

Modélisation de l'endommagement instantané et vieillissement hygrothermique d'un assemblage collé béton/pultrudé GFRP

Ibrahim ALACHEK¹, Nadège REBOUL², Bruno JURKIEWIEZ³

¹ Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Lyon 1, 82 boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, ibrahim.alachek@univ-lyon1.fr

² Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Lyon 1, 82 boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, nadega.reboul@univ-lyon1.fr

³ Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Lyon 1, 82 boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, bruno.jurkiewicz@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. Le développement des résines époxydiques a élargi la portée du collage dans l'industrie du génie civil, mais l'utilisation de cette technologie dans les travaux de construction est encore loin d'être répandue. Il est nécessaire de faire davantage d'efforts pour comprendre ces matériaux, pour tirer parti de leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, et donc pour les utiliser pour des applications structurelles. Dans ce contexte, cette présente étude fournit des informations sur la durabilité des assemblages FRP (polymère renforcé de fibres) / béton collés. Les effets de l'humidité et de la température sur l'adhésif sous forme massive et sur l'assemblage structural de type béton/pultrudé GFRP (polymère renforcé de fibres de verre) ont été étudiés par la réalisation d'essais de vieillissement accélérés. Les caractérisations mécaniques ont été réalisées sur des échantillons de contrôle ainsi que sur des échantillons exposés, afin d'évaluer la dégradation et l'endommagement des propriétés des joints d'adhésif engendrés par le vieillissement accéléré. De plus, la Méthode des Eléments Finis (MEF) a été utilisée pour la simulation, la prévision de résistance et l'analyse de ruine des structures collées non vieillies. Des éléments d'interface ont été utilisés pour l'analyse des contraintes et des déplacements dans les joints collés.

ABSTRACT. The development of epoxy has widened the scope of adhesive bonding in the civil engineering industry but the use of this technology in building and construction work is still far from being achieved. There is a need to make more effort to understand these materials, to take advantage of their outstanding properties, and hence to use them for structural application. In this context, this study provides information on the long-term durability of the FRP (fiber reinforced polymer)/concrete bonded interface. The effects of moisture and temperature on concrete slab bonded with square glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite tube has been investigated under accelerated ageing conditions. Mechanical characterizations were carried out on control and exposed push out specimens, in order to evaluate the degradation and damage of the adhesive bond properties caused during accelerated ageing. Also in this study, the Finite Element Method (FEM) has been used for the simulation, strength prediction and failure analysis of bonded structures not aged. Special adhesive elements have been used for stress and displacement analyses in adhesively bonded joints.

MOTS-CLÉS : époxyde, vieillissement, durabilité, modélisation numérique, Méthode des Eléments Finis (FEM).

KEY WORDS: epoxy, ageing, durability, numerical modelling, Finite Element Method (FEM).

1. Introduction

Le collage est une technique largement utilisée en génie civil qui remonte à la plus haute antiquité [TAB 82]. En effet, quinze siècles avant J.C., les Egyptiens employaient déjà des colles naturelles. Plus récemment, la découverte des résines époxydes en 1937 par P. Castan, provoque une révolution importante dans le domaine de l'adhésion. L'utilisation du collage métal/métal en construction aéronautique depuis plus de 50 ans est un exemple qui montre le large succès de cette technique aux dépens d'autres techniques plus classiques telles que le rivetage, la soudure ou le boulonnage.

Actuellement, dans le domaine du génie civil, les résines jouent un rôle prépondérant dans le domaine du collage structural, notamment pour la réparation d'ouvrages par le collage d'éléments de renforcement extérieur, et la voie semble ouverte pour le développement de nouvelles applications en collage structural [MAY 82] (connexions de ponts mixte acier/béton, assemblages de structures en béton fibré, etc.).

Depuis 1955, les adhésifs ont été utilisés dans la construction de ponts et pour des applications telles que le remplissage des fissures dans le béton et pour le collage de poutres d'acier à des dalles de béton. En 1963, la construction du premier pont en béton, en utilisant la technique de collage entre les voussoirs préfabriqués, a été réalisée sur la Seine à Paris [HUG 82]. Alors, l'assemblage de structures par collage semble être une solution intéressante pour assembler des matériaux de natures différentes. Et, en effet, cette technique d'assemblage présente de nombreux avantages comme une répartition uniforme des contraintes, l'absence du risque de corrosion des points de connexion, en plus le collage permet d'éviter toute opération d'usinage endommageante (perçage, échauffement), et l'apport de matière supplémentaire, donc de poids supplémentaire, est très limité, comparé aux poids des rivets ou des cordons de soudure. Malgré les avantages mécaniques et économiques en termes de coûts et d'allègement des structures, le collage reste une technique d'assemblage complexe. L'application de cette technique dans le domaine du génie civil se heurte encore à la réticence des industriels et maîtres d'ouvrages en raison du manque de garanties sur la durabilité à long terme (~100 ans), et de l'absence d'outils de modélisation fiables permettant de prévoir la durée de vie des assemblages collés dans les conditions effectives de service. L'incertitude est amplifiée si les assemblages sont soumis à des environnements agressifs (forte humidité, température élevée, cycles gel/dégel...) Ce constat provoque, par conséquent, une certaine réticence dans les bureaux d'études vis-à-vis de cette technique d'assemblage.

Il existe donc une demande croissante de la part des maîtres d'œuvre pour disposer d'outils numériques et expérimentaux permettant de prévoir les comportements instantanés des assemblages collés et leur durabilité.

C'est dans ce contexte que se situe notre étude qui vise à rechercher une méthodologie globale d'étude sur la durabilité d'assemblages béton / pultrudé GFRP (polymère renforcé de fibres de verre) collés à base d'adhésifs époxydiques. En essayant d'évaluer la fiabilité et l'efficacité de ces assemblages dans des conditions environnementales agressives. Cette étude tente d'analyser le bien-fondé des préjugés ayant cours sur cette technique d'assemblage.

En effet, les conditions environnementales (exposition à l'eau ou à l'humidité, températures, cycles thermiques, attaques chimiques dues à l'alcalinité du milieu) et les propriétés caractéristiques des matériaux composites GFRP peuvent influencer le comportement de l'assemblage collé béton/profilé pultrudé durant les temps de service des structures [SIL 08] [MUK 98]. Alors, une étude de l'influence des différents facteurs environnementaux sur les propriétés de l'assemblage, sur le joint d'adhésif et sur la réponse à la rupture, est indispensable afin de s'assurer une bonne durabilité de l'assemblage. Il faut souligner que la prédiction de la durée de vie des assemblages collés est un sujet qui a souvent été abordé dans la littérature scientifique, mais qui reste complexe et sans solution universelle et la littérature fournit peu d'informations concernant le vieillissement des assemblages collés béton/profilé pultrudé, même béton/acier, mais qu'il existe de nombreuses études sur les assemblages collés béton/composites de réparation et même acier/composite [SIL 08] [ALM 14].

L'étude que nous présentons met en évidence, dans un premier temps, l'influence de traitements de surface sur le mode de ruine de l'assemblage, notamment en visant un traitement mécanique qui pourrait assurer une bonne adhésion entre les constituants. Dans un second temps, l'étude cherche à modéliser le comportement instantané de l'assemblage non vieilli afin de développer un modèle numérique capable de prédire le mode de ruine et les états de contraintes et déformations à la rupture.

D'autre part, nous avons porté une attention toute particulière sur deux facteurs environnementaux très néfastes sur le joint d'adhésif, à savoir la température et l'humidité. Dans cette optique, l'adhésif, sous sa forme massive, et des assemblages collés ont été soumis à différentes conditions environnementales agressives afin d'évaluer l'évolution de leurs propriétés mécaniques ultimes sous l'effet d'un vieillissement accéléré.

2. Modélisation numérique de l'interface collée pultrudé – béton

La première partie de notre étude est consacrée à l'étude de comportements instantanés de l'assemblage pultrudé – béton collé pour caractériser l'interface et à la modélisation du joint collé. Pour cela, un modèle numérique 3D a été développé dans le code de calcul d'éléments finis Cast3M. Son objectif est de prédire de façon précise, en fonction des caractéristiques des matériaux assemblés, le comportement mécanique sous chargement instantané et le mode de ruine de l'assemblage. L'essai de poussée de type Push-Out a été retenu pour caractériser l'interface collée en raison de sa simplicité. C'est un essai standardisé dans l'eurocode 4 pour la caractérisation de la connexion par goujons dans les structures mixtes acier-béton. Le corps d'épreuve est constitué de deux dalles de béton connectées à un tube pultrudé par un adhésif époxydique.

Pour atteindre l'objectif visé, le modèle couplé plasticité endommagement, proposé par L. Jason [JAN 04], a été retenu avec une approche non locale pour simuler le comportement du béton et un modèle orthotrope a été

adopté pour le pultrudé. Le maillage de dalle de 20 mm constituée de 1150 (20 mm) éléments d'interpolation linéaire de formes tétraédriques à 4 nœuds. Des éléments joints à 6 nœuds disponibles dans cast3m ont été utilisés pour modéliser le joint d'adhésif entre les deux matériaux. Les paramètres de ces modèles sont calés sur la base d'essais de caractérisation menés à l'échelle des matériaux (essais de traction et compression). Afin de valider le pouvoir prédictif du modèle à l'échelle de l'assemblage, une confrontation a été réalisée entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques des simulations.

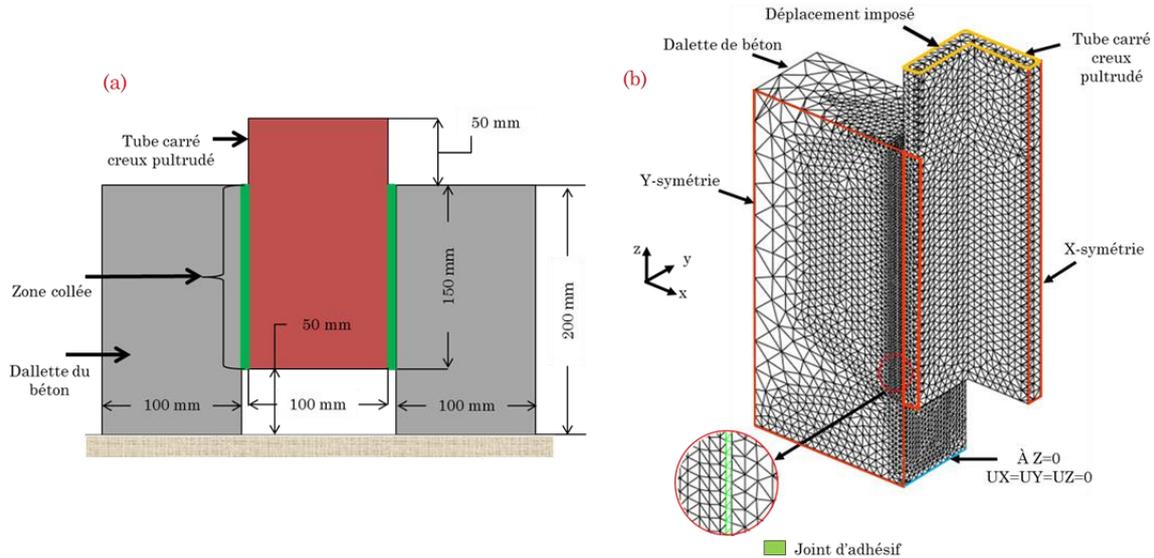


Figure 1. (a) Géométrie du corps d'épreuve push-out, (b) Les conditions aux limites et le maillage d'un quart d'éprouvette push out.

3. Vieillessement accéléré de l'assemblage pultrudé – béton collé

Les adhésifs structuraux, comme tous les polymères, présentent des propriétés physico-chimiques qui évoluent dans le temps en fonction de l'environnement auquel ils sont soumis [AKA 97] [ZAN 95]. Ces phénomènes de vieillissement sont susceptibles d'affaiblir le joint de colle, et doivent donc être pris en compte dans l'analyse de structure.

Cette seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale des phénomènes de vieillissement des adhésifs massiques et des joints adhésifs dans les assemblages collés. Nous avons soumis les matériaux et les corps d'épreuve push-out à quatre protocoles de vieillissement hygrothermiques différents récapitulés dans le Tableau 1. Ces conditions hygrothermiques permettent d'accélérer les phénomènes tout en restant dans des gammes de températures et degrés d'hygrométrie susceptibles d'être observés pendant la mise en service. Les effets de différents protocoles de vieillissement ont été analysés, mettant en évidence des différences de comportement entre l'assemblage collé vieilli et celui non vieilli. Le joint d'adhésif se révèle être la partie la plus sensible à un environnement agressif (voir) : le mode de rupture des éprouvettes collées vieilles devient cohésif dans la zone de transition (interface collée) (voir Figure 3). Cela peut être attribué à la diminution des propriétés mécaniques de la zone inter-faciale associée à un gonflement du polymère et à la disparition des interactions physico-chimiques assurant la cohésion de l'ensemble [ZAN 95].

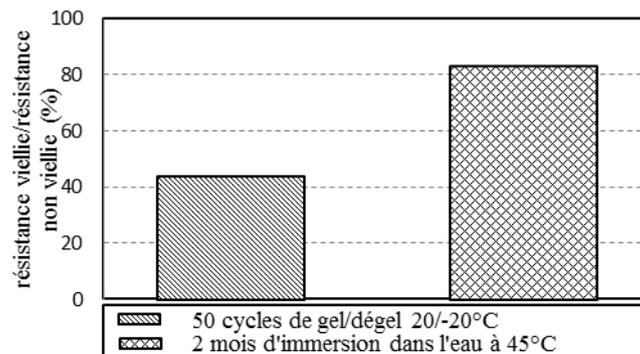


Figure 2. Effets de vieillissement sur la contrainte de cisaillement à la rupture des éprouvettes push-out.

Viellissement naturel	Immersion dans l'eau	Cycles gel/dégel	humidification
Pendant 1 et 2 ans (en cours)	T°=45°C pendant une durée allant jusqu'à 12 mois	50 cycles de Gel à -20°C & dégel à +20°C	Exposition en atmosphère humide (HR=85%) pendant 45 jours

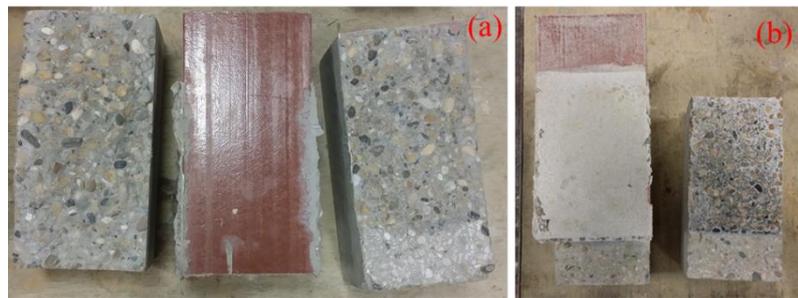


Figure 3. Evolution du mode de ruine des éprouvettes vieilles ((a) Rupture cohésive dans le béton pour l'éprouvette non vieilles, (b) Rupture cohésive dans l'adhésif pour l'éprouvette vieilles).

4. Conclusion

Dans cette étude, les résultats de la modélisation numérique du comportement instantané de l'assemblage et les résultats expérimentaux des essais push-out sur les assemblages témoins non vieilles et sur les assemblages exposés aux conditions agressives ont été présentés. Les conclusions suivantes ont pu être effectuées :

1. Le modèle numérique développé constitue un outil numérique efficace pour prévoir le mode et la charge de ruine,
2. Le vieillissement hygrothermique des assemblages conduit à un changement du mode de ruine,
3. Le vieillissement accéléré semble être plus néfaste dans le cas de cycles de gel/dégel que dans le cas d'immersion mais ces résultats devront être confirmés pour des durées d'exposition supérieures.

5. Bibliographie

[AKA 97] AKAY M., MUN S. K. A., Stanley A., « Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates », *Composites science and technology*, vol. 57, n°5, 1997, p. 565-571.

[ALM 14] AL-MAHMOUD F., MECHLING J. M., SHABAN M., « Bond strength of different strengthening systems–Concrete elements under freeze–thaw cycles and salt water immersion exposure », *Construction and Building Materials*, vol. 70, 2014, p. 399-409.

[HUG 82] HUGENSCHMIDT F., « New experiences with epoxies for structural applications », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 2, n°2, 1982, pp. 84-95.

[JAN 04] JASON L., Relation endommagement perméabilité pour les bétons applications aux calculs de structures, Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004.

[MAY 82] MAYS G. C., VARDY A. E., « Adhesive-bonded steel/concrete composite construction », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 2, n°2, 1982, p. 103-107.

[MUK 98] MUKHOPADHYAYA P., SWAMY R. N., Lynsdale C. J., « Influence of aggressive exposure conditions on the behaviour of adhesive bonded concrete–GFRP joints », *Construction and Building Materials*, vol. 12, n°8, 1998, p. 427-446.

[SIL 08] SILVA M. A., BISCAIA H., « Degradation of bond between FRP and RC beams », *Composite structures*, vol. 85, n°2, 2008, p. 164-174.

[TAB 82] TABOR L. J., « Adhesives in construction: a contractor's viewpoint », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 2, n°2, 1982, pp. 73-76.

[ZAN 95] ZANNI-DEFFARGES M. P., SHANAHAN M. E. R., « Diffusion of water into an epoxy adhesive: comparison between bulk behaviour and adhesive joints », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 15, n°3, 1995, p. 137-142.