

# Etude de l'effet thermique sur les contraintes de cisaillement engendrées par arrachement de la plaque de renforcement FRP

## Study of thermal effect on interfacial shear stresses in FRP-plated RC beams under pull-off test

Khamis Hadjazi\*, Zouaoui Sereir, L. Errouane, M. L. Bennegadi<sup>1</sup> & A. Semmani

Laboratoire de Structures de Composites et Matériaux innovants, Faculté de Génie Mécanique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, BP 1505 El M'naouer, USTO, Oran, Algérie.

### Info. Article

#### Historique de l'article

Reçu le 15/12/2019

Révisé le 24/04/2020

Accepté le 29/02/2020

#### Mots-clés

Béton/FRP, Renforcement, Effet thermique, Contrainte d'interface, Décollement.

#### Keyword:

Concrete / FRP, Interface, Detachment, Repair, Reinforcement, Thermal, effect.

### RESUME

Afin d'éviter les inconvénients des anciennes techniques de renforcement ou de réparation en utilisant les assemblages soudés, boulonnés ou rivetés, l'emplacement de plaques en matériaux composites collées extérieurement sur les structures est apparu comme une alternative fiable assurant une répartition uniforme des contraintes à l'interface. Mais pour des raisons de techniques inadaptées lors de la mise en œuvre, de surexploitation ou de sous-dimensionnement, les nouvelles approches ont soulevé le problème de la séparation de la plaque de renforcement FRP de la poutre en béton. Pour parer à ce type d'endommagement dans les structures réparées, une nouvelle approche analytique tenant en compte l'effet de la température a été développée pour simuler le phénomène de décollement au niveau de l'interface Béton-FRP lors une sollicitation en Mode II. Cette approche est basée sur l'emploi du modèle de la zone cohésive. La loi de comportement ( $\tau$ - $\delta$ ) est divisée en trois zones : élastique, adoucissement et décollement. En premier lieu, une validation du modèle analytique a été effectuée avec des résultats issus de la littérature. Afin de réduire la concentration des contraintes au front et retarder leur évolution au niveau de l'interface, une étude paramétrique a été effectuée avec succès pour montrer l'effet de la température et de la variation de propriétés mécaniques et géométriques de la plaque FRP sur le comportement de la structure réparée.

### Abstract

In order to avoid various drawbacks caused by old reinforcement techniques and repair based on welded, bolted or riveted assemblies, composite panels glued externally on structures appeared as a reliable alternative ensuring a uniform distribution of the stresses at the interface. However, for reasons of unsuitable techniques during implementation, overuse or under-design, the new approaches have raised the problem of the separation of the FRP reinforcing plate from the concrete beam. To deal with this type of damage in the case of repaired structures, a new analytical approach taking into account the effect of temperature has been developed to simulate the phenomenon of detachment at the Concrete-FRP interface when applying a load in Mode II. This approach is based on the use of the cohesive zone model. The constitutive law ( $\tau$ - $\delta$ ) is divided into three zones: elastic, softening and separation. First, a validation of the analytical model was carried out with literature results. In order to reduce the stress concentration at the front and delay their evolution at the interface, a parametric study was carried out successfully to show the effect of the temperature and of the variation of mechanical and geometrical properties of the FRP plate on the behavior of the repaired structure.

---

**\* Auteur Correspondant**

Khamis Hadjazi

Département de Génie mécanique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.

BP 1505 El M'naouer, USTO, Oran, Algérie.

Email: [Khamishadj@yahoo.fr](mailto:Khamishadj@yahoo.fr)

---

**1. INTRODUCTION**

Les pathologies des ouvrages et des infrastructures existants, les modifications des conditions d'exploitation et de nouvelles conditions accidentelles exigent l'entretien, la protection ou la réhabilitation (réparation, renforcement). Les matériaux composites sont bien adaptés à ces objectifs. Leurs performances mécaniques, en particulier en traction, leur légèreté (qui ne surcharge pas la structure en cours de réparation) et leur adhérence avec le béton sont les principaux avantages de ces matériaux. L'utilisation des matériaux composites est devenue de plus en plus fréquente et ce dans plusieurs domaines industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire, le génie civil et (en) le génie maritime, etc... Le secteur du génie civil représentait en 2009, 27% du volume de matériau composite utilisé dans le monde au cours de cette année, juste derrière le domaine du transport avec 28 %, suivent ensuite les domaines de l'électronique (16%), des biens de consommation (9%), de la pétrochimie (7%), du maritime (6%), de l'éolien (3.5%) et de l'aérospatiale (3.5%), [1]. Une des applications avec succès est l'utilisation des plaques en composite pour la réparation et le renforcement des colonnes en béton armé, [2]. Ce champ d'application s'élargit de plus en plus aux autres types de structures comme les poutres [3], les dalles et les ouvrages d'arts, [4] où les bandes composites sont collées sur leur surface tendue dans l'espoir de réparer et d'améliorer leur capacité portante en flexion.

De nombreux travaux de recherches ont démontré l'efficacité de la technique de réhabilitation des bâtiments et des ouvrages d'art par le collage d'éléments de renforcement extérieur. Parmi les théories les plus utilisées dans littérature pour étudier la rupture des interfaces, l'approche par le modèle de la zone cohésive (MZC) est la mieux adaptée. Ce modèle relie les contraintes aux sauts de déplacement à travers une interface où la fissure peut se créer, [5-7]. L'objectif est donc d'exploiter les potentialités de ces systèmes composites dans le but de : 1) protéger, 2) réparer et 3) renforcer les ouvrages existants. Cependant, et malgré les nombreux avantages qu'offrent les matériaux composites, leurs adaptations aux applications de renforcement posent de nombreux problèmes. Ces problèmes peuvent, par exemple, être liés directement à la mécanique des composites (matériaux hétérogènes et anisotropes). Par ailleurs, de nombreuses défaillances sont aussi relatives à la structure renforcée (décollement, durabilité, etc.). La problématique des réparations et des renforcements des structures en béton a déjà fait l'objet de nombreuses investigations, [8-11].

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux lancés auparavant par de nombreux auteurs et a pour objet l'étude du comportement thermomécanique d'une poutre en béton renforcée par une plaque en matériau composite afin d'assurer un meilleur comportement de cette structure (résistance, rigidité et durabilité). L'évolution des contraintes de cisaillement le long de l'interface FRP-béton et le comportement en traction de la structure réparé ont été étudié.

**2. MODELE DE LA ZONE COHESIVE**

Pour étudier le phénomène de décollement de l'interface FRP-Béton, nous avons considéré une poutre en béton, renforcé par une plaque en matériau composite FRP soumise à une charge de traction (arrachement), comme illustré sur la figure 1. La géométrie et la section transversale de l'ensemble étudié est similaire au travail du chercheur (H. Yuan, 2004 et 2001). Les indices «c» et «p» dénotent respectivement la poutre en béton et la plaque FRP. La largeur et l'épaisseur de la plaque en composite sont désignées respectivement par « $b_p$ » et « $t_p$ », celles de la poutre en béton par « $b_c$ » et « $t_c$ ». L est la longueur d'interface FRP-Béton.

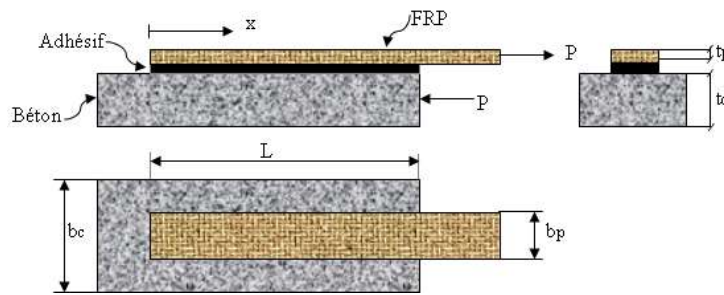


Figure 1. Problème simulé.

Dans cette étude la couche adhésive est sollicitée à une force de traction axiale appliquée à l'extrémité droite de la plaque FRP et à une température extérieure ( $T_{opr}$ ). Signalons que la loi de comportement de l'interface suit le Mode II (figure 3). Pour étudier le comportement du joint, un modèle analytique est développé en traitant les deux adhérents (FRP-Béton) comme étant soumis à des contraintes axiales uniformément réparties (déformations axiales), avec des effets de flexion négligés. La couche adhésive peut être considérée comme soumise uniquement à des contraintes de cisaillement qui sont également constantes dans l'épaisseur de la couche adhésive. Sur la base de ces hypothèses, les équations d'équilibre fondamentales d'un élément structural (Fig. 2), peuvent être facilement trouvées, [11]:

$$\frac{d\sigma_p}{dx} - \frac{\tau}{t_p} = 0 \tag{1}$$

$$\sigma_p t_p b_p + \sigma_c t_c b_c = 0 \tag{2}$$

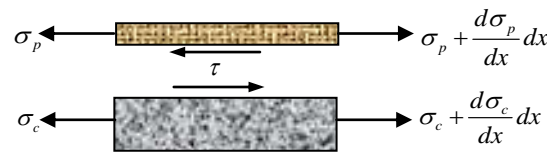


Figure 2. Déformation et équilibre dans un élément structural collé.

Avec  $\tau$ ,  $\sigma_p$  et  $\sigma_c$  qui sont la contrainte de cisaillement le long de la couche adhésive, la contrainte axiale dans la plaque et la contrainte axiale dans la poutre en béton, respectivement. Les lois constitutives de la couche adhésive, de la poutre en béton et de la plaque FRP sont données par :

$$\tau = f(\delta) \tag{3}$$

$$\sigma_p = E_p \frac{du_p}{dx} \tag{4}$$

$$\sigma_c = E_c \frac{du_c}{dx} \tag{5}$$

Où  $E_p$  et  $E_c$  sont respectivement le module d'Young de la plaque FRP et celui de la poutre en béton.

Afin d'étudier l'effet de la température sur la rigidité et la résistance du béton, de nombreuses études expérimentales sont effectuées. Ces études montrent que, avec l'augmentation de la température, le module de Young du béton  $E_c$  diminue, [13].

Dans ce travail, la dégradation de la rigidité de la poutre en béton en fonction de l'augmentation de la température est donnée par, [14]:

$$E_c(T_{opr}) = (1 - \max(val))E_c \tag{6}$$

Avec:

$$\begin{cases} val = 0.2\theta - 0.01\theta^2 & \text{pour } 0 \leq \theta \leq 10 \\ val = 1.0 & \text{pour } \theta > 10 \end{cases} \tag{7}$$

Et :

$$\theta = \frac{T_{opr} - T_{rm}}{100} \quad (8)$$

Où  $\theta$  est la température relative en ° C.

Nous avons utilisé la règle de mélange appliquée aux matériaux composites, afin de déterminer, le module de Young de la plaque de FRP, à savoir:

$$E_p = E_m V_m + E_f V_f \quad (9)$$

Dans cette équation, les indices  $f$  et  $m$  sont utilisés pour désigner respectivement les propriétés de la fibre et celles de la matrice.  $V_f$  est la fraction volumique des fibres dans le matériau composite. Pour les applications numériques, les caractéristiques mécaniques de la fibre et de la matrice sont regroupées dans le tableau 2.

Afin de mieux évaluer l'étude thermomécanique du composite ainsi que la variation des propriétés mécaniques des fibres et de la matrice, l'introduction de la température adimensionnelle  $T^*$  se fait au niveau micromécanique et non pas au niveau des plis ou du stratifié. Cette température adimensionnelle est définie par, [15-16]:

$$T^* = \frac{T_g^0 - T_{opr}}{T_g^0 - T_{rm}} \quad (10)$$

Avec,  $T_{opr}$ ,  $T_{rm}$ ,  $T_g^0$  qui sont respectivement la température de la limite opérationnelle, la température ambiante et la température de transition vitreuse de la matrice.

D'après Tsai (1988), les caractéristiques micromécaniques des fibres et de la matrice selon la variation de la température sont exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} E_m &= E_m^0 (T^*)^a \\ E_f &= E_f^0 (T^*)^b \end{aligned} \quad (11)$$

Où  $a$ ,  $b$  sont des constantes empiriques (Tab. 3).

Le glissement au niveau de l'interface Béton-Adhésif-FRP peut être décrit sous la forme :

$$\delta = u_p - u_c \quad (12)$$

Où  $u_p$  et  $u_c$  sont les déplacements longitudinaux à la base de l'adhérent «  $p$  » et la partie supérieure de l'adhérent «  $c$  », respectivement.

Le rapport entre la contrainte et la déformation dans ce contexte est désigné généralement sous le nom de contrainte-déplacement, puisque la déformation d'interface est principalement le déplacement relatif entre la plaque FRP et la poutre en béton.

Par conséquent, on emploie la loi de la zone cohésive (MZC) dans le présent modèle, pour analyser la séparation de l'interface de la poutre réparée par une méthode non linéaire. Dans ce document, un type triangulaire de la loi cohésive (bilinéaire) (Fig. 3), donne une bonne approximation de ce rapport non linéaire, [17,18, 9]. Selon ce modèle, la contrainte de cisaillement augmente linéairement avec le glissement le long de l'interface jusqu'à ce qu'elle atteigne la contrainte maximale  $\tau_f$  pour laquelle la valeur du glissement est désignée par  $\delta_1$ . L'adoucissement de l'adhésive (ou microfissuration) commence alors que la contrainte de cisaillement se réduit linéairement avec le glissement. La contrainte de cisaillement se réduit à zéro lorsque le glissement dépasse  $\delta_f$ , signifiant la rupture locale par cisaillement (décollement ou macro-fissuration) d'un élément cohésive.

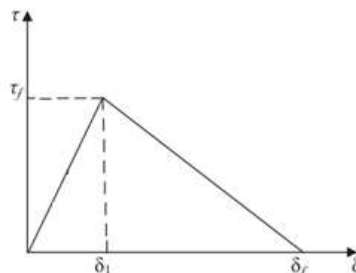


Figure 3. Loi bilinéaire du modèle de la zone cohésive.

$\tau_f$  est la contrainte limite de cisaillement,  $\delta_1$  et  $\delta_f$  le déplacement limite élastique et celui de séparation de l'interface, respectivement. L'énergie de la rupture  $G_f$  est donnée par la surface sous la figure 3, de la courbe de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement.

A partir de la loi de comportement contraintes de cisaillement - déplacement (glissement) les trois zones peuvent être décrites par l'équation suivante :

$$f(\delta) = \begin{cases} \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & , 0 \leq \delta \leq \delta_1 \text{ Stage élastique} \\ \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) & , \delta_1 < \delta \leq \delta_f \text{ Stage endommagement} \\ 0 & , \delta > \delta_f \text{ Stage séparation} \end{cases} \quad (13)$$

Substituant les équations (1) à (5) dans l'équation (12) et en introduisant les paramètres du modèle de la zone cohésive  $\tau_f$  et énergie de rupture  $G_f$  on peut trouver l'équation différentielle qui gouverne le comportement de l'interface FRP-béton et peut être résolue si le modèle local reliant la contrainte de cisaillement au glissement représenté par  $f(\delta)$  est défini.

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - \frac{2G_f}{\tau_f^2} \lambda^2 f(\delta) = 0 \quad (14)$$

Et:

$$\sigma_p = \frac{\tau_f^2}{2G_f t_p \lambda^2} \frac{d\delta}{dx} \quad (15)$$

Où :

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f^2}{2G_f} \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right) \quad (16)$$

Utilisant le MZC, le comportement d'un élément structural renforcé par une plaque FRP est donné comme suit :

### 2.1. Etape élastique

Initialement, la charge appliquée dans cet étape est petite, par conséquent la contrainte maximale d'interface  $\tau$  est inférieure à  $\tau_f$ . Le comportement le long de l'interface est élastique (zone élastique). Dans cette zone la relation contrainte/glissement est donnée par la première expression de l'équation (13). La substitution de l'équation (14) dans cette équation donne :

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - \lambda_1^2 \delta = 0 \quad (17)$$

Où :

$$\lambda_1^2 = \frac{\tau_f}{\delta_1} \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right) \quad (18)$$

La contrainte axiale doit satisfaire les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 0 & \text{à } x &= 0 \\ \sigma_p &= \frac{P}{b_p t_p} & \text{à } x &= L \end{aligned} \quad (19)$$

Avec ces conditions aux limites, l'expression de la contrainte de cisaillement interfaciale dans l'étape élastique est trouvée en résolvant l'équation (17) :

$$\tau = \frac{p \lambda_1 \cosh(\lambda_1 x)}{b_p \sinh(\lambda_1 L)} \quad (20)$$

Au cours de cette étape, la contrainte de cisaillement maximale est inférieure à la contrainte de cisaillement  $\tau_f$ . La contrainte de cisaillement de l'interface présentée par l'équation (20), augmente linéairement avec la charge appliquée jusqu'à atteindre la limite de cisaillement, c'est-à-dire:

$$\begin{cases} \tau|_{x=L} = \tau_f \\ \text{ou} \\ \delta|_{x=L} = \delta_1 \end{cases} \quad (21)$$

Cette contrainte de cisaillement maximale correspond à une force de traction maximale qui représente la limite d'élasticité  $P_e$ . La force maximale pour laquelle l'interface est à l'étape élastique peut être obtenue à partir de l'équation (20):

$$p_e = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1 L) \quad (22)$$

### 2.2. Etape adoucissante-élastique

Si la charge continue d'augmenter et après avoir atteint la limite d'élasticité  $\tau = \tau_f$  ( $\delta = \delta_1$ ), une partie de l'interface commence à s'endommager localement en présence d'un glissement (cisaillement au niveau de l'interface), et deux régions le long de l'interface sont formées. Cette étape est composée de deux régions : zone élastique et zone adoucissante. Pour déterminer le comportement de l'interface dans cette étape, on substitue la deuxième relation de l'équation (13) dans l'équation (14). Après un développement mathématique, la solution du glissement dans les deux zones donne les formes différentielles suivantes :

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - \lambda_1^2 \delta = 0 \quad \text{Si} \quad 0 \leq \delta \leq \delta_1 \quad (23)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} + \lambda_2^2 \delta = \lambda_2^2 \delta_f \quad \text{Si} \quad \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \quad (24)$$

Avec :

$$\lambda_2^2 = \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} \left( \frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right)$$

En utilisant les conditions aux limites ci-dessous :

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 0 \quad \text{à} \quad x = 0 \\ \sigma_p &\text{ est continue} \quad \text{à} \quad x = L - a \\ \delta &= \delta_1 \text{ ou } \tau = \tau_f \quad \text{à} \quad x = L - a \\ \sigma_p &= \frac{P}{b_p t_p} \quad \text{à} \quad x = L \end{aligned} \quad (25)$$

Les deux équations différentielles du second ordre (23) et (24) admettent les solutions suivantes:

Dans la région élastique ( $0 \leq \delta \leq \delta_1$ ), i.e. ( $0 \leq x \leq L - a$ ) la solution de la contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \tau_f \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1 (L - a))} \quad (26)$$

et pour la région adoucissante de l'interface ( $\delta_1 < \delta \leq \delta_f$ ), i.e. ( $L - a \leq x \leq L$ ), elle est donnée par :

$$\tau = -\tau_f \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1 (L - a)) \sin(\lambda_2 (x - L + a)) - \cos(\lambda_2 (x - L + a)) \right\} \quad (27)$$

Où  $a$  est la longueur de la zone d'adoucissement.

La taille de la zone d'adoucissement  $a$  peut être déterminée par la substitution des conditions aux limites de l'équation (25) dans l'équation (27).

Quand  $P > P_e$ , l'interface FRP-béton passe à l'étape élastique-adoucissante. Cette étape s'achève quand la séparation commence à s'initier

La taille maximum de la zone adoucissante  $a_u$  est atteinte lorsque  $\frac{dP}{da} = 0$ . La valeur maximale de  $a_u$  est donnée par :

$$a_{\max} = a_u = \frac{1}{\lambda_2} \arctan\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \tag{28}$$

La charge  $P$  correspondante à cet instant est désignée sous le nom de la charge ultime  $P_u$ . Elle est donnée par :

$$P_u = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_2} \left\{ \frac{\delta_1}{\delta_f - \delta_1} \tanh^2(\lambda_1(L - a_u)) + 1 \right\} \sin(\lambda_2 a_u) \tag{29}$$

**2.3. Etape de Séparation-Adoucissante-Elastique**

Si la charge continue encore d’augmenter, la limite de décollement est atteinte ( $\delta = \delta_f$ ), par conséquent un décollement total se produit le long de l’interface. La distance  $d$  montre la taille de la propagation du décollement lorsque la force de traction limite  $P_u$  est atteinte. Dans cette section les trois étapes, élastique, adoucissement et séparation sont considérées. Pour chaque étape, la contrainte de cisaillement est donnée par:

- Stage élastique

$$\tau = \tau_f \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1(L - d - a))} \tag{30}$$

- Stage adoucissante

$$\tau = -\tau_f \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh(\lambda_1(L - d - a)) \sin(\lambda_2(x - L + d + a)) - \cos(\lambda_2(x - L + d + a)) \right\} \tag{31}$$

- Stage de séparation

$$\tau = 0 \tag{32}$$

**3. RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Dans le présent travail, une validation du modèle suivi d’une étude paramétrique est présentée afin de mettre en valeur la sensibilité de notre modèle à la variation de la température et aux caractéristiques mécaniques de la poutre en béton et de la plaque en FRP. Pour nos applications, les caractéristiques mécaniques et géométriques sont données dans les tableaux 1, 2 et 3. Elles sont identiques à celles utilisées par H. Yuan et al, [11] et Sereir et al [16].

Tableau 1. Caractéristiques géométrique du modèle étudié [11].

$L$ [mm]	$t_p$ [mm]	$t_c$ [mm]	$b_c$ [mm]	$b_p$ [mm]
190	0,165	150	150	25

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques de la poutre, la plaque graphite / époxy (T300/ 5208) et l’adhésif [11,16].

$E_c$ [Gpa]	$E_f^0$ [GPa]	$E_m^0$ [GPa]	$V_f$	$\tau_f$ [MPa]	$\delta_1$ [mm]	$G_f$ [N/mm]
28.6	259	3.4	0.7	7.2	0.034	0.58

Tableau 3. Température et constantes empiriques [16].

$T_g^0$ [°C]	$T_{rm}$ [°C]	a	b
160	20	0.5	0.04

**3.1 Effet de la Température sur la Rigidité du FRP et du Béton**

La comparaison de la dégradation et la variation de la rigidité de la poutre en béton et de la plaque en composite en fonction de l’augmentation de la température a été effectuée avec les résultats ©UBMA 2020

donnés par le modèle expérimentale de Schneider, [13] et le modèle analytique de Sereir, [16] (Fig. 4 et Fig.5 respectivement). La figure 4 montre la concordance de l'équation 6 avec les résultats expérimentaux donnés par Schneider, [13]. La dégradation du module de Young de la plaque composite avec variation de température donné par la figure 5 est en bon accord avec les résultats donnés par le modèle de Sereir, [16].

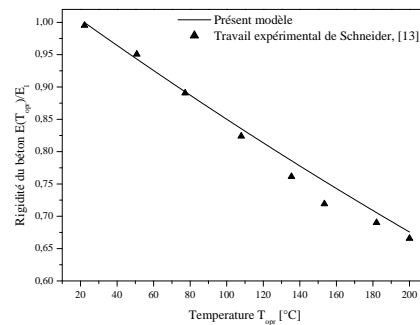


Figure 4. Variation de la rigidité du béton en fonction de la température.

### 3.2 Validation des Résultats

Dans la figure 6, l'évolution de la contrainte de cisaillement le long de l'interface FRP/Béton obtenue par le modèle de la zone cohésive actuelle a été comparée avec les résultats donnés par le modèle analytique de H. Yuan [11]. Cette validation montre la parfaite concordance de nos résultats avec ceux issus de la bibliographie. Au début du chargement, la contrainte de cisaillement est dans la zone élastique. Lorsque cette contrainte atteint sa valeur critique  $\tau_f$ , on assiste à un endommagement caractérisé par la zone adoucissante. Dans cette zone on remarque une chute considérable de cette contrainte jusqu'à la valeur zéro qui désigne le début de la zone de séparation.

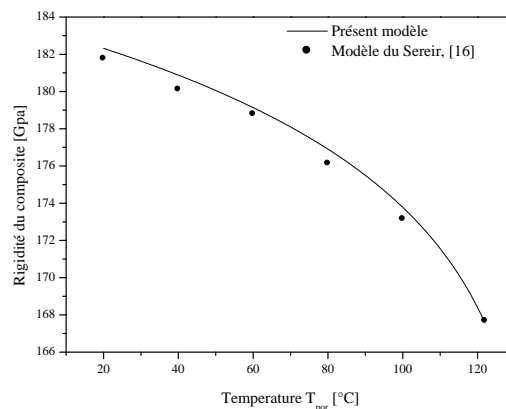


Figure 5. Variation de la rigidité de la plaque FRP en fonction de la température.



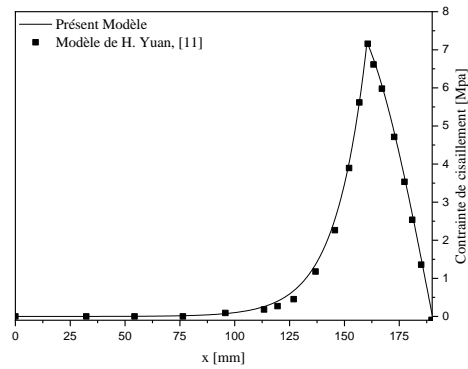


Figure 6. Validation des résultats.

#### 4. ÉTUDE PARAMETRIQUE

##### 4.1 Effet de la Température

La figure 7 donne un aperçu général sur l'évolution de la contrainte de cisaillement le long de l'interface sous l'effet de la température ( $T_{opr} = 20$  à  $100^\circ\text{C}$ ). Dans le cas où la température est égale à  $20^\circ\text{C}$  ( $T_{opr} = 20^\circ\text{C}$ ), la contrainte au fond (bord libre) est de l'ordre de  $\tau = 1,52$  MPa et la longueur de la zone adoucissante est de l'ordre de  $a_l = 21$  mm. Avec l'augmentation de la température, on remarque une augmentation de la longueur de la zone adoucissante et une chute de la concentration de la contrainte de cisaillement au bord libre. Cela peut provoquer le décollement de la plaque de renforcement si la contrainte atteint la valeur 0.

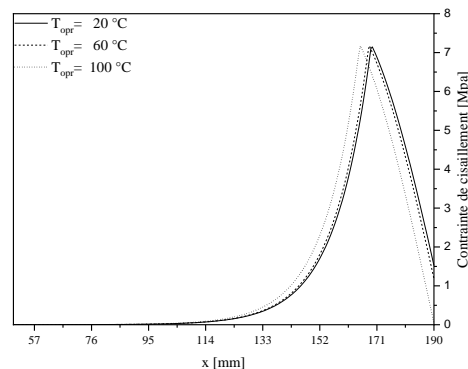


Figure 7. Evolution de la contrainte de cisaillement le long de l'interface en fonction de la température.

Ainsi, la température influe considérablement sur le comportement et la durée de vie de la structure renforcée. Dans la figure 8, l'évolution de la force de traction dans la plaque en matériau composite (pulling force) a été établie en fonction du déplacement axial au niveau de l'interface «  $\delta$  » jusqu'au début de décollement pour différentes valeurs de la température. Pour un chargement donné, trois zones ont été distinguées à savoir AB, BC et le point C. Le segment AB correspond à l'étape élastique avec un comportement linéaire. Le segment BC correspond à l'étape élastique-adoucissante avec un comportement non linéaire (endommagement microscopique). Enfin le point C correspond au début du décollement (endommagement macroscopique). Dans ce dernier stade, la force de traction dans la plaque composite qui est constante représente la charge ultime de décollement.

A partir de cette figure, on remarque que la variation de la température a un effet considérable sur la variation du comportement de la structure réparée. L'élévation de la température de  $20$  à  $100^\circ\text{C}$  provoque une dégradation de 12% de la capacité portante de la structure réparée. D'autre part la dégradation de la structure réparée est plus importante entre  $60^\circ$  et  $100^\circ\text{C}$  qu'entre  $20^\circ$  et  $60^\circ\text{C}$ .

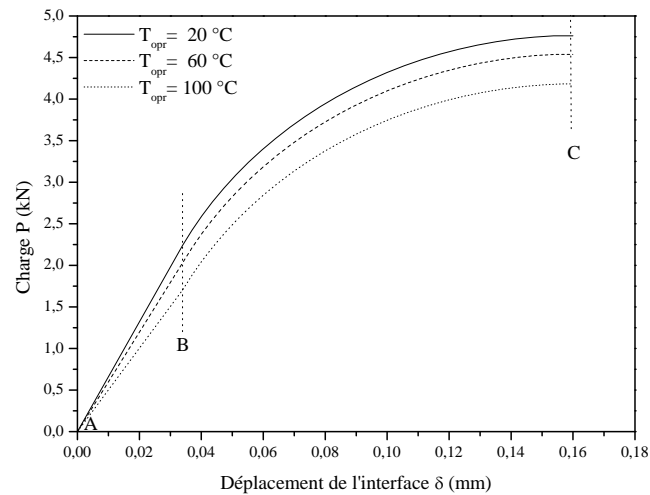


Figure 8. Courbes forces-déplacements au niveau de l'interface.

La figure 9 illustre l'effet de la variation de la fraction volumique sur la concentration de la contrainte de cisaillement à l'extrémité ( $x=L$ ) pour différentes valeurs de la température. Sur cette figure il est clairement visible que la diminution de la rigidité de la plaque FRP par la diminution de la fraction volumique provoque une chute de la concentration de contrainte de cisaillement à l'extrémité, par conséquent une activation du processus de séparation de la plaque de renforcement. D'autre part l'augmentation de la température engendre une augmentation de la concentration de la contrainte soit pour des faibles ou des fortes rigidités de la plaque en matériau composite. Evidemment, la température et la rigidité de la plaque FRP jouent un rôle important dans la concentration de la contrainte de cisaillement à l'extrémité et dans la création de la zone de séparation.

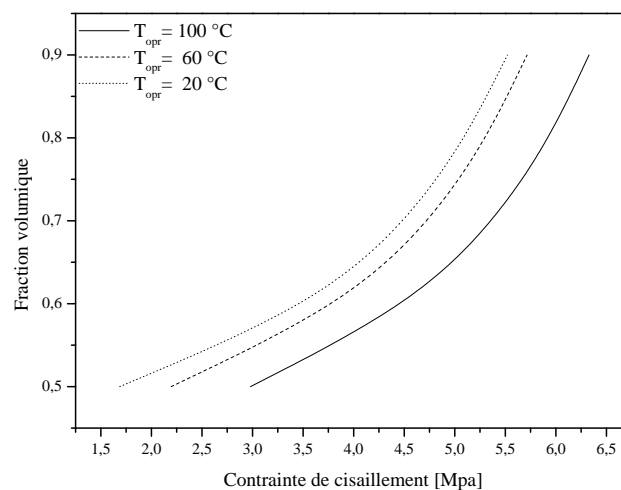


Figure 9. Variation de la concentration de contrainte de cisaillement à l'extrémité.

#### 4.2 Effet de la Fraction Volumique

La variation de la longueur de la zone adoucissante en fonction de la température pour différents fraction volumique ( $V_f=0.5$  à  $0.7$ ) est représentée sur la figure 10. Sur cette figure il est clair que l'augmentation de la température engendre une augmentation de la longueur de la zone adoucissante ( $a_1$ ). Si température continue d'augmenter, l'interface rejoint la zone de séparation. On peut dire que la température influe considérablement sur la résistance de la structure. De plus, pour des

grands pourcentages de la fraction volumique, la longueur de la zone adoucissante devient plus importante. Ainsi on assiste à un retardement du passage entre la zone adoucissante et la zone de séparation. On peut dire, que l'augmentation de la fraction volumique est un facteur favorable, parce qu'il ajoute une rigidité supplémentaire à la structure renforcée.

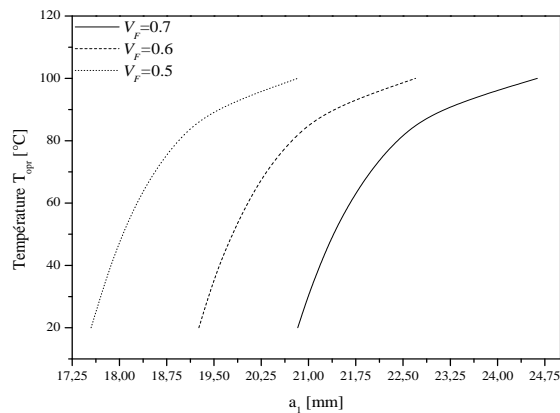


Figure 10. Variation de la longueur de zone adoucissante en fonction de la température.

En ce servant du modèle de la zone cohésive, nous avons choisi de vérifier l'influence de la fraction volumique des fibres sur l'évolution des contraintes de cisaillement le long de l'interface à une température constante. En effet, la figure 11, montre que lorsque la fraction volumique des fibres de la plaque FRP augmente la contrainte de cisaillement à l'extrémité chargée s'éloigne de la valeur zéro et la longueur de la zone adoucissante diminue. Ceci permet d'affirmer que l'augmentation de la fraction volumique des fibres diminue le risque de décollement de la plaque FRP.

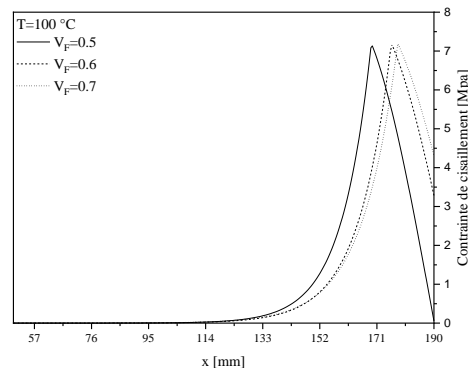


Figure 11. Evolution de la contrainte de cisaillement pour différentes fraction volumique.

## 5. CONCLUSION

Afin de mieux cerner le comportement des structures de type poutres en béton renforcées par des plaques en matériau composite, sous des sollicitations thermomécanique, nous avons proposé une nouvelle approche analytique pour prédire la distribution des contraintes de cisaillement le long de l'interface induites par une charge de traction. Notre nouvelle approche est basée sur une loi bilinéaire de la zone cohésive. Une étude paramétrique a été effectuée afin de tester la sensibilité de notre modèle à la variation de la température et de la fraction volumique des fibres. A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que:

✓ L'augmentation de la température engendre une augmentation de la longueur de la zone adoucissante et une chute de la concentration de la contrainte de cisaillement (qui tend vers zéro) à l'extrémité. Cette situation peut provoquer le décollement de la plaque FRP.

✓ La dégradation de la structure réparée est plus importante entre 60° et 100 °C qu'entre 20° et 60°C.

✓ L'augmentation de la fraction volumique ajoute une rigidité supplémentaire à la structure renforcée et diminue le risque de décollement de la plaque FRP.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] James O., 2009. Construire avec les composites; L'usine nouvelle N° 3141, Technologies et innovations.
- [2] Mosallam AS., 2000. Innovative systems for seismic repair and rehabilitation of structures. *Lancaster, PA, USA: Technomic Publishing Co*, ISBN 1 -56676-964-7.
- [3] Djelal C. et al., 1998. Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : étude expérimentale - pré dimensionnement". *Analyses du bâtiment et des travaux publics*.
- [4] Ayman, S. Mosallam & Khalid, M. Mosalam, 2003. Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates. *Construction and Building Material*, Vol. 17, PP 43-54.
- [5] Wang, J., 2007. Cohesive-bridging zone model of FRP-concrete interface debonding. *Engineering Fracture Mechanics*. vol. 74, pp. 2643-2658, [doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.02.013](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.02.013)
- [6] Hadjazi, K., Sereir, Z., Amziane S., 2012. Cohesive zone model for the prediction of interfacial shear stresses in a composite-plate RC beam with an intermediate flexural. *Composite Structure*, vol. 94, pp. 3574-3582, [doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.05.027](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.05.027)
- [7] Houachine, H.R.E, Sereir, Z., Amisiane, S., Hadjazi, K., Bouhafis, M., 2014. Développement d'un modèle combiné cohésive/ pontage pour l'étude de l'effet des déformations de cisaillement sur les contraintes d'interface d'un joint béton-CFRP. *Journal of matériels, Processes and Environment. Volume 02, Numéro 01 (May edition), ISSN: 2335-1020*.
- [8] Madi R., Guenfoud M., 2009. Analyse du comportement des poutres en béton arme renforcées par matériaux composites. *19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*.
- [9] Wang, J., 2006. Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, PP. 6630-48, [doi:10.1016/j.ijsolstr.2006.01.013](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.01.013)
- [10] Chen, J. F, Yuan, H., Teng, J.G, 2007. Debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks in concrete members. *Engineering Structures*, Vol. 29. PP. 259-270. [doi:10.1016/j.engstruct.2006.04.017](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.04.017)
- [11] Yuan, H., Teng, J.G., Seracino, R., Wu, Z.S., Yao, J. 2004. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. *Engineering Structures*. Vol. 26, PP. 553-565. [doi:10.1016/j.engstruct.2003.11.006](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.11.006)
- [12] Yuan, H., Zhishen, W., Hiroyuki, Y. 2001. Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates. *Structural Engineering*. Vol. 18, PP. 27-39.
- [13] Schneider, U. 1982. Verhalten von beton bei hohen temperaturen deutscher ausschuss für Stahlbeton, ed., Ernst & Sohn.
- [14] Stabler, J. T. 2000. Computational modelling of thermo-mechanical damage and plasticity in concrete.
- [15] Tsai, SW, 1988. Composite design. Think composites. 4<sup>th</sup> ed. OH, USA: Dayton.
- [16] Sereir, Z., Adda-Bedia, E.A., Tounsi, A. 2006. Effect of temperature on the hygrothermal behavior of unidirectional laminated plates with asymmetrical environmental conditions. *Composite Structure*. Vol. 72, PP. 383-392. [doi:10.1016/j.compstruct.2005.01.008](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.01.008)
- [17] Bennegadi, M.L., Hadjazi, K., Sereir, Z., Amziane, S., Mahi, B. El, 2016. General cohesive zone model for prediction of interfacial stresses induced by intermediate flexural crack of FRP-plated RC beams. *Engineering Structures*, Vol. 126, PP. 147-157. [doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.030](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.030)
- [18] Houachine, H. R. E., Sereir, Z., Kerboua, B., Hadjazi, K., 2013. Combined cohesive-bridging zone model for prediction of the debonding between the FRP and concrete beam interface with effect of adherend shear deformations. *Composite : Part B*, Vol. 45, PP. 871-880. [doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.009](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.009)