

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LE COMPORTEMENT DES COMPOSITES DE PRF POUR LE GÉNIE CIVIL

M. ROBERT, P. COUSIN, B. BENMOKRANE
Mathieu.Robert2@USherbrooke.ca – Patrice.Cousin@USherbrooke.ca
Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

De nos jours, bon nombre de structures en béton armé ayant été exposées à des environnements agressifs présentent des problèmes de durabilité et risquent de ne pas atteindre leur durée de vie utile théorique. La corrosion induite par les chlorures et/ou la carbonatation est la principale cause de détérioration des structures de béton armé. Les coûts des réparations et des restaurations effectuées aux USA, au Canada et dans la plupart des pays européens représentent un fort pourcentage des dépenses reliées aux infrastructures. En Europe par exemple, le coût annuel des réparations dues à la corrosion des barres d'acier d'armature est estimé à un milliard d'Euros [Nkurunziza, 2005]. L'utilisation de sel de déglaçage et les cycles de gel-dégel constituent des agresseurs importants dans les pays nordiques. À ces agents corrosifs, s'ajoute l'augmentation des charges utiles sur les routes par suite de l'accroissement du volume des activités

économiques dans les pays industrialisés durant les trente dernières années. Conséquemment les ponts construits dans les années cinquante et soixante sont soumis à des charges supérieures à celles pour lesquelles ils ont été conçus, pouvant même atteindre le double des charges de calcul. Cette augmentation combinée aux effets des agents corrosifs entraîne une détérioration importante de nombreuses structures en béton.

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. 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.

1.2. Matériaux composites

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 [Berthelot, 1992]. Les matériaux composites de PRF sont constitués d'un renfort (fibres) protégé et supporté par une résine appelée matrice (figure 1).

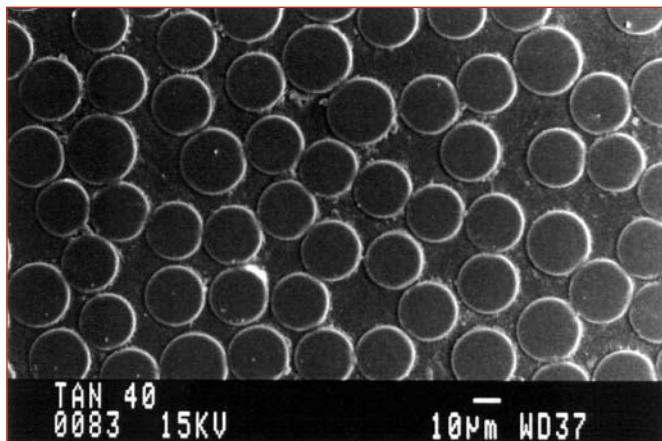


Figure 1: Fibres de verre dans une matrice polymère.

Les principales fibres ayant fait l'objet d'études 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 fibre 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. 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 2) et les laminés pour la réhabilita-

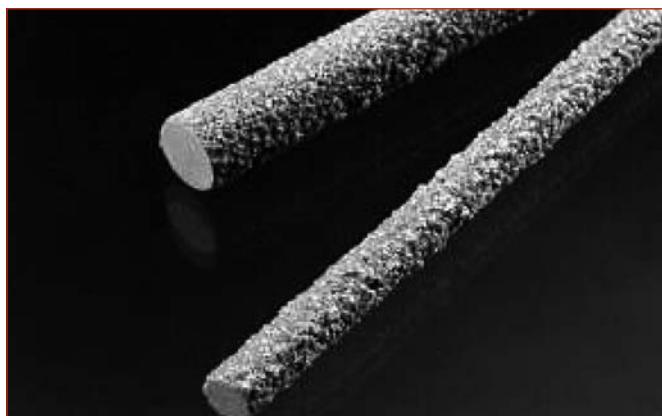


Figure 2: Barres d'armature en PRFV.

tion externe de structures existantes. Plusieurs ouvrages contenant des composites de PRF comme renforcement interne du béton ont déjà été construits dans le monde (figure 3) et plusieurs codes et guides de calcul traitant de l'armature en matériaux composites pour les structures de béton ont été développés (CAN/CSA-S806-02 ; CAN/CSA-S6-06 ; ACI 440.1R-06 ; JSCE). Aussi, plusieurs codes de spécifications des propriétés pour l'homologation des produits de composites de PRF pour leur utilisation en génie civil ont été développés (ISIS, 2006 ; ACI 440.5-08 ; ACI 440.6-08).



Figure 3: Tablier de pont en béton armé de PRFV.

1.3. État actuel

Face à l'arrivée d'un nouveau produit, le milieu du génie civil a été longtemps considéré comme réservé. Cependant, 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 sous charge soutenue. L'utilisation de vieillissements accélérés en laboratoire, simulant l'environnement d'application des composites de PRF pour évaluer leur propriétés mécaniques résiduelles et prédire la perte de propriétés à long terme est très commune pour les scientifiques étudiant la durabilité de ce type de matériau. Dans un vieillissement accéléré, le matériau est vieilli prématûrement en utilisant un paramètre accélérant, généralement la température. En effet, la théorie d'Arrhenius suppose que si un seul phénomène de dégradation survient dans une certaine plage de température et

qu'aucun autre mécanisme ne se déclenche, l'effet du temps et de la température pourra être considéré comme équivalent dans cette plage de température, autrement dit que l'effet du temps pourra être simulé en augmentant la température.

Se basant sur l'hypothèse que la loi d'Arrhenius était respectée, plusieurs travaux ont été menés afin d'étudier la durabilité des composites de PRFV soumis en laboratoire à divers environnements pouvant simuler les conditions réelles d'application. Porter *et coll.* (1997) ont exposé trois différents types de barres d'armature en résine polyester isophthalique renforcée de fibres de verre de type E à une solution alcaline et à une température maximale de 60°C durant des périodes allant de deux à trois mois. Leurs résultats expérimentaux indiquent que les vieillissements accélérés réalisés réduisaient sévèrement la résistance ultime en traction des barres d'armature de PRFV. Dejke (1999) a démontré pour sa part que certaines fibres de verre se dégradaient en présence d'eau et que l'humidité pouvait diminuer la température de transition vitreuse (Tg) de la résine polymère en agissant comme un plastifiant et réduire potentiellement la résistance en flexion des barres de PRFV. La réaction des composites de PRF aux alcalis du béton est un des soucis majeurs des ingénieurs en conception soucieux de la durabilité de ces nouveaux matériaux. L'environnement typiquement alcalin du béton, qui dépend du mélange de conception de béton et du type de ciment utilisé [Diamond, 1981 ; Taylor, 1987] endommage les fibres de verre en diminuant la dureté et la résistance et en les fragilisant.

Les fibres de verre sont endommagées par la combinaison de deux phénomènes: (1) l'attaque chimique des fibres de verre par l'environnement alcalin du béton et (2) la croissance et l'augmentation de la concentration de produits d'hydrolyse entre les monofilaments de verre [Murphy *et coll.*, 1999]. La fragilisation des fibres est due à la nucléation d'hydroxyde de calcium sur la surface des fibres. La formation d'hydroxyde peut attaquer la surface des fibres de verre et une augmentation de la rugosité de cette dernière, ce qui peut agir comme défauts réduisant significativement les propriétés des fibres en présence d'humidité. De plus, les hydroxydes de calcium, de sodium et de potassium trouvés dans le béton humide sont fortement agressifs pour les fibres de verre. La dégradation des fibres de verre dépend donc non seulement du pH élevé du béton humide, mais aussi de la combinaison des sels alcalins, du pH et de l'humidité. Le taux de réaction de tous ces phénomènes de dégradation augmentent avec la température, faisant penser que la dégradation globale des composites de PRF soumis à des vieillissements accélérés en solutions est en fait un ensemble de plusieurs réactions simples faisant appel aux mêmes mécanismes sur toute la gamme de température de vieillissement. Pour cette raison, plusieurs chercheurs utilisent des températures de vieillissement très élevées (jusqu'à 80°C) pour accélérer au maximum les phénomènes de dégradation.

Cet article établit les effets de l'utilisation de températures de vieillissement élevées sur le taux de réaction de dégradation des composites de PRF soumis à des solutions aqueuses. Quelques résultats expérimentaux sont présentés quant à la perte de propriétés en flexion et à l'augmentation du taux d'absorption d'humidité des composites de PRF.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Matériaux

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, 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 2). Les barres sont fabriquées à partir de fibres de verre continues de type E imprégnées avec une résine vinylester par un procédé de pultrusion. La fraction massique de verre mesurée par analyse thermogravimétrique selon la norme ASTM E 1131 est de 81,5 %. La densité relative mesurée selon la norme ASTM D 792 est égale à 1,99. Des vieillissements accélérés par immersion complète dans l'eau d'aqueduc des barres de PRFV ont été effectués à 23°, 40°, 60° et 80°C avec différents temps d'exposition.

2.2. Essais de flexion

Des essais de flexion quatre points permettant de mesurer la rétention de la résistance en flexion des barres de PRFV ont été réalisés selon la norme ASTM D 4476. Quelques modifications ont été apportées à la norme utilisée, comme l'utilisation de barres à section circulaire au lieu de barres à section semi-circulaire. Un surplomb de 10 % de l'espacement entre les appuis inférieurs a été utilisé. La figure 4 montre le montage expérimental utilisé pour la réalisation des essais de flexion des barres de PRFV. Une presse universelle à commande manuelle d'une capacité de 270 kN a été utilisée pour la réalisation des tests de flexion. Les échantillons ont été chargés sous force contrôlée à un taux approximatif de 5 MPa/sec. Cinq échantillons ont été testés après 100 et 120 jours d'exposition.

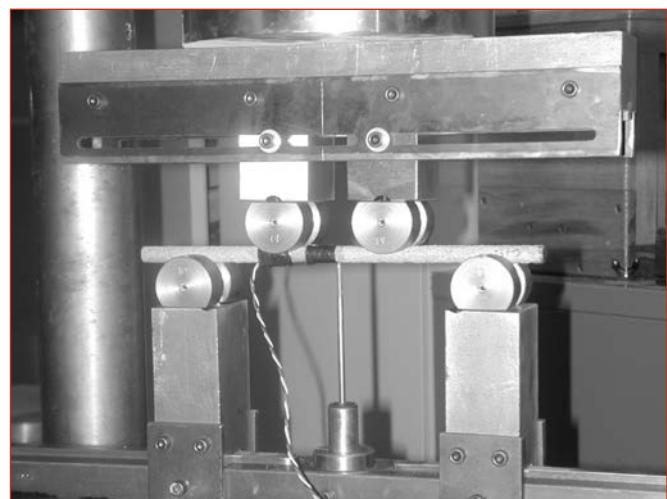


Figure 4: Montage expérimental de l'essai de flexion 4 points de barres de PRFV.

2.3. Absorption d'humidité

Des mesures d'absorption d'humidité ont été périodiquement prises en retirant les échantillons de l'eau, en les séchant et en mesurant immédiatement leur poids. Les mesures ont été faites jusqu'à saturation selon la norme ASTM D 570. Le gain de masse a été corrigé pour prendre en compte la perte de masse éventuelle des échantillons par dissolution ou décollement de matière. Cette correction a été effectuée en mesurant la masse des échantillons séchés après immersion et en la rapportant à la masse initiale.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1. Perte de résistance en flexion

La figure 5 montre la perte de résistance en flexion observée avec les barres de PRFV conditionnées dans l'eau d'aqueduc pendant 100 et 120 jours (Wang, 2005). Les résultats expérimentaux montrent que l'effet de la température sur les propriétés mécaniques en flexion des composites soumis à un vieillissement accéléré utilisant la température comme le facteur accélérant, n'est pas constant entre la température ambiante et 80°C. La figure 5 montre que la dégradation du matériau est plus importante entre 60° et 80°C qu'entre 40° et 60°C, alors qu'elle est la plus faible entre la température ambiante et 40°C (Wang, 2005). Puisque l'amplitude de l'augmentation de la perte de résistance mécanique est plus grande aux températures plus élevées, les prédictions basées sur des températures très élevées ($> 50^\circ\text{C}$) peuvent surestimer la dégradation suite à l'exposition aux conditions réelles d'application et donc sous-estimer la durabilité à long terme du matériau.

3.2. Absorption d'humidité

La figure 6 présente la tendance générale de l'absorption d'humidité d'échantillons de PRF immersés dans l'eau d'aqueduc (Wang, 2005). Les résultats présentés sont les valeurs moyennes obtenues pour cinq échantillons diffé-

rents. Tel qu'attendu, plus la température d'immersion est élevée (ou plus le temps d'immersion est long), plus l'absorption d'humidité est élevée. Les taux d'absorption d'humidité à saturation sont égaux à 0,7 % pour les échantillons immersés à 23°, 40°, 60°C et à 1,8 % pour ceux immersés à 80°C. Ces observations indiquent une différence majeure entre la diffusion d'humidité à basses températures (23°, 40° et 60°C) et à hautes températures (80°C). Ceci pourrait être expliqué par un phénomène thermomécanique comme nous le verrons ci-dessous.

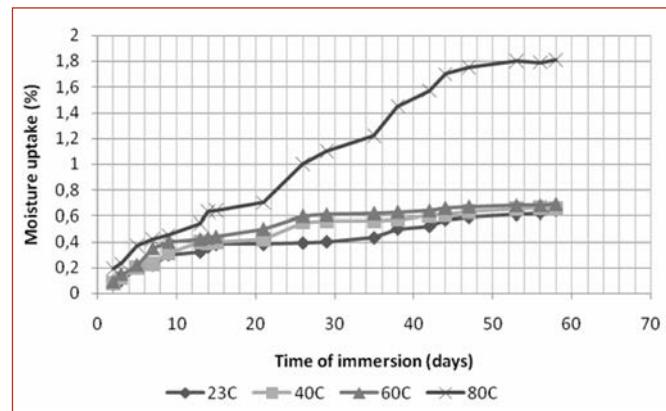


Figure 6: Absorption d'humidité de barres de PRFV immersées dans l'eau en fonction du temps.

4. DISCUSSION

L'augmentation de type exponentiel de la perte de résistance en flexion et l'augmentation de l'absorption d'humidité à saturation avec la température peuvent être expliquées par deux phénomènes distincts, le premier cinétique qui pourrait être le plus important et le second thermomécanique.

4.1. Phénomène cinétique

Il peut facilement être présumé que la perte de résistance mécanique des composites de PRF soumis à un vieillissement accélérés sous différentes conditions (type d'environnement, température, niveau de chargement, etc.) peut être reliée à plusieurs réactions chimiques simples. De plus, il est attendu que le niveau de rétention des propriétés mécaniques sera inversement proportionnel au niveau de dégradation, c'est-à-dire au taux de dégradation chimique du matériau. Par exemple, dans le cas d'un composite de résine vinylester renforcée de fibres de verre soumis à un conditionnement dans une solution alcaline, les alcalis peuvent réagir avec les fibres de verre par des mécanismes de dissolution et aussi réagir avec le polymère via un processus d'hydrolyse. Selon l'équation d'Arrhenius suivante, on voit que le taux de réaction est relié à la température de vieillissement :

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (1)$$

k est une constante reliée au taux de dégradation, E_a l'énergie d'activation de la réaction de dégradation, R la constante des gaz parfaits et T la température absolue.

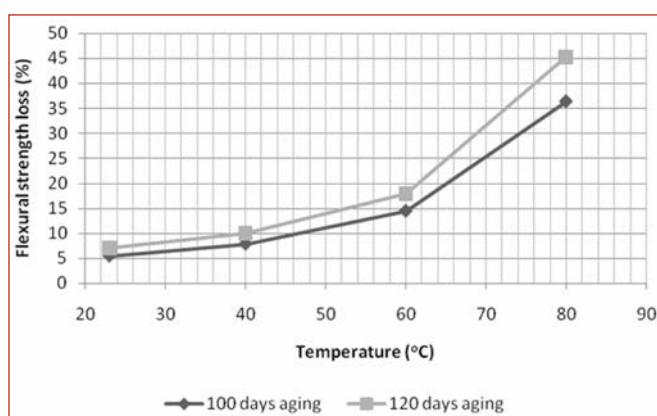


Figure 5: Perte de résistance en flexion en fonction de la température.

Dans la grande majorité des réactions, cette équation montre que pour chaque augmentation de 10°C, le niveau de dégradation augmente d'un facteur de 2 à 3 (généralement près de 2). La figure 7 montre l'effet de l'augmentation de température de 20° à 80°C sur la vitesse de réaction, lorsque ce dernier double à chaque augmentation de 10°C. On peut observer à la figure 7 que l'augmentation de la vitesse de réaction est presque linéaire entre la température ambiante et 50°C, tandis qu'elle devient exponentielle au fur et à mesure que la température s'élève (plus de 60°C). Par conséquent, une petite augmentation de température, lorsque celle-ci est déjà élevée, amplifiera la perte de résistance mécanique. La comparaison des figures 5 et 7 confirme que l'effet de température sur la résistance en flexion d'un composite de PRFV conditionné dans l'eau est semblable à celui exercé sur la vitesse d'une réaction chimique simple.

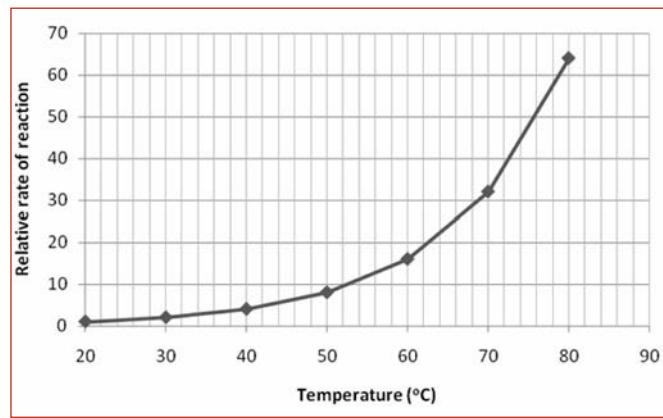


Figure 7: Vitesse de réaction relative en fonction de la température.

La figure 8 montre la perte de résistance en flexion de barres de PRFV après 120 jours de conditionnement en fonction d'une vitesse de réaction doublant à chaque augmentation de 10°C. En traçant ces données, nous obtenons une ligne droite parfaite qui montre que les propriétés mécaniques peuvent être traitées comme des réactions chimiques simples. Il devient donc possible de calculer le facteur accélérant comme une fonction de la température à partir d'une température de référence correspondant à la température annuelle moyenne (TAM) d'application (exemple TAM = 6°C pour Montréal, Canada, selon environnement Canada). Il doit être noté que dans les régions soumises à de grandes variations de températures comme le Canada, un vieillissement d'une année à la température moyenne n'est pas équivalent à un vieillissement d'une année aux températures variant autour de cette température médiane. En fait, pour deux secteurs ayant la même température moyenne, la dégradation sera inférieure dans la région ayant la variation de température la plus faible du fait de l'équation Arrhenius qui établit que la dégradation ne varie pas linéairement avec la température mais exponentiellement. La figure 9 montre les valeurs du facteur accélérant en fonction des températures de conditionnement pour une température de référence égale à 6°C.

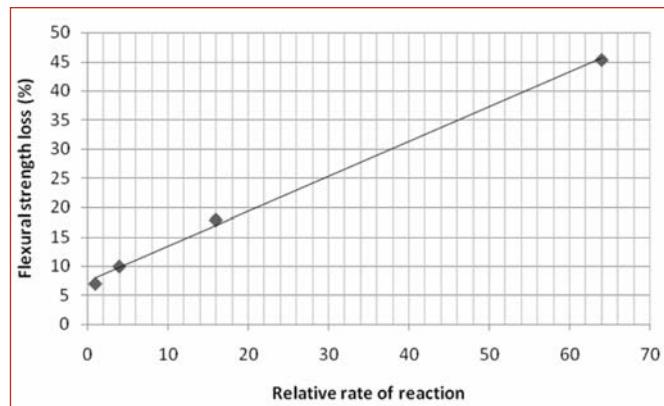


Figure 8: Relation entre la perte de résistance en flexion et la vitesse relative de réaction.

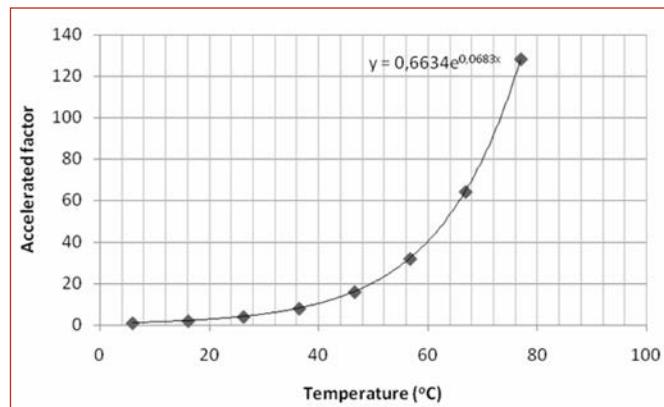


Figure 9: Facteur accélérant en fonction de la température.

4.2. Phénomène thermomécanique

Selon la théorie Arrhenius, les mécanismes de dégradation affectant un matériau doivent être quantitativement et qualitativement les mêmes sur la totalité de la plage des températures de vieillissement accéléré utilisées (Bank *et coll.*, 2003). Les composites de PRF sont composés de fibres de verre très stables à hautes températures. Cependant, la phase polymère ne peut pas supporter une gamme de températures aussi élevées. Quand la température de transition vitreuse de la résine, T_g , est atteinte (entre 110° et 130°C pour les résines vinylester), la structure et le comportement de la résine change profondément, passant d'un état vitreux à un état viscoélastique. Quelques changements peuvent aussi être observés avant T_g et il a été observé que certaines propriétés des résines vinylester commencent à être affectées à des températures aussi basses que T_g -50°C (Foster et Bisby, 2008). Une des caractéristiques principales des résines polymères qui est affecté autour de T_g est l'expansion thermique. À l'état vitreux et bien en dessous de T_g , le coefficient d'expansion thermique de la résine est constant. Quand la température du matériau s'approche de T_g , ce coefficient et par conséquent le volume libre du polymère, augmente rapidement, menant à un matériau légèrement moins dense. De plus, la rigidité et le module d'élasticité du composite polymère commence à diminuer. Ces deux phénomènes créent un matériau plus poreux qui peut absorber une plus grande quantité de solution (voir la figure 6), augmentant les mécanismes de dégradation.

Dans le cas des composites vinylester-verre, il est probable que la solution diffusant dans le matériau remplisse plus facilement l'espace libre à l'interface fibre-résine et commence à réagir avec les molécules de la résine polymère ou de la silice des fibres avoisinantes. Puisque la quantité d'eau et éventuellement la quantité d'ions dissous sera plus concentrée à l'interface fibre-résine que dans la résine elle-même, les réactions de dégradation seront plus importantes dans cette région. Par exemple, la réaction d'hydrolyse menant à la rupture de chaînes moléculaires du polymère pourrait être fortement localisée à l'interface fibre-résine et presque inexistante dans le reste du matériau. Par conséquent, la quantité de chaînes hydrolysées pourrait être très faible, et peut-être même non détectable, comparativement à la quantité totale de résine tout en étant concentrée à l'interface fibre-résine, zone essentielle au transfert des charges mécaniques dans le matériau. Puisque la région de l'interface entre les fibres et la résine est en partant le point faible des composites polymères, tout changement, même faible, survenant à ce niveau peut affecter de manière importante le comportement du matériau en réduisant le transfert de charges entre les fibres.

Deuxièmement, les coefficients d'expansion thermiques (CET) de la résine et des fibres de verre sont respectivement égaux à $33 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ et $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Quand le matériau composite est chauffé, la grande différence entre les CET produit un effort de cisaillement principalement situé dans la région où les deux composants sont en contact, c'est-à-dire l'interface. Cela peut induire un phénomène de décollement/délamination des fibres et l'apparition de vide à l'interface. De plus, il a été observé que le coefficient d'expansion thermique transversal des barres, qui est grandement lié à celui de la résine (alors que le CET longitudinal est lié à celui des fibres) n'est pas constant sur une grande gamme de températures puisqu'il augmente quand le matériau est au-dessus de 40° ou 50°C (Masmoudi *et coll.*, 2005). Par conséquent, le phénomène thermomécanique de dégradation serait amplifié quand des températures de vieillissement trop élevées seraient utilisées, menant à une « sur dégradation » du matériau composite.

5. CONCLUSION

La dégradation des composites de PRF conditionnés en solution aqueuse peut être reliée à des réactions chimiques de dégradation impliquant plusieurs phénomènes distincts (cinétique et thermomécanique). L'effet de la température est le plus important comparativement aux autres facteurs comme le temps ou les charges soutenues. Par exemple, si le temps de vieillissement en solution aqueuse est choisi comme un paramètre de dégradation, le niveau de dégradation devrait être proportionnel à la durée du conditionnement tant que le matériau composite est entièrement et également saturé de solution. Dans ce cas, un temps de vieillissement double doublera le niveau de dégradation. Au contraire, l'effet de la température est plus important puisque le taux de dégradation chimique, comme n'importe quelle réaction chimique, n'est pas proportionnel à la température mais varie exponentiellement avec cette dernière.

Une nouvelle approche de l'utilisation des vieillissements accélérés pour la prédiction du comportement à long terme des composites de PRF doit être élaborée. Dans cette optique, quelques chercheurs [Robert *et coll.*, 2009 ; Davalos *et coll.*, 2008] ont mis au point des techniques de conditionnement reflétant mieux la réalité, en immergeant des échantillons enrobés de béton dans de l'eau à une température maximale de 50°C . Ces paramètres de vieillissement simulent mieux les conditions d'applications réelles comparativement aux paramètres traditionnels de vieillissement par immersion en solution alcaline à haute température. En effet, Robert *et coll.* (2009) ont conclu à la suite de vieillissements accélérés en eau tempérée de barres de PRFV enrobées de béton que la perte des propriétés mécaniques en traction ne devrait pas dépasser 25 % après 200 ans d'utilisation, garantissant ainsi une résistance à long terme largement supérieure aux contraintes de conception utilisées par les principaux codes de conception en vigueur (CAN/CSA-S806-02 ; CAN/CSA-S6-06 ; ACI 440.1R-06 ; JSCE). Ces résultats semblent corroborer ceux recueillis sur le terrain par Mufti *et coll.* (2005) qui démontrent qu'après près de 10 ans d'utilisation, aucun changement physique ou microstructural n'est survenu sur des barres de PRFV utilisées dans la construction de différents ouvrages au Canada. On peut conclure de ces considérations que les modèles prédictifs servant à extrapoler les résultats des vieillissements accélérés en durée de vie utile réelle doivent prendre en compte les phénomènes de dégradation liés à l'utilisation de températures de conditionnement trop élevées. L'utilisation de températures très élevées (supérieures à 50° ou 60°C), qui est pratique courante dans les études sur la durabilité des composites pour leur applications en génie civil, mènerait à une surestimation des processus de dégradation sur les très longues périodes et influencerait négativement les concepteurs et les ingénieurs des travaux publics potentiellement intéressés à les utiliser.

6. RÉFÉRENCES

- ACI 440.1R-06 (2006) “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2006, 44p.
- ACI 440.5-08 (2008) “Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008, 9p.
- ACI 440.6-08 (2008) “Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008, 10p.
- ASTM D 570 (2005). “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.” American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 792 (2000). “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.” American Society for Testing and Materials.

- ASTM E 1131 (2003). "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry." American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 4476 (2000). "Standard test method for flexural properties of fiber reinforced pultruded plastic rods" American Society for Testing and Materials.
- Bank, L.C, Gentry, T.R, Thompson, B.P, Russel, J.S (2003). "A Model Specification for Composites for Civil Engineering Structures." *Construction and Building Materials*, vol. 17(6-7), 405-437.
- Berthelot, J.-M (1992) « Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures », Masson, Paris, 620 p.
- CAN/CSA-S806-02 (2002). "Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers," Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 177 p.
- CAN/CSA-S6-06 (2006). "Canadian Highway Bridge Design Code," Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 757 p.
- Davalos, J.F, Chen, Y, Ray, I. (2008) "Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete." *Cement & Concrete Composite*, 30, 722–730.
- Dejke, V. (1999). "Durability of Fibre Reinforced Polymers (FRP) as Reinforcement Concrete Structures," Publication P-98:18, Department of Building Materials Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 69 p.
- Diamond, S. (1981). "Effects of two Danish flyashes on alkali contents of pore solutions of cement fly ash pastes." *Cem. Concr. Res.*, 11, 383 – 394.
- Foster, S. K., Bisby, L., A. (2008) "Fire Survivability of Externally Bonded FRP Strengthening Systems." *Journal of Composites for Construction*, 12(5), 553-561.
- ISIS (2006) "Specifications for Product Certification of Fibre Reinforced Polymers (FRPs) as Internal Reinforcement in Concrete Structures." ISIS Canada Research Network, Winnipeg, Manitoba, Canada, 27 p.
- Japanese Society of Civil Engineers (1997) "Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforced Materials." 120 p.
- Masmoudi, R., Zaidi, A., Gérard, P. (2005) "Transverse Thermal Expansion of FRP Bars Embedded in Concrete," *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 377-387.
- Mufti, A., Onofrei, M., Benmokrane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J., Bakht, B., Tadros, G., Brett, P. (2005). "Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures." ACI Special Publication, 230, 1361-1378.
- Murphy, K., Zhang, S., and Karbhari, V. M. (1999). "Effect of concrete based alkaline solutions on short term response of composites." Proc., 44th Int. SAMPE Symposium and Exhibition, L. J. Cohen, J. L. Bauer, and W. E. Davis, eds., Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Long Beach, Calif., 2222–2230.
- 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, no 4, p. 615-621.
- Porter, M.L., Mehus, J., Young, K.A., O'Neil, E.F., and Barnes, B.A., (1997). "Ageing for Fiber Reinforcement in Concrete," Proc. of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, Japan, Vol. 2, 59-66.
- Robert, M., Cousin, P., Benmokrane, B. (2009) "Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete", *Journal of Composites for Construction*, sous presse.
- Taylor, H. F. W. (1987). "A method for predicting alkali ion concentration in cement pore water solutions." *Adv. Cem. Res.*, 1(1), 5–16.
- Wang, P. (2005). "Effect of Moisture, Temperature, and Alkaline on Durability of E-Glass/Vinyl Ester Reinforcing Bars". Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.