



**HAL**  
open science

## Modélisation numérique du comportement à rupture (peeling-off) de poutres BA renforcées soumises à un essai de flexion 4-points

Sahar Radfar, Gilles Forêt, Karam Sab

► **To cite this version:**

Sahar Radfar, Gilles Forêt, Karam Sab. Modélisation numérique du comportement à rupture (peeling-off) de poutres BA renforcées soumises à un essai de flexion 4-points. *Revue des composites et des matériaux avancés = Journal of Composite and Advanced Materials*, 2012, pp.n°2, 171-185. hal-00939990

**HAL Id: hal-00939990**

**<https://enpc.hal.science/hal-00939990>**

Submitted on 31 Jan 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation numérique du comportement à rupture (peeling-off) de poutres BA renforcées soumises à un essai de flexion 4-points

## *Simulation of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams*

Sahar Radfar<sup>1</sup>, Gilles Foret<sup>1</sup>, Karam Sab<sup>1</sup>

1 : Laboratoire Navier – École des Ponts ParisTech  
Université Paris-Est, F-77455 Marne-la-Vallée cedex 2  
e-mail : [sahar.radfar@enpc.fr](mailto:sahar.radfar@enpc.fr), [gilles.foret@enpc.fr](mailto:gilles.foret@enpc.fr), [karam.sab@enpc.fr](mailto:karam.sab@enpc.fr)

### Résumé

Le renforcement de structures ou d'éléments de structure par collage de matériaux composites est une technique actuellement reconnue et utilisée dans le monde entier. Néanmoins, ce type de renforcement peut produire des ruptures non-conventionnelles telles que la rupture par délaminage ou de type peeling-off. Cette dernière résulte du décollement du béton d'enrobage qui reste solidaire du matériau de renforcement. Pour une conception optimale d'un renforcement en flexion par collage, il est important d'être en mesure de prévoir ce type de rupture et d'en tenir compte dans le dimensionnement. Nous nous intéressons donc dans cette étude à ce mécanisme de ruine. Pour cela, nous avons modélisé des poutres BA renforcées sollicitées en flexion 4 points à l'aide d'un code de calcul commercial de type éléments finis, ABAQUS. Les analyses numériques sont de type élasto-plastique et permettent de déterminer le mode de rupture et le niveau de charge correspondant. Nous avons ensuite mené une étude expérimentale sur 15 poutres pour valider notre travail numérique. La confrontation des résultats de la modélisation et des résultats expérimentaux nous permet de conclure que le modèle numérique est capable de prédire le mécanisme de ruine à savoir le peeling-off ainsi que la charge de ruine correspondante.

### Abstract

The flexural strength of a reinforced concrete beam can be increased by bonding a fiber-reinforced polymer sheet to the tension face. This method of flexural strengthening has emerged very popular around the world for the repair of structures. Nevertheless, this type of reinforcement may cause a premature and brittle failure such as plate end interfacial debonding or concrete cover separation. This paper is concerned with the failure by concrete cover separation; in other words by peeling-off. This mode involves the tearing-off of the concrete cover along the level of tension steel reinforcement starting from a plate end. The first step for a successful, safe and economic design of flexural strengthening using FRP composite at the bottom of the beam is then to predict such failure and to take it into account in design. In this paper, a 3D finite element model using the commercial program; ABAQUS, is presented for the simulation of concrete cover separation failures. A nonlinear finite element analysis was carried out to predict ultimate loading capacity and the failure mode of RC beams in a four-point bending setup. In order to validate this modeling, 15 RC beams were tested in a four-point bending set-up. Comparisons between the predictions of the numerical model and test results show a very good agreement.

**Mots Clés :** peeling-off, renforcement, modélisation numérique, modélisation expérimentale

**Keywords:** peeling-off, concrete cover separation, strengthening, numerical modelling, experimental program

## 1. Introduction

Le parc des infrastructures des pays développés vieillit et demande une maintenance adaptée. Optimiser cette maintenance, dans la logique du développement durable, est un enjeu sociétal majeur. Le renforcement des structures par collage de PFR (polymères renforcés de fibres) rentre dans le cadre de la valorisation des structures existantes et permet d'augmenter la durée de vie des infrastructures et ainsi de répondre aux attentes en matière de « Conception et d'aménagement des infrastructures avec un objectif de développement durable ». L'avantage du renforcement par collage est qu'il augmente la durée de vie des ouvrages renforcés et qu'il permet de limiter les concentrations de contraintes dans les pièces à assembler par rapport à l'assemblage par

boulonnage. On peut citer d'autres avantages pour cette technique comme la facilité de mise en œuvre, la résistance à la corrosion et l'accroissement minimum dans la taille et le poids de la structure renforcée.

Il est maintenant de l'avis général que le renforcement permet d'augmenter la charge de service et dans des proportions plus importantes la charge ultime de l'ouvrage lorsque l'on est en présence de modes de ruine de type conventionnel (rupture du béton en compression ou par effort tranchant, rupture des aciers, rupture du matériau de renforcement). On observe en effet souvent un autre mode de ruine fragile et non-conventionnel que l'on appelle « peeling-off ». Ce mode de ruine résulte du décollement du béton d'enrobage qui reste collé au matériau de renforcement. Les calculs montrent que ce mécanisme de ruine se produit pour un niveau de charge bien plus bas que tous les niveaux de charge entraînant une ruine de type conventionnel. Le renforcement n'est donc pas dans ce cas de figure optimale. Par conséquent, pour une conception optimale d'un renforcement en flexion par collage, il est important d'être en mesure de prévoir ce type de rupture et d'en tenir compte dans le dimensionnement. La figure 1 représente différents modes de rupture d'une poutre BA renforcée.

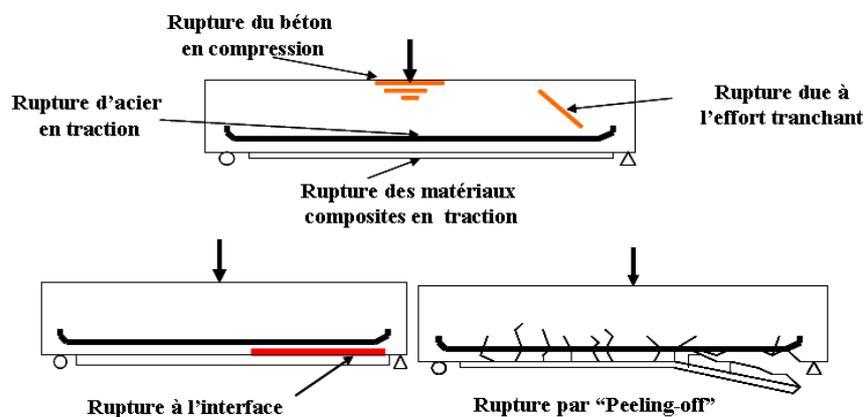


Figure 1 : Différents modes de ruptures de poutres BA renforcées

On trouve d'une part dans la littérature des travaux préconisant des règles pour prévenir les ruptures prématurées, ces règles étant en général déduites d'approches expérimentales. Dans le cadre du renforcement de poutres BA avec des plaques en acier, il est ainsi recommandé que le rapport largeur sur épaisseur des renforts ne soit pas inférieur à 50 ou 60 [1]. D'autre part, il existe des modèles permettant de prédire la rupture de poutre ou dalle BA utilisant le renforcement par collage [2,3,4]. Nous pouvons aussi citer la méthode basée sur la formation de dents entre les fissures dans le béton d'enrobage, la méthode basée sur la résistance du béton en cisaillement et la méthode basée sur la contrainte interfaciale à l'extrémité de la plaque de renforcement [5-9].

Cependant, bien que l'on trouve dans la littérature un grand nombre d'articles portant sur le renforcement en flexion des poutres BA, très peu de travaux portent sur les ruptures prématurées dues au renforcement. Cet état de fait a donc motivé notre étude qui s'intéresse à la rupture des poutres BA renforcées par peeling-off et qui vise à proposer un outil simple et performant pour pouvoir modéliser les poutres BA renforcées. Dans un premier temps, dans le but d'appréhender les phénomènes responsables de ce mécanisme de ruine, nous avons procédé à une modélisation numérique et à une campagne expérimentale. Le modèle numérique est réalisé à l'aide d'un code de calcul commercial fréquemment utilisé de type éléments finis, ABAQUS. Les analyses numériques sont de type élasto-plastique et permettent de déterminer le mode de ruine et le niveau de charge correspondant. Le modèle numérique est un modèle tridimensionnel dans lequel les éléments du béton et de l'acier de renforcement sont des éléments 3D quadratiques et les éléments du renfort sont 2D quadratiques. Pour comprendre au mieux le comportement des poutres renforcées sous chargement et pour valider la modélisation numérique, nous avons réalisé 15

poutres BA dont 12 sont renforcées (les 3 autres servant de référence). Les poutres ont été sollicitées en flexion 4 points jusqu'à la rupture. Le mode de ruine de toutes les poutres renforcées est de type peeling-off. Nous obtenons une très bonne concordance entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux. Par la suite, nous allons dans un premier temps développer les différentes étapes de la modélisation et dans un deuxième temps analyser les résultats obtenus.

## 2. Modélisation numérique

Le but de ce travail est d'élaborer un modèle pour la conception et le dimensionnement des poutres BA renforcées et ainsi fournir aux ingénieurs un outil de calcul dédié. Nous avons choisi de modéliser la poutre qui est un milieu 3D à l'aide du code de calcul ABAQUS. Notre modèle doit permettre de prédire l'endroit de la rupture et le mode associé ainsi que le niveau de chargement correspondant. Pour traiter correctement une telle problématique, il nous faut d'abord réfléchir au choix des paramètres suivants : modélisation 2D ou 3D, comportement du matériau, non-linéarité due au matériau ou dû aux grandes déformations paramètres de contrôle et d'arrêt du programme, charge appliquée, conditions aux limites, maillage, comportement du contact, modélisation du renfort. Les résultats et le temps de calcul peut considérablement varier en fonction de ces paramètres.

### 2.1 Géométrie et hypothèses de la modélisation

Les poutres BA renforcées à section rectangulaire sont composées de béton, d'armatures longitudinales, de renfort transversal et de plaques de composites collées sur les faces inférieures (les dimensions de ces poutres sont présentées dans la section 3). Les plans de symétrie ont été utilisés en considérant la charge et la géométrie pour ne modéliser qu'un quart de la poutre. Les poutres sont sollicitées en flexion 4 points jusqu'à la rupture. Nous avons défini les conditions aux limites appropriées, telles que les conditions de symétrie et d'appui simple. La non-linéarité géométrique (grande déformation) a été prise en compte. Nous supposons dans toutes les modélisations qu'il y a une adhérence parfaite entre les différentes composantes d'une poutre ; autrement dit, le transfert de charge est optimal. Les poutres sont maillées finement dans les endroits où les ruptures sont susceptibles de se produire, c'est-à-dire à l'extrémité de la plaque de renforcement ainsi qu'au niveau de l'armature et reste grossier ailleurs. Les éléments du béton et de l'armature longitudinale sont de type volumique hexaédrique à vingt-nœuds où l'interpolation des déplacements sur l'élément est quadratique ; de plus, chaque nœud d'éléments a trois degrés de liberté (trois déplacements). Les plaques de renforcement sont modélisées à l'aide des éléments bidimensionnels quadratiques composés de 8 nœuds ayant chacun 6 degrés de liberté. Nous pouvons voir différentes étapes de modélisation telles que la géométrie, les conditions aux limites, le chargement et le maillage sur la figure 2.

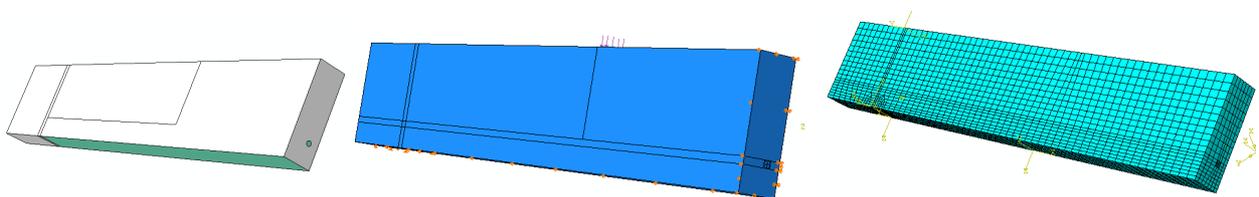


Figure 2 : poutre BA renforcées modélisée : géométrie, conditions aux limites, chargement, maillage

### 2.2 Propriétés des matériaux

#### 2.2.1 Comportement de l'acier et du PRF

Le comportement de l'acier a été considéré comme élastique parfaitement plastique. D'autre part, sachant que le rôle de l'armature est de transmettre les efforts axiaux, nous avons considéré un

comportement unidirectionnel. Les caractéristiques de l'acier dans notre modèle sont :  $E = 200$  GPa,  $\sigma_e = 500$  MPa,  $\nu = 0,3$ . Le comportement des plaques en matériaux composites est supposé être élastique linéaire jusqu'à la rupture. Nous pouvons résumer respectivement les propriétés mécaniques du renfort transversal et de la plaque de renforcement comme suit:  $E_T=160$  GPa,  $E_L = E_N = 6$  GPa,  $G_{LT} = G_{LN} = 4$  GPa,  $G_{TN} = 2,4$  GPa,  $E_T=120$  GPa,  $E_L = E_N = 8$  GPa,  $G_{LT} = G_{LN} = 4,5$  GPa,  $G_{TN} = 3,2$  GPa.

## 2.2.2 Comportement du béton

Le comportement du béton est toujours difficile à modéliser. Cette difficulté est liée à de nombreux paramètres tels que : la forte hétérogénéité du béton, la dissymétrie du comportement en traction et en compression, les microfissures réparties de manière aléatoire etc... Des recherches ont été menées depuis longtemps sur le comportement mécanique du béton dans l'espoir de mieux comprendre les mécanismes de rupture de ce matériau et plusieurs théories ont été développées ; à savoir, la mécanique de la rupture, la théorie de la plasticité, la théorie de l'endommagement, la méthode de fissuration discrète, la méthode de fissuration distribuée. Tous ces modèles permettent de modéliser le comportement du béton à l'aide d'une approche éléments finis [4,10,11]. Néanmoins, la modélisation du comportement mécanique du béton n'est pas entièrement résolue et reste un domaine de recherche. Par conséquent, il faut élaborer dans un premier temps un modèle fiable qui représente correctement le comportement complexe du béton et dans un deuxième temps simple pour qu'il soit aisé de l'utiliser pour la modélisation des structures en béton.

### 2.2.2.1 Béton en compression

Nous savons que le comportement du béton sous compression multiaxiale tout en étant plus ductile (par rapport à la compression uniaxiale) peut être apparenté à un comportement plastique, mais il faut garder à l'esprit le fait qu'au niveau local, les mécanismes mis en jeu correspondent à de la microfissuration [12]. Cela dit, nous employons par la suite le terme plasticité. Un modèle couramment utilisé pour le béton est un comportement élasto-plastique en appliquant un critère de plasticité [13,14]. L'avantage de ce modèle est d'être plus robuste du point de vue calcul numérique et l'inconvénient est d'être incapable de prédire la fissuration et son évolution. Dans ce travail, le béton est pris comme un milieu continu isotrope dans le cadre de la théorie de la plasticité. Nous avons donc employé le critère de plasticité Drucker-Prager avec la loi d'écoulement associée, formulé dans l'espace des contraintes hydrostatiques et déviatoriques. Classiquement, nous décomposons le champ de contrainte en deux parties : la contrainte hydrostatique et la contrainte déviatorique. L'expression de la contrainte hydrostatique qui ne dépend pas des contraintes de cisaillement et celle de la contrainte déviatorique sont respectivement données par les équations 1 et 2 et nous pouvons constater que dans le cas d'un cisaillement pur, seule la contrainte déviatorique n'est pas nulle. Ces deux contraintes permettent de déterminer des domaines d'élasticité et de plasticité dans le plan p-q.

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) + 3\sigma_{12}^2 + 3\sigma_{13}^2 + 3\sigma_{23}^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Dans le cadre du critère Drucker-Prager, le domaine d'élasticité est défini par deux paramètres caractéristiques du matériau. La Cohésion  $d$  qui correspond à la contrainte de cisaillement limite dans le cas d'un cisaillement pur, et l'angle de cohésion  $\phi$  qui est relatif à l'importance de l'influence de la pression hydrostatique. Le critère  $F_{DP}$  s'exprime à l'aide de l'équation 3.

$$F_{DP} = q - (p \tan(\varphi) + d) = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

La représentation du critère dans l'espace forme un cône. Il est important de noter que nous sommes intéressés ici qu'au critère de Drucker-Prager linéaire mais, il existe d'autres variantes de ce critère dites hyperbolique et exponentiel qui permettent de s'affranchir de la singularité du cône. Nous avons déterminé les paramètres du critère de plasticité  $d$  et  $\varphi$  à partir de résultats d'essais de caractérisation du béton tels que des essais de compression simple et essais de fendage :  $\varphi = 69,2^\circ$  et  $d = 2 \text{ MPa}$ . Les caractéristiques élastiques du béton sont :  $E = 37 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,2$ .

#### 2.2.2.2 Béton en traction

Le module d'Young et le coefficient de Poisson est identique en traction et en compression. Dans le cas d'une traction multiaxiale, le plan de rupture est perpendiculaire à la direction de traction maximale, la rupture est toujours fragile et la résistance à la rupture est égale à celle de la traction simple. La résistance en traction simple du béton est beaucoup plus faible que celle de la compression simple, c'est pourquoi cette résistance est souvent négligée dans les dimensionnements mais il faut garder à l'esprit que dans le cas du béton armé, le renforcement pourrait avoir une influence considérable sur la résistance du béton en traction par adoucissement. En effet, lorsque l'on réalise un essai de traction simple à vitesse de déplacement imposée, la courbe contrainte-déformation est quasi-linéaire jusqu'à un maximum puis est décroissante. Ce comportement post pic de contrainte est adoucissant. L'adoucissement dans le béton armé représente la capacité du béton à supporter la traction après fissuration. Cet effet est dû à la réorganisation des contraintes de traction entre les fissures voisines. On trouve un grand nombre de modèles traitant de l'adoucissement dans la littérature. La figure 3 trace l'allure générale de ces modèles. Comme il est montré sur la figure 3 d'après différentes recherches, la partie adoucissante de la courbe pourrait avoir une forme linéaire, bilinéaire ou parabolique [11,15]. Pour représenter le comportement d'un béton fissuré il existe plusieurs modèles comme la méthode de fissuration discrète, la méthode de fissuration distribuée et la mécanique de la rupture. Dans ce travail nous adoptons une approche en mécanique de la rupture pour déterminer la rupture globale des poutres BA renforcées par peeling-off.

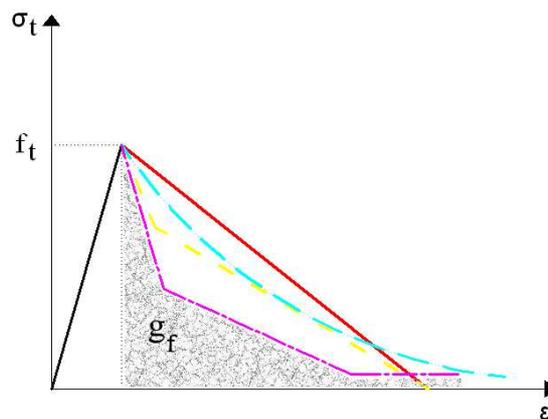


Figure 3 : Comportement du béton en traction

Considérons  $g_f$  l'aire sous la courbe de la figure 3 après la fissuration. L'énergie de rupture  $G_f$  (le taux de restitution d'énergie critique) qui représente la quantité d'énergie nécessaire pour la propagation d'une unité de surface de fissure, est reliée à  $g_f$  comme suit [16]:

$$G_f = b \cdot g_f \quad (\text{Eq. 4})$$

Où  $b$  représente la largeur de l'ensemble des microfissures et est égale à la taille d'élément dans la direction perpendiculaire à la fissure. D'après la norme CEB-FIP [17], en absence de valeurs empiriques nous pouvons évaluer la valeur de  $G_f$  à partir de la formule proposée par l'équation 5.

$$G_f = G_{f0} \left( \frac{f_c}{10} \right)^{0.7} \quad (\text{Eq. 5})$$

Où  $f_c$  est la résistance du béton en compression (MPa) et  $G_{f0}$  est une valeur de base de l'énergie de la rupture qui dépend de la taille maximale de granulat. Dans le béton que nous avons réalisé, la taille maximale de granulat est égale à 20mm, la valeur de  $G_{f0}$  est donc égale à 0,036 et par conséquent,  $G_f = 0,096 \text{ N.mm/mm}^2$ .

### 3. Travaux expérimentaux

Au vu des différents travaux existants, nous avons souhaité améliorer notre connaissance de la rupture par peeling-off pour pouvoir l'analyser plus précisément en réalisant une campagne expérimentale consistant à réaliser des essais de flexion 4 points sur des poutres BA renforcées. Après avoir rassemblé les résultats d'essais existants dans la littérature sur les poutres BA renforcées présentant un mode de ruine de type peeling-off, et, après avoir réalisé une étude paramétrique sur les paramètres influençant des résultats, nous avons défini les configurations de poutre à réaliser notre but étant de pouvoir reproduire ce mécanisme de rupture sur les poutres de configurations différentes. Nous avons réalisé 15 poutres, soit 5 groupes de 3, parmi lesquelles nous gardons un groupe sans renforcement (poutres de référence). Les autres groupes sont composés des poutres renforcées dont leurs caractéristiques sont différentes aux paramètres suivants : la largeur de la poutre, la hauteur de la poutre et l'épaisseur de la plaque en matériaux composites. Le tableau 1 résume les dimensions des poutres réalisées. La longueur des poutres est égale à 1,20 m.

N°	Béton			Armature		plaque de renforcement		F <sub>rup</sub> (kN)	
	a (mm)	t (mm)	d (mm)	f' <sub>c</sub> [Mpa]	f' <sub>t</sub> [Mpa]	A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )	t <sub>p</sub> (mm)		b <sub>p</sub> (mm)
<b>1,2,3</b>	100	150	24	45,0	3,1	56,52	1,2	100	50,1
<b>4,5,6</b>	100	150	24	42,3	2,7	56,52	0,6	100	48,8
<b>7,8,9</b>	100	150	24	42,6	2,4	56,52	-----	-----	25
<b>10,11,12</b>	70	105	24	37,5	2,7	56,52	1,2	70	26,3
<b>13,14,15</b>	80	120	24	37,5	2,7	56,52	0,6	80	29,8

Tableau 1 : Caractéristiques des poutres réalisées

Où  $a$ ,  $t$ ,  $d$ ,  $f'_c$ ,  $f'_t$ ,  $A_s$ ,  $b_p$ ,  $t_p$  et  $F_{rup}$  représentent respectivement la largeur et l'épaisseur de la poutre, l'épaisseur du béton d'enrobage, la résistance du béton en compression et en traction, la section des armatures, la largeur et l'épaisseur de la plaque de renforcement, et la charge totale à la rupture. Les résistances du béton en traction et compression ont été déterminées à l'aide d'essais de compression et fendage sur des éprouvettes cylindriques. La figure 4 montre l'essai de flexion 4 points sur une des poutres réalisées avant et après la rupture de type peeling-off.



Figure 4 : Essai flexion 4 points sur une poutre BA renforcée avant et après la rupture par peeling-off

#### 4. Analyse des résultats

Nous avons tout d'abord effectué des essais sur les poutres de référence. Nous constatons sur cette figure que la courbe charge/flèche présente trois phases distinctes et classiques. Dans la première phase, le comportement est quasi linéaire et des microfissures apparaissent aux interfaces mortier granulat mais le frottement permet de supporter la charge. Dans la deuxième phase il y a apparition de non-linéarité car il y a une propagation des fissures et on observe une perte de raideur de la poutre. Il y a ensuite dans la dernière phase plastification des aciers de renforcement. Il y a en effet accroissement des contraintes de traction dans l'acier provoqué par la fissuration du béton et la rupture de la poutre survient après la rupture des aciers. Nous avons calibré les paramètres de modélisation numérique à partir des résultats d'essai sur les poutres non-renforcées.

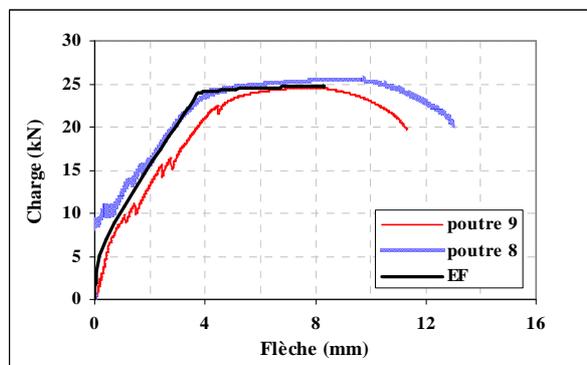


Figure 5 : Résultats d'essais et de la modélisation éléments finis sur les poutres de référence

Les poutres BA renforcées ont rompu suivant le mécanisme de rupture de type peeling-off et nous avons reproduit ce type de rupture par modélisation numérique (Figure 6). La figure 7 présente les courbes expérimentales et numériques charge en fonction de la flèche. Au vu de ces courbes, on constate que ce type de rupture présente un caractère plus fragile que les ruptures conventionnelles obtenues pour les poutres BA et que l'accord entre les résultats numériques et expérimentaux est acceptable. Sur certaines figures (7b, 7d) on peut distinguer les 3 phases classiques obtenues pour les poutres de référence alors que les courbes des figures 7a et 7c traduisent une rupture avec une absence de plastification des aciers.

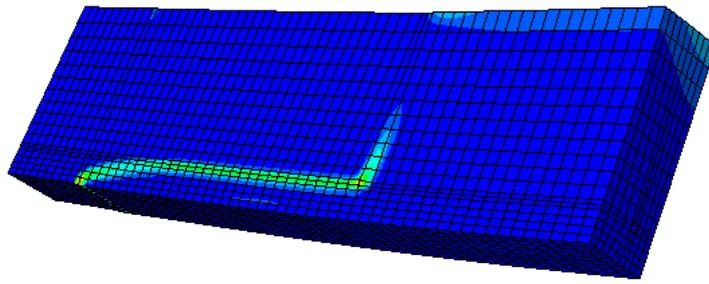


Figure 6 : Rupture par peeling-off

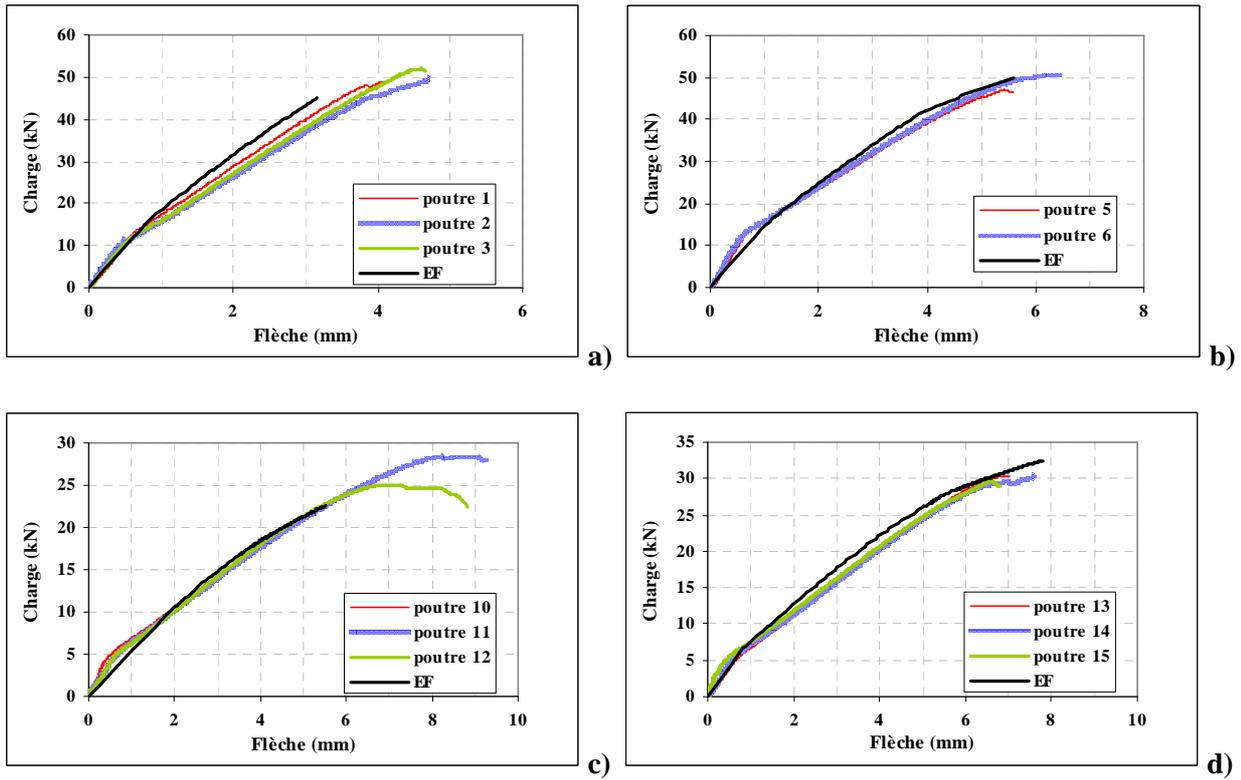


Figure 7 : Résultats expérimentaux et numérique des poutres BA renforcées : a) poutres 1,2,3, b) poutres 5,6 c) poutres 10,11,12, d) poutres 13,14,15

Numéro	Charge expérimentale de rupture kN	flèche expérimentale (mm)	flèche numérique (mm)	erreur	Charge de rupture numérique	erreur
1,2,3	50,1	4,46	3,66	17,9 %	45	10,2 %
5,6	48,85	5,92	5,35	9,7 %	49,92	2,2 %
10,11,12	26,32	7,62	7,22	5,2%	22,55	14,3 %
13,14,15	29,83	7,15	6,41	10,4 %	32,5	8,9 %

Tableau 2 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques

Toutes les poutres BA renforcées présentent le même mécanisme de ruine (peeling-off) d'un point de vue expérimental et numérique. Le tableau 2 nous permet de comparer les résultats obtenus expérimentalement et numériquement pour la charge de ruine et la flèche correspondante. L'erreur maximale dans la prédiction de la charge à la rupture est égale à 14,3%, valeur très acceptable pour le matériau béton ; l'erreur maximale sur la flèche à la rupture est de 17,9 %. Cette erreur pourrait se produire en surestimant la capacité portante de la poutre. En résumé, nous avons réussi à modéliser la rupture de la poutre par peeling-off et nous avons validé notre modèle. Il est donc possible à l'aide de cette démarche de prédire ce type de rupture et le niveau de charge correspondant.

D'autre part, nous pouvons déduire à partir des résultats obtenus que la géométrie de la poutre est le paramètre le plus important dans la détermination de la charge de rupture (par peeling-off). Si on compare les courbes correspondantes aux poutres 1,2,3 avec celles obtenues pour les poutres 10,11,12 (les poutres renforcées par une plaque d'épaisseur 1,2 mm) on s'aperçoit que la charge à rupture est beaucoup plus importante pour les poutres 1,2,3 c.-à-d. pour les poutres présentant une section plus grande et ayant une flèche moins élevée. D'après les résultats numériques, le mécanisme de peeling-off se produit avant la plastification de l'acier. En effet, dans le cas d'une plaque épaisse, la plaque reprenant une partie de la traction l'acier plastifie tardivement. Dans le cas où les plaques sont moins épaisses, l'acier commence à plastifier avant que ne se produise la rupture par peeling-off. Si on compare les courbes correspondantes aux poutres 1 à 6, on trouve que la charge de la rupture ne varie quasiment pas. Les géométries étant identiques pour les deux types de poutre. La petite différence observée porte sur la rigidité de structure, autrement dit, la flèche de la poutre renforcée par une plaque plus épaisse est moins importante.

## 5. Conclusion

Notre travail porte essentiellement sur l'étude de la rupture de type peeling-off des poutres BA renforcées par des PRF. Pour mener à bien notre étude, nous avons réalisé des modélisations numériques en utilisant le code de calcul éléments finis ABAQUS, ainsi que des travaux expérimentaux. Nous avons réalisé 5 groupes de poutres (15 poutres au total) parmi lesquels nous avons renforcé 4 groupes. Les poutres ont été soumises à un essai de flexion 4 points jusqu'à la rupture. Le mode de rupture constaté est de type peeling-off pour toutes les poutres renforcées. La modélisation numérique consiste en une analyse non-linéaire du modèle 3D. Le comportement de l'acier et le renfort sont respectivement élasto-plastique parfait et élastique. Le béton en compression est considéré comme un matériau élasto-plastique avec le critère de plasticité de Drucker-Prager. Pour le béton en traction nous utilisons les notions de la mécanique de la rupture pour définir l'énergie maximale qu'un élément peut supporter après l'apparition des fissures et avant la propagation ( qui provoque la rupture de structure). Nous avons validé le modèle numérique en comparant les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Nous pouvons aussi avancer quelques conclusions (plus ou moins attendues) des résultats obtenus à savoir que le mécanisme de peeling-off peut se produire avant ou après la plastification des aciers de renforcement, que plus la géométrie (la section) de la poutre est grande, plus la charge de la rupture est élevée, que le changement d'épaisseur de la plaque influence la rigidité de la structure (lorsque la plaque est plus épaisse, la flèche est moins importante) et enfin que la singularité à l'extrémité de la plaque est probablement un paramètre dominant dans la rupture par peeling-off.

## Références

- [1]. Raouf, M. Hassanen, M.A.H. « Peeling failure of reinforced concrete beams with fibre-reinforced plastic or steel plates glued to their soffits », Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings, v 140, n 3, Aug 2000, p. 291-305.
- [2]. Limam, O. Foret, G. Ehrlacher, A. « Beams Strengthened with Composite Material: A Limit Analysis Approach and Experimental Study », Composite Structures 59 (2003) 467-472.

- [3]. Saxena, P. Toutanji, H. Noumowe, A. « Failure analysis of FRP-strengthened RC beams », *Journal of Composites for Construction*, v 12, n 1, Jan 2008, p. 2-14.
- [4]. Yang, ZJ. Chen, JF. Proverb, D. « Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams », *Construction and Building Materials*, v 17, n 1, 2003, p. 3-13.
- [5]. Raouf, M. El-Rimawi, J. Hassanen, M.A.H. « Theoretical and experimental study on externally plated R.C. beams », *Engineering Structures*, v 22, n 1, Jan 2000, p. 85-101.
- [6]. Smith, ST. Teng, JG. « FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models ». *Engineering Structures*, v 24, n 4, Apr 2002, p. 385-395.
- [7]. Smith, ST. Teng, JG. « FRP-strengthened RC beams. II: assesment of debonding strength models ». *Engineering Structures*, v 24, n 4, Apr 2002, p. 397-417.
- [8]. Yao, J. Teng, JG. « Plate end debonding in FRP-plated RC beams - I: Experiments », *Engineering Structures*, v 29, n 10, 2007, p. 2457-2471.
- [9]. Teng, JG. Yao, J. « Plate end debonding in FRP-plated RC beams - II: Strength model », *Engineering Structures*, v 29, n 10, 2007, p. 2472-2486.
- [10]. Hu, HT. Lin, FM. Jan, YY. « Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strenthened by fiber-reinforced plastics », *Composite Structures*, v 63, 2004, p.271-281.
- [11]. Lu, X.Z. Ye, L.P. Teng, J.G. Jiagn, J.J « Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete », *Engineering Structures*, v 27, 2005, p.564-575.
- [12]. Chen, W.F. « Constitutive equations for concrete », *IABSE Colloquium Copenhagen*, 1979.
- [13]. Salvatore, W. Bursi, OS. Lucchesi, D. « Design, testing and analysis of high ductile partial-strength steel-concrete composite beam-to-column joints », *Computers and Structures*, v 83, n 28-30, 2005, p. 2334-2352.
- [14]. Chung, W. Sotelino, ED. « Nonlinear finite-element analysis of composite steel girder bridges », *Journal of Structural Engineering- ASCE*, v 131, n 2, 2005, p.304-313.
- [15]. Wang, YC. Chen, CH. « Analytical study on reinforced concrete beams strengthened for flexure and shear with composite plates », *Composite Structures*, v , 2003, p. 137-148.
- [16]. Kwak, HG. Filippou, FC. « Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic load », *Research report of Department of Civil Engineering, U.C. Berkeley*, No. UCB/SEMM-90/14; 1990.
- [17] Comité Euro International du Béton. Ceb-fip model code 90. CEB Bulletins, 1993.