

STUDY OF THE PERFORMANCE OF FRP REINFORCING BARS SUBJECTED TO EXTREME CONDITIONS OF APPLICATION

PERFORMANCE DES ARMATURES COMPOSITES DE PRF SOUMISES À DES ENVIRONNEMENTS D'APPLICATION EXTRÊMES

Mathieu ROBERT¹, Patrice COUSIN², Brahim BENMOKRANE³

¹Post-Doctoral Fellow, Department of Civil Engineering., University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, J1K 2R1, Phone: (819) 821-8000 ext. 62967, Fax: (819) 821-7974, E-mail: Mathieu.Robert2@USherbrooke.ca

²Research Associate, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada J1K 2R1, Phone: (819) 821-8000 ext. 62967, Fax: (819) 821-7974, E-mail: Patrice.Cousin@USherbrooke.ca

³NSERC Research Chair Professor in Innovative FRP Composite Materials for Infrastructures, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, J1K 2R1, Phone: (819) 821-7758, Fax: (819) 821-7974, E-mail: Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca

1. INTRODUCTION

Many steel reinforced concrete infrastructures exposed to harsh environments present durability issues and are likely not to reach the lifetime expected or have already attained the service limit. Steel corrosion induced by chlorides and/or carbonation are the main causes of deterioration of steel reinforced concrete structures. The amplitude of the

phenomenon and economic factors have pushed research engineers, industries and public institutions to develop new technologies to better protect reinforcing steel or providing non corrosive materials in replacement of steel [1]. In anticipation of offering an alternative material, research works have been conducted to develop and use fibre reinforced polymer (FRP) composites in civil engineering applications.

A composite material may be defined as a material constituted of at least two dissimilar materials providing complementary properties, which offers a better general performance than each of its components [2]. FRP composite materials are composed of reinforcing fibres embedded and protected by a polymeric resin matrix. The main fibres used for civil engineering applications are glass, carbon and aramid fibres. Glass fibre being the main fibre used because of its good properties, high strength/cost ratio, good usability and excellent availability. Mechanical properties of glass fibre reinforced polymer reinforcements depend on the characteristics, orientation and shape of fibre, fibre/matrix volumetric ratio, the bonding at the interface between fibres and matrix and on the manufacturing processing. The function of the resin matrix is to keep the fibres in place, transfer and distribute stresses through fibres, bring a lateral support against buckling under compression and protect fibres from abrasion and surrounding environment. Because of their high chemical resistance, vinylester-based resin is generally used for civil engineering applications [3]. This article deals with the FRP reinforcing bars for concrete structures (figure 1). Several concrete structures using FRP as structural internal reinforcement have been built in North America and worldwide. Also, several design codes and guides dealing with composite material as reinforcement for concrete structures have been developed [4-7]. Also, codes and guides on specification, construction, and certification of FRP reinforcing bars for concrete structures has been issued [8-10].

De nos jours, bon nombre de structures en béton armé ayant été exposées à des environnements agressifs éprouvent des problèmes de durabilité et risquent de ne pas atteindre leur durée de vie utile anticipée ou excèdent déjà cette dernière. La corrosion de l'acier d'armature due aux chlorures et/ou à la carbonatation est la principale cause de détérioration des structures en béton armé. L'ampleur du phénomène et les considérations économiques ont initié le développement de nouvelles technologies permettant de protéger l'armature d'acier contre la corrosion ou de simplement la remplacer par des matériaux moins sensibles à la corrosion [1]. C'est dans cette optique que des recherches ont été orientées vers le développement et l'utilisation des polymères renforcés de fibres (PRF) pour leur utilisation en génie civil.

Par définition, un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux de nature différente mais complémentaire, créant ainsi un matériau dont les performances générales sont supérieures à celles de chacun de ces composants pris séparément [2]. Les matériaux composites de PRF sont constitués d'un renfort (fibres) protégé et supporté par une résine polymère appelée matrice. Les principales fibres ayant fait l'objet d'études pour leur utilisation en génie civil au cours des dernières années sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. La fibre de verre domine dans la majorité des applications. Sa vaste gamme de propriétés, son rapport résistance/coût élevé, sa disponibilité et sa facilité de mise en œuvre en font la plus importante fibre au niveau industriel. Les propriétés mécaniques des armatures de polymères renforcés

de fibres de verre (PRFV) dépendent principalement des caractéristiques des fibres, de leur orientation, de leur forme, de leur rapport volumétrique par rapport à la matrice, de la qualité de l'interface entre les fibres et la résine ainsi que du procédé de fabrication. Le rôle de la matrice est de maintenir les fibres en place, de transmettre et de distribuer les sollicitations mécaniques extérieures au renfort, de fournir un support latéral agissant contre le voilement des fibres sous compression et de les protéger contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales. Les résines de type vinylester sont habituellement utilisées pour les applications du génie civil vu leur bonne résistance chimique [3]. Les applications des composites de PRF en génie civil portent essentiellement sur les armatures de renforcement interne du béton dont il sera question dans le présent article (figure 1). Plusieurs ouvrages utilisant des composites de PRF comme renforcement interne du béton ont déjà été construits en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde, et plusieurs codes et guides de calcul traitant de l'armature en matériaux composites pour les structures de béton ont été développés [4-7]. Aussi, des codes et guides de spécifications des propriétés pour l'homologation des produits de composites de PRF pour leur utilisation en génie civil ont été développés [8-10].



Figure 1: GFRP reinforcing bars

One of the biggest challenges for the acceptance of FRP in civil engineering applications concerns their durability and more specifically their capacity to maintain their structural performance in severe and changing environmental conditions of service [11]. The durability of FRP reinforcing rods is related to the three different phases of the material: fibre, resin and interface (figure 2), which may be affected by deteriorations and degradations caused by exposure to various environments and could potentially lead to a reduction of long term durability and performance.

Face au développement sans précédent de nouveaux produits performants, l'industrie de la construction a dû modifier son approche conservatrice, ce qui a permis aux nouvelles technologies liées à l'utilisation des composites de PRF de susciter une attention toute particulière de la part des ingénieurs de réalisation de travaux publics et des gestionnaires de systèmes d'infrastructure. La résistance à l'application à grande échelle des matériaux composites de PRF est fondée en partie sur le manque d'informations sur le comportement à long terme de ces matériaux dans les conditions de service les plus critiques. Un des grands défis actuels à relever quant à l'acceptation des composites de PRF en génie civil concerne la durabilité de ces matériaux et plus spécifiquement leur capacité à maintenir

leur performance structurale dans des conditions environnementales sévères et changeantes [11]. La durabilité des barres d'armature en PRF est en fait liée aux trois composantes fondamentales de tout matériau composite, soit les fibres, la résine, et l'interface entre les fibres et la résine (figure 2). En effet, ces trois composantes peuvent montrer des lacunes ou des traces de dégradation suite à l'exposition à divers environnements pouvant mener à une perte de durabilité et de performances à long terme.

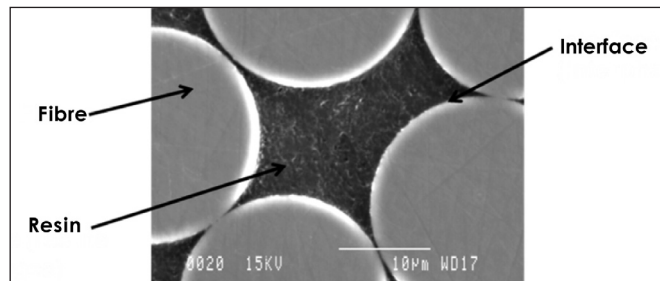


Figure 2: Typical microstructure of GFRP bar

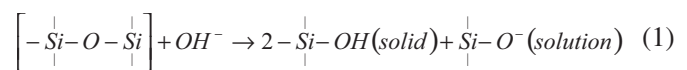
The polymeric component of FRP materials protects fibres against the chemical attack of corrosive ions, especially hydroxyl ions, present in the pore water of the surrounding concrete. The degradation process of GFRP reinforcing bars may be caused by the deterioration of one (or more) of its phase: fibre, resin matrix or interface. The degradation mechanisms are more complex compared to those occurring in a monophasic material, such as steel.

Mechanical properties of GFRP bars are controlled by the fibre component [12]. Once the fibres are not deteriorated, the material will keep most of its mechanical strength and will be able to support the loads. If the protective resin degrades, the fibres located in the outer part of the bar will rupture and the bar resistance will start to decrease. According to Uomoto's work [13], the interface between the glass fibre and resin controls the chemical resistance of GFRP against alkaline corrosion. The increase of the bonding degree at the interface may highly improve the chemical resistance of these materials. Many studies dealing with the resistance of GFRP to alkalis have shown that the alkaline environment of concrete is among the most critical environments for glass fibre [14]. Actually, the main issue is the potential degradation caused by the concrete pore solution, the pH of which may reach 13.5. In alkaline environments, glass fibre may degrade according to several mechanisms, such as corrosion, hydrolysis and leaching. Several studies on the corrosion mechanisms of GFRP reinforcing bars and environmental effects have been published [15-20]. Yilmaz and Glasser [15] describe fibre glass attack by the dissolution of silica (SiO_2) by alkaline ionic species (hydroxyl groups) according to equation (1). In this equation, the first by-product, SiOH , forms a gel on the glass fibre surface, whereas the second one, SiO^- , is dissolved.

Au niveau de la résistance chimique des matériaux composites de PRF, la résine protège les fibres contre l'attaque des ions nocifs provenant de l'environnement et spécialement les ions OH^- de la solution interstitielle du béton. Le

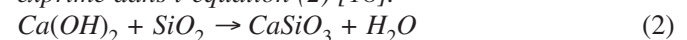
processus de dégradation des PRFs est une conséquence de la dégradation de un ou de plusieurs de ses constituants ainsi que de l'interface entre ceux-ci. Une détérioration des fibres, de la résine et de l'interphase entre fibres et résine gouvernent la durabilité des armatures de PRFV compliquant le mécanisme de dégradation des armatures de PRF comparativement à celui de l'acier d'armature.

Comme les propriétés mécaniques des barres de PRFV sont contrôlées par les fibres [12], si celles-ci ne sont pas détériorées, les armatures de PRFV peuvent dans la plupart des cas supporter la charge mécanique. Si la résine protégeant les fibres est attaquée et dégradée, les fibres se brisent de la surface vers le centre de la barre réduisant la résistance. Selon Uomoto [13], l'interface entre les fibres de verre et la résine contrôle la résistance des barres de PRFV contre les alcalis et son amélioration est efficace pour augmenter la résistance aux alcalis des armatures de PRFV jusqu'à un degré élevé. Beaucoup d'études réalisées sur la résistance des barres de PRFV aux alcalis [14] ont montré que le milieu alcalin du béton constitue l'un des environnements les plus critiques pour les fibres de verre. A l'heure actuelle, le principal souci est la dégradation potentielle causée par la solution interstitielle du béton dans laquelle le pH peut atteindre 13,5. Dans un environnement alcalin, les filaments de fibres de verre sont susceptibles de se dégrader suite à une combinaison de mécanismes allant de la corrosion, à l'hydrolyse et à la lixiviation. Plusieurs études ont été publiées sur les mécanismes de dégradation des armatures de PRFV et sur les effets environnementaux [15-20]. Yilmaz et Glasser [15] expliquent l'attaque des fibres de verre par le processus de dissolution de la silice (SiO_2) par des ions alcalins (ions hydroxydes) selon l'équation (1). Dans l'équation (1), le sous-produit SiOH forme un gel sur la surface des fibres de verre tandis que le deuxième sous-produit SiO^- se retrouve en solution.



This dissolution can cause a weight loss and a diameter decrease of the glass fibre, reducing the mechanical properties of the bar. Another mechanism of degradation, resulting from the reaction of silica with the alkaline environment, is the formation of calcium silicate expressed in the equation (2) [18].

Cette dissolution cause la perte de poids et de diamètre de la fibre entraînant par le fait même une perte de la résistance et du module élastique. Un autre mécanisme de dégradation résultant de la réaction de la silice avec le milieu alcalin est la formation de silicate de calcium exprimé dans l'équation (2) [18].



Different studies have shown that alkaline environments are more critical than water at the beginning of the degradation but become almost similar later [21]. The mecha-

nisms of fibre degradation by water were discussed by Mercier and Maréchal [22]. They have reported that immersion of glass fibres in water can lead to their dissolution through the diffusion of hydroxide ions outside the glass fibres, called *lixiviation*. This *lixiviation* is exacerbated by the amount of alkalis present inside the glass fibres and the temperature of the wet environment. After *lixiviation*, the formation of large amounts of hydroxides leads to an increase of the pH of the solution. Then, these hydroxide ions attack the fibre surface, leading to the formation of cracks and micro cracks, which decrease the resistance and can result in a premature fracture of glass fibres [23-24].

The diffusion of moisture and alkalis from the concrete into the polymer matrix can lead to changes in the mechanical, thermo mechanical and physico-chemical properties of GFRP reinforcing bars. The main effect of the absorption is the possible degradation of the polymer resin through hydrolysis or plasticizing effects. The chemical resistance of thermoset resins is largely governed by the chemical nature of the polymer chain. Weak adhesion of the polyester resin can result in serious deterioration when hydroxyl ions penetrate into the structure. The matrix could be damaged through cracking and micro cracking due to volume expansion during moisture absorption, whereas its stiffness could be reduced by plasticization. A subsequent mechanism of degradation by breaking of polymer chains triggered by hydrolysis and leaching out of low molecular weight material from the bulk resin could further damage the matrix. Meanwhile, the matrix formed by vinylester, which contains much less ester units as compared to polyester, is also hardly deteriorated by hydroxyl ions compared to a polyester matrix [19, 24, 25].

The interface (or interphase) is a heterogeneous region of some micrometers in thickness between the matrix and fibres. This interface plays a critical role as it insures the load transfer between the fibres and matrix [24, 26]. The application of a coupling agent (silane) at the surface of the fibres improves the bonding at the interface and protects the fibre surface against environmental attacks. However, this chemical bond is not stable in presence of humidity and alkalis and it is particularly subjected to long-term degradation [24, 26]. When moisture and alkali ions diffuse through the composite, this bonding is gradually reduced, leading to the deterioration of the interface. The resistance of this interface is directly related to the amount of coupling agent which cannot be extracted from the fibre surface.

A high level of sustained load combined with chemical attacks, increases the degradation of the interface. Different types of damage may be observed: (1) osmotic cracking of the matrix, (2) differential swelling and (3) delamination of the fibres.

The extensive research performed on FRP reinforcements led to the publication of codes and design guides on the use of the FRP reinforcing bars and prestressing tendons as reinforcement for new or existing concrete structures. Design codes and guides in North-America and Japan [4-7] provide strength reduction factors or material factors to account for the effects of environmental conditions, creep

under sustained loads, and fatigue under repeated loads. The use of an environmental reduction factor (C_E) was a simple solution to overcome the difficulties caused by the absence of data on the long-term durability of FRP's. Several codes require an environmental reduction coefficient of approximately 0.7. This factor mitigates the use of new generation of FRP products, which are less vulnerable to environmental attacks than the previous products. These environmental reduction coefficients are considered to be very conservative and are being criticized by many experts and engineers, because they are based on the behaviour of the early generations of FRP products that were of lower quality and on limited long-term behaviour data.

This paper presents an overview of several aspects affecting the long-term durability of GFRP reinforcing bars subjected to laboratory accelerated aging simulating the genuine environment of application. The durability of GFRP bars submitted to various environmental conditions such as wet concrete, extreme temperatures and micro cracks-inducing pre-loading will be evaluated through the residual mechanical properties.

La plupart des études ont montré que l'environnement alcalin est plus critique que l'eau au début de la dégradation mais qu'après un certain temps leurs effets sont presque similaires [21]. Les mécanismes de dégradation des fibres par l'eau ont été discutés par Mercier et Maréchal [22], rapportant des phénomènes de dissolution des fibres dans l'eau et la diffusion des ions hydroxyde hors de la structure de verre, appelé lixiviation. Celle-ci est accentuée par la quantité d'alcalis présente dans la structure de verre et la température de l'environnement humide. Suite à la lixiviation il y a une formation d'excès d'hydroxydes ce qui augmente par conséquent le pH de la solution. Ces ions attaquent ensuite la surface des fibres générant ainsi des fissures qui dégradent la résistance et peut résulter en une fracture prématurée ou une rupture des fibres de verre [23-24].

L'humidité et les alcalis du béton diffusent à l'intérieur des polymères organiques à différents degrés amenant des changements dans les caractéristiques mécaniques, thermomécaniques et physico-chimiques de ces derniers. Le principal effet de l'absorption se manifeste sur la résine elle-même à travers l'hydrolyse ou la plastification. La durabilité chimique des résines thermodurcissables est gouvernée en grande partie par la nature chimique de la chaîne de polymère. La structure des résines polyester et vinylester consiste en de longues chaînes moléculaires formées par la polymérisation de composés organiques non saturés. Celles-ci sont elles-mêmes réticulées pour former un réseau dense et rigide. La grande résistance chimique des résines vinylester préserve leur résistance et assure leur durabilité. Cette performance chimique de la résine vinylester dans un environnement alcalin a été confirmée par plusieurs études [19, 24, 25].

L'interface est une région hétérogène entre la matrice et les fibres et elle mesure quelques micromètres d'épaisseur. Cette interface joue un rôle critique dans une armature de composite dans le transfert de charge entre fibres et la matrice [24, 26]. L'usage d'un agent de couplage (silane)

sur la surface des fibres de verre améliore la résistance de l'interface fibre/matrice et protège la surface des fibres contre les attaques environnementales. Cependant la liaison chimique entre l'agent de couplage silane et la surface des fibres de verre n'est pas stable face à l'humidité et aux alcalis et est particulièrement susceptible à une dégradation à long terme [24, 26]. Lorsque l'humidité et les alcalis diffusent dans le composite, cette liaison est détruite progressivement et cause des dommages à l'interface. La résistance de l'interface du composite est directement liée à la quantité d'agent de couplage ne pouvant pas être extraite de la surface des fibres.

Combinée à l'attaque chimique, un chargement mécanique soutenu élevé accentue la dégradation de l'interface fibres/matrice. Différents dommages peuvent être subis par la région de l'interface : (1) fissuration osmotique de la matrice, (2) gonflement différentiel de l'interface et (3) décollement.

Les progrès réalisés par les différentes recherches ont permis d'élaborer des codes et manuels de calcul sur l'utilisation des produits de PRF dans le renforcement et la réhabilitation des structures de génie civil (nouvelles structures et structures existantes). Les codes et guides de calcul nord-américains et japonais [4-7] fournissent des facteurs de réduction de résistance en tenant compte des efforts soutenus, de la fatigue et des conditions environnementales. Les guides canadiens semblent être moins conservateurs quant aux valeurs de contraintes admissibles prises en compte dans le calcul mais elles restreignent l'utilisation de certains types de PRF dans certaines conditions [27]. Le développement d'un coefficient de réduction environnementale (C_E) permettait de surmonter rapidement les difficultés causées par l'absence de données sur la durabilité à long terme des PRF et de permettre aux ingénieurs de calcul d'utiliser plus rapidement ce nouveau matériau. Plusieurs codes et guides de conception utilisent couramment des coefficients de réduction environnementale conservateurs d'environ 0,7. Cette réduction majeure ne permet pas aux nouvelles générations de barres de PRFV de bénéficier pleinement de la grande résistance qu'elles possèdent. Ces coefficients de réduction environnementale conservateurs sont remis en question par plusieurs chercheurs et ingénieurs. En effet les valeurs de ces coefficients sont basées sur des matériaux de première génération de moindre qualité et sur un nombre limité de données sur le comportement à long terme des barres de PRFV recueillis par la réalisation de vieillissements accélérés en laboratoire ne reflétant pas toujours adéquatement les conditions réelles d'application.

Dans cet article synthèse, un survol de plusieurs aspects de la durabilité à long terme de composites de PRFV soumis à des vieillissements accélérés en laboratoire simulant l'environnement d'application sera effectué. Il sera question d'évaluer la durabilité des barres de PRFV en termes de réduction des propriétés mécaniques lorsque soumises à différentes conditions environnementales telles que le béton humide, les températures extrêmes d'application et suite à des pré-chargeurs initiant la création de fissuration dans la microstructure des barres.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1. Material

Experimental results presented in this paper were obtained during research work conducted in the laboratory of durability of FRP composite materials of the department of civil engineering of the University of Sherbrooke, Sherbrooke, Canada. Sand-coated glass FRP reinforcing bars manufactured by a Canadian company (Pultrall inc., Thetford Mines, Quebec, Canada) are used in this study (Figure 1). The bars are made of continuous E-glass fibres embedded in vinylester matrix using a pultrusion process. The GFRP bars used have a nominal diameter of 12 mm.

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article ont été obtenus à partir de travaux de recherche réalisés dans le laboratoire de durabilité des matériaux composites de PRF du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada. Des barres de PRFV de 12 mm de diamètre à recouvrement de sable fabriquées par Pultrall Inc., Thetford Mines, Québec, ont été utilisées (figure 1). Les barres ont été fabriquées à partir de fibres de verre continues de type E imprégnées avec une résine vinylester par un procédé de pultrusion.

2.2. Test Plan

2.2.1. Aging in Moist Concrete

Accelerated aging of GFRP reinforcing bars embedded in concrete, used in this study, were designed to simulate an aggressive alkaline environment of saturated concrete. The embedded samples were immersed in tap water. The technique currently used is believed to be representative of the real life situation. Indeed, the pH of the solution surrounding the bars is a result of the absorption of water by the concrete, thus allowing the liberation of the alkaline ions of the concrete directly in the bars environment. The aging was performed by immersing the mortar-wrapped GFRP bars in a wood container specially manufactured for the study. Figure 3 shows the containers that were tightly closed with a polyethylene film on their inner surfaces. A polyethylene sheet was also placed on top of the wood containers to avoid excessive evaporation of water during the conditioning. Bars were spaced from each other and from the bottom of the container to allow the free circulation of the solution between and around the GFRP bars. Furthermore, the water level was kept constant throughout the study to avoid a pH increase which could be due to a water level decrease and a significant increase of the concentration of the alkaline ions in the solution. The temperatures of immersion were chosen to accelerate the degradation effect of aging; however, they were not too high to produce any thermal degradation mechanisms. The specimens were completely immersed at three different temperatures (23, 40 and 50°C) and were removed from the water after four different periods of time (60, 120, 180 and 240 days). After each period, usually six GFRP bars were removed from the water, tested under tension to compare their tensile strength retention values to those of the refer-

ence specimens. Microstructural and physical analyses were also performed after immersion.

Des conditionnements par immersion en eau d'aqueduc ont été subis par certaines des barres d'armature utilisées dans cette étude pour simuler le milieu alcalin agressif du béton d'enrobage. Ces barres étaient préalablement enrobées d'un mortier consistant en trois parties de sable, une partie de ciment Type 10 (Type I, ASTM) et un rapport eau/ciment de 0,40, menant à un pH de 12,15 mesuré par extraction de la solution interstitielle après les conditionnements. Cette technique de vieillissement représente une bonne simulation de la réalité. Le pH de la solution en contact avec les barres d'armature est le résultat de l'absorption d'eau par le mortier, permettant ainsi la libération des ions alcalins du béton dans l'environnement immédiat des barres. Ces vieillissements ont été réalisés par l'immersion complète des barres enrobées dans des bacs de vieillissement spécialement fabriqués à cet effet. Un film de polyéthylène a aussi été placé par-dessus les bacs pour éviter une évaporation excessive de l'eau pendant les conditionnements. Les barres ont été espacées les unes des autres ainsi que du fond du bac pour permettre la libre circulation de la solution autour de ces dernières. La figure 3 montre les barres positionnées dans leur bac d'immersion. De plus, le niveau d'eau a été gardé constant tout au long de l'étude pour éviter une augmentation du pH de la solution de vieillissement qui aurait pu être causée à une augmentation de la concentration des ions alcalins dans la solution. La dégradation a été accélérée par l'utilisation de la température, tout en choisissant cette dernière afin d'éviter l'introduction de mécanismes de dégradation thermique. En plus des propriétés physiques et microstructurale des barres, la rétention des propriétés en traction des barres ont été mesurés après différents temps d'immersion (60, 120, 180 et 240 jours).

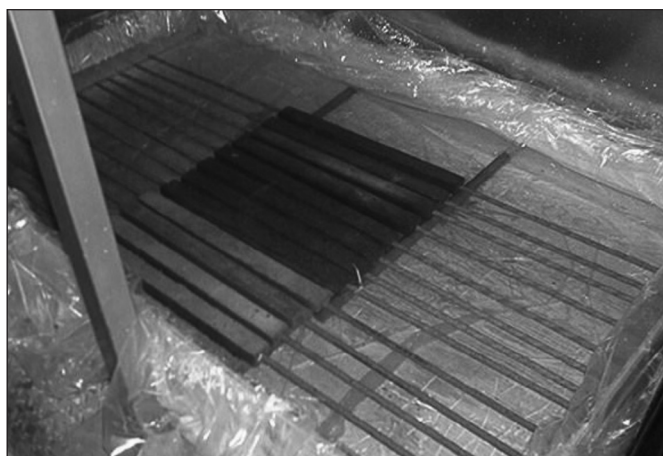


Figure 3: Wood container built for aging of the cement mortar-wrapped GFRP bar specimens

2.2.2. Extreme Temperatures

Properties of GFRP bars submitted to extreme temperatures were measured. All GFRP bar specimens were tested under extreme temperature conditions using a MTS environmental chamber cooled by liquid nitrogen (Figure 2).

Sub-zero temperatures equal to -100° , -80° , -60° , -40° , -20° and also 0°C were chosen to simulate the effect of Nordic climate on GFRP bars. The temperatures below -60°C were used to amplify the effects of temperature on mechanical and microstructural behaviour of the FRP materials. Elevated temperatures equal to 50° , 100° , 150° , 200° , 250° and 325°C were chosen to simulate short-term environmental conditions in the case of fire. All the tests were conducted using a steady-state temperature (heat then load) regime. To be sure that the temperature at the core of the GFRP bars reached the desired temperature, an extra GFRP bar was kept in the same conditions and its core temperature was monitored using a thermocouple that was inserted in the core of this bar. When the desired temperature was reached (from the thermocouple reading), it was kept constant and the GFRP specimens were tested at that temperature.

Les propriétés des barres soumises à des températures extrêmes d'applications ont été mesurées. Pour ce faire, tous les échantillons testés ont subis des conditionnements en chambre environnementale sous des températures contrôlées. Une chambre environnementale MTS refroidie à l'azote liquide et directement installée sur la presse d'essai a été utilisée (figure 4). Des températures sous le point de congélation égales à -100° , -80° , -60° , -40° , -20° et 0°C ont été utilisées pour simuler les effets d'un climat nordique canadien sur le comportement des barres d'armature. Des températures élevées égales à 50° , 100° , 150° , 200° , 250° et 325°C ont été choisies pour simuler les conditions à court terme dans le cas d'un incendie. Pour s'assurer que les



Figure 4: Test setup for tensile tests at controlled temperature

échantillons testés atteignent bien la température désirée, tous les échantillons ont été placés dans la chambre environnementale au moins deux heures avant les essais mécaniques et un thermocouple a été fixé sur un échantillon de référence pour mesurer la température au centre de ce dernier. Les propriétés physiques et microstructurale, ainsi que les propriétés en traction ont été mesurées suite à ces vieillissements à températures contrôlées.

2.2.3. Pre-Loading of GFRP Bars Samples

The effect of cracking and microcracking on the long-term behaviour of GFRP bars was evaluated. GFRP bars were preloaded at 80 percent of their theoretical ultimate tensile strength (854 MPa) (UTS) to initiate cracks and microcracks in polymer and glass fibres. All bars were preloaded under tension according to ASTM D 7205 standard. The test was carried out using a MTS 810 testing machine and load was increased until required load was reached. For each tensile preloading, the specimen was mounted on the press with the steel pipe anchors gripped by wedges of the upper and the lower jaws of the machine. The rate of loading ranged between 250 and 500 MPa/min and the maximum load was maintained for 10 minutes, and then was reduced at the rate of 250 to 500 MPa/min. The study of the long-term behaviour of pre-loaded GFRP bars was performed by using accelerated aging in moist concrete, as described above.

L'effet de la fissuration sur les comportements à long terme des barres de PRFV a été mesuré. Pour ce faire, des barres ont été préalablement chargées jusqu'à 80% de leur charge ultime théorique en traction (854 MPa) pour ainsi initier des fissures et des microfissures dans le polymère ou les fibres de verre. Toutes les barres ont été pré-chargées sous tension en suivant la norme ASTM D 7205. Les chargements ont été réalisés en utilisant une presse hydraulique MTS 810 et en augmentant la charge jusqu'au niveau désiré, soit 80% de la charge ultime en traction. Le montage expérimental utilisé est le même que celui présenté à la figure 4. Pour chaque pré-chargement en traction réalisé, l'échantillon était installé sur la presse avec des ancrages d'acier à ses extrémités et fixé aux mâchoires supérieure et inférieure de la machine. Le taux de chargement se situait entre 250 et 500 MPa/min et le niveau de chargement a été maintenu pendant 10 minutes avant que la charge soit enlevée à un taux de déchargement allant de 250 à 500 MPa/min. L'étude du comportement à long terme des barres fissurées par pré-chargement a été réalisée par des vieillissements en solution après enrobage dans un mortier, comme décrit précédemment.

2.3. Mechanical Characterization

Tensile tests were performed on bars aged in solution, bars subjected to controlled temperatures and bars pre-loaded at 80 percent of their UTS. The measured tensile strengths of the bars before and after exposure were considered as a measure of the durability performance of the specimens. All bars were tested under tension according to the ACI 440.3R-04 B2. Each specimen was instrumented with a

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) to capture the elongation during testing. The test was carried out using a Baldwin testing machine and the load was increased until failure. For each tensile test, the specimen was mounted on the press with the steel pipe anchors gripped by the wedges of the upper and the lower jaw of the machine. Just before the test, the concrete cover was carefully removed from the middle third of the specimens with a hammer to avoid any damage to the bar. The rate of loading ranged between 250 and 500 MPa/min. The applied load and bar elongation were recorded during the test using a data acquisition system monitored by a computer. Due to the brittle nature of GFRP, no yielding occurs and the stress-strain behaviour was linear.

Des essais de traction ont été réalisés sur les barres conditionnées en solution, vieilles à températures contrôlées et pré-chargées en traction en vue de mesurer la rétention des propriétés en traction après vieillissements. Tous les essais de traction réalisés sur les barres de PRFV conditionnées l'ont été selon la norme ASTM D 7205. Chaque échantillon était instrumenté avec un extensomètre permettant d'enregistrer l'élongation pendant l'essai. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique MTS 810 en augmentant la charge jusqu'à la rupture de l'échantillon. Tout comme pour les pré-chargements, les échantillons étaient installés sur la presse avec des ancrages d'acier à leurs extrémités et fixés aux mâchoires supérieure et inférieure de la machine. Dans le cas des échantillons testés suite à des vieillissements avec enrobage de mortier, ce dernier a été soigneusement enlevé de l'échantillon juste avant l'essai en utilisant un marteau. Le taux de chargement se situait entre 250 et 500 MPa/min. La charge appliquée et l'élongation de l'échantillon ont été enregistrées pendant les essais en utilisant un système d'acquisition de données relié à un ordinateur. Aucune déformation plastique n'est survenue lors des essais et les courbes de contraintes déformations étaient dans tous les cas linéaires, exprimant le caractère fragile des barres de PRFV.

2.4. Physical Characterization

2.4.1. Density Measurements after Pre-Loading

The density of the reference and preloaded composite samples without mortar cover was determined by displacement in water according to ASTM D792 (Test Method A) using a Mettler AG204 DeltaRange® microbalance. The specimens (3 per sample) were weighed in air (P_g). Then, each specimen was placed in a cylinder, which was filled with water. After having weighted the cylinder containing the sample and water (P_{s+w}), the specimen was removed and the cylinder was filled with water up to the same level. The cylinder containing only water was then weighed (P_w). If considering the density of water as equal to 1.00, the density of the sample, ρ , was obtained using the equation Eq. 3.

La densité des échantillons de référence et des échantillons pré-chargés à 80% de leur charge ultime en traction a été

déterminée par mesure de déplacement d'eau selon la norme ASTM D792 (méthode A), en utilisant une balance Mettler AG204 DeltaRange®. Les échantillons (3 par type d'échantillons) ont tout d'abord été pesés dans l'air (P_{ech}) avant d'être placé dans un cylindre gradué subséquentement rempli d'eau. Après avoir pesé le cylindre contenant l'échantillon et l'eau, ($P_{ech+eau}$), l'échantillon était enlevé du cylindre et ce dernier était rempli d'eau jusqu'au même niveau puis pesé (P_{eau}). En considérant que la densité de l'eau est égale à 1, la densité de l'échantillon, ρ , a été obtenu en utilisant l'équation (3).

$$\rho = P_s / P_s + P_w + P_s + w \quad (3)$$

A drop of density was considered as a confirmation of the increase of void content and as a measurement of the damage caused to the GFRP bars by preloading.

Une chute de la densité après le pré-chargement est considérée comme une confirmation de l'augmentation du taux de vide dans l'échantillon testé et une mesure du dommage causé par le pré chargement.

2.4.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM observations and image analysis were performed to evaluate the microstructure of aged specimens and the integrity of the GFRP material after exposure to extreme temperatures. All specimens were first cut, polished and coated with a thin layer of gold-palladium by a vapor-deposit process for observing in the SEM. Microstructural observations were thereafter performed on a JEOL JSM-840A SEM. These observations were conducted to determine the potential degradation of the polymer matrix, possible glass fibers and interface.

Des observations en MEB et l'analyse d'image ont été réalisées pour évaluer les changements de microstructure des échantillons conditionnés et l'intégrité des matériaux de PRF ayant subis des vieillissements à températures extrêmes. Tous les échantillons ayant été observés en MEB ont tout d'abord été coupés, puis polis et revêtus d'une couche d'or-palladium par un procédé d'électrodéposition. Les observations micro-structurales ont été réalisées à l'aide d'un microscope JEOL JSM-840A. Ces observations sont réalisées pour déterminer la dégradation potentielle de la matrice, des fibres ou de l'interface entre les fibres et la matrice.

2.4.3. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

DSC was used to obtain information on the thermal behavior and characteristics of polymeric materials and composites such as glass transition temperature (T_g), melting point, curing process, crystallinity, thermal stability, and relaxation. In the study, specimens weighting 12 to 15 milligrams were cut from different GFRP samples (non-conditioned and conditioned) and placed in aluminum pans and were analyzed using a TA Instruments DSC Q10 calorimeter. Specimens were heated from 25°C to 195°C at a rate of 5°C/min. Glass transition temperature was determined for both the specimens in accordance with ASTM E 1356 standard. If decrease in T_g was observed for conditioned samples, it was an indication of plasticizing effect or

chemical degradation. Aged sample maintaining a lower T_g than for the reference showed an irreversible chemical degradation.

La DSC est utilisée pour obtenir des informations sur le comportement thermique des matériaux polymères et des composites, comme la température de transition vitreuse (T_g), le point de fusion, le processus de cure, la cristallinité, la stabilité thermique et la relaxation. Dans la présente étude, des échantillons coupés de barres de référence (non-conditionnées et conditionnées) ont été placés dans des cupules d'aluminium et analysés à l'aide d'un calorimètre TA Instruments DSC Q10. Les échantillons ont été chauffés de 25° à 195°C à un taux de 5°C/min. La T_g a été déterminée selon la norme ASTM E 1356 pour tous les échantillons testés. Une chute de T_g observée chez un échantillon ayant subi un conditionnement, est l'indication d'une dégradation chimique ou d'une plastification de la matrice. La DSC permet donc de confirmer les effets des vieillissements en laboratoires sur la structure du matériau polymère testé.

2.4.4. Dynamical Mechanical Analysis (DMA)

DMA was used to determine changes in the mechanical properties of FRP composite materials either under isothermal conditions or as a function of temperature. Glass transition temperature, stiffness, and damping properties could also be measured by this technique. Dynamic mechanical testing provided a method to determine elastic and loss moduli of materials and could be used to evaluate and compare composite parameters, such as adhesion and interface properties, some of the processing treatments, curing, and stress state. In the present study, some GFRP bar specimens were tested by DMA under flexure to measure the effect of temperature on the flexural modulus of elasticity for temperatures ranging from -100° to 350°C. The tests were carried out according to ASTM D 5023 standard and using a TA Instruments DMA Q800 testing machine equipped with a three point bending device. The span between the supports was kept equal to 50 mm. The rate of loading is chosen to allow a deflection of 10 microns.

La DMA est utilisée pour déterminer les changements de propriétés mécaniques des PRF sous des conditions isothermes ou en fonction de la température. La température de transition vitreuse et la rigidité des matériaux peuvent aussi être mesurées par cette technique. La DMA permet donc la détermination des modules élastique et de perte du matériau testé et peut être utilisée pour évaluer et comparer certains paramètres reliés au composite, tels que l'adhésion et les propriétés d'interface, le paramètres de moulage, la cure du polymère et l'état de contrainte. Dans la présente étude, des échantillons de barres de PRFV ont été testés en flexion pour mesurer l'effet de la température sur le module élastique en flexion pour une gamme de températures allant de -100° à 350°C. Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM D 5053 en utilisant une machine d'analyse TA Instruments DMA Q800 équipée d'un montage de flexion en trois points. L'espacement entre les appuis a été fixé à 50 mm et le taux de chargement a été choisi pour permettre une déflexion constante de 10 microns.

2.4.5. Thermo gravimetric Analysis (TGA)

TGA determined the changes in weight of FRP composites as a function of temperature. The TGA could be used to calculate glass fibre and moisture contents and to study the thermal stability of matrix. In the study, the thermal stability of specimens was investigated by using TGA, and the weight loss traces were recorded as function of temperature in the range of 20–800 °C according to ASTM E 1868 standard. The mass variations recorded could give indications concerning the different phenomena of degradation occurring in the matrix and also explain the loss of mechanical properties observed at very high temperatures. Thermo gravimetric analysis was carried out by using TA Instrument Q500 TGA equipment under air with a heating rate of 20°C min⁻¹.

La TGA détermine les changements de masse des composites de PRF en fonction de la température. La TGA peut être utilisée pour calculer le taux de fibres et d'humidité des échantillons testés, ainsi que pour étudier la stabilité thermique du polymère utilisé comme matrice. Dans la présente étude, la stabilité thermique des échantillons a été étudiée selon la norme ASTM E1868 en utilisant la TGA. Les pertes de masse ont été enregistrées en fonction de la température entre 20° et 800°C permettant de déterminer l'effet des températures extrêmes d'application sur les barres d'armature en PRFV testées. Les analyses thermogravimétriques ont été réalisées à l'aide d'un analyseur de type TA Instrument TGA Q500 dans un atmosphère d'air en utilisant un taux de chauffe de 20°C/min.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

3.1. Effect of Immersion

3.1.1. Tensile Strength Retention

Table 1 shows the experimental results obtained during the tensile tests concerning the ultimate strength of aged bars tested after immersion. Figure 5 shows the retention of the

ultimate strength of aged bars according to the duration of immersion of embedded bars at various temperatures. As shown in Table 1, the tensile strength for unconditioned bar was equal to 788 ± 54 MPa. Note that the tensile strength of bars was reduced to 665 ± 62 MPa after 240 days exposure to water at 50°C.

Figure 5 shows a slight decrease of the ultimate tensile strength with immersion duration. The recorded results show that the longer the time of immersion, the larger the loss of resistance. Furthermore, it is clear that the temperature of immersion affects the loss of resistance. It can be seen that for duration of immersion of 8 months, the loss of resistance is equal to 16, 10 and 9 % at 50°, 40° and 23°C, respectively. This phenomenon is due to the increasing of the diffusion rate of the solution and to the acceleration of the chemicals reaction of degradation with the temperature of immersion, leading to a larger absorption rate of the solution for the same time of immersion and accelerated reaction of degradation. The absorption of solution can lead to a degradation of the fibres and fibre/matrix interface, leading to a loss of the ultimate tensile.

Le tableau 1 montre les résultats expérimentaux obtenus pendant les essais de traction des échantillons enrobés de mortier et conditionnés par immersion en solution à différentes températures et temps d'immersion. La figure 5 montre la rétention de la résistance ultime en traction en fonction de la durée d'immersion et de la température de conditionnement des barres enrobées. Comme présenté au tableau 1, la résistance en traction des barres de référence non conditionnées est égale à 788 ± 54 MPa. Cette résistance chute à 665 ± 62 MPa après une immersion de 240 jours dans l'eau à 50°C.

La figure 5 montre pour sa part une légère diminution de la résistance en traction avec l'augmentation du temps d'immersion. Les résultats enregistrés montrent que plus le temps d'immersion est grand, plus la perte de résistance est grande. De plus, il apparaît clair que la température de vieillissement affecte la perte de résistance en traction. La figure 5 montre que pour une immersion de 8 mois, la perte de résistance est égale à 16, 10 et 9% à 50°, 40° et 23°C, respectivement. Ce phénomène est dû à l'accroissement du

Time of immersion (days)	Temperature (°C)	Mean Tensile Strength (MPa)	COV (%)
0	23	788	6,9
60	23	753	8,2
	40	755	3,7
	50	767	3,8
120	23	702	2,0
	40	666	7,8
	50	720	3,2
180	23	717	2,6
	40	708	4,8
	50	711	2,5
240	23	714	3,5
	40	708	7,1
	50	665	9,3

Table 1: Experimental tensile strength of reference specimens and specimens aged in moist concrete

taux de diffusion de la solution dans l'échantillon et à l'accélération de la réaction chimique de dégradation à mesure que la température d'immersion augmente. Ces phénomènes mènent donc à un plus grand taux d'absorption à saturation et à une dégradation plus rapide des propriétés du matériau testé. De façon générale, l'absorption de solution peut mener à la dégradation des fibres et de l'interface entre les fibres et la matrice, menant à une perte de résistance ultime en traction.

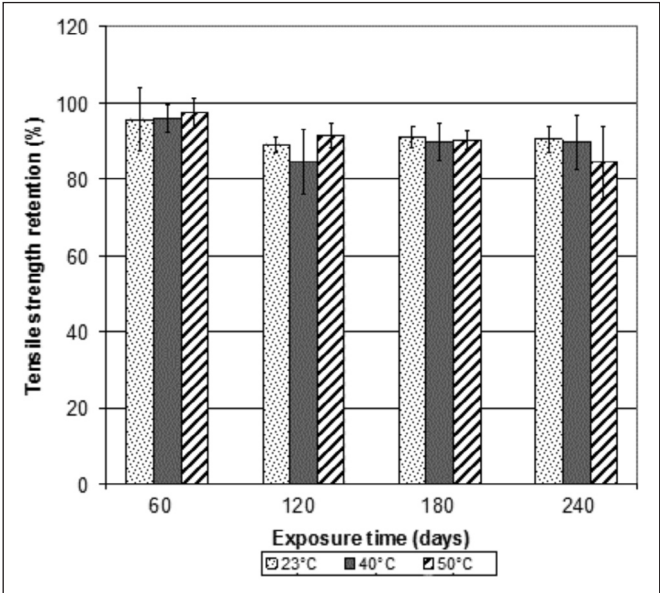


Figure 5: Tensile strength retention of conditioned GFRP bars aged in moist concrete at 23°, 40°, and 50°C

Figure 6 shows the change in the elastic modulus of aged bars with time of immersion at various temperatures. Indeed, it can be seen from the measured results that after 240 days, the loss of elastic modulus is negligible and all aged bars are not affected by the higher temperature or the exposure to moist concrete. This result shows that elastic modulus of bars is not affected by aging in concrete environment.

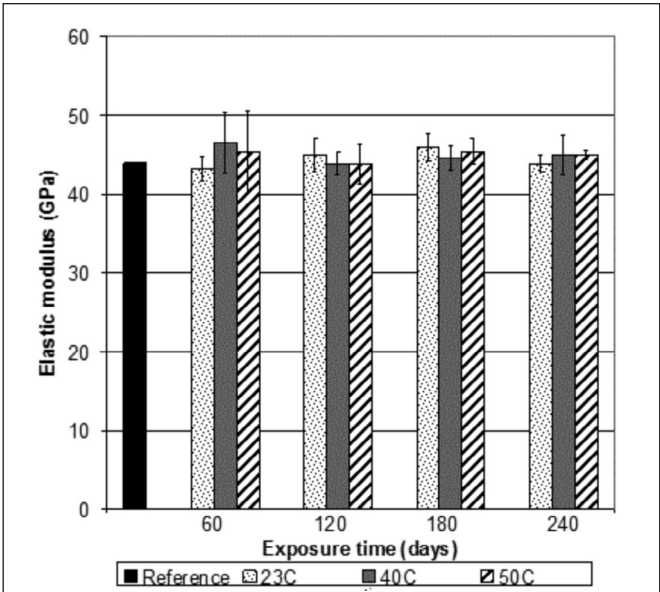


Figure 6: Elastic modulus retention of conditioned GFRP bars aged in moist concrete at 23°, 40°, and 50°C

La figure 6 montre les changements de module élastique des barres conditionnées en fonction du temps d'immersion à différentes températures. Il peut être observé à la figure 6 que même après 240 jours d'immersion, la perte de rigidité du composite est négligeable et qu'aucune des barres n'est affectée par les températures élevées ou le mortier humide. Ces résultats montrent clairement que la rigidité des composites n'est pas affectée par les vieillissements en mortier humide simulant les vraies conditions d'application.

3.1.2. Change in Density

Table 2 shows the measured density for reference sample and samples preloaded at 80 percent of the UTS. As expected, higher the load level, lower the density. In fact, a loss of 15 percent of the density was measured after preloading of the GFRP bar specimen at 80 percent of the UTS. This result could be explained due to the creation of cracks and microcracks by preloading of GFRP bars. Matrix cracking and debonding at fibre/matrix interface cause an increase of void content of the GFRP bar and decrease in the measured density. This result was in accordance with microstructural observations performed by SEM (Figure 8).

Le tableau 2 montre la densité mesurée pour les échantillons de référence et pré-chargés à 80% de leur charge ultime en traction. Comme envisagé, l'application d'un niveau de chargement élevé (80% de la charge ultime en traction) mène à une diminution de la densité de l'échantillon. En effet, une diminution d'environ 15 % de la densité a été observée. Ce résultat peut être expliqué par la création de fissures et de microfissures durant l'étape de pré-chargement des barres de PRFV. La fissuration de la matrice polymère et le délaminage à l'interface entre les fibres et la résine peuvent causer une augmentation du taux de vide de la barre de PRFV et en diminuer la densité. La fissuration et la microfissuration de la barre ont été confirmées en microscopie électronique à balayage (figure 8).

Condition	Measured Density	COV (%)
Reference	2,12	2,1
Pre-loaded at 80% of the UTS	1,81	1,8

Table 2: Experimental density measured before and after pre-loading of GFRP bars

3.1.3. Effect on Tensile Properties of Pre-Loaded Bars

Table 3 shows the experimental results obtained during the tensile tests concerning the ultimate strength and the modulus of elasticity of reference and pre-loaded (80% UTS) bars tested after 60, 120, 180 and 240 days of immersion in water at different temperatures.

Le tableau 3 montre les résultats expérimentaux (résistance ultime en traction et module d'élasticité) obtenus durant les essais de traction de barres pré-chargées à 80% de leur charge ultime en traction (854 MPa) puis immergées dans l'eau pendant 60, 120, 180 ou 240 jours à différentes températures.

Time of immersion (days)	Temperature (°C)	Mean Tensile Strength (MPa)	COV (%)	Mean Modulus of Elasticity (GPa)	COV (%)
0	23	854	2	43	2
60	23	846	5	44	3
	40	847	6	43	3
	50	838	4	43	4
120	23	849	2	42	5
	40	832	8	43	4
	50	837	3	44	2
180	23	836	3	42	4
	40	823	5	43	6
	50	808	3	41	4
240	23	810	4	43	3
	40	784	7	42	2
	50	768	9	43	2

Table 3: Experimental tensile strength of reference specimens and pre-loaded specimens aged in moist concrete

Results presented in Table 3 show slight decrease (6 to 11%) of the ultimate tensile strength after 240 days of immersion of pre-loaded bars embedded in mortar. This decrease was similar to the loss of tensile strength measured on same bar subjected to same conditionings but without preloading. This phenomenon was due to the increasing of diffusion rate of the solution into the sample due to the presence of cracks and microcracks and to the acceleration of chemical reactions of degradation with the temperature of immersion, leading to a larger absorption rate of the solution for the same time of immersion. The higher absorption of solution could lead to a higher degradation of the fibres and fibre/matrix interface, leading to a loss of the ultimate tensile.

Concerning the stiffness of embedded pre-loaded GFRP bars after aging in the water, it was seen from the measured results presented in Table 3 that after 240 days, the loss of elastic modulus was negligible and all aged bars were not affected by the higher temperature or the exposure to moist mortar. This result showed that elastic modulus of bars was not affected by aging in concrete environment and was in accordance with the results found by testing similar bars subjected to same aging but without pre-loading.

Les résultats présentés au tableau 3 montrent une légère chute (6 à 11%) de la charge ultime en traction après 240 jours d'immersion à 50°C de barres pré-chargées et enrobées de mortier. Cette chute est similaire à la perte enregistrée pour le même type de barres conditionnées sans avoir été pré-chargées et fissurées (voir tableau 1). La diminution de résistance en traction peut être expliquée par l'augmentation du taux de diffusion de la solution dans l'échantillon avec l'augmentation de la température d'immersion, menant à un taux d'absorption plus élevé pour un même temps d'immersion et à l'accélération des réactions chimiques de dégradation. L'absorption de solution, d'autant plus facilitée par la présence de fissures dans la microstructure des barres pré-chargées en traction, peut mener

à une dégradation de l'interface entre les fibres et la résine, expliquant la perte de résistance en traction avec les vieillissements en béton humide.

En ce qui a trait à la rigidité des échantillons pré-chargés puis vieillis en béton humide pendant 240 jours, il peut être vu au tableau 3 que la perte de module élastique est négligeable et que les barres vieilles ne sont pas affectées par les températures élevées ou l'exposition au béton humide. Ces résultats expérimentaux sont similaires à ceux trouvés pour les mêmes barres mais conditionnées sans pré-chargement en traction, montrant que la présence de fissuration n'affecte pas le module élastique des barres conditionnées en béton humide.

3.1.4. Effect on Failure Mode

The tensile test of unconditioned specimens, specimens aged in moist concrete at 50°C during 240 days and pre-loaded specimens aged in moist concrete at 50°C during 240 days showed an approximately linear behaviour up to failure. Specimens failed through the rupture of fibres. The failure was accompanied by the delamination of fibres and resin, as shown in Figure 7. From this observation, it could be concluded that the aging in moist concrete or the presence of pre-existing cracks and microcracks due to the pre-loading of bars, have no significant effects on the failure mode occurring during tensile tests.

La figure 7 montre que le mode de rupture des échantillons de référence, des échantillons conditionnés en béton humide à 50°C pendant 240 jours et des échantillons pré-chargés à 80% de la charge ultime en traction puis vieillis en béton humide à 50°C pendant 240 jours, est le même. À partir de cette observation, il peut être conclu que le pré-chargement des barres de PRFV, et la présence de fissures et de microfissures dans la microstructure des barres, n'ont pas d'effets significatifs sur les propriétés à long-terme des échantillons testés.

3.1.5. Microstructural Effect of Pre-Loading

The micrographs of Figure 8 show the longitudinal bar surface of reference and GFRP bar pre-loaded at 80 percent of the UTS. In particular, the fibres and the interface between the fibres and the resin should be observed. Observations of these interfaces and of the microstructure in general demonstrated that the pre-loading affected the microstructure of GFRP bar. The only visible damage occurred at the fibre level since the elongation at the rupture was lower for the fibres compared to the polymer matrix. No damage occurred at the matrix and fibre/matrix interface, even at very high stress level (up to 80 percent of the UTS). These observations were in accordance density measurements in the way that the increase of microcracking at high stress levels leads to a decrease of density.

Les micrographies présentées à la figure 8 montrent la coupe longitudinale d'une barre de référence non-conditionnée et d'une barre pré-chargée à 80% de sa charge

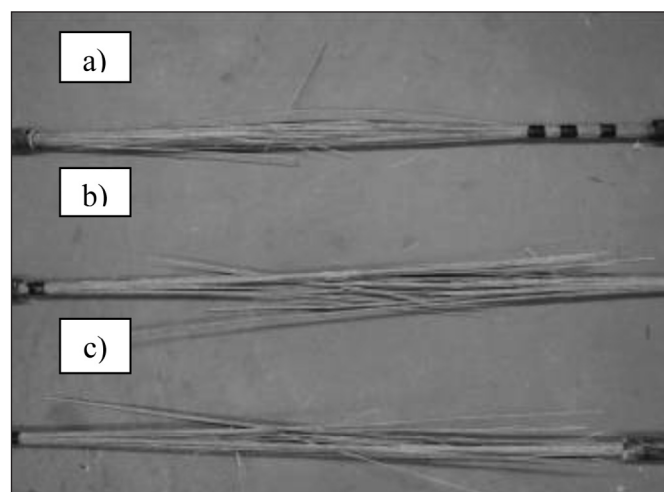


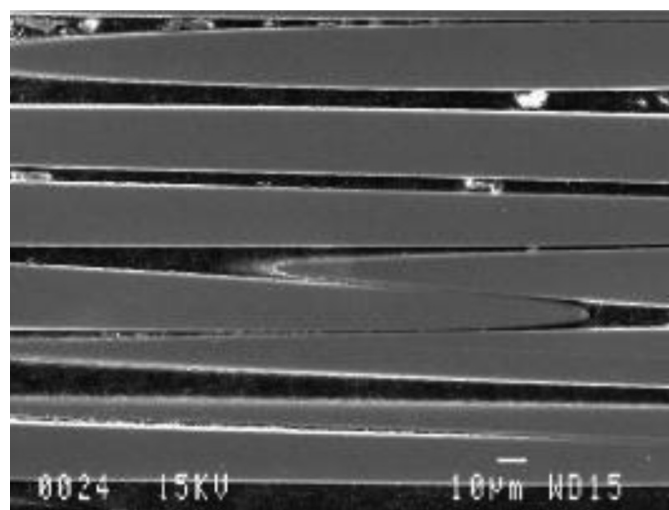
Figure 7: Typical failure mode for GFRP bars: a) reference, b) bar aged in moist concrete at 50°C during 240 days c) bar pre-loaded at 80% of the UTS and aged in moist concrete at 50°C during 240 days.

ultime en traction. Les fibres et l'interface entre les fibres et la résine doivent être observées. L'observation de ces interfaces et de la microstructure en général démontre que le pré-chargement affecte la microstructure de la barre de PRFV puisque des fibres semblent avoir été fissurées par l'application de la charge. Il peut aussi être observé qu'aucun dommage significatif n'est visible au niveau de la résine ou de l'interface entre les fibres et la résine, même après l'application d'une grande charge (80% de la charge ultime de traction). Les seuls dommages visibles sont au niveau des fibres puisque la déformation des fibres est limitée comparativement à celle de la matrice polymérique.

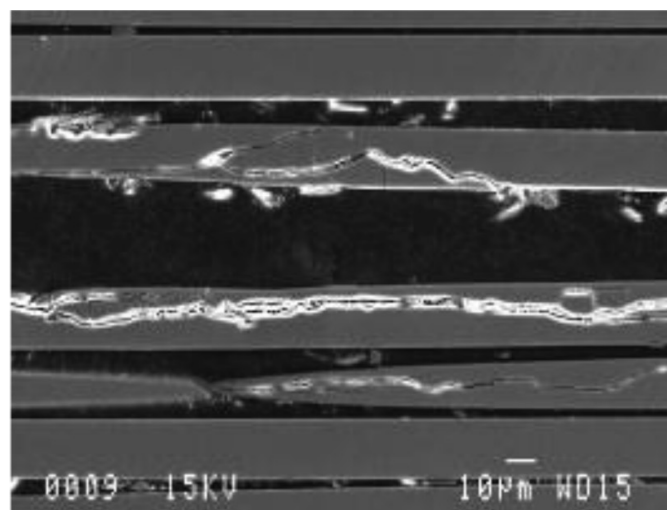
3.1.6. Microstructural Effect of Aging in Moist Concrete

The visual and microstructural observations of reference and pre-loaded bars showed no significant damage after 240 days of immersion in the tap water at the highest temperature (50°C). The micrographs of Figure 9 show the fibres/matrix interface for reference and pre-loaded bars aged in moist concrete at 50°C during 240 days. Observation of these interfaces and of the microstructure, in general, demonstrate that the conditionings of mortar-wrapped bars in water do not affect the microstructural properties of the GFRP bars, even if the bars show pre-existing cracks or microcracks. The micrographs of external surfaces of unconditioned specimen, specimen aged in moist concrete at 50°C during 240 days and specimen pre-loaded at 80 percent of the UTS and aged in moist concrete at 50°C during 240 days are shown in Figure 10. The comparison of these micrographs shows that there was no significant damage occurring to mortar-wrapped GFRP bar surface, even at high temperature (50°C) and when bar presents pre-existing cracks and microcracks.

Les observations visuelles et microstructurale des barres enrobées de mortier et immergées 240 jours dans l'eau à 50°C ne montrent aucun dommage significatif autant pour les barres de référence que pour les barres pré-chargées.



(a)



(b)

Figure 8: Micrograph of longitudinal GFRP bar surface pre-loaded under tensile load: a) Reference GFRP bar at low magnification, and b) GFRP bar loaded at 80% of the UTS at high magnification

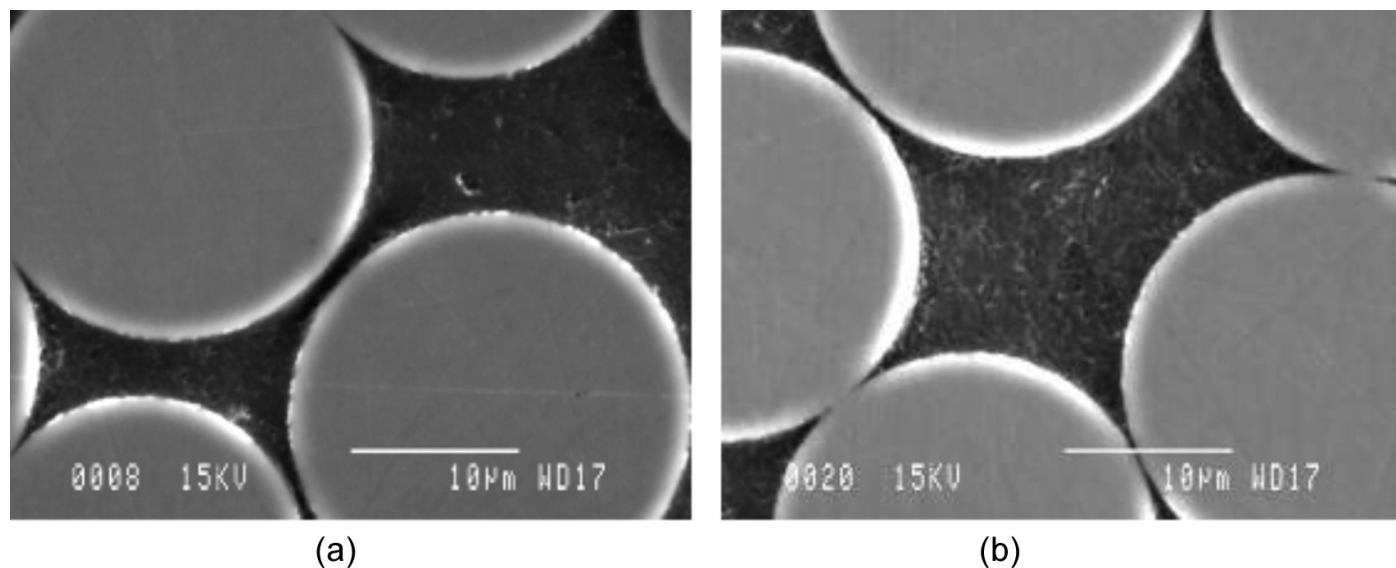


Figure 9: Micrographs of fibre/matrix interface (X3000) of: a) unconditioned GFRP bar specimen, b) Conditioned GFRP bar specimen aged in moist concrete at 50°C for 240 days.

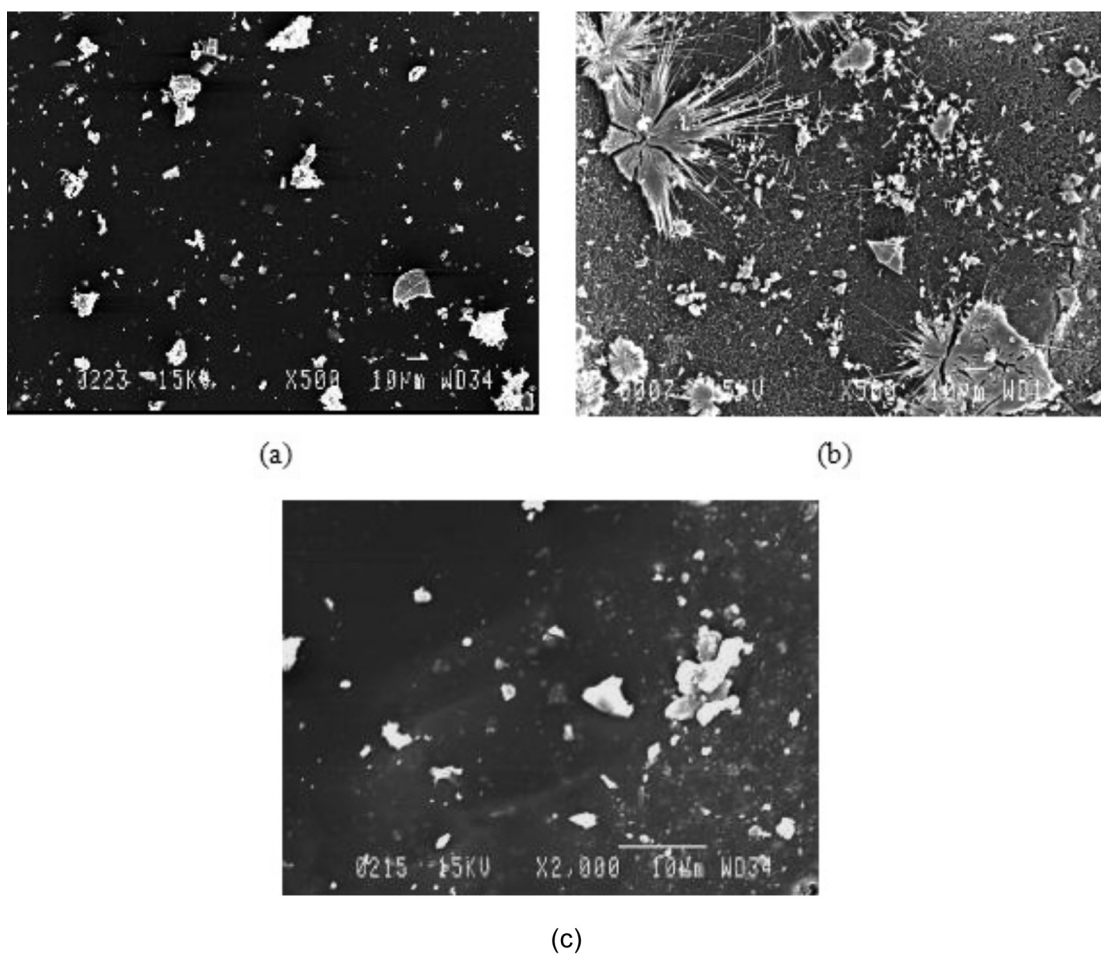


Figure 10: Micrographs of external surfaces for : a) reference, b) bar aged in moist concrete at 50°C during 240 days, c) bar pre-loaded at 80% of the UTS and aged in moist concrete at 50°C during 240 days.

La figure 9 montre les micrographies des interfaces fibres/résine pour les mêmes échantillons. L'observation de ces interfaces et de la microstructure en général démontre que les conditionnements dans l'eau de barres enrobées de mortier n'affectent pas leur microstructure

même si ces dernières sont fissurées. Les micrographies de la figure 10 montrent les surfaces externes d'une barre de référence non-conditionnée, d'une barres non pré-chargée immergée 240 jours dans l'eau à 50°C et d'une barre pré-chargée à 80% de sa charge ultime en traction puis immer-

gée dans l'eau à 50°C pendant 240 jours. L'observation de ces micrographies montre clairement qu'aucune dégradation matricielle significative ne survient chez les barres enrobées de béton puis immergées à haute température (50°C) même si ces dernières présentent des fissures initiées par pré-chargement

3.1.7. Effect on Polymer Matrix

Table 4 presents the glass transition temperature (T_g) values found by DSC for unconditioned specimen, specimen aged in moist concrete at 50°C during 240 days and specimen pre-loaded at 80 percent of the UTS and aged in moist concrete at 50°C during 240 days. Note that for the unconditioned and aged samples, the T_g corresponding to the second heating run is higher than that of the first scan. This shift indicates that the samples were not fully cured and that a post-curing phenomenon occurred during the second heating run. However, it can be seen from the results presented in Table 4 that no significant changes of the T_g value occur after aging in water at 50°C for 240 days, even for pre-loaded bars. This result shows that no major effect on the thermal properties of the resin, which could occur after conditioning of mortar-wrapped FRP bars, was detected by DSC.

Le tableau 4 montrent les valeurs expérimentales de la température de transition vitreuse (T_g) pour l'échantillon de référence non-conditionné, la barre immergée 240 jours dans l'eau à 50°C et la barre pré-chargée à 80% de sa charge ultime en traction puis immergée dans l'eau à 50°C pendant 240 jours recueillis par calorimétrie différentielle à balayage. Il est à noter que pour un même échantillon, la T_g recueillie lors de la deuxième chauffe du matériau est plus élevée que celle recueillies lors de la première. Cette augmentation indique que la matrice polymère de l'échantillon en question n'est pas complètement polymérisée et qu'un phénomène de postcure est survenu lors de la deuxième chauffe, expliquant l'augmentation de la T_g . Il est possible de voir à partir des résultats présentés au tableau 4 qu'aucun changement significatif de la T_g n'est survenu suite aux vieillissements par immersion à haute température de barres enrobées de béton, fissurées ou non. Ces résultats montrent que les immersions n'affectent pas les propriétés thermiques de la résine polymère servant de matrice pour les barres de PRFV.

Condition	Temperature (°C)	Time of immersion (days)	T_g 1 st run (°C)	T_g 2 nd run (°C)
Reference			105	134
Embedded in moist concrete	50	240	104	129

Table 4: Glass transition Temperature measured by DSC

3.2. Effect of Extreme Temperatures

3.2.1. Effect of Extreme Temperatures on Mechanical Properties

Figure 11 shows the relation between the tensile, shear and flexural strength of GFRP bars and the test temperature respectively. Figure 12 presents the relationship between the flexural modulus of elasticity (Storage Modulus (SM)) and temperature in the range of -100° to 350°C. The SM (flexural modulus) was used to measure the effect of temperature on the stiffness of the FRP material. The drop of SM (flexural modulus) beginning around 120°C corresponded to the glass transition of the polymer and the lower plateau to the viscoelastic state.

La figure 11 montre la dépendance de la résistance en traction des barres de PRFV avec la température d'essai. Pour sa part, la figure 12 présente la relation entre le module élastique en flexion (Storage Modulus (SM)) et la température d'essai sur une échelle allant de -100° à 350°C. Le module élastique en flexion est utilisé pour mesurer l'effet de la température sur la rigidité des barres de PRFV testées. La chute du module en flexion débutant vers 120°C correspond à la température de transition vitreuse du polymère et le plateau inférieur correspond à l'état viscoélastique de ce polymère. Les écart-types sur les mesures sont présentées directement sur la figure 11.

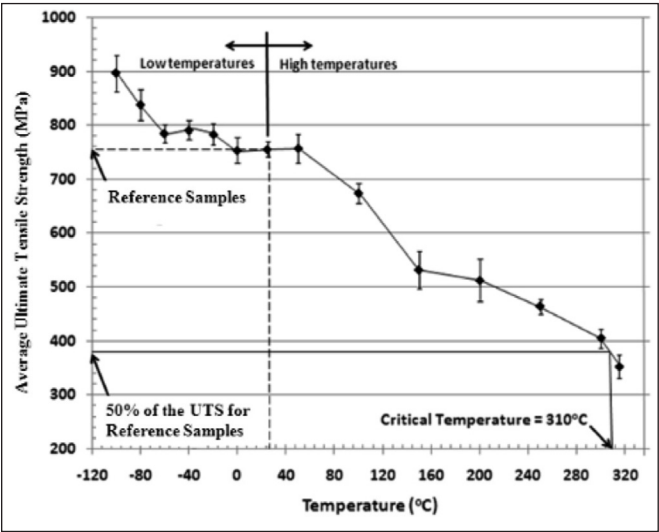


Figure 11: Tensile strength of GFRP bars tested at different temperatures

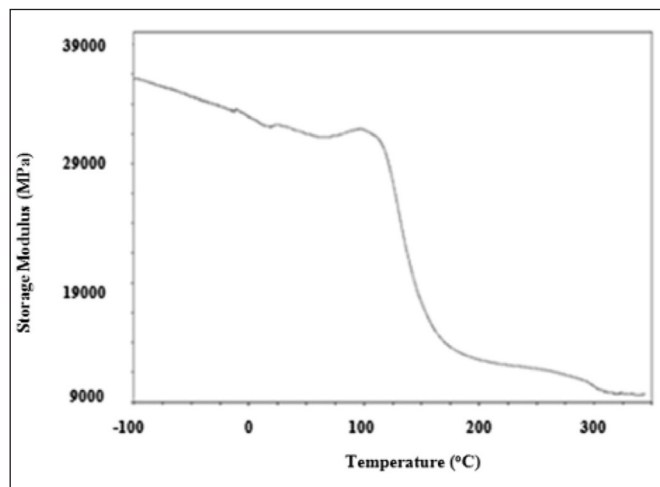


Figure 12: Flexural modulus of elasticity of GFRP bar specimen found by DMA between -100° and 350°C

Three different zones were identified in Figure 11: 1) the reference plateau between -40° and 50°C; 2) the zone where the stiffness increasing at temperatures lower than -50°C; and 3) the mechanical strength decreasing zone for temperatures near and above the glass transition temperature (T_g) of the polymer. The mechanical strengths between -40° and 50°C were stable. In this range of temperatures, the molecular chain mobility of the polymer did not change since the temperature was below T_g . This result showed that for standard environmental conditions of Nordic countries as Canada and north of USA (temperature ranging from -40 to 50 °C), the mechanical properties of GFRP bars were not changed. For temperatures lower than -50°C, the molecular chains mobility of the polymer decreased, leading to an increase of the mechanical stresses needed to rupture the material. Below T_g (around 120°C), the matrix was in a glassy state. When increasing the temperature and reaching the decomposition region, the breaking of molecular bonds started and the ductility of the material increased, leading to a decrease of mechanical strengths and stiffness of the material. At very high temperatures (greater than 300°C), strong degradation of the polymer occurred (combustion, oxidation...) and load transfer provided by the matrix was severely reduced.

If the critical temperature for FRP internal reinforcements is found from a tensile strength loss of 50 percents, such as for steel reinforcements, the results presented in Figure 11 can be used to determine the critical temperature for tested GFRP bars. Based on the experimental results, the critical temperature is equal to 310°C which is similar to the critical temperature found by Bisby and Kodur [28] for similar GFRP bars, and lower than the critical temperature of steel reinforcement, which is close to 500°C.

Trois différentes zones peuvent être identifiées sur la figure 11: 1) le plateau de référence entre -40 et 50°C, 2) la zone de températures sous -50°C, marquée par une augmentation de la rigidité, et 3) la zone de chute des propriétés mécaniques à des températures au-dessus de la température de transition vitreuse (T_g) du polymère. Il est donc clair que les propriétés mécaniques sont stables entre -40°

et 50°C. Dans cet intervalle de température, la mobilité des chaînes moléculaires du polymère ne change pas puisque la température est sous la T_g de ce dernier, expliquant la stabilité des résultats. Ce résultats montre que pour les conditions environnementales standard des pays nordiques comme le Canada et le nord des États-Unis, marqués par des températures allant de -40° à 50°C, les propriétés mécaniques ne sont pas significativement affectées. À des températures sous -50°C, la mobilité des chaînes moléculaires du polymère décroît, menant à une augmentation des contraintes nécessaires à la rupture du matériau. Sous T_g (autour de 120°C), les polymères se trouvent dans un état plutôt vitreux. Lorsque la température est augmentée et que la région de décomposition est atteinte, les liens moléculaires commencent à se briser entraînant une augmentation de la ductilité du polymère et à une chute de la résistance mécanique et de la rigidité du matériau. À température très élevée (plus de 300°C), une dégradation sévère du polymère survient (combustion, oxydation...) et le transfert de charge assuré jusque là par la matrice polymère est sévèrement réduit.

Si la température critique d'utilisation des renforcements internes en PRF est calculée à partir d'une réduction de 50% de la résistance en traction, comme c'est le cas pour l'acier d'armature, les résultats présentés à la figure 11 peuvent être utilisés pour déterminer cette température critique pour les barres d'armature en PRFV testées. La température critique mesurée est donc égale à 310°C approximativement, laquelle est semblable à la température critique trouvée par Bisby et Kodur [28] pour des barres de PRFV, comparativement à 500°C pour l'acier standard.

Figure 13 shows the failure mode for unconditioned and specimens exposed to temperature of 150°C during 2 hours. The tensile test of unconditioned specimens showed approximately a linear behavior up to the failure at any temperature. Specimens failing through the rupture of fibres were accompanied by delamination of the fibres and matrix. A similar, but less dramatic failure was observed for specimens tested at high temperatures. In this case, it was noted that the delamination of fibres and matrix was more important than for unconditioned specimens. It was noted that the ultimate elongation slightly decreased at low temperatures but no significant change was noted at high temperatures. The increase of the tensile strength and flexural modulus and the decrease of ultimate elongation were constant in the temperature range. No ductile-brittle transition occurred in the GFRP materials at low temperature, contrary to steel which could present a ductile-brittle transition between -20° and -30°C [29].

La figure 13 montre le mode de rupture pour un échantillon de référence non-conditionné et pour un échantillon conditionné pendant deux heures et testés à 150°C. Les essais de traction des différents échantillons montrent un comportement plutôt linéaire jusqu'à la rupture. La rupture était dirigée par la rupture des fibres et était accompagnée d'un délaminage des fibres de la résine. Une rupture similaire mais moins dramatique a été observée pour les échan-

tillons testés à hautes températures. Dans ce cas, il a été noté que le délaminage des fibres et de la matrice était plus important que pour les échantillons de référence. Il a aussi été noté qu’une légère baisse de l’élongation à la rupture survenait à basse température, mais aucun changement signification n’a été noté à haute température. L’augmentation de la résistance en traction et du module élastique en flexion, ainsi que la diminution de l’élongation à la rupture sont toutes deux constantes dans l’intervalle de températures testées. Aucune transition ductile-fragile n’est survenue à basse température pour les barres de PRFV, contrairement à l’acier pouvant présenter une telle transition vers -20° ou -30°C [29].

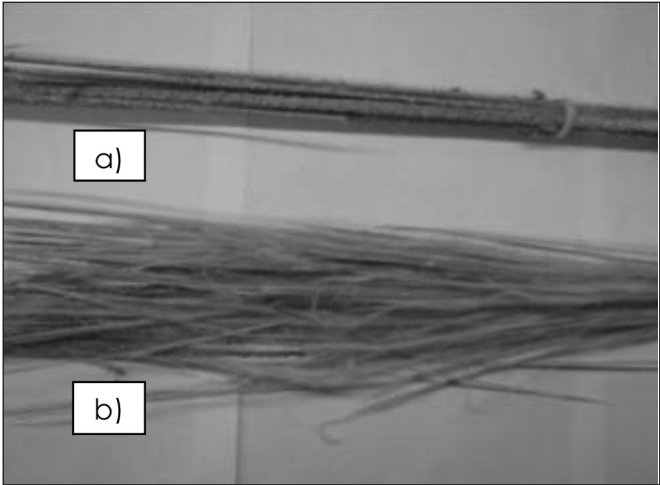


Figure 13: The failure mode of GFRP bars : a) tested at room temperature, and b) tested at 150°C.

3.2.2. Effect on Polymer Matrix

Figure 14 shows the mass variation of specimens as a function of temperature measured by TGA. It was seen that major weight loss occurred between 300 and 450°C. This important drop, up to 18%, was due to the thermal degradation of the polymer. At these temperatures, thermal degradation occurred and the molecular chains of the polymer broke, leading to the formation of microcracks both at the fibre/matrix interface and in the matrix phase (Figure 15). The weight losses measured by TGA showed a major degradation of the resin from 300°C to 450°C. Below this range of temperatures of degradation, the properties were recovered when the GFRP specimens were heated to the desired temperature and then tested at the ambient temperature. At this point, the experimental results suggest that irreversible loss of mechanical properties occurred above 300°C.

La figure 14 montre la perte de masse des échantillons de PRFV mesurée par TGA en fonction de la température. Il peut être vu qu’une perte de masse majeure survient entre 300° et 450°C. Cette importante chute de près de 18%, est due à la dégradation thermique du polymère. À ces températures, une dégradation thermique survient et les chaînes moléculaires du polymère se brisent, menant à la formation de microfissures dans la matrice et à l’interface entre les fibres et la résine (figure 15).

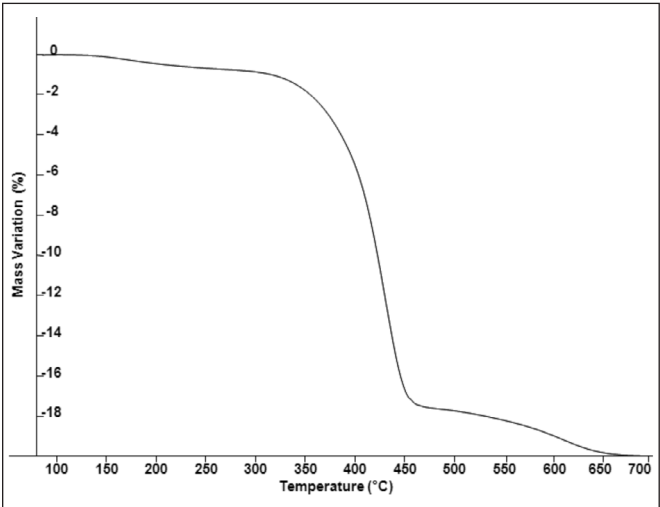


Figure 14: Mass variation of GFRP bar specimen when heated between 20° and 800°C.

Table 5 shows T_g measured by DSC for reference and specimen heated at 350°C for 2 hours. Noted that, for reference samples, an exothermic peak corresponding to post-curing occurred after T_g . The T_g of the reference specimen was equal to 113°C, whereas the specimens heated at 350°C for 2 hours was equal to 67°C. This showed that the matrix weakened when heated at elevated temperatures, which explained the causes of the observed large decrease of mechanical properties.

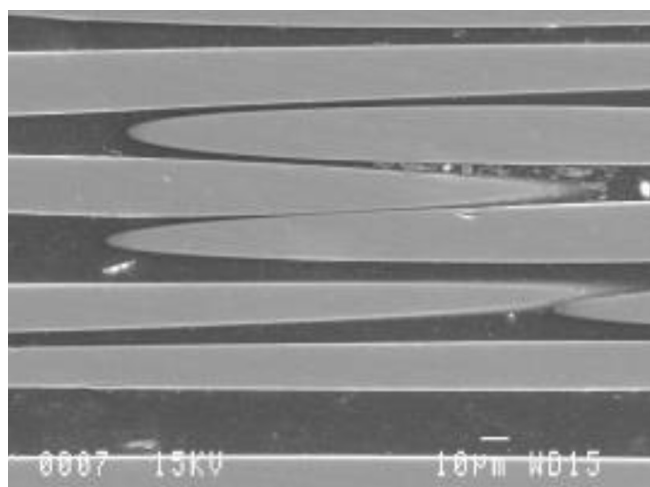
Le tableau 5 présente les T_g obtenus par DSC pour un échantillon de référence et un échantillon chauffé pendant 2 heures à 350°C. Il est à noter qu’un pic exothermique correspondant à une postcure du polymère est survenu après la T_g dans le cas de l’échantillon de référence. La T_g de l’échantillon de référence est égale à 113°C, tandis que celle de l’échantillon chauffé à 350°C pendant 2 heures est de 67°C. Ce résultat montre clairement une dégradation de la matrice lorsque cette dernière est chauffée à des températures élevées (350°C). Cette dégradation, menant à un affaiblissement de la matrice polymère, peut expliquer la chute significative des propriétés mécaniques.

Condition	Temperature (°C)	Duration (hours)	T_g 1 st run (°C)	T_g 2 nd run (°C)
Reference	20	2	113	135
High Temperature	350	2	68.5	67

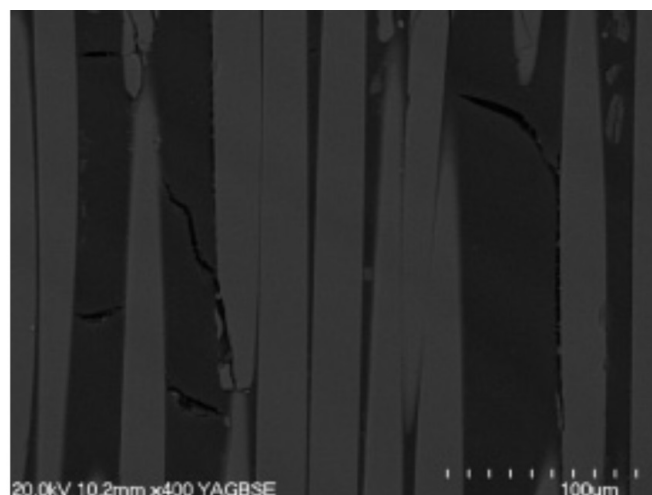
Table 5: Glass transition Temperature measured by DSC

3.2.3. Microstructural Effect of Extreme Temperatures

The polymer matrix degradation was confirmed by microstructural analysis. The micrographs presented in Figure 15 show the polymer, the fibre and the interface between the fibres and matrix for reference specimen and specimen conditioned at 350°C for two hours. The comparison of these micrographs showed that significant dam-



(a)



(b)

Figure 15: Micrographs of longitudinal fibre/ matrix interface of: a) unconditioned GFRP bar specimen, b) Conditioned GFRP bar specimen aged in air at 350°C for 2 hours.

age occurred for GFRP bar conditioned at 350°C (Figure 15b) as compared to reference sample (Figure 15a). The presence of microcracks in specimen tested at 350°C confirmed the degradation of the polymeric matrix and explained the loss of mechanical properties.

La dégradation de la matrice polymère est confirmée par l'analyse microstructurale. Les micrographies présentées à la figure 15 montrent le polymère, les fibres et l'interface entre les fibres et la résine pour un échantillon de référence et un échantillon conditionné à 350°C pendant 2 heures. La comparaison de ces micrographies montre que des dommages significatifs sont survenus pour les barres de PRFV conditionnées à 350°C (figure 15b) comparativement à l'échantillon de référence (figure 15a). La présence de microfissures dans l'échantillon conditionné à 350°C confirme la dégradation de la matrice polymérique et explique la perte de propriétés mécaniques.

4. CONCLUSIONS

Based on the results of this study the following conclusions may be drawn:

1. The aging of mortar-wrapped GFRP bars in tap water is significantly less pronounced than traditional aging in simulated pore solution. The loss in the tensile strength and the microstructural/physical effects were significantly reduced.
2. Even at high temperature (50°C), where the environment is the more aggressive, the change in tensile strength is minor. For example, increasing the temperature of the solution from 40 to 50°C during 240 days results in a decrease of the tensile strength retention by 10 to 16% of the original tensile strength.
3. No significant microstructural changes were observed after 240 days immersion of GFRP bars embedded in

concrete in tap water at 50°C. The interfaces between the bars and concrete and between the resin and the fibres don't seem to be affected by the moisture absorption and high temperatures.

4. The polymer matrix is not affected by moisture absorption and high temperatures: no changes of the glass transition temperature occur as observed by differential scanning calorimetry.
5. High stress level (more than 60% of the UTS) leads to fibre cracking, resulting in an increase of moisture uptake at saturation and a decrease of GFRP density related to the higher void content.
6. After 240 days water immersion of pre-loaded bar embedded in mortar, the retention rate of tensile strength are 95, 96 and 98% at 50, 40, and 23°C, respectively.
7. No significant microstructural changes were observed after 240 days immersion of GFRP bars embedded in mortar in tap water at 50°C after a pre-loading of 80% of the UTS. The interface between the resin and the fibres did not seem to be affected by the moisture absorption and high temperatures.
8. DSC analysis did not show any non-reversible degradation of the polymer chemical structure due to the aging of pre-loaded bars in moist concrete at 50°C during 240 days. No changes of the glass transition temperature occur as observed by differential scanning calorimetry.
9. Mechanical properties (tensile, shear and flexural strengths) and flexural elastic modulus of GFRP bars increased when the temperature decreased. This phenomenon was due to the increase of stiffness of the amorphous polymer matrix due to low temperatures.
10. At severe temperatures experienced in Northern regions such as Canada (temperature ranging from -40° to 50°C), the tensile strength and flexural modulus of elasticity appeared to be stable, which showed that the mechanical behavior of GFRP bars was not affected by temperature in this range of temperature.

La présente étude permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Le vieillissement par immersion dans l'eau de barres de PRFV enrobées de béton est moins sévère et reflète mieux la réalité que les vieillissements traditionnels en solution alcaline. La perte de résistance en traction et les effets microstructuraux et physiques sont significativement réduits.
2. Même à haute température (50°C), lorsque l'environnement est le plus agressif, les changements de résistance en traction sont mineurs. Par exemple, augmenter la température de vieillissement de 40° à 50°C mène à une diminution du taux de rétention de la résistance en traction initiale de 6%.
3. Aucun changement microstructural n'a été observé sur les barres enrobées de béton et immergées dans l'eau à 50°C pendant 240 jours. Les interfaces entre les barres et le béton et entre la résine et les fibres ne semblent pas avoir été affectées par l'absorption d'humidité et par les températures élevées.
4. La matrice polymérique n'est pas affectée par l'absorption d'humidité et les températures élevées. Les mesures en calorimétrie différentielle à balayage n'ont montrées qu'aucun changement de la température de transition vitreuse ne survenait.
5. Le pré-chargement en traction des échantillons de PRFV à des niveaux de chargement élevés (plus de 60% de la charge ultime en traction) mènent à la fissuration des fibres. Cette initiation de fissures crée une augmentation de l'absorption d'humidité à saturation et une diminution de la densité du composite de PRFV. Ces effets physiques sont liés à l'augmentation du taux de porosités des échantillons pré-chargés vu la fissuration des fibres.
6. Après 240 jours d'immersion dans l'eau de barres de PRFV pré-chargées à 80% de leur charge ultime en traction et enrobées de béton, les taux de rétention de leur résistance en traction initiale sont de 95, 92 et 90% à 23°, 40° et 50°C, respectivement.
7. Aucun dommage microstructural n'a été observé sur les échantillons pré-chargés à 80% de leur charge ultime en traction, enrobés de béton et conditionnés dans l'eau à 50°C pendant 240 jours. L'interface entre les fibres et la résine ne semble pas avoir été affectée par l'absorption d'humidité et les températures élevées.
8. La matrice polymère des échantillons pré-chargés à 80% de leur charge ultime en traction, enrobés de béton et conditionnés dans l'eau à 50°C pendant 240 jours n'est pas affectée par l'absorption d'humidité et les températures élevées. Les mesures en calorimétrie différentielle à balayage n'ont montrées qu'aucun changement de la température de transition vitreuse ne survenait.
9. Les propriétés mécaniques résiduelles (résistances en traction et module élastique en flexion des barres de PRFV) augmentent avec la baisse de la température. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la rigidité de la matrice polymère amorphe à basses températures.
10. À des températures généralement observées dans les régions nordiques comme le Canada (températures allant de -40° à 50°C), la résistance résiduelle à la traction et le module élastique en flexion semble

demeurer stable, montrant que le comportement mécanique des barres de PRFV n'est pas affecté par la température dans cette gamme de températures.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the National Science and Engineering Research Council (NSERC) of Canada, the Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) and the Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS Canada). The authors also want to thank the FRP bar manufacturer (Pultrall inc.) and The Ministry of Transportation of the province of Québec for their technical support.

Ces travaux de recherche ont été supportés par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) et le Réseau de Centres d'excellence du Canada sur les innovations en structures avec systèmes de détection intégrés (ISIS Canada). Les auteurs tiennent également à remercier la compagnie Pultrall inc. et le Ministère des transports du Québec pour leur implication.

6. REFERENCES

- [1] Nkurunziza, G., Benmokane, B., Debaiky, A. S., Masmoudi, R. (2005). Effect of sustained load and environment on long-term tensile properties of glass FRP reinforcing bars. *ACI Structural Journal*, vol. 102, n°4, p. 615-621.
- [2] Berthelot, J.-M (1992) Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures, Masson, Paris, 620 p.
- [3] Robert, M., Cousin, P., Benmokane, B. (2009). Influence de la température sur le comportement des composites pour le génie civil. *Les Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, vol. 6, p. 21-27.
- [4] American Concrete Institute (2006). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 2006, 44p (code ACI 440.1R-06).
- [5] Canadian Standards Association (2002). Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymer. *Canadian Standards Association*, Rexdale, Ontario, Canada, 177 p (code CAN/CSA-S806-02).
- [6] Canadian Standards Association (2006). Canadian Highway Bridge Design Code. *Canadian Standards Association*, Rexdale, Ontario, Canada, 757 p (code CAN/CSA-S6-06).
- [7] Japanese Society of Civil Engineering (1997). Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforced Materials. *Japanese Society of Civil Engineers*, 120 p (code JSCE 1997).

- [8] Canadian Standards Association (2010). Specification for fibre-reinforced polymers. *Canadian Standards Association*, Rexdale, Ontario, Canada, 44 p (code CAN/CSA-S807-10).
- [9] American Concrete Institute (2008). Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 2008, 5p (code ACI 440.5-08).
- [10] Intelligent sensing for innovative structures. (2006). *Specifications for Product Certification of Fibre Reinforced Polymers (FRPs) as Internal Reinforcement in Concrete Structures*. The Canadian Network of Centres of Excellence, ISIS Canada, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 27 p.
- [11] Benmokrane, B., El-Salakawy, E. (1997). In the Proceedings of the Third International Conference on Durability and Field Applications Of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, CDCC, 569 p.
- [12] Benmokrane B, Wang P, Ton-That T, Rahman H, Robert J. (2002). Durability of glass fibre reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. *Journal of Composite for Construction*, vol. 6, n°2, p.143-153.
- [13] Uomoto, T. (2004). Development of new GFRP with high alkali resistivity. In the Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-IV, Calgary, Alberta.
- [14] Vijay, P. V., Gangarao, H.V.S., et Kalluri, R.(1998) Hygrothermal Response of GFRP Bars under Different Conditioning Schemes, In the Proceedings of the 1st International Conference on Durability of fiber Reinforced Polymer for Construction (CDCC'98), Sherbrooke, Canada, p.243-252.
- [15] Yilmaz, V.T. et Glasser, F. P. (1991). Reaction of Alkali-resistant Glass Fibres with Cement, Part I, Review, Assessment, and Microscopy. *Glass Technology*, vol.32, n°3, p.91-98.
- [16] Tannous, F.E. (1997). *Durability of AR Non-Metallic Reinforcement Bars and Prestressing Tendons*. Thèse de doctorat, Université d'Arizona, Tucson, Arizona, 287 p.
- [17] Porter, M. L., and Barnes, B., A. (1998). Accelerated aging degradation of glass fiber composites. In Proceedings of the 2nd International Conference on Composites in Infrastructure, vol. II, ICCI, Tucson, Arizona, p. 446-459.
- [18] Swit, G. (2000). *Durability of Stressed E-glass Fibre in Alkaline Medium*. In Recent Developments in Durability Analysis of Composite Systems, Cardon, Fukuda, Reifsneider and Verchery Editions, Balkema, Rotterdam, pp. 473-476
- [19] Valter, T. et Ralejs, T. (2001). Durability and Service Life Prediction of GFRP for Concrete Reinforcement. In the Proceedings of FRPRCS-5 fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, University of Cambridge, vol.1, p.505-514
- [20] Sen, R., Mullins, G., et Salem, T. (2002) Durability of E-Glass/Vinylester Reinforcement in Alkaline Solution, *ACI Structural Journal*, vol. 99, n°3, p. 369-375.
- [21] Chu, W., Karbhari, V.M. (2005). Effect of Water Sorption on Performance of Pultruded E-Glass/Vinylester Composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 17, n°1, p. 63-71.
- [22] Mercier, J.-P., et Maréchal, E.(1993) Chimie des polymères, Synthèse, réactions, dégradations. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 448 p.
- [23] Bank L. C., Gentry T. R., Barkatt A., Prian L., Wang F. and Mangla S. R. (1998). Accelerated aging of pultruded glass/vinyl ester rods, In the Proceedings of the Second International Conference on Fiber Composites in Infrastructure ICCI, vol. 2, p. 423-437.
- [24] Benmokrane B, Ton-That, T., Robert, J.F., and Mukhopadhyaya, P. (1999). *Durability studies of composite GFRP C-bar reinforcing rods*. Technical Progress Report No.8 submitted to Marshall Industries Composites, inc., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 105 p.
- [25] Dejke, V. (2001) *Durability of FRP reinforcement in concrete-Literature Review and Experiments*, Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, January 2001,212 p.
- [26] Thomason, J.L. (1995). The Interface Region in Glass Fibre-reinforced Epoxy Resin Composites: 3. Characterization of Fibre Surface Coatings and the interphase. *Composites*, vol. 26, n°7, p.487-498.
- [27] Byars, E. A., Waldron, P., Dejke, V, and Demis, S. (2001). Durability of FRP in Concrete – Current Specifications and a New Approach. *FRP Composites in Civil Engineering*, vol. 2, p. 1497-1507.
- [28] Bisby, L.A., Kodur, V.K.R. (2007). Evaluating the fire endurance of concrete slabs reinforced with FRP bars: Considerations for a holistic approach. *Composites : Part B*, vol.38, p.547-558.
- [29] Panigrahi, B.K. (2006). Microstructures and properties of low-alloy fire resistant steel. *Bulletin of Material Science*, vol.29, n°1, p.59-66.