

---

# Effet de la longueur ancrée sur le comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites selon la technique CFRP NSM

---

Abdelghani Merdas<sup>1,2</sup>, Bruno Fiorio<sup>3</sup>, Nasr-Eddine Chikh<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>URMES· UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF1, CITE MABOUDA 19000, ALGERIE

*Abdelghani.merdas@yahoo.com*

<sup>2</sup>Département de génie civil, Université Ferhat Abbas de Sétif1 19000, ALGERIE

<sup>3</sup> L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, Site de Neuville, Rue d'Eragny- Neuville sur Oise, 95 031 Cedex France. Bruno.fiorio@u-cergy.fr

<sup>4</sup> LMDC, Dépt de génie civil, Université M Mentouri Constantine, ALGERIE.

*Chikh\_ne@yahoo.fr*

---

## RÉSUMÉ.

La technique Near Surface Mounted (NSM) a été utilisée ces dernières années pour le renforcement des poutres en béton armé. Elle consiste à l'insertion de plats ou de joncs de polymères renforcés en fibres de carbone (CFRP) dans des engravures réalisées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues et remplies de résines époxydiques pour fixation. L'objectif du programme expérimental développé dans ce travail est d'étudier l'effet de la longueur ancrée sur le comportement des poutres en béton armé renforcées par des renforts en matériaux composites selon cette technique de NSM. Pour atteindre cet objectif, nous étudions en premier lieu, quelques propriétés physiques et mécaniques des renforts de carbone tels que les plats et les joncs et leurs interactions avec le béton. En second lieu, des essais d'adhérence par flexion ont été effectués pour caractériser le comportement d'adhérence de ces renforts de carbone avec le béton. La force d'arrachement dans les plats et dans les joncs, le glissement aux extrémités libres et chargées ont été mesurés. L'influence de la longueur ancrée sur le comportement d'adhérence entre ces trois matériaux (béton, résine, composite) a été analysée. Une modélisation de la relation constitutive  $\tau$ -glissement des renforts de carbone en utilisant l'équation différentielle qui régit le problème d'adhérence a été développée. Une modélisation du comportement d'adhérence des renforts de carbone en utilisant le logiciel ABAQUS a été également effectuée. Et finalement une comparaison entre les différents résultats, expérimentaux, analytiques et de modélisation par éléments finis a été effectuée.

**Mots clés :** NSM, CFRP, Beam test, adhérence, glissement, matériau de scellement, renforcement en flexion, comportement global, arrachement, modélisation.

## 1. Introduction

La maintenance des ouvrages de génie civil est nécessaire pour assurer la sécurité des usagers, cette maintenance consiste à assurer une meilleure étanchéité, ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. Le renforcement des structures en béton armé par matériaux composite remembre plusieurs techniques, parmi les techniques les plus efficaces, on peut citer la technique de renforcement par insertion des PRF appelée NSM (Near surface mounted) et celle du renforcement par collage des renforts sur la surface extérieur du béton nommée EBR (External Bonded Reinforcement). Cette dernière (la technique de renforcement EBR) est basée sur le collage extérieur des renforcements à base de fibre de carbone(CFRP), de verre (GFRP) ou d'aramide (AFRP). Cette technique offre divers avantages : faible densité, pas de corrosion, bonnes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de

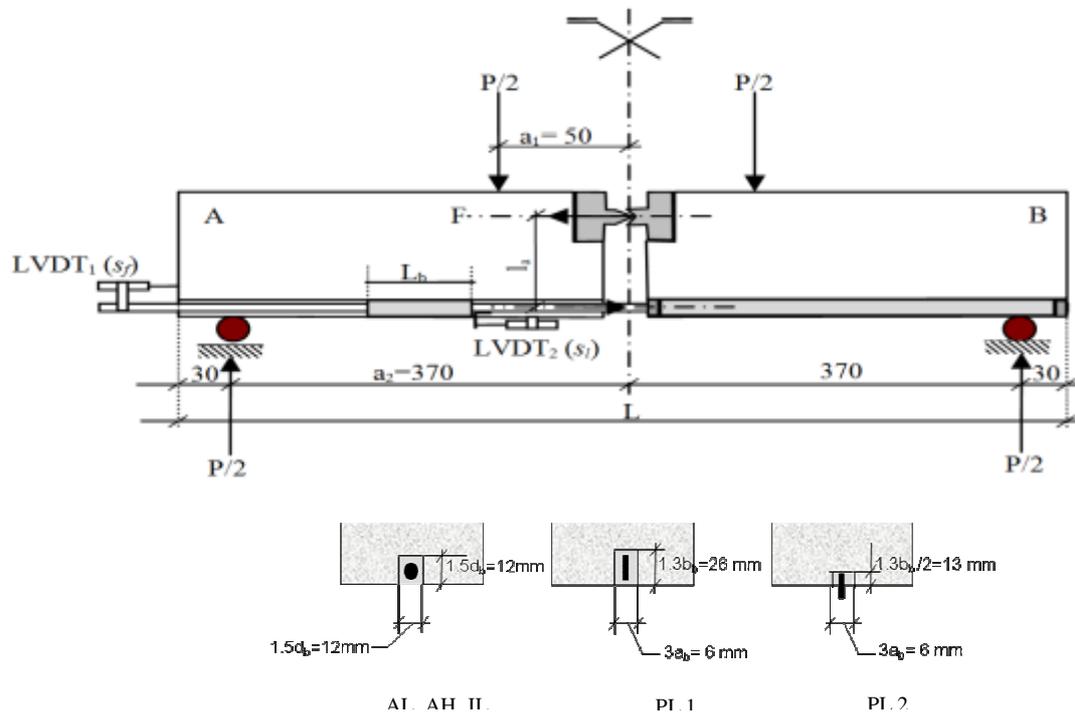
manipulation [Rah 01]. Le processus de l'introduction de ces matériaux a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Une nouvelle technique de renforcement nommée (NSM pour Near Surface Mounted) a été utilisée ces dernières années pour le cas des poutres fléchies. Elle consiste à l'insertion de bandes de polymères renforcées en fibres de carbone (CFRP) dans des engravures effectuées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues, remplies de résine époxydique pour fixation [Bar 02 ; Yun 08]. Cette technique est particulièrement attrayante pour renforcer les éléments structuraux en flexion tels que poutres, dalles, murs et même des poteaux où la structure est soumise aux endommagements mécaniques et environnementaux.

## 2. Objectif

Plusieurs laboratoires de recherche à travers le monde ont intéressé par l'étude du comportement des éléments structuraux réhabilités par matériaux composites et aux différents paramètres influant ce comportement tels que : la technique de renforcement, le type de matériaux composite (renfort), type de résine utilisée, la qualité du béton, le taux de ferrailage, la taille des éléments à renforcés, et notamment le comportement d'adhérence de ces renforts composite avec le béton. L'objectif du travail expérimental développé dans cet article est de caractériser et comparer l'effet de la longueur ancrée sur le comportement d'adhérence des plats de carbone avec le béton selon les principaux type de montage possible de la méthode NSM.

Nous avons pour cela utilisé des joncs (JL) et des plats (PL) lisses de carbone, associés à 3 bétons (deux bétons ordinaires B30, B50 et un béton haute performance B75). Deux configurations ont été utilisées avec les plats : entièrement (PL1) ou partiellement (PL2) inséré dans la gravure. Cette dernière configuration évite de couper les cadres transversaux de la poutre en cas de faible enrobage des aciers. Dans toute ces différentes configurations, en utilisant trois (3) longueurs ancrées  $L_b$  (120mm, 80mm, 40mm). Des essais avec des renforts d'acier lisse (AL) et d'acier haute adhérence (AH), avec les mêmes longueurs ancrées, ont également été réalisés à titre de comparaison.

Pour atteindre cet objectif, des essais d'adhérence par flexion ont été effectués. La force d'arrachement dans les plats, le glissement aux extrémités libres et chargées ont été mesurés. L'influence de la longueur ancrée sur le comportement d'adhérence entre ces trois matériaux (béton, résine, composite) ont été analysées. La Figure 1 présente le dispositif adopté pour l'essai d'adhérence par flexion utilisé dans notre travail expérimental.



Détails coupes de poutre (Pullout-bending test)

Figure 1. Dispositif adopté pour l'essai d'adhérence par flexion utilisé

Le dispositif adopté dans notre travail est similaire à celui proposé par la RILEM (RIL82) qui consiste à appliquer une force d'arrachement par un essai de flexion. Les essais d'adhérence par flexion ont été réalisés en faisant varier Trois longueur ancrée ( $l_a=120\text{mm}$ ,  $80\text{mm}$ , et  $40\text{mm}$ ) ; pour chaque longueur ancrée on a changé le types de béton ; le types de montage ;le type de résine et le type de renfort.

Le tableau 1 reprend la dénomination des différentes séries d'essais réalisées.

**Tableau 1.** Dénomination des différentes séries d'essais.

utilisés

Séries	Renfort	Béton	Résine	Longueur ancrée $L_b$ (mm)
1	JL	BO30	E371	40, 80,120
			E380	120
		BO50	E371	40, 80,120
			E380	120
		BHP75	E371	40, 80,120
			E380	120
2	PL1	BO30	E371	40, 80,120
			E380	120
		BO50	E371	40, 80,120
			E380	120
		BHP75	E371	40, 80,120
			E380	120
3	PL2	BO30	E371	40, 80,120
		BHP75	E371	80
4	AH	BO30	E371	40, 80,120
			E380	120
5	AL		E371	40, 80,120
			E380	120

**Tableau 2.** Proportions des bétons

Constituants	BO30 (kg/m <sup>3</sup> )	BO50 (kg/m <sup>3</sup> )	BHP75 (kg/m <sup>3</sup> )
Eau totale	209	170	150
Ciment CEM I 52.5 N	336	400	500
Sable 0/4 SC NF	419	451	715
Sable 4/10 SC NF	471	507	/
Gravillon 6.3/20	834	897	987
Super plastifiant		/	4.71
E/C	0,6	0.4	0,3
G/C	2,5	2.2	2.0
$f_{c28}$ (MPa)	37,5	57	73,5
$f_{t28}$ (MPa)	3	4,7	6.0
$E_b$ (GPa)	33,5	40,6	48

### 3. Méthodologie expérimentale

#### 3.1. Détermination caractéristiques des matériaux utilisée

##### 3.1.1. Béton

Trois bétons ont été utilisés dans nos travaux : deux bétons ordinaires (BO30 et BO50) et un de haute performance (BHP75). Les proportions du béton utilisé et les résistances en compression et traction obtenues sont présentés dans le Tableau 2. L'ensemble des résultats est obtenu à partir d'une moyenne effectuée sur trois éprouvettes testées le jour de l'essai des poutres.

##### 3.1.2. Renforts carbone

Les renforts de carbone utilisés dans notre travail sont des plats et des joncs en carbone CFRP sont fournis par la société SOFICAR France®. Composés de fibres de carbone agglomérées dans une matrice de résine époxy. Le module d'élasticité et la résistance en traction sont déterminés à partir des essais en laboratoire. Les résultats obtenus sont montrés dans le Tableau 3 ci-dessous.

**Tableau 3.** *Contrainte maximales de traction et module d'élasticité des renforts carbonés utilisés.*

Éprouvettes	Module d'élasticité (GPa)	Moyenne (GPa)	Force appliqué (kN)	Résistance en traction (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart type (MPa)
1	179.91	179.855	125.98	2507.56	2538.15	157.79
2	179.856		120.47	2397.89		
3	179.799		136.1	2708.99		

##### 3.1.3. La résine (matériaux de scellement)

Deux matériaux de scellement ont été caractérisés et utilisés pour le remplissage des engravures EPONAL 371 et EPONAL 380. Il s'agit d'un adhésif époxy fabriqué par l'entreprise (BOSTIK France ®). Les résultats obtenus sont pratiquement les mêmes que ceux obtenus par le fabricant. Le tableau 4 indique les propriétés mécaniques en traction et en compression obtenues par le fabricant.

**Tableau 4.** *Propriétés des colles époxy E 371.*

Type d'époxy-adhésif		EPONAL 371	EPONAL 380
Traction	Resistance à la rupture (MPa)	29.5 ± 1.0	29.28 ± 2.5
	Allongement à la rupture (%)	0.65 ± 0.1	0.94 ± 0.25
	Module d'Young E (MPa)	4940 ± 170	3738.27 ± 901
Compression	Resistance à la rupture (MPa)	83.0 ± 1.6	81.05 ± 8.9
	Raccourcissement en Compression (%)	4.3 ± 0.3	3.12 ± 0.47
	Module d'Young E (MPa)	4200 ± 150	3400 ± 250

#### 3.2. Mode opératoire

La Figure 1 montre une schématisation de l'épreuve d'essai, une poutre avec les deux blocs équipée de la rotule en acier. Et des coupes transversales des trois configurations de NSM utilisées. La zone d'adhérence testée est localisée dans le bloc A. Différentes longueurs ancrées  $L_b$  ont été utilisées, 40mm, 80 mm et 120 mm. La fixation du renfort dans le bloc B a été réalisée en utilisant la même résine que celle utilisée pour le bloc A, en utilisant la totalité de la longueur disponible pour la longueur d'adhérence. Cela garantie que la rupture

d'adhérence se produit dans le bloc A. Pour mesurer le glissement, deux capteurs de déplacement (LVDT1 et LVDT2) de 10 mm de course nominale ont été utilisés .LVDT2 mesure le glissement du renfort par rapport au béton à l'extrémité chargée (S1), LVDT1 enregistre le glissement à l'extrémité libre (Sf). Après 45 jours de la réalisation des spécimens nous avons entamé les essais en respectant les étapes suivantes :

Approvisionnement des poutres, de la salle de conservation au labo de l'essai (précaution particulière pendant le transport des blocs avec la mise en place de la rotule en acier pour éviter tous mouvements indésirables)

Traçage des poutres au niveau des points de positionnement des appuis et aux points d'application de charges pour assurer la symétrie du système dans les deux sens, longitudinal et transversal.

Montage des LVDT dans les deux extrémités, chargée et libre.

La mise en contact de la charge avec la poutre à tester.

Tarage de tous les variables, tel que la charge, le déplacement et les déformations des deux LVDT S1 et Sf. Puis la mise en route de l'essai. L'essai s'arrête automatiquement lorsqu'il y a une diminution de charge de 40% de la charge maximale appliquée.

#### 4. Résultats expérimentaux

##### 4.1. Comportement qualitatif

Le dispositif utilisé permet le calcul précis de l'effort de traction ( $F_t$ ) et des contraintes induites ( $\tau$ ) à l'interface renfort / colle / béton (Figure 3), à partir de la connaissance de l'effort appliqué ( $P$ ) et du bras de levier du moment interne ( $l_a$  : Distance du centre de la rotule au centre de gravité de la section transversale du CFRP) qui ne dépend pas du niveau de charge appliquée.

La force d'arrachement sur le CFRP (coté extrémité chargée),  $F_t$ , est déterminée à partir de l'équation suivante :

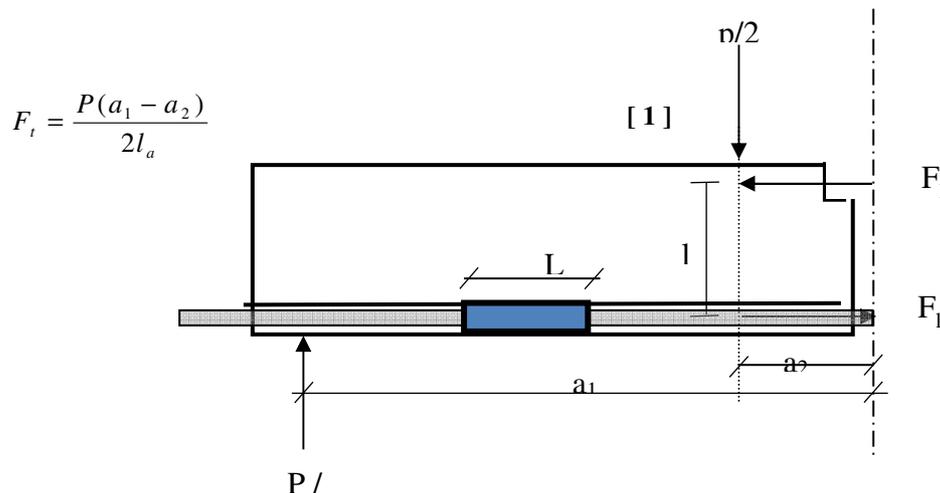


Figure 3. Schématisation de demi-poutre étudiée selon la technique NSM

Le Tableau 5 suivant reprend les résultats des différentes séries d'essais (Au moins 3 éprouvettes ont été testées pour chacune des séries présentées). Il donne l'effort à la rupture par arrachement  $F_{lmax}$ , et la contrainte de cisaillement moyenne  $\tau_u$  au niveau de l'interface renfort / colle époxy.

$\tau_u$  est déterminé en fonction du type de renfort par les relations suivantes :

$$\tau_u = \frac{F_{lmax}}{\pi \phi L_b} \quad (\text{Jonc}) \quad [1]$$

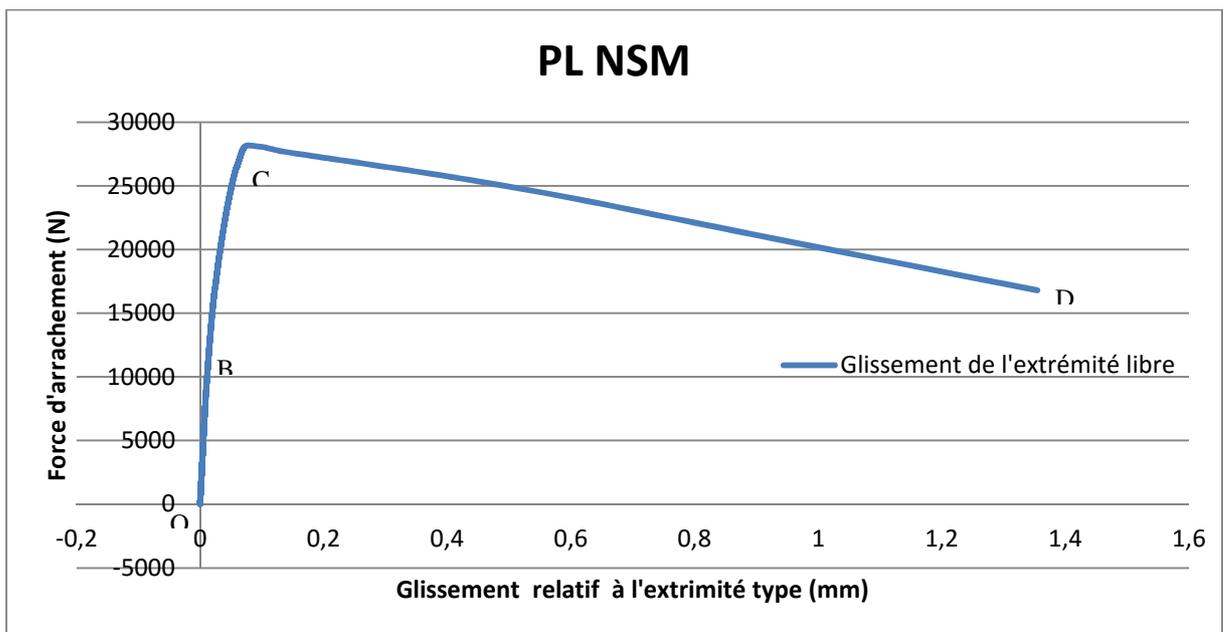
$$\tau_u = \frac{F_{l_{\max}}}{2w_f L_b} \quad (\text{Plat lisse partiellement inséré PL1}) \quad [ 2 ]$$

$$\tau_u = \frac{F_{l_{\max}}}{w_f L_b} \quad (\text{Plat lisse partiellement inséré PL2}) \quad [ 3 ]$$

$F_{l_{\max}}$  Étant la force maximale appliquée (kN);  $\phi$  et  $w_f$  respectivement le diamètre du jonc (mm) et la largeur du plat (mm) et  $L_b$  la longueur ancrée (mm).

Pour des niveaux de charge inférieurs à approximativement 40% de la charge maximale  $F_{l_{\max}}$ , le glissement mesuré à l'extrémité chargée (LVDT2) évolue linéairement avec l'effort appliqué tandis que le glissement mesuré à l'extrémité libre (LVDT1) est négligeable (Figure 4). On n'observe aucune fissuration de la résine ou du béton.

Au de la de 40% de  $F_{l_{\max}}$ , le glissement coté chargé devient de plus en plus non linéaire. Cela peut s'expliquer par le comportement non linéaire dû à la plastification de la résine époxy qui se traduit par un processus de décollement à l'interface composite – résine et béton – résine.



**Figure 4.** Courbe type : force d'arrachement en fonction de glissement.

Au pic, la force d'arrachement ultime est atteinte et le glissement se produit brutalement aux extrémités libre et chargée. Cette transition est due à la dégradation rapide de l'adhérence à l'interface composite – résine – béton. La brutalité du glissement est due au fait que l'essai n'est pas directement piloté par le glissement du renfort  $S_1$  mais par la flèche de l'éprouvette.

**Tableau 5.** Résultats expérimentaux

Renfort	Béton	Résine	Lb (mm)	F <sub>lmax</sub> (kN)	ET(kN)	CV(%)	KI (kN/mm)	ET(kN/mm)	CV(%)
JL	B30	E371	40	16.549	1.495	9.04	32.133	29.660	0.923
JL	B30	E371	80	22.710	0.077	0.34	68.054	9.955	0.146
JL	B30	E371	120	33.368	0.839	2.52	67.279	18.316	0.272
JL	B30	E380	120	38.342	1.003	2.62	72.886	33.265	0.456
JL	B50	E371	40	22.083	4.863	22.02	48.279	1.316	0.027
JL	B50	E371	80	30.574	4.135	13.53	57.500	13.435	0.234
JL	B50	E371	120	40.783	0.674	1.65	67.981	25.996	0.382
JL	B50	E380	120	33.043	0.900	2.72	69.006	5.556	0.081
JL	B75	E371	40	23.009	6.637	28.85	26.198	3.787	0.014
JL	B75	E371	80	34.516	4.140	12.00	55.112	19.800	0.359
JL	B75	E371	120	46.023	1.643	3.57	78.594	11.363	0.145
JL	B75	E380	120	36.485	2.943	8.07	74.877	6.107	0.081
AH	B30	E371	40	18.222	5.014	27.52	54.674	3.957	0.072
AH	B30	E371	80	26.600	2.591	9.74	72.653	3.932	0.054
AH	B30	E371	120	29.094	0.295	1.01	59.392	27.143	0.457
AH	B30	E380	120	29.970	2.462	8.21	152.288	26.142	0.172
PL1	B30	E371	40	21.349	0.002	0.01	64.060	13.002	0.203
PL1	B30	E371	80	31.552	2.179	6.91	83.382	4.411	0.053
PL1	B30	E371	120	41.704	0.023	0.05	44.028	3.645	0.083
PL1	B30	E380	120	46.594	2.240	4.81	79.718	9.593	0.120
PL1	B50	E371	40	27.657	3.059	11.06	45.670	5.988	0.131
PL1	B50	E371	80	36.932	0.857	2.32	61.046	29.300	0.480
PL1	B50	E371	120	44.650	2.976	6.66	67.472	5.180	0.077
PL1	B50	E380	120	46.207	1.345	2.91	118.762	22.395	0.189
PL1	B75	E371	40	29.118	0.144	0.49	60.383	19.911	0.330
PL1	B75	E371	80	37.219	2.879	7.74	79.109	48.064	0.608
PL1	B75	E371	120	47.618	2.355	4.95	65.661	5.893	0.090
PL1	B75	E380	120	54.011	3.089	5.72	87.655	5.869	0.067
PL2	B30	E371	40	17.394	0.314	1.80	65.700	5.699	0.087
PL2	B30	E371	80	30.124	3.896	12.93	81.581	1.459	0.018
PL2	B30	E371	120	36.533	2.597	7.11	80.693	6.985	0.087
PL2	B75	E371	80	34.007	0.005	0.01	267.942	188.577	0.704

#### 4.2. Effet de la longueur ancrée

L'évolution de la force d'arrachement maximale en fonction de la longueur ancrée  $L_b$  (Trois éprouvettes au moins ont été testées pour chaque configuration). On constate que la force d'arrachement augmente quasi-linéairement avec l'augmentation de la longueur ancrée pour les trois longueurs testées.

A partir du tableau 5 présentés ci-dessus, les résultats suivants peuvent être cités :

La force d'arrachement augmente régulièrement avec l'augmentation de la longueur ancrée ;

La force d'arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance du béton tout en remarquant qu'après une certaine résistance (BO50), cette augmentation est modérée ;

Si on travaille sur les petites longueurs ancrées, on sollicite la résine, dans le cas contraire, c'est le béton qui est sollicité ;

L'utilisation de la résine E380 augmente sensiblement la force d'arrachement par rapport à l'utilisation de la résine E371;

Le coefficient de rigidité KI augmente avec l'augmentation de la longueur ancrée et de la résistance du béton ;

Un effet considérable du type de renfort sur les valeurs du coefficient de rigidité a été constaté. Par ailleurs la contrainte de cisaillement diminue généralement avec l'augmentation de la longueur ancrée.

### 4.3. Modélisation de la relation constitutive $\tau$ -glissement

les modèles disponibles, élaborés pour les barres d'acier HA, sont également valides pour prévoir la forme de la courbe  $\tau$ -glissement des renforts de carbone en utilisant l'équation différentielle qui régit le problème d'adhérence (REH, 1961) en considérant l'équilibre d'un tronçon de barre de longueur dx :

$$\frac{\pi\phi^2s}{4}d(x) = \pi\phi\tau dx \quad [4]$$

Et le comportement élastique linéaire de la barre qui, si la contribution du béton tendu est négligée, est donné par :

$$\sigma = E_c \varepsilon \cong E_c \frac{ds}{dx} \quad [5]$$

$E_c$  et  $\phi$  sont le module d'élasticité et le diamètre du jonc de carbone respectivement,  $x$  est la distance depuis l'extrémité non chargée du jonc de carbone. A partir des équations (4) et (5), l'équation (6) peut être obtenue :

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{4}{E_c\phi} \tau(x) = 0 \quad [6]$$

Où  $s$  est le glissement à l'extrémité non chargée du jonc de carbone. Le comportement  $\tau$ -glissement est analytiquement modélisé par une branche ascendante pour  $s < s_m$ , qui coïncide avec la première branche du modèle de (Eligehausen et al, 1983) Et une branche descendante (adoucissante) pour  $s > s_m$  qui est donnée par:

$$\tau(s) = \tau_u \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha \rightarrow \text{Pour } s < s_m \quad [7]$$

$$\tau(s) = \tau_u \left(\frac{s}{s_m}\right)^{-\alpha'} \rightarrow \text{Pour } s \geq s_m \quad [8]$$

Où  $\tau_u$  est la contrainte tangentielle moyenne ultime (au pic);  $s_m$  est le glissement correspondant à  $\tau_u$ ;  $\alpha$  et  $\alpha'$  est un paramètre de précision influençant la forme de la courbe  $\tau$ -glissement dans la branche ascendante et obtenu en égalisant l'air sous la branche ascendante de la courbe expérimentale à la valeur :

$$A_\tau(0, s_m) = \int_0^{s_m} \tau_u \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha ds = \frac{\tau_u s_m}{1 + \alpha} \quad [9]$$

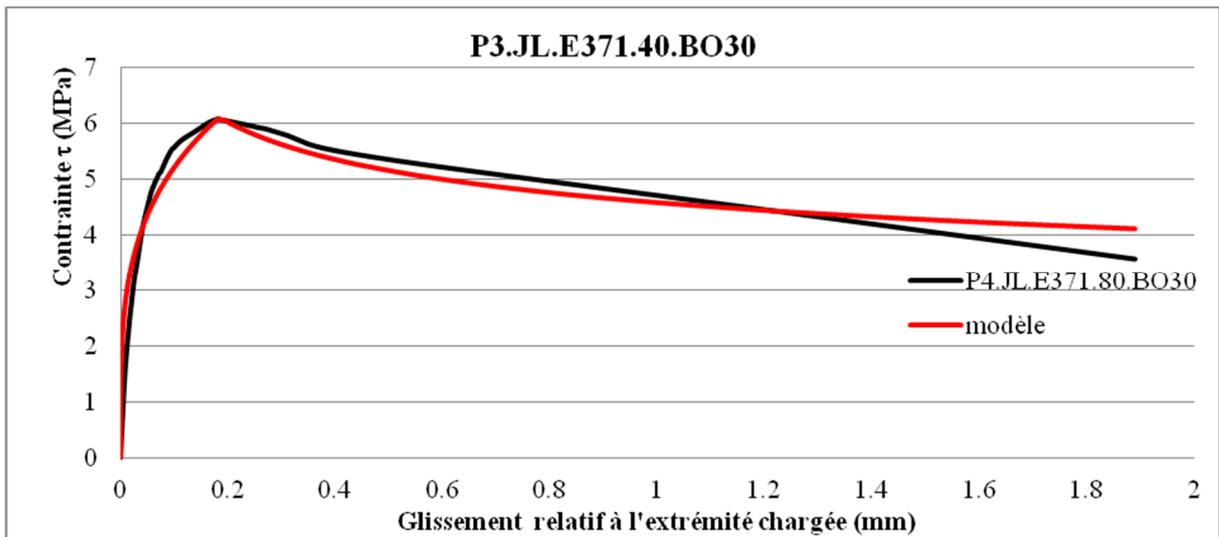
Le tableau 6. ci-dessous donne les valeurs des paramètres inconnus calibrés par le meilleur ajustage de précision des résultats expérimentaux obtenus pour des courbes représentatives types. Des comparaisons entre  $\tau_u$  calculée selon l'équation (8), pour les deux branches ascendante et descendante, et les résultats expérimentaux pour deux configurations (P3.JL.E371.80.BO30, JL.E380.120.BHP75) sont montrées sur les figures ci-dessous. Nous constatons de ces figures que  $\tau_u$  calculée selon le modèle (Eligehausen et al, 1983) a une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. Par conséquent, le modèle existant élaboré pour les barres d'acier HA est également valide pour les joncs et pour les plats de carbone.

#### 4.4. Exemples de modélisation de la relation contrainte $\tau_u$ –glissement

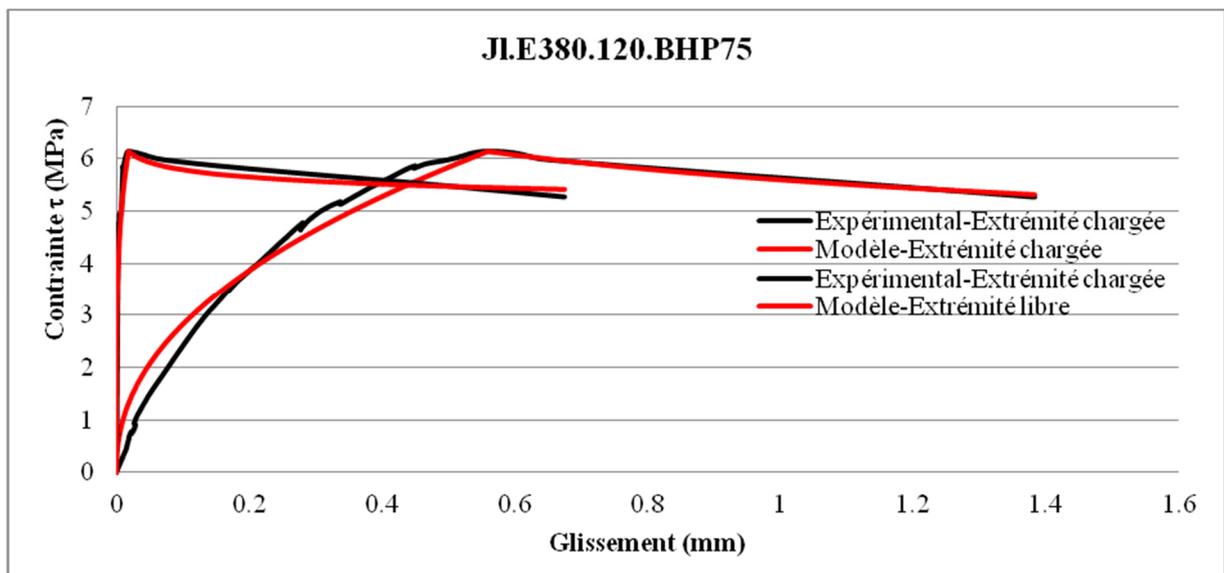
Ci-dessous un exemple de modélisation de la relation constitutive  $\tau_u$ -glissement (extrémité chargée) pour une poutre en béton armé de 30 MPa de résistance renforcée par un jonc lisse avec deux longueurs ancrées 40 et 80 mm en utilisant la résine époxy Eponal 371. Et un autre pour un BHP75 et  $L_b=120$  mm en utilisant la résine époxy Eponal 380.

**Tableau 6.** Paramètres inconnus calibrés par ajustage des résultats expérimentaux obtenus (JL.E371.80.BO30)

Type de renfort de carbone	s m (mm)	$\tau_u$ (MPa)	$\alpha$	$\alpha'$
P3.JL.E371.40.BO30	0.25 8	6.708	0.69	-0.204
P4.JL.E371.80.BO30	0.357	6.09	0.45	-0.232



**Figure 5 :** Comparaisons entre  $\tau_u$  calculée et les résultats expérimentaux pour une longueur ancrée 80 mm (JL.E371.80.BO30)



**Figure 6 :** Comparaisons entre  $\tau_u$  calculée et les résultats expérimentaux pour une longueur ancrée 120mm (JL.E380.120.BHP75)

**Tableau 7.** Paramètres inconnus calibrés par ajustage des résultats expérimentaux obtenus (JL.E380.120.BHP75)

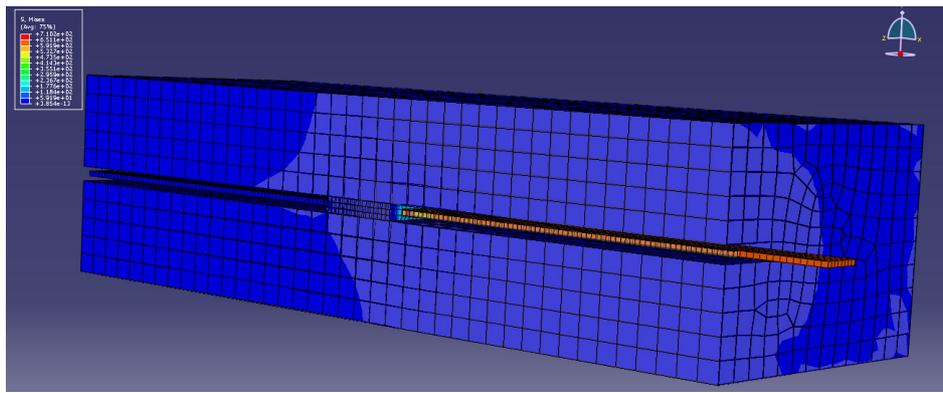
JL.E380.120.BH P75	s m (mm)	$\tau_u$ (MPa)	$\alpha$	$\alpha'$
Extrémité chargée	0.560	6.136	0.451	-0.264
Extrémité libre	0.0185	6.136	0.232	-0.969

Comparaisons entre  $\tau_u$  calculée et les résultats expérimentaux pour (JL.E380.120.BHP75)

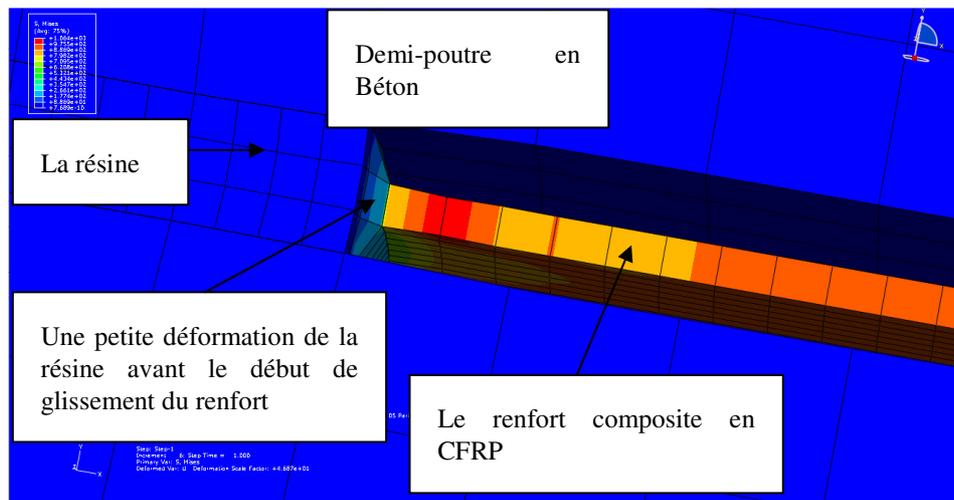
#### 4.5. Modèle en trois dimensions de l'essai d'adhérence par flexion

Un modèle en trois dimensions de l'essai d'adhérence par flexion est présenté dans la figure x ci-dessous, la moitié de la poutre a été considérée pour la modélisée en 3D, Pour représenter la performance de l'essais d'adhérence, le comportement des quatre différents matériaux, le béton, le FRP, l'acier et l'adhésif, doivent être convenablement modélisée. Les éléments en béton, où les charges sont appliquées, ont été définis comme un matériau élastique, pour éviter les problèmes de convergence. Les renforts de NSM ont été définies comme un matériau élastique d'où les caractéristiques définies a partir des résultats expérimentaux. La simulation de l'interfaces béton-adhésives et considérée parfaite car en aucun cas n'est se produit ce type de rupture c.à.d. à l'interface béton-résine.

Cependant, différentes solutions ont été envisagées afin de simuler la liaison entre les renforts PRF NSM et de l'adhésif. Des éléments cohésifs, d'épaisseur zéro 3D ont été introduits dans l'ABAQUS, sont des éléments qui simulent une interface entre deux surfaces où les phénomènes de glissement (décollement) pourrait se produire.



**Figure 11 :** Model élément finis 3D d'une demi poutre



**Figure 12 :** Détail du système d'adhérence CFRP/Résine/Béton

On constate une meilleure performance des renforts plats lisses (PL1) par rapport aux autres renforts. Bien que présentant des sections similaires à celle des joncs, les renforts plats offrent une surface de contact plus grande permettant d'atteindre une force d'arrachement plus élevée. L'acier haute adhérence (AH) présente une surface rugueuse permettant d'atteindre une adhérence plus importante par rapport aux PL2, JL, et AL. Ces derniers renforts présentent des comportements proches (pour  $L_b = 40$  mm), ce qui peut être expliqué par la similitude de leur surfaces de contact et leurs états. Les bossages présents à la surface du renfort AH empêchent la rupture du lien d'adhérence (pour  $L_b = 80$  mm) et c'est la résistance à la traction du renfort qui limite la force d'arrachement (pour  $L_b = 120$  mm). On remarque que la rupture des renforts en acier (AL et AH) pour ( $L_b = 120$  mm) s'effectue dans l'acier, par traction. Ceci est dû à la présence d'une adhérence parfaite entre l'acier et la résine et entre cette dernière et le béton.

Dans tous les cas, la résistance à l'arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance du béton. L'influence de la résistance du béton sur la résistance à l'arrachement est plus prononcée pour les longueurs ancrées réduites (40mm) que pour les longueurs d'ancrage plus importantes. A partir de  $L_b=120$ mm, l'optimum semble atteint et l'effet de la résistance du béton devient réduite. C'est la contrainte d'adhérence plus forte du côté chargé que du côté libre qui explique ce comportement. A partir des graphes présentés ci-dessus les résultats suivants peuvent être cités : La force d'arrachement augmente régulièrement avec l'augmentation de la longueur ancrée ; La force d'arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance du béton tout en remarquant qu'après une certaine résistance (BO50), cette augmentation est modérée ; Si on travaille sur les petites longueurs ancrées, on sollicite la résine, dans le cas contraire, c'est le béton qui est sollicité ; L'utilisation de la résine E380 augmente sensiblement la force d'arrachement par rapport à l'utilisation de la résine E371.

## 5. Conclusions

Des essais d'adhérence par flexion ont été effectués pour caractériser le comportement d'adhérence de renforts de carbone positionnés dans le béton suivant la méthode NSM. Les essais réalisés montrent l'effet de la longueur ancrée, de la forme et de type de montage sur la résistance à l'arrachement du renfort. En particulier, les renforts sous forme de plat, qui donne une surface de contact avec la colle augmentée par rapport aux renforts cylindriques de même section, favorisent la résistance à l'arrachement. Une configuration spécifique d'intégration partielle du renfort dans le béton a été testée dans le cas de renforts plats. Elle permet d'éviter la coupure des cadres transversaux s'ils sont proches de la surface et présente une meilleure performance par rapport aux aciers lisses ou HA et aux joncs lisses. L'influence de la longueur ancrée, de la résistance du béton et du type de résine, a également été évaluée.

Une modélisation de la relation constitutive  $\tau_u$ -glissement des renforts de carbone en utilisant l'équation différentielle qui régit le problème d'adhérence a été développée. Nous constatons que  $\tau_u$  calculée selon le modèle (Eligehausen et al, 1983) a une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. Par conséquent, le modèle existant élaboré pour les barres d'acier HA est également valide pour les joncs et pour les plats de carbone.

Une modélisation du comportement d'adhérence des renforts de carbone en utilisant le logiciel ABAQUS a été également effectuée. Et finalement une comparaison entre les différents résultats, expérimentaux, analytiques et de modélisation par éléments finis a été effectuée. Cependant, afin de simuler la liaison entre les renforts PRF NSM et de l'adhésif. Des éléments cohésifs, d'épaisseur zéro 3D ont été introduits dans l'ABAQUS, sont des éléments qui simulent une interface entre deux matériaux où le phénomène de glissement (décollement) s'est produit.

On constate une meilleure performance générale des plats (PL1 et PL2) par rapport aux joncs. A section constante, le renfort PL1 offre une surface de contact plus grande permettant d'atteindre la force d'arrachement la plus élevée. Le montage PL2 présente approximativement la même surface de contact que les joncs. La meilleure résistance à l'arrachement dans ce cas est imputable à une épaisseur moyenne de colle plus réduite du fait de la meilleure correspondance géométrique du renfort et de l'engravure. L'acier à haute adhérence AH a une surface rugueuse permettant d'atteindre une adhérence plus importante par rapport à PL2, JL, et AL (dans ce cas, les bossages présents à la surface du renfort empêchent la rupture du lien d'adhérence et c'est la résistance à la traction du renfort qui limite la force d'arrachement). Les renforts JL et AL présentent des comportements similaires, ce qui peut être expliqué par la similitude de leurs surfaces de contact. Ces résultats montrent un fort effet de la micro-géométrie des renforts.

## 6. Bibliographie

- [ALZ 95] Al-Zahrani MM, Al-Dulaijan SH. *Annotated bibliography of bond behavior in FRP concrete systems*. Report CMTC-9501, Composite Manufacturing Technology Center, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802. p. 72, November 1995.
- [BJO 03] Bjorn T. *Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets* Construction and Building Materials, 2003. P. 15-26
- [BAR 03] Barros JAO, Dias S. *Shear strengthening of reinforced concrete beams with laminate strips of CFRP*. In: Proceedings CCC2003, Cosenza (Italy), 2003. p. 289–294.
- [BAN 04] Bank LC. *Mechanically Fastened FRP (MF-FRP) Strips for Strengthening RC Structures- A Viable Alternative*. In: Proc of 2nd international conference on FRP composites in civil engineering: CICE, Adelaide, Australia, December 8–10, 2004. 12 pp.
- [BAR 08] Barros J, Kotynia R. *Possibilities and challenges of NSM for the flexural strengthening of RC structures*, Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008) 22-24 July 2008.
- [CER 10] Ceroni F. *Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials*, Engineering Dept, University of Sannio, Benevento, Italy. In: Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 9, September 2010. P. 1547–1559.
- [ELI 83] Eligehausen, Popov, Betero. *Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed bars Under Generalized Excitations*, Report No. 83/23, EERC, University of California-Berkeley, Berkeley, Calif. 1983. p.162.
- [ASC 98] *Failure behaviour of precracked RC beams strengthening with carbon FRP sheets*, journal of composite for constructions ASCE 1998. vol 2, p.138-144.
- [NFP 81] French standard NF P18-406, *Essai de compression*, AFNOR, Paris; 1981.

- [LEE 99] Leeming MB, and Darby J. *Design and specifications for FRP plate bonding of beams, strengthening of reinforced concrete structures using externally-bonded FRP composites* in structural and civil engineering. 1999 vol. 22, p. 21-26.
- [JAE 07] Jae Ha Lee and al. *flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with mechanically fastened FRP strip*, Frprcs-8university of Patras, Patras, Greece, 16-18 July 2007.
- [KAM 99] Kamiharako A, Shimomura T, Maruyama K, Nishida H. *Stress transfer and peeling-off behaviour of continuous fiber reinforced sheet-concrete system*. In: The seventh East Asia-Pacific conference on structural engineering and construction; 1999. p. 1283–8.
- [LIM 03] Limam O, Foret G, Ehlacher A. *RC Two-Way Slabs Strengthened with CFRP Strips: Experimental Study and a limit Analysis Approach*. in *Composite Structures*, 60, 2003, p.467-471.
- [LEL 03] Lelli V, Einde D, Zhao L, Seible F. *Use of FRP composites in civil structural applications* *Construction and Building Materials* 17 .2003. p. 389–403.
- [MER 15] A. Merdas, B. Fiorio, N.E. Chikh, *Aspects of bond behavior for concrete beam strengthened with CFRP-NSM*, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015.
- [MER 11] Abdelghani Merdas, Bruno Fiorio, Nasr-Eddine Chikh, *Adhérence de joncs et plats composites mis en place dans le béton selon la méthode NSM*, XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 mai 2011
- [NAN 82] Nanni A, et al. *Concrete cover delamination in RC beams strengthened with FRP sheets*, O'Brien TK, editor, Long-term behavior of composites. Philadelphia: ASTM, 1982.
- [REH 61] Rehm G., «Uber die Grundlagen des Verbundes Zwischen Stahl und Beton», *Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Helft*,p. 138, 1961.
- [RIL 70] RILEM, «Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton : essai par traction», *J. Materials and Structures*, (3) 15, 1970.