

Comportement en fluage des interfaces collées béton/composites: Etude expérimentale et développement d'un modèle analytique

N. HOUHOU^a, K. BENZARTI^a, M. QUIERTANT^a, S. CHATAIGNER^b

a. Université Paris-Est, IFSTTAR, Cité Descartes, 14-20 Bd Newton, F-77447 Marne la vallée Cedex 2
b. LUNAM Université, IFSTTAR, F-44341, BOUGUENNAIS France

Résumé :

Ce travail vise à développer et valider un modèle analytique permettant d'étudier le comportement en fluage de l'interface adhésive entre un substrat en béton et un composite de renforcement. Une étude antérieure a permis de concevoir un banc de fluage innovant capable de solliciter simultanément trois corps d'éprouve à double recouvrement. Les mesures réalisées sur les corps d'épreuves instrumentés sur une période d'un mois ont permis de calculer les profils de répartition des contraintes de cisaillement le long de l'interface collée directement après le chargement et après un mois de fluage. Par ailleurs, le comportement en fluage de l'adhésif a pu être identifié à partir d'une approche prédictive basée sur le Principe de Superposition Temps-Température et sur l'utilisation du modèle rhéologique de Burgers, ce qui a permis de proposer un modèle de fluage linéaire pour l'adhésif étudié. Le second volet de ce travail a consisté à introduire ce modèle rhéologique dans l'équation du modèle de Völkersen. Cette approche permet de calculer, à chaque pas de temps, la répartition des contraintes de cisaillement le long du recouvrement et de décrire le comportement en fluage de l'interface collée béton/composite sur la durée considérée. La confrontation entre ces simulations et les données expérimentales montre que le modèle reproduit assez fidèlement les profils expérimentaux instantanés ou mesurés après un mois de fluage.

Abstract :

The objective of this research is to develop and validate an analytical model for studying the creep behavior of bonded concrete/FRP interfaces. A previous study made it possible to design and build an innovative creep device involving three double-shear test-specimens. Measurements performed on the instrumented specimens over a period of one month under standard conditions were used to calculate the shear stress distribution profiles along the lap joint after instantaneous loading and after one month creep. In addition, the long-term creep response of the epoxy adhesive was identified from a predictive approach based on the Time-Temperature Superposition Principle (construction of master curves) and the use of Burger's rheological model, which allowed us to propose a linear creep model for the adhesive material. In a second part of the work, this rheological model of the adhesive layer was implemented in Völkersen's model. Such an approach was used to calculate at each time step, the shear stress distribution along the lap joint, and to describe the creep behavior of the concrete/FRP interface over the considered period. A comparison between these simulations and experimental results shows that the proposed analytical model reproduces quite well the shear stress profiles measured just after the load application or after one month creep.

Mots clefs : époxy, joints collés béton/composites, fluage, principe de superposition temps-température, modélisation analytique

1 Introduction

La technique de renforcement/réparation par collage externe de polymères renforcés de fibres (PRF) est maintenant considérée comme une solution efficace permettant de prolonger la durée de vie des infrastructures en béton armé (BA). Dans le cadre des applications de renforcement à la flexion, les lamelles de polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) sont couramment utilisées pour restaurer ou améliorer les capacités structurelles initiales de l'élément en BA. Les contraintes de traction qui affectent le béton se transmettent alors vers les renforts composites à travers la couche adhésive qui est majoritairement sollicitée en cisaillement. Bien que les lamelles composite présentent une bonne résistance vis-à-vis des

sollicitations environnementales et mécaniques de service, l'interface adhésive reste considérée comme le point faible de l'assemblage collé béton/PRF et le manque de recul concernant sa durabilité freine le développement des systèmes de renforcement par composite dans le domaine de la construction. De nombreux travaux de recherches ont étudié l'influence de l'humidité ou du vieillissement hygrothermique sur les propriétés des interfaces collées [1-4], mais peu de travaux ont examiné le comportement mécanique à long terme des interfaces collées béton/composite soumises à une charge constante (fluage) [5-7]. Partant de ce constat, le travail de recherche présenté dans cet article vise à développer et valider un modèle analytique simple, permettant d'analyser rapidement et sans code de calcul complexe, le comportement en fluage de l'interface adhésive entre un substrat béton et un composite collé.

2 Etude du comportement en fluage à long terme de l'adhésif

2.1 Matériaux et méthodes

Un adhésif époxy bi-composant polymérisant à température ambiante, commercialisé par la société SIKA France sous le nom *Sikadur®30* a été sélectionné dans cette étude [8]. Cet adhésif est couramment utilisé pour le collage des lamelles *Sika® CarboDur®* [9] ou de plats en acier. Afin de réaliser des essais de fluage sur ce matériau adhésif, des éprouvettes spécifiques de dimensions 30 x 4 x 1 mm³ ont été fabriquées. Ces échantillons ont été soumis à des cycles de fluage/recouvrement (30 minutes de fluage en traction puis 30 minutes de recouvrement) au moyen du viscoanalyseur Metravib VA2000, en conditions isothermes à différents paliers de températures entre 25°C et 57°C (avec un écart de 2°C entre deux paliers successifs). Ces essais thermo-stimulés ont été réalisés pour un niveau de contrainte de fluage σ_0 de 5 MPa. Les courbes isothermes permettront dans une seconde étape de construire la courbe maîtresse de fluage à 25°C et pour un niveau de contrainte de 5 MPa selon le Principe de Superposition Temps-Température (*PSTT*) [10-11].

2.2 Prédiction du comportement en fluage à long terme de l'adhésif

La Figure 1(a) présente les courbes de fluage thermo-stimulé obtenues pour l'adhésif *Sikadur®30*. Chaque courbe décrit les évolutions de la complaisance de fluage ($J(t, T) = \varepsilon(t, T) / \sigma_0$) en fonction du logarithme du temps pour les différents paliers de température, et pour le niveau de contrainte appliqué (5 MPa). La Figure 1(b) illustre quant à elle, la construction de la courbe maîtresse de la complaisance de fluage de l'adhésif à la température de référence de 25°C. Cette courbe fournit une évolution de la complaisance sur des temps très longs (de l'ordre de 10¹³s) ce qui n'est probablement pas réaliste. Dans la suite de l'étude, nous nous intéresserons essentiellement à la prédiction du fluage durant le premier mois de chargement.

Cette première partie de courbe maîtresse qui rend compte du premier mois de fluage a ensuite été utilisée pour caler le modèle rhéologique de Burgers (Figure 2(a)). Ce modèle a été choisi car il fournit une description mathématique simple du comportement en fluage des matériaux viscoélastiques linéaires.

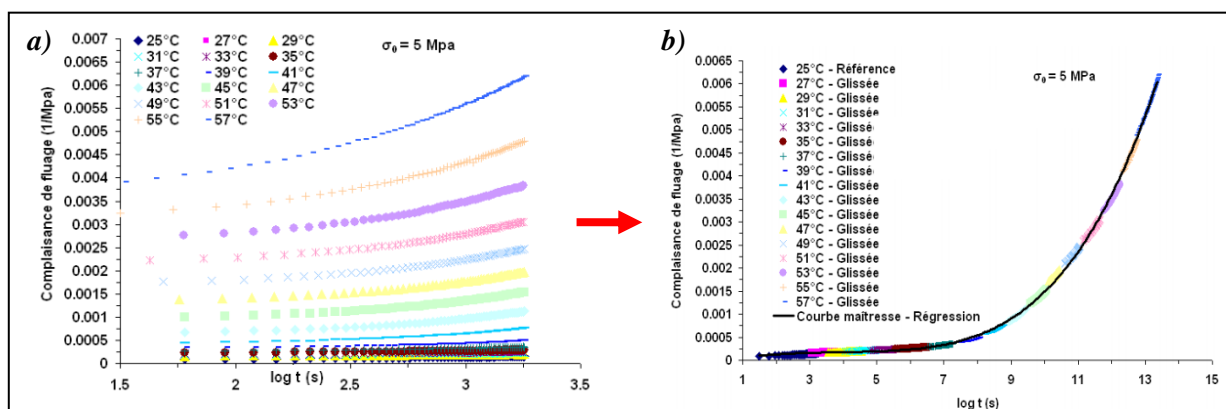


FIG.1 – Prédiction du comportement en fluage à long terme du système *Sikadur®30*: a) Résultats des essais de fluage thermo-stimulé ; b) Construction de la courbe maîtresse de la complaisance de fluage à la température de référence de 25°C et à un niveau de contrainte appliquée de 5 MPa.

L'équation du modèle de Burgers est obtenue à partir de la réponse en termes de déformation des différents

éléments du modèle (un élément de Maxwell couplé à un élément de Kelvin-Voigt, comme décrit sur la Figure 2(b)) consécutive à l'application d'une contrainte constante. D'après le modèle de Burgers, la déformation totale peut alors être exprimée de la manière suivante :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) \right] \quad (1)$$

Où σ_0 est la contrainte appliquée; E_1 et E_2 sont les modules d'élasticité des ressorts ; η_1 et η_2 sont les coefficients de viscosité dynamique des amortisseurs.

Le module d'élasticité E_1 est considéré égal au module d'Young déterminé expérimentalement par essais de traction à 25°C (12,8 GPa).

Les valeurs ainsi identifiées des coefficients du modèle de Burgers sont répertoriées dans le Tableau 1.

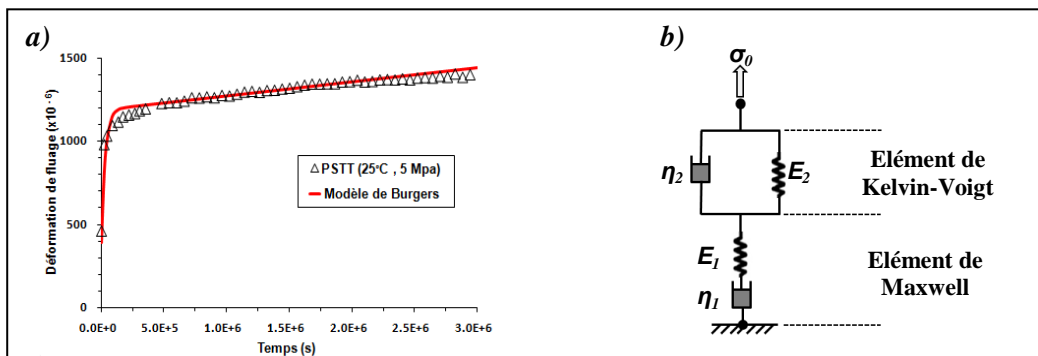


FIG.2 – Evolution de la déformation de fluage sur une durée de 1 mois pour le système *Sikadur*®30 à la température de référence de 25°C et à un niveau de contrainte appliquée de 5 MPa : a) Comparaison entre les données issues de l'approche *PSTT* et les simulations obtenues par identification avec le modèle de Burgers ; b) Description du modèle de fluage de Burgers.

Tableau 1 : Coefficients du modèle de Burgers identifiés à partir de la courbe de fluage expérimentale.

E_1 (GPa)	η_1 (GPa.s)	E_2 (GPa)	η_2 (GPa.s)
12,8	$59,1 \times 10^6$	6,3	$19,0 \times 10^4$

3 Etude expérimentale du fluage des interfaces collées

3.1 Description du dispositif expérimental

Un dispositif expérimental innovant basé sur le principe de l'essai de cisaillement à double recouvrement a été conçu dans le but d'étudier le comportement en fluage des joints collés béton/composite. Chaque corps d'épreuve est composé de deux blocs de béton de dimension $210 \times 205 \times 415 \text{ mm}^3$, reliés entre eux par deux lamelles de composite (*Sika*® *CarboDur*® *S*) symétriquement collées sur les faces latérales des blocs à l'aide de l'adhésif *Sikadur*®30 (Figure 3(a)). Un vérin plat hydraulique situé entre les deux blocs de béton les écarte l'un de l'autre, ce qui génère une contrainte de cisaillement le long des interfaces collées. Le banc d'essais est composé de 3 corps d'épreuves sollicités en fluage par 3 vérins plats soumis à une pression hydraulique (Figure 3(a)). Le niveau de pression permet d'atteindre une contrainte de cisaillement moyenne de 0,6 MPa dans chaque interface collée, ce qui correspond à 30% de la contrainte ultime en cisaillement à 25°C. Un accumulateur hydraulique de 10 litres connecté au circuit hydraulique, a permis de stabiliser le niveau de chargement durant l'essai de fluage. Le dispositif expérimental a été installé dans une chambre climatique à une température contrôlée de 25°C et à une humidité relative de 50%. La pression hydraulique a été continûment contrôlée par un mano-contacteur sur toute la durée de l'essai de fluage (1 mois). Pour l'un des trois corps d'épreuve du banc de fluage, une instrumentation spécifique par jauges de déformation a été installée sur la face supérieure des deux plats de renfort. Les jauges de déformation ont été collées symétriquement sur les deux plats PRF opposés (plat A et plat B, voir Figure 3(b)). Cette instrumentation

était destinée à suivre l'évolution des profils de déformation durant l'essai de fluage.

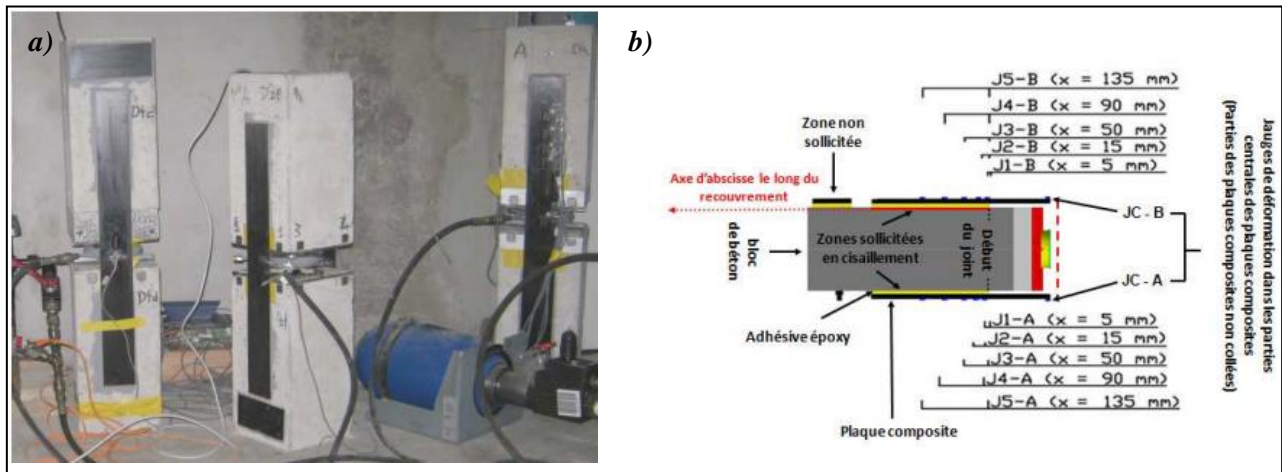


FIG.3 – Banc de fluage sollicitant 3 corps d'épreuves (a) et instrumentation des corps d'épreuve par des jauges de déformation - Positions des jauges (b).

3.2 Evolution expérimentale de la répartition de la contrainte de cisaillement le long de l'interface collée

Les déformations longitudinales ont été enregistrées par les jauges collées le long des plats en PRF, au droit du plan de collage, pendant toute la durée de l'essai de fluage. A partir de ces mesures, il est possible de déduire les profils de répartition des contraintes de cisaillement le long de l'interface collée à chaque pas de temps de fluage (t). En effet pour un pas de temps (t) donné, la contrainte de cisaillement moyenne dans la couche de colle située entre deux jauges adjacentes (J_i et J_{i+1}) peut être calculée en introduisant les déformations mesurées ($\varepsilon_i(t)$ et $\varepsilon_{i+1}(t)$) dans l'équation suivante (pour plus de détails voir la référence [12]) :

$$\tau_{a(i,i+1)}(t) = E_{PRF} \cdot e_{PRF} \cdot \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} \quad (i=0-4 ; i=0 \text{ représente la jauge centrale } J_C \text{ avec } x_0=0) \quad (2)$$

En appliquant cette méthode au profil de déformation longitudinale mesuré par les jauges à un instant (t) donné, il est possible de calculer le profil de contrainte de cisaillement le long du joint collé à ce même instant (t). Les Figures 4(a) et 4(b) montrent les répartitions expérimentales des contraintes de cisaillement le long des deux interfaces collées A et B ainsi que les valeurs moyennes, calculées à partir des enregistrements des jauges, directement après chargement (t=0, réponse élastique instantanée) et après un mois de fluage.

4 Modélisation analytique du comportement de fluage des interfaces collées

L'analyse de Völkersen [13] s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche de colle et permet d'évaluer la réponse élastique instantanée d'un joint adhésif. Elle est considérée comme une théorie réaliste relative à l'état de contraintes dans les joints à recouvrement. Dans cette approche, l'adhésif et les substrats sont considérés comme parfaitement élastiques et isotropes. Les contraintes de cisaillement dues à la flexion des substrats sont négligées et le joint est supposé travailler en contraintes planes. Dans le cas des joints collés béton/composite et en respectant les conditions aux limites des essais de cet article, cette théorie permet d'exprimer la répartition de la contrainte de cisaillement le long du joint collé [14]:

$$\tau_a(x) = \frac{G_a \sigma_{10}}{\lambda e_a E_c} \left(\frac{E_c e_c}{E_b e_b} - 1 \right) \left(\frac{\sinh(\lambda x)}{\tanh(\lambda L)} - \frac{\cosh(\lambda x)}{\tanh(\lambda L)} \right) \quad (3)$$

Avec :

$$\lambda^2 = \frac{G_a}{e_a} \left(\frac{1}{E_c e_c} + \frac{1}{E_b e_b} \right)$$

Où :

- $E_c = 165 \text{ GPa}$, $E_b = 35 \text{ GPa}$ et $G_a = 4,88 \text{ GPa}$ sont respectivement les modules d'Young des adhérents (c :

- composite et b : béton) et le module de cisaillement de la couche adhésif.
- $e_c = 1,2\text{mm}$, $e_b = 102,5\text{mm}$ et $e_a = 1\text{mm}$ étant respectivement les épaisseurs des adhérents (c : composite et b : béton) et de la couche colle.
- $L = 240\text{mm}$ étant la longueur de l'interface collée.

Le profil de cisaillement instantané calculé par cette méthode est présenté sur la Figure 4(a) où il est confronté aux profils déduits des mesures des jauges, ainsi qu'à leur moyenne. Sur cette figure, on note une concordance satisfaisante entre les valeurs expérimentales et celles issues du calcul. Cette constatation constitue tout d'abord un élément de validation du dispositif expérimental. Elle permet, de plus, de conclure que la modélisation est bien apte à rendre compte du profil des contraintes de cisaillement dans le joint collé.

Par la suite, le modèle est donc exploité en envisageant des lois de comportement plus complexes du joint. Les travaux de modélisation ont donc été poursuivis en introduisant le modèle rhéologique de la couche de colle précédemment identifié (modèle de Burgers) dans l'équation du modèle de Völkersen (équation (3)). Cette introduction se fait en remplaçant dans l'équation (3) la valeur constante du module de cisaillement instantané de la colle G_a par une valeur qui évolue dans le temps $G_a(t)$ déduite de l'équation (1):

$$G_a(t) = \frac{1}{2 \cdot (1 + \gamma) \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) \right]} \quad (4)$$

Où $\gamma = 0,3$ est le coefficient de Poisson de l'adhésif.

Cette approche, dite modèle de « Völkersen modifié » permet de calculer, à chaque pas de temps, la répartition des contraintes de cisaillement le long du recouvrement et de décrire le comportement en fluage de l'interface collée béton/composite sur la durée considérée.

Le profil de cisaillement le long de l'interface collée a été calculé suivant le modèle de Völkersen modifié, après un mois de fluage. La confrontation entre simulation et expérience est présentée sur la Figure 4(b). On peut constater que le modèle reproduit assez fidèlement le profil expérimental. Les résultats expérimentaux comme ceux issus des modélisations analytiques montrent l'existence d'une importante concentration des contraintes de cisaillement à proximité du bord chargé. Pour Yuan [15], la longueur d'ancrage d'un joint correspond à la longueur collée à travers laquelle 97% de la charge appliquée sur le plat PRF est transmise au support béton (pour un joint dont la longueur est très grande devant la longueur d'ancrage). Si nous retenons cette définition, il est possible de calculer les valeurs des longueurs d'ancrage relatives aux courbes analytiques affichées sur les Figures 4(a) et 4(b). Ces résultats, présentés dans le Tableau 2, indiquent que le fluage provoque une augmentation significative de la longueur d'ancrage par rapport à la valeur initiale déterminée à partir de la réponse élastique instantanée. Un tel phénomène est alors susceptible d'améliorer la durabilité à long terme des joints collés. Ce type de comportement (augmentation de la longueur d'ancrage) a déjà été constaté par d'autres auteurs [4] dans le cadre d'une étude de durabilité, mais sur des joints soumis à un vieillissement hygrothermique sans sollicitation mécanique.

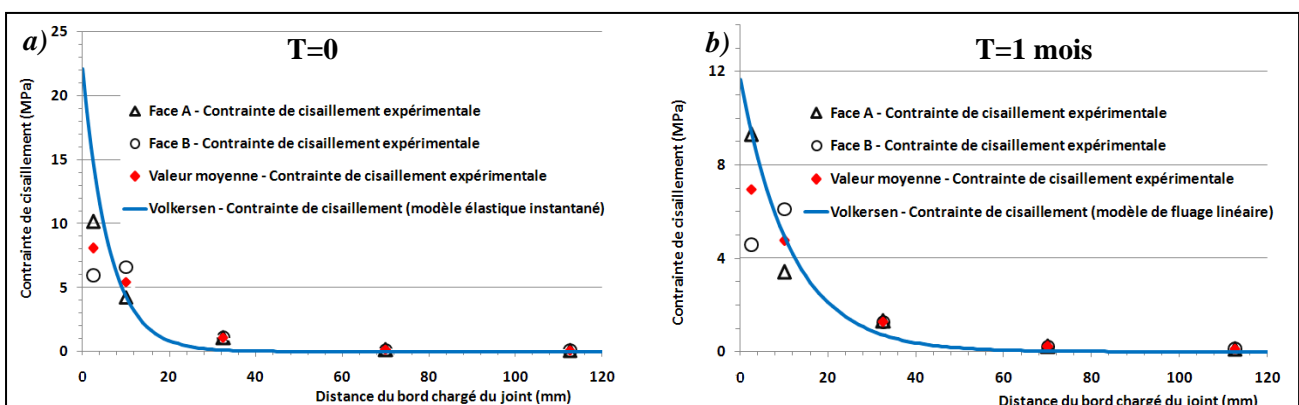


FIG.4 – Comparaison des profils de cisaillement issus du modèle analytique de Völkersen et des résultats expérimentaux : a) directement après chargement ; b) après un mois de fluage.

Tableau 2 : Longueurs d'ancrage calculées à partir des profils de distribution des contraintes de cisaillement.

Modèle analytique	Longueur d'ancrage (mm)
Völkersen élastique	21,0
Völkersen modifié (fluage linéaire sur 1 mois)	40,0

5 Conclusion

L'objectif de ce travail est le développement et la validation d'un modèle analytique permettant d'analyser le comportement en fluage à long terme de l'interface adhésive entre un substrat en béton et un composite collé. Dans un premier temps, une procédure basée sur le principe de Superposition Temps-Température et sur l'utilisation du modèle rhéologique de Burgers, a permis de proposer un modèle de fluage linéaire pour l'adhésif étudié. Ce modèle rhéologique a ensuite été introduit dans l'équation du modèle de Völkersen afin de prédire le comportement en fluage à long terme de l'interface collée béton/composite. Finalement la confrontation entre les simulations et les données expérimentales a démontré que ce modèle de Völkersen modifié reproduit assez fidèlement les profils expérimentaux instantanés ou mesurés après un mois de fluage. Les résultats montrent aussi que le fluage provoque une augmentation significative de la longueur d'ancrage par rapport à la valeur initiale déterminée à partir de la réponse élastique instantanée ; cela semble indiquer que le fluage pourrait présenter des effets bénéfiques sur la durabilité à long terme des joints collés.

References

- [1] Silva M.A.V., Biscaia H., Degradation of bond between FRP and RC beams, *Journal of Composite Structures*, 85, 164-174, 2008.
- [2] Karbhari V.M., Ghosh K., Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges, *Composites Part A*, 40, 1353-1363, 2009.
- [3] Dai J.G., Yokota H., Iwanami M., Kato E., Experimental investigation of the influence of moisture on the bond behavior of FRP to concrete interfaces, *Journal of Composites for Construction*, 14, 834-844, 2010.
- [4] Benzarti K., Chataigner S., Quiertant M., Marty C., Aubagnac C., Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays, *Construction & Building Materials*, 25, 523-538, 2011.
- [5] Houhou N., Benzarti K., Quiertant M., Chataigner S., Fléty A., Marty C., Analysis of the nonlinear creep behavior of concrete/FRP - bonded assemblies, *Journal of Adhesion Science and Technology*, DOI: 10.1080/01694243.2012.697387, 2012.
- [6] Meshgin P., Choi K.K., Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesive at the concrete-FRP interfaces, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 56-66, 2009.
- [7] Ferrier E., Michel L., Jurkiewicz B., Hamelin P., Creep behavior of adhesives used for external FRP strengthening of RC structures, *Construction and Building Materials*, 25, 461-467, 2011.
- [8] *Sikadur®30*, Adhésive structural pour le collage de renforts –Fiche technique, Version No. 2011-026, <http://frcon.webdms.sika.com/fileshow.do?documentID=547>, 2011.
- [9] *Sika®Carbodur® S*, Lamelles pultrudées à base de fibres de carbone pour le renforcement de structures – Fiche technique”, Version No. 2011-387, http://fra.sika.com/dms/getdocument.get/aa3e5909-b161-370f-b261-8201b7807841/fr_carbodur_s_nt914.pdf, 2011.
- [10] Leaderman H., *Elastic and creep properties of filamentous materials and other high polymers*, Washington, DC: Textile Foundation, 1943.
- [11] Sheng X., Akinc M., Kessler M.R., Creep behavior of bisphenol E cyanate ester/alumina nanocomposites, *Materials Science and Engineering A*, 527, 5892-5899, 2010.
- [12] Xiao J., Li J., Zha Q., Experimental study on bond behavior between FRP and concrete”, *Journal of Construction and Building Materials*, 18, 745–752, 2004.
- [13] Völkersen O., Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten, *Luftfahrtforschung*, 15, 41-47, 1938.
- [14] Houhou N., Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites: développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique, Thèse de Doctorat de l'université Paris-Est, 2012.
- [15] Yuan H., Improved theoretical solutions of FRP-to-concrete interfaces, In *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, BBFS 2005, Hong Kong*, 97-102, 2005.