 jours. Les

résultats obtenus indiquent qu'aucune dégradation supplémentaire n'a été observée. De plus, les auteurs soulignent que la résistance résiduelle en traction chute jusqu'à seulement 95 % (soit une perte de seulement 5 %) pour les spécimens ayant été préalablement chargés à 80 % de la résistance en traction. Ces observations renseignent que la pré-charge n'avait produit aucune fissure ou microfissure sur les barres d'armatures en PRFV, dans le cas contraire la dégradation devrait être importante.

Robert et Benmokrane (*Robert and Benmokrane 2012*) ont mené une campagne de vieillissement (120 jours,  $T = 70^{\circ}\text{C}$ ) en immergeant dans l'eau du robinet et dans une solution saline des barres d'armature en PRFV préalablement scellées dans du béton et soumises à aucune sollicitation soutenue. Les résultats des essais de traction effectués après le vieillissement révèlent que la durabilité de ces barres, peu importe la solution utilisée (l'eau du robinet ou la solution saline 3 % NaCl), n'avait pas été affectée. En outre, les auteurs précisent que selon les prédictions (modèle d'Arrhenius), même après une durée de vie de 100 ans, la résistance résiduelle en traction serait respectivement de 70% et 77% pour les températures moyennes de  $50^{\circ}\text{C}$  (régions chaudes du moyen orient) et  $10^{\circ}\text{C}$  (régions nordiques). Toujours est-il que les prédictions se basent sur des données de courte durée (120 jours d'exposition).

Almusallam et al. (*Almusallam et al. 2013*) ont étudié la dégradation des propriétés en traction des barres d'armatures en PRFV scellées dans du béton, puis exposées dans des conditions environnementales de laboratoire et de terrain pendant une durée maximale de 18 mois. Dans les conditions de laboratoire et pour immerger les barres, les auteurs avaient utilisé l'eau du robinet et l'eau marine à la température ambiante et à  $50^{\circ}\text{C}$ , ainsi qu'une solution alcaline ( $\text{pH} = 12,5-13$ ) à  $50^{\circ}\text{C}$ . Dans des conditions de terrain, deux milieux ayant quasiment la même température moyenne annuelle avaient été utilisés pour exposer les barres. Il s'agit d'un milieu aride, chaud et sec (26 % HR) et d'un autre milieu chaud et humide (52 % HR). A la fin de ces campagnes de vieillissement, et suite aux essais de traction réalisés, les auteurs avaient souligné les conclusions suivantes : les conditions environnementales de terrain n'étaient pas critiques et aucune dégradation notable n'avait été observée; le taux de dégradation de la résistance en traction augmente à mesure que l'on augmente la température dans l'eau du robinet : 6 % de perte de résistance en traction

à la température ambiante contre 23,5 % à 50 °C; une perte d'environ 14 % de la résistance en traction pour les barres plongées dans l'eau marine (température ambiante et 50 °C). Rappelons que les barres avaient perdu 21,7 % de leur résistance en traction dans la solution alcaline. Par ailleurs, aucun effet significatif n'avait été observé sur le module élastique et la déformation ultime.

La résistance résiduelle de deux types de barres d'armature en PRFV noyées dans du béton a été étudiée par El-Maaddawy et al. (*El-Maaddawy et al. 2015*). Les deux types de barres (type I et type II) diffèrent par leur résistance initiale et par leurs diamètres internes et externes. La barre de type I qui mesurait respectivement 7,2 et 8 mm de diamètre interne et externe avait une résistance initiale moins élevée que celle de type II dont les diamètres interne et externe mesuraient respectivement 8 et 9 mm. Ces barres, une fois noyées dans le béton, avaient été immergées dans l'eau du robinet pendant 150, 300 et 450 jours à des températures de 20, 40 et 60 °C. À l'issue de cette campagne de vieillissement accéléré, les barres conditionnées avaient été soumises à des essais de traction afin de comparer la perte de résistance avant et après le conditionnement. Les auteurs avaient alors noté que la barre de type II (résistance initiale élevée) montrait des résistances résiduelles plus faibles que la barre de type I (résistance initiale faible). D'un côté, des pertes de 15 % de résistance en traction avaient été observées dans les barres de type I après 450 jours d'immersion à 60 °C. De l'autre, les barres de type II perdaient jusqu'à 50 % de leur résistance initiale dans les mêmes conditions. Les pertes de résistance, comme déjà mentionné par plusieurs autres auteurs, étaient beaucoup significatives à la plus haute température, en combinaison avec la plus longue durée d'exposition des barres. Rappelons tout de même que le niveau de résistance initiale en traction pour chacun de ces deux types de barre n'avait pas été mentionné dans cette étude.

### 2.4.3 Durabilité des barres en PRFV exposées aux conditions environnementales réelles

#### 2.4.3.1 Introduction

Cette section présente une revue de la littérature qui aborde l'étude de la durabilité des barres d'armature en PRFV exposées dans leur milieu d'utilisation. Il s'agit ici de mettre en exergue les conditions environnementales réelles que rencontrent les barres et évaluer l'impact de celles-ci sur ces barres. En d'autres termes, cette approche nous permettra de

mieux cerner la différence entre le degré d'agressivité des conditions réelles en service et celui des conditions de laboratoire (en particulier le vieillissement accéléré indirect) pour ensuite se faire une idée quant à la performance à long terme de ces barres d'armature en PRFV. Rappelons que dans la littérature qui aborde cette question de durabilité des structures en béton renforcé avec des barres en PRFV, l'investigation de celle-ci se fait d'une part sur des échantillons prélevés des structures existantes. D'autre part, elle est directement menée sur des structures construites, réparées ou renouvelées.

#### *2.4.3.2 Durabilité des barres en PRFV soumises aux conditions de service*

Plusieurs auteurs (*Phillips 2004, Onofrei 2005, Mufti, Banthia, et al. 2007, Mufti, Onofrei, et al. 2007, Eitel 2005, Mufti et al. 2011, Sennah et al. 2011, Murphy 2013, Harik and Peiris 2014, Nazair and Loranger 2015, Loranger and Nazair 2016*) ont mené des travaux d'investigation de la durabilité des barres d'armature en PRFV utilisées dans des structures en béton, particulièrement des ponts érigés dans certains pays du monde. Ces travaux sont entre autres des rapports d'expertises, des articles de conférences, des mémoires de maîtrise et des thèses de doctorat.

À cet effet, Phillips (*Phillips 2004*) dans son mémoire de maîtrise s'était assigné comme objectif d'investiguer l'efficacité et la durabilité des barres d'armature en PRFV utilisées comme renfort interne dans un tablier en béton. L'infrastructure investiguée a été construite en 2003. Il s'agit du pont sur la route 668 traversant le ruisseau Gills, situé dans le comté de Franklin, dans l'état de Virginie aux USA. Durant la construction du pont, celui-ci avait été instrumenté avec des thermocouples et des thermistances afin de mesurer la température dans le tablier et les déformations éventuelles des barres en PRFV. Des essais de charge de service avaient aussi été effectués sur le pont. À l'issue de cette investigation, les auteurs ont noté que, de façon générale, le tablier exhibait un excellent comportement mécanique. Cependant, aucune information supplémentaire n'est disponible à ce jour depuis la dernière investigation conduite en 2004, soit 13 maintenant.

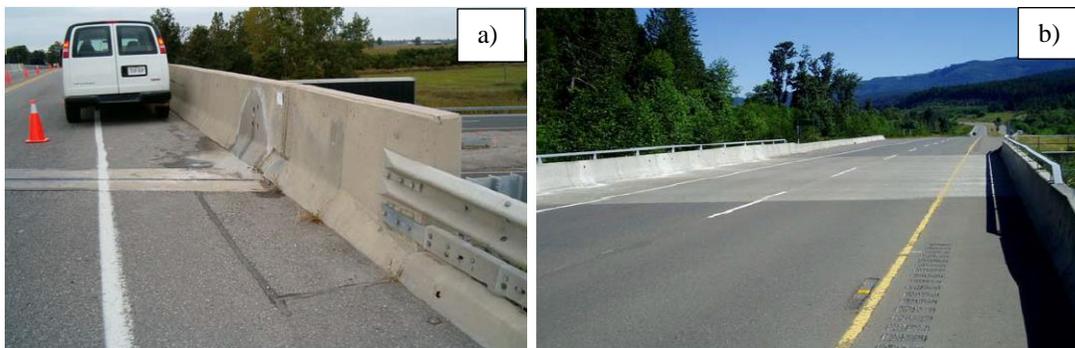
Onofrei et al. (*Onofrei 2005*) ainsi que Mufti et al. (*Mufti, Banthia, et al. 2007, Mufti, Onofrei, et al. 2007*) se sont intéressés à investiguer la durabilité des barres d'armature en PRFV ayant été mises en service dans des structures pendant une certaine durée. Cinq

structures (en béton) Canadiennes exposées à différentes conditions environnementales furent choisies par les auteurs :

- le *Hall's Harbor Wharf*, totalisant 5 ans en service au moment de l'expertise, est situé en Nouvelle-Ecosse. C'est la première structure marine au Canada construite avec les barres d'armature en PRFV et soumise à une gamme de température variant entre -35 et 35 °C, des cycles de gel-dégel, cycles de mouillage-séchage, de l'humidité chargée de chlorure et de l'eau salée ;
- le *pont Joffre* avec ses 7 ans de service. Ce pont est situé à Sherbrooke et est fréquemment soumis à une gamme de température variant entre -35 et 35 °C, des cycles de gel-dégel, cycles de mouillage-séchage ainsi que les sels de déglacage pendant l'hiver ;
- le *pont Chatham* (voir figure 5), en service depuis 8 ans au moment de l'étude, est situé à Chatham en Ontario. Le pont est exposé à une gamme de température variant entre -24 et 30 °C, des cycles de gel-dégel, cycles de mouillage-séchage ainsi que des sels de déglacage pendant l'hiver ;
- le *pont Crowchild Trail*, situé à Calgary et vieux de 8 ans lors de l'étude. Ce pont est exposé à une gamme de température variant entre -15 et 23 °C, des cycles de gel-dégel, cycles de mouillage-séchage ainsi que des sels de déglacage pendant l'hiver;
- le *pont Waterloo Creek* (voir figure 5) vieux de 6 ans au moment de l'investigation, est situé sur l'île de Vancouver. Il est exposé à la gamme de température variant entre 0 et 23 °C et les sels de déglacage sont régulièrement utilisés sur le tablier).

De ces structures, un prélèvement de carottes en béton contenant des barres d'armature en PRFV avait été effectué. Au total, trois échantillons avaient été prélevés sur chaque structure. La procédure de préparation des échantillons en vue de leur investigation est expliquée dans (Onofrei 2005). Les investigations, se limitant aux analyses physico-chimiques, furent conduites de façon indépendante par trois différents groupes de recherche travaillant dans ce domaine. Rappelons que les échantillons furent prélevés et investigués en 2004. De ces investigations, les auteurs soulignent que les barres d'armature en PRFV exposées dans leur milieu naturel d'utilisation ne présentaient aucune dégradation significative au bout de 5 et 8 ans après leur mise en service. Ceci indique par ailleurs que

les résultats obtenus à partir des barres prélevées des structures exposées aux conditions environnementales idéales ne sont pas en accord avec ceux des résultats des essais de vieillissement accéléré indirect. L'environnement de laboratoire proche des conditions réelles (vieillissement accéléré indirect) ne représente donc pas le milieu naturel. De plus, les auteurs suggèrent qu'avec la faible perméabilité de la matrice polymérique, les fibres de verre ne devraient pas être attaquées dans le temps par les alcalins et les barres d'armature en PRFV seraient plus durable dans ces conditions environnementales. Toutefois ces conclusions aussi importantes soient-elles, auraient dû être associées aux résultats des essais mécaniques pour ensuite estimer la performance à long terme de ces barres d'armature en PRFV, ce qui aurait permis de corrélérer le niveau de détérioration et celui d'une éventuelle perte de propriétés mécaniques, et ensuite évaluer la durabilité de ces barres dans un milieu cimentaire en service.



**Figure 5 :** Ouvrages Canadiens investigués : a) le pont Chatham et b) le pont Waterloo creek (Mufti, Banthia, et al. 2007).

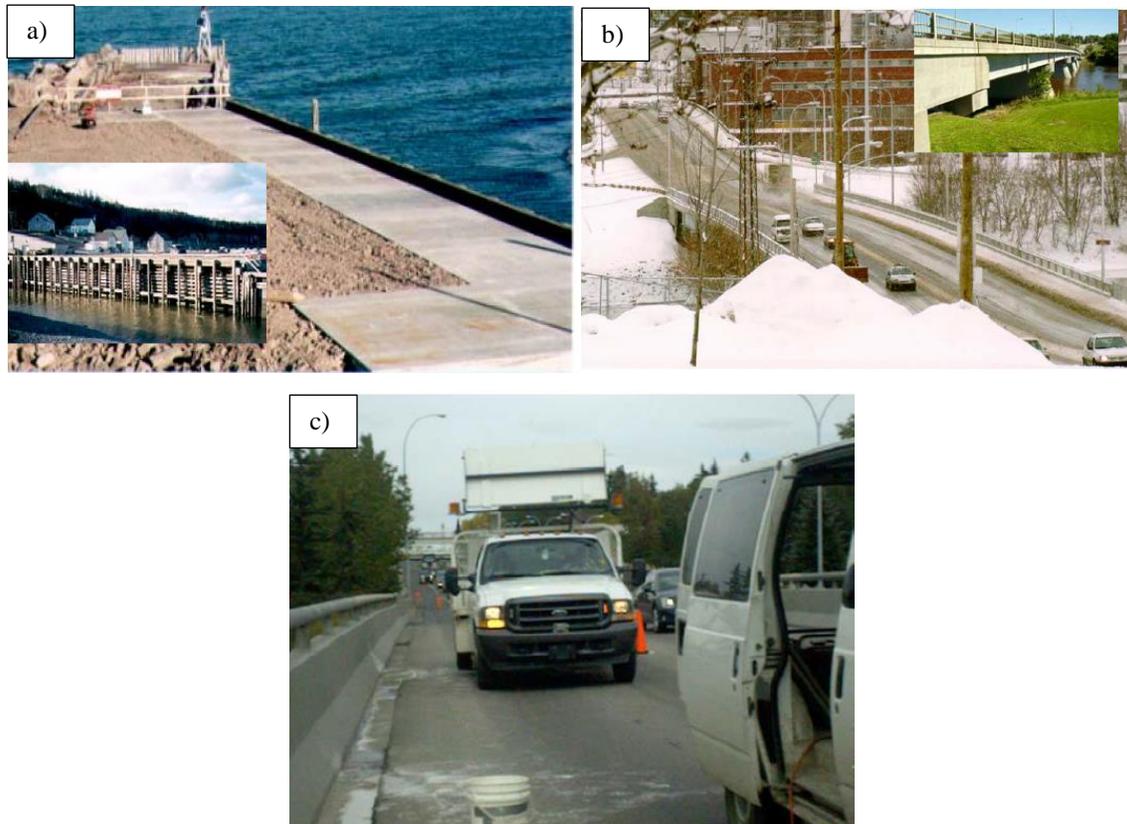
Eitel (Eitel 2005) a rapporté dans sa thèse de doctorat les résultats d'une étude de réhabilitation du pont Miles Road situé dans l'état de Ohio aux USA. Ce pont est fréquemment soumis en moyenne à 53 cycles de gel-dégel et une application lourde de sel de déglacage chaque année, causant ainsi la fissuration du béton et la contamination en chlorure. L'objectif de son projet de doctorat était alors de remplacer tout le tablier en béton armé avec des barres en acier par un tablier avec un renfort en PRFV. Ce projet, selon l'auteur, représentait pour la première fois dans le monde l'utilisation totale des barres d'armature en PRFV comme renfort du tablier d'un pont routier à plusieurs travées. Pour conduire à bien l'étude de réhabilitation de ce pont, un système de monitoring avait été placé sur ce dernier afin de collecter les données (température, déformation, déflexion).

Deux types d'échantillonnages avaient été alors nécessaires : un échantillonnage environnemental saisonnier et un autre échantillonnage rapide lors des tests de charge en service pendant une durée minimale de 2 ans. A cet effet, 6 tests de charge en service et 2 échantillonnages saisonniers à différentes périodes avaient été effectués sur le pont entre mai 2002 et août 2004. D'après les résultats des tests effectués, les auteurs ont rapporté que le pont réhabilité exhibait un excellent comportement mécanique en accord avec les prédictions données par les modèles par éléments finis. Le tablier en PRFV présentait une rigidité et une continuité transversale plus élevées que celles du tablier original. Les déflexions relatives et les contraintes dans les poutres du tablier rénové étaient relativement les mêmes que pour le tablier original. A la lumière de ces résultats, il est à noter que les barres d'armature en PRFV utilisées comme renfort dans un tablier exhibent un excellent comportement mécanique.

Benmokrane et al. (*Benmokrane et al. 2007*) se sont intéressés à mener une investigation sur une structure réelle. Pour cela, ils ont testé mécaniquement le tablier du pont de Val-Alain situé sur l'autoroute 20 Est. Rappelons que ce pont en est le premier au Canada à avoir un tablier en béton qui est entièrement renforcé avec les barres d'armature en PRFV. Pour les besoins de l'investigation, le pont avait été instrumenté avec des jauges de déformation à résistance électrique et des capteurs à fibre optique placés le long du pont à des positions jugées critiques. Les détails et la schématisation de cette instrumentation peuvent être trouvés dans l'article cité. Le but de cette instrumentation était de mesurer la température et les déformations internes dans le tablier. De plus, le pont avait été testé sous charge de service afin de mesurer sa performance mécanique. Les essais effectués montrent que la structure testée exhibait un excellent comportement mécanique. Par ailleurs, la déformation mesurée était inférieure à 0,4 % de la déformation ultime des barres en PRFV. Toujours est-il que cette déformation est inférieure à celles attendues lorsque l'on utilise la méthode de conception par flexion (*CSA 2000*). Les auteurs soulignent que les résultats de ces essais menés sur le terrain permettront de réduire la quantité des barres d'armature en PRFV nécessaires pour la construction de dalles, ce qui aura pour effet positif de réduire le coût initial élevé des barres en PRFV lors de la conception. Les auteurs soulignent aussi que l'utilisation d'un tel renfort non métallique en combinaison avec du béton haute performance conduit à une durée de vie prévue de plus de 75 ans. Ceci reste toutefois à

élucider par le biais des investigations des ouvrages d'art construits avec ces barres comme renforts internes. Ces ouvrages devront être alors soumis à un suivi faisant appel aux méthodes de travail du MTMDET.

En 2009, soit 5 ans après leur dernière étude de même envergure, Mufti et al. (*Mufti et al. 2011*) ont mené une expertise sur trois des cinq (5) ouvrages Canadiens déjà investigués en 2004. Il s'agissait du quai Hall's Harbor, des ponts Joffre et Crowchild Trail (voir figure 6). Tout comme les investigations effectuées en 2004, les auteurs ne s'étaient intéressés ni plus ni moins qu'aux analyses des propriétés physico-chimiques pouvant indiquer le niveau de dégradation des barres d'armature en PRFV. A l'issue de ces analyses, pareillement aux investigations menées en 2004, les résultats ont montré que les barres d'armature en PRFV n'avaient subi aucune dégradation supplémentaire. De par ces analyses, 10 à 13 ans après la mise en service de ces armatures, on est en droit de penser que les conditions environnementales naturelles restent non agressives pour les barres, et que de cette façon elles pourraient résister le plus longtemps possible sans une dégradation significative. Toutefois, il est difficile de préciser la durée exacte de leur performance sans que la perte de résistance des propriétés mécaniques qui caractérise la durabilité de ces armatures ne soit évaluée.



**Figure 6** : Ouvrages Canadiens investigués : a) quai Hall's Harbor, b) pont Joffre et c) pont Crowchild Trail (Mufti, Banthia, et al. 2007).

Des barres d'armature courbes en PRFV avaient été développées par Sennah et al. (Sennah et al. 2011) afin de surmonter les problèmes liés à la perte de résistance en traction au niveau de la zone courbe. Les barres étaient faites d'un tube en plastique de forme ondulée. Le tube avait été alors rempli avec un matériau en PRFV à l'état liquide, lequel avait été séché. Les barres avaient été développées dans le but d'être utilisées dans un pont en Ontario, Canada. A cet effet, les auteurs s'étaient intéressés à investiguer l'utilisation de ces barres d'armature courbes en PRFV comme étriers à l'articulation entre le poteau en acier du système de garde-fou du pont et la dalle en porte-à-faux. De plus, des barres en PRFV avec des extrémités pointues avaient été utilisées pour un meilleur ancrage au niveau du joint entre le poteau et la dalle du pont. A grande échelle, deux types de spécimens du pont avaient été érigés et testés (essais de compression axiale) jusqu'à l'effondrement. Il faut noter qu'un des spécimens avait pour renfort une armature en acier et l'autre était renforcé par les barres d'armature courbes en PRFV. Les résultats de ces essais indiquent que les spécimens avec renfort en PRFV résistent aussi bien que ceux à renfort d'acier.

Murphy (*Murphy 2013*), dans le cadre de son projet de recherche de maîtrise, a effectué une étude analytique sur un cas pratique d'un pont existant et ayant un tablier en PRFV. Trois aspects avaient été considérés pour conduire son étude : les aspects structural, économique et environnemental. De plus, le pont avait été reconçu avec une nouvelle approche d'un tablier en béton afin de la comparer avec le matériau conventionnel souvent utilisé. Le pont (voir figure 7) avait été construit en 2008 sur l'autoroute B3 à Friedberg, dans l'état de Hessen, en Allemagne. Les résultats obtenus indiquent des meilleures perspectives pour l'approche utilisant les barres d'armatures en PRFs. Structuralement, le pont exhibe un excellent comportement. Économiquement, le matériau composite avait un coût initial substantiellement élevé, mais plus faible durant la période d'entretien comparativement au matériau conventionnel. Finalement, le pont en PRF requiert un court temps de construction pour la superstructure, presque 1/3 de celui avec le matériau conventionnel. Il présente aussi un très faible impact environnemental en tenant compte du processus de fabrication de ces matériaux et celui de la construction du pont. Bien qu'ayant obtenu quelques résultats satisfaisants quant à l'utilisation potentielle de ces matériaux en PRFs, l'auteur souligne que ces résultats restent dans un cadre purement expérimental et ne devraient pas être utilisés pour des structures réelles à grandes échelles.



**Figure 7 :** Pont sur l'autoroute B3 à Friedberg, Allemagne (*Murphy 2013*).

Harik et Periris (*Harik and Peiris 2014*) ont présenté les travaux d'une expertise se basant sur le déploiement des matériaux composites en PRFs (polymères renforcés de fibres de carbone ou de verre) et utilisés dans différents ponts dans l'état de Kentucky aux États-Unis. Il s'agissait de mettre en exergue l'utilisation de ces matériaux dans 11 projets

pendant quatorze (14) ans, de 1996 à 2010. Deux mandats avaient été assignés aux auteurs. Le premier mandat consistait à déployer ces matériaux (PRFs) dans 4 nouveaux ponts. Le deuxième mandat consistait de réparer et de rénover 7 autres structures déjà existantes en utilisant les matériaux en PRFs. Ce dernier mandat pouvait aller jusqu'au remplacement d'armatures en acier par celles en PRFs. Rappelons que l'utilisation de ces matériaux dans les nouveaux ponts n'avait qu'un but expérimental afin d'évaluer leur performance. De plus, il n'y a eu aucune évaluation des propriétés mécaniques et physico-chimiques durant l'expertise, mais seul un monitoring avait été effectué sur les structures investiguées. De cette expertise il ressort que les barres d'armature en PRFV ou PRFC se sont révélées être d'excellentes candidates pour remplacer pour les armatures en acier utilisées comme renfort dans les ponts en béton.

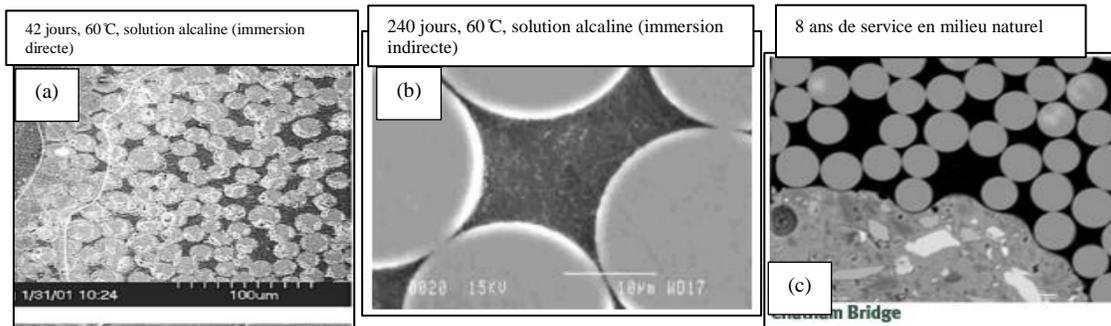
Une expertise sur l'état des barres d'armature en PRFV placées dans les glissières du pont Médéric-Martin P-15641 avait été conduite par Nazair et Loranger (*Nazair and Loranger 2015*), membres de l'équipe du MTMDET. Les glissières concernées avaient été construites au Québec. Les échantillons des barres d'armature en PRFV qui avaient fait l'objet de cette expertise étaient prélevés à partir de la portion médiane des glissières de sécurité dudit pont. Rappelons que ces barres furent mises en service depuis 1992, ce qui représente près de 21 ans de vie en service par rapport à la date à laquelle l'expertise avait été menée. Pour caractériser la détérioration de ces barres, les auteurs ont réalisé des essais physico-chimiques conformément à la norme CSA S807-10. A l'issue de ces analyses, les observations faites ont indiqué la présence de plusieurs signes de dégradation : fissurations, porosités, décollement de l'interface fibres/matrice et fibres de verre endommagées. Les échantillons investigués ne furent pas comparés à ceux de référence (échantillons issu du même lot de barre mais non utilisés en service) pour une estimation réelle du degré de détérioration. De plus, selon les analyses, la matrice utilisée pour la fabrication de ces barres était faite de polyester ; une matrice moins résistante à la dégradation comparativement à la matrice vinylester qui est actuellement recommandée au sein du MTMDET. Au regard de la durée de vie de ces barres et en tenant compte de la matrice vinylester, en combinaison avec les nouvelles méthodes de fabrication des barres d'armature en PRFV, on est en droit de penser qu'une glissière en PRFV à base de vinylester aurait une durée de vie supérieure à celle observée avec les barres analysées dans

cette expertise. Toutefois, les essais mécaniques qui n'avaient pas été conduits sur ces échantillons seraient toujours nécessaires afin de mieux corrélérer la détérioration à la perte de performance à long terme de ces barres d'armature en PRFV.

Loranger et Nazair (*Loranger and Nazair 2016*) ont mené une autre expertise sur les barres d'armature en PRFV qui avaient été échantillonnées à partir du pont P-11591 situé sur l'autoroute 20 Est à Val-Alain, dans la province de Québec. Cette infrastructure, à la période où l'expertise a été conduite, avait une durée de vie en service de 11 ans. Pour les besoins de cette étude, deux types de barres d'armature en PRFV avaient été investigués : les barres droites et les courbes. Les analyses faites par les auteurs avaient révélé qu'au bout de 11 ans de mise en service les armatures n'avaient montré aucun signe de détérioration avancée. Toutefois, les auteurs soulignent que comparativement aux barres droites, les barres courbes avaient des porosités importantes. Celles-ci avaient certainement été causées pendant le processus de fabrication. Par ailleurs, une étude comparative des propriétés physico-chimiques de barres droites en PRFV prélevées dans la structure avait été faite parallèlement à celles de barres droites de référence (précieusement gardées) du même lot de fabrication destiné à la réalisation du projet. La conclusion tirée indique que les barres n'avaient subi aucune dégradation significative. Rappelons que l'expertise effectuée n'avait concerné que les analyses physico-chimiques des échantillons prélevés. Il serait donc approprié d'examiner la performance à long terme de ces barres en investiguant la perte éventuelle des propriétés mécaniques.

Les observations MEB illustrées à la figure 8 permettent de souligner le caractère très critique du vieillissement accéléré par immersion directe dans les solutions aqueuses ou alcalines. La figure 8 (a) (*Micelli and Nanni 2004*) révèle une fragilisation du matériau causée par la présence de microfissures sur les armatures directement immergées dans la solution alcaline. Nous remarquons que ces dégradations ne sont pas observées sur les armatures vieilles de façon indirecte en laboratoire (figure 8 (b) (*Robert et al. 2009*)) ou sur des armatures prélevées sur un pont existant (figure 8 (c) (*Mufti, Banthia, et al. 2007*)) et ayant connu un vieillissement naturel. Ces observations nous renseignent que les conditions naturelles de service ne semblent pas être critiques comparativement à celles de laboratoire tant en immersion directe qu'indirecte, même si dans ce présent cas il ne semble

pas y avoir de dégradation sur les armatures vieilles indirectement. Toutefois pour cette dernière approche, la durée d'exposition est courte (240 jours vs 8 ans de service). De plus, la norme (ACI440.9R-15) souligne que les conditions des essais en laboratoire ne sont pas identiques à celles en service, et que les résultats des essais de campagne de vieillissement accéléré mentionné dans ce guide ne devraient pas être utilisés pour prédire la durée de vie en service. Cependant, l'utilisation de ces méthodes de conditionnement en laboratoire en collaboration avec les évaluations in situ de la performance des structures renforcées de barres d'armature en PRFV est vivement encouragée, dans la mesure où la corrélation entre la performance en service et les conditions de vieillissement accéléré est proprement établie. Ceci reste en effet une question à résoudre dans le futur. Rappelons que les versions antérieures de cette norme ne font pas mention de l'utilisation ou non des résultats des campagnes de vieillissement accéléré pour prédire la durabilité des barres en PRFV. La version de la présente norme constitue en effet la toute première édition qui a été rendue publique.



**Figure 8 :** Micrographie MEB montrant la détérioration des armatures en PRFV dans différents environnements. (a) (Micelli and Nanni 2004), (b) (Robert et al. 2009) et (c) (Mufti, Banthia, et al. 2007).

#### 2.4.4 Exposition des barres d'armature en PRFV aux cycles de gel-dégel et/ou mouillage-séchage

Les conditions environnementales liées aux cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, ainsi que les très basses températures dans le cas du Québec pourraient également être considérées comme facteur jouant un rôle important dans l'évaluation de la durabilité des barres d'armature en PRFV à base de vinylester. Dans ce sens, nous passons en revue quelques études qui portaient sur l'effet de ces conditions environnementales sur la durabilité des barres d'armatures en PRFV.

Luke et Mark (*Luke and Mark 2002*) ont investigué la capacité d'adhérence des barres d'armature en PRFV avec le béton sous l'effet des cycles de gel-dégel. Les barres d'armatures en PRFV noyées dans du béton avaient été soumises à un total de 300 cycles de gel-dégel entre -18 et 15 °C. Ces cycles correspondent à une période de gel à -18 °C à l'air pendant 16 h et un autre période de dégel à 15 °C dans l'eau pendant 8 h. A la fin de cette exposition, les spécimens réalisés avaient été sollicités en flexion. Les résultats de ces essais indiquent, selon les auteurs, que les conditions environnementales utilisées n'avaient aucun effet significatif sur la capacité d'adhérence entre barres et béton.

Une étude similaire à (*Luke and Mark 2002*) avait été conduite par Mark et al. (*Green et al. 2003*) sur de petites poutres de béton renforcées avec des PRFV (100 mm x 150 mm x 1200 mm). Ces poutres furent soumises à 200 cycles de gel-dégel, avec un cycle par jour (-18 °C à 15 °C), ce qui revient à 200 jours d'exposition. Les résultats des essais de flexion indiquent que les poutres n'avaient pas subi de dommage notable.

Wu et al. (*Wu et al. 2006*) ont exposé des barres d'armatures en PRFV prélevées d'un tablier à des cycles de gel-dégel dont la température variait de 44 à - 17,4 °C. Ces barres étaient immergées dans un environnement sec (air), dans de l'eau distillée et dans de l'eau salée durant toute la période (1 250 h, soit 52 jours) pendant laquelle elles étaient soumises aux cycles de gel-dégel. D'une part, 625 cycles étaient nécessaires pour cette exposition au cours de laquelle les barres étaient libres de tout effort mécanique. De l'autre, les barres furent exposées à 250 cycles sous une charge soutenue à 25 % de leur déformation ultime. Les auteurs soulignent que les conditions environnementales utilisées sans chargement soutenu n'avaient aucun effet significatif sur la dégradation des barres. Par contre, quelques pertes (tout de même faibles, environ 1 %) du module élastique furent observées sur les spécimens conditionnés sous charge soutenue. Par ailleurs, la résistance en flexion n'avait pas été significativement affectée car les valeurs notées étaient dans l'intervalle de l'écart-type des résultats obtenus.

Almusallam et al. (*Almusallam and Al-Salloum 2006*) ont utilisé des barres d'armatures en PRFV scellées dans du béton qu'ils ont soumises à des cycles de mouillage-séchage toutes les deux semaines dans de l'eau marine (deux semaines de mouillage mais la durée de séchage n'a pas été indiquée). La température était de 40 °C et la durée de l'exposition était

de 16 mois (480 jours). Dans ces conditions expérimentales, certaines barres étaient soumises à une charge soutenue (20-25 % de la résistance ultime en traction), et d'autres étaient libres de tout effort mécanique. Les résultats des essais de traction réalisés après ces campagnes de vieillissement ont montré que le chargement soutenu provoque une importante perte de 55 % de la résistance en traction comparativement à 21,8 % dans le cas où aucune charge soutenue n'avait été appliquée.

Chen et al. (*Chen et al. 2007*) ont investigué les effets séparés des cycles de mouillage-séchage et ceux de gel-dégel sur la durabilité des barres d'armatures en PRFV noyées dans du béton. Ces barres furent immergées dans des solutions alcalines durant les cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel. D'un côté, 9 cycles de mouillage-séchage (pendant 72 jours) avaient été considérés pour vieillir les barres de la manière suivante :

- Pour chaque cycle de mouillage les barres étaient immergées dans la solution agressive (solution alcaline) pendant 4 jours à 60 °C ;
- Pour chaque cycle de séchage les barres étaient soumises à une température de 20 °C pendant 4 jours.

De l'autre côté, 600 cycles de gel-dégel de 20 à -20 °C avaient été réalisés comme suit :

- 30 min de trempe à 20 °C et 90 min de rampe de 20 à -20 °C ;
- 30 min de trempe à -20 °C et 90 min de rampe de -20 à 20 °C.

Rappelons que les auteurs n'avaient pas reporté le nombre de jours de l'exposition aux cycles de gel-dégel. Après cette campagne de vieillissement, les barres avaient été testées en traction. Les résultats avaient révélé que les cycles de mouillage-séchage et ceux de gel-dégel ont des effets négligeables sur le processus de dégradation des barres d'armatures en PRFV noyées dans un prisme de béton. Selon les auteurs, ces deux conditions d'expositions n'étaient pas critiques sur la performance des barres d'armatures en PRFV. Comparativement à l'étude (*Almusallam and Al-Salloum 2006*), la température d'exposition dans la présente étude est plus élevée (60 °C vs 40 °C) et la solution dans laquelle les barres étaient immergées est aussi la plus agressive (solution alcaline vs l'eau marine). Ainsi, dans les conditions de cycles de mouillage-séchage, le niveau élevé de perte de résistance observée dans (*Almusallam and Al-Salloum 2006*) apporte une contradiction sur le rôle déterminant de la température et de l'agressivité d'une solution alcaline. Cette

importante perte de résistance en traction reportée dans (*Almusallam and Al-Salloum 2006*) serait inéluctablement attribuée à la longue durée d'exposition (480 jours vs 72 jours) d'une part. D'autre part, elle serait causée par l'effet combiné de la charge soutenue (20-25 % de la résistance ultime vs 0 %) et de la longue période d'exposition (480 jours vs 72 jours). Soulignons donc que ces deux paramètres (charge soutenue plus durée d'exposition) devraient être considérés dans l'évaluation de la durabilité des barres d'armature en PRFV.

L'influence des basses températures sur les propriétés mécaniques des barres d'armature en PRFV avec recouvrement de sable avait été étudiée par Robert et Benmokrane (*Robert and Benmokrane 2010a*). Les échantillons furent conditionnés de façon à être saturés dans l'eau pour atteindre une teneur en humidité de 0,65 % après leur immersion complète pendant 60 jours. À cet effet, la procédure 7.4 préconisée par la méthode d'essai ASTM D570, à l'exception du fait que la température de l'eau était de 50 °C, avait été employée. Ces échantillons étaient alors soumis à des essais mécaniques (traction, flexion, cisaillement) à différentes températures basses : -100, -80, -60, -40, -20 et 0 °C. Les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques mesurées (résistance en traction, module élastique, résistance en flexion) étaient stables (aucun changement majeur) entre -40 et 50 °C. Pour les températures inférieures à -50 °C, les propriétés mécaniques s'élevaient à mesure que la température descendait. Ceci a été expliqué par diminution de la mobilité des chaînes moléculaires qui conduit à une augmentation des contraintes mécaniques nécessaires pour rompre le matériau. En outre, la stabilité des propriétés mécaniques (entre -40 et 50 °C) est le résultat du fait que la mobilité des chaînes moléculaires ne change pas étant donné que la gamme de température est au-dessous de  $T_g$ .

Shi et al. (*Shi et al. 2014*) ont caractérisé l'effet combiné de la charge soutenue et des cycles de gel-dégel sur les barres d'armatures en PRFV qui étaient directement exposées. Un total de 300 cycles de gel-dégel pour 3 à 4 h par cycle dans l'eau avaient été utilisés pendant que les barres étaient sous charge soutenue de 30 % de leur résistance ultime en traction. La température considérée variait de 8 à -17 °C. Les barres vieillies étaient par la suite sollicitées en traction. Les résultats obtenus indiquent que les barres d'armatures en PRFV avaient perdu jusqu'à 14 % de la résistance en traction. Cela renseigne que la charge soutenue accentue la cinétique de propagation de l'eau dans la matrice (résine), ce qui

accélère ensuite la dégradation des propriétés mécaniques. Les auteurs estiment alors que le mécanisme de dégradation des barres d'armatures exposées aux conditions de cycles de gel-dégel se compose principalement de deux aspects fondamentaux : les dommages de l'interface fibre-matrice dû à une incompatibilité thermique (fluctuation thermique), et la dégradation des constituants du matériau (matrice, fibre, interface fibre/matrice).

#### 2.4.5 Étude de la durabilité de l'interface armature / béton

L'interface séparant la barre d'armature en PRFV et le béton constitue également une zone sensible pouvant favoriser la dégradation de la barre. Une bonne adhérence entre la barre et le béton est alors nécessaire durant la période où le système barre-béton est mis en service. Pour évaluer cette capacité d'adhérence, des auteurs (*Chen et al. 2007, Bank et al. 1998, Galati et al. 2006, Davalos et al. 2008, Robert and Benmokrane 2010c, Masmoudi et al. 2011*) ont conduit des études sur la durabilité de l'interface entre les barres d'armatures en PRFV et le béton. A cet effet, il s'est agi de conduire des essais d'arrachement sur les barres d'armature en PRFV scellées dans du béton.

Bank et al. (*Bank et al. 1998*) avaient préparé des éprouvettes à l'aide de barres d'armature en PRFV qu'ils avaient par la suite vieillis dans l'eau pendant 84 jours et à la température de 60°C afin de les soumettre après aux essais d'arrachement. Une perte de 66 % de la résistance à l'arrachement avait été observée à l'issue de cette campagne de vieillissement. Par ailleurs, les auteurs parviennent, suite aux observations MEB (microscopie électronique à balayage), à associer la perte de résistance à la dégradation microstructurale causée par le processus de vieillissement (fragilisation, fissuration de la matrice et décohésion fibre / matrice).

Dans les travaux de Galati et al. (*Galati et al. 2006*), des éprouvettes d'arrachement avaient été réalisées avec des barres d'armatures en PRFV placées à différentes positions dans le bloc en béton afin d'étudier l'effet de l'enrobage (2, 3 et 8 fois le diamètre). Une sollicitation thermique à 70°C pendant 200 h avait été appliquée à ces éprouvettes. Avant de conduire les essais d'arrachement, les éprouvettes conditionnées thermiquement avaient été soumises à un traitement thermique de revenu à température ambiante. Les résultats des essais d'arrachement ont montré qu'à l'issue de la sollicitation thermique, il existait une

forte influence de la position de l'enrobage vis-à-vis de la capacité d'adhérence de la barre d'armature en PRFV. Des pertes de la capacité d'adhérence allant jusqu'à respectivement 3, 12 et 16 % pour les armatures placées à 8, 3 et 2 fois leur diamètre avaient alors été notées.

Quant aux travaux de Chen et al. (*Chen et al. 2007*), une solution alcaline avait été utilisée pour exposer durant 60 jours à 60 °C des éprouvettes d'arrachement. Les essais ont révélé une perte de la capacité d'adhérence de l'ordre de 12 %. Ils avaient ensuite souligné que cette perte d'adhérence était comparable à la résistance au cisaillement inter-laminaire, indiquant ainsi que l'interface fibre/matrice aurait joué un rôle important sur les capacités d'adhérence entre les barres d'armatures en PRFV et le béton.

Des éprouvettes d'arrachement composées de barres d'armature en PRFV scellées dans du béton à haute performance (BHP) avaient été vieilles dans l'étude de Davalos et al. (*Davalos et al. 2008*). Deux séries de campagne de vieillissement avaient été menées. La première série consistait à soumettre des éprouvettes à des cycles thermiques journaliers variant de -20 à 60 °C pendant 30 jours. Tandis que la deuxième série avait pour but de faire vieillir d'autres éprouvettes dans des bains d'eau maintenue à 20 et 60 °C durant 90 jours. Les auteurs avaient noté, d'une part, des pertes de 10 à 18 % de la résistance à l'arrachement pour les éprouvettes conditionnées sous les cycles thermiques. De l'autre, ils avaient observé des pertes de 9 % et 20 % de la résistance à l'arrachement pour les éprouvettes vieilles dans les bains d'eau, respectivement à 60 °C et 20 °C. Au regard de ces derniers résultats, vu le rôle majeur que joue la température sur la cinétique de la dégradation, on s'attendrait à ce que les pertes majeures de la résistance à l'arrachement soient observées pour les éprouvettes vieilles à 60 °C. Au contraire, les faibles pertes de résistance à l'arrachement ont été observées à 60 °C en dépit du fait que le MEB ait révélé, dans ces conditions, une importante dégradation caractérisée par la présence de vides dans la matrice. A ce constat, les auteurs estiment qu'à haute température les armatures auraient absorbé une importante quantité d'eau, ce qui favoriserait un gonflement de celles-ci et qui aurait pour conséquence l'amélioration de leur adhérence avec le béton. Les auteurs de ce présent rapport pensent toutefois que ce gonflement serait attribué au phénomène de dilatation des fibres.

Concernant les travaux de Robert et Benmokrane (*Robert and Benmokrane 2010c*), les éprouvettes destinées aux essais d'arrachement réalisées à partir des barres d'armatures en PRFV dans le béton avaient été soumises à un vieillissement dans l'eau pour une durée de 180 jours à des températures de 20, 30 et 50 °C. Seulement 8 % de perte de résistance à l'arrachement avaient été observés par les auteurs à 50 °C. D'une part, les mesures effectuées par DSC n'avaient montré aucune évolution de la  $T_g$  de la matrice. De l'autre, les observations au MEB n'avaient révélé aucune dégradation notable.

#### 2.4.6 Effet de la haute température sur les barres d'armature en PRFV

La présente section s'intéresse à l'effet de la haute température sur les barres d'armature en PRFV. Leur impact sur l'interface entre ces armatures et le béton est en particulier présenté. La résistance au feu n'est pas abordée dans ce rapport.

Katz et al. (*Katz et al. 1999*) ont investigué les propriétés d'adhérence des spécimens en béton avec armatures en PRFV à haute température. La gamme de températures utilisée variait de 20 à 250 °C. Les spécimens une fois préparés, avaient été soumis à deux types de tests expérimentaux conduisant aux essais d'arrachement. Il s'agissait d'une part de chauffer le spécimen jusqu'à une température voulue et ensuite conduire l'essai d'arrachement en maintenant constant le glissement. D'autre part, il était question d'appliquer une charge mécanique sur le spécimen jusqu'à une charge prescrite et ensuite chauffer le spécimen avant de commencer l'essai d'arrachement. Pour la circonstance, un dispositif facilitant le chauffage du spécimen a été conçu. Au terme de ces essais, des pertes de la capacité d'adhérence avaient été notées à partir de 80 °C, allant de 3 à 43 % par rapport aux valeurs obtenues à température ambiante. Cette différence est en grande partie liée à la diminution des propriétés mécaniques de la matrice sous l'effet de la haute température, et plus particulièrement au voisinage de  $T_g$ . Pour des valeurs encore plus importantes de la température d'essai (200 °C et plus, donc nettement au-dessus de la  $T_g$ ), les auteurs avaient noté d'importantes dégradations (80-90 %). En comparaison avec le renfort en acier, une réduction de la capacité d'adhérence de seulement 38 % avait été observée dans le même intervalle de température par les mêmes auteurs.

Elbardy et al. (*Elbadry et al. 2000*) se sont intéressés à conduire une étude expérimentale sur le comportement des barres d'armature en PRFV sous l'effet de la température. A cet

effet, des poutres en béton (500 x 250 mm de section rectangulaire et 3 350 mm de long) renforcées avec des barres en PRFV avaient été soumises à des gradients thermiques tout en maintenant fixe les deux extrémités des poutres. Avant de soumettre ces poutres aux chargements thermiques, des moments finaux égaux avaient été appliqués sur celles-ci à l'aide de deux tendeurs fournis avec les cellules de charge. Ces moments agissaient dans la même direction que ceux produits par le gradient thermique. Pour faire varier la température, 10 à 12 incréments avaient été appliqués. De plus, chaque incrémentation nécessitait 2 à 3 h afin de stabiliser la distribution de température sur la poutre testée. Un autotransformateur variable relié à la boîte thermique avait été utilisé afin de contrôler la température sur la face chaude. Pour chaque incrément, en raison de la variation progressive du gradient de température, l'augmentation des charges et des déformations avait été notée. Au dernier incrément, la température sur la surface chaude était de 160 °C et celle de la surface froide était de 40 °C, ce qui résulte à une différence de température de 120 °C entre les deux faces. Rappelons que 24 à 26 h avaient été nécessaires pour conduire les tests. Après la stabilisation de la lecture de la température pour chaque incrément, les tendeurs fixés aux cellules de charge avaient été ajustés pour éliminer toute variation de déflexion centrale et pour faire en sorte que les charges dans les deux cellules soient toujours égales. Cela a permis de s'assurer que la longueur de la poutre testée était soumise à un moment de flexion pur qui est égal au moment initial plus le moment final induit par le chargement thermique. Les résultats ont été comparés à ceux des essais effectués sur des poutres en béton ayant les mêmes dimensions mais renforcées avec de l'acier conventionnel. Il a été montré que le coefficient d'expansion thermique (CET) élevé des barres en PRFV dans le sens transversal crée un champ de contraintes élevé amenant l'éclatement du béton autour de la barre d'armature, et ce, à température élevée. La plus grande réduction de la résistance au fendage a été observée pour les poutres avec armature en PRFV. Ceci conduit à l'affaiblissement de l'interface entre le béton et les barres d'armature en PRFV et, par conséquent, une diminution de la rigidité du béton et une augmentation de la flèche.

Saafi (*Saafi 2002*), dans ses travaux, a conduit une étude analytique de l'effet de la haute température (supérieure à  $T_g$ ) sur la performance des poutres en béton armé de barres en PRFV. Il avait alors développé une méthode pour estimer les résistances résiduelles en

flexion et en cisaillement des poutres exposées à des températures élevées en tenant compte de la durée d'exposition. De plus, une paramétrisation avait été conduite afin d'étudier l'effet du recouvrement du béton, la durée d'exposition ainsi que les résistances en cisaillement et en flexion des poutres renforcées. Les résultats de cette étude montrent que, comparativement aux poutres en béton armé avec l'acier, le comportement mécanique de celles avec des barres d'armature en PRFV est considérablement affecté lors de l'exposition à des températures élevées. De plus, ce comportement dépend principalement du recouvrement du béton et les profils de température développés dans les poutres. À cause de la dégradation rapide des barres d'armature en PRFV, les poutres en béton avec renfort en PRFV présentaient une dégradation significative en terme de résistance en cisaillement et en flexion comparativement aux poutres avec renfort en acier. Il a été aussi observé que le recouvrement minimum de béton permettant de résister à la dégradation causée par la haute température dans le cas des PRFV était de 64 mm, alors qu'il était de seulement 30 mm dans le cas de l'acier.

Robert et Benmokrane (*Robert and Benmokrane 2010a*) quant à eux ont étudié l'influence des hautes températures sur les propriétés mécaniques des barres d'armature en PRFV avec recouvrement de sable. Les échantillons furent conditionnés de façon à être saturés dans l'eau pour atteindre une teneur en humidité de 0,65 % après leur immersion complète pendant 60 jours. À cet effet, la procédure 7.4 préconisée par la méthode d'essai ASTM D570, à l'exception du fait que la température de l'eau était de 50 °C, avait été employée. Ces échantillons étaient alors soumis à des essais mécaniques (traction, flexion et cisaillement) à différentes températures : 50, 100, 150, 200, 250 et 325 °C, lesquelles températures ont été choisies pour simuler à court terme les conditions environnementales dans le cas d'un incendie. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une perte des propriétés mécaniques mesurées (résistance en traction, module élastique et résistance en flexion) pour des températures proches ou supérieures à  $T_g$  ( $T_g$  environ 120 °C), ceci à cause du changement de l'état du polymère et de la réaction de dégradation ; le polymère devient beaucoup ductile et la mobilité de la chaîne de molécules devient plus importante. À une température plus élevée (350 °C), les auteurs avaient noté la présence de microfissures dans le polymère à cause de la dégradation thermique de la matrice polymérique, ce qui conduit à la perte de la résistance mécanique et du module élastique. De plus, la matrice

polymérique se dégrade de façon significative à la température proche de 350 °C. Ceci se traduit par une perte de masse de 18% et une diminution de la  $T_g$  de 113 °C à 67 °C. Il est cependant important de rappeler que les conditions utilisées dans la présente étude sont plus sévères que les conditions réelles car les barres testées étaient en contact direct avec l'air, ce qui n'est pas le cas dans les conditions de service ou celles-ci sont enrobées de béton. En effet, la réaction de dégradation des barres dans leur milieu en service serait plus lente et moins sévère à cause de l'absence de la réaction d'oxydation de la matrice polymérique.

Masmoudi et al. (*Masmoudi et al. 2011*) ont étudié l'effet de la température sur la performance à long terme de l'adhérence entre les barres d'armature en PRFV et le béton. L'intervalle de température choisie variait entre 20 et 80 °C. Deux types de barres distincts l'un de l'autre par leur diamètre (8 mm et 16 mm) et ayant 500 mm de longueur, 60 GPa de module élastique et un coefficient d'expansion thermique (CET) transversale de  $2,2 \times 10^{-5}$  mm/mm/°C avaient été utilisés pour fabriquer à température ambiante des spécimens destinés aux essais d'arrachement. Pour ce faire, les barres avaient été placées verticalement dans un cube en béton. Ces spécimens avaient été alors exposés pendant 4 à 8 mois à des températures de 40, 60 et 80 °C dans une chambre environnementale fabriquée à cet effet et permettant de contrôler la température. Après une période de 3 à 5 minutes suivant l'exposition des spécimens à l'action de hautes températures, ceux-ci étaient directement soumis aux essais d'arrachement. Les auteurs indiquent que l'effet de la température n'était significatif que pour la température de 80 °C après 8 mois d'exposition. Celle-ci cause une perte de résistance à l'adhérence de 10 % et 14 % respectivement pour les barres de 8 mm et 16 mm de diamètre. Ce résultat met en évidence l'effet du diamètre des barres, montrant ainsi que la résistance à l'adhérence diminue avec l'augmentation du diamètre des barres. Les auteurs ajoutent aussi que la résistance à l'adhérence dépend du CET transversale des barres d'armature en PRFV. À cet effet, les résultats obtenus par Alvarez et Masmoudi (*Alvarez and Masmoudi 2007*), dans les mêmes conditions d'exposition à 80 °C pendant 240 jours, indiquent que les spécimens constitués de barres en PRFV (44 GPa module d'élasticité et un CET de  $3,4 \times 10^{-5}$  mm/mm/°C) soumis aux essais d'arrachement présentaient une perte de résistance d'adhérence de 32 %.

#### 2.4.7 Coefficient d'expansion thermique (CET)

La littérature recense peu d'études qui abordent le sujet des coefficients d'expansion thermique (CET) transversal et longitudinal sur la durabilité des barres d'armature en PRFV. Quelques auteurs en revanche se sont intéressés à mesurer ces coefficients à l'aide de jauges de déformation qu'ils collent sur les barres (*Gentry and Hudak 1996, Gentry and Husain 1999, Masmoudi et al. 2005*), en comparaison avec la procédure de détermination de ces coefficients par analyse thermomécanique définie par les normes (*ASTM-E831 2006*) et (*JSCE-E536 1995*). De plus, les quelques études existantes n'abordent que le rôle négatif du CET transversal sous l'effet d'une température élevée. Au regard de cela, il semblerait que le CET longitudinal ne poserait pas de problème car aucune mention n'est faite dans la littérature consultée.

Par ailleurs, une des particularités des barres en PRFV utilisées comme renfort interne dans le béton est qu'elles sont unidirectionnelles et présentent un comportement anisotrope. Ce fait implique que le CET transversal est différent du CET longitudinal. En particulier, le CET longitudinal, contrôlé par des fibres, est très faible ( $6 \text{ à } 10 \times 10^{-6} / \text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ) comparativement au CET transversal ( $21 \text{ à } 23 \times 10^{-6} / \text{mm/mm/}^\circ\text{C}$ ) (*Neville 1996*) qui est en revanche contrôlé par la résine. Alors que le CET longitudinal est proche de celui du béton, celui dans le sens transversal est cependant 3-8 fois plus élevé que celui du béton (*Gentry and Hudak 1996*). Par conséquent, sous l'effet de l'augmentation de température, la différence entre le CET transversal des barres en PRFV et celui du béton génère une pression radiale à l'interface barre/béton qui engendre des champs de contraintes dans le béton. Ces champs de contraintes pourraient provoquer la fissuration voire l'éclatement du béton si les barres sont exposées à une hausse de température importante. Ce phénomène conduit inéluctablement à la dégradation de l'adhérence entre le béton et le renfort interne (*Hizia et al. 2014*), affectant ainsi le comportement mécanique de la structure. Dans le sens inverse, une baisse de température par rapport à la température de référence, peut amener un champ de tension à l'interface barre/béton pouvant amener également une perte d'adhérence. D'autres part, *Masmoudi et al. (2005)* ont présenté dans leurs travaux les résultats d'une investigation expérimentale permettant d'analyser le rôle du CET transversal des barres en PRFV noyées dans du béton. Ils se sont alors intéressés à l'effet du ratio de l'épaisseur du recouvrement du béton par rapport au diamètre de la barre

en PRFV ( $c/d_b$ ) sur la distribution de la déformation dans le béton et dans les barres en PRFV. À cet effet, ils ont utilisé des spécimens cylindriques en béton, qui ont été renforcés avec les barres en PRFV. Ces spécimens avaient ensuite été soumis aux chargements thermiques variant de -30 à 80°C. Les résultats expérimentaux montrent que le CET transversal des barres en PRFV testées était en moyenne égal à  $33 \times 10^{-6}$  mm/mm/°C. Le rapport entre les CETs transversal et longitudinal était alors égal à 4. De plus, ils avaient noté la présence de fissures causées par la haute température, et celles-ci commençaient à se développer à la surface du cylindre en béton lorsque la température variait entre 50 et 60°C et ce, pour des spécimens dont le rapport  $c/d_b$  est égal à 1,5. Cependant, pour un rapport  $c/d_b$  supérieur ou égal à 2, aucune fissuration du béton n'a été observée sous l'effet de la température, même pour la valeur la plus élevée (80°C) enregistrée dans cette étude.

### 3 Méthodes de caractérisation et d'analyse des barres d'armature en PRFV

#### 3.1 Généralités

En se basant sur un certain nombre d'informations recueillies dans la littérature existante, cette section présente certaines méthodes et techniques de caractérisation et d'analyse qui permettent de déterminer les propriétés physico-chimiques et mécaniques des armatures en PRFV. Nous scindons ces méthodes et techniques en deux catégories. D'un côté, nous répertorions les techniques et méthodes qui permettent de déterminer les propriétés physico-chimiques, et de l'autre celles permettant de déterminer les propriétés mécaniques. Rappelons qu'en plus des conditions environnementales, ces propriétés dépendent intimement de la matrice, des fibres, de l'interface fibres/matrice et de l'interface barre/béton. Également, dans une étude de la durabilité de ces barres, il est important de caractériser et d'analyser ces deux types de propriété afin d'établir la corrélation entre elles pour mieux ainsi évaluer la performance à long terme des barres en PRFV.

## 3.2 Caractérisation et analyse des propriétés physico-chimiques et de la microstructure

### 3.2.1 Généralités

Le phénomène de dégradation affecte la structure physico-chimique des matériaux composites de type PRFV de différentes manières : la matrice polymère, les fibres et/ou l'interface entre ces deux composants peuvent se détériorer. En outre, l'hydrolyse ou la formation de microfissures dans la résine, la dissolution des fibres de verre, et la décohésion de l'interface fibres/matrice sont les phénomènes les plus courants qui se produisent dans un matériau de type PRFV soumis à un environnement agressif (*Debaiky et al. 2006*). Cette dégradation est associée à la perte de propriétés physico-chimiques et mécaniques. Pour avoir une meilleure compréhension des causes de la perte de ces propriétés, il est nécessaire et important que les méthodes pertinentes pour caractériser et analyser cette dégradation soient utilisées, et que les résultats obtenus permettent facilement l'évaluation de la durabilité des barres en PRFV.

Dans la suite de cette sous-section, nous décrivons la propriété analysée avec la méthode ou technique utilisée pour l'investigation de celle-ci.

### 3.2.2 Propriétés physico-chimiques

#### 3.2.2.1 Température de transition vitreuse de la matrice

La température de transition vitreuse ( $T_g$  pour *glass transition temperature*) d'un matériau polymère se définit comme étant l'intervalle de température dans lequel le matériau passe d'un état vitreux à un état caoutchouteux. Cela se traduit par une chute importante de la rigidité et des propriétés mécaniques du matériau. En d'autres termes, la  $T_g$  est un indicateur de la température maximale de service d'une armature en PRFV, au-delà de laquelle le matériau perd sa fonction de renforcement structural. A l'aide d'un calorimètre différentiel à balayage (DSC pour *Differential Scanning Calorimetry*), la  $T_g$  des matériaux polymères peut être facilement déterminée. La norme (*ASTM-E1356 2008*) décrit par ailleurs la procédure permettant de caractériser et d'analyser cette propriété physique. Elle indique que l'échantillon destiné pour l'analyse est soumis à une rampe de température pendant laquelle le flux thermique, nécessaire pour maintenir cet échantillon à la même température qu'une référence inerte, est mesuré de façon continue. De cette manière les

phénomènes endo et exothermiques ayant cours dans le matériau analysé sont quantifiés. Le saut endothermique sur les thermo-grammes, comme l'indique la figure 9, est caractéristique de la transition vitreuse. A cet effet, on utilise la méthode des tangentes pour identifier la  $T_g$  au niveau de la mi-hauteur du saut.

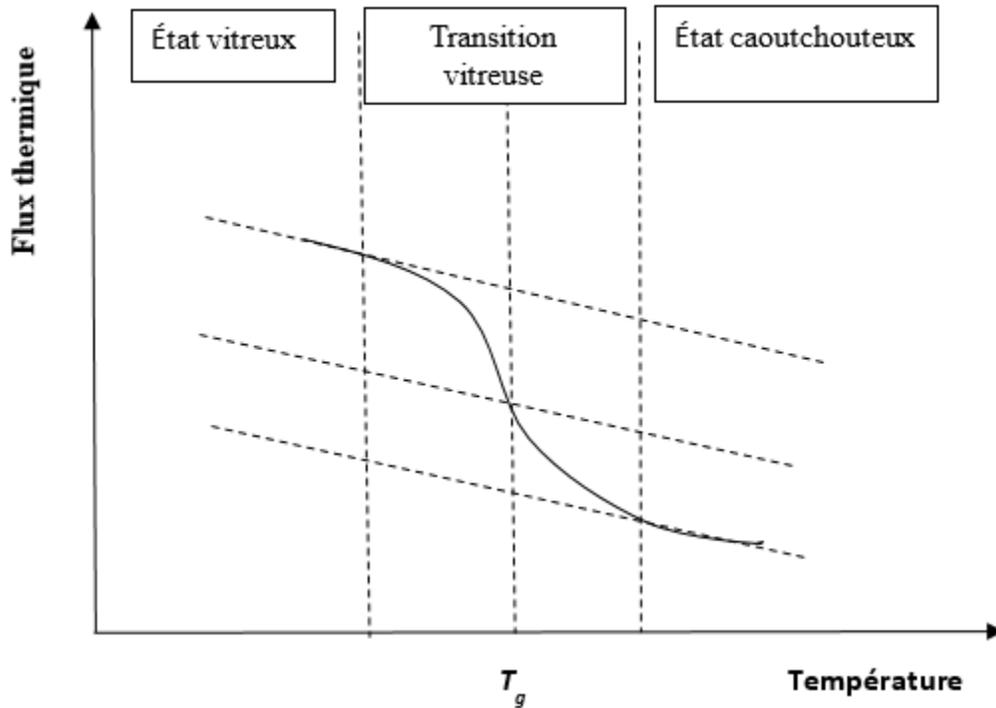


Figure 9 : Méthode permettant d'exploiter les thermo-grammes afin de déterminer la  $T_g$ .

De plus, l'analyse par DSC permet également de révéler des informations sur la qualité de réticulation de la matrice. Si l'on constate que la  $T_g$  a augmenté après la seconde rampe de température, cela veut dire qu'une post-cuisson a eu lieu durant la première rampe. Par contre, s'il n'y a pas d'augmentation de température ou que celle-ci est de très faible amplitude, ceci indique alors qu'une polymérisation initiale de l'échantillon a eu lieu de façon satisfaisante. Plus encore, l'utilisation de la DSC se révèle également intéressante pour caractériser l'évolution des propriétés de la matrice à la suite d'un vieillissement, ce qui permet par exemple de montrer que la diminution de la  $T_g$  est liée au phénomène de plastification par l'eau lors du vieillissement humide. Enfin, bien que les valeurs de  $T_g$  soient propres à chaque matrice polymère utilisée (selon la nature et la structure chimique

des monomères), elles dépendent également du cycle de polymérisation appliqué lors de la fabrication de la barre en PRFV. En d'autres termes, un cycle de cuisson optimal permettra d'atteindre un taux de réticulation maximal (et donc une  $T_g$  plus élevée) plus élevé qu'un cycle de cuisson inapproprié. On considère généralement qu'une bonne matrice doit présenter une valeur de  $T_g$  et un taux de cuisson élevés et qui garantiront par la suite une meilleure résistance mécanique, thermique et chimique, et conséquemment une meilleure durabilité.

### 3.2.2.2 Coefficients d'expansion thermique

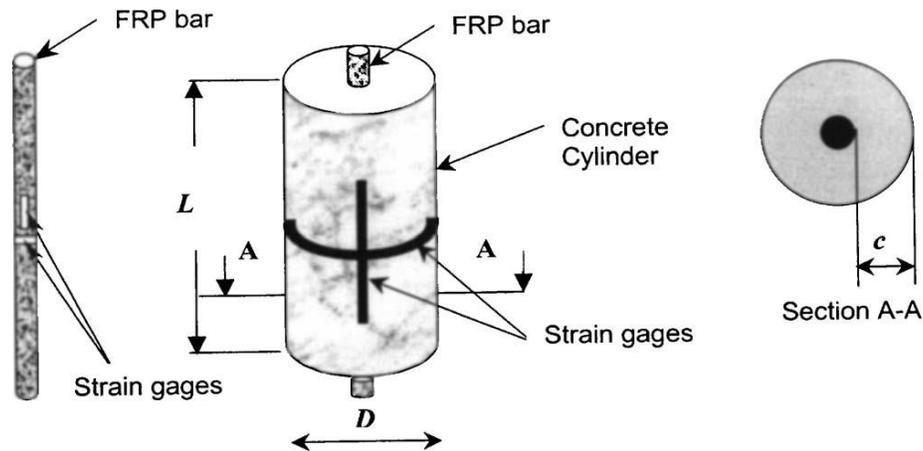
Les barres en PRFV utilisées comme renfort interne dans le béton ont la caractéristique particulière d'être unidirectionnelle et présentent un comportement anisotrope<sup>1</sup>. Ce fait implique que les coefficients d'expansion thermique (CET) sont différents dans les directions longitudinale et transversale.

L'analyse thermomécanique, autrement appelée *ThermoMechanical Analysis* (TMA), permet ainsi de déterminer les CET longitudinaux et transversaux des armatures en PRFV. La procédure nécessitant l'utilisation de cette méthode est définie par les normes (*ASTM-E831 2006*) et (*JSCE-E536 1995*), dont le principe d'analyse consiste à mesurer l'expansion linéique de l'échantillon pendant que celui-ci est soumis à une rampe de température. Notons que cette méthode vient avec une source d'incertitude qui réside dans la façon de prendre en considération les dilatations des pièces de la machine pour corriger la valeur d'élongation enregistrée. Certains auteurs (*Gentry and Hudak 1996, Masmoudi et al. 2005*) utilisent d'ailleurs une autre méthode, bien que n'étant pas normée, pour mesurer les CET transversaux. Ces mesures se font au moyen des jauges de déformations qui sont collées sur les barres. La figure 10 présente la géométrie du spécimen, l'instrumentation des barres en PRFV et le cylindre en béton. Le cylindre en béton ainsi que les barres sont instrumentés par des thermocouples dans le but de mesurer la température. Les jauges de déformations placées dans les directions transversale et longitudinale permettent de mesurer l'expansion thermique (voir figure 11). Les thermocouples sont attachés près des jauges de déformations sur les barres en PRFV ainsi que sur la surface externe du cylindre en béton. Toutefois, aucune précision n'a été donnée

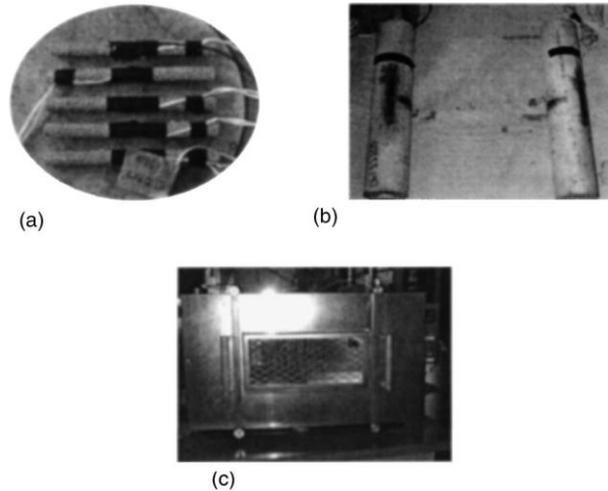
---

<sup>1</sup> On devrait parler ici de matériau orthotrope de révolution ou encore de matériau isotrope plan, les propriétés mécaniques étant isotropes dans le plan de la section de la barre. Il y a 5 propriétés élastiques à identifier et 2 coefficients de dilatation.

sur la sensibilité des jauges de déformations. Notons que dans la direction radiale (transversale), les déformations sont fonctions du diamètre des barres, et celui-ci étant petit, il est donc important d'utiliser une jauge assez sensible pour capter ces faibles déformations.



**Figure 10** : Illustration de l'instrumentation et de la géométrie des spécimens (Masmoudi et al. 2005).



**Figure 11** : Instrumentation des spécimens et chambre environnementale: (a) barres en PRFV instrumentées avec des jauges de déformation et des thermocouples; (b) spécimens en PRFV scellés dans du béton; (c) chambre environnementale (Masmoudi et al. 2005).

Le dispositif ainsi constitué est par la suite placé dans une chambre environnementale dans laquelle il est soumis à des chargements thermiques de  $-30$  à  $80^{\circ}\text{C}$ . La procédure est telle que, lorsque la température dans le béton se stabilise, les lectures de toutes les jauges de déformation sont enregistrées, et on augmente par la suite la température d'un incrément de  $10^{\circ}\text{C}$ . Chaque augmentation de température nécessite 2 à 3h afin d'atteindre une

distribution stable de température à l'interface entre les barres en PRFV et le béton. Une fois que la température se stabilise de nouveau, on enregistre toutes les mesures de température et de déformation. Notons qu'avant d'augmenter la température pour la prochaine incrémentation, le spécimen est d'abord examiné visuellement afin de vérifier toute initiation de fissures.

Notons que ce test génère des informations quantitatives. La variation du CET en fonction du vieillissement accéléré est un indicateur de dégradation. S'il est possible de mesurer les deux CET sur les échantillons prélevés in situ, alors on a ainsi une mesure indirecte de la dégradation.

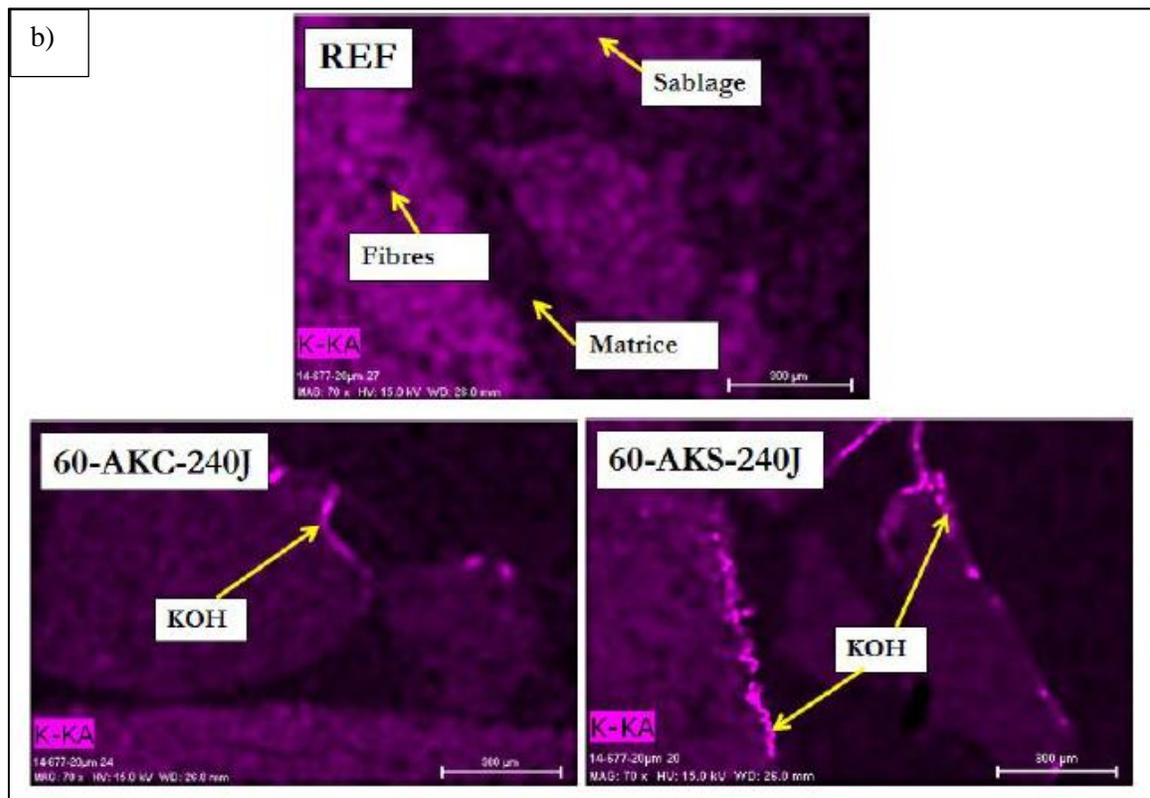
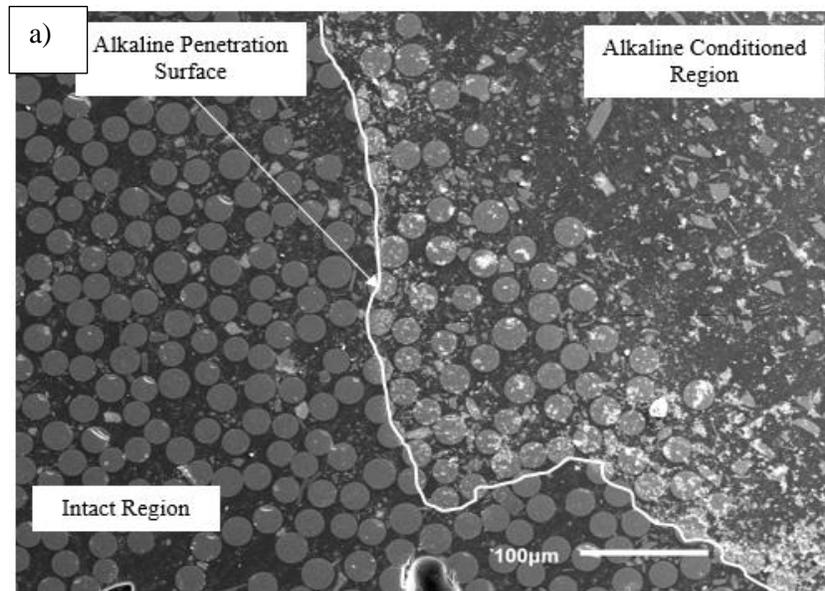
### 3.2.2.3 *Constituants chimiques-modification chimique*

Rappelons que les résines des composites PRF constituants des groupes esters sont susceptibles de se dégrader en présence d'ions alcalins. La réaction chimique conduisant à cette dégradation n'est autre que l'hydrolyse. Elle provoque la rupture des molécules de la résine, favorisant ainsi la formation des groupes hydroxyles tels que les alcools ou les acides carboxyliques. De plus, elle affecte la structure du polymère et affaiblit le matériau de façon à ce que celui-ci se trouve en incapacité de transférer les charges aux fibres. A cet effet, il devient nécessaire de déterminer, par une technique de caractérisation et d'analyse, la présence susceptible d'une réaction d'hydrolyse qui aurait eu lieu dans la matrice polymère. Pour ce faire, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, analyse FTIR, est la technique d'analyse appropriée (*Debaiky et al. 2006, Robert and Benmokrane 2012*). Ce type d'analyse permet de détecter les vibrations caractéristiques des liaisons chimiques du matériau, et ensuite de mettre en évidence les différentes fonctions et groupements des molécules qui le composent. Autrement dit, le principe est de mesurer la quantité relative des groupes hydroxyles présents dans l'échantillon, en déterminant le rapport entre le maximum du spectre correspondant au groupe hydroxyle et celui du groupe carbone-hydrogène (C-H) connu à  $2,900\text{ cm}^{-1}$ , la teneur en C-H étant considérée constante. En outre, lorsqu'une réaction d'hydrolyse a lieu, de nouveaux groupes hydroxyles se forment et le spectre correspondant augmente. Ceci indique alors la présence d'une dégradation possible de la matrice qui affecterait sans doute les propriétés mécaniques et donc la durabilité de l'armature.

### 3.2.3 Microstructure et endommagement

#### 3.2.3.1 Microscopie électronique à balayage

Les observations micrographiques sont réalisées au moyen d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB) en mode électrons secondaires sur les sections polies des armatures destinées à être étudiées. Notons que l'imagerie MEB, comme technique d'analyse qualitative, permet, avec une résolution de l'ordre de 1 nm, d'observer les surfaces de matériaux. Dans le cas des armatures en PRF, le but de ces observations est de comprendre leur microstructure (agencements de fibres, interface fibres/matrice et interface matrice/béton) et de détecter d'éventuelles dégradations au sein des échantillons vieillis (décohésion aux interfaces fibres/matrice et matrice/béton, éventuelle alkali réaction sur les fibres de verre), et suivre aussi l'évolution de ces endommagements au cours du temps. Le mode de rupture des armatures en PRF peut être également investigué en examinant les surfaces de rupture au moyen du MEB. En outre, une cartographie EDX (*energy dispersive x-ray spectroscopy*) permet d'observer l'agencement des principaux constituants des armatures en PRFV, mais également de suivre l'éventuelle pénétration des alcalins provenant de la solution de vieillissement à l'intérieur des armatures, ou encore d'identifier l'apparition d'éventuels produits de dégradation (voir figure 12).



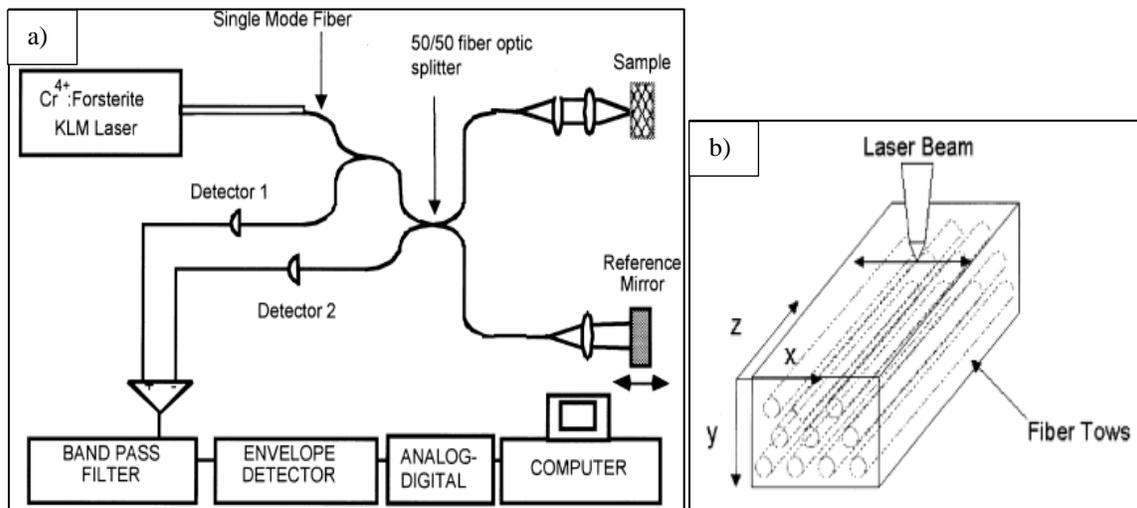
**Figure 12** : a) Image MEB permettant d'identifier la pénétration des alcalins (Gooranorimi *et al.* 2017) et b) cartographie EDX réalisées sur des sections transversales polies des barres PRFV de référence ou vieilles (A. Roland 2015).

### 3.2.3.2 Tomographie optique cohérente

La tomographie optique cohérente (OCT pour *Optical Coherence Tomography*) se présente comme une technique très avancée pour caractériser et analyser les matériaux composites

semi-transparents, en l'occurrence les PRFV (*Wiesauer et al. 2007, Dunkers et al. 1999, Dunkers et al. 2001, Stifter et al. 2008*). Rappelons que la microstructure et l'endommagement (dégradation) des matériaux composites à base de polymère avaient souvent été caractérisés au moyen des techniques destructives telle que la microscopie, en sectionnant les échantillons afin d'obtenir des informations détaillées à une petite échelle. Cependant, la possibilité de mesurer ces informations de manière non-destructive est vivement souhaitée car elle permet de suivre l'évolution de l'endommagement et la corrélation des résultats avec les aspects microstructuraux qui sont susceptibles d'initier, influencer ou encore contrôler l'endommagement. Il est par ailleurs beaucoup plus avantageux d'effectuer ces mesures avec une seule technique, car ceci élimine les difficultés liées à la combinaison des données issues des sources différentes. L'OCT est alors une technique versatile capable de caractériser à la fois la microstructure et l'endommagement avec une haute résolution. Elle permet particulièrement de déterminer la microstructure pour prédire la perméabilité et les propriétés mécaniques, de détecter les défauts ainsi que d'évaluer l'endommagement (*Dunkers et al. 1999*). De plus, OCT est une technique d'imagerie optique non invasive et sans contact qui permet d'observer la microstructure dans un milieu diffractant (*James et al. 1995, Bashkansky et al. 1997*). Brièvement, l'OCT utilise une source cohérente faible telle qu'une diode laser super-luminescente avec une fibre optique basée sur l'interféromètre de Michelson (figure 13). Dans cette configuration, le composite est le bras fixe de l'interféromètre. Les réflexions à partir des hétérogénéités dans l'échantillon sont mises en correspondance en fonction de l'épaisseur pour n'importe quelle position. L'information en volume est alors générée en faisant une translation de l'échantillon sur un port-échantillon motorisé, ce qui permet alors de révéler l'information à propos de la microstructure. Cependant, la qualité de l'image de l'OCT est fortement affectée par la non-concordance de l'indice de réfraction entre les fibres et le renfort. Les images doivent alors être interprétées rigoureusement à cause de l'atténuation du contraste à travers l'épaisseur de l'échantillon. Pour cela, l'inspection de plusieurs couches et la reconstruction tridimensionnelle sont les meilleures méthodes pour identifier les aspects réels de la microstructure (*Dunkers et al. 1999, Dunkers et al. 2001*). En effet, avec les autres variantes de cette technique, l'analyse de la dégradation peut se faire de façon qualitative (*Stifter et al. 2003*) et quantitative (*Wiesauer et al. 2005*). La

mesure de la biréfringence (propriété physique d'un matériau) renseigne sur les contraintes résiduelles dans l'échantillon analysé, ce qui permet de réaliser une cartographie de la distribution locale des contraintes et évaluer la dégradation. Il importe de mentionner que cette technique n'a pas été largement exploitée pour l'investigation de la durabilité des barres en PRFV, et aucune étude, au meilleur de nos connaissances, n'a été conduite sur des échantillons prélevés des structures réelles en vue de caractériser la dégradation de ces barres.

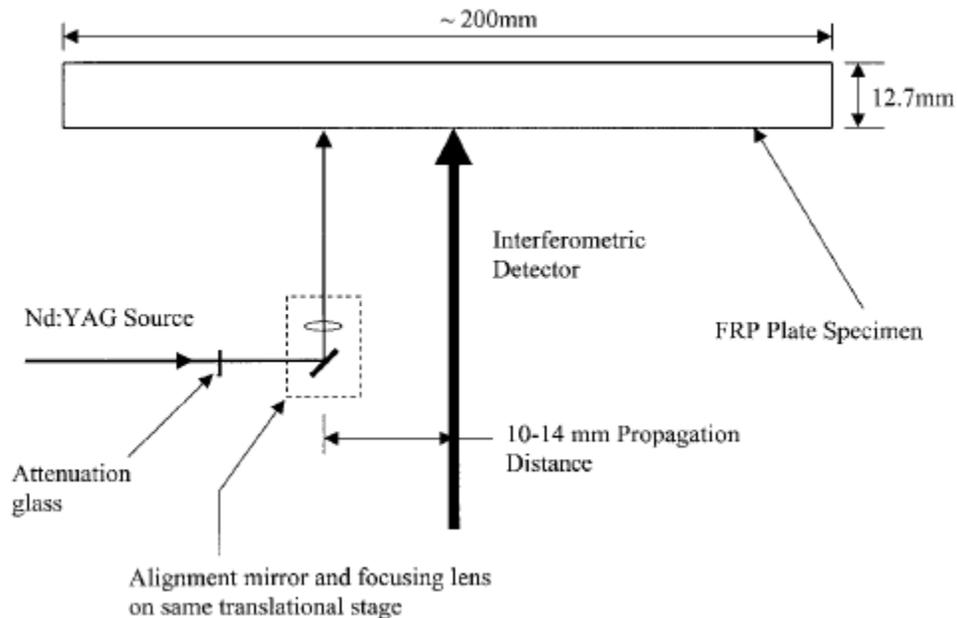


**Figure 13** : Représentation schématique : a) du laser et du système OCT; b) de l'orientation du laser et les directions d'échantillonnage en fonction du composite (Dunkers et al. 1999).

### 3.2.3.3 Émission acoustique Laser

L'Émission Acoustique (EA) est une technique dynamique non destructive capable, par interférométrie laser, de détecter les défauts dans le matériau composite en PRF et de vérifier l'intégrité de celui-ci lorsqu'il est utilisé en service (Li et al. 2012). Elle résulte d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein de l'échantillon analysé. La mesure de ces ondes élastiques transitoires qu'on manipule au moyen d'un système 2D à transformée de Fourier, permet de développer les courbes de dispersion pour les échantillons analysés. On détermine alors la vitesse de phase ultrasonore, qui est une propriété acoustique directement mesurable, et qui est associée à la densité et aux propriétés élastiques du matériau. Les vitesses de phase permettent ainsi de déterminer de façon quantitative la variation des propriétés du matériau en fonction de la dégradation de celui-ci (Dokun et al. 2000). Bien que cette technique ait été utilisée pour

la caractérisation de la dégradation des matériaux composites faits à base de polymères renforcés de fibres, aucune mention n'a cependant été faite sur la question de la durabilité à long terme de ceux-ci. La figure 14 illustre un schéma expérimental utilisant la technique d'Émission acoustique.



**Figure 14** : Illustration schématique de l'expérimentation avec la technique d'émission acoustique (Dokun et al. 2000).

### 3.3 Caractérisation et analyse des propriétés mécaniques

#### 3.3.1 Introduction

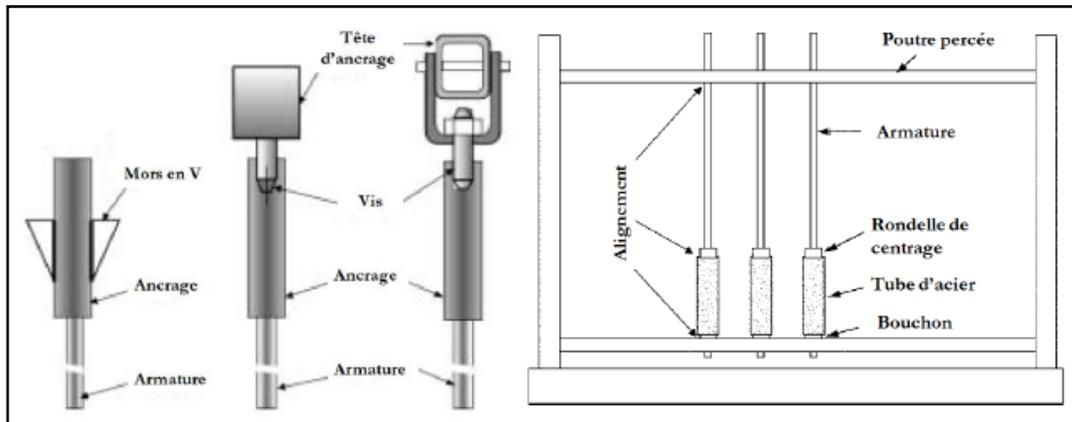
Pour les armatures en PRFV, tout comme pour tous les autres matériaux, l'état de leurs propriétés mécaniques renseignent sur leur performance en service. Il est donc nécessaire de caractériser et d'analyser les propriétés mécaniques de ces armatures afin de les appréhender. A cet effet, des tests mécaniques sont effectués sur des échantillons préparés à partir de ces armatures. Nous allons, dans les paragraphes qui suivent, passer en revue certains tests standards qui sont souvent conduits.

#### 3.3.2 Résistance en traction, module élastique, dureté

##### 3.3.2.1 Test de traction

Pour déterminer la courbe contrainte-déformation, la résistance en traction et le module élastique des armatures en PRFV, on se réfère à la norme (CSA S807-10) qui décrit la procédure de ces essais. Pour les armatures en PRF on utilise un dispositif d'ancrage

spécifique (figure 15), différent de celui pour les tests sur des barres d'acier. À l'aide d'une résine de scellement ou d'un mortier expansif, un tube en acier est scellé autour de chaque extrémité de la barre, constituant ainsi le dispositif d'ancrage. Avec ces ancrages, la répartition des contraintes radiales dans l'armature se fait de façon plus uniforme, ce qui permet d'éviter une rupture précoce par compression au niveau des zones de serrage.



**Figure 15** : Propositions d'ancrages pour essais de traction sur les barres d'armature en PRF (ACI440.3R-04).

### 3.3.2.2 Test de nanoindentation

En plus du test de traction, on peut caractériser à une très petite échelle d'autres propriétés mécaniques, telles que la dureté, le module élastique et la capacité d'adhérence de l'interface fibres/matrice (Cordelle and Drissi-Habti 2013, Cech et al. 2013). Pour cela, on se réfère à la nanoindentation qui est par ailleurs une nouvelle technique avec laquelle des caractéristiques des matériaux à l'échelle plus petites que 100 nm, aussi bien que des films fins de moins de 5 nm d'épaisseur, peuvent être évalués. La méthode des essais comprend l'indentation pour déterminer de façon comparative et quantitative la dureté pour l'évaluation de la résistance à l'usure et la capacité d'adhérence de l'interface fibres/matrice. Cette technique non-destructive est conduite en conjonction avec la microscopie à force atomique (AFM pour *atomic force microscopy*). La surface de caractérisation est définie par imagerie AFM, et les marques de rayure laissées par les indentations sont imagées par AFM après le test. Une pointe de la sonde en diamant en forme de pyramide à trois cotés est généralement utilisée pour indenter et caractériser l'échantillon. Ceci se fait de telle sorte que la sonde pénètre la surface de l'échantillon à une vitesse donnée et à une force maximale quelconque. Dans les rainures, la sonde est

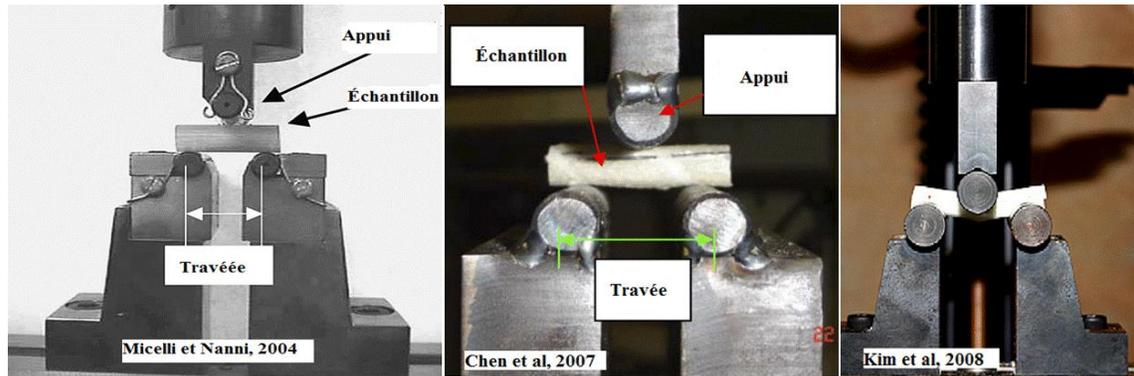
trainée à travers la surface de l'échantillon. Les paramètres tels que la force, la vitesse, la longueur et l'angle de la rayure sont contrôlés. De plus, l'imagerie est effectuée in situ en utilisant la sonde en contact intermittent. La profondeur de l'empreinte est mesurée à partir de l'image AFM afin d'évaluer la dureté. Une courbe force-déplacement que l'on génère lors de l'indentation fournit également des informations sur les propriétés mécaniques de l'échantillon du matériau. Bien que cette technique semble performante, elle n'a par contre pas été utilisée pour évaluer la performance à long terme des armatures en PRFV. De ce fait, elle pourrait constituer une approche intéressante d'autant plus que des recherches sur la dégradation du béton, en utilisant cette technique, ont été conduites à l'université Laval (Sorelli et al. 2008).

### 3.3.3 Résistance au cisaillement inter-laminaire

La caractérisation de la résistance au cisaillement inter-laminaire de l'interface fibre/matrice d'une barre d'armature en PRFV se fait en se référant à la norme (ASTM-D4475 2002) qui définit la procédure de la mise en œuvre d'un essai de flexion trois points avec appuis rapprochés, connu sous le nom d'essai *short-beam*. Cette configuration de flexion trois points avec appuis rapprochés, est responsable de l'effort tranchant qui prédomine sur le moment de flexion. L'effort tranchant est alors appliqué perpendiculairement à l'interface fibres/matrice, et fait en sorte qu'un cisaillement de type inter-laminaire est généré (principe de réciprocité en cisaillement). De plus, la norme spécifie et met un accent particulier sur l'utilisation de tels appuis spécifiques afin de faciliter la répartition des efforts sur la barre. Au cours de l'essai une relation typique charge versus déflexion est enregistrée. Le tableau 1 récapitule les résultats des essais de résistance au cisaillement conduits au moyen de dispositifs expérimentaux d'essais *short-beam* effectués dans certaines études (Micelli and Nanni 2004, Chen et al. 2007, Kim et al. 2008) qui sont ainsi présentées dans la figure 16.

**Tableau 1** : Récapitulatif des résultats des essais short-beam.

Condition	Température (°C)	Durée d'exposition (jours)	Résistance au cisaillement (% résiduelle)		
			(Micelli and Nanni 2004)	(Chen et al. 2007)	(Kim et al. 2008)
Solution alcaline	40	60			83.2
	60	45		92	
		42	70		



**Figure 16** : Quelques dispositifs d'essais short-beam trouvés dans la littérature (Micelli and Nanni 2004, Chen et al. 2007, Kim et al. 2008).

### 3.3.4 Comportement de l'interface armature/béton

#### 3.3.4.1 Généralités

L'armature en PRFV dans son milieu cimentaire est susceptible de se dégrader, et l'adhérence entre celle-ci et le béton constitue un point important dans l'évaluation du comportement mécanique d'un ouvrage d'art en béton armé. Rappelons que les propriétés d'interface jouent un rôle déterminant dans le transfert de charge entre le béton et son renfort. A cet effet, plusieurs mécanismes contrôlent ce transfert de charge (*Johnson 2009*), à savoir:

- L'adhésion chimique entre la barre et le béton ;
- Le confinement de la barre induit par le retrait du béton ;
- Les forces de frottement causées par la rugosité de l'interface et par le glissement relatif entre la barre et le béton environnant ;
- L'effet d'engrènement mécanique lié à la présence de reliefs entre la barre et le béton.

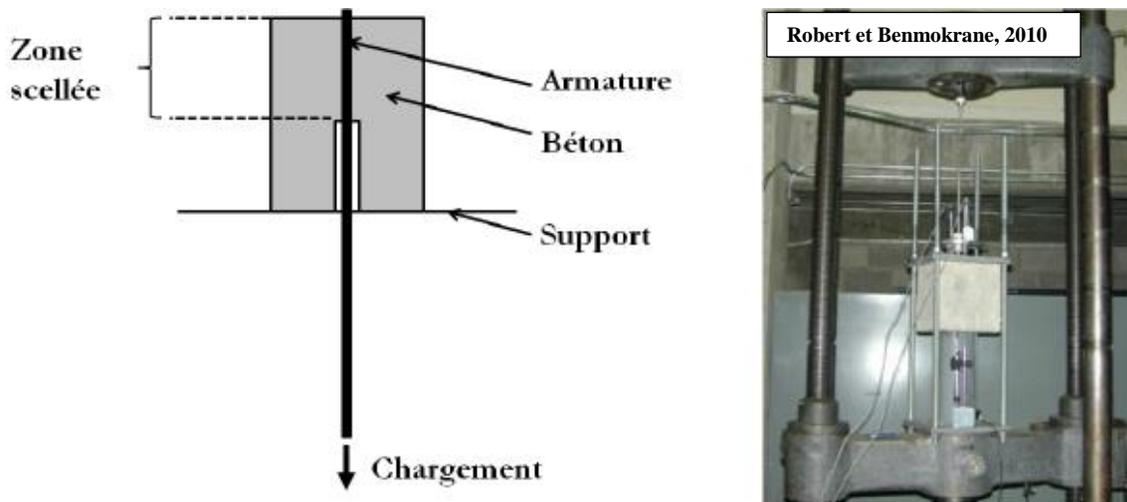
Ces caractéristiques se répercutent à l'échelle de la structure, notamment sur les déformations en service (flèches), ainsi que sur la fissuration du béton scellant la barre. Ces mécanismes mis en jeu sont plus complexes et aucun d'entre eux n'est prépondérant. Cela s'explique d'ailleurs par le fait que la résistance de l'interface dépend bien de nombreux paramètres, tels que la résistance en compression du béton, de la rigidité de l'armature, de la géométrie de sa surface, des propriétés d'adhérence entre le traitement de surface et le

corps de l'armature, des types de fibres et de matrice, ainsi que des propriétés de l'interface fibres/matrice.

Deux essais d'arrachement sont couramment effectués pour investiguer le comportement de l'interface armature/béton. Il s'agit alors des essais d'arrachement directs (*Pull-out tests*) et des essais d'arrachement par flexion de poutre rotulée (*Bond beam test*). Ils permettent de mieux comprendre le comportement de l'interface entre le béton et l'armature, et de mettre en exergue l'influence de paramètres tels que la forme et l'état de surface des barres ainsi que leur diamètre ou leur rigidité à la traction.

#### 3.3.4.2 Essai d'arrachement direct (*Pull-out test*)

Le principe de l'essai d'arrachement *Pull-out* est détaillé dans (*ACI440.3R-04*) (figure 17). Une éprouvette (cubique ou cylindrique) de béton est utilisée pour encastrer l'armature. De cette manière, un élément de séparation entre l'armature et le béton (généralement un tube) est placé du côté du chargement afin, d'une part de pouvoir régler la longueur de scellement de l'armature et de limiter les effets de bords qui tendent à provoquer un effet de confinement supplémentaire au niveau de la zone de butée du béton. La longueur scellée correspond généralement à quelques diamètres d'armature, ce qui permet d'assurer une rupture par décohésion et glissement de l'armature car un plus long scellement est susceptible de causer une rupture en traction de l'armature ou encore en fendage du béton.



Pendant l'essai, l'évolution de la force appliquée et le glissement de l'armature sont enregistrés continuellement. Cet essai permet d'ailleurs d'établir la relation d'interface de type contrainte moyenne d'adhérence – glissement qui caractérise le fonctionnement de l'armature scellée. Cet essai n'est pas très représentatif du comportement d'interface dans une section tendue d'un élément de structure, mais il reste très utile pour des études comparatives, telles que les différences de comportement et de résistance à l'arrachement.

#### 3.3.4.3 Essais d'arrachement par flexion de poutre (*Bond beam test*)

Les spécifications de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) (*RILEM 1964*) et de l'ACI (*ACI440.3R-04*) décrivent l'essai de caractérisation de l'interface armature/béton par flexion de poutre. La figure 18 illustre un schéma de montage de ce type d'essai. On a une poutre constituée de deux blocs en béton reliés en partie supérieure par une rotule en acier et en partie inférieure par la barre en PRF qui est destinée à la caractérisation de la capacité d'adhérence. Pour ce faire, on utilise la flexion quatre points pour solliciter la poutre, ce qui fait que la partie inférieure de la fibre est mise en tension sous l'effet du chargement, conduisant ainsi à un arrachement progressif de l'armature. De plus, à l'aide de la mesure de la déformation de la jauge on peut déterminer l'effort de traction réellement exercé sur la partie non scellée de l'armature.

La particularité de cet essai, en comparaison à l'essai *Pull-out*, réside dans le fait que le béton enrobant l'armature est lui-même sollicité en traction. Cette condition se rapproche davantage du comportement réel d'éléments structurels soumis à la flexion. Toutefois, cette technique n'est pas fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité des armatures en PRFV car elle est beaucoup plus compliquée que l'essai *Pull-out*.

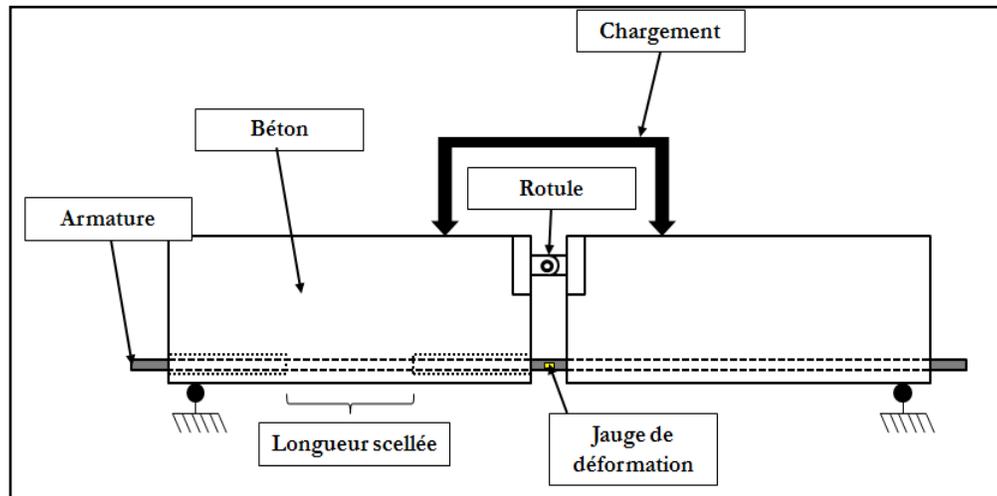


Figure 18 : Schéma représentant le principe de l'essai Bond beam (ACI440.3R-04).

### 3.3.5 Le fluage

Le guide (ACI440.1R-15) recommande de se référer à la méthode d'essai proposée par la Japan Society of Civil Engineers (JSCE 1997). Le fluage par définition est le mode de déformation permanente et variable dans le temps que présente un matériau soumis à une charge ou une contrainte constante. Les armatures en PRFV, à la différence de celles en PRFC (polymères renforcés de fibres de carbone) ou de PRFA (polymères renforcés de fibres d'aramide), sont très susceptibles au fluage. Une rupture soudaine après une certaine période de temps est possible (fluage tertiaire). Yamaguchi et al (Yamaguchi et al. 1997) ont conduit une série de tests de fluage sur des barres lises en PRFV, PRFA et PRFC. Les barres avaient un diamètre de 6 mm et avaient été testées à température ambiante sous différents niveaux de chargement. Les résultats obtenus indiquent l'existence d'une relation linéaire entre la résistance au fluage et le logarithme du temps pour une période de près de 100 heures. Les rapports niveau de contrainte à la rupture par fluage / résistance à court terme de barres en PRFV, PRFA et PRFC après 500.000 heures (plus que 50 ans) étaient extrapolés de façon linéaire, et les valeurs étaient de l'ordre de 0,29, 0,47 et 0,93, respectivement. Seki et al (Seki et al. 1997) ont investigué, à température ambiante et dans des conditions de laboratoire, le comportement en fluage des barres en PRFV à matrice vinylester. Les barres investiguées avaient une section rectangulaire de 4,4 mm<sup>2</sup> avec des languettes intégrales en PRFV. Les auteurs avaient également montré l'existence d'une relation linéaire entre le pourcentage de la résistance initiale résiduelle et le logarithme du temps. Pour une extrapolation à 50 ans du temps d'endurance, le pourcentage de la

résistance initiale résiduelle était de 55 %. Rappelons que ces études avaient été conduites sur des barres en PRFV isolées du béton et soumises à des essais de traction directe ne représentant pas les conditions réelles dans leur domaine d'utilisation. (Laoubi et al. 2006) ont étudié le comportement en fluage et la durabilité des poutres en béton dans lesquelles les barres PRFV revêtues de sable avaient été utilisées comme renfort interne. Les effets individuels et synergiques de cycles de gel/dégel et de charges de flexion soutenues sur le comportement à long terme des poutres en béton renforcées avec des barres PRFV avaient été investigués. Les poutres ont été exposées à 100, 200 et 360 cycles de gel/dégel ( $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+20^{\circ}\text{C}$ ), soit dans un état non sollicité ou sollicité en flexion dans le but de causer une contrainte de traction égale à 27% de la résistance ultime en traction de la barre en PRFV. Les poutres conditionnées avaient été testées jusqu'à la rupture selon une configuration d'essais de flexion quatre points. Les résultats des tests ont montré que l'action unique ou couplé de cycles de gel/dégel et charges soutenues n'avait pas eu un effet significatif sur le comportement en fluage des poutres testées en termes de déflexion, de déformation et de la capacité ultime. De plus, les déflexions à long terme et les limites de déformation par fluage spécifiées dans le guide (ACI440.1R-15) sont conservatrices car elles surestiment les valeurs mesurées expérimentalement. Il a été montré que la déformation au fluage des barres en PRFV était plus faible que 2 % par rapport à leur valeur initiale après 26 semaines de chargement soutenu. Rappelons que cette valeur avait été obtenue en tenant compte d'une charge soutenue à 27 % de la résistance ultime en traction des barres en PRFV, laquelle est environ 2,33 fois plus élevée que la valeur recommandée par (ACI440.1R-15) pour le contrôle du phénomène de fluage de ces barres. Plus encore, l'effet de différentes conditions environnementales sur le comportement en fluage des poutres en béton armé de polymères renforcés fibres de verre (PRFV) sous charges soutenues avait été étudiée par Al-Salloum et al (Al-Salloum and Almusallam 2007). À cet effet, ces poutres avaient été soumises à des essais de flexion quatre points et sollicitées entre 20 à 25% de la contrainte ultime des barres en PRFV. D'une part, les poutres prises pour références (poutres n'étant pas conditionnées) avaient été sollicitées dans des conditions de laboratoire dans lesquelles la température avait été contrôlée ( $24 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ). D'autre part, les autres poutres testées étaient au préalable complètement ou partiellement immergés dans des environnements différents (l'eau du robinet et l'eau de mer) à température élevée ( $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) pour accélérer le

vieillessement. Au cours de la période d'exposition, qui a duré dix mois, les déformations dans le béton et dans les barres en PRFV, ainsi que les déflexions avaient été enregistrées pour chacune des conditions environnementales considérées. Les résultats ont montré que l'effet de fluage, sous l'effet des chargements soutenus, était significatif pour tous les environnements considérés dans cette étude, et que l'effet le plus significatif était observé sur les poutres soumises à des cycles de mouillage-séchage avec l'eau de mer à  $40 \pm 2$  °C. La déflexion et la déformation dans la barre en PRFV et dans le béton ont été les principaux effets du fluage. En dépit de quelques études conduites sur ce mode de défaillance, les données sur le fluage des barres en PRFV s'avèrent toutefois très limitées, et surtout les études sur le fluage sous conditionnement environnemental et celui des barres prélevées des structures réelles. Des recherches supplémentaires sont alors nécessaires pour approfondir les connaissances sur ce mode de défaillance et l'associer à l'évaluation de la durabilité de ces barres. Les auteurs de ce rapport pensent aussi à utiliser la nanoindentation pour caractériser le fluage des barres en PRFV prélevées de structures en service étant donné qu'avec cette technique, des recherches à l'université Laval ont permis de caractériser avec succès le fluage du béton (Sorelli et al. 2013, Frech-Baronet et al. 2016).

### 3.3.6 La fatigue

La fatigue des matériaux composites à base des polymères renforcés de fibres (PRF) a fait l'objet de plusieurs études, bien que la plupart d'entre elles étaient destinées à des applications maritimes et aéronautiques (Wicaksono and Chai 2013). Les données de ces études ne sont généralement pas applicables au domaine du béton car on estime que l'ordre de grandeur de la déformation impliquée et l'environnement dans lequel le matériau est utilisé diffèrent (Adimi et al. 2000). Il a été souligné que le béton a un effet néfaste sur le comportement en fatigue des matériaux PRF à cause de son environnement alcalin et de l'usure de la surface des barres causée par les frottements entre la barre en PRF et le béton (Rahman et al. 1996, Adimi et al. 2000). D'autres études ont montré que le comportement en fatigue des barres scellées dans le béton est affecté à la fois par la résistance du renfort interne et par l'interaction entre ce renfort et le béton (El-Ragaby et al. 2007). L'un des principaux défis qui entravent la recherche sur le comportement en fatigue des barres en PRFV dans les domaines des ouvrages d'art est le manque de dispositifs de préhension appropriés et de standards devant encadrer les essais de chargement cyclique. Rappelons

que les barres en PRFV sont fortement sensibles à la pression transversale, ce qui voudrait dire que la concentration des contraintes à l'interface entre la barre et le support de préhension cause invariablement une défaillance précoce sous la fatigue. Ainsi, pendant l'essai de fatigue les dispositifs de préhension et le béton scellant la barre (voir figure 19) ont un effet significatif sur les résultats (*ACI440.1R-15*). L'effet du béton sur les barres en PRFV soumises aux chargements cycliques a été également investigué dans l'étude (*Noël and Soudki 2014*). L'approche utilisée consistait à comparer le comportement en fatigue des barres scellées dans le béton et celui des barres dépourvues de tout recouvrement de béton (chargement direct). Les résultats ont montré que les barres en PRFV scellées dans le béton exhibent une durée de vie moins élevée que celle de leur contrepartie. Les auteurs de cette étude expliquent que cet effet néfaste est attribué à l'usure causée par le glissement relatif de l'interface entre le béton et la barre ainsi que le gradient de contrainte dans le renfort. Au regard de ce qui précède, force est de constater que le comportement en fatigue des armatures en PRFV reste un sujet ouvert, et que des études complémentaires abordées sous un angle permettant d'évaluer la durabilité de ces barres sont vivement recommandées

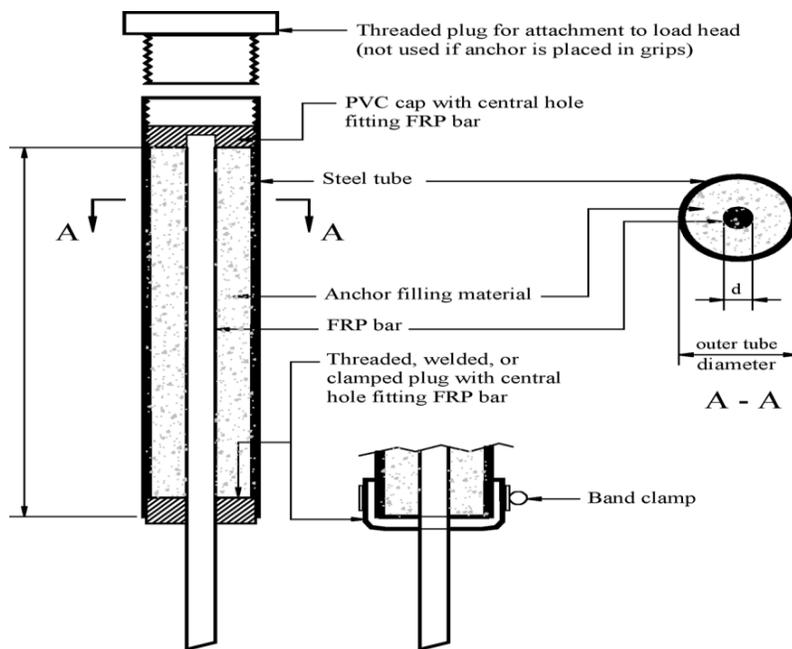


Figure 19 : Détails du dispositif de préhension (*ASTM-D7205/D7205M 2006*).

## 4 Conclusion et recommandations

Ce rapport est consacré aux barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) susceptibles de remplacer avantageusement les aciers traditionnels dans le domaine de structures en béton, grâce en particulier à leur non-vulnérabilité à la corrosion. Il se présente sous deux grands objectifs. Le premier objectif est d'émettre un avis scientifique externe sur les résultats de tests effectués à ce jour sur la durabilité des armatures en PRFV à base de résine vinylester publiés dans la littérature accessible, et de répondre à la question suivante : ces tests permettent-ils de garantir de façon satisfaisante que la durée de vie des armatures en PRFV est supérieure à celle de l'infrastructure ayant été construite avec des barres d'acier ? À cet effet, les auteurs de ce présent rapport ont effectué une revue et une analyse critique de la littérature sur la durabilité des barres d'armature en PRFV et de leur interface avec le béton lorsqu'elles sont soumises à des conditions environnementales tant sévères (conditions de laboratoire) que réelles (conditions naturelles de service). Le deuxième objectif consiste à explorer les techniques de caractérisation de la durabilité et de proposer différents types d'analyses afin de caractériser les barres en PRFV « dégradées ».

La revue des méthodes et techniques de caractérisation de la dégradation des barres en PRFV a mis en évidence l'intérêt de la communauté scientifique pour donner une réponse à la question de la durabilité de ces barres qui fait encore débat. Les approches utilisées, aussi importantes soient elles, n'ont pas permis d'établir concrètement la corrélation entre la perte des propriétés physico-chimiques et mécaniques des barres en PRFV exposées aux conditions de laboratoire et celles en service. Ceci requiert incontestablement que des études supplémentaires, en exploitant d'autres approches de caractérisation et d'analyse de la dégradation, soient effectuées. Pour ce faire, les auteurs de ce présent rapport font quelques propositions qui permettront, estiment-ils, de donner un élément de réponse à cette sempiternelle problématique liée à la performance à long terme des barres d'armature en PRFV. Il sied de rappeler que la liste des références que les auteurs citent dans ce rapport n'est pas exhaustive mais constitue une base pertinente d'information ayant permis de réaliser cette étude. La qualité et la répétition de l'information trouvée ont été les critères de sélection de cette liste de références de près de 100 articles. Du point de vue conditions

environnementales de laboratoire, les études existantes se basent sur le principe de vieillissement accéléré des barres d'armatures en PRFV pour évaluer leur durabilité. Les armatures sont exposées à des milieux agressifs (exposition directe ou vieillissement indirect à travers un prisme ou un cylindre de béton lui-même exposé à un environnement agressif) avec ou sans charge soutenue pendant toute la durée de la campagne de vieillissement. À l'issue de cette revue de la littérature nous pouvons dire que la performance à long terme des barres d'armature en PRFV demeure encore une question controversée du fait, en grande partie, que le milieu environnemental de laboratoire ne reflète pas le milieu de service naturel. Par ailleurs, il y a des contradictions dans les résultats des tests qui seraient imputables, entre autres, aux différents protocoles de tests, à la différence entre les propriétés des barres étudiées, aux méthodes de fabrication des barres et à leur évolution au cours des années. À cet effet, nous pouvons tirer les conclusions et observations suivantes :

- De façon générale, le milieu alcalin est l'environnement le plus agressif de tous les autres environnements naturels auxquels les armatures en PRFV sont exposées (dans des conditions normales d'utilisation).
- Le vieillissement direct (armatures nues) en solution alcaline et aqueuse est beaucoup plus critique que celui effectué par l'entremise d'un enrobage de béton. Ce qui indique que la résistance en traction dans le premier cas se dégrade plus significativement que dans l'autre, réduisant ainsi la durée de vie de ces armatures. La première approche ne simule pas les conditions environnementales en service. Elle représente par ailleurs **la pire condition** qu'une armature en PRFV ne pourrait rencontrer en service et ne reflète pas la réalité des barres en milieu naturel ; ce niveau de dégradation est pratiquement impossible à atteindre *in situ*.
- La température est le facteur qui contrôle la cinétique de dégradation des armatures en PRFV immergées dans les solutions ; c'est-à-dire qu'à mesure que la température augmente les barres d'armature en PRFV se dégradent rapidement et perdent leur résistance mécanique. De plus, à température égale, la plus longue durée d'exposition des barres d'armature en PRFV occasionne plus de dégradation.

- Les essais mécaniques conduits à basse température (en dessous de  $-50^{\circ}\text{C}$ ) montrent que les propriétés mécaniques ne se détériorent pas. Cependant, peu d'études ont été conduites à cet effet. Dans ce rapport nous avons fait référence à une seule étude.
- Le chargement soutenu, combiné à des conditions environnementales agressives, accélère la dégradation des propriétés mécaniques et la croissance des dommages des barres d'armature en PRFV.
- Les cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel ont des effets négligeables sur le processus de dégradation des barres d'armatures en PRFV noyées dans le béton pour de **très courtes périodes d'exposition**. Ces deux conditions d'exposition ne seraient pas critiques sur la performance des armatures surtout lorsque celles-ci ne sont pas soumises à des charges soutenues. La combinaison d'une longue période d'exposition et de la charge soutenue accentue la dégradation. Toutefois, les études présentant les effets combinés de la charge soutenue et des cycles de gel-dégel ou de mouillage-séchage sont très limitées.
- Le module élastique n'est pas affecté par le vieillissement accéléré, tout au moins pour les différentes températures auxquelles les essais ont été effectués (maximum  $73^{\circ}\text{C}$  que les auteurs du présent rapport ont noté) n'approchant pas celle de transition vitreuse ( $T_g$  entre  $110$  et  $130^{\circ}\text{C}$  pour la matrice vinylester).
- L'exposition à haute température dépassant la  $T_g$  des barres d'armature en PRFV dégrade considérablement les propriétés mécaniques (résistance à la traction, capacité à l'adhérence, module élastique en flexion).
- Le coefficient d'expansion thermique (CET) transversal des barres en PRFV est 3 à 8 fois plus élevé que celui du béton. Sous l'effet de l'augmentation de température, la différence entre le CET transversal des barres en PRFV et celui du béton génère une pression radiale à l'interface barre/béton, qui par la suite engendre des champs de contraintes dans le béton. Ces champs de contraintes provoqueraient l'éclatement du béton et causeraient l'apparition de fissures. Ce phénomène qui dépend du rapport entre l'épaisseur du recouvrement du béton et le diamètre des barres conduit inéluctablement à la dégradation de l'adhérence entre le béton et le renfort interne, affectant ainsi le comportement mécanique de la structure.

- Le CET longitudinal des barres en PRFV est proche de celui du béton, et n'a pas d'impact négatif sur l'interface barre/béton.
- La résistance au feu n'a pas été abordée dans ce rapport.
- La prédiction de la performance à long terme des barres d'armature en PRFV repose sur le modèle d'Arrhenius. Les auteurs qui ont utilisé cette approche, ont calé le modèle à partir de données à court terme et ils ont par la suite estimé la durée de vie à long terme (des dizaines d'années) de ces armatures. Nous parlons ici d'une **extrapolation** basée sur des résultats de quelques mois pour prédire une durée de vie à 75 ans. Du point de vue scientifique, cette approche est à notre avis inappropriée. Ainsi, il serait assez subjectif de prédire avec exactitude une durée de vie des armatures d'au moins 75 ans, car il manque de données à long terme. Des études sur des durées de vieillissement plus longues seraient alors nécessaires à conduire. Dans ces études ultérieures, les chercheurs devraient être en mesure de déterminer le nombre d'années de service d'une armature en PRFV qui correspond à une durée quelconque d'une immersion indirecte en laboratoire. Ceci permettra d'identifier le temps (la durée) nécessaire indiquant le début du plateau de la loi d'Arrhenius qui garantirait ainsi la prédiction de la durabilité à long terme. Plus précisément, il importe d'avoir assez de données fiables pour bien estimer la valeur de  $\tau$  (équation (7)). Si nous pouvions établir clairement le taux d'accélération de la dégradation de ces tests par rapport à des barres en milieu naturel, il serait possible d'établir une loi exponentielle non pas en fonction du temps des tests, mais en fonction du temps équivalent au temps réel, alors peut-être que les résultats des études faites à ce jour pourraient être utilisés. Les auteurs du présent rapport sont cependant conscients que cela demanderait de faire des tests à partir des échantillons prélevés des structures existantes qui ont été en service pendant une certaine durée.

De plus, concernant les conditions réelles de service, nous remarquons que partout dans le monde un intérêt grandissant s'est développé autour de l'utilisation des barres d'armature en PRFV dans les ouvrages en béton (voir l'annexe, tableau 5). À la lumière de la revue de la littérature faite sur la durabilité de ces barres d'armature en PRFV exposées dans leur

milieu naturel de service, les conclusions ci-après sont tirées, en comparaison aux conditions de laboratoire simulant le milieu naturel (vieillessement indirect) :

- Suite aux analyses physico-chimiques effectuées sur de petits échantillons prélevés *in situ*, aucune dégradation significative sur les barres d'armature en PRFV à matrice vinylester n'a été observée au moment de certaines expertises après une certaine durée de leur mise en service dans les ouvrages en béton. La durée de vie la plus longue observée est de 13 années sur les barres en PRFV prélevées du pont Crowchild Trail (Alberta). De nos jours, si une autre expertise de même envergure avait révélé les mêmes conclusions, la durée de vie de ces barres serait d'au moins de 21 ans.
- Des dégradations importantes ont été observées sur les barres d'armature en PRFV à matrice polyester après près de 21 ans en service (pont Médéric-Martin P-5641). Ce type de résine a été abandonné par la suite par le MTMDET.
- Cependant, les analyses physico-chimiques n'ont pas été corrélées aux éventuelles pertes de résistance mécanique. Il faut donc se fier aux seuls résultats d'analyse physico-chimiques pour qualifier la dégradation mécanique, i.e. la perte de résistance. Si on accepte une corrélation parfaite, alors on peut avancer que la résistance mécanique des barres PRFV n'est pas affectée après 13 années en service soit la période la plus longue observée sur une structure en service (pont Crowchild Trail).
- Les essais de chargement à court terme effectués sur certains ouvrages construits ou rénovés montrent que les structures renforcées de barres en PRFV exhibent un excellent comportement mécanique.
- Les barres d'armature en PRFV représentent des excellentes candidates pour remplacer les armatures en acier utilisées comme renforts internes dans les ponts en béton.

Les auteurs de ce rapport s'accordent alors pour dire que les tests de vieillissement accéléré des barres enrobées de béton immergé dans l'eau, l'eau salée ou un milieu alcalin, représentent des situations beaucoup plus agressives que la réalité d'une dalle de pont armée de barres PRFV. Il est improbable que les barres d'armature en PRFV puissent être

soumises à des telles conditions environnementales lorsqu'elles sont mises en service. De plus, le niveau de dégradation observé dans le cas des essais en laboratoire ne pourrait pas être atteint en si peu de temps. Il s'ensuit que la résistance du matériau devrait rester beaucoup plus élevée que celle observée en laboratoire. Ce dernier milieu est beaucoup plus agressif que celui en service. À cet effet, les barres en PRFV seraient plus durables dans les conditions environnementales réelles que dans celles de laboratoire (vieillessement indirect).

Toutefois, le modèle d'Arrhenius de prédiction de la durabilité à long terme se base sur une extrapolation de données obtenues à court terme; ce modèle prédit des propriétés mécaniques sur une durée de plus de 27 000 jours à partir de données obtenues sur moins de 360 jours. On ne peut donc pas garantir que ce modèle fournisse des propriétés mécaniques fiables de ces barres sur une telle période. De plus, tel que le recommande le guide (*ACI440.9R-15*), les résultats des essais de campagne de vieillissement accéléré ne devraient pas être utilisés pour prédire la durée de vie en service tant que la corrélation entre la performance en service et les conditions de vieillissement accéléré n'est pas proprement établie. En définitive, la question sur la corrélation entre les conditions d'exposition en laboratoire et celles en service reste posée. La version actuelle de ce guide est la première édition qui a été rendue publique.

Concernant la caractérisation des barres dégradées, nous rappelons que les propriétés physico-chimiques caractérisées sur des échantillons prélevés sur des structures en service ne peuvent pas en elles seules garantir la compréhension de la durabilité de ces barres. Il faut associer à cela les propriétés mécaniques. Pour ce faire, des échantillons de ces structures doivent être caractérisés et analysés aussi bien mécaniquement que physico-chimiquement. Ou encore, ces propriétés mécaniques pourraient être déterminées de façon indirecte. Ainsi, nous proposons d'aborder la durabilité réelle des barres en corrélation des informations pouvant être obtenues de prélèvement *in situ* sur des ouvrages d'art utilisant les barres en PRFV. Idéalement, on devrait effectuer des essais de traction directe sur des échantillons prélevés des ouvrages d'art afin de connaître les valeurs réelles des propriétés mécaniques. Toutefois, les échantillons nécessaires à l'évaluation des propriétés mécaniques nécessiteraient des échantillons de grandes dimensions et endommageraient la

structure lors du prélèvement. À grande échelle, une telle approche est difficilement réalisable, et il faut donc procéder indirectement.

Supposons une valeur quantitative connue qui permet de connaître le degré de dégradation de la barre. Idéalement, il vaudrait mieux avoir 2 ou 3 indicateurs de dégradation. Cette valeur quantitative peut varier disons, de 0 (état parfait) à 1 (état complètement dégradé), et doit être mesurable sur des échantillons prélevés sur la structure existante. Naturellement, il serait aussi possible d'obtenir cet index (ou ces index) de dégradation à partir des échantillons conditionnés en laboratoire.

La méthodologie proposée consiste à créer une banque de données issue de tests en laboratoire avec vieillissement accéléré (vieillissement direct ou indirect) qui mettrait en corrélation les propriétés physico-chimiques et mécaniques ( $T_g$ ,  $CET$ , module de Young ( $E$ ), limite à la rupture ( $\sigma_r$ ), etc.) avec un index de dégradation (ou des index) quantifiable sur de petits échantillons. Pour fixer les idées, supposons que la technique de nanoindentation permet de caractériser le niveau de dégradation des barres PRFV. En fixant une pénétration maximum de l'indentateur choisi, on en retire la force pour atteindre cette valeur de pénétration. Avec la dégradation de la barre selon le temps d'exposition, la force requise pour atteindre la même profondeur d'indentation pourrait être moindre. Connaissant la force  $F_0$  sur le matériau vierge et celle à un temps de dégradation accéléré donné  $F_t$ , on peut définir l'index de dégradation de nanoindentation :

$$I_t^n = \frac{F_0 - F_t}{F_0}$$

Cet index varierait de 0 ( $F_t = F_0$ ) pour un matériau intact à 1 pour un matériau complètement dégradé ( $F_t = 0$ ). Pour le même temps de dégradation, un ensemble de tests est fait pour caractériser les paramètres physico-chimiques et mécaniques importants : module de Young ( $E$ ), limite de rupture ( $\sigma_r$ ),  $CET$ ,  $T_g$ , la résistance au cisaillement et à l'arrachement, etc. Ainsi, on peut créer une banque de données  $E(I_t^n)$ ,  $\sigma_r(I_t^n)$ ,  $CET(I_t^n)$ , etc.

Il serait bien de choisir un ensemble de tests qui génèrent des résultats quantifiables pour définir d'autres index de dégradation (utilisation par exemple de la méthode acoustique, de

la tomographie et de la nanoindentation) qui seraient aussi corrélés aux mêmes tests mécaniques discutés précédemment. Cela permettrait de donner un intervalle de valeurs estimées.

Supposons que l'on prélève un petit échantillon de barre PRFV sur une structure existante et que l'on cherche à estimer le niveau de dégradation et les propriétés mécaniques associées. Alors on soumettrait cet échantillon aux mêmes tests qui ont servi à la détermination de la dégradation des barres et à la création de la base de données en laboratoire, comme le test de nanoindentation. On pourrait ainsi définir son index comme suit :

$$I_{in\ situ}^n = \frac{F_0 - F_{in\ situ}}{F_0}$$

En admettant que la corrélation entre les propriétés physico-chimiques et mécaniques des tests *in situ* est similaire à celle issue des tests fait sur les barres dégradées en laboratoire, on pourrait alors estimer ces propriétés comme suit :

$$E_{in\ situ} = E(I_{in\ situ}^n)$$

$$\sigma_{r\ in\ situ} = \sigma_r(I_{in\ situ}^n)$$

$$CET_{in\ situ} = CET(I_{in\ situ}^n)$$

On établirait aussi une corrélation indirecte entre le temps de dégradation accéléré en laboratoire et le temps réel *in situ* permettant d'atteindre le même niveau de dégradation. Rappelons que le paramètre temps est très important pour permettre d'atteindre la dégradation totale des barres en laboratoire. On se met alors face au choix de l'approche des campagnes de vieillissement de ces barres. D'un côté, si l'on utilise la méthode de vieillissement direct, celle-ci permettra sans doute de dégrader les barres rapidement mais en s'éloignant de leur environnement naturel. De l'autre, si l'on utilise le vieillissement indirect (condition de laboratoire se rapprochant le plus du milieu environnemental naturel du fait de la présence du béton scellant les barres), le temps nécessaire pour atteindre la dégradation totale des barres sera long. On pourra alors, dans la mesure du possible, utiliser les deux méthodes de vieillissement accéléré (vieillissement direct et indirect) pour les besoins d'études et, peut-être, de validation de notre approche.

Dans le déroulement des essais et des analyses à faire, nous mettons en exergue ci-dessous quelques détails sur les méthodes et les approches à employer :

- La tomographie comme technique de caractérisation de la dégradation n'a pas été largement exploitée pour l'investigation de la durabilité des barres en PRFV et aucune étude, au meilleur de nos connaissances, n'a été conduite sur des échantillons prélevés de structures réelles. Il serait possible, avec cette technique, de caractériser la dégradation des barres de façon qualitative et quantitative. La mesure de la biréfringence (propriété physique d'un matériau) renseigne sur les contraintes résiduelles dans l'échantillon analysé, ce qui permet de réaliser une cartographie de la distribution locale des contraintes et d'évaluer la dégradation. Nous recommandons l'emploi de cette technique pour caractériser la dégradation à la fois des spécimens vieillis et de ceux prélevés de structures en service ;
- L'émission acoustique par interférométrie laser est une technique tout aussi viable et que l'on pourrait exploiter pour caractériser la dégradation des barres d'armature dans une optique d'évaluation de leur performance à long terme. À partir de la vitesse de phase ultrasonore, qui est une propriété acoustique directement mesurable et qui est associée à la densité et aux propriétés élastiques du matériau, on peut déterminer de façon quantitative la variation des propriétés des barres en PRFV en fonction de la dégradation de celui-ci ;
- Pour les essais d'arrachement, nous suggérons d'instrumenter adéquatement les armatures à l'aide de fibres optiques qui devraient être installées de manière continue sur toute la longueur du scellement afin d'évaluer les profils de déformation le long des interfaces armatures/béton, et de suivre l'évolution de ces profils lors de l'endommagement progressif de l'interface ;
- Lors des vieillissements d'éprouvettes pour les essais d'arrachement en laboratoire (courte durée d'exposition d'environ 240 jours), on pense que les phénomènes propres au béton (cure, retrait, et réactions de gonflement) contrôleraient davantage les évolutions des propriétés de l'interface que les dégradations matérielles des armatures. De plus longues périodes de vieillissement (conduisant à la « stabilisation » des propriétés propres au béton) pourraient alors permettre de tirer des tendances plus réalistes sur l'évolution du comportement d'interface. Nous

- suggerons également de réaliser des vieillissements sur des éprouvettes instrumentées par fibre optique afin d'étudier plus localement l'évolution des propriétés d'interfaces (évolution des profils, de la longueur d'ancrage). Il serait toutefois nécessaire de mener dans un premier temps une étude spécifique pour vérifier la tenue au vieillissement des fibres optiques lorsque celles-ci sont installées à la surface des barres afin d'évaluer leur impact éventuel sur les résultats.
- Le fluage des barres mises en service n'a presque pas été étudié, et d'autre part, les essais de fluage sous conditionnement environnemental ne sont presque pas régulièrement conduits. Nous proposons ainsi d'investiguer ce dernier aspect en laboratoire. Pendant les essais de fluage, les barres testées en laboratoire seraient sous conditionnement environnemental. Nous proposons également de caractériser le fluage des échantillons prélevés de structures réelles avec la technique de nanoindentation.
  - La détermination des propriétés en fatigue *in situ* ne semble pas être évidente. De plus, étant donné le manque de données sur le comportement en fatigue des armatures en PRFV à base de vinylester, il est nécessaire de conduire des essais de fatigue en laboratoire sur des barres scellées dans le béton. Lors de ces essais, une attention particulière devrait être portée sur la conception et l'implémentation des bancs d'essais afin de minimiser la concentration des contraintes à l'interface entre le béton scellant la barre et le support de préhension qui causent invariablement une défaillance précoce sous la fatigue. Les campagnes de vieillissement sous chargement se font régulièrement avec des efforts soutenus. Nous proposons que soit étudié, dans la mesure du possible, l'effet des chargements cycliques pendant le vieillissement. De façon plus réaliste, nous proposons également des tests de fatigue sous conditionnement environnemental des poutres renforcées avec des barres en PRFV.

En guise de conclusion générale, selon les analyses physico-chimiques réalisées sur des échantillons provenant de structures existantes, on conclut qu'il n'y a pas de dégradation significative des barres en PRFV avec matrice de vinylester sur une période de 13 années. Cette conclusion est fort encourageante pour continuer l'utilisation de telles barres dans les ponts et glissières de sécurité.

Nous croyons que ces barres ont un avenir probant et nous recommandons de poursuivre la construction d'ouvrages incorporant ce type de barre, tel que le MTMDET le spécifie dans son devis type « Construction et réparation des structures » (réf. devis type édition 2015 produit par la Direction des structures), afin de continuer le développement des connaissances mais assujetti à un suivi de ces structures.

## 5 Références

- A. Roland. 2015. "Comportement mécanique et durabilité de structures en béton renforcées par des armatures composites internes." PhD, Paris-Est.
- ACI440.1R-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute (ACI).
- ACI440.3R-04. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute (ACI).
- ACI440.9R-15. Guide to Accelerated Conditioning Protocols for Durability Assessment on Internal and External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute (ACI).
- Adimi, Mr, Ah Rahman, and B. Benmokrane. 2000. "NEW METHOD FOR TESTING FIBER-REINFORCED POLYMER RODS UNDER FATIGUE." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 4 (4):206-213. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(206).
- Al-Salloum, Yousef A., and Tarek H. Almusallam. 2007. "Creep effect on the behavior of concrete beams reinforced with GFRP bars subjected to different environments." *Construction and Building Materials* 21 (7):1510-1519. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.008.
- Al-Salloum, Yousef A., Sherif El-Gamal, Tarek H. Almusallam, Saleh H. Alsayed, and Mohammed Aqel. 2013. "Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars." *Composites Part B: Engineering* 45 (1):835-844. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.004>.
- Almusallam, Tarek H., Yousef A. Al-Salloum, Saleh H. Alsayed, Sherif El-Gamal, and Mohammed Aqel. 2013. "Tensile properties degradation of glass fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete under severe laboratory and field environmental conditions." *Journal of Composite Materials* 47 (4):393-407. doi: 10.1177/0021998312440473.
- Almusallam, Th, and Ya Al-Salloum. 2006. "Durability of GFRP rebars in concrete beams under sustained loads at severe environments." *JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS* 40 (7):623-637. doi: 10.1177/0021998305055275.
- Alvarez, A., and R. Masmoudi. 2007. "Bond slip behaviour of FRP bars under low and high temperature, experimental and theoretical studies." CDCC.
- ASTM-D4475. 2002. Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM-D7205/D7205M. 2006. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.
- ASTM-E831. 2006. Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials (ASTM).

- ASTM-E1356. 2008. Standard test method for assignment of the glass transition temperature by differential scanning calorimetry. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Bank, L. C., M. Puterman, and A. Katz. 1998. "The effect of material degradation on bond properties of fiber reinforced plastic reinforcing bars in concrete." *ACI MATERIALS JOURNAL* 95 (3):232-243.
- Bashkansky, M., M. D. Duncan, M. Kahn, III D. Lewis, and J. Reintjes. 1997. "Subsurface defect detection in ceramics by high-speed high-resolution optical coherent tomography." *Optics Letters* 22 (1):61-63.
- Benmokrane, B., E. El-Salakawy, S. El-Gamal, and S. Goulet. 2007. "Construction and testing of an innovative concrete bridge deck totally reinforced with glass FRP bars: Val-Alain Bridge on Highway 20 East." *JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING* 12 (5):632-645. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:5(632).
- Benmokrane, B., F. Elgabbas, E. Ahmed, and P. Cousin. 2015. "Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars." *Journal of Composites for Construction* 19 (6):04015008. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000564.
- Benmokrane, B., P. Wang, T. M. Ton-That, H. Rahman, and Jf Robert. 2002. "Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 6 (3):143-153. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(143).
- Cech, V., E. Palesch, and J. Lukes. 2013. "The glass fiber-polymer matrix interface/interphase characterized by nanoscale imaging techniques." *Composites Science and Technology* 83:22-26. doi: 10.1016/j.compscitech.2013.04.014.
- Chen, Y., Jf Davalos, and I. Ray. 2006. "Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 10 (4):279-286. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279).
- Chen, Y., Jf Davalos, I. Ray, and Hy Kim. 2007. "Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures." *COMPOSITE STRUCTURES* 78 (1):101-111. doi: 10.1016/j.compstruct.2005.08.015.
- Cordelle, A., and M. Drissi-Habti. 2013. "Nanoindentation Characterization of Vinylester Glass-fiber Composites Submitted to Dense Ultraviolet Radiation Exposure." *MATERIALS EVALUATION* 71 (4):466-473.
- CSA, Canadian Standards Association. 2000. Canadian highway bridge design code-section 16, updated version for public review. *CAN/CSA-S6-00*. Rexdale, Toronto.
- Davalos, Julio F., Yi Chen, and Indrajit Ray. 2008. "Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete." *Cement and Concrete Composites* 30 (8):722-730. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.05.006.
- Debaiky, As, G. Nkurunziza, B. Benmokrane, and P. Cousin. 2006. "Residual tensile properties of GFRP reinforcing bars after loading in severe environments." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 10 (5):370-380. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:5(370).

- Dokun, Od, Lj Jacobs, and R. M. Haj-Ali. 2000. "Ultrasonic monitoring of material degradation in FRP composites." *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS-ASCE* 126 (7):704-710.
- Dunkers, Joy P., Richard S. Parnas, Carl G. Zimba, Richard C. Peterson, Kathleen M. Flynn, James G. Fujimoto, and Brett E. Bouma. 1999. "Optical coherence tomography of glass reinforced polymer composites." *Composites Part A* 30 (2):139-145. doi: 10.1016/S1359-835X(98)00084-0.
- Dunkers, Joy P., Frederick R. Phelan, Daniel P. Sanders, Matthew J. Everett, William H. Green, Donald L. Hunston, and Richard S. Parnas. 2001. "The application of optical coherence tomography to problems in polymer matrix composites." *Optics and Lasers in Engineering* 35 (3):135-147. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00010-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00010-0).
- Eitel, A. K. 2005. "PERFORMANCE OF A GFRP REINFORCED CONCRETE BRIDGE DECK." PhD., Civil Engineering, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY.
- El-Maaddawy, T., A. Al-Saidy, and A Al-Sallamin. 2015. "Residual Strength of Glass Fiber- Reinforced Polymer Bars in Seawater- Contaminated Concrete." 5th International Conference on Construction Materials (ConMat'15). Performance, Innovations, and Structural Implications, Whistler, Vancouver, Canada, 19-21 August.
- El-Ragaby, A., E. El-Salakawy, and B. Benmokrane. 2007. "Fatigue life evaluation of concrete bridge deck slabs reinforced with glass FRP composite bars." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 11 (3):258-268. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:3(258).
- Elbadry, Mamdouh M., Hany Abdalla, and Amin Ghali. 2000. "Effects of temperature on the behaviour of fiber reinforced polymer reinforced concrete members: experimental studies." *Canadian Journal of Civil Engineering* 27 (5):993-1004. doi: 10.1139/100-013.
- Frech-Baronet, J., L. Sorelli, and J. P. Charron. 2016. "New evidences on the effect of the internal relative humidity on the creep and relaxation behaviour of a cement paste by micro-indentation techniques." *Cement and Concrete Research*. doi: 10.1016/j.cemconres.2016.10.005.
- Galati, Nestore, Antonio Nanni, Lokeswarappa R. Dharani, Francesco Focacci, and Maria Antonietta Aiello. 2006. "Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (8):1223-1230. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.043>.
- Gentry, T. Russell, and Mohamed Husain. 1999. "Thermal Compatibility of Concrete and Composite Reinforcements." *Journal of Composites for Construction* 3 (2):82.
- Gentry, T. Russell., and C. E Hudak. 1996. "Thermal compatibility of plastic composite reinforcement and concrete." 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-II, Montreal.
- Gilbert Nkurunziza, Brahim Benmokrane Ahmed S. Debaiky, and Masmoudi Radhouane. 2005. "Effect of Sustained Load and Environment on Long-Term Tensile Properties of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars." *Structural Journal* 102 (4). doi: 10.14359/14566.

- Gooranorimi, Omid, Wimal Suaris, Edward Dauer, and Antonio Nanni. 2017. "Microstructural investigation of glass fiber reinforced polymer bars." *Composites Part B* 110:388-395. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.029.
- Green, Mark, Aaron Dent, and Luke Bisby. 2003. "Effect of freeze-thaw cycling on the behaviour of reinforced concrete beams strengthened in flexure with fibre reinforced polymer sheets." *Canadian Journal of Civil Engineering* 30 (6):1081-1088.
- Harik, I. E., and A Peiris. 2014. "16 Years of Deployment of FRP Material in Bridges in Kentucky." Transport Research Arena, Paris.
- Hizia, Bellakehal, Zaidi Ali, Masmoudi Radhouane, and Bouhicha Mohamed. 2014. "Behavior of FRP Bars-Reinforced Concrete Slabs under Temperature and Sustained Load Effects." *Polymers* 6 (3):873-889. doi: 10.3390/polym6030873.
- Huang, J. W., and R. Aboutaha. 2010. "Environmental Reduction Factors for GFRP Bars Used as Concrete Reinforcement: New Scientific Approach." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 14 (5):479-486. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000122.
- Ishai, Ori. 1975. "Environmental effects on deformation, strength, and degradation of unidirectional glass fiber reinforced plastics. II. Experimental study." *Polymer Engineering & Science* 15 (7):491-499. doi: 10.1002/pen.760150704.
- James, G. Fujimoto, E. Brezinski Mark, J. Tearney Guillermo, A. Boppart Stephen, Bouma Brett, R. Hee Michael, F. Southern James, and A. Swanson Eric. 1995. "Optical biopsy and imaging using optical coherence tomography." *Nature Medicine* 1 (9):970. doi: 10.1038/nm0995-970.
- Johnson, D. T. C. 2009. "Investigation of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars as internal reinforcement for concrete structures." Master, University of Toronto.
- JSCE-E536. 1995. Test method for coefficient of thermal expansion of continuous fiber reinforcing materials by thermo-mechanical analysis. Tokyo, Japan: Japanese Society of Civil Engineering (JSCE).
- JSCE. 1997. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. Tokyo, Japan: Japanese Society of Civil Engineering (JSCE).
- Katz, A., N. Berman, and L. C. Bank. 1999. "Effect of High Temperature on Bond Strength of FRP Rebars." *Journal of composite for construction* 3 (2):73-81.
- Kim, Hyeong-Yeol, Young-Hwan Park, Young-Jun You, and Chang-Kwon Moon. 2008. "Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions." *Composite Structures* 83 (1):37-47. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.03.005>.
- Laoubi, Kader, Ehab El-Salakawy, and Brahim Benmokrane. 2006. "Creep and durability of sand-coated glass FRP bars in concrete elements under freeze/thaw cycling and sustained loads." *Cement and Concrete Composites* 28 (10):869-878. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.014>.
- Li, Wei, Guang Dai, Feifei Long, Peng Jiang, and Yali Wang. 2012. "Study on FRP composite materials' damage based on the acoustic emission testing technology." 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 16-20 April.

- Loranger, M-A., and C. Nazair. 2016. Expertise sur l'état du béton et des barres d'armature en PRFV du pont P-11591 situé sur l'Autoroute 20 Est à Val-Alain. Québec: Ministère des Transports du Québec.
- Luke, A. Bisby, and F. Green Mark. 2002. "Resistance to Freezing and Thawing of Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Bond." *Structural Journal* 99 (2). doi: 10.14359/11547.
- Masmoudi, R., A. Zaidi, and P. Gerard. 2005. "Transverse thermal expansion of FRP bars embedded in concrete." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 9 (5):377-387. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:5(377).
- Masmoudi, Radhouane, Abdelmonem Masmoudi, Mongi Ben Ouezdou, and Atef Daoud. 2011. "Long-term bond performance of GFRP bars in concrete under temperature ranging from 20 °C to 80 °C." *Construction and Building Materials* 25 (2):486-493. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.040>.
- Micelli, Francesco, and Antonio Nanni. 2004. "Durability of FRP rods for concrete structures." *Construction and Building Materials* 18 (7):491-503. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012.
- Mufti, A. A., N. Banthia, B. Benmokrane, M. Boulfiza, and J. P. Newhook. 2007. "Durability of GFRP composite rods." *Concrete International* 29 (2):37-42.
- Mufti, A. A., M. Onofrei, B. Benmokrane, N. Banthia, M. Boulfiza, J. P. Newhook, B. Bakht, G. S. Tadros, and P. Brett. 2007. "Field study of glass-fibre-reinforced polymer durability in concrete." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (3):355-366. doi: 10.1139/106-138.
- Mufti, A., J. P. Newhook, B. Benmokrane, G. S. Tadros, and H. M Vogel. 2011. "Durability of GFRP rods in Field demonstration Projects across Canada." Proceedings of the Forth International Conference (CDCC-11), Québec, Canada.
- Murphy, N. 2013. "Feasibility Analysis of a Fiber Reinforced Polymer Bridge." Masters, Civil and Architectural Engineering, Stockholm University.
- Nazair, C., and M-A. Loranger. 2015. Expertise sur l'état du béton, des barres d'armature en PRFV et en acier galvanisé des glissières du pont Médéric-Martin P-15641. Québec: Ministère des Transports du Québec.
- Neville, A. M. 1996. *Properties of concrete*. Harlow, UK: Addison Wesley Longman Limited.
- Nishizaki, I., and S. Meiarashi. 2002. "Long-term deterioration of GFRP in water and moist environment." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 6 (1):21-27.
- Nkurunziza, G., P. Cousin, R. Masmoudi, and B. Benmokrane. 2003. "Effect of sustained tensile stress and temperature on GFRP composite bars properties: 1. Preliminary experiment in deionised water and alkaline solution." *International Journal of Materials & Product Technology* 19 (1/2). doi: 10.1504/IJMPT.2003.003555.
- Noël, Martin, and Khaled Soudki. 2014. "Fatigue Behavior of GFRP Reinforcing Bars in Air and in Concrete." *Journal of Composites for Construction* 18 (5):04014006. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000468.
- Onofrei, M. 2005. Durability of GFRP reinforced concrete from field demonstration structures. University of Manitoba.
- Phillips, K. A. 2004. "PERFORMANCE OF A BRIDGE DECK WITH GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP) BARS AS THE TOP MAT OF

- REINFORCEMENT." Masters, Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Rahman, A. H, M. R Adimi, and B Benmokrane. 1996. "Fatigue behavior of FRP reinforcements encased in concrete." Proc., 2nd Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Montreal, QC, Canada.
- Rajan Sen, Gray Mullins, and Salem Tom. 2002. "Durability of E-Glass/Vinylester Reinforcement in Alkaline Solution." *Structural Journal* 99 (3). doi: 10.14359/11921.
- RILEM. 1964. Essai d'adhérence des aciers pour armatures de béton armé. In *Essai par flexion: RILEM*.
- Robert, M., and B. Benmokrane. 2010a. "Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 14 (4):353-360. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000092.
- Robert, M., and B. Benmokrane. 2010b. "Physical, Mechanical, and Durability Characterization of Preloaded GFRP Reinforcing Bars." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 14 (4):368-375. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000104.
- Robert, M., P. Cousin, and B Benmokrane. 2008. "Influence de la température sur le comportement des composites de PRF pour le génie civil." *Anales du BTP* 6 (1):21-27.
- Robert, M., P. Cousin, and B. Benmokrane. 2009. "Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 13 (2):66-73. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(66).
- Robert, M., and A. Fam. 2012. "Long-Term Performance of GFRP Tubes Filled with Concrete and Subjected to Salt Solution." *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 16 (2):217-224. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000251.
- Robert, M., P. Wang, P. Cousin, and B. Benmokrane. 2010. "Temperature as an Accelerating Factor for Long-Term Durability Testing of FRPs: Should There Be Any Limitations?" *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* 14 (4):361-367. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000102.
- Robert, Mathieu, and Brahim Benmokrane. 2010c. "Effect of aging on bond of GFRP bars embedded in concrete." *Cement and Concrete Composites* 32 (6):461-467. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.02.010.
- Robert, Mathieu, and Brahim Benmokrane. 2012. "Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars." *Construction and Building Materials* 38:274-284. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.021.
- Saafi, Mohamed. 2002. "Effect of fire on FRP reinforced concrete members." *Composite Structures* 58 (1):11-20. doi: 10.1016/S0263-8223(02)00045-4.
- Seki, H, K Sekijima, and T Komoto. 1997. "Test Method on Creep of Continuous Fiber Reinforcing Materials." Proceedings of the third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Tokyo, Japan.
- Sennah, K., N. Nikravan, J. Louie, A. Hassan, N. Al-Bayati, M. El-Sayed, and M Sayed-Ahmed. 2011. "Bridge Deck-Gaurd rail Anchorage Detailling for Sustainable Construction." Proceedings of the Forth International Conference (CDCC-11), Québec, Canada.

- Shi, Jia-Wei, Hong Zhu, Gang Wu, and Zhi-Shen Wu. 2014. "Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freeze–thaw cycling environments." *Composites Part B: Engineering* 60:239-247. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.026>.
- Sorelli, L., D. T Pham, D Vallée, J Chen, and M Fafard. 2013. "Finite Element Based Characterization of the Creep Properties of the Cement Paste Phases by Coupling Nanoindentation Technique and SEM-EDS " Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9), Cambridge, Massachusetts, United States, September 22-25.
- Sorelli, Luca, Georgios Constantinides, Franz-Josef Ulm, and François Toutlemonde. 2008. "The nano-mechanical signature of Ultra High Performance Concrete by statistical nanoindentation techniques." *Cement and Concrete Research* 38 (12):1447-1456. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.09.002.
- Stifter, D., P. Burgholzer, O. Höglinger, E. Götzinger, and C. K. Hitzenberger. 2003. "Polarisation-sensitive optical coherence tomography for material characterisation and strain-field mapping." *Applied Physics A* 76 (6):947-951. doi: 10.1007/s00339-002-2065-5.
- Stifter, D., K. Wiesauer, M. Wurm, E. Schlotthauer, J. Kastner, M. Pircher, E. Götzinger, and C. K. Hitzenberger. 2008. "Investigation of polymer and polymer/fibre composite materials with optical coherence tomography." *Measurement Science and Technology* 19 (7):074011. doi: 10.1088/0957-0233/19/7/074011.
- Tchitembo Goma, F. A, A El Refai, and M Fafard. 2016. Performance des barres d'armature de type PRFV à long terme dans leur milieu naturel et proposition d'un plan de recherche pour caractériser la dégradation: Rapport d'étape 1 du projet de recherche R782.1. université Laval.
- Uomoto, T., H. Mutsuyoshi, F. Katsuki, and S. Misra. 2002. "Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete." *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING* 14 (3):191-209. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(191).
- Verdu, J. 2000. *Action de l'eau sur les plastiques*. Techniques de l'ingénieur ed.
- Wicaksono, Satrio, and Gin Boay Chai. 2013. "A review of advances in fatigue and life prediction of fiber-reinforced composites." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 227 (3):179-195. doi: 10.1177/1464420712458201.
- Wiesauer, K., A. D. Sanchis Dufau, E. Götzinger, M. Pircher, C. K. Hitzenberger, and D. Stifter. 2005. "Non-destructive quantification of internal stress in polymer materials by polarisation sensitive optical coherence tomography." *Acta Materialia* 53 (9):2785-2791. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2005.02.034>.
- Wiesauer, Karin, Michael Pircher, Erich Götzinger, Christoph K. Hitzenberger, Reinhold Oster, and David Stifter. 2007. "Investigation of glass–fibre reinforced polymers by polarisation-sensitive, ultra-high resolution optical coherence tomography: Internal structures, defects and stress." *Composites Science and Technology* 67 (15–16):3051-3058. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.04.018>.
- Won, Jong-Pil, Su-Jin Lee, Yoon-Jung Kim, Chang-Il Jang, and Sang-Woo Lee. 2008. "The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength–porosity

- relationship of GFRP rebar." *Composites Part B: Engineering* 39 (5):764-772. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.11.002>.
- Wu, H. C., G. Fu, Rf Gibson, A. Yan, K. Warnemuende, and V. Anumandla. 2006. "Durability of FRP composite bridge deck materials under freeze-thaw and low temperature conditions." *JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING* 11 (4):443-451. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:4(443).
- Yamaguchi, T, Y Kato, T Nishimura, and T Uomoto. 1997. "Creep Rupture of FRP rods Made of Aramid, Carbon and Glass fibers." Proceedings of the third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Tokyo, Japan.

## 6 Annexe

**Tableau 2** : Revue de la littérature dans les conditions d'immersion directe en solution aqueuse ou alcaline.

Référence	Type de barre	Conditionnement	Température (°C)	Période d'exposition (jours)	Perte de résistance (%)
(Benmokrane <i>et al.</i> 2002)	Verre- E/vinylester	Solution alcaline (pH = 12,8); charge soutenue à 30 %	22	140	17
(Rajan Sen and Tom 2002)	Verre- E/vinylester	Solution alcaline (pH = 13, 5), plus charge soutenue à 10 %	22	270	70
		Aucune charge	22	270	63
(Nkurunziza <i>et al.</i> 2003)	Verre- E/vinylester	Eau déminéralisée, plus charge soutenue de 30-40 %	55-75	60	4
		Solution alcaline (pH = 13,11), plus charge soutenue 30-40 %	55-75	60	11
(Gilbert Nkurunziza and Radhouane 2005)	Verre- E/vinylester	Eau déminéralisée, plus contrainte à 38 %	22	417	négligeables
		Solution alcaline (pH = 12,8), plus contrainte à 38 %	22	417	32
(Debaiky <i>et al.</i> 2006)	Verre- E/vinylester	Eau déminéralisée, plus contrainte à 29 %	73	120	15
		Solution alcaline (pH = 12,8), plus contrainte à 29 %	73	120	17
(Chen <i>et al.</i> 2006)	Verre- E/vinylester	Solution alcaline 1 (pH = 13,6)	60	240	80
		Solution alcaline 2 (pH = 12,8)	60	240	40
(Chen <i>et al.</i> 2007)	Verre- E/vinylester	Solution alcaline	60	60	37
(Al-Salloum <i>et al.</i> 2013)	Verre- E/vinylester	Eau du robinet	50	540	24,5
		Solution alcaline (pH=12,5-13)	50	540	24,04
(Benmokrane <i>et al.</i> 2015)	Verre- E/vinylester	Solution alcaline (pH=12,6-13,11)	60	208	7

**Tableau 3** : Revue de la littérature dans les conditions d'immersion indirecte en solution aqueuse ou alcaline.

Référence	Type de barre	Conditionnement	Température (°C)	Période d'exposition (jours)	Perte de résistance (%)
(Benmokrane <i>et al.</i> 2002)	Verre- E/vinylester	Béton armé dans l'eau du robinet, plus charge soutenue de 25 et 30 %	23	140	Existence d'un seuil de chargement entre 25 et 30 % ne causant aucune dégradation
(Almusallam and Al-Salloum 2006)	Verre- E/vinylester	Béton armé dans l'eau du robinet, sans charge	40	480	16,3
		Béton dans l'eau du robinet, plus charge 25-30 %	40	480	47,1
		Béton dans l'eau marine, sans charge	40	480	19,7
		Béton dans l'eau marine, plus charge 25-30 %	40	480	47,9
(Chen <i>et al.</i> 2007)	Verre- E/vinylester	Solution alcaline	60	60	37
		Béton armé dans la solution alcaline	60	90	27
(Robert <i>et al.</i> 2009)	Verre- E/vinylester	Béton dans l'eau du robinet	50	240	16
(Robert and Benmokrane 2010b)	Verre- E/vinylester	Armatures pré-chargées, puis scellées dans le béton pour être vieillis dans l'eau du robinet	50	240	5
(Almusallam <i>et al.</i> 2013)	Verre- E/vinylester	Eau du robinet	50	540	23,5
		Eau marine	50	540	21,7
(El-Maaddawy <i>et al.</i> 2015)	Verre- E/vinylester : type I Verre- E/vinylester : type II	Béton dans l'eau du robinet	60	450	15
		Béton dans l'eau du robinet	60	450	50

**Tableau 4** : Sélection de la revue de la littérature dans les conditions réelles en service.

Ouvrages	Type de structure	Durée (ans) /Année de l'expertise	Type de barre	Conditions environnementales	Observations après analyses physico-chimiques/ essais de chargement à court terme
Hall's Harbor, Nouvelle Ecosse	Quai marin	5/2004 et 9/2009	PRFV- Matrice vinylester ISOROD	Température entre : -35 et 35 °C, cycles de gel-dégel, mouillage-séchage, de l'humidité chargée de chlorure et de l'eau salée	Pas de dégradation
Pont Joffre, Québec	Trottoir et Parapet	7/2004 et 12/2009	PRFV- Matrice vinylester C-Bar	Température entre : -35 et 35 °C, cycles de gel-dégel, mouillage-séchage, sels de déglacage	Pas de dégradation
Pont Chatham, Ontario	Parapet	8/2004	PRFV- Matrice vinylester NEFMAC	Température entre : -24 et 30 °C, cycles de gel-dégel, mouillage-séchage, sels de déglacage	Pas de dégradation
Pont Crowchild Trail, Alberta	Parapet et Tablier	8/2004 et 13/2009	PRFV- Matrice vinylester C-Bar	Température entre : -15 et 23 °C, cycles de gel-dégel, sels de déglacage	Pas de dégradation
Pont Waterloo Creek, Colombie Britannique	Parapet	6/2004	PRFV NEFMAC	Température entre : 0 et 23 °C, cycles de mouillage-séchage	Pas de dégradation
Pont auto route 668 traversant le Ruisseau Gills, Virginie, USA	Tablier	1/2003	PRFV- Matrice vinylester	Non déterminée	Excellent comportement mécanique
Pont Miles Road, Ohio, USA	Remplacement d'un tablier	2005	PRFV- Matrice vinylester	En moyenne 53 cycles de gel-dégel par an, sels de déglacage	Excellent comportement mécanique

(Suite tableau 4)

Ouvrages	Type de structure	Durée (ans) /Année de l'expertise	Type de barre	Conditions environnementales	Observations après analyses physico-chimiques/ essais de chargement à court terme
Pont auto route B3, Friedberg, Allemagne	Tablier	5/2013	PRFV- Matrice <u>polyester</u>	Non déterminées	Excellent comportement mécanique
Pont Médéric-Martin P-15641, Québec	Glissière	23/2015	PRFV- Matrice <u>polyester</u>	Température entre : -35 et 35 °C, cycles de gel-dégel, mouillage-séchage, sels de déglacage	Importantes dégradations
Différents ponts dans le Kentucky, USA	Construction, remplacement et rénovations des tabliers	2014	PRFs	Non déterminées	Pas d'observations physico-chimiques, ni d'essais mécaniques de service. Seul un monitoring qui a permis de conclure que ces barres représentées d'excellentes candidates pour remplacer l'acier
Pont P-11591 Autoroute 20 Est à Val-Alain, Québec	Glissière	11/2016	PRFV- Matrice vinylester	Température entre : -35 et 35 °C, cycles de gel-dégel, mouillage-séchage, sels de déglacage	Aucune dégradation

**Tableau 5** : Sélection des différents projets des ponts en PRFs dans le monde (Murphy 2013).

Nom du Pont	Ville	Pays/État	Année de construction	Utilisation des PRFs	Information de base et références
Miyun Bridge	Beijing	China	1982	Tout	Length: 20,7 m. Width: 9,8 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Chenjiawan Bridge	Chongqing	China	1988	Tout	Length: 60,0 m. Width: 4,0 m. Manufactured by Chongqing GlassFiber
Luzhou Bridge	Luzhou	China	1988	Tout	Manufactured by Chongqing Glass Fiber Product Factory.
Aberfeldy Golf Course Bridge	Aberfeldy	UK	1990	Tout	Length: 112,8 m. Width 2,1 m. Manufactured by GEC Plastics / Linear Composites. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002215">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002215</a> <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1003">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1003</a> <a href="http://www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2009/Papers/SKINNER.pdf">www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2009/Papers/SKINNER.pdf</a> <a href="http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp25.pdf">www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp25.pdf</a>
Bonds Mill Lift Bridge Stroud	Gloustershire	UK	1994	Tout	Length: 8,2 m. Width 4,3 m. Manufactured by GEC Reinforced Plastics. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1004">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1004</a>
Fidgett Footbridge	Chalgrove	UK	1995	Tout	<a href="http://www-civ.eng.cam.ac.uk/isegroup/fidgett.htm">www-civ.eng.cam.ac.uk/isegroup/fidgett.htm</a>
PWRI Demonstration Bridge	Tsukuba	Japan	1996	Tout	Length: 20,1 m. Width: 2,1 m. Manufactured by Tokyo Rope Mfg. Ltd. and Mitsubishi Chemical
Clear Creek Bridge	Bath	USA, Kentucky	1996	Tout	Length: 18,3 m. Width 1,8 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Fiberline Bridge	Kolding	Denmark	1997	Tout	Length: 39,9 m. Width: 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. Literature: Braestrup, Mikael W. Cable-stayed GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) footbridge across railway line, presented at IABSE Conference, Malmö 1999 - Cable-stayed bridges. Past, present and future Braestrup, Mikael W. Footbridge Constructed from Glass-Fibre-Reinforced Profiles, Denmark, in "Structural Engineering International", November 1999, n. 4 v. 9 <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1004">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1004</a> <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?ID=s00">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?ID=s00</a>
Pontresina Bridge	Pontresina	Switzerland	1997	Tout	Length: 25,0 m. Width 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0005206">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0005206</a> <a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-storiesfootbridge/">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-storiesfootbridge/</a>

(Suite tableau 5)

Nom du Pont	Ville	Pays/État	Année de construction		
INEEL Bridge	Idaho Falla	USA, Idaho	1997	Tout	Length: 9,1 m. Width: 5,5 m. Information de base et références m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Medway Bridge	Meway	USA, Maine	1997	Tout	Utilisation des PRFs
West Seboeis Bridge	West Seboeis	USA, Maine	1997	Tout	Length: 13,4 m. Width: 4,9 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Smith Creek Bridge	Hamilton/Butler	USA, Ohio	1997	Tout	Length: 10,1 m. Width: 7,3 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Las Rusias Military		USA, Texas	1997	Tout	Length: 13,7 m. Width 1,2 m. Manufactured by Hughes Bros., Inc.
Falls Creek Trail Bridge	Gifford Pinchot	USA, Washington	1997	Tout	Length: 13,7 m. Width 0,9 m. Manufactured by Creative Pultrusion, Inc. And E.T. Techtonics. <a href="http://www.ettechtonics.com/pedestrian_and_trail_bridges/project_g">www.ettechtonics.com/pedestrian_and_trail_bridges/project_g</a>
Seebrucke	Bitterfeld	Germany	2000	Tout	<a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0001336">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0001336</a>
Noordland Pedestrian Bridge	Noordland Inner Harbor	The Netherlands	2000	Tout	Length: 26,8 m. Width 1,5 m. Manufactured by FiberlineComposites .
EastDixfield Bridge	East Dixfield	USA, Maine	2000	Tout	Length: 13,7 m. Width: 9,1 m. Manufactured by University of Maine.
Five Mile Road Bridge # 0171	Hamilton	USA, Ohio	2000	Tout	Length: 13,4 m. Width: 8,5 m. Manufactured by Hardcore
Lleida Footbridge	Leida	Spain	2001	Tout	Length: 38,1 m. Width 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0008679">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0008679</a> <a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-storiesfootbridge/international-award-innovat">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-storiesfootbridge/international-award-innovat</a> Sobrino, J. A., Pulido, M.D.G.: Towards Advanced Composite Material Footbridges, Structural Engineering International IABSE 12(2) 2002:
West Mill Bridge over River Cole	Shrivenham, Oxfordshire	UK	2002	Tout	Length: 10,0 m. Width: 6,8 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/westmill-brid/west-mill-bridge-england">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/westmill-brid/west-mill-bridge-england</a> <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?Docume">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?Docume</a>
Fredrikstad Bridge	Fredrikstad	UK	2002	Tout	Length: 60,0 m. Width 3,0 m. Manufactured by Marine Composites. <a href="http://www.fireco.no/references/Gangbru">www.fireco.no/references/Gangbru</a>

(Suite tableau 5)

Nom du Pont	Ville	Pays/État	Année de construction	Utilisation des PRFs	Information de base et références
Den Dungen Bridge	Den Dungen	The Netherlands	203	Tout	Length: 10,0 m. Width: 3,7 m.
Emory Brook Bridge	Fairfield	USA, Maine	2003	Tout	Length: 21,9 m. Width: 10,7 m. Manufactured by Gordon Composites
Wood Road Bridge over Cohocton	Campbell	USA, New York	2003	Tout	Length: 63,1 m. Width: 5,5 m.
Composite bridge for China	Shangai	China	2009	Tout	Length: 11,5 m, width: 2 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Composite cycle bridge Hague	Spoorlaan, The Hague	Netherlands	2009	Tout	Length: 2x 13,25 m, width 5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Bridge Potgieterstraat	Rotterdam	Netherlands	2010	Tout	Length: 18 m, width: 2,25 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Bride Ghent	Ghent, old Fishmarket	Belgium	2010	Tout	Length: 17,5 m, width: 2,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Bicycle Bridges (2)	Nagele	Netherlands	2011	Tout	Length: 20 m, width: 1,5 & 2,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
11-006 bridges (2) Borne	Bongerdsweg	Netherlands	2012	Tout	Length: 15 m, width: 4 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a>
Infracore bridge	Tholen	Netherlands	2013	Tout	<a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian current

(Suite tableau 5)

Nom du Pont	Ville	Pays/État	Année de construction	Utilisation des PRFs	Information de base et références
Guanyinquiao Bridge	Chongqing	China	1988	Tablier	Length: 157,0 m. Width: 4,6 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
A19 Tees Viaduct	Middlesborough	UK	1988	Tablier	Manufactured by Maunsell Structural Plastics.
Panzhuhua Bridge	Panzhuhua	China	1992	Tablier	Length: 24,1 m. Width: 3,0 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Chuanmian Bridge	Chengdu	China	1993	Tabier	Length: 10,7 m. Width: 5,2 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Parson's Bridge	Dyfed	UK	1995	Tablier	Length: 17,7 m. Width 3,0 m. Manufactured by Strongwell Inc. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1007">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1007</a>
LaSalle Street Pedestrian Walkway	Chicago	USA, Illinois	1995	Tablier	Length: 67,1 m. Width 3,7 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Second Severn Bridge	Bristol	UK	1996	Tablier	Length: 29,4 m. Width 9,1 m. Manufactured by GEC Reinforced Plastics. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1008">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1008</a>
Magazine Ditch Bridge (Del Memorial Bridge)	New Castle	USA, Delaware	1997	Tablier	Length: 21,3 m. Width: 6,1 m. Manufactured by Hardware Composites.
Expo Bridge	Lisbon	Portugal	1998	Tablier	Length: 30,0 m. <a href="http://www.gurit.com/expo-bridge-1998.aspx">www.gurit.com/expo-bridge-1998.aspx</a>
Rowser Farm Bridge	Bedford	USA, Pennsylvania	1998	Tablier	Length: 4,9 m. Width: 3,7 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc.
Mill Creek Bridge	Wilmington	USA, Delaware	1999	Tablier	Length: 11,9 m. Width: 5,2 m. Manufactured by Hardware Composites
Sedlitz & Senftenberg Bridge	Sedlitz & Senftenber	Allemagne	2000	Tablier	Length: 20,1 m. Width: 2,4 m. Manufactured by Creative Pultrusions, Inc.
Milbridge Municipal pier	Milbridge	USA, Maine	2000	Tablier	Length: 53,3 m. Width: 4,9 m. Manufactured by University of Maine
Buehl-Balzhofen Bridge		Allemagne	2001	Tablier	Length: 11,9 m. Manufactured by Creative Pultrusions, Inc.
A30 Halgavor Bridge	Halgavor	UK	2001	Tablier	Length: 47,2 m. Width 3,7 m. Manufactured by VosperThornycroft <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1007">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1007</a>
Katy Truss Bridge	Marion	USA, West Virginia	2001	Tablier	Length 27,4 m. Width 4,3 m. Aluri S., Jinka C., GangaRao H. V. S. Dynamic Response of Three Fiber Reinforced Polymer Composite Bridges, Journal of Bridge Engineering,

(Suite tableau 5)

Nom du pont	Ville	Pays/État	Année de construction	Utilisation des PRFs	Information de base et références
No Towoomba Bridge m du Pont	Towoomba	Australie	2002	Tablier	Length: 10,0 m. Width: 5,5 m. Manufactured by Univ. Southern Queensland.
Klipphausen Bridge	Klipphausen	Allemagne	2002	Tablier	<a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-road-bridges/case-stories-roadbridges/germany's-first-germany's-first-road-bridge">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-road-bridges/case-stories-roadbridges/germany's-first-germany's-first-road-bridge</a>
Benten Bridge	Fukushima	Japan	2002	Tablier	Length: 60,0 m. Width: 3,0 m. Manufactured by NEFMAC.
O'Fallon Park Bridge	Denver	USA, Colorado	2002	Tablier	Length: 30,5 m. Width 6,7 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Schwerin-Neumühle Bridge	Schwerin	Allemagne	2003	Tablier	Length: 45,0 m. Width: 2,5 m. Manufactured by Creative Pultrusions, Inc.
Ribble Way Footbridge	Lancashire	UK	2003	Tablier	Length: 131,1 m. Width 3,0 m. Manufactured by Vosper Thorneycroft
Schuyler Heim Lift Bridge	Long Beach	USA, California	2003	Tablier	Length: 10,7 m. Width: 11,0 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Pedestrian passage on the 23rd kilometre of the Highway "Leningradskoe"	Moscow	Russia	2005	Tablier	Length: 56,8 m. Width: 3,9 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lenroad_eng.html">www.apatech.ru/lenroad_eng.html</a>
Garstang Mount Pleasant M6 Bridge	Lancashire	UK	2006	Tablier	<a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/newgrp-bridge/new-grp-bridge-across-uk-mo">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decksbridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/newgrp-bridge/new-grp-bridge-across-uk-mo</a> <a href="http://www.infrasite.net/news/news_article.php?ID_nieuwsberichten=4403">www.infrasite.net/news/news_article.php?ID_nieuwsberichten=4403</a>
Pedestrian bridge over the platform "Depot"	Moscow	Russia	2007	Tablier	Length: 279,0 m (13 spans). Width: 3,0 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/depo_eng.html">www.apatech.ru/depo_eng.html</a>
Bradford Bridge	Bradford	USA, Vermont	2007	Tablier	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins tal.html">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins tal.html</a>
Footbridge over road	Gadki	Poland	2008	Tablier	Manufactured by Fiberline Composites.
Belle Glade Bridge	Belle Glade	USA, Florida	2009	Tablier	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins</a>

(Suite tableau 5)

Nom du Pont	Ville	Pays/État	Année de construction	Utilisation des PRFs	Information de base et références
Lafayette Bridge	Lafayette, Tippecano	USA, Indian	2009	Tablier	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins</a>
Lunetten Footbridge	Utrecht	The Netherlands	2010	Tablier	Length: 12,0 m. Width: 5,0 m. <a href="http://www.netcomposites.com/newspic.as">www.netcomposites.com/newspic.as</a>
Redstone Arsenal Bridge	Redstone Arsenal	USA, Alabama	2011	Tablier	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.compositesworld.com/articles/new-bridge-deckbests-early-frp-systems">http://www.compositesworld.com/articles/new-bridge-deckbests-early-frp-systems</a>
Lleida Footbridge (2)	Lleida	Spain	2011	Tablier	<a href="http://www.tech.plym.ac.uk/sme/composites/bridges.htm#lleida2">www.tech.plym.ac.uk/sme/composites/bridges.htm#lleida2</a>
Fort Amherst Footbridge	Fort Amherst	UK	2011	Tablier	Length: 25,0 m. Width: 2,0 m. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0059485">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0059485</a>
A27 Lunetten Viaduct	Lunetten	The Netherlands	2012	Tablier	Length: 25,0 m. Width: 2,0 m. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0059485">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0059485</a>