
Etude comparative de l'efficacité de la réparation du béton avec des matériaux composites bio ressourcés et des composites carbone-époxyde

Mariem LIMAIEM^{1,2}, Elhem GHORBEL¹, Oualid LIMAM²

¹ Université Cergy Pontoise Paris Seine, Laboratoire de Mécanique et de Matériaux de Génie Civil, France. Mariem.limaie@m-cergy.fr

² Université de Tunis El Manar, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Laboratoire de Génie Civil, Tunisie

RÉSUMÉ. Le recours aux matériaux composites pour la réparation des ouvrages en béton s'est répandu afin de remédier au différent endommagement subi ces dernières décennies. Les composites de Carbone ont montré d'excellentes performances ainsi une grande facilité d'application. Ces matériaux restent polluants et chers ce qui va à l'encontre du développement durable. Ce travail s'intéresse à l'étude de réparation du béton avec des matériaux composites bio-ressourcés en les comparant avec ceux du carbone. Pour cela, deux différents matériaux composites sont utilisés, le premier est un PRFC, le deuxième est un PRFN. Le béton étudié est de classe C35/45 testé à 90 jours. L'étude menée se compose d'une partie expérimentale explorant la différence de réparation de béton avec un PRFC et un PRFN et d'une étude semi analytique pour la modélisation du problème de confinement. Les résultats préliminaires montrent que l'utilisation du PRFN a réussi restituer les performances mécaniques initiales et les améliorer ce qui encourage leurs utilisation à la place des PRFC.

ABSTRACT. Using composite materials for repairing concrete structures has been widely spread in order to remedy to different underwent damages through last decades. These materials are still polluting and expensive which goes against sustainable development. This work studies concrete repairing with bio-resourced composite materials in comparison with carbon ones. For this purpose, two different composite materials are used; the first one is CFRP, the second one is NFRP. The concerned concrete is a C34/45, tested after 90 days of curing. The conducted research is composed of an experimental part exploring the difference between using CFRP and NFRP for repairing damaged concrete and a theoretical part for modeling concrete confinement. Preliminary results show that using PRFN allowed restoring and enhancing initial mechanical performances which promotes its use instead of CFRP.

MOTS-CLÉS : composite, endommagement, carbone, bio-ressourcé, confinement, modélisation

KEY WORDS: composite, damage, carbon, bio-resourced, confinement, modelling

1. Introduction

Les structures en génie civil ont subi, au cours des années, des dégradations dues aux conditions environnementales agressives ou aux chargements mécaniques excessifs ce qui a rendu leur utilisation suspecte. La réparation traditionnelle de ces structures, telle que le chemisage, est généralement difficile à mettre en œuvre, coûteuse et peu efficace. Un nouveau matériau dont l'utilisation est devenue répandue dans le monde est le polymère renforcé par des fibres de Carbone PRFC. Ce matériau composite présente d'excellentes performances mécaniques meilleures que l'acier [WAN 07] et une facilité de mise en œuvre sur le chantier. Cependant certains freins doivent être levés pour respecter les critères environnementaux de plus en plus présents. Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'ANR MICRO et a pour objectif d'étudier la possibilité de remplacer les matériaux composites traditionnels (carbone/époxyde) par des matériaux bio ressourcés. Pour cela, la première partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés afin de comparer leurs performances. La deuxième partie est dédiée à l'étude de l'efficacité de la réparation des colonnes en béton endommagées mécaniquement. Dans la troisième partie une étude semi-analytique est proposée pour la prédiction des performances des bétons réparés.

2. Caractérisation des matériaux

2.1. Béton

Le béton utilisé est de classe C35/45. Sa formulation détaillée dans [OMA 17]. Les éprouvettes à réparer sont cylindriques de dimension 15x30 testées à 90 jours. La déformation est déterminée grâce à l'instrumentation des éprouvettes par 3 extensomètres liés par deux couronnes. L'essai est conduit par une presse hydraulique de capacité 3000KN avec une vitesse de chargement 0.5MPa/s. Le béton montre se comporte de façon viscoélastique endommageable. Il est caractérisé par une résistance moyenne à la compression de 43 MPa, une déformation au pic égale à 0.0016 et un module d'Young de 32 GPa.

L'endommagement mécanique en compression des bétons a été identifié à travers des essais de charge/décharge et estimé par la perte des modules élastiques (Figure 1). L'essai a été répété 5 fois. Le taux d'endommagement, est défini par un paramètre scalaire $D = 1 - (E_s/E_c)$. L'évolution de ce paramètre en fonction de la déformation imposée est reportée sur la figure 2 et son expression est donnée par l'Eq. (1).

$$D = 12.867(\varepsilon - 0.000147)^{0.57} \quad \text{avec } R^2=0.9926 \quad [1]$$

L'endommagement maximal mesuré est de 73%. Pour étudier l'efficacité de la réparation par les composites de bétons fissurés, les éprouvettes cylindriques ont été chargées en compression à deux niveaux de déformation $\varepsilon_{c1} = 0.16\%$ (déformation au pic) et $\varepsilon_2 = 0.25\%$ (déformation post-pic) correspondant à deux taux d'endommagements « D » de 30% et de 42% respectivement.

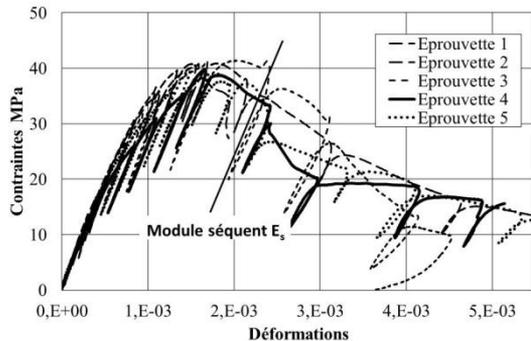


Figure 1 : Courbe contrainte-déformation en chargement cyclique de compression

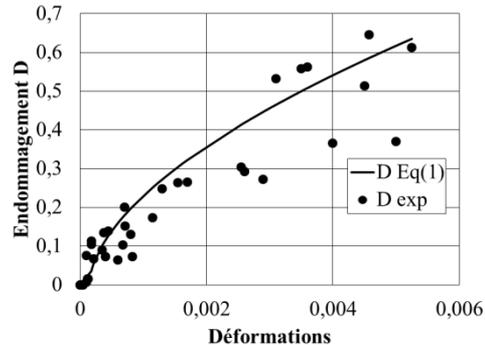


Figure 1 : Evolution de l'endommagement en fonction de la déformation

2.2. Composite

Deux types de composites unidirectionnels ont utilisés pour le confinement et la réparation des bétons. Le premier composite, fourni par l'entreprise SIKA, est constitué de tissus de fibres de carbone unidirectionnelles (SIKAWRAP-230C) et d'une résine époxyde de nom commercial SIKADUR. Le deuxième composite est composé d'une résine bio-ressourcée (pré-polymère CHS-EPOXY 520+durcisseur Cardolite) et d'un tissu en fibres de lin unidirectionnelles (LINCORE FF). Les composites ont été élaborés à température ambiante par moulage puis testés en traction uniaxiale à température ambiante à l'état réticulé. Les résultats obtenus montrent que le comportement des deux composites est élastique fragile jusqu'à la rupture avec des résistances moyennes de 2.1 GPa pour le C/Epoxyde et de 470 MPa pour le bio ressourcé alors que les modules E_{11} sont respectivement de 210 MPa et 183MPa.

3. Effet de la réparation sur endommagement mécanique

Les éprouvettes cylindriques 15x30 ont été confinées par deux couches pour le composte bio-ressourcée et une seule pour le composite carbone/epoxyde. Le confinement a été réalisé pour 3 taux d'endommagement ($D=0\%$, $D= 30\%$ et $D= 42\%$) puis testées en compression uniaxiale. Le comportement est illustré par la figure 4 (a). On remarque que le confinement d'une colonne de béton ($D=0\%$) conduit à l'augmentation la ductilité de la structure et de sa résistance mécanique à la compression sans affecter le module tangent. La courbe de compression du béton confiné ne comporte plus de phase post-pic et deux nouveaux paramètres sont introduits : f_{cc} correspondant à la résistance maximale à la compression et la déformation ultime ε_{cc} . Le comportement d'un béton endommagé avant réparation est décrit dans la figure 4(b). On observe une diminution de E_c , f_{cm} et une augmentation de ε_{c1} . Les bétons endommagés avec $D=30\%$ et 42% ont été réparés puis testés en compression.

On observe que les allures des courbes de compression du béton confiné et du béton réparé sont similaires (Figures 3 (a) et (b)).

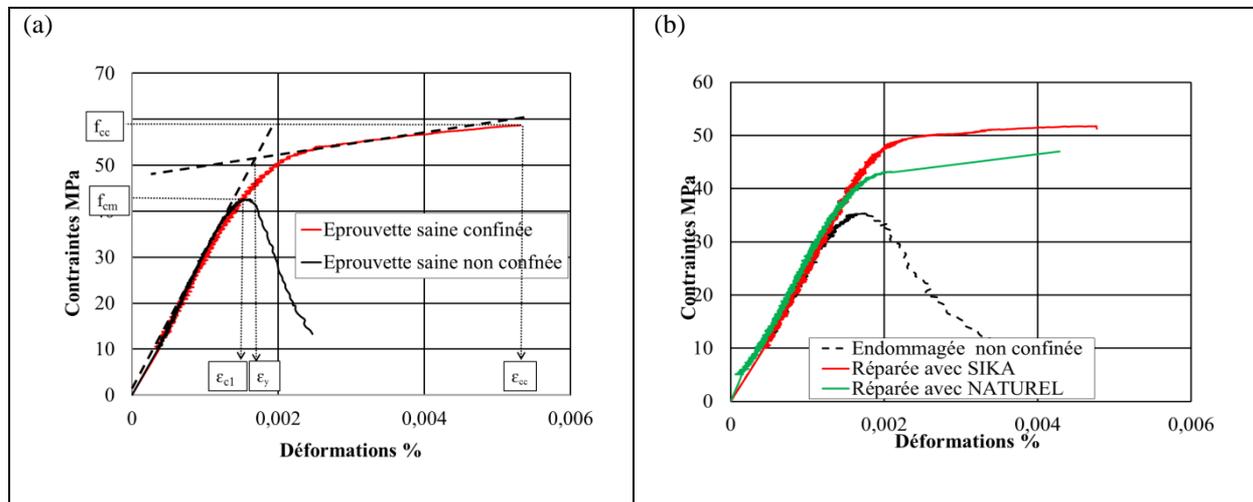
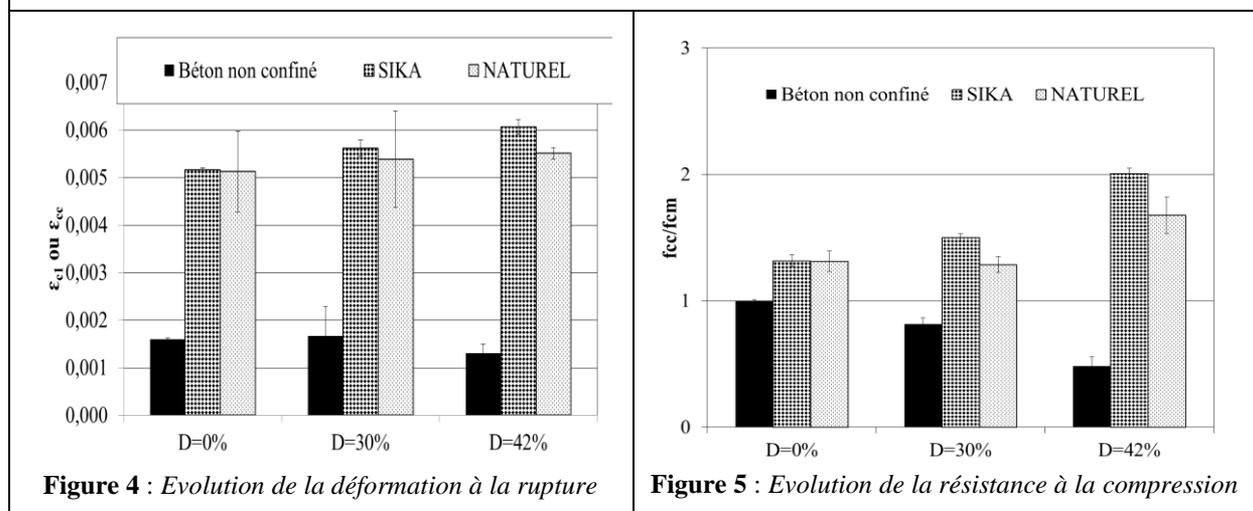


Figure 3 : Caractéristiques du béton confiné/réparé en compression



La rupture du béton confiné/réparé est gouvernée par celles des fibres du composite sollicitées en traction. L'effet du confinement/réparation n'est déclenché qu'au-delà de la résistance moyenne à la compression du béton ce qui explique la non restitution de la rigidité comme signalé par d'autres auteurs [CET 03]. Le confinement/réparation a permis au béton d'acquérir une grande capacité de déformation sous charge élevée, capacité d'autant plus élevée que le béton est fissuré (figure 4), et une résistance ultime à la compression 2 fois supérieure à la résistance moyenne à la compression pour le taux d'endommagement le plus élevée (figure 5). Par ailleurs, l'utilisation d'un composite bio-ressourcé pour le confinement/réparation conduit à des propriétés comparables à celles obtenues avec le composite Carbone/Epoxyde.

4. Modélisation semi-analytique du problème du confinement du béton

Une étude semi-analytique a été réalisée pour modéliser le comportement du béton confiné/réparé par des composites en compression selon le modèle de [MAN 88]. L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation est décrite par l'équation [2]. Le modèle repose sur le calcul de la pression du confinement, f_1 , de f_{cc} , de ϵ_{cc} et de r (équations [3] et [4]) en fonction des propriétés du béton (ϵ_{c1} , f_{cm} et E_c), de la résistance à la traction du composite f_j et des caractéristiques géométriques de l'éprouvette (diamètre D et épaisseur du composite t).

Les comparaisons entre les résultats issus du modèle et ceux expérimentaux sont illustrées dans les figures 6 et 7. On remarque que le comportement expérimental se décompose en trois phases ; la première élastique gouvernée par le comportement du béton, la deuxième de transition avec une contribution du comportement du composite soumis à des pressions internes provoquées par la déformation volumique du béton et la troisième gouvernée par le comportement du composite. Le modèle de Mander traduit de façon satisfaisante le

comportement du béton confiné/réparé au niveau de la première et troisième phase. La résistance ultime à la compression est prédite avec une erreur de 4%. Le comportement ductile (3^{ème} phase) a été bien pris en compte par le modèle alors que des écarts existent et nécessitent une meilleure analyse au niveau de la deuxième phase.

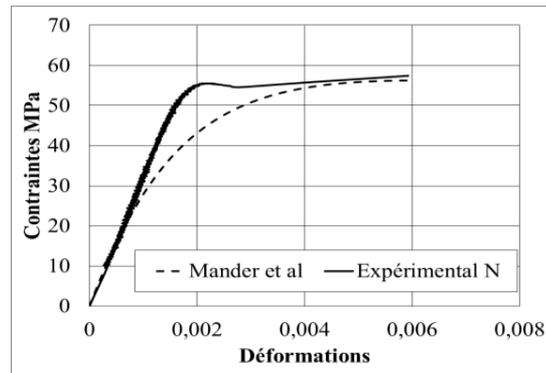
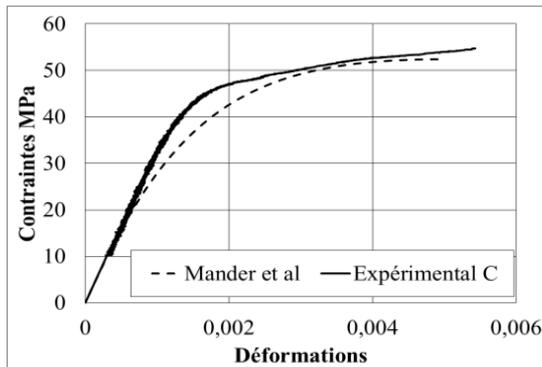


Figure 6 : Modélisation avec le composite SIKa

Figure 7 : Modélisation avec le composite NATUREL

$$f(\varepsilon) = f_{cc} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \times \frac{r}{r-1+(\varepsilon/\varepsilon_{cc})^r} \quad [2]$$

$$f_1 = 2(t/D)f_j \quad \text{et} \quad f_{cc} = f_{cm} \left(-1.2541 + 7.94 \left[(f_1/f_{cm}) + 2.254 \right]^{0.5} - 2(f_1/f_{cm}) \right) \quad [3]$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c1} \left[1 + 5 \left((f_{cc}/f_{cm}) - 1 \right) \right] \quad \text{et} \quad r = \frac{E_c}{E_c - (f_{cc}/\varepsilon_{cc})} \quad [4]$$

5. Conclusions

Le confinement/réparation des colonnes en béton par des composites unidirectionnels a conduit à une amélioration de la résistance à la compression de 180% et une grande capacité à la déformation. Les performances obtenues lors de l'utilisation du composite bio ressourcé sont prometteuses pour la réparation des structures du génie civil. L'étude semi-analytique a permis une prédiction fiable des caractéristiques mécaniques utilisées dans les codes de calcul du béton confiné/réparé comprimé.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ANR MICRO pour le support financier.

7. Bibliographie

- [CET 03] Cetisli, F., Naito, C.J., «State of the Art of Analytical Prediction for Confined Concrete» ATLSS Reports, N03-24. 2003
- [DON 15] Dong a, C.X., Kwan a, A.K.H., «Effects of confining stiffness and rupture strain on performance of FRP confined concrete» Engineering structures, Vol. 97,N. 2015
- [OMA 17] Omary,S., Ghorbel, E., Wardeh, G., Nguyen, M.D., «Mix Design and Recycled Aggregates Effects on the Concrete's Properties» International journal of civil engineering 2017
- [MAN 88] Mander, J.B., Priestley, J.N., Park, R., «Theoretical stress-strain model for confined concrete» Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, 1988
- [WAN 07] Wang, Y. C., Wong, P. M. H., & Kodur, V. « An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures» Composite Structures, Vol 80 N(1), 131–140. 2007