

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département de Génie Civil

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Génie Civil

Option: Matériaux et Structures

Par

DOUADI Abdellah

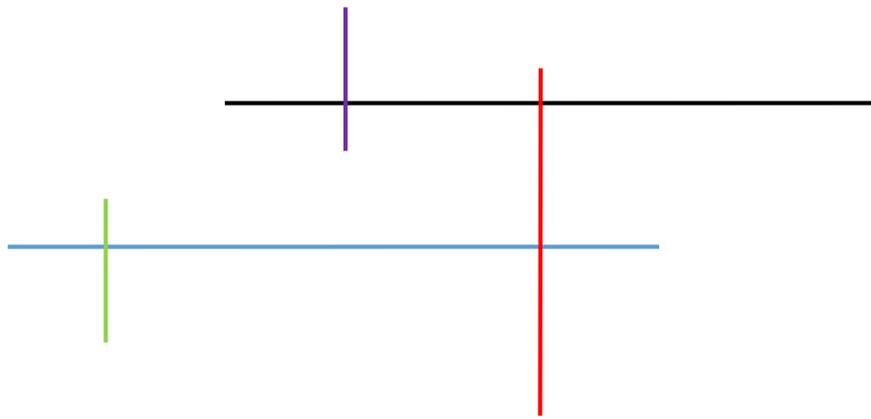
THÈME

**Caractérisation du comportement d'adhérence des
éléments en BA renforcés par matériaux composites selon
la technique FRP-NSM**

Soutenue le 22/02/2020 devant le Jury:

HAMIDOUCHE Mouhamed	Professeur	Univ Sétif 1	Président
MERDAS Abdelghani	M.C.A	Univ Sétif 1	Directeur de thèse
TAHAKOURT Abdelkader	Professeur	Univ. Bejaia	Examineur
RAHMOUNI Zine el Abidine	Professeur	Univ. M'sila	Examineur
BELGASMIA Mourad	M.C.A	Univ Sétif 1	Examineur

Avant-propos



Le travail présenté dans cette étude a été réalisé au sein l'Unité de Recherche Matériaux Emergent de l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, Une partie de cette étude concernant le renforcement des poutre par les renfort NSM a été réalisée au sein du laboratoire de matériaux de Génie Civil de l'Université Mohamed EL-Bachir El Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj et dans un laboratoire privée.

Ce travail de thèse a fait l'objet des communications et publications suivantes :

Publication internationale

- **Abdellah Douadi**, Abdelghani Merdas & Łukasz Sadowski (2019), The bond of near-surface mounted reinforcement to low-strength concrete, Journal of Adhesion Science and Technology, DOI: 10.1080/01694243.2019.1592944.

Conférences internationales

- **Abdellah Douadi**, Abdelghani Merdas, Abdelli Houssam Eddine & Hebbache Kamel (2018), Effet d'ajout du quartz dans la résine sur la propriété d'adhérence béton-CFRP [Effect of adding powder of quartz in the epoxy resin on the bond property between CFRP-concrete], Fourth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution, April29-30,2018, Constantine, Algeria.
- **Abdellah Douadi**, Abdelghani Merdas & Abdelli Houssam eldine (2018), Adhérence entre le béton et les renforts selon la technique NSM [Bond between concrete and reinforcements using NSM method], in the 1st international conference on vulnerability and rehabilitation of structures, USTHB, Algeria, May 07 and 08 2018.

REMERCIEMENTS

C'est une habitude saine de remercier au début d'un tel travail tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à le rendre possible. Avec mon enthousiasme le plus vif et le plus sincère que je voudrais rendre mérite à tous ceux qui à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

C'est avec une immense reconnaissance que j'adresse mes vifs remerciements à mon encadrant Monsieur **MERDAS Abdelghani**, Maître de conférence à l'Université de Ferhat Abbas Sétif 1, Pour sa disponibilité, son soutien et ses conseils qui ont été nombreux et importants. Ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant de diriger cette thèse J'ai tant apprécié en sa présence l'environnement de notre équipe qui s'est solidifié. J'ai appris beaucoup de choses avec lui. Je lui adresse toute ma reconnaissance et mon affection. Je tiens à remercier aussi Monsieur **HAMIDOUCHE Mouhamed**, Professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif 1, qui m'a honoré en acceptant d'être Président de mon jury mais également pour tous ses conseils toujours pertinents et attentifs.

Ma profonde gratitude et vifs remerciements s'adressent à Monsieur **BELGASMIA Mourad**, Maître de Conférence à L'université Ferhat Abbas Sétif 1, d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse et participer à mon jury.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur **TAHAKOURT Abdelkader**, Professeur à l'Université Abderrahmane Mira-Bejaia de m'avoir fait l'honneur d'être un examinateur de cette thèse et de participer à mon jury.

Je remercie Monsieur **RAHMOUNI Zine El Abidine**, Professeur à l'Université Mohamed Boudiaf- M'Sila, de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail en qualité d'examineur et d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

J'aimerai, par ailleurs souligner la contribution importante de Monsieur **NOUI Ammar**, Chef de Département de Génie Civil Université de Bordj Bou Arréridj, qui nous a accueilli à bras ouvert dans son **laboratoire pédagogique** et mis à notre disposition tout le matériel nécessaire pour la réalisation d'une partie de ce travail.

Un grand merci aux Pr **BENMOKRAN Ibrahim** de l'université Cherbrook-Canada et Pr **LUKASZ Sadowski** de l'université Worclaw-Pologne pour leurs aides.

J'exprime aussi ma gratitude à tous les enseignants de département génie civil, pour leurs soutiens et l'intérêt qu'ils portent à mon travail. Un grand merci pour Mr **Mohaned Oussaaid** et Mr **Masmoudi billele** et Dr **BELEBCHOUCHE Cherif** pour leurs précieux conseils. Je n'oublierai jamais ce qu'ils m'ont donné. Merci beaucoup mes chers enseignants.

Je tiens à remercier sincèrement Mme. **Fatima Al Zahra** pour son suivi durant toute l'année. Je voudrais lui dire merci à Dieu et ensuite à votre faveur, deuxièmement, j'ai pu compléter cette thèse.

Finalement je remercie mes **Parents** et mes Sœurs **Fatima, Hasna, Khaoula, Amina** et **ma fiancée** pour leurs soutiens qui m'a été bien utile durant toutes ces années d'études.

Le Prophète Mouhamed que la prière d'Allah et Son salut soient sur lui a dit :

« Celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah »

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A La mémoire de mon cher ami **Yakoub**, que Dieu le tout-puissant les accueille dans son vaste paradis ;

A Mes **parents** les plus chers au monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, ceux qui ont sacrifié et souffert les plus belles années de leurs vies pour me voir un jour réussir ;

A mes chers frères **Mohamed** et **Oussama** ;

A mes chère sœurs **Fatima, Khaoula, Hasna** et **Amina** ;

A mes chers neveux et nièces **Wail, Yahia**, mes belles **Djenouna et Foufa, Khadija, Zineb et Adem** ;

A toutes la famille **Douadi** et **Beya** ;

A ma chère épouse **Ouahib**, A mes chers futures enfants In chaa Allah **Mohamed** et **Aroua** ;

A ma belle-mère **Salima**, A mes beaux-frères **Bilell, Houcine, Djalel** et **Oualid** ;

A mon Directeur de thèse Docteur **Abdelghani MERDAS** ;

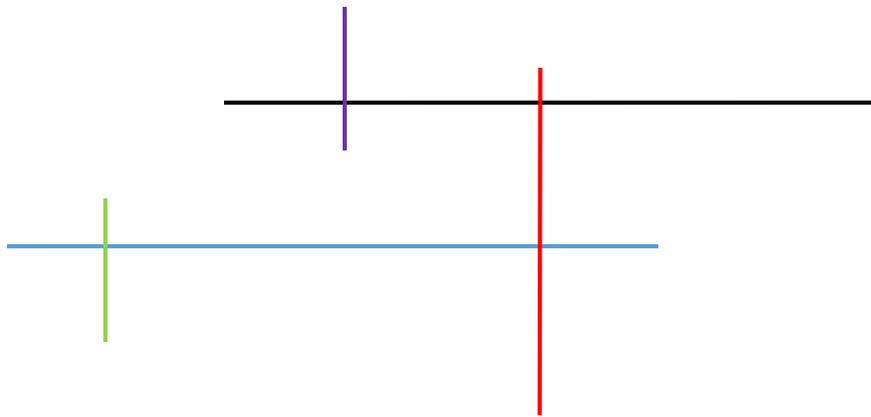
A mes Chers enseignants : **Chaben Bousbaa, Kamel HEBBACHE, Farid Mohaned OUSSAD, Bilel MASMOUDI, Mourad BELGASMIA, Mourad BOUTLIKHT** et **Cherif Belebchouche** ;

A tous les post-graduants du département de génie civil ;

A mes chers meilleurs collègues: **Abdelhalim, , Lhadi, Mohamed, Walid, Riad** ;

A mes chers meilleurs amis : **Ilyes, Yakoub, Oussama, Redha, Imad, Abdelkayoum et Walid.**

Table de matière



Avant propos	i
Remerciment	ii
Dédicace	iii
Tables des matières	iv
Liste des figures	v
Liste des Tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction Générale	1

– Chapitre I – État de l’Art

I.1. Introduction	5
I.2. les matériaux composites	5
I.3. Applications des FRP en génie civil	15
I.4. Techniques de renforcement du béton avec les FRP.....	15
I.5. Les fils d'acier	21
I.6. Comportement d'adhérence.....	23
I.7. Facteurs affectant le comportement d'adhérence.....	24
I.8. Méthodes utilisées pour caractériser l'adhérence dans le cas NSM	27
I.9. Modes de rupture observés lors des essais d'adhérence dans le cas NSM	30
I.10. Modèle numérique	32
Conclusion	34

– Chapitre II – Adhérence Entre Les Renforts NSM et Le Béton de Faibles Caractéristiques Mécaniques

II.1. Introduction	36
II.2. Récapitulatif des travaux antérieurs	36
II.3. Description des matériaux	38
II.4. Montage expérimental et résultats.....	43
II.5. Discussion des résultats	49

Conclusion	54
------------------	----

**– Chapitre III –
Effet De L'ajout Du Sable a La Résine**

III.1. Introduction.....	56
III.1. Introduction.....	56
III.2. Les types de charges ajoutés à la résine	56
III.3. Utilisation des charges minérales dans les résines époxydes	58
III.4. Procédure expérimentale	59
III.5. Essai d'adhérence	69
Conclusion	73

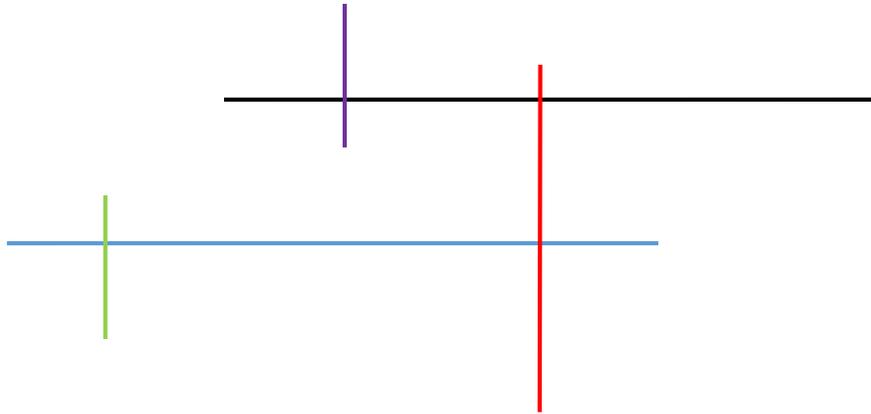
**– Chapitre IV –
Etude Des Poutres En BA Renforcées Par NSM**

IV.1. Introduction.....	74
IV.2. Récapitulatif des travaux antérieurs	74
IV.3. Mode de rupture.....	76
IV.4. Objectifs du travail expérimental	77
IV.5. Programme expérimental	78
IV.6. Résultats expérimentaux	82
Conclusion	86

Conclusion générale.....	88
--------------------------	----

Références.....	
-----------------	--

Liste des figures



– Chapitre I – État de l'Art

Figure I.1: Comportement et constitution des principaux composants d'un matériau composite [12].....	6
Figure I.2: Vue au microscope électronique montrant les fibres de carbone microscopiques utilisées dans la fabrication des FRP [12].	7
Figure I.3: Processus de fabrication par pultrusion [15].....	12
Figure I.4: Étapes principales de fabrication par pultrusion, a) Bobine de fibre de verre, b) passage des fibres dans le bain de résine, c) passage des fibres enrobées de résine dans les moules, d) produit final [15].....	13
Figure I.5: Courbes contraintes-déformation des différents renforts [15]	14
Figure I.6: Applications des FRP en génie civil (a) Pont de l'Autoroute 55 Nord (Magog – 2002), (b) Pont Wotton (Municipalité de Wotton – 2001), (c) le renforcement d'une poutre par lamelles en CFRP, (d) confinement d'un poteau avec les tissus en CFRP [12].....	15
Figure I.7: Renforcement du béton avec du FRP, a) EBR, b) lamelle en NSM, c) jonc en NSM [19].....	16
Figure I.8: Applications de la technique EBR, a) renforcement des poutres, b) renforcement de la dalle, c) renforcement des silos, d) renforcement de la connexion poutre-poteau [15].....	17
Figure I.9: Procédure de renforcement par NSM [12].....	18
Figure I.10: Les applications de la méthode NSM, a) renforcement d'un garage de stationnement [46], b) renforcement d'un pont en Suède [14].....	19
Figure I.11: Schéma d'une filière de tréfilage [28].	23
Figure I.12: Comportement d'adhérence [30].	24
Figure I.13: Dimension minimale d'engravure [37]	26
Figure I.14: Dispositif adopté par De Lorenzis et al. (dimensions en mm) [33].....	28
Figure I.15: Pullout test Dimensions en millimètres [30].	29
Figure I.16: Dispositif adopté par Sena Cruz et al. [40].	29
Figure I.17: Mode de rupture [40].....	31
Figure I.18: Modèle d'adhérence, a) Modèle bilinéaire, b) Modèle de BEP, c) Modèle de MBEP	32

– Chapitre II –
Adhérence Entre Les Renforts NSM et Le Béton de Faibles Caractéristiques Mécaniques

Figure II.1: Analyse granulométrique.....	38
Figure II.2: Les différentes étapes pour déterminer les caractéristiques mécaniques du béton, (a) Éprouvettes surfacées par du soufre, (b) Essai de compression, (c) Mesure du module Young, (d) Essai de traction.	40
Figure II.3: Observation au microscope électronique à balayage de barres en CFRP et acier de précontrainte, (a) section longitudinale des renforts, (b) section transversale des renforts, (c) surface extérieure des renforts.	42
Figure II.4: Les différentes étapes de préparation des échantillons, (a) la forme du bloc de béton, (b) le nettoyage des engravures à l'air comprimé, (c) la procédure de masquage, (d) le remplissage des engravures avec la résine époxy.	45
Figure II.5: La configuration adoptée (dimension en mm) : a) dispositif expérimental pour l'essai arrachement par flexion ; b) poutre avant le chargement.	46
Figure II.6: Courbe force d'arrachement-glisement, (a) courbe force d'arrachement-glisement pour les renforts composites, (b) courbes force d'arrachement-glisement pour les fils d'acier de précontraint	48
Figure II.7: Système de classement pour différents types des renforts.	49
Figure II.8: Mode de rupture.....	51
Figure II.9: Comparaison des courbes de glissement-contrainte d'adhérence entre les résultats des tests et les résultats prévus, (a) échantillons BE12×12,(b) échantillons BE9×9, (c) spécimen BC8×15, (d) spécimen BD12×12.	53
Figure II.10: Effet du changement de type de béton.....	54

– Chapitre III –
Effet De L'ajout Du Sable a La Résine

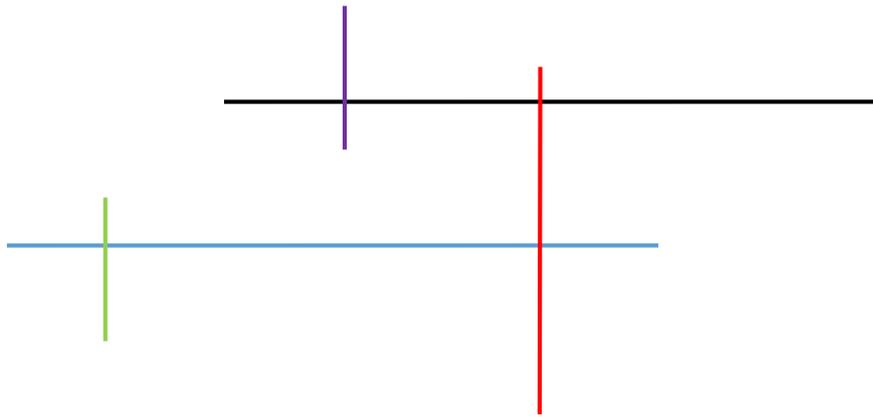
Figure III.1: Les différents états de dispersion [83].	57
Figure III.2: Description du sable, (a) photographie MEB du sable, (b) analyse granulométrique	60
Figure III.3: Géométrie des éprouvettes pour les essais de traction	62
Figure III.4: Essai de traction.	62
Figure III.5: Courbes de l'évolution de la contrainte en traction pour les quatre mélanges.....	63
Figure III.6: Résultats d'essai de Charpy.	64

Figure III.7: Mode de rupture.....	64
Figure III.8: Schéma de l'essai d'adhérence résine-composite.....	65
Figure III.9: Mode de rupture résine/renfort.	66
Figure III.10: Résultats du test de DSC.....	67
Figure III.11: Spectre par FTIR de la résine +charge 0/45.....	68
Figure III.12: Observation par microscope électronique à balayage des résines chargée et non chargée.....	69
Figure III.13: Préparation des échantillons.....	70
Figure III.14: Courbes force d'arrachement en fonction du glissement d'extrémités chargées.	72

– Chapitre IV –
Etude Des Poutres En BA Renforcées Par NSM

Figure IV.1: Caractéristiques géométriques et schémas de ferrailage des poutres préparées	78
Figure IV.2: Dimensions et position des engravures.....	80
Figure IV.3: Procédure de fabrication et renforcement des poutres, a) création des engravures, b) traitement de surfaces des engravures, c) Nettoyage avec l'air comprimé, d) scellement des renforts	80
Figure IV.4: Paramètres d'étude	81
Figure IV.5: Dispositif d'essai adoptée pour les essais de flexion	82
Figure IV.6: Les charges caractéristiques : (a) charge de la première fissure, (b) charge ultime	83
Figure IV.7: Modes de rupture des poutres testées, (a) poutre P.T, (b) poutre N-1, (c) poutre N-2, (d) poutre N-3, (e) poutre N-4	85
Figure IV. 8: Influence du renforcement sur énergie d'absorption des poutres	86

Liste des tableaux



- Chapitre I – État de l'Art

<u>Tableau I.1:</u> Quelques applications de matériaux composites à base des polymères [10].6	6
<u>Tableau I.2:</u> Propriétés longitudinales des fibres de carbone [15].....8	8
<u>Tableau I.3:</u> Principaux avantages et désavantages des fibres de carbone [15].8	8
<u>Tableau I.4:</u> Propriétés longitudinales des fibres de verre [15].9	9
<u>Tableau I.5:</u> Principaux avantage et inconvénients des fibres de verre [15].9	9
<u>Tableau I.6:</u> Propriétés longitudinales des fibres d'aramide [15].10	10
<u>Tableau I.7:</u> Propriétés mécaniques des matériaux en FRP [15].14	14

- Chapitre II – Adhérence Entre Les Renforts NSM et Le Béton de Faibles Caractéristiques Mécaniques

<u>Tableau II.1:</u> Aperçu général de l'état de l'art récent, des paramètres étudiés et des résultats sélectionnés obtenus par la technique NSM.37	37
<u>Tableau II.2:</u> La composition et les principales propriétés mécaniques du béton.....39	39
<u>Tableau II.3:</u> Propriétés chimiques, minéralogiques et physiques du ciment.41	41
<u>Tableau II.4:</u> Certaines propriétés mécaniques de renforts.41	41
<u>Tableau II.5:</u> Détaille des échantillons.44	44
<u>Tableau II.6:</u> Résultats obtenus.....48	48
<u>Tableau II.7:</u> L'utilisation de la capacité de traction du renfort.50	50
<u>Tableau II.8:</u> Paramètres d'ajustement pour les équations s-T.52	52

- Chapitre III – Effet De L'ajout Du Sable a La Résine

<u>Tableau III. 1:</u> Propriétés de la résine époxy.....59	59
<u>Tableau III. 2:</u> Composition chimique du sable.60	60
<u>Tableau III. 3:</u> Pourcentage de sable ajouté à la résine.60	60
<u>Tableau III. 4:</u> La masse volumique des résines.61	61
<u>Tableau III. 7:</u> Résultats expérimentaux pour l'adhérence résine/composite.....65	65
<u>Tableau III. 8:</u> Composition et caractéristiques mécaniques du béton.69	69
<u>Tableau III. 9:</u> Propriétés mécaniques de la lamelle en PRFC.70	70

Tableau III. 10: Détails des échantillons d'arrachement.71

Tableau III. 11: Résultats obtenus pour les essais d'arrachement directs.71

**- Chapitre IV –
Etude Des Poutres En BA Renforcées Par NSM**

Tableau IV. 1: Propriétés de la résine époxy.79

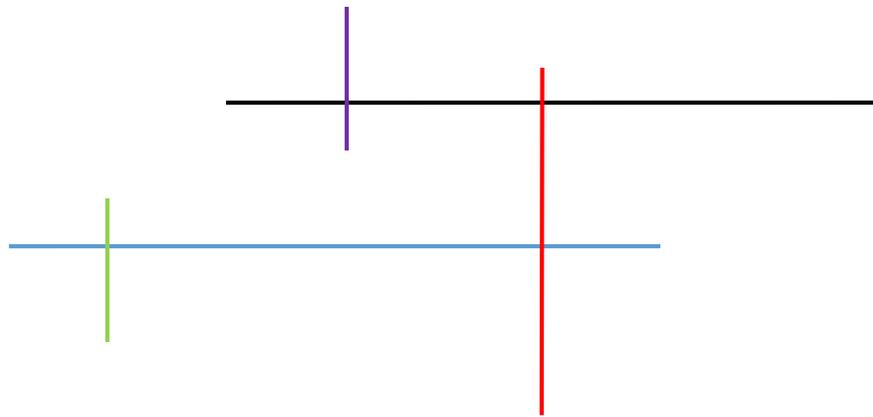
Tableau IV. 2: Propriétés mécaniques des renforts.....79

Tableau IV. 3: Programme expérimental pour les essais de flexion quatre points.81

Tableau IV. 4: Résultats obtenus pour les poutres en flexion.82

Tableau IV. 5: Flèches et ductilité de déplacement des poutres.....85

Liste des abréviations

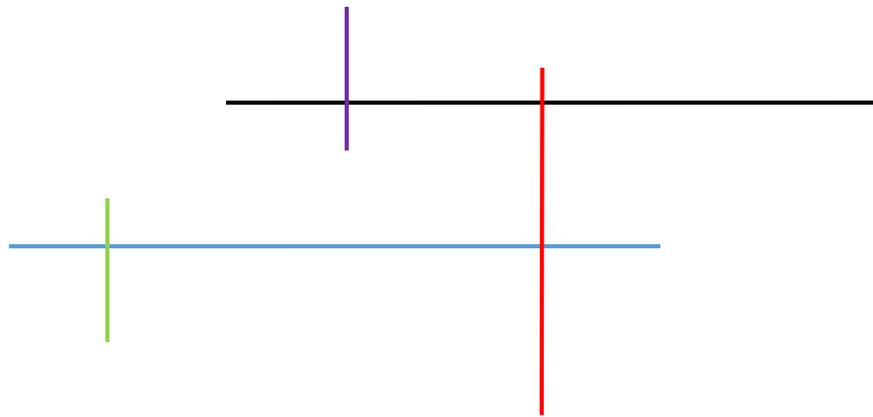


Liste des abréviations

$\sigma_{\max \text{ moy}}$: Contrainte d'arrachement moyenne (MPa)	σ_{\max}	: La contrainte axiale dans l'armature (MPa).
Δ_u	: La flèche enregistrée afin d'atteindre la charge de rupture.	Δ_y	: La flèche enregistrée afin d'atteindre la limite d'élasticité
a et b	: Sont des paramètres de montée et de descente de la courbe glissement-contrainte .	a1	: La distance entre l'appui et la mi-portée de la poutre.
a2	: La distance entre le point d'application de la charge et la mi-portée de la poutre.	Al₂O₃	: Oxyde d'aluminium.
Am	: Section d'éprouvette de résine.	bp	: Epaisseur de la lamelle.
C.S	: La surface du renfort.	C.V	: Coefficient de variation.
C₂S	: Silicate bicalcique.	C₃A	: Aliminate trécalcique.
C₃S	: Silicate trécalcique	C₄AF	: Alimine-ferrite tétracalcique.
CaO	: Oxyde de calcium.	Cl	: Chlore.
dm	: Diamètre d'éprouvette de résine	dp	: Largueur de la lamelle.
E	: Module de young.	E/C	: Rapport eau sur ciment.
EBR	: External Bonded Reinforcement	Fe₂O₃	: Oxyde ferrique.
fc	: La résistance à la compression a 28 jours du béton.	Fmax	: La force d'arrachement maximale appliquée sur le renfort.
Ffu	: La limite d'élasticité du renfort utilisée (MPa).	Fu	: Force d'arrachement prédite (kN).
Fmax moy	: La force d'arrachement maximale moyenne (kN).	K₂O	: Oxyde de potassium.
hm	: Hauteur d'éprouvette de résine.	Lb	: La longueur ancrée.
la	: La distance entre le centre de gravité de la rotule et le centre de gravité de l'armature.	MgO	: Oxyde de magnisiume.
NSM	: Near Surface Mounted	P	: La force totale appliquée sur la poutre (kN).
ϕ	: Le diamètre du renfort rond.	Pel	: La charge appliquée afin d'atteindre la limite d'élasticité.
P_{er}	: Périmètre du renfort.	Pf	: La charge de la première fissure.
PRFA	: Polymere Renforce en Fibre d'Aramide.	PRFC	: Polymere Renforce en Fibre de Carbone.
PRFV	: Polymere Renforce En Fibre De	S.D	: Ecart type.

	Verre.		
P_{ru}	: La charge de rupture.	S	: Le glissement du fil d'acier de précontrainte (mm).
S'	: Le glissement local.	SiO₃	: Silicate trécalcique.
SiO₂	: Dioxyde de silicium.	S_{max}	: Glissement maximal moyen (mm).
		moy	
S_m	: Le glissement qui correspond à la contrainte d'adhérence maximale.	Su	: Le glissement qui correspond à la contrainte d'adhérence maximale (mm).
S_{max}	: Le glissement maximal (mm) à l'extrémité chargée.	α et α'	: Sont des paramètres qui varient entre 0 et 1 pour α, et entre -1 et 0 pour α'.
W_f	: La largeur du renfort plat de CFRP.	τ	: La contrainte d'adhérence locale (MPa).
μΔu	: L'indice de ductilité	τ_m	: La contrainte d'adhérence maximale (MPa).
τ_{av}	: La contrainte d'adhérence moyenne du fil d'acier de précontrainte (MPa).	S.D	: Ecart type.
τ_u	: La contrainte d'adhérence maximale (MPa).	SiO₃	: Silicate trécalcique.

Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

Les structures en béton armé (BA), que l'on trouve dans le monde entier, sont actuellement vulnérables à plusieurs facteurs qui peuvent avoir une incidence sur leur durée de vie utile, on peut tout simplement faire en sorte que la capacité portante de la structure ne soit pas suffisante pour résister aux charges de service. Certains facteurs sont naturels, comme les charges accidentelles (tremblements de terre), ou les conditions environnementales et climatiques (température, humidité), d'autres sont liés au processus de conception, comme la modification des structures édifices ou l'augmentation de la charge de service. De nos jours, la tendance générale est à la réhabilitation des structures plutôt qu'à la construction nouvelle [1,2]. Afin de préserver les structures existantes en BA, et par conséquent, augmenter leur durée de vie, un renforcement est souvent nécessaire. En ce sens, les polymères renforcés de fibres (PRF) jouent un rôle important dans la préservation des structures en BA en raison des avantages qu'ils offrent par rapport aux autres matériaux traditionnels. Les matériaux en PRF sont légers, non corrosifs et possèdent de meilleures propriétés mécaniques. Ces matériaux peuvent être élaborés facilement à forme contrôlée selon le besoin, et peuvent être utilisés dans un large éventail de structures et dans des zones à accès limité où les techniques traditionnelles seraient difficiles à mettre en œuvre [3- 7]. Cependant, la rupture fragile et, dans certains cas, le faible module d'élasticité, en plus de la faible résistance aux charges transversales, sont les principaux inconvénients des matériaux en PRF [5].

Les structures en BA existantes peuvent être renforcées à l'aide de matériaux en PRF grâce à deux grandes techniques communes : Externally Bonded Reinforcement (EBR), dans laquelle l'élément en PRF est collé à la surface extérieure de l'élément renforcé, et technique Near Surface Monted (NSM), dans laquelle l'armature en PRF est insérée dans une rainure pratiquée dans le revêtement en béton de l'élément en BA.

Ces dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour la technique NSM en raison de ses avantages potentiels par rapport à la technique EBR, tels que : (i) un temps d'installation minimal, (ii) aucune exigence de préparation de la surface, à l'exception de la coupe des rainures, (iii) une tendance moindre à la rupture par décollement, (iv) une exposition moindre aux dommages mécaniques, au feu et au vandalisme puisque l'armature en PRF est protégée par le revêtement en béton [8- 10].

Le coût de la réhabilitation et de la réparation est dans la plupart des cas bien inférieur au coût de remplacement. De plus, la réparation et la réhabilitation prennent généralement moins de temps que le remplacement, ce qui réduit le temps d'interruption du service. Les propriétés

mécaniques et physiques supérieures des PRFs en font d'excellents candidats pour la réparation et la rénovation des structures. Les PRFs sont constitués de filaments à haute résistance, tels que des fibres de verre, fibres de carbone et des fibres de l'aramide, placés dans une matrice de résine.

Les composites dans les pays européens sont facilement disponibles et relativement peu coûteux puisqu'ils ont la technologie de fabriquer ces matériaux dans leurs territoires.

À nos jours, l'utilisation de la technique NSM dans les chantiers algériens soit pour le renforcement ou la réparation des structures n'est pas encore applicable ; il est essentiel de poursuivre les recherches expérimentales pour comprendre en profondeur le comportement d'adhérence entre les renforts NSM et le béton, puisque l'adhérence est considérée comme le facteur clé qui contrôle le succès et l'efficacité du système de renforcement, car il est responsable du transfert de la charge entre les renforts et le béton. De plus, l'efficacité du système de renforcement par la méthode NSM sur le comportement en flexion et en cisaillement des poutres en BA doit encore être étayée par des études rigoureuses capables de fournir des données fiables. Ainsi, une proposition d'un règlement algérien qui contient des méthodes de conception et de prévision pour la réparation et le renforcement des structures selon la technique NSM s'avère très importante.

Deux objectifs principaux ont été visés par ce travail, le premier s'articule sur le comportement des éléments structuraux fabriqués par un béton ayant une faible résistance mécanique.

D'après le contrôle technique de Bordj Bou-Arredj et M'Sila, plus de quarante-cinq ouvrages structuraux, et plus de 80 éléments structuraux ont été démolies à cause de la faible résistance mécanique du béton (généralement erreur de dosage en ciment ou bien en eau). De plus, les déchets de démolition sont considérés comme une contrainte économique et environnementale. Donc la question qui s'impose est la suivante : est-ce que ce type de structure ou d'élément peuvent être renforcés ?

Le deuxième objectif est de trouver une alternative aux PRF en raison de l'indisponibilité des matériaux PRF sur le marché algérien et la longue durée d'importation et leurs couts élevés, à cause de ces facteurs, nous avons pensé à utiliser une matière locale comme un alternatif aux PRFs à titre d'exemple les joncs et plats en fibres de carbone. Le matériau alternatif qui est proposé dans ce travail est les fils d'aciers qui sont destinés à la fabrication des aciers de la précontrainte.

Les fils d'acier sont des matériaux utilisés pour le renforcement ou la réparation des structures afin d'éviter la rupture fragile des éléments en BA. Malgré leurs poids élevés et leur corrosivité, ils présentent de bonnes propriétés mécaniques.

Selon les objectifs décrits précédemment, la thèse est structurée comme suit :

Au **premier chapitre**, une étude bibliographique sur les travaux réalisés dans le cadre de l'étude de l'efficacité du comportement d'adhérence des armatures en PRF-NSM a été résumée.

Tout d'abord, une description détaillée des matériaux en PRF, y compris leurs types, leurs substances constitutives, leurs procédés de fabrication et leurs propriétés mécaniques, est donnée. Suivie par une description détaillée des deux méthodologies principales communes pour le renforcement des éléments en BA avec des matériaux PRF (EBR et NSM). Ensuite, une revue complète des programmes expérimentaux sur le comportement d'adhérence du PRF NSM est décrite. Une attention particulière a été accordée aux principaux paramètres régissant le comportement d'adhérence, le test et les configurations d'essai adoptées, les modes de ruptures et les modèles d'adhérence disponibles qui simulent l'effet du comportement d'adhérence.

Dans le **second chapitre**, des essais d'adhérence par flexion ont été effectués afin d'étudier le comportement d'adhérence des renforts NSM dans un béton de faible caractéristiques mécaniques (15MPa) et d'essayer de trouver une alternative aux renforts en PRF. Le protocole expérimental est décrit en détail dans ce chapitre. La configuration de l'essai et les dimensions de l'éprouvette ainsi que les formes des engravures et les types de renforts sont spécifiées. L'instrumentation et les variables du test sont également expliqués. Les caractéristiques physico-chimiques des renforts et du béton sont définies expérimentalement.

Le **troisième chapitre** présente un protocole expérimental visant à étudier un matériau composite (résine époxy chargée par le sable) afin d'améliorer ses propriétés et réduire le coût du matériau. Ce chapitre commence par une brève description de l'effet d'ajout d'une charge minérale à la résine. Des essais mécaniques et thermiques ont été ensuite effectués pour caractériser ces matériaux de scellement. Enfin, deux configurations d'arrachement ont été utilisées pour avoir l'influence de la résine époxy chargée sur le comportement d'adhérence.

Dans le **quatrième chapitre**, le comportement en flexion des poutres en BA confectionnées avec un béton de faibles caractéristiques mécaniques et renforcées avec des renforts en PRF à base de carbone ou avec des fils d'aciers selon la technique NSM a été analysé. Les détails sur les propriétés des matériaux, le montage, les variables d'essai et la configuration des poutres sont également donnés. Les principaux résultats des essais de flexion

sont présentés et discutés en fonction de la charge de la première fissure, la charge ultime, le mode de rupture, la ductilité et l'énergie d'absorption.

Enfin, une conclusion générale contenant l'ensemble des résultats obtenus et des propositions des perspectives de recherches futures.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

I.1. Introduction	5
I.2. Les matériaux composites	5
I.2.1. Les fibres	7
<i>I.2.1.1. Les fibres de carbones</i>	7
<i>I.2.1.2. Les fibres de verre</i>	9
<i>I.2.1.3. Les fibres d'aramide</i>	9
<i>I.2.1.4. Les fibres de basalte</i>	10
I.2.2. La matrice	10
<i>I.2.2.1. Polyester</i>	11
<i>I.2.2.2. Vinylester</i>	11
<i>I.2.2.3. L'époxy</i>	12
I.2.3. Méthode de fabrication	12
I.2.4. Propriétés mécaniques des PRF	13
I.3. Applications des PRF en génie civil	14
I.4. Techniques de renforcement du béton avec les PRF	15
I.4.1. Technique de renforcement externe (EBR)	16
I.4.2. Insertion de renforts composites dans des engravures préparées sur la surface de béton méthode NSM	17
I.4.3. Comparaison entre les techniques EBR et NSM	19
I.5. Les fils d'acier	21
I.5.1. Principe de tréfilage	21
I.6. Comportement d'adhérence	23
I.7. Facteurs affectant le comportement d'adhérence	24
I.7.1. Effet de la résistance du béton	25

I.7.2. Effet de la longueur d'encrage.....	25
I.7.3. Dimensions des engravures et configuration du surface.....	25
I.7.4. Matériaux de scellement.....	26
I.7.5. Caractéristiques des renforts	27
I.8. Méthodes utilisées pour caractériser l'adhérence dans le cas NSM	27
I.8.1. Essai d'arrachement direct (direct pull out test)	27
I.8.2. Essai d'arrachement par flexion (beam test)	28
I.9. Modes de rupture observés lors des essais d'adhérence dans le cas NSM	30
I.10. Modèle numérique	32
Conclusion.....	35

I.1. Introduction

En Algérie, le béton est le matériau de construction le plus utilisé en raison de ses nombreux avantages, tels que la résistance aux compressions, la durabilité, la résistance au feu et l'excellent rapport performance/coût. Cependant, la durée de vie des structures en béton est affectée par différents facteurs, tels que l'âge, les charges ou les conditions environnementales ce qui fait de la réhabilitation et le renforcement des opérations indispensables [11,12]. À cet effet, le développement de nouveaux matériaux et techniques pour la construction et la réhabilitation des structures en béton tirant partie des technologies émergentes revête une importance majeure [13, 14].

I.2. Les matériaux composites

Le terme matériau composite est un terme générique utilisé pour décrire une combinaison judicieuse de deux matériaux ou plus pour obtenir un produit plus efficace à partir de ses composants [15]. Ces matériaux sont largement utilisés dans le domaine du génie civil, grâce aux nombreux avantages qu'ils fournissent. Certaines applications de matériaux composites à base de polymères dans différents domaines sont présentées dans le **Tableau I.1**. Plusieurs propriétés peuvent être améliorées ou affectées par la formation d'un matériau composite polymère, telles que la résistance, la rigidité, la ductilité, la résistance à la corrosion, le poids, la résistance à la fatigue [14].

De nos jours, le matériau composite en PRF est le plus couramment utilisé dans les applications de construction et de génie civil, en tant qu'alternative à l'acier, soit pour le renforcement interne, soit pour le renforcement externe [16, 17]. Les matériaux en PRF offrent plusieurs avantages par rapport à l'acier, parmi lesquels : (i) le rapport résistance poids (la résistance des PRF peut être dix à quinze fois supérieure à celle de l'acier ; son poids est de cinq fois inférieur par rapport aux aciers), (ii) la facilité de manipulation (leur faible poids facilite la manipulation et réduit les charges permanentes ajoutées aux structures), (iii) la résistance à la corrosion (offre une grande durabilité en présence d'environnements agressifs), (iv) leur faible coefficient de dilatation thermique, (v) ils peuvent être utilisés dans une large gamme de structures en raison de leur neutralité électromagnétique et de leur grande aptitude au découpage, (vi) ils peuvent être disponibles en plusieurs tailles et formes [18]. D'autre part, la rupture fragile, le faible module d'élasticité, et sa faible résistance aux charges transversales peut être considérée comme des inconvénients des matériaux en PRF [19].

Les fibres et la matrice sont les deux principaux composants formant le matériau PRF, les fibres fournissent la force et la rigidité, et la matrice (résine) fournit principalement le transfert

des contraintes et des déformations entre les fibres [20]. Par conséquent, les composites PRF sont fabriqués en incorporant des fibres continues de haute résistance dans une matrice de polymère (voir la **Figure I.1**). Étant donné que les PRF sont composés de deux matériaux distincts, les propriétés PRF dépendent principalement de celles des constituants individuels. Il est donc instructif d'examiner le rôle et les propriétés de chacun des matériaux constitutifs, les fibres et la matrice, séparément, avant de discuter les propriétés du composite produit en PRF dans son ensemble.

Tableau I.1: Quelques applications de matériaux composites à base des polymères [21].

<i>Domaine d'application</i>	<i>Exemples</i>
<i>Aérospatiale</i>	Structures spatiales, antenne satellite, boîtiers de moteurs fusée, réservoirs de carburant haute pression, cônes de nez, tubes de lancement.
<i>Avion</i>	Carénages, portes d'accès, raidisseurs, ailes entières, peaux d'ailes, longerons d'ailes, radomes, stabilisateurs verticaux et horizontaux, pales d'hélicoptère, portes de train d'atterrissage, panneaux intérieurs.
<i>Chimique</i>	Tuyaux, réservoirs, trémies, vannes, pompes, turbines.
<i>Construction</i>	Ponts et passerelles, câbles, cadres.
<i>Domestique</i>	Panneaux intérieurs et extérieurs, chaises, tables, baignoires, unités de douche.
<i>Électrique</i>	Appareillage de commutation, isolateurs, connecteurs.
<i>Loisir</i>	Raquettes de tennis, bâtons de ski, clubs de golf, casques de protection, cannes à pêche, équipements de jeux, cadres de vélo.
<i>Marine</i>	Coques, mâts, haubans de moteur, panneaux intérieurs.
<i>Médical</i>	Prothèses, fauteuils roulants, orthèses, équipements médicaux.
<i>Transport</i>	Panneaux de carrosserie, tableaux de bord, cadres, cabines, spoilers, avant, pare-chocs, ressorts à lames, arbres de transmission.

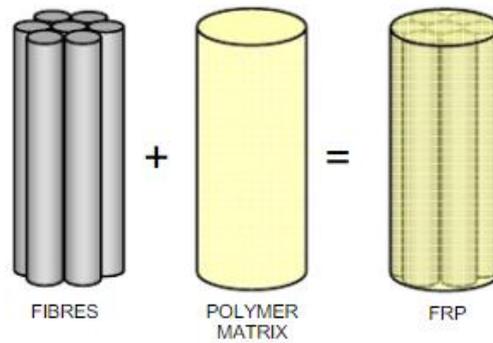


Figure I. 1: Comportement et constitution des principaux composants d'un matériau composite [22].

I.2.1. Les fibres

Le rôle principal des fibres est d'assurer la résistance et la rigidité des PRF afin de résister à la majeure partie de la charge agissant sur le système composite. Par conséquent, les fibres sont le principal composant qui forme la colonne vertébrale des matériaux en PRF, et leurs propriétés influencent les propriétés globales des PRF. Les fibres sont généralement choisies pour leur grande rigidité, leur résistance ultime élevée, leur module d'élasticité élevé, leur allongement pratique à la rupture en traction, leur durabilité et leur coût acceptable [23].

La fraction volumique des fibres dans les matériaux en PRF varie habituellement de 30 à 75%. Le choix des fibres utilisées pour fabriquer un matériau composite est lié aux caractéristiques mécaniques requises, à la rigidité, aux considérations de durabilité, aux contraintes de coût et à la disponibilité des matériaux constituants [24]. Pour les emplois structuraux en génie civil, les fibres sont caractérisées par des rapports longueur-diamètre extrêmement grands et par des diamètres extrêmement petits (aussi petits que 5 à 10 microns). La **Figure I.2** montre les fibres microscopiques utilisées dans les PRF.

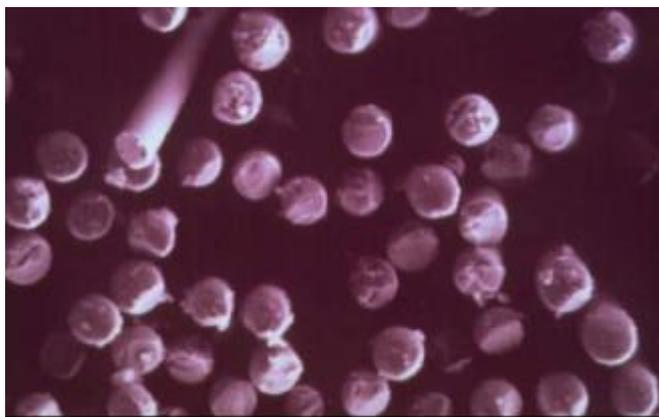


Figure I. 2: Vue au microscope électronique montrant les fibres de carbone microscopiques utilisées dans la fabrication des PRF [22].

De nombreux types de fibres sont disponibles pour l'utilisation, chacun présentant ses propres avantages et inconvénients. En fonction du type de fibre utilisé, les composites de PRF les plus utilisés sont classés en quatre groupes : PRF de carbone (PRFC), PRF de verre (PRFV), PRF d'aramide (PRFA) et PRF de Basalte (PRFB). Les propriétés et les caractéristiques de ces fibres sont présentées dans les prochaines sections.

1.2.1.1. Les fibres de carbones

Plusieurs avantages ont rendu les fibres de carbone largement utilisées dans les matériaux composites, notamment leur rigidité et leur résistance élevée associée à une faible densité et à un coût plus ou moins élevé. De plus, les fibres de carbone ont une résistance élevée à la fatigue et un très faible coefficient de dilatation thermique [11, 20]. Les fibres de carbone sont chimiquement inertes et insensibles à la corrosion et à l'oxydation à des températures inférieures à 400 °C. De plus, les fibres de carbone possèdent un grand module d'élasticité, 200 à 600 GPa, et leur allongement final varie de 0,3 à 2,5 %. Le principal inconvénient de la fibre de carbone est qu'elle est électriquement conductrice et pourrait donc initier une corrosion galvanique lors d'un contact direct avec l'acier [24].

Le principe fondamental de fabrication des fibres de carbone comprend essentiellement les étapes suivantes [24] :

- ✚ Un traitement dit de stabilisation évitant la fusion des fibres durant les traitements thermiques à haute température ;
- ✚ Un traitement thermique appelé carbonatation permettant d'éliminer la majorité des éléments non carboniques ;
- ✚ Un traitement thermique optionnel appelé graphitisation pour améliorer les propriétés des fibres obtenues à l'étape 2.

Les **Tableaux I.2** et **I.3** montrent les propriétés longitudinales des fibres de carbones ainsi que les principaux avantages et désavantages de ce type de fibres.

Tableau I. 2: Propriétés longitudinales des fibres de carbone [25].

<i>Propriétés</i>	<i>Intervalle</i>
Module d'élasticité (GPa)	290- 400
Résistance en traction (MPa)	2400- 5700
Déformation ultime (%)	0,3- 1,8

Tableau I. 3: Principaux avantages et désavantages des fibres de carbone [25].

<i>Avantage</i>	<i>Désavantage</i>
- Haute résistance en traction et à la fatigue.	- Cout élevé.
- Excellente tenue en haute température.	- Mauvais isolant.
- Excellente rigidité.	- Corrosion par pile galvanique avec les métaux.
- Bonne conductivités électrique et thermique.	
- Insensibilité à l'humidité et aux rayures.	

1.2.1.2. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont constituées de verre fondu ou d'un mélange approprié de matières premières telles que le sable et l'alumine. La masse fondue est étirée en filaments continus lorsqu'elle traverse des filières micro-fines et les fibres sont refroidies simultanément. Les fibres sont enduites pour assurer un mouillage amélioré par la matrice polymère. Les fibres sont également recouvertes d'un agent de couplage (silanes) pour former une couche flexible sur l'interface de fibre. Cette couche améliore les caractéristiques de liaison des fibres et réduit le nombre de vides dans les matériaux.

Différents types de verre peuvent être produits pour les renforcements structuraux, les types suivants sont utilisés : verre E (verre électrique, résistivité électrique élevée), verre S (verre structural à haute résistance utilisé dans l'industrie aérospatiale) et verre résistant aux alcalis réactions, la fabrication de ce dernier type de fibre de verre s'effectue par la même procédure mais en ajoutant le zirconium. Les **Tableaux I.4** et **I.5** montrent les propriétés longitudinales des fibres de verres ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Tableau I. 4: Propriétés longitudinales des fibres de verre [25].

<i>Propriétés</i>	<i>Intervalles</i>
<i>Module d'élasticité (GPa)</i>	70-90
<i>Résistance en traction (MPa)</i>	3000-4500
<i>Déformation ultime (%)</i>	4,8- 5,5

Tableau I. 5 : Principaux avantages et inconvénients des fibres de verre [25].

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Cout relativement faible	Densité élevée
Haute résistance en traction	Sensibilité à l'abrasion
Excellentes résistance aux impacts	Faible module d'élasticité
Bon isolant	Vieillessement à l'humidité

1.2.1.3. Les fibres d'aramide

Les fibres d'aramide sont des fibres de polymères organiques synthétiques (un polyamide aromatique) obtenues par filage d'une fibre solide à partir d'un mélange chimique liquide. Les fibres d'aramide se caractérisent par une résistance élevée, un module d'élasticité modéré et une faible densité. Leur rapport résistance-poids est environ 43%, elles sont plus légères que les fibres de verre et environ 20% plus légères que la plupart des fibres de carbone. Ces fibres offrent également une meilleure résistance à l'abrasion et aux chocs, ainsi qu'à la dégradation chimique et thermique [11- 15]. Les principaux inconvénients de ces fibres sont notamment la dégradation lorsqu'elles sont exposées à la lumière ultraviolette et le fait qu'elles sont très difficiles à couper et nécessitent un outillage spécifique et des techniques spéciales. De plus, les PRF fabriqués à partir de fibres d'aramide ont une faible résistance à la compression et au cisaillement en raison des propriétés anisotropes uniques de ces fibres [22, 23]. Le **Tableau I.6** montre les propriétés longitudinales des fibres d'aramide.

Tableau I. 6: Propriétés longitudinales des fibres d'aramide [25].

<i>Propriétés</i>	<i>Intervalles</i>
<i>Module d'élasticité (GPa)</i>	290-400
<i>Résistance en traction (MPa)</i>	2400-5700
<i>Déformation ultime (%)</i>	0,3- 1,8

1.2.1.4. Les fibres de basalte

La fibre de basalte est le produit unique fabriqué à partir d'un matériau volcanique. Le basalte est une roche inerte, présente en quantités abondantes et qui expose une résistance, une durabilité et des propriétés thermiques excellentes. Les polymères renforcés par les fibres de basalte (PRFB) sont fabriqués à partir de roche de basalte en un seul processus et sont

préférables que les fibres de verre en termes de stabilité thermique, propriétés d'isolation thermique et phonique, résistance aux vibrations et durabilité. Les fibres de basalte constituent une excellente alternative économique aux autres fibres résistant aux températures élevées et sont généralement utilisées dans les écrans thermiques, les renforts composites et les barrières thermiques et acoustiques [21]. Le processus de chauffage difficile du basalte concassé dans les fours et le contrôle de qualité des fibres sont les principaux inconvénients des PRFB [18].

I.2.2. La matrice

Dans un matériau composite, la matrice, appelée plus communément résine a comme rôle de maintenir les fibres en position afin de contrevenir au voilement de celle-ci en leur fournissant un support latéral. Elle a aussi comme rôle de transmettre les charges vers les fibres et enfin, de protéger ces dernières contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales. Il est important de noter que les fibres sont agglomérées dans la résine afin de pouvoir remplir parfaitement ses fonctions, dans le cas contraire, les fibres pourraient être exposées aux agents environnementaux, ce qui provoquerait une rupture prématurée de celle-ci. Les matrices les plus courantes et les plus utilisées sont les matrices organiques, également appelées résines ou polymères, qui sont des molécules à longue chaîne d'atomes d'hydrogène et de carbone maintenues ensemble par des liaisons ioniques ou covalentes. En fonction de la disposition des chaînes hydrocarbonées, différentes configurations moléculaires et donc différentes propriétés sont obtenues [20]. Les polymères peuvent être classés en deux types, thermoplastiques et thermodurcissables, en fonction de l'effet de la chaleur sur leurs propriétés [11-20].

Presque exclusivement, les thermodurcissables sont actuellement utilisés dans des applications de génie civil. Ces polymères présentent plusieurs avantages tels que : une bonne stabilité thermique, une bonne résistance chimique, bonne tenue au fluage et faible relaxation par rapport à la plupart des thermoplastiques [23]. En générale, les trois résines thermodurcissables les plus couramment utilisées actuellement pour la fabrication de PRF, utilisé dans des applications de génie civil sont les suivantes : polyester, vinylester et époxy [12].

I.2.2.1. Polyester

Les résines polyester sont les types de résine les plus économiques et les plus largement utilisées dans la fabrication de composants en PRFV pour les applications d'infrastructure, en particulier dans l'industrie maritime. Près d'un demi-million de tonnes de ce matériau est utilisé

chaque année aux États-Unis dans des applications composites [21]. Les résines de polyester peuvent être formulées pour obtenir une large gamme de propriétés allant de douces et ductiles à dures et cassantes. Leurs avantages comprennent une faible viscosité, un faible coût et un temps de durcissement rapide. En outre, les polyesters sont considérés comme les résines thermodurcissables les moins toxiques. L'inconvénient majeur des polyesters est leur retrait volumétrique élevé [11- 13].

1.2.2.2. Vinylester

Les résines vinylester sont plus souples et plus résistantes à la rupture que les résines polyester durcies. La manipulation, les caractéristiques mécaniques et chimiques des esters vinyliques sont similaires à celles des polyesters, pour cette raison, ils sont souvent identifiés comme une classe de polyesters. Parmi les avantages des esters vinyliques, qui peuvent justifier leur coût plus élevé, mentionnons une meilleure résistance aux produits chimiques et à la corrosion, une stabilité hydrolytique et de meilleures propriétés physiques, comme la résistance à la traction aux chocs et à la fatigue. Il a été démontré, à titre d'exemple, qu'une couche de résine vinylester de 0,5 à 1,5 mm d'épaisseur peut offrir une excellente barrière de perméation pour résister aux cloques dans les stratifiés marins [15,17].

1.2.2.3. L'époxy

Parmi les avantages de cette résine on peut citer : la haute résistance mécanique et chimique, facilité de fabrication, faible rétrécissement pendant la cure et une bonne adhésion chimique pour une bonne variété de fibres. Elle est considérée comme la résine la moins affectée par l'eau et la chaleur. Ses inconvénients principaux sont son coût et sa période de cure élevés. Cette résine est la plus compatible avec toutes les fibres énoncées plus haut.

Les époxydes sont très utilisés pour les applications d'imprégnation, comme les plaques et les feuilles en PRF. Le fait que le durcissement des époxydes se fait à des températures ambiantes et que leur capacité d'adhérence sur les surfaces est élevée. Ils ont une haute résistance mécanique, de bonnes propriétés aux températures élevées, une résistance énorme contre les attaques chimiques et une endurance élevée [19].

1.2.3. Méthode de fabrication

Plusieurs méthodes de fabrication des matériaux composites en PRF sont possibles, la méthode la plus courante parmi elle est la pultrusion.

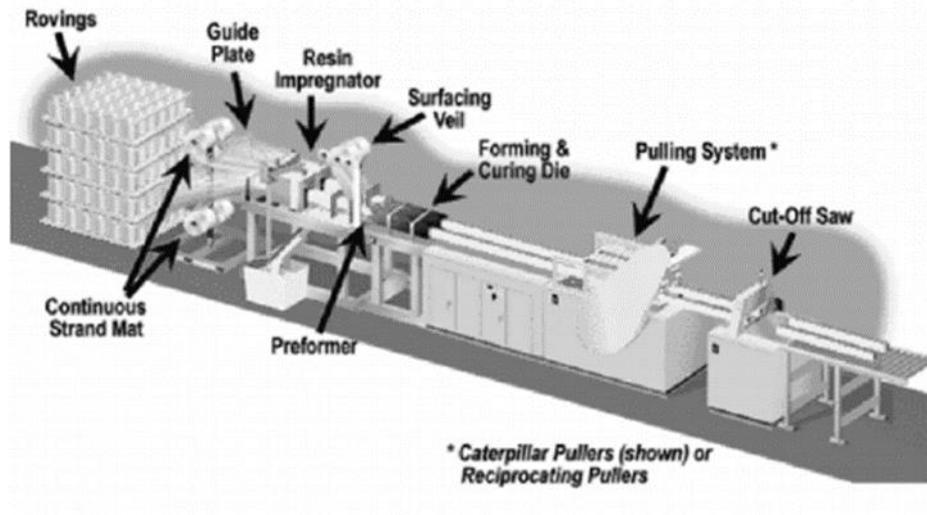


Figure I. 3: Processus de fabrication par pultrusion [25].

Dans un premier temps, partant de différentes bobines, les fibres convergent vers un bain de résine où elles sont noyées. Les fibres subissent la première moulure pour définir la section.

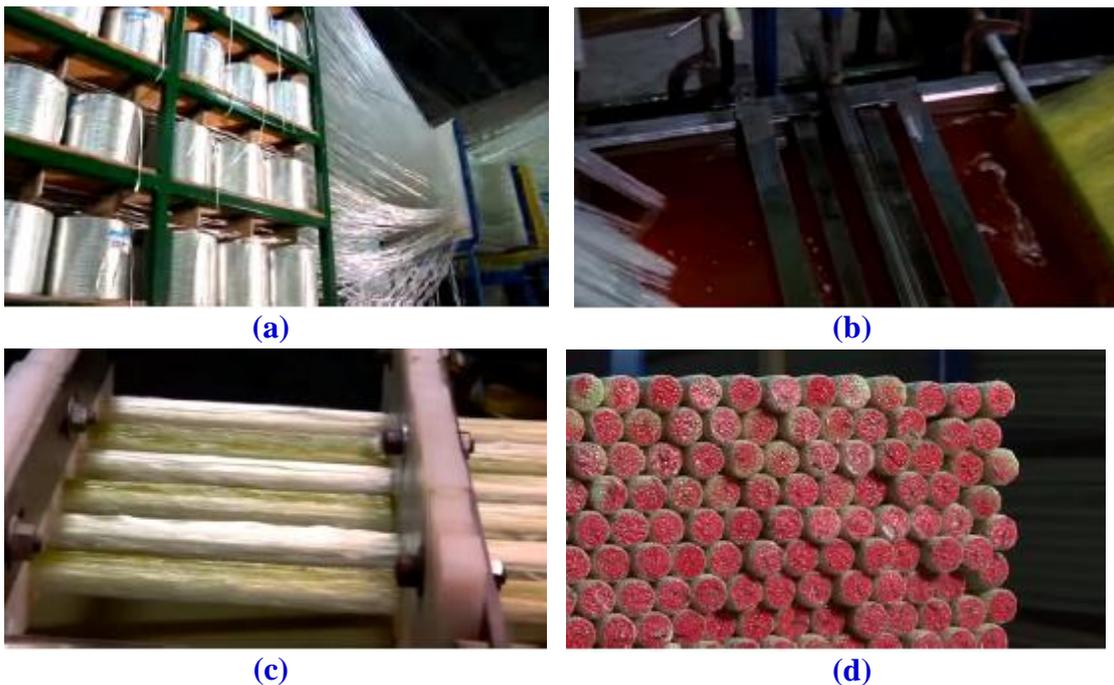


Figure I. 4: Étapes principales de fabrication par pultrusion, a) Bobine de fibre de verre, b) passage des fibres dans le bain de résine, c) passage des fibres enrobées de résine dans les moules, d) produit final [25].

La résine à cette étape est chaude et à l'état liquide. Suite au passage dans le bain, les fibres imprégnées passent dans la moulure finale, où on leur donne la forme finale. A ce niveau, la résine est encore à l'état liquide et c'est là qu'on lui offre son aspect de surface final : sablé, tressé, enroulement hélicoïdal. Dans le cas du sable, il est projeté sur la barre pour bien adhérer

lorsque la résine deviendra solide. Par la suite, on passe au four où se tient le processus de polymérisation, la température de cure dans le four est choisie pour une polymérisation optimale. Par la suite, les barres sont coupées à des longueurs prédéfinies. Dans le cas de la résine thermodurcissable, les barres ne peuvent pas être courbées après le passage dans le four, puisque le processus est irréversible. La **Figure I.4** présente quelques étapes importantes décrites précédemment.

I.2.4. Propriétés mécaniques des PRF

Les propriétés mécaniques des PRF dépendent d'un certain nombre de facteurs : les proportions relatives entre les fibres et la matrice, les propriétés mécaniques des matériaux de composition (fibre, matrice et additifs éventuels) et l'orientation des fibres. Pour cette raison, il n'est pas possible de donner des valeurs uniques des propriétés mécaniques des PRF [22].

Une comparaison entre le comportement, sous traction, de différents matériaux en PRF est présentée à la **Figure I.5**. Les PRF présentent un comportement contrainte-déformation élastique linéaire jusqu'à la rupture. Ces matériaux ne possèdent pas la ductilité des aciers et leur fragilité peut limiter le comportement ductile des éléments RC renforcés avec des composites de PRF [16].

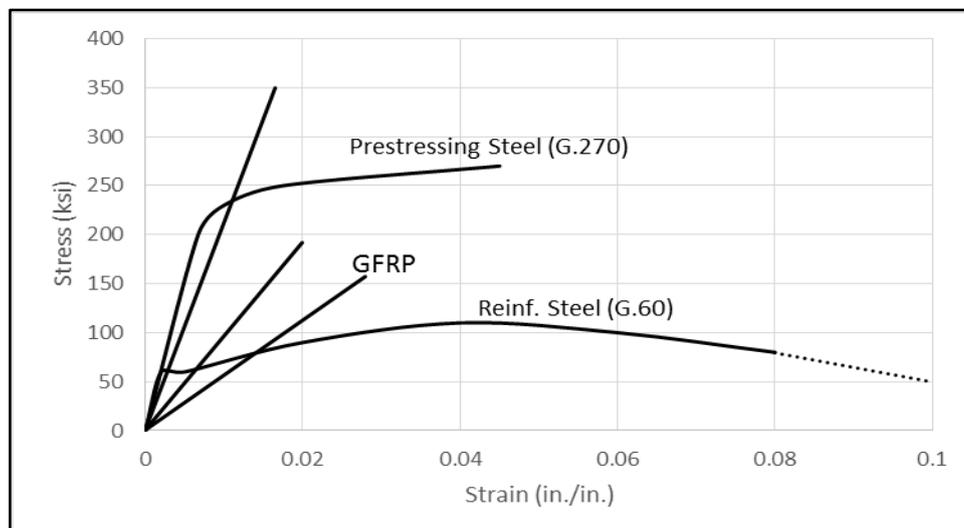


Figure I.5 : Courbes contraintes-déformation des différents renforts [25].

En comparaison avec l'acier conventionnel, les matériaux en PRF présentent généralement des résistances à la traction nettement plus élevée et des modules d'élasticité plus faibles, notamment dans le cas du renforcement des PRFV. Le module d'élasticité des PRF reste pratiquement constant jusqu'au point de rupture [27]. Le **Tableau I.7** présente certaines propriétés des différents matériaux en PRF disponibles sur le marché (verre, carbone et aramide).

Tableau I. 7: Propriétés mécaniques des matériaux en PRF [25].

<i>Type de PRF</i>	<i>Unité</i>	<i>PRFV</i>	<i>PRFC</i>	<i>PRFA</i>
<i>Taux de Fibres</i>	%	50-80	65-75	60-70
<i>La densité</i>	Kg/m ³	1600-2000	1600-1900	1050-1250
<i>Module de Young</i>	GPa	25-55	120-250	40-125
<i>La limite d'élasticité</i>	MPa	400-1800	1200-2250	1000-1800

I.3. Applications des PRF en génie civil

Les composites PRF sont durables et légers et peuvent donc répondre à de nombreuses exigences des matériaux de construction pour le génie civil. De plus, la facilité d'utilisation et les propriétés mécaniques que les matériaux en PRF offrent par rapport aux autres matériaux conventionnels, leur grande variété de types, de formes et de propriétés leur permettent d'être utilisés efficacement dans plusieurs types d'applications en génie civil et en construction telles que les structures BA réparées. (**Figure I.6**).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure I. 6: Applications des PRF en génie civil, a) Pont de l'Autoroute 55 Nord (Magog – 2002), b) Pont Wotton (Municipalité de Wotton – 2001), (c) le renforcement d'une poutre par lamelles en PRFC, (d) confinement d'un poteau avec les tissue en PRFC [22].

I.4. Techniques de renforcement du béton avec les PRF

Comme mentionné précédemment dans ce chapitre, il a été prouvé que l'utilisation de PRF pour renforcer les structures en béton armé est une méthodologie efficace en raison de leurs propriétés uniques par rapport à l'acier et à d'autres matériaux de construction. Deux techniques principales sont devenues courantes dans les systèmes de renforcement par PRF ; à savoir l'EBR et le NSM (**Figure I.7**). Une brève description de chaque technique est présentée dans les paragraphes suivants.

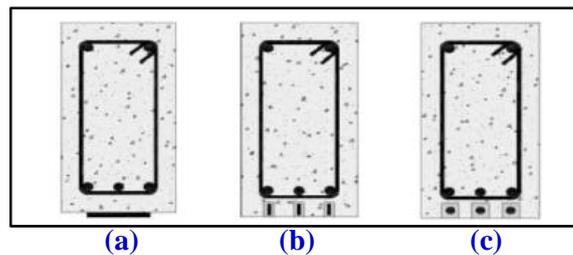


Figure I. 7: Renforcement du béton avec du PRF, a) EBR, b) lamelle en NSM, c) jonc en NSM [29].

I.4.1. Technique de renforcement externe (EBR)

Le renforcement par collage des PRF extérieurement est l'une des techniques de renforcement du béton les plus largement utilisées dans laquelle le PRF, en tissu ou en lamelle est appliqué sur la surface tendue externe de l'élément à l'aide d'adhésifs époxy [29– 31].

Afin d'assurer une bonne liaison entre le PRF et le béton, on doit suivre les étapes suivantes :

- ✚ Préparation de la surface du béton.
- ✚ Décapage et sablage.
- ✚ Nettoyage, brossage et dépoussiérage de la surface à réparer.
- ✚ Réparation des fissures par injection de résine.
- ✚ Préparation de la colle et encollage.
- ✚ Préparation de la surface du renfort.

La surface du béton doit être bien préparée afin d'éviter la rupture à l'interface résine/béton. La **Figure I.8** montre quelques exemples d'applications de renforcement avec la technique EBR.

Bien que le système EBR présente de nombreux avantages pratiques, mais le décollement prématuré des renforts en PRF peut conduire à une rupture fragile lors du renforcement d'un élément subissant une flexion. Pour cela, une nouvelle technique, NSM, est utilisée pour éviter

ce mode de rupture indésirable et augmenter la surface de contact, cette technique sera présentée dans les paragraphes suivants.

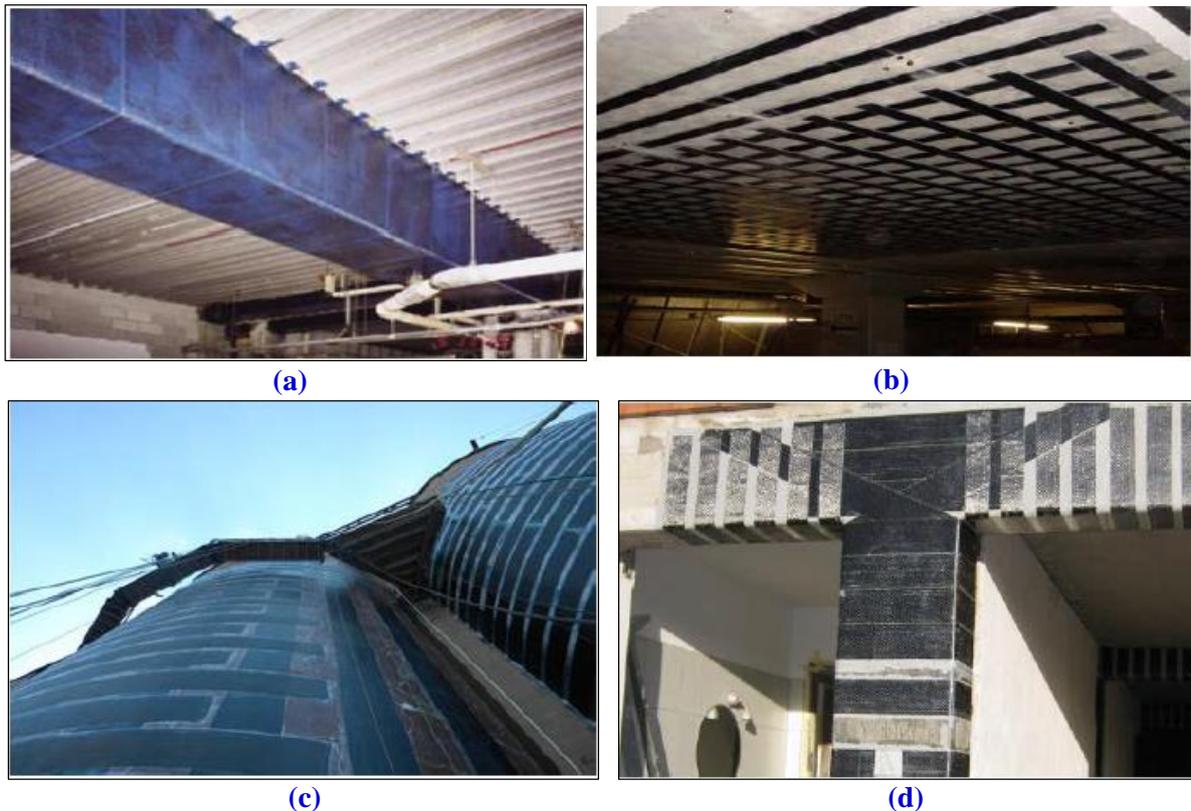


Figure I. 8: Applications de la technique EBR, a) renforcement des poutres, b) renforcement de la dalle, c) renforcement des silos, d) renforcement de la connexion poutre-poteau [25].

I.4.2. Insertion de renforts composites dans des engravures préparées sur la surface de béton méthode NSM

NSM PRF est une technique moderne développée récemment. L'idée de la technique NSM a été mise en œuvre en 1949 dans le renforcement d'un pont en Suède qui souffrait d'un tassement en raison d'une augmentation du moment négatif. La solution à ce problème consistait à insérer des barres d'acier dans des rainures faites dans la zone tendue puis les remplir par un mortier de ciment à haute résistance. La même technique est appliquée dans les PRF NSM en substituant des barres d'acier par des barres/bandes de PRF et des mortiers de ciment par des résines époxy qui ont une résistance à la traction bien supérieure à celle du ciment [25].

L'utilisation de la méthode NSM-PRF pour le renforcement en flexion pourrait être considérée comme la méthode la plus efficace que d'autres techniques de renforcement, telles

que les barres d'acier et le collage externe des PRF. **El-Hacha *et al.* [28]** ont mentionné que cette technique a pour avantage de procurer une résistance considérable au problème de la corrosion, le poids des PRF est inférieur à celui des barres d'acier, ces PRF peuvent être facilement transportés et traités dans les travaux de renforcement. En outre, cette méthode offre une meilleure protection des matériaux en PRF contre les dommages environnants, cela pourrait augmenter l'adhérence entre le béton et les renforts en PRF et donc les efforts seront transférés aux substrats béton et entre eux plus efficacement que la méthode EBR.

Les engravures sont formées en utilisant une scie qui permet d'obtenir deux faces parallèles lisses et une interface rugueuse au fond. Après réalisation de l'engravure, un soufflage à l'air comprimée est exécuté puis l'engravure est remplie par le matériau de scellement jusqu'au milieu. Le renfort est inséré après le traitement de sa surface et l'engravure sera remplie, le renfort est donc adhérent à la résine avec les trois côtés.

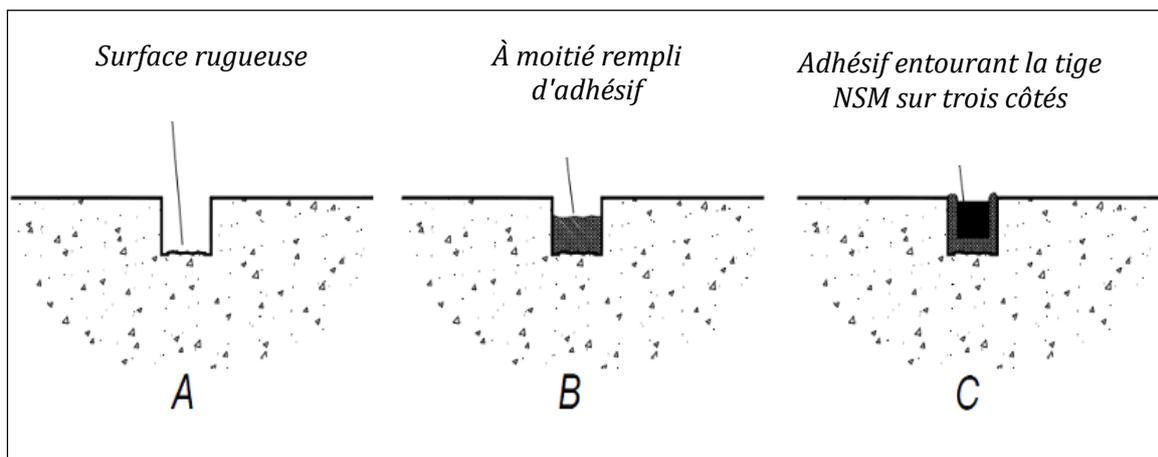


Figure I. 9: Procédure de renforcement par NSM [22].

Dans la plupart des applications sur le terrain en NSM-PRF, l'armature en PRFC a été utilisée pour renforcer les structures en béton, elle a été principalement utilisée pour renforcer la maçonnerie et les structures en bois [22]. Quelques exemples d'applications de la technique NSM sont illustrés à la **Figure I.10**.



(a)



(b)

Figure I. 10: Les applications de la méthode NSM, a) renforcement d'un garage de stationnement [25], b) renforcement d'un pont en Suède [24].

I.4.3. Comparaison entre les techniques EBR et NSM

Malgré le grand nombre d'applications de la technique EBR, elle présente certaines limites pratiques. La principale limite est que, en général, la liaison entre le béton et le PRF empêche la feuille de PRF de développer toute sa résistance à la traction, ce qui entraîne des défaillances prématurées du décollement [32]. Par conséquent, des limites de contrainte doivent être imposées dans la procédure de conception. En outre, le système de renforcement EBR PRF, étant situé sur la face externe des éléments, le PRF et l'adhésif époxy sont exposés aux effets de l'environnement, au feu et au vandalisme.

Par ailleurs, les cycles de gel/dégel peuvent avoir un impact négatif sur les performances de renforcement des matériaux en PRF [33]. L'utilisation de la technique NSM a la capacité de résoudre partiellement les inconvénients susmentionnés du fait de ses plusieurs avantages, tels que [30, 32] :

- ✚ L'esthétique de la structure renforcée est pratiquement inchangée.
- ✚ La préparation de la surface est limitée à la découpe de l'engravure, ce qui réduit la quantité de travail d'installation.

- ✚ Dans le comportement structurel des poutres RC renforcées en flexion et en cisaillement, la même quantité de renforcement NSM offre une capacité portante et une déflexion plus élevées jusqu'à la rupture par rapport à EBR, principalement en raison de la plus grande surface d'adhérence.
- ✚ Les renforts NSM peuvent être plus facilement ancrés dans les éléments adjacents pour résister à la séparation et aux ruptures par décollement. Cet avantage est particulièrement intéressant pour le renforcement des éléments dans lesquels les moments maximaux peuvent se produire à leurs extrémités, tels que le renforcement des poutres soumises à un moment de flexion.
- ✚ L'énergie nécessaire pour décoller les NSM est dans de nombreux cas beaucoup plus importante que celle des stratifiés EBR.

De plus, la résistance à la traction des matériaux en PRF est mieux exploitée par la technique NSM avec des facteurs d'utilisation beaucoup plus élevés que ceux obtenus dans les systèmes EBR. Cela indique que l'utilisation du PRF-NSM en tant que technique de renforcement peut représenter une alternative intéressante aux EBR. Cependant, le processus d'installation dans le cas des systèmes NSM a un aspect crucial de son efficacité : le collage des bandes / barres dans les engravures par époxy est plus sensible aux détails de l'application et au processus de durcissement de la colle que dans le cas de Systèmes EBR.

Une comparaison expérimentale de l'efficacité des techniques NSM et EBR a été effectuée par **Barros *et al.* [34]**, des poutres en béton armé renforcées avec les mêmes taux ont subi un effort de flexion et de cisaillement. Dans cette étude, l'efficacité a été déterminée en termes de capacité de déformation et de capacité de charge. Selon les résultats expérimentaux, la technique NSM s'est avérée plus efficace que la technique EBR pour le renforcement en flexion, les différences d'efficacité diminuent avec l'augmentation du rapport de renforcement longitudinal équivalent. Dans le cas du renforcement par cisaillement, l'utilisation la technique NSM avec les PRFC rend cette méthode plus efficace. Les modes de rupture des poutres renforcées par la technique NSM ne sont pas aussi fragiles que ceux observés dans les poutres renforcées avec la technique EBR.

Bilotta *et al.* [35] ont présenté une autre comparaison de l'efficacité du renforcement de PRFC dans les techniques de renforcement NSM et EBR. Selon les résultats expérimentaux, la résistance à la traction des matériaux en PRF était mieux exploitée par la technique NSM avec des facteurs d'utilisation beaucoup plus élevés (36-100%) que ceux obtenus avec les systèmes EBR (environ 15%), ce qui indique que la technique NSM peut représenter une alternative

intéressante aux plaques EBR. La technique NSM a également permis d'obtenir des facteurs d'efficacité plus élevés contre une rigidité axiale plus faible.

De plus, les capacités d'adhérence pour la technique NSM et EBR utilisant des lamelles en PRF ont été étudiées expérimentalement par **Khalifa *et al.* [36]**, selon les résultats, il a été constaté que NSM développait des forces d'adhérence 1,5 fois supérieures à celles atteintes dans la méthode EBR.

I.5. Les fils d'acier

En raison de l'indisponibilité des matériaux en PRF et de leur coût élevé, ainsi leur comportement fragile, nous avons pensé à utiliser une matière locale comme alternative aux joncs et plats fibres de carbone, ces matériaux sont les fils d'aciers destinés à la fabrication des aciers de précontraints.

Les fils d'aciers utilisés dans ce travail ont été fabriqués dans l'usine de TRIFISOUD EL-EULMA à l'aide d'une opération qui s'appelle le tréfilage. Cette opération nous a permis d'obtenir des fils métalliques de sections et de forme bien déterminées, le principe de tréfilage est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de la « traction » et celle du « fil ».

Le tréfilage est l'un des procédés de mise en forme à froid les plus utilisés dans le milieu industriel, en particulier dans le secteur électrique et pour la fabrication de fils métalliques. Le processus consiste à étirer un fil, en plusieurs passes, en réduisant progressivement son diamètre à travers un orifice calibre, appelé « filière », sous l'action d'une traction continue. La déformation du métal résulte de l'application d'un champ de contrainte pour provoquer un écoulement plastique, de façon à obtenir une géométrie donnée. Cette mise en forme du fil au cours de l'étirage à travers les filières provoque une modification générale des propriétés mécaniques. Les variations de ces propriétés en fonction de l'écrouissage sont exploitées pour obtenir une géométrie donnée, des propriétés mécaniques souhaitées, un état de surface déterminé et une qualité de fil requise [37].

I.5.1. Principe de tréfilage

Le tréfilage est une opération industrielle qui se compose de quatre étapes élémentaires :

Préparation de surface

Le matériau de départ utilisé pour le tréfilage est appelé fil-machine, il provient du laminage à chaud de billettes produites par coulée continue et se présente sous forme de couronnes,

refroidies à l'air. La surface du fil est recouverte d'une couche d'oxydes métalliques, appelée aussi calamine, dont l'épaisseur est fonction de la température de sortie du fil. A cause de son caractère abrasif, de sa dureté et de son absence de ductilité, cette couche doit être éliminée avant le tréfilage. Différents procédés de nettoyage de surface peuvent être employés [38-39] : par action chimique (décapage), mécanique (décalaminage) ou action combinée des deux.

Revêtement de surface

La lubrification est essentielle au cours du tréfilage. Or, les lubrifiants secs sont difficilement entraînés par le fil surtout si sa surface est peu rugueuse. Il est donc nécessaire de déposer un support de lubrifiant sur la surface avant tréfilage. Ce revêtement assure également une protection limite en cas de mauvaise lubrification et permet d'éviter ainsi tout risque de grippage [38].

Le tréfilage

Cette opération s'effectue à l'aide d'une machine continue ou à passage direct, ce sont les équipements les plus modernes et les plus répandus. Ces bancs travaillent en général à des vitesses élevées et sans glissement du fil sur les bobines grâce à un équilibrage rigoureux des vitesses. En effet, chaque bobine voit sa vitesse contrôlée par un moteur séparé dans le but d'assurer un débit massique de fil identique dans toutes les filières. Les bobines n'accumulent que 5 ou 6 spires de fil. Le boîtier de tréfilage comprend le réservoir de lubrifiant (appelé également savonnier) et le support de filière dans lequel est logé l'outil calibrant [38].

La filière sont composées de quatre parties :

1. Un cône d'entrée jouant le rôle d'un entonnoir d'engagement, de répartiteur et d'entraîneur de lubrifiant ;
2. Un cône de travail, de demi-angle α , dans lequel s'effectue la réduction de section par déformation progressive du fil ;
3. Une portée cylindrique qui calibre le diamètre du fil ;
4. Un cône de sortie qui décharge progressivement la filière des efforts et permet l'évacuation du lubrifiant.

Au cours du tréfilage, le matériau de filière se dégrade : l'endommagement peut provenir d'une usure par fatigue ou d'une usure abrasive liée à une mauvaise lubrification. La durée de vie d'une filière est conditionnée par de nombreux facteurs : la nuance du métal, la préparation

de surface du fil (qui va "accrocher" le lubrifiant), l'état de surface du fil machine (rugosité), nature et forme de la filière [38].

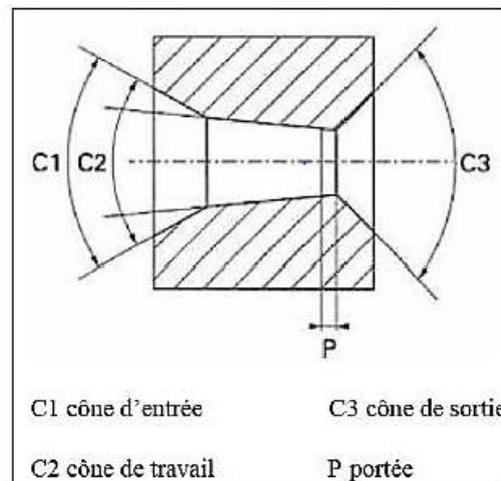


Figure I. 11: Schéma d'une filière de tréfilage [38].

Donc l'opération principale de la lubrification consiste à intercaler entre deux corps en contact et un troisième corps qui se cisaille facilement, tout en étant capable de supporter la pression. L'objectif principal de la lubrification est de minimiser les pertes d'énergie par frottement ainsi que l'endommagement des surfaces.

✚ La finition : nettoyage et traitements thermiques

Après le tréfilage, le fil comporte un film superficiel de lubrifiant et de revêtement dont il faut se débarrasser avant de procéder à un traitement thermique (pour éviter la diffusion d'éléments polluants). Deux sortes de nettoyage peuvent être envisagés, par action mécanique ou chimique (lessives alcalines, solutions acides), au trempé ou au défilé (suivant les sections des fils tréfilés) [39].

En dernière étape, les traitements thermiques sont mis en œuvre pour obtenir des fils présentant une structure adaptée au tréfilage ou aux déformations ultérieures, pour supprimer l'effet de l'érouissage et adoucir le fil (recuit) ou encore pour communiquer au fil des caractéristiques particulières (trempe). Les fours de recuit peuvent être de types statiques (couronnes, bobines) ou au défilé (fours pouvant atteindre 20 m de longueur) [39].

I.6. Comportement d'adhérence

Le comportement d'adhérence entre PRF et béton est une propriété fondamentale des techniques de renforcement en PRF. L'adhérence est considérée comme le facteur clé qui contrôle le succès et l'efficacité du système de renforcement car il est responsable de la

transformation des charges entre PRF et le béton. En outre, pour les éléments renforcés en béton armé, le comportement d'adhérence influence la capacité ultime de l'élément, ainsi que son comportement d'aptitude au service en termes de largeur et d'espacement des fissures.

Un travail expérimental a été effectué par **Hassan *et al.* [40]** pour étudier le comportement d'adhérence et définir le mécanisme de transfert des charges entre les PRF et le béton selon la technique NSM, en changeant la surface de PRF, le type de résine et la longueur d'encrage. Ils ont conclu que l'adhérence provient :

- ✚ D'une adhésion chimique entre les interfaces : la résine / PRF, et résine/ béton.
- ✚ De la friction ou du frottement qui résulte de la rugosité de la barre qui a été noyée dans la résine.

La **Figure I.12** montre les résultats et le comportement d'adhérence d'une série d'essai.

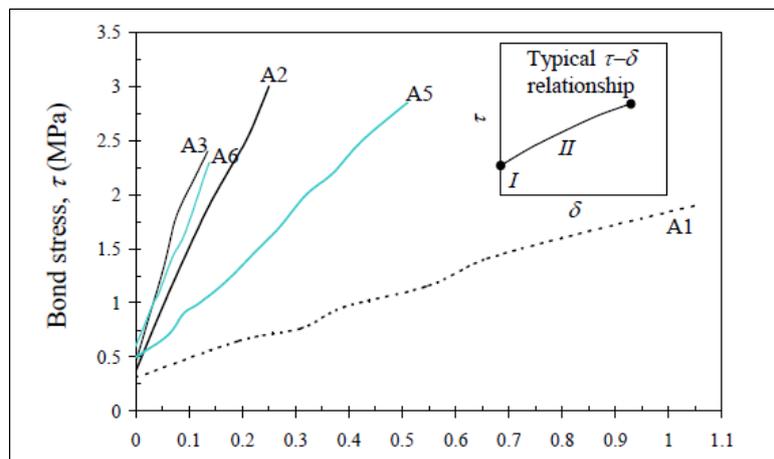


Figure I. 12: Comportement d'adhérence entre les PRF et le béton [40].

Avec : A1, A2, A3, A4, A5 et A6 ce sont des poutres renforcées avec des fibres de carbones en changeant la longueur d'ancrage et le type du matériau de scellement.

Selon cette figure, plusieurs stades sont observés :

Stade I : représente la liaison initiale fournie par l'adhésion chimique. A ce stade, aucun glissement ne se produit [40].

Stade II : représente la rupture de l'adhérence chimique et le transfert des forces qui s'effectuent par le frottement entre les interfaces résine/béton. A ce moment, des contraintes dans le béton et l'époxy sont développées et induisent des microfissures transversales à l'extrémité des résines permettant à la barre de glisser [40].

I.7. Facteurs affectant le comportement d'adhérence

L'adhérence dans les éléments renforcés en PRF NSM peut-être affectée par plusieurs facteurs tel que les propriétés mécaniques des matériaux impliqués (adhésif, PRF et béton), ainsi que par la géométrie du système de renforcement (dimensions, PRF, géométrie et emplacement des engravures) [18,27,32,39], du le type de charge et de sa période d'application, ainsi que des conditions environnementales.

I.7.1. Effet de la résistance du béton

Dans les travaux réalisés par **Seracino *et al.*** [41], l'effet de la résistance du béton sur l'adhérence entre les bandes de PRFC-NSM et le béton a été étudié par des essais d'arrachement direct, effectués sur des blocs en béton renforcés avec des bandes de PRFC ; la résistance du béton utilisé varie de 30 MPa à 65 MPa, tandis que la longueur collée allait de 100mm à 350mm. Les résultats expérimentaux ont montré que la charge de rupture augmentait avec l'augmentation de la résistance du béton.

Les résultats expérimentaux rapportés par **Sharaky *et al.*** [42] indiquent que la modification de la résistance du béton de 22 MPa à 42,2 MPa n'a aucun effet sur la capacité d'adhérence lorsque la rupture se produit dans l'interface barre-époxy.

I.7.2. Effet de la longueur d'encrage

Plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'effet de la longueur d'encrage sur le comportement d'adhérence entre le PRF et le béton selon la technique NSM. La plupart d'entre eux ont indiqué que l'augmentation de la longueur collée augmentait la charge d'arrachement ultime [11,17,42] ainsi que la résistance au décollement du système renforcé [39, 40], cependant, les résultats présentés par **Seracino *et al.*** [41] ont montré qu'il n'y a une limite à cette augmentation, c'est ce qu'en appelle la longueur de développement.

I.7.3. Dimensions des engravures et configuration des surfaces

L'effet de la taille de la rainure sur l'adhérence du système NSM utilisant des barres rondes en PRFV et PRFC avec des engravures rectangulaires préformée a été étudié et rapporté par **De Lorenzis** [43]. Les résultats obtenus ont montré que la capacité d'adhérence augmentait avec l'augmentation de la taille de la rainure.

Sur la base de cette étude, il a été recommandé que la taille de la rainure se situe entre 1,5 et 2 fois le diamètre de la barre. L'augmentation de la largeur de la rainure a changé le mode de rupture de la rupture cohésive de l'époxy à celle du béton qui entoure la rainure. Une nouvelle

augmentation de la largeur de la rainure a provoqué une rupture par fendage au niveau de l'interface en béton époxy.

Les résultats expérimentaux rapportés par **Galati *et al.* [44]** ont montré que l'augmentation de la profondeur de la rainure de 12 à 16 et 20 mm augmentait la force d'arrachement de 7,4 MPa à 10,3 MPa et à 11,1 MPa, respectivement.

Sur la base des résultats expérimentaux réalisée par **Blaschko [45]**, une épaisseur d'adhésif de 1 mm à 2 mm a été recommandée pour les lamelles en PRF. D'autres chercheurs [47] ont suggéré une taille minimale d'engravure de 3 fois l'épaisseur du plat et de 1,5 fois la hauteur du plat, comme le montre la **Figure I.13**.

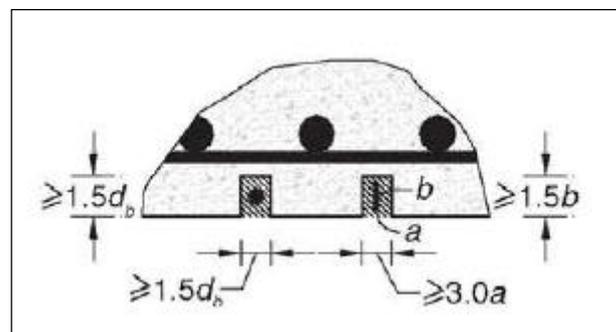


Figure I. 13: Dimension minimale d'engravure [47].

Le revêtement de surface d'engravure dépend du processus de fabrication, obtenant des surfaces rugueuses lorsque la rainure est coupée après le durcissement du béton, les surfaces lisses lorsque la rainure est obtenue en installant des bandes de plastique avec les dimensions désirées au fond du moule avant le moulage [47]. Les surfaces rugueuses sont non seulement considérées comme plus représentative, mais elles offrent également de meilleures caractéristiques d'adhérence, car les surfaces lisses sont plus sujettes à la rupture dans l'interface béton-résine [43].

I.7.4. Matériaux de scellement

Les deux principaux matériaux de scellement utilisés pour coller les PRF dans l'engravure sont des résines à base d'époxy et les ciments à base de résine. Plusieurs travaux ont exploré l'effet du matériau de remplissage des rainures sur le comportement d'adhérence des éléments renforcés en PRF, montrant que les adhésifs époxy offrent de meilleures performances mécaniques que les autres matériaux de remplissage des engravures [47, 49].

Le programme expérimental présenté par **Ceroni *et al.* [49]** a montré que les échantillons avec des rainures remplies d'époxy avaient des charges de rupture de liaison plus élevées que

celles remplies de ciment. Les auteurs ont attribué cela à la résistance à la traction élevée de l'époxy qui a retardé la formation de la fissure engendrée par la fin de l'adhésion chimique. En outre, les résultats expérimentaux présentés par **De Lorenzis *et al.* [47]** ont montré que les échantillons avec des adhésifs à base de ciment présentaient une charge de rupture d'environ 40% à 56% de la charge de rupture fournie par les échantillons avec des adhésifs époxy.

I.7.5. Caractéristiques des renforts

Les caractéristiques des PRF, telles que le type et la surface des fibres (qui fournissent la rigidité du renforcement), la forme de la section transversale et la configuration de la surface, influencent le comportement d'adhérence [49] et peuvent être considérées comme des paramètres clés. En outre, les propriétés géométriques des PRF, comme le rapport entre le périmètre et la surface de la section transversale, jouent un rôle important dans la charge d'arrachement maximale [48].

Dans l'étude rapportée par **De Lorenzis *et al.* [47]**, l'effet de la configuration de surface des barres en PRFC a été étudié. Selon les résultats expérimentaux, les barres en PRFC qui ont une surface extérieure nervurées en enroulement en spirale étaient les types préférables pour le renforcement en NSM PRF. La forme de la section transversale du renfort composite est un paramètre influençant sur le comportement d'adhérence. Le renfort en PRF peut être fabriqué sous forme de barres circulaires, rectangulaires, carrées ou ovales. Dans le cas des barres en PRF, les barres carrées semblent être la forme la plus efficace pour le renforcement NSM, par rapport aux barres circulaires, en raison du rapport entre la surface de la section transversale et le périmètre.

I.8. Méthodes utilisées pour caractériser l'adhérence dans le cas NSM

Les méthodes utilisées pour caractériser l'adhérence des renforts composites avec le béton, en utilisant de la résine époxy, sont inspirées de celles mentionnées ci-dessus (utilisées pour caractériser l'adhérence des aciers et des composites liés directement avec le béton). Les types les plus utilisés pour la technique NSM sont l'essai d'arrachement direct et l'essai d'arrachement par flexion (beam test), comme mentionné sur les **Figures I.14- I.15**. Ce dernier permet d'éviter tous les problèmes d'excentricité indésirables lors des essais d'arrachement direct [43].

I.8.1. Essai d'arrachement direct (direct pull out test)

Des essais sur l'adhérence des joncs de carbone ont été réalisés par **Yan *et al.* [50]** en utilisant une éprouvette en béton de 152x152x203 mm³ avec des engravures réalisées sur deux

faces opposées et remplies par de la résine. Le problème de ce dispositif est qu'une petite excentricité entre les engravures des deux côtés opposés du bloc peut facilement induire des effets de flexion et changer le comportement d'adhérence et la charge ultime de l'éprouvette [43].

Warren *et al.* [50] ont réalisé une série d'essais sur l'adhérence de joncs composites avec des blocs en béton de $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}^3$. Deux engravures sont formées sur les deux faces opposées du bloc. Deux blocs pour chaque installation d'essai ont été alignés dans une armature et les joncs composites ont été scellés dans les engravures. Un vérin hydraulique a été placé entre les blocs pour appliquer une force à mi-distance entre les joncs de sorte que les quatre joncs réagissent les uns contre les autres. Deux problèmes sont rencontrés dans l'utilisation de ce dispositif : le premier est l'excentricité entre les engravures des deux blocs sur le même côté et entre celles du même bloc, un autre problème semble résulter de la taille de l'éprouvette. En effet, quand la rupture se produit dans le béton entourant l'engravure, la propagation des fissures est influencée par les dimensions limitées de l'éprouvette. Ce n'est évidemment plus un problème quand la rupture se produit à l'interface béton-résine [50].

Une nouvelle forme d'éprouvette a été développée par De Lorenzis *et al.* [40] pour étudier l'adhérence du système NSM (Figure I.14).

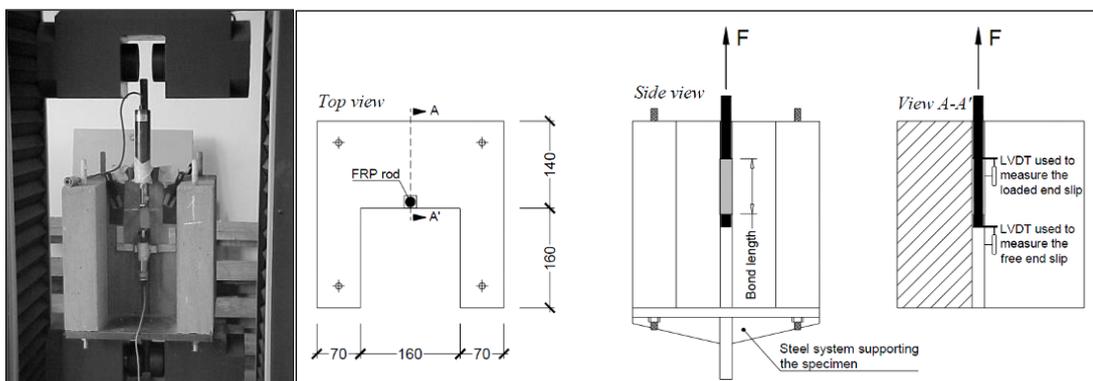


Figure I. 14 : Dispositif adopté par De Lorenzis *et al.* (Dimensions en mm) [43].

I.8.2. Essai d'arrachement par flexion (beam test)

D'après Merdas *et al.* [50] ce dispositif minimise le problème de l'excentricité et facilite la mise en œuvre du matériau de scellement. Il permet également d'étudier l'effet de facteurs comme les dimensions de l'engravure.

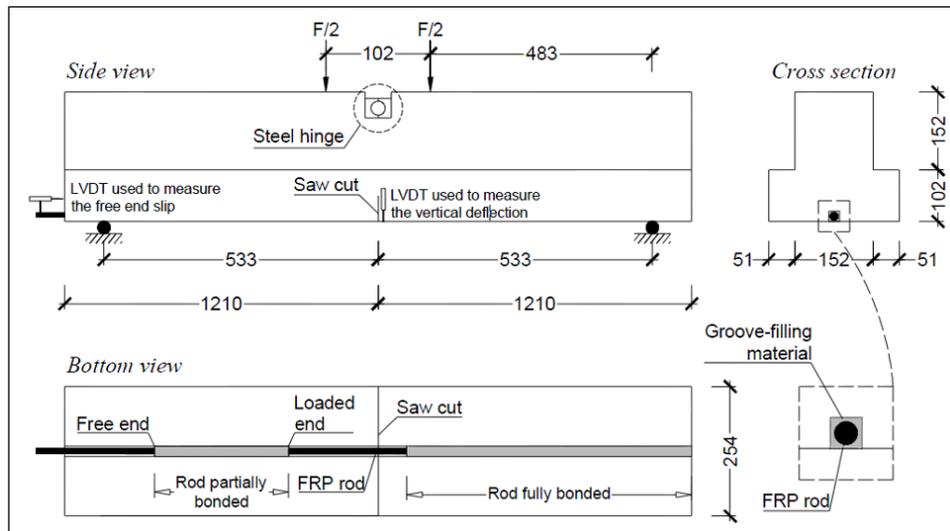


Figure I. 15: Pullout test Dimensions en millimètres [40].

Les essais les plus courants pour la caractérisation de l'adhérence renforts/matrice sont les essais d'arrachement par flexion. Le dispositif d'essais d'adhérence par flexion est reconnu par la communauté des chercheurs comme le plus représentatif du comportement des membres en flexion. Pour chaque méthode d'essai, plusieurs configurations ont été proposées, par exemple par De Lorenzis *et al.* [40] (Figure I.15) ou par Sena Cruz *et al.* [50] (Figure I.16).

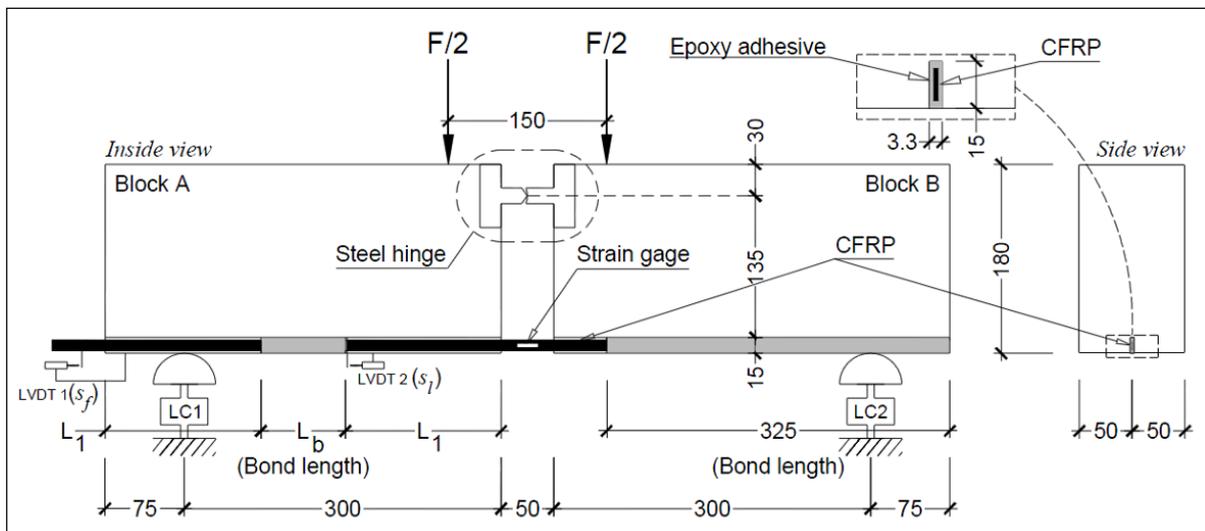


Figure I. 16 : Dispositif adopté par Sena Cruz *et al.* [50].

D'après Merdas *et al.* [50], plusieurs chercheurs ont étudié les caractéristiques d'adhérence des renforts PRF au béton par les deux méthodes mentionnées. Ces recherches ont montré que le frottement est le mécanisme dominant pour les renforts lisses de PRF.

I.9. Modes de rupture observés lors des essais d'adhérence dans le cas NSM

Le mode de rupture des systèmes renforcés suivant la méthode NSM est fortement influencé par l'état de surface du renfort, le matériau de scellement, les dimensions de l'engravure et le type d'essai utilisé. Les différents modes de rupture possibles du système NSM sont récapitulés dans la **Figure I.17** ci-dessous [50].

- ✚ Rupture par arrachement du renfort composite (rupture de l'interface résine – composite (IRC))

Dans ce cas, on distingue deux sous-modes : le premier correspond à la perte de l'adhérence à l'interface renfort-matériau de scellement, constaté avec les barres lisses ou les barres légèrement sablées pour lesquelles la résistance d'adhérence dépend principalement du frottement et de l'adhésion entre le renfort composite et le matériau de scellement. Le deuxième correspond à la rupture par cisaillement du matériau de scellement à l'interface avec le renfort composite.

- ✚ Rupture par perte d'adhérence à l'interface résine-béton (IRB)

Ce mode est généralement observé lorsque la résine utilisée comme matériau de scellement présente une bonne adhérence avec le renfort composite et que la taille de l'engravure est importante. Ce mode de rupture est beaucoup plus constaté dans le cas des mortiers utilisés comme matériau de scellement.

- ✚ Rupture mixte des interfaces résine – composite et résine – béton (IRC/IRB)

Le mode de rupture IRC/IRB est la combinaison des deux modes cités ci-dessus (IRC et IRB).

- ✚ Rupture de la couche de résine couvrant le renfort composite (splitting)

Le mécanisme de rupture de la couche de matériau de scellement qui couvre le renfort composite dans le système NSM est semblable à celui obtenu avec les renforts d'acier HA. Une bonne explication de ce comportement a été développée par **Tepfers et al.** [51]. Pour un renfort composite, la composante radiale des contraintes d'adhérence est équilibrée par les contraintes de traction circonférentielles dans la couche de résine qui couvre le renfort et qui peut mener à la formation d'une fissure qui se propage longitudinalement jusqu'à la rupture par splitting. Le béton entourant l'engravure, qui est également soumis aux contraintes de traction, peut par la suite se fissurer lorsque sa résistance en traction est atteinte, causant la rupture le long de l'engravure. Ce mode de rupture dépend principalement des dimensions de l'engravure et de la

résistance en traction du matériau de scellement. Ce mode de rupture n'a pas été constaté avec le mortier comme matériau de scellement, sauf s'il est accompagné des autres modes.

✚ Fissuration de l'enrobage de la résine et rupture de la couche d'enrobage du béton couvrant le renfort dans le plan incliné (RB)

Ce mode de rupture est observé s'il y a une adhérence parfaite entre le renfort composite et la résine (généralement dans le cas des renforts à reliefs type barres à haute adhérence) et une faible résistance du béton.

Les modes de ruptures discutés ci-avant sont observés pour un jonc composite, mais ces modes peuvent être aussi observés dans le cas de plats [43]. On peut par ailleurs constater d'autres types de ruptures, comme le dernier mode présenté dans la **Figure I.17**, pour lequel le renfort composite est près du bord de l'éprouvette (**Blaschko *et al.* [45]**).

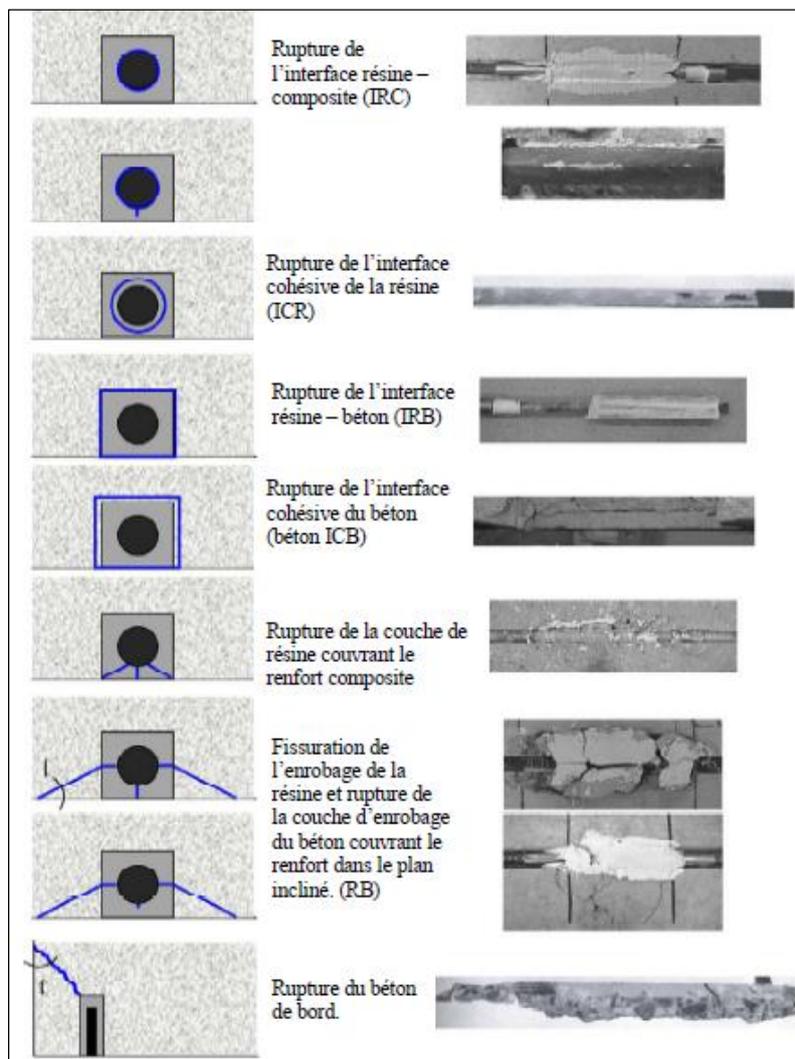


Figure I. 18: Les modes de rupture constatée dans les essais d'arrachement [50].

I.10. Modèle numérique

La forme la plus simple du modèle d'adhérence utilisée pour simuler le comportement réel de glissement-contrainte d'adhérence des barres en PRF est la relation bilinéaire illustrée à la **Figure I.18(a)** (Neubauer *et al.* [52] ; Yuan *et al.* [53]). Cependant, une relation linéaire pour la branche ascendante ne peut pas être aussi précise pour la modélisation des longues longueurs de liaison, car il existe une variation significative des contraintes de liaison le long de la longueur de la liaison [54]. Certaines études ultérieures l'ont simplifié en un modèle unilinéaire (illustré en pointillés à la **Figure I.18(a)**) en se basant sur l'observation suivante : le glissement à la contrainte d'adhérence maximale (S_1) est beaucoup plus petit que le glissement ultime (S_m) de sorte que l'idéalisation a peu d'effet et donnera une valeur légèrement conservatrice de la résistance au décollement [55].

L'une des relations empiriques les plus couramment utilisées pour modéliser la liaison acier-béton est le modèle **Bertero Eligehausen Popov (BEP)** [56]. (**Figure I.18 (b)**). La branche ascendante du modèle MPE est donnée par :

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad \text{I. 1}$$

Où τ_1 , S_1 et α sont des paramètres d'ajustement des courbes. Ensuite, il y a une valeur de liaison constante jusqu'à une valeur de glissement de S_2 , puis la contrainte de liaison diminue linéairement jusqu'à la valeur de liaison correspondant à S_3 . Ensuite, les contraintes d'adhérence dues au frottement restent constantes pour les valeurs de glissement supérieures à S_3 .

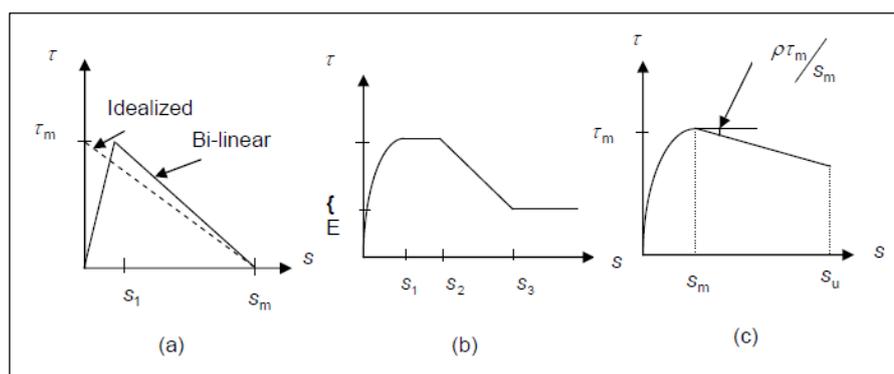


Figure I.18 : Modèle d'adhérence, a) Modèle bilinéaire, b) Modèle de BEP, c) Modèle de MBEP.

Malvar [57] a proposé une équation unique pour reproduire l'ensemble du comportement de glissement en :

$$\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) = \frac{\left[F\left(\frac{S}{S_m}\right) + (G-1)\left(\frac{S}{S_m}\right)^2\right]}{\left[1 + (F-2)\left(\frac{S}{S_m}\right) + G\left(\frac{S}{S_m}\right)^2\right]} \quad \text{I.2}$$

Où F et G sont des constantes empiriques déterminées pour chaque type de barre. Le travail comprenait une étude des caractéristiques d'adhérence des barres en PRVF avec différentes configurations de surface.

Cosenza et al. [58] ont proposé un nouveau modèle, appelé modèle Cosenza-Manfredi-Realfonzo (CMR), qui prétend être meilleur pour définir la branche ascendante du comportement d'adhérence des PRF au béton, il est défini par la relation suivante :

$$\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) = \left[1 - \exp\left(-\frac{S}{S_r}\right)\right]^\alpha \quad \text{I.3}$$

Où τ_m est la contrainte d'adhérence maximale et S_r et α sont des paramètres d'ajustement de courbe. **Cosenza et al. [58]** ont comparé les résultats expérimentaux avec ceux des modèles BEP, Malvar et CMR et ont conclu que le modèle Malvar est moins fiable que les deux autres modèles, et le modèle CMR est le plus proche des résultats expérimentaux dans la région de la branche ascendante, tandis que le modèle BEP est en accord avec les résultats expérimentaux dans toutes les régions.

Cosenza et al. [59] ont modifié le modèle MPE qui avait été initialement mis au point pour modéliser l'adhérence du béton sur l'acier, pour la modélisation de l'adhérence du PRF sur le béton. Le modèle modifié de Bertero Eligehausen Popov (MBEP) comporte trois branches, ce qui élimine le plateau de contrainte d'adhérence après pointe du modèle BEP à quatre branches, comme le montre la **Figure I.18(c)**. Le plateau a été éliminé car les résultats expérimentaux ne correspondaient pas aux courbes analytiques, les courbes étant plus similaires sans le plateau. Le modèle de MBEP a une branche ascendante identique à celle de l'équation (I.1) et une branche descendante linéaire donnée par :

$$\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) = 1 - \rho \left(\frac{S}{S_m} - 1\right) \quad \text{I.4}$$

Certains des modèles d'adhérence susmentionnés ont également été utilisés pour modéliser le comportement de glissement d'adhérence des barres en PRFV NSM.

De Lorenzis et al. [43] ont modélisé le comportement d'adhérence des barres en PRF et selon la techniques NSM à l'aide du modèle MBEP. La rupture des éprouvettes qui ont été modélisées, a été produite dans l'interface résine-PRF, la branche ascendante a été modélisée à

l'aide du modèle MBEP, tandis que pour la branche descendante, l'équation suivante a été proposée :

$$\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) = \left(\frac{S}{S_m}\right)^{\alpha'} \quad \text{pour } S \geq S_m \quad \text{I.5}$$

Cette équation est identique à l'équation de la branche ascendante, mais en remplaçant α par une valeur négative, α' .

Les valeurs α' ont été calibrés en ajustant au mieux les résultats expérimentaux. **Sena Cruz et al. [60]** ont utilisé le modèle MBEP pour reproduire le comportement d'adhérence des barres en PRF-NSM, jusqu'à la contrainte d'adhérence maximale, tandis que la branche descendante a été modélisée à l'aide de l'expression analytique proposée par **De Lorenzis et al. [43]**.

En résumé, plusieurs modèles simulent le comportement d'adhérence, on voit clairement que ces modèles sont dérivés à partir des modèles élaborés pour les systèmes adhérence acier-béton. Des modèles plus polyvalents sont nécessaires pour simuler le comportement d'adhérence, ainsi que la relation contrainte-glisement, du béton renforcé avec un renfort NSM.

Conclusion

Les études présentées dans ce chapitre ont montré que la technique de renforcement NSM est une méthodologie efficace pour le renforcement du béton avec des matériaux PRF, en raison de ses avantages potentiels par rapport à la technique EBR. La technique NSM présente les avantages suivants par rapport à la technique EBR : (i) temps d'installation minimal, (ii) non exigence de la préparation de la surface, à l'exception de la coupe des rainures, (iii) une tendance plus faible au décollement (iv) une exposition moindre aux dommages mécaniques, au feu et au vandalisme, et (v) aptitude à renforcer des éléments en béton ayant des zones de moments négatifs.

L'adhérence entre l'armature en PRF et le béton est considérée comme le facteur clé qui contrôle le succès et l'efficacité du système de renforcement. Pour la même quantité d'armature en PRF, indépendamment de la répartition de l'armature en PRF, la technique NSM fournit une capacité de charge supérieure à celle de la technique EBR. L'introduction de plats/lamelle en PRF dans les engravures permet d'obtenir une plus grande surface d'adhérence et améliore la capacité d'ancrage des renforts. Plusieurs paramètres peuvent influencer ce facteur clé, certains d'entre eux sont liés aux propriétés du matériau, telles que la résistance du béton, le matériau de remplissage des engravures et les caractéristiques des armatures en PRF, tandis que d'autres

paramètres sont liés à la géométrie de l'élément renforcé, comme la longueur d'encrage, les dimensions des engravures ainsi que sa configuration superficielle (rugueuse ou lisse).

CHAPITRE II

ADHÉRENCE ENTRE LES RENFORTS NSM ET LE BÉTON DE FAIBLES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

II.1. Introduction	36
II.2. Récapitulatif des travaux antérieurs.....	36
II.3. Description des matériaux.....	38
II.3.1. Béton	38
II.3.2. Les renforts	41
II.3.3. Adhésif	43
II.4. Montage expérimental et résultats	43
II.4.1. Détail des échantillons	43
II.4.2. Préparation des échantillons	44
II.4.3. Mise en place et résultats des tests	45
II.5. Discussion des résultats.....	49
II.5.1. Effet de changement de la taille d'engravure	49
II.5.2. Effet de type du renfort	49
II.5.3. Mode de rupture	50
II.5.4. Prédiction de contrainte d'adhérence-glissement	51
II.5.5. Effet de la résistance du béton	53
Conclusion	54

II.1. Introduction

Du fait que de nombreuses structures en béton ont récemment atteint la fin de leur durée de vie, les chercheurs se concentrent sur le développement des techniques de réparation efficaces. Certaines structures en béton sont construites avec du béton à faible résistance (inférieure ou égale à 15 MPa). Aujourd'hui, le défi consiste à réparer ces types de structures en béton. Selon **Capozucca [61]**, l'intérêt des recherches s'est récemment porté sur l'utilisation de matériaux composites, tels que le polymère renforcé en fibres de carbone (PRFC). **Al-Mahmoud et al. [62]** et **Parretti et al. [63]** affirment que la méthode NSM (Near Surface Mounted) présente de nombreux avantages. **Chen et al. [64]** estiment que l'application de la technique NSM minimise les problèmes de décollement préliminaire. Cette performance dépend principalement de la résistance d'adhérence de l'armature NSM au béton, qui est d'une importance fondamentale pour le comportement et la durabilité des structures en béton réparées avec la technique NSM.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement d'adhérence entre les armatures et le béton de faible résistance mécanique selon la technique NSM, et de déterminer si la méthode NSM peut être appliquée au béton à faible résistance. L'objectif est également de déterminer si l'acier de précontraint peut être utilisé comme une alternative aux barres en PRFC.

Pour atteindre les objectifs susmentionnés, les propriétés physiques et mécaniques choisies du béton à faible résistance et de l'armature ont été étudiées. Ensuite, des essais ont été effectués afin de caractériser l'influence de la résistance du béton, les dimensions des engravures et le type d'armatures sur le comportement d'adhérence de l'armature NSM au béton à faible résistance en utilisant l'essai d'arrachement par flexion « Beam pull-out test » pour minimiser le problème d'excentricité.

II.2. Récapitulatif des travaux antérieurs

Le **Tableau II.1** donne un aperçu général sur des recherches récentes, des paramètres étudiés et des résultats sélectionnés obtenus avec la technique NSM. Sur la base de la revue de la littérature réalisée présentée dans le **Tableau II.1**, il a été constaté que la plupart des tests étaient liés à l'étude de l'adhérence entre différents types des renforts NSM et du béton ayant une résistance à la compression supérieure à 19 MPa. Il existe un manque de connaissances sur l'adhérence entre le renforcement NSM et le béton à faible résistance.

Tableau II. 1: Aperçu général de l'état de l'art récent, des paramètres étudiés et des résultats sélectionnés obtenus par la technique NSM.

<i>Auteur</i>	<i>Résistance en compression du béton (MPa)</i>	<i>Type de renforts</i>	<i>Année de la publication</i>	<i>Résultats sélectionnés</i>
<i>De Lorenzis et al. [65]</i>	22	jonc en verre et carbone nervuré	2002	La modification du type de renforts affecte la force d'arrachement.
<i>Novidis et al. [66]</i>	30	Jonc en PRFC sablé	2007	L'augmentation de la taille d'engravure entraîne une augmentation de la force d'adhérence.
<i>Galati et al. [67]</i>	40	jonc en PRFC enroulé en spirale et enduit par le sable	2009	L'augmentation des propriétés mécaniques de la résine époxy induit une augmentation de la force d'arrachement.
<i>Bilotta et al. [68]</i>	19	Lamelle en PRFC	2011	La résistance à la traction des PRF est mieux exploitée par la technique NSM que par la technique EBR.
<i>Soliman et al. [69]</i>	38- 44	Jonc en PRFC	2010	L'augmentation de la taille d'engravure pour les éprouvettes scellée avec l'adhésif en ciment diminue la charge de rupture.
<i>Dongkeun Lee et al. [70]</i>	28,5	jonc en PRFC lisse et rugueux, jonc en PRFC enroulé en spirale et enduit par le sable	2012	Le changement du type de surface des renforts affectera la force d'arrachement maximale.
<i>Kalupahana et al. [71]</i>	60	Jonc en PRFC plat et carré	2013	Les barres rectangulaires semblent être la forme la plus efficace que les barres rondes et carrées.
<i>Lluís Torres et al. [72]</i>	23	Jonc en PRFC et PRFV	2016	Le changement de type de l'armature induit une augmentation de la force d'arrachement.
<i>Sharaky et al. [73,74]</i>	22- 42,2	Jonc en PRFC	2013 ; 2013	L'augmentation de la taille de la rainure (largeur ou profondeur) ou de la résistance du béton entraîne une résistance d'arrachement plus élevée.

<i>Al-Saadi et al. [75]; Khshain et al. [76]</i>	32	Lamelle en PRFC lisse et rugueuse	2016 ; 2015	La rugosité de la surface améliore la force d'arrachement.
<i>Renata Kotynia et al. [77]</i>	35,4	Bars en PRFC	2017	L'augmentation du diamètre de la barre a entraîné une augmentation de la force d'arrachement.
<i>Merdas et al. [78]</i>	37,5	Jonc et plat en PRFC	2011	Une meilleure performance en termes de contrainte d'adhérence, la charge d'arrachement a été atteinte par les plats de carbone.
<i>Merdas et al. [79]</i>	37,5- 73,5	Jonc en PRFC et barre en acier lisse	2015	L'augmentation de la résistance du béton améliore la force d'arrachement. Une meilleure performance en termes de contrainte d'adhérence, la charge d'arrachement a été obtenue par les plats de carbone par rapport à l'acier.

Le **Tableau II.1** montre également que la plupart des chercheurs ont utilisé des barres (jonc ou plats) ou des lamelles en PRFC comme un renforcement NSM. Aucune tentative n'a été faite pour utiliser l'acier de précontrainte au lieu du PRFC comme solution de remplacement efficace du renforcement NSM.

II.3. Description des matériaux

II.3.1. Béton

La méthode Dreux-Gorisse a été utilisée pour la formulation du mélange de béton [80], la taille des particules des granulats utilisés a été effectuée selon la norme NF P18-560 [81].

Le **Tableau II.2** présente la composition et les principales propriétés du béton. Pour la fabrication du béton, un malaxeur d'une capacité de 100 L à axe vertical a été utilisé. Les procédures de mélange ont été effectuées comme suit :

- Les graviers, le sable fin et le ciment sont mélangés pendant 1 minute.
- L'eau est ajoutée et le malaxage continue pendant une autre minute.

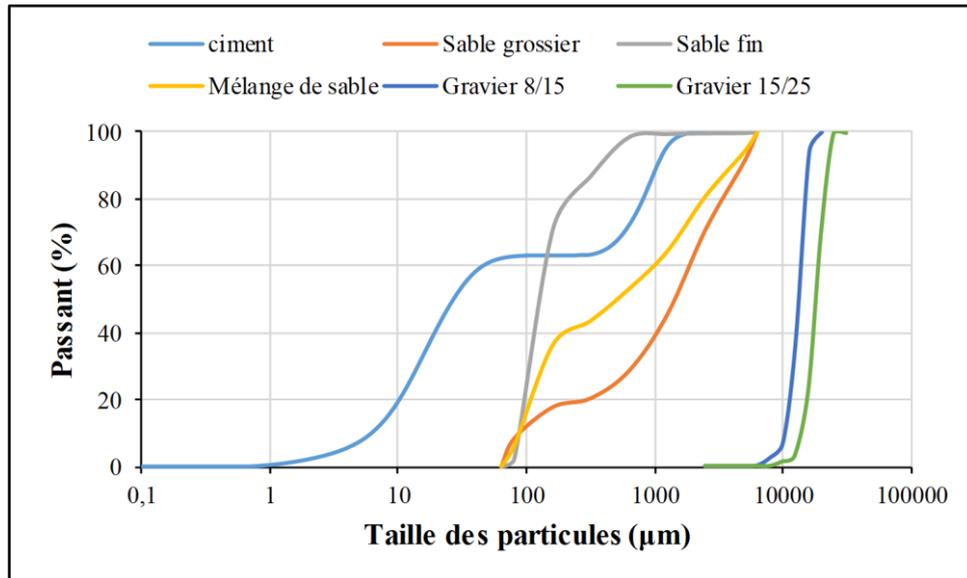


Figure II. 1 : Analyse granulométrique

Tableau II. 2 : La composition et les principales propriétés mécaniques du béton.

<i>Constitutions</i>	<i>Quantités</i>
<i>Sable grossier 0/5 (kg/m³)</i>	574
<i>Sable fin 0/3 (kg/m³)</i>	305
<i>Gravier 8/15 (kg/m³)</i>	545
<i>Gravier 15/25 (kg/m³)</i>	455
<i>Eau (kg/m³)</i>	188
<i>Ciment CPJ-CEM II 42.5 (kg/m³)</i>	350
<i>Résistance en compression (MPa)</i>	15,37±1.08
<i>Résistance à la traction (MPa)</i>	1,62±0.22
<i>Module de Young (GPa)</i>	27,6±0.67

Le coulage a été effectué en deux couches pour chaque éprouvette, compacté sur une table vibrante 50 Hz pendant 30 secondes. Après le remplissage des moules, les surfaces supérieures sont lissées manuellement et recouvertes d'une feuille de plastique. Les éprouvettes ont été enlevées de leurs moules 24 heures après le coulage. Les échantillons ont été conservés au niveau du laboratoire à une température de 25 °C pendant 28 jours, où l'humidité varie entre 23 et 41%. La résistance à la compression, le module d'élasticité et la résistance à la traction ont été déterminés (28 jours après la coulée) selon NF P 18-406 [82] et NF P 18-406 [83] (Figure II.2). Chaque propriété a été déterminée comme étant la valeur moyenne des trois valeurs d'éprouvettes testées de la même configuration. La résistance moyenne à la compression

obtenue est de 15,63 MPa et la résistance à la traction et le module d'élasticité moyen sont de 1,62 MPa et 27,6 GPa, respectivement.

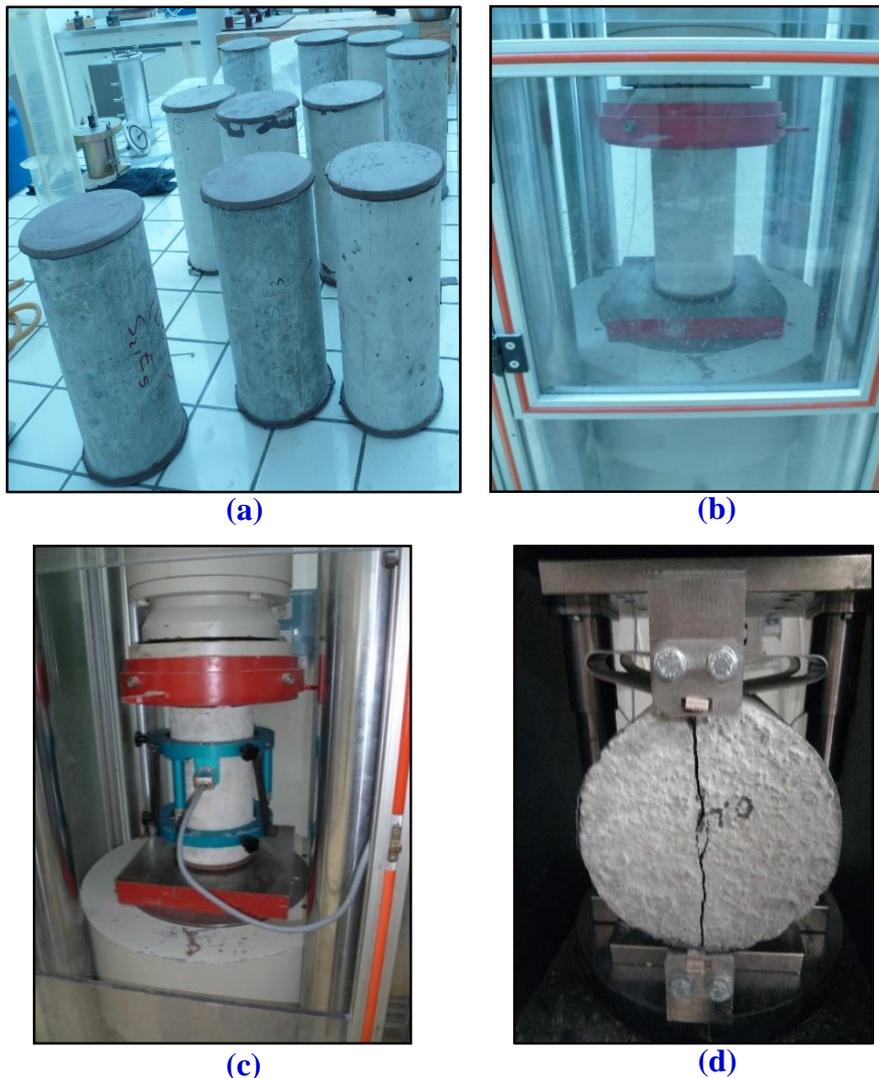


Figure II. 2: Les différentes étapes pour la détermination des caractéristiques mécaniques du béton, (a) Éprouvettes surfacées par du soufre, (b) Essai de compression, (c) Mesure du module de Young, (d) Essai de traction.

Les propriétés chimiques et minéralogiques du ciment ont été déterminées au niveau de laboratoire de Ain El Kbira (<http://www.scaek.dz/>). La composition chimique a été déterminée par spectroscopie de fluorescence des rayons X. La composition minéralogique a été calculée à l'aide des équations de Bogue. La densité spécifique et la finesse Blaine ont été déterminées à l'aide de la méthode du pycnomètre et d'un perméabilimètre de Blaine. Le **Tableau II.3** résume les résultats obtenus.

Tableau II. 3: Propriétés chimiques, minéralogiques et physiques du ciment.

<i>Contenu (%)</i>							
<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Cl</i>	<i>Perte de masse</i>
23,30	5,94	5,29	56,68	2,05	0,44	0,007	2,97
<i>Composition minéralogique utilisant l'équation de Bogue</i>							
<i>C₃S</i>		<i>C₂S</i>		<i>C₃A</i>		<i>C₄AF</i>	
67,35		9,42		3,33		16,20	
<i>Propriétés physiques</i>							
<i>La masse volumique (g/cm³)</i>				<i>La finesse (cm²/g)</i>			
3,11				3475			

II.3.2. Les renforts

Deux différents types de renfort ont été utilisés dans ce travail : les fibres de carbone lisse (un jonc de 8mm de diamètre et un plat de 10mm de largeur et 2,5mm d'épaisseur), et le fil d'acier de précontraint d'un diamètre de 6mm. Le renfort a été fourni par la société SOFICAR France (<https://www.toray-cfe.com/en/>) et l'entreprise de TREFISOUD EL Eulma, (<Http://www.trefisoud.com/index1.html>). Chaque type du renfort a été testé pour déterminer sa résistance à la traction et son module d'élasticité selon la norme EN 10002 [84].

Les propriétés mécaniques des armatures, déclarées par le fabricant sont testées au laboratoire URME, et présentées dans le **Tableau II.4.**

Tableau II. 4: Certaines propriétés mécaniques des renforts.

	<i>Jonc de carbone</i>		<i>Plat de carbone</i>		<i>Fil d'acier de précontraint</i>	
	<i>Déclarés par le fournisseur</i>	<i>Obtenus au laboratoire</i>	<i>Déclarés par le fournisseur</i>	<i>Obtenus au laboratoire</i>	<i>Déclarés par le fournisseur</i>	<i>Obtenus au laboratoire</i>
<i>Module d'élasticité (GPa)</i>	160	179,46± 0,88	160	179,85± 0,04	170	160,22± 1,76
<i>La limite d'élasticité (MPa)</i>	3000	2561,23± 30,19	3000	2538,15± 128,83	1850	1800,43± 3,87

Dans le but de mieux comprendre la microstructure des renforts, nous avons observé des échantillons à l'aide d'un microscope électronique à balayage de type Leica S430i. L'objectif

est de caractériser la section transversale et longitudinale des renforts. Quelques exemples d'images MEB sont présentés dans la Figure II.3 ci-dessous.

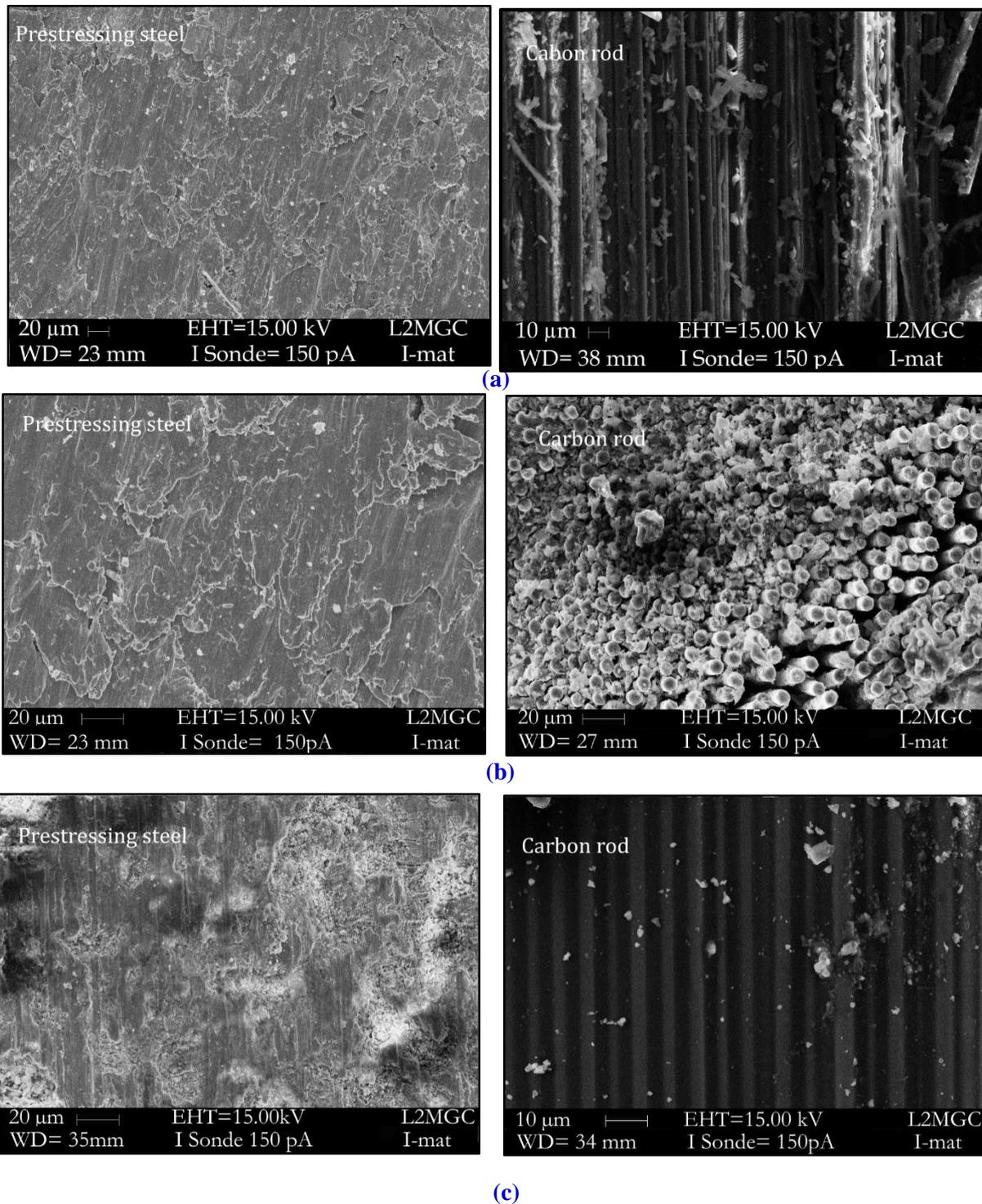


Figure II. 3: Observations au microscope électronique à balayage des barres en PRFC et acier de précontrainte, (a) section longitudinale des renforts, (b) section transversale des renforts, (c) surface extérieure des renforts.

La **Figure II.3** montre une série d'observations au MEB des joncs de carbone, comparées avec des observations de renforts en fils d'acier de précontrainte de 6mm de diamètre. Le jonc de carbone présente une surface extérieure très lisse par rapport à l'acier, elle-même étant peu rugueuse. La section transversale montre que le renfort se compose de fibres de carbone assemblées dans une matrice de résine époxy. L'analyse d'image a donné un taux de résine par rapport à la section transversale du renfort d'environ 35%. Le nombre de fibres dans un renfort de 8mm de diamètre est ainsi de plus d'un million.

Dans le sens longitudinal, les fibres sont disposées parallèlement les unes aux autres et séparées entre elles par des films de résine. En comparaison, les sections transversale et longitudinale du fil d'acier présentent une certaine homogénéité. La surface extérieure du jonc contient des vides entre les fibres de carbone. Pour cette raison, la longueur développée du périmètre d'une section circulaire ou rectangulaire est d'environ 1,35 fois supérieure à celle du périmètre apparent.

II.3.3. Adhésif

L'adhésif utilisé dans ce travail est une résine époxy (MEDAPOXY REP) fabriquée par la société GRANITEX (<http://www.granitex.dz/>), ce matériau de scellement est une pâte spécialement formulée pour la réparation du béton, le scellement des aciers dans le béton et le collage des renforts au béton selon les techniques NSM et EBR. Il est fourni avec deux composants (résine et durcisseur). Les propriétés suivantes sont fournies par le fournisseur : la résistance à la compression à 28 jours de la résine époxy est égale à 68 MPa selon la norme NF P18-923 [85], et la valeur d'adhérence au béton est égale à 3 MPa selon la norme NF P18-923 [86]. Le durcissement de la résine époxy est presque complet au bout de 7 jours à une température de 20 °C.

II.4. Montage expérimental et résultats

II.4.1. Détail des échantillons

Huit poutres ont été testées en quatre séries sous charge monotone jusqu'à la rupture. Dans cette étude expérimentale, les paramètres étudiés pour caractériser le comportement d'adhérence sont :

- ✚ Type de béton : un béton ordinaire avec une résistance à la compression 15 MPa.
- ✚ Type de renfort : un plat de carbone lisse, un jonc de carbone lisse et fil d'acier de précontraint lisse, comme indiqué dans le **Tableau II.5**.

- ✚ Taille d’engravures : deux tailles d’engravures ont été utilisées, telles que recommandées par **De Lorenzis et al. [66]**, $1,5d_b$ et $2d_b$ (d_b est le diamètre de fil d’acier de précontraint).

Tableau II. 5: Détails des échantillons utilisées pour les essais d'arrachement par flexion.

<i>Série</i> <i>BT_{w×h}</i>	<i>Type</i> <i>d’adhésif</i>	<i>Dimension</i> <i>du renfort</i> <i>(mm)</i>	<i>Type de renfort</i>	<i>Dimension</i> <i>d’engravure</i> <i>(mm²)</i>	<i>Longueur</i> <i>d’encrage</i> <i>(mm)</i>
<i>BC_{12×12}</i>	époxy	8	Jonc de Carbon	12×12	40
<i>BD_{8×15}</i>	époxy	2,5×10	Plat de Carbon	8×15	40
<i>BE_{9×9}</i>	époxy	6	Fil d’acier de précontrainte	9×9	40
<i>BE_{12×12}</i>	époxy	6	Fil d’acier de précontrainte	12×12	40

II.4.2. Préparation des échantillons

Les différents essais ont été réalisés au laboratoire de l’URME, Université Ferhat Abbes Sétif 1. La **Figure II.4** montre les principales étapes suivies dans la préparation d'un essai d’adhérence par flexion d’un spécimen. À l’âge de 28 jours, les deux blocs composant chaque spécimen ont été retirés de la salle de conservation pour enlever la pièce du bois qui a été placé dans l’extrémité du moule avant le coulage du béton pour conserver l’emplacement des engravures. Afin d’éliminer la poussière due au processus de sciage, les engravures ont été nettoyées avec de l’eau sous pression puis séchées à l’air comprimé afin d’assurer une surface sèche avant le collage du composite au béton (**Figure II.4 (b)**). Avant le collage du renfort, les engravures ont été nettoyées à nouveau avec l’air comprimé. Pour éviter de coller l’époxy dans les zones indésirables, une procédure de masquage a été adoptée, comme le montre la **Figure II.4 (c)**.

Dans la préparation du PRF, voici les étapes à suivre :

- Un petit élément en acier a été fixé à l’extrémité chargée pour mesurer le glissement S_1 .
- Le renfort a été nettoyé à l’acétone puis inséré doucement dans l’engravure ;
- Dans les régions où le renfort doit être collé au béton, l’engravure a été remplie avec la résine époxy jusqu’au milieu de l’engravure et les faces latérales du renfort étaient couvertes par une mince couche de colle. Puis, le renfort a été inséré dans l’engravure et a été légèrement enfoncé pour forcer la colle époxy à circuler entre le renfort et les côtés de l’engravure. Enfin, l’époxy excédentaire a été enlevé et la surface a été nivelée.

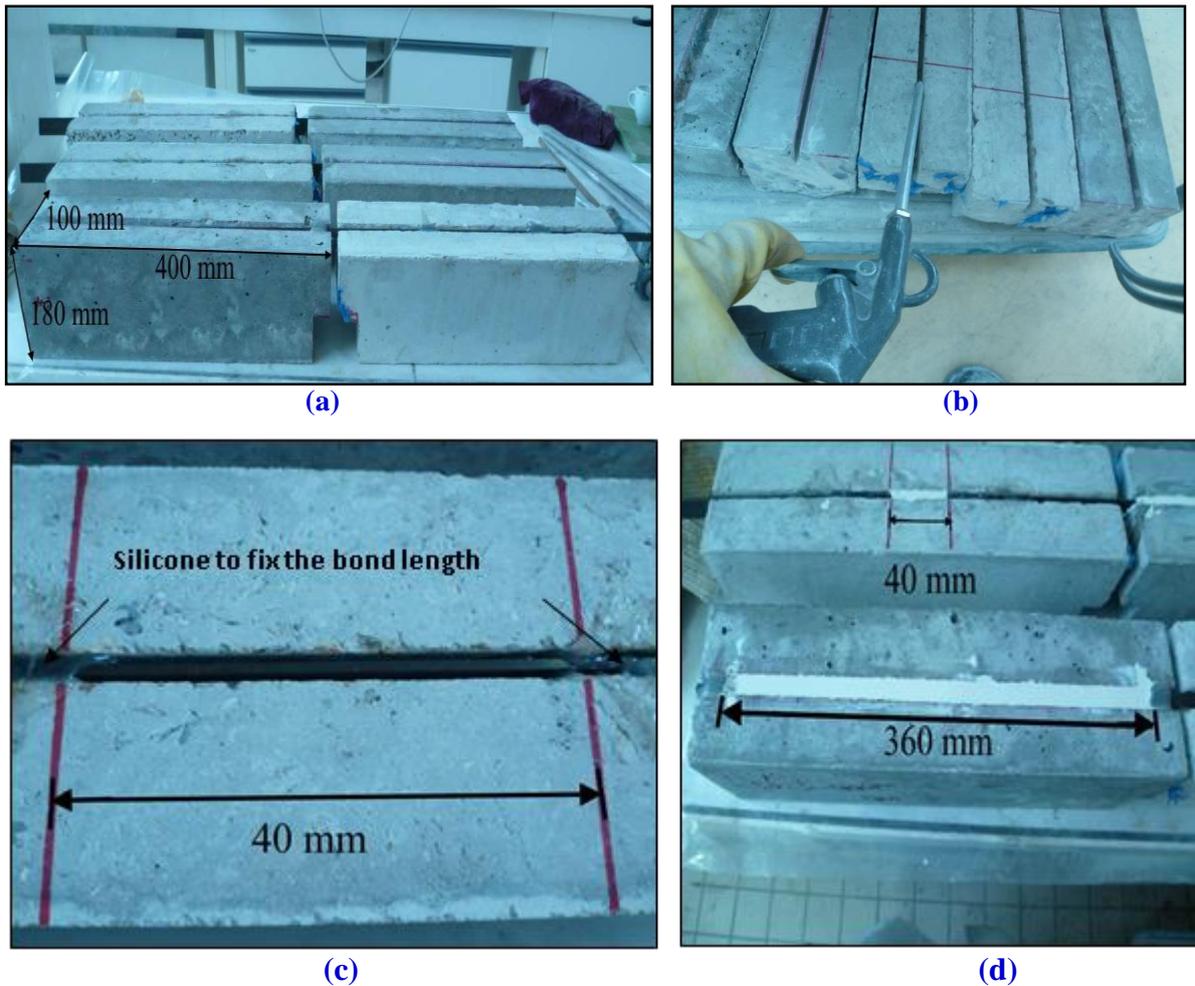
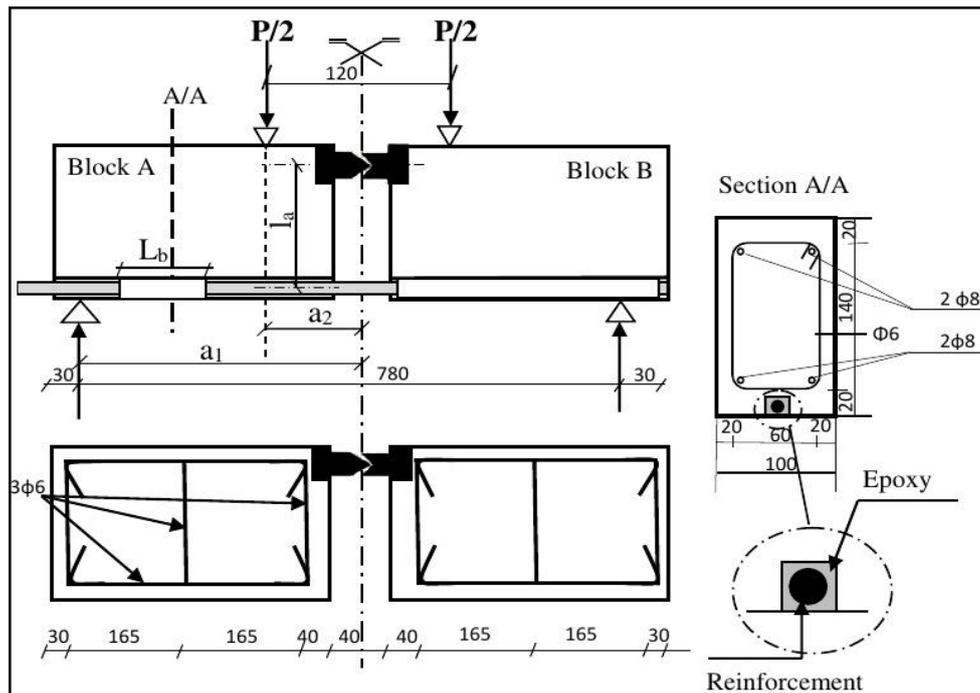


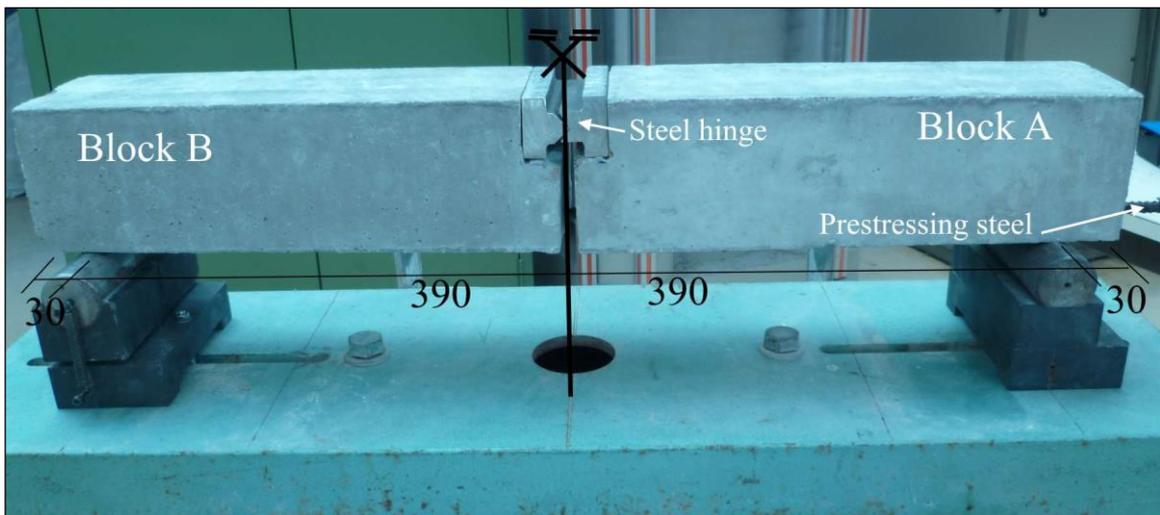
Figure II. 4: Les différentes étapes de préparation des échantillons, (a) la forme du bloc de béton, (b) le nettoyage des engravures à l'air comprimé, (c) la procédure de masquage, (d) le remplissage des engravures avec la résine époxy.

II.4.3. Mise en place et résultats des tests

La disposition d'essai adoptée dans ce travail, afin de caractériser le comportement d'adhérence entre les renforts et le béton selon la technique NSM est similaire à celle proposée par RILEM [77] (Figure II.5(a)).



(a)



(b)

Figure II. 5: La configuration adoptée (dimension en mm) : a) dispositif expérimental pour l'essai arrachement par flexion ; b) poutre avant le chargement.

Le dispositif adopté est constitué de deux blocs parallélépipédiques en béton (A et B), reliés à leurs parties inférieures par le renfort dont on étudie l'adhérence, et à leurs parties supérieures par une rotule en acier. La poutre d'essai est sollicitée en flexion simple (4 points) par deux forces égales et disposées symétriquement par rapport à sa section médiane.

L'action d'une charge verticale sur la poutre provoque la mise en traction du renfort. Étant donné que l'effort de compression dans la section de la poutre à mi- portée est situé au centre

de la rotule d'acier, alors le bras de levier du moment interne est constant quel que soit le niveau de chargement. Ceci permet un calcul précis de la force de traction et des contraintes induites dans le renfort. La zone d'adhérence testée est localisée dans le bloc A. Pour assurer un glissement très négligeable du renfort fixé au bloc B, une longueur d'adhérence de 360mm a été utilisée. Cela garantit que la rupture d'adhérence se produit dans le bloc A.

Les échantillons ont été testés jusqu'à la rupture en utilisant la configuration de **RILEM** et une machine de compression d'une capacité de 50 kN avec une vitesse de chargement de 2mm/min. Le **Tableau II.6** résume la dénomination et les résultats moyens obtenus pour chaque configuration. La première lettre de l'échantillon BT_{wxh} , B, se réfère à l'essai d'adhérence, la lettre suivante C se réfère au jonc de fibre de carbone. D se réfère au plat de carbone, E se réfère au fil d'acier de précontraint, tandis que w et h se réfèrent respectivement à la largeur et à la hauteur de l'engravure. La **Figure II.6** montre les courbes obtenues lors de l'essai d'arrachement. La force d'arrachement maximale appliquée sur le renfort (F_{max}) est déterminée par l'équation suivante :

$$F_{max} = \frac{P(a_1 - a_2)}{2l_a} \quad (II.1)$$

Où,

- ✚ P : est la force totale appliquée sur la poutre, elle est mesurée à l'aide du capteur de force du dispositif d'essai.
- ✚ l_a : est la distance entre le centre de gravité de la rotule et le centre de gravité de l'armature.
- ✚ a_1 : est la distance entre l'appui et la mi- portée de la poutre.
- ✚ a_2 : est la distance entre le point d'application de la charge et la mi- portée de la poutre.
- ✚ S_{max} : est le glissement maximal (mm) à l'extrémité chargée.

La contrainte d'adhérence maximale a été calculée en utilisant la formule (II.2) pour les renforts ronds et la formule (I.3) pour le plat de carbone :

$$\tau_u = \frac{F_{max}}{\pi\phi L_b} \quad (II.2)$$

$$\tau_u = \frac{F_{max}}{2W_f L_b} \quad (II.3)$$

Où, ϕ et W_f sont le diamètre du renfort rond et la largeur du renfort plat de PRFC, respectivement.

Tableau II. 6 : Résultats des tests d'arrachement par flexion.

$BT_{w \times h}$	F_{max} (kN)	Moyenne	S.D	C.V (%)	S_{max} (mm)	τ_u (MPa)	Mode de rupture
$BC_{12 \times 12}$	13,72	13,61	0,11	0,807	0,79	13,54	Rupture dans le béton
	13,50						
$BD_{8 \times 15}$	14,80	14,59	0,20	1,43	0,46	18,46	Rupture dans le béton
	14,38						
$BE_{9 \times 9}$	7,32	7,39	0,06	0,89	0,37	9,80	Rupture dans le béton
	7,45						
$BE_{12 \times 12}$	8,54	8,37	0,16	1,98	0,65	11,11	Rupture dans le béton
	8,20						

A partir des courbes force d'arrachement-glissement représentées sur la **Figure II.6**, il est démontré que, après une branche linéaire initiale, le comportement devient non linéaire en raison du comportement non linéaire de l'adhésif époxy [76]. La charge de pointe s'est produite pour un glissement de l'ordre de 0,35 à 0,8mm.

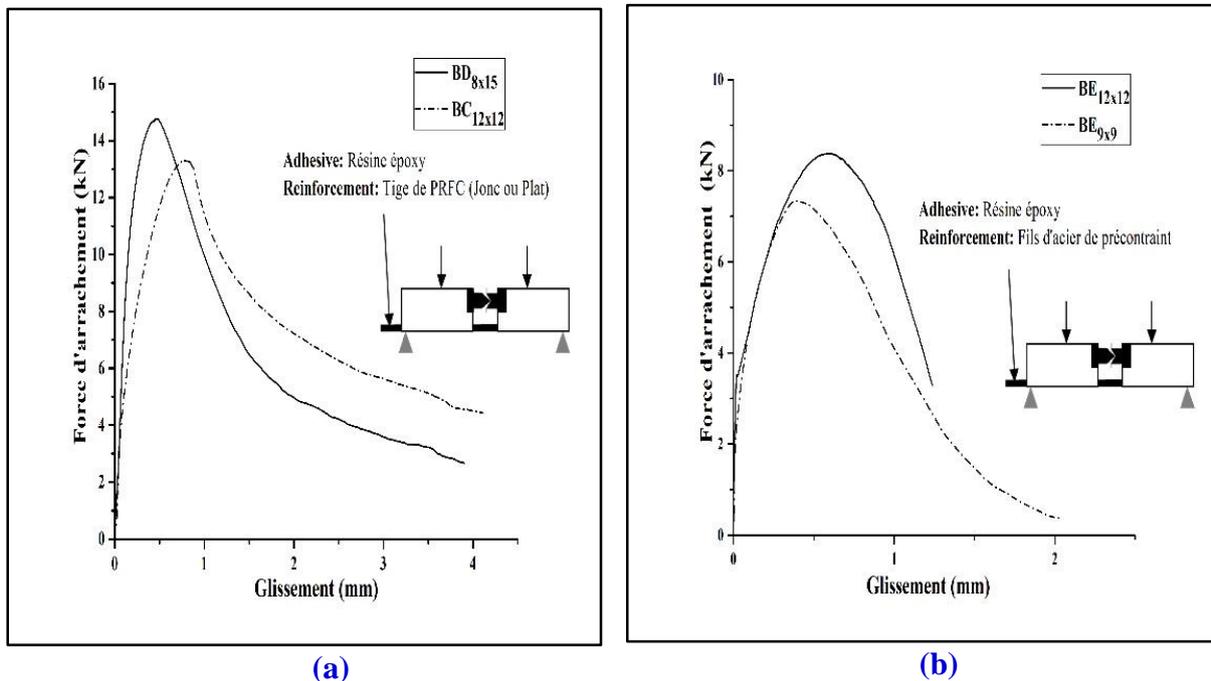


Figure II. 6: Courbes force d'arrachement-glissement, (a) courbes force d'arrachement-glissement pour les renforts composites, (b) courbes force d'arrachement-glissement pour les fils d'acier de précontraint

II.5. Discussion des résultats

II.5.1. Effet de changement de la taille d'engravure

Pour les échantillons BE_{9×9} et BE_{12×12} renforcés avec le fil d'acier de précontrainte, l'augmentation de la taille de l'engravure a entraîné une augmentation de la charge de rupture.

Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la surface de contact entre la résine et le béton, ce qui entraînera une réduction significative des contraintes de traction induites entre l'adhésif et le béton. Ces résultats se concordent avec ceux rapportés par **Sharaky et al. [74]**.

II.5.2. Effet de type du renfort

Un système de classement a été élaboré pour évaluer la performance des renforts, comme le montre dans la **Figure II.7**. Ce classement repose sur deux critères : la force d'arrachement maximale et le taux d'utilisation de la capacité de traction de l'armature. Le **Tableau II.7** résume les résultats obtenus.

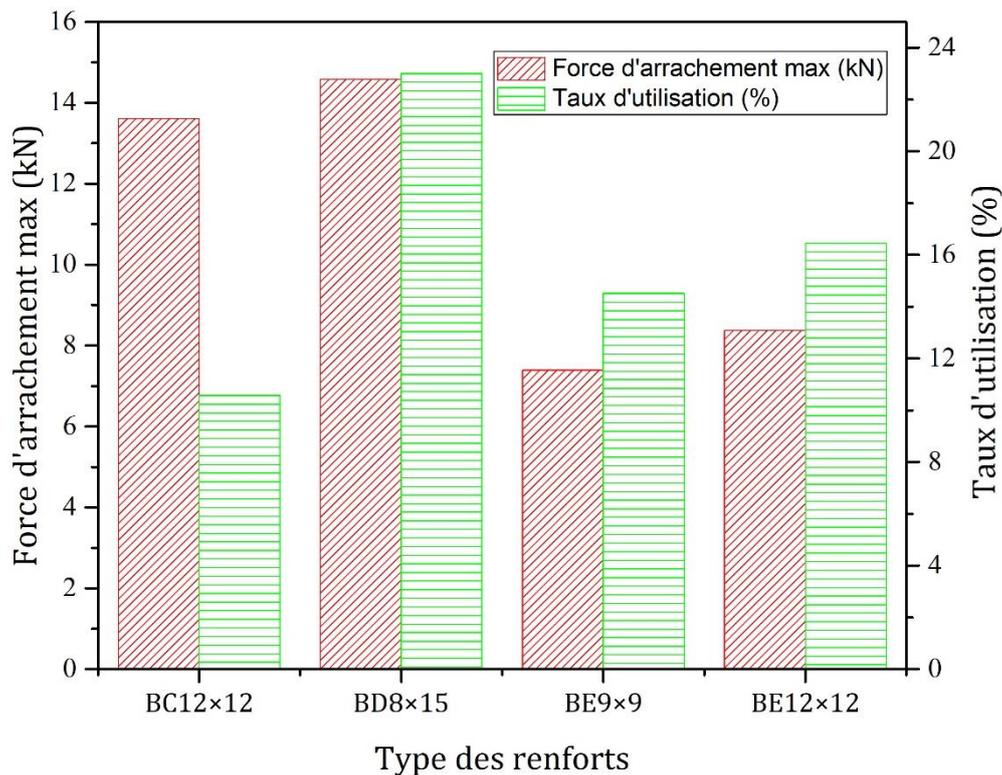


Figure II. 7: Système de classement pour les différents types des renforts.

D'après la **Figure II.7** et le **Tableau II.7**, il est visible que le pourcentage de l'efficacité d'utilisation de la capacité de traction des armatures est faible en raison de l'utilisation d'une faible longueur d'encrage. L'utilisation de la capacité de traction dépend du rapport

section/périmètre (C.S/P_{er}). Au fur et à mesure que le rapport entre le C.S et le P_{er} diminue, l'efficacité de l'utilisation de la pleine capacité de traction augmente.

Tableau II. 7: L'utilisation de la capacité de traction du renfort.

<i>BT_{w×h}</i>	<i>Type du renfort</i>	<i>C.S</i> (mm ²)	<i>P_{er}</i> (mm)	<i>C.S/Per</i>	<i>f_{fu}</i> (MPa)	<i>σ_{max} / f_{fu}</i> (%)	<i>F_{max}</i> (kN)
<i>BC_{12×12}</i>	Jonc de PRFC	50,24	25,12	2	2561,23	10,58	13,61
<i>BD_{8×15}</i>	Plat de PRFC	25	25	1	2538,15	23,02	14,59
<i>BE_{9×9}</i>	Fil d'acier de	28,26	18,84	1.5	1800	14,52	7,39
<i>BE_{12×12}</i>	précontraint	28,26	18,84	1.5	1800	16,46	8,37

✚ C.S et P_{er} sont respectivement la section et le périmètre de la barre d'armature.

✚ σ_{max} : est la contrainte axiale dans l'armature (MPa) à la force d'arrachement maximale.

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{C.S} \quad (II.4)$$

✚ f_{fu} : est la limite d'élasticité du renfort utilisé (MPa).

Le meilleur renfort utilisé dans ce travail était le plat de fibre de carbone. Il a un rapport C.S/Per plus faible et montre une meilleure performance en termes de force d'arrachement et de pourcentage d'efficacité d'utilisation de la résistance à la traction. Le taux d'utilisation du plat de carbone est supérieur à celui du jonc de carbone, avec une augmentation de 12,5%, et supérieur de 8% à celui du fil d'acier de précontrainte. Cela s'explique par la forme de l'armature, et non pas par la surface de contact, puisque le jonc de fibre de carbone offre une plus grande surface de contact que les plats de carbone lisses. Les tiges en PRFC de la série BC_{12×12} ont exhibé le plus faible classement en termes d'efficacité d'utilisation de la résistance à la traction.

II.5.3. Mode de rupture

La **Figure II.8** montre le mode de rupture obtenu pour tous les échantillons. Le mode de rupture que l'on retrouve dans tous les essais est celui de la rupture dans le béton, où les fissures commencent à se propager de l'extrémité libre à l'extrémité chargée. La rupture se produit lorsque la fissuration atteint l'extrémité chargée, ce qui peut s'expliquer par la faible résistance du béton et la courte longueur d'ancrage utilisée dans ces configurations.

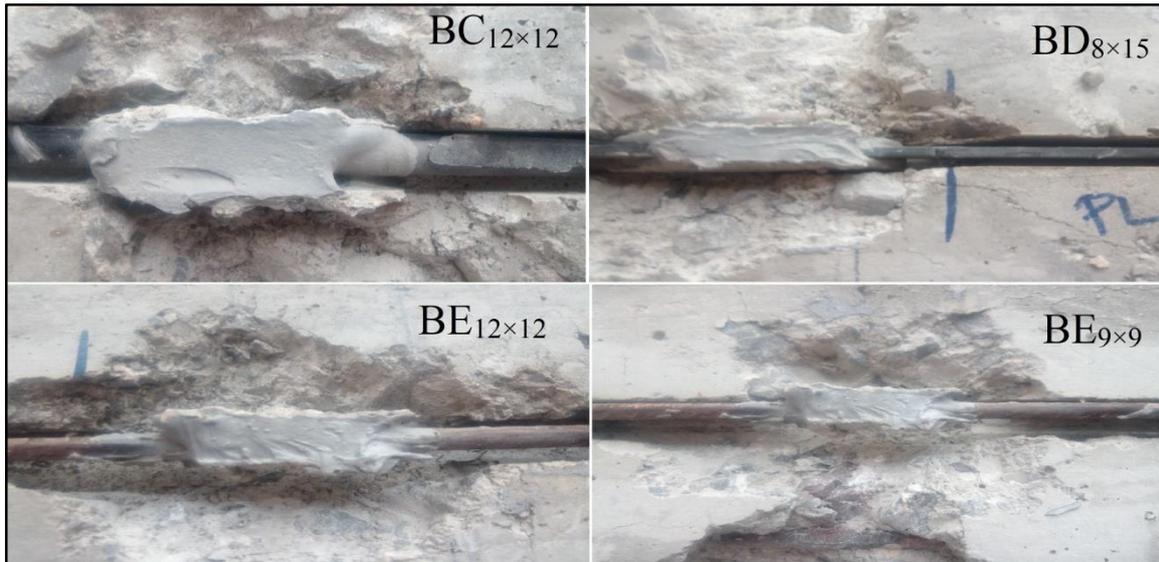


Figure II. 8: Mode de rupture .

II.5.4. Prédiction de la contrainte d'adhérence-glissement

L'étude de la relation entre la contrainte d'adhérence et le glissement sera utile pour modéliser des éléments renforcés par ce genre de matériaux. La courbe de glissement-contrainte d'adhérence du fil d'acier de précontrainte selon la technique NSM est modélisée par l'équation de **Xing et al. [78]** pour pré-détecter la courbe de glissement d'adhérence des barres d'armature d'acier et du béton.

$$\tau_{av} = \tau_u \left(\frac{S}{S_u} \right)^a \text{ pour } 0 \leq S \leq S_u \quad (II.5)$$

$$\tau_{av} = \tau_u \frac{S/S_u}{b \left(\frac{S}{S_u} - 1 \right)^3 + S/S_u} \text{ pour } S \geq S_m \quad (II.6)$$

Avec :

- ✚ τ_{av} : la contrainte d'adhérence moyenne du fil d'acier de précontrainte.
- ✚ S : le glissement du fil d'acier de précontrainte.
- ✚ τ_u : la contrainte d'adhérence maximale.
- ✚ S_u : le glissement qui correspond à la contrainte d'adhérence maximale.
- ✚ a et b sont des paramètres de montée et de descente de la courbe glissement-contrainte.

Pour les échantillons avec une barre de PRFC (tige ou plat), les équations utilisées pour la branche ascendante et descendante sont les équations utilisées par **De Lorenzis et al. [65]**.

$$\tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha \text{ pour } 0 \leq s \leq s_m \quad (II.7)$$

Pour la branche descendante, l'équation suivante a été adoptée :

$$\tau (s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^{\alpha'} \quad \text{pour } s \geq s_m \quad (II.8)$$

- ✚ τ et s sont, respectivement, la contrainte d'adhérence locale et le glissement local.
- ✚ τ_m et s_m sont la contrainte d'adhérence maximale et le glissement qui correspond à la contrainte d'adhérence maximale.
- ✚ α et α' sont des paramètres qui varient entre 0 et 1 pour α , et entre -1 et 0 pour α' .

Le **Tableau II.8** donne les valeurs des paramètres inconnus étalonnés par les meilleurs résultats expérimentaux d'ajustement obtenus pour des courbes représentatives types.

Tableau II. 8: Paramètres d'ajustement pour les équations s- τ .

<i>Fils d'acier de précontraint</i>				
<i>Echantillon</i>	τu	$s u$	a	b
	(MPa)	(mm)		
<i>BE_{9×9}</i>	9,88	0,39	0,35	0,5
<i>BE_{12×12}</i>	11,32	0,67	0,3	2
<i>Jonc de fibre de carbone</i>				
<i>Specimen</i>	τ_m	s_m	α	α'
	(MPa)	(mm)		
<i>BC_{12×12}</i>	13,43	0,77	0,42	-0,67
<i>BD_{8×15}</i>	18,50	0,43	0,35	-0,75

Les comparaisons entre τu calculé selon les équations (II.5-II.8) pour les branches ascendantes et descendantes et les résultats expérimentaux pour les quatre configurations (*BE_{9×9}*, *BE_{12×12}*, *BC_{12×12}*, *BD_{8×15}*) sont présentées à la **Figure II.9**. D'après cette dernière, on peut conclure que les courbes prédites concordent avec les courbes expérimentales.

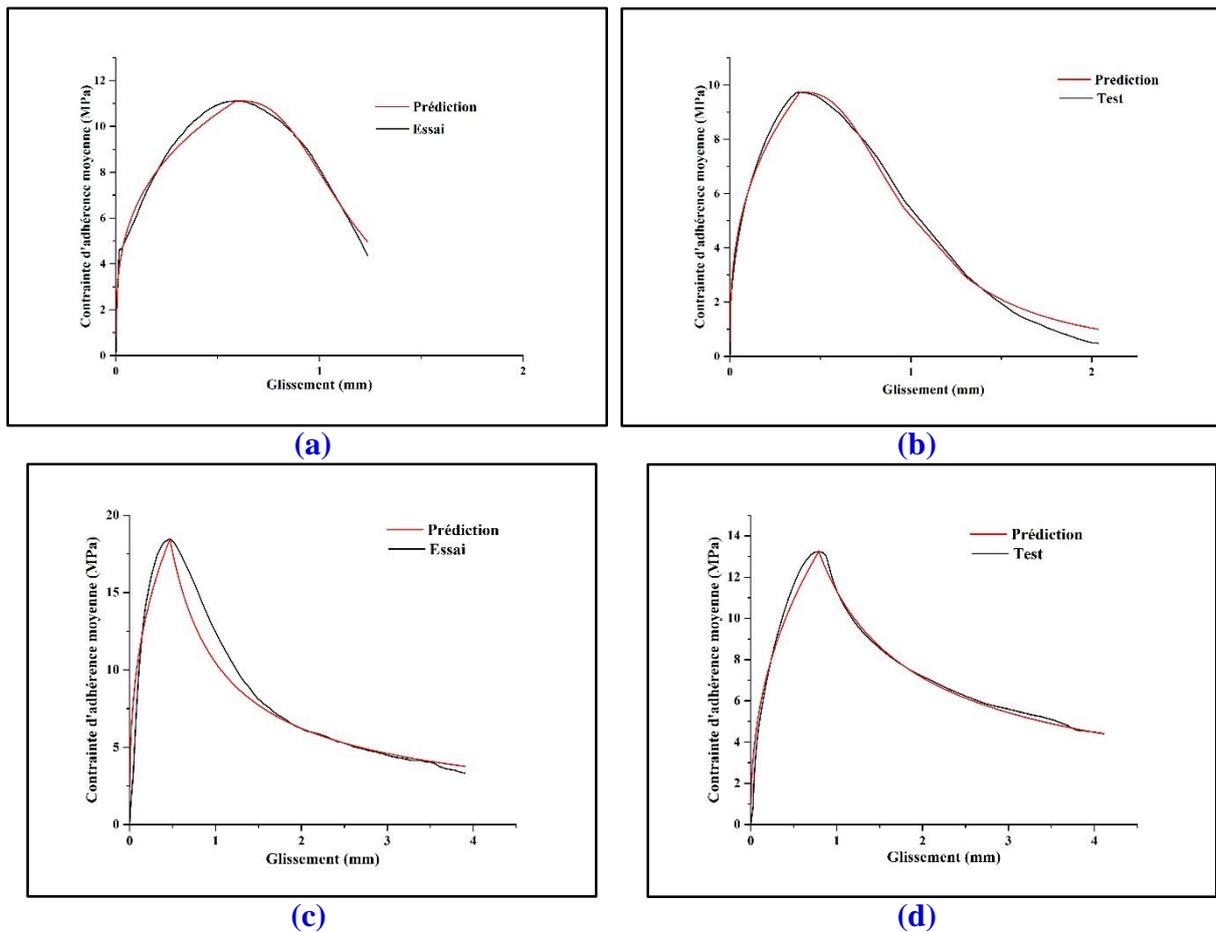


Figure II. 9: Comparaison des courbes de glissement-contrainte d'adhérence entre les résultats des tests et les résultats prévus, (a) échantillons BE12×12, (b) échantillons BE9×9, (c) spécimen BC8×15, (d) spécimen BD12×12.

II.5.5. Effet de la résistance du béton

La Figure II.10 présente une comparaison des résultats obtenus dans le cadre de cette recherche avec ceux de Merdas *et al.* [79], d'un jonc de fibre de carbone de 8 mm de diamètre soumis à un essai d'arrachement. La Figure II.10 montre que la force d'arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression du béton. Pour une résistance du béton supérieure à 30 MPa, le mode de rupture le plus souvent observé est la rupture de liaison à l'interface barre-époxy. Dans ce cas, la résistance du béton n'a aucun effet sur le mode de défaillance. Cependant, pour les bétons à faible résistance à la compression, la rupture s'est produite dans le béton.

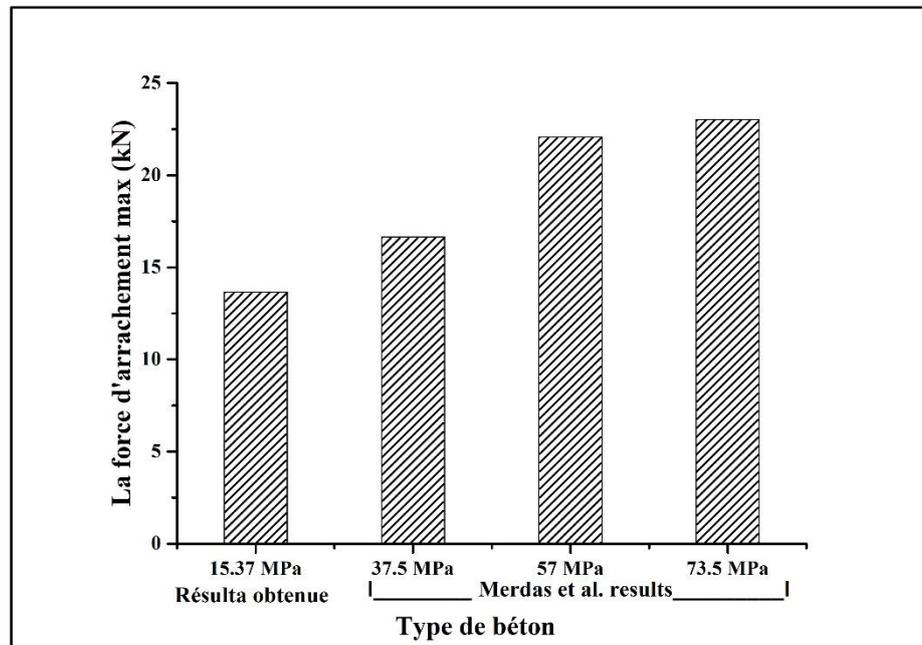


Figure II. 10 : Effet du changement de type de béton sur la force d'arrachement.

Conclusion

Dans cette étude, le comportement d'adhérence entre le béton et les renforts NSM utilisant un adhésif époxy a été examiné, une caractérisation mécanique et physique des matériaux (armatures, béton) a été effectuée. Les renforts ont été observés à l'aide d'un microscope électronique à balayage, et les sections longitudinales et transversales de l'acier de précontrainte présentent une surface solide raseuse par rapport au jonc de carbone.

Au total, huit poutres ont été testées à l'aide d'essais d'arrachement par flexion sous un chargement monotone jusqu'à la rupture. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✚ Le procédé de renforcement NSM utilisant des renforts tels que les joncs et les plats ou les fils d'acier de précontrainte peut être utilisé avec du béton à faibles caractéristiques mécaniques.
- ✚ Selon la technique NSM, l'utilisation d'acier de précontrainte comme armatures dans le béton est valable. Les armatures ont de bonnes propriétés d'adhérence avec le béton, mais elles présentent plus d'inconvénients et moins d'avantages que le PRFC, du fait de leur poids.
- ✚ L'augmentation de la taille d'engravure pour les éprouvettes avec un adhésif époxy et le fil d'acier de précontrainte n'a pas d'influence significative sur le mode de rupture.

- ✚ L'augmentation de la taille d'engravure induit une augmentation de la charge de rupture.
- ✚ Le mode de rupture observé pour tous les échantillons est la rupture dans le béton. Cela peut s'expliquer par la faible résistance du béton. Bien que la longueur d'adhérence utilisée soit faible, la rupture interfaciale soit dans la résine-béton ou résine-renfort n'a pas été observée, ce qui implique la bonne qualité des matériaux de renforcement et l'efficacité de cette technique de NSM.

CHAPITRE III

EFFET DE L'AJOUT DU SABLE A LA RÉSINE

III.1. Introduction	56
III.2. Les types de charges ajoutés à la résine	56
III.3. Utilisation des charges minérales dans les résines époxydes	58
III.4. Procédure expérimentale	59
III.4.1. Propriétés des matériaux	59
<i>III.4.1.1. La résine</i>	<i>59</i>
<i>III.4.1.2. La charge minérale</i>	<i>59</i>
<i>III.4.1.3. Malaxage</i>	<i>60</i>
III.4.2. Caractérisation du matériau composite	60
<i>III.4.2.1. Détermination de la masse volumique</i>	<i>60</i>
<i>III.4.2.2. Caractéristiques mécaniques</i>	<i>61</i>
<i>III.4.2.3. Collage résine-renfort</i>	<i>65</i>
<i>III.4.2.4. Analyse thermique</i>	<i>66</i>
<i>III.4.2.5. Analyse chimique</i>	<i>67</i>
<i>III.4.2.6. Microscope électronique a balayage</i>	<i>68</i>
III.5. Essai d'adhérence	69
III.5.1. Description du matériel	69
III.5.2. Préparation des échantillons	70
III.5.3. Déroulement de l'essai	71
III.5.4. Mode de rupture	72
III.5.5. Modèle théorique	72
Conclusion	73

III.1. Introduction

L'efficacité du renforcement des éléments ou structures en béton armé à l'aide de PRFC dépend de l'adhérence entre le béton et le PRFC. Comme décrit dans le chapitre I, la résine a pour rôle de sceller le renfort dans le béton et transférer la charge vers le renfort, donc il est important que la résine soit soigneusement sélectionnée lors des travaux de renforcement en particulier pour le décollement interfacial, les mécanismes sont liés aux propriétés mécaniques de l'adhésif et à la résistance à la rupture inter-laminaire. Il est donc nécessaire d'améliorer la ductilité, la ténacité et la rugosité de l'adhésif [89]. **Sen et al. [90]** ont étudié l'effet du climat de la Floride (la température, l'air, l'humidité et les cycles gel/dégel) sur le renforcement du béton par le PRFC. Les résultats obtenus indiquent que l'adhérence est affectée par ces effets environnementaux. **Al-Safy et al. [91]** ont étudié les propriétés thermiques et mécaniques d'un matériau de scellement renforcé par les nano-argiles. La calorimétrie à balayage différentiel (DSC), la diffraction des rayons X (XRD) ont été utilisées pour caractériser cet adhésif. Les résultats obtenus indiquent que l'ajout des charges à la résine n'a pas une influence sur la température de transition vitreuse (T_g). La résistance à la traction de l'adhésif a montré une augmentation avec l'addition de la nano-argile. Cependant, une amélioration du module de traction a été constatée pour toute addition de la nano-argile. Les essais d'arrachement qui ont été effectués directement indiquent que les PRFC collés par une résine chargée avec la nano-argile améliorent la propriété d'adhérence.

L'utilisation de la technique NSM pour renforcer des poutres en béton armé a été également étudiée par **Hassan et al. [92]**. Ils ont constaté que la résistance du béton n'a pas d'effet sur la capacité de charge de la poutre renforcée en cas de rupture interfaciale béton/renfort. D'autre part, lorsque la résistance à la traction de la résine augmente, la charge de rupture augmente également. Donc la présente étude vise à obtenir un matériau de scellement efficace et économique, utilisé pour le collage de PRFC. Les propriétés mécaniques et thermiques ainsi que l'effet d'ajout de la charge à la résine sur les propriétés chimiques et d'adhérence seront discutés.

III.2. Les types de charges ajoutés à la résine

Différentes natures de charge peuvent être utilisées. On distingue trois grandes familles [93] :

✚ Les charges minérales telles que le carbonate de calcium, le sulfate de calcium, qui sont souvent utilisées comme additif permettant de diminuer le coût de revient du matériau. Elles permettent aussi de modifier certaines propriétés mécaniques.

✚ Les charges métalliques qui permettent de conférer au matériau des propriétés électriques, ou d'améliorer son comportement thermique.

✚ Les charges organiques (souvent des polymères) sont, la plupart du temps, utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques et faciliter la mise en œuvre du matériau.

Les différentes familles de charges peuvent être décomposées et classées suivant leur type [93] :

✚ Charges particulaires renforçantes

Elles sont constituées de très fines particules (sphères, écailles, paillettes, ...), lorsqu'elles sont bien dispersées dans la matrice, elles permettent de répartir les contraintes dans la masse du composite (**Figure III.1**). Dans ce type de charge, les plus utilisées sont les billes de verres, creuses ou non, de diamètre compris entre 10 et 150 μ m. N'étant pas poreuses, elles n'absorbent pas la matrice et permettent donc de ne pas trop faire augmenter la viscosité, elles améliorent la résistance aux contraintes de flexion et de compression, la dureté et permettent aussi de diminuer la masse volumique du mélange. Elles ont la possibilité d'augmenter les propriétés électriques des matériaux, mais aussi d'améliorer la rigidité mécanique et touchent les propriétés physico-chimiques en permettant au matériau d'avoir une meilleure tenue aux agents chimiques [94].

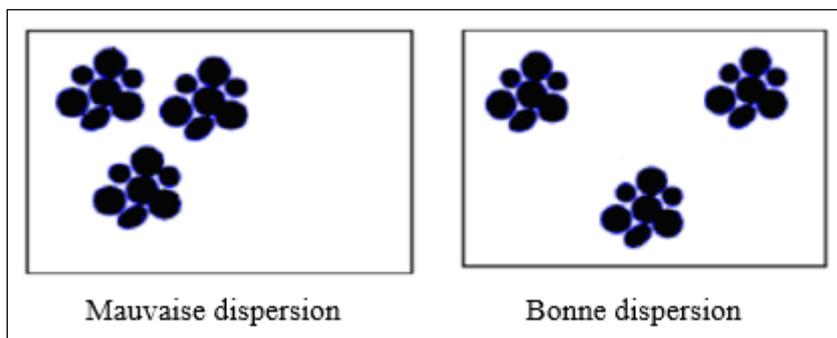


Figure III. 1 : Les différents états de dispersion [93].

✚ Charges particulaires inertes

Ayant un faible coût, leur rôle essentiel est de réduire le prix de revient du matériau. Elles permettent aussi d'améliorer la mise en œuvre et certaines propriétés telles que la dureté, la résistance à la rupture... Ce type de charge regroupe surtout les matières minérales telles que : les silices, les kaolins (silicates d'aluminium hydratés), le carbonate de calcium, la craie qui permet de diminuer le prix de revient des mélanges, le talc qui confère aux mélanges de bonnes propriétés mécaniques et une grande résistance aux acides [93].

Renforts fibreux.

Les fibres de renforcement des matériaux composites proviennent de deux origines :

- Les fibres minérales : fibre de verre, de carbone et céramiques.
- Les fibres organiques.

Les qualités importantes recherchées lors de l'introduction de fibres dans une matrice sont en premier lieu : un module de Young et une résistance à la rupture élevés et tous les deux sont reliés à la légèreté du matériau [93].

III.3. Utilisation des charges minérales dans les résines époxydes

Les propriétés d'une résine chargée dépendent des propriétés de la résine elle-même, des propriétés des particules de charges, de leur dispersion, de leur distribution géométrique et de leur interaction avec la résine. L'interface est la zone où s'effectue le transfert de contrainte de la matrice vers le renfort, c'est également la zone où sont concentrées les contraintes générées lors de la cuisson. L'interface charge-matrice, souvent considérée comme une surface de contact d'épaisseur quasi nulle, forme en fait une couche autour de la particule de charge dans laquelle la structure de la résine est différente de celle du cœur. L'interface est donc considérée comme une zone d'interactions [95].

Depuis une vingtaine d'années, il est admis que les silices contribuent à améliorer certaines propriétés des polymères [93]. Le mode de synthèse de la charge minérale et donc de la silice est essentiel puisqu'il permet de moduler les propriétés de la charge en rendant son utilisation spécifique pour un type de renforcement donné. De nombreux paramètres entrent en ligne de compte. Les plus importants sont la fonctionnalité à la surface, la quantité d'eau adsorbée, l'agrégation des particules, la structure et la taille des particules (ce qui est associé très souvent à la surface spécifique).

Le renforcement dû à la silice peut être modifié en agissant sur trois facteurs [96] :

 La taille et la surface spécifique des particules : elles déterminent la surface de contact entre la silice et la résine époxyde. Les charges de très petite taille, avec un caractère hydrophile important, augmentent généralement la viscosité plus que les charges de plus grande taille à masse égale. C'est notamment le cas des silices nanométriques [93].

 L'activité chimique de la silice, c'est-à-dire la nature des groupes présents à la surface de celle-ci (groupes silanol et siloxane) est le paramètre prédominant qui détermine la force des interactions silice-silice et résine-silice [93].

III.4. Procédure expérimentale

III.4.1. Propriétés des matériaux

III.4.1.1. La résine

Dans l'étude actuelle, l'adhésif utilisé est une résine époxy à deux composants, elle porte le nom commercial SIKADUR 330[®], il est généralement utilisé pour le collage extérieur des tissus en PRFC. Cet adhésif est choisi car il est utilisé dans un large éventail d'applications sur le terrain et des projets de recherche concernant les systèmes de renforcement. Elle est donc bien référencée dans la littérature [97- 101]. En outre, il a été fourni par l'entreprise SIKA qui possède une grande expérience dans le domaine du renforcement du béton avec des matériaux PRF, l'emballage était composé du composant A, qui est la résine de couleur blanche et du composant B, qui est le durcisseur de couleur noire.

Les deux composants doivent être mélangés lentement, dans une proportion de 4A : 1B (en poids), jusqu'à obtention d'une couleur uniforme et homogène. Les propriétés de la résine seront illustrées dans le **Tableau III.1**.

Tableau III. 1 : Propriétés de la résine époxy.

<i>Densité (kg/l)</i>	<i>Résistance en traction (MPa)</i>	<i>Module de Young (MPa)</i>	<i>L'allongement à la rupture (%)</i>	<i>Température de T.V (°C)</i>
1.3	30	4500	9	73,5

III.4.1.2. La charge minérale

Les charges minérales ont été choisies par rapport à leur taux de silice important et leur disponibilité. Dans cette étude, nous avons utilisé le sable siliceux qui provient de Tlemcen Djbel-El Ghoul. Ce sable siliceux a des grains de forme roulées arrondies et de surface lisse.

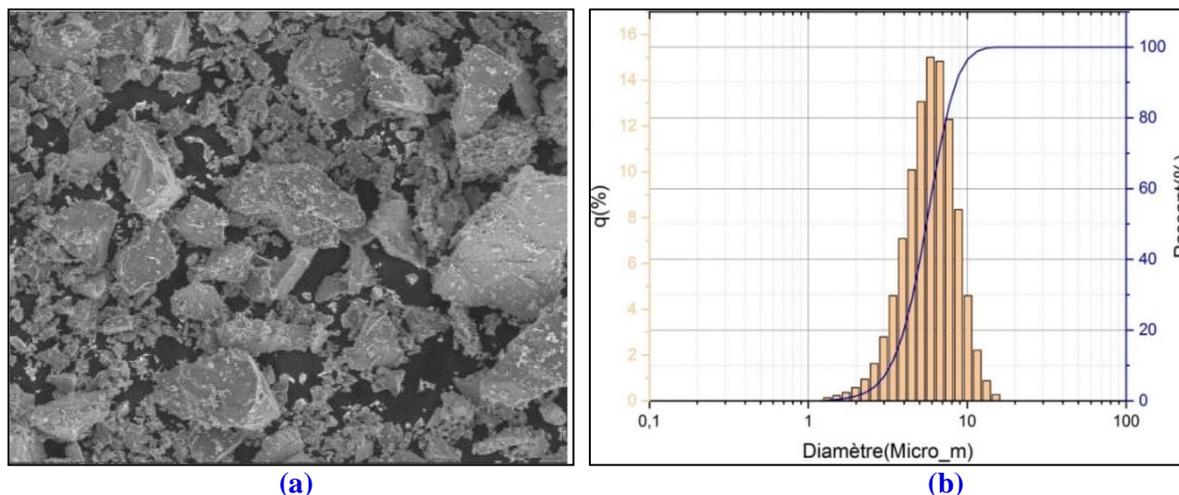
Il est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal (grosseur maximale) qui n'excède pas 3,0 mm.

Ce sable est lavé puis mis au four à une température de 400°C pour éliminer les matières organiques, puis broyé dans un broyeur à boulet et tamisé pour obtenir des grains de taille inférieure à 45µm.

La composition chimique est représentée sur le **Tableau III.2**. La distribution des tailles des grains est présentée sur la **Figure III.2-b**. l'image prise au microscope électronique (**Figure III.2-a**) montre que les grains ne sont pas de géométrie sphérique mais comportent des angles et des arêtes.

Tableau III. 2 : Composition chimique du sable.

<i>Composants</i>	<i>SiO₂</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>
<i>Teneur (%)</i>	97,22	1,5	0,19	0,5	0,17

**Figure III. 2 :** Description du sable, (a) image MEB du sable, (b) analyse granulométrique.

III.4.2.3. Malaxage

L'adhésif est composé de deux parties, la résine (partie A) et le durcisseur (partie B), qui seront mélangés avec un rapport (4 :1) mais lors de l'ajout d'une charge, la charge doit être mélangée à l'une ou l'autre des parties A ou B avant de mélanger A et B ensemble. Dans le cas de l'ajout du renfort à un mélange de A et B après leur mélange, l'ouvrabilité est en grande partie réduite, en raison de l'interaction des parties adhésives qui empêche la pénétration de sable.

Donc la synthèse des composites est faite par le mélange de la résine époxy sikadur 330 et la charge minérale pendant 10 minutes, ensuite le durcisseur est versé et mélangé pendant 10 minutes. Les différents pourcentages des charges sont présentés sur le **Tableau III.3**.

Tableau III. 3 : Pourcentage de sable ajouté à la résine.

<i>Type de mélange</i>	<i>Mélange 1</i>	<i>Mélange 2</i>	<i>Mélange 3</i>	<i>Mélange 4</i>
<i>Taux de charge</i>	Résine+0%	Résine+5%	Résine+10%	Résine+15%

III.4.2. Caractérisation du matériau composite

III.4.2.1. Détermination de la masse volumique

La masse volumique réelle est déterminée suivant la méthode de la balance hydrostatique, selon la norme NF T 51-561. Cette méthode, basée sur le principe d'Archimède, est plus précise

qu'un simple rapport masse sur volume. Les masses volumiques des échantillons sont déterminées sur une moyenne de deux échantillons, par double pesée à 22 °C. La balance utilisée est une balance analytique équipée d'un dispositif de mesure et d'un logiciel qui permet de donner directement la masse volumique de l'échantillon, en introduisant les valeurs massiques à l'aire libre et sous l'eau. Les résultats trouvés expérimentalement sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau III. 4 : La masse volumique des résines.

Type de mélange	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3	Mélange 4
La masse volumique (g/cm ³)	1,485	1,514	1,574	1,604

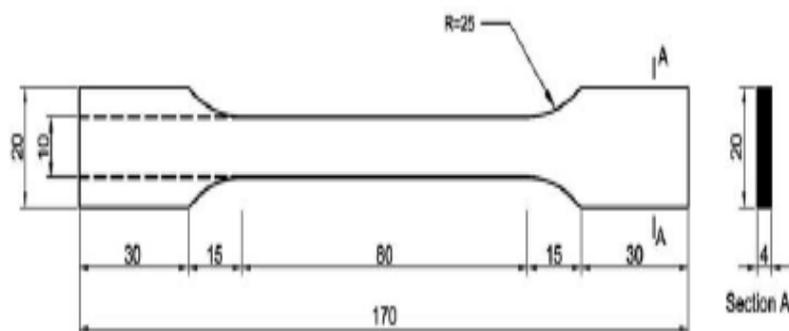
III.4.2.2. Caractéristiques mécaniques

✚ Essai de traction

Les matériaux composites sont recherchés pour leurs propriétés mécaniques. Dans notre étude, l'élaboration de nouveaux composites à base d'une charge minérale nous procure davantage l'effet que présentent ces charges dans l'amélioration des contraintes mécaniques. Pour ces essais, différents échantillons ont été préparés à base de la résine non chargée (matrice) et chargées. A partir des échantillons décrits dans la partie suivante, des essais mécaniques en traction ont été réalisés selon la norme ISO 527-2 [102].

Cette étude nous a permis d'observer l'évolution des propriétés mécaniques des échantillons de différentes formulations, et d'observer l'effet du taux de remplacement sur le module élastique, la déformation et la charge ultime.

Les échantillons sont préparés dans des moules en silicone, ces derniers ont comme avantage le faible transfert thermique lors de la réticulation de la résine. Cette méthode nous donne des échantillons avec de bonnes surfaces et moins de défauts, contrairement à la méthode de découpe des plaques qui donne des échantillons avec des surfaces dégradées.



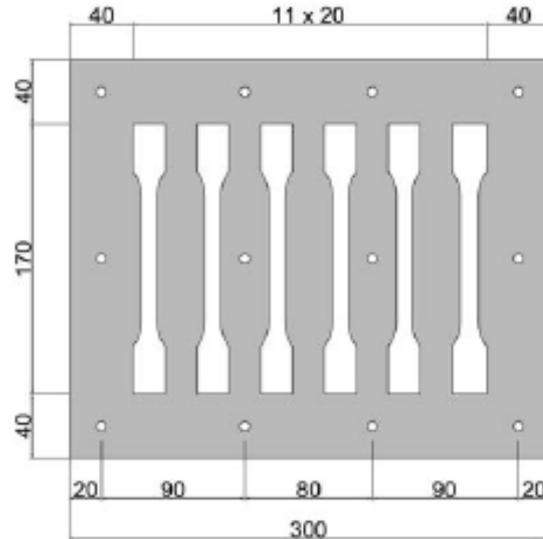


Figure III. 3 : Géométrie et dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de traction.

Les essais de traction sont utilisés pour observer l'évolution des propriétés mécaniques jusqu'à la rupture. Les essais ont été réalisés à l'Unité de Recherche de l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 (URME) avec l'appareil MTS qui dispose d'un capteur de force de 50 kN à température ambiante (**Figure III.4**).

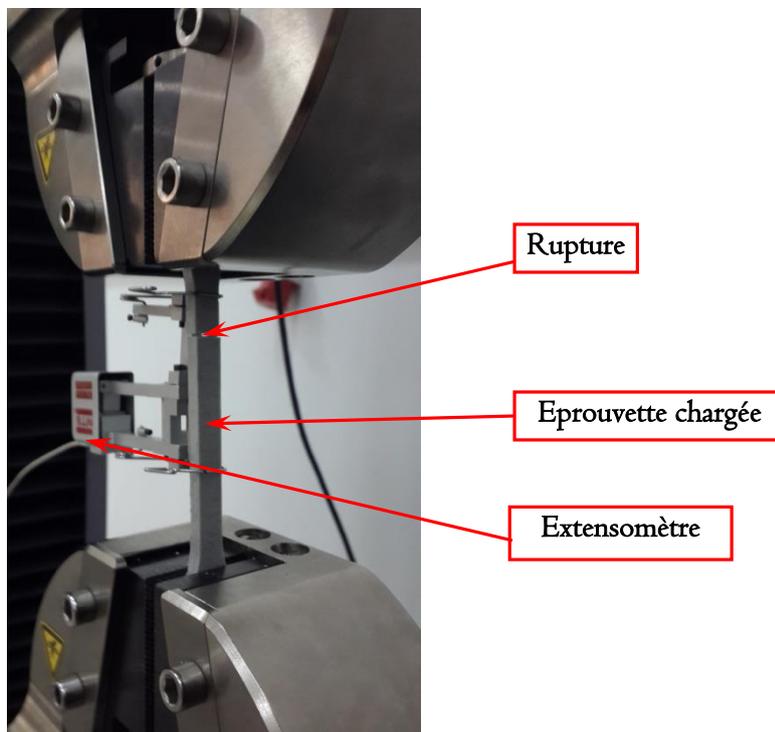


Figure III. 4 : Essai de traction sur les différents échantillons de résine.

Pour chaque type de matériau, trois éprouvettes ont été caractérisées. Les diagrammes suivants présentent les courbes moyennes de contrainte en traction. Les résultats obtenus sont résumés dans la **Figure III. 5** et le **Tableau III.5**.

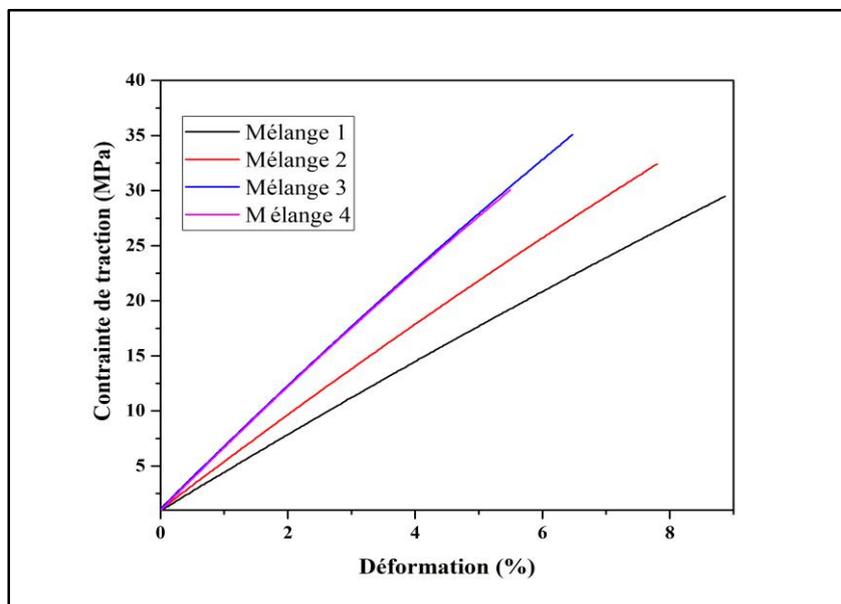


Figure III. 2 : Courbes d'évolution de la contrainte en traction pour les quatre mélanges.

Tableau III.5 : Propriétés mécaniques en compression des mélanges.

<i>Mélanges</i>	σ_{max} (MPa)	ϵ_{rup} (%)	E (GPa)
<i>Mélange 1</i>	29,47	8,87	4,38
<i>Mélange 2</i>	32,82	7,93	4,92
<i>Mélange 3</i>	35,52	6,5	5,83
<i>Mélange 4</i>	31,28	5,5	5,82

L'effet du taux de charge est très remarquable dans l'augmentation de la contrainte à la rupture et le module de Young avec une diminution de déformation. On remarque un comportement élastique pour tous les mélanges, plus la charge augmente, plus la déformation d'éprouvette diminue et le comportement devient plus fragile. 10% du taux de charge présente des meilleurs résultats pour la contrainte et le module d'élasticité avec une valeur minimale de l'allongement à la rupture.

✚ Essai de Charpy

L'essai de résistance au choc résulte de l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse de percussion avec une énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde. Il permet de déduire dans des conditions expérimentales données, la fragilité ou la ductilité du matériau.

Les résultats obtenus lors des essais Charpy sur la résine Sikadur 330 chargée sont présentés sur la **Figure III.6**.

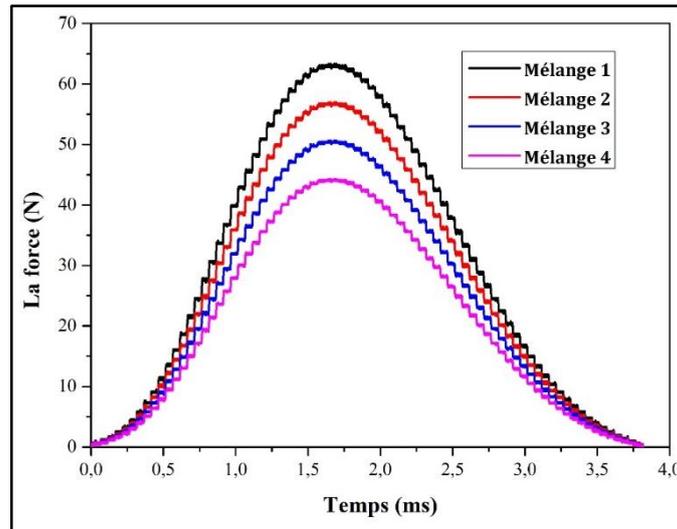


Figure III. 6 : Résultats d'essai de Charpy.

Nous observons une diminution remarquable de l'énergie pour tous les composites par rapport au témoin, l'ajout des charges a la résine fragilise le composite. La **Figure III.7** présente les modes de rupture obtenus.



Figure III.7 : Modes de rupture obtenus pour les différents échantillons de résine.

D'après les essais mécaniques, on constate que le mélange 3 est le meilleur mélange qui nous a permis d'obtenir des caractéristiques mécaniques optimales.

III.4.3.3. Collage résine-renfort

Afin de déterminer les propriétés de collage entre le composite et la résine, on a réalisé des essais sur des plats en composites collés entre eux par la résine. Le montage suivant présente les dimensions et la configuration utilisée **Figure III.8**.

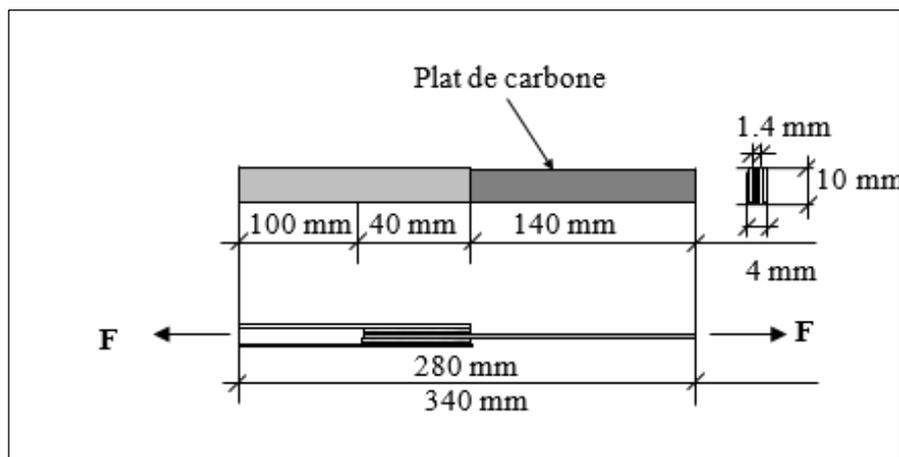


Figure III. 8 : Schéma de l'essai d'adhérence résine-composite.

Les essais ont été effectués après 7 jours de cure à l'aide d'une presse de 50 kN de capacité, pilotée en déplacement (1 mm/mn). Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau III.7**.

Tableau III. 6 : Résultats expérimentaux pour l'adhérence résine/composite.

<i>Échantillon</i>	F_{max} (kN)	<i>La moyenne</i> (kN)
	6,22	
<i>Mélange 1</i>	5,87	6,37
	7,03	
	8,54	
<i>Mélange 3</i>	8,97	8,97
	9,43	

Le mode de rupture type observé pour le collage résine-composite se produit de manière brutale, par rupture d'adhérence au niveau de la surface collée. On constate que la résine retient des traces de fibres de carbone suite à leur forte adhésion chimique. Le mélange 3 présente une adhésion plus forte que le mélange 1 avec une augmentation de 29%. Il est important de signaler

l'effet du nettoyage des renforts de carbones avec l'acétone sur le processus d'adhésion, un bon nettoyage du renfort assure une bonne adhésion.

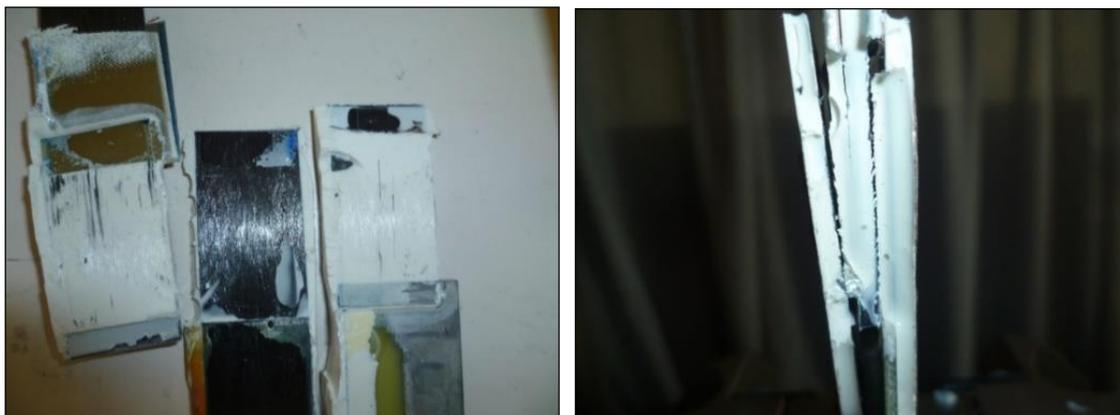


Figure III. 9 : Modes de rupture résine/renfort.

III.4.3.4. Analyse thermique

✚ Calorimétrie à balayage différentiel (DSC)

L'une des méthodes couramment utilisées pour déterminer la température de transition vitreuse (T_g) des matériaux, à laquelle le matériau passe d'un état rigide à un état caoutchouteux, est la calorimétrie à balayage différentiel (DSC). Cette méthode d'essai consiste à chauffer le matériau à une vitesse constante à l'aide d'un gaz de purge spécifié fourni à un débit contrôlé. Pendant le test, le comportement du matériau à tester est comparé à celui d'un matériau de référence. À cette fin, on surveille en permanence la différence de température ou la différence d'apport de chaleur entre les deux matériaux à l'aide d'un dispositif de détection approprié. Une transition est marquée par l'absorption ou la libération d'énergie par l'échantillon, ce qui entraîne un décalage correspondant du pic ou de la ligne de base endothermique ou exothermique dans la courbe de chauffage ou du refroidissement [104].

La **Figure III.10** présente les résultats obtenus en termes de flux de chaleur en fonction de la température. La T_g peut être obtenue en mesurant les trois températures suivantes : (i) la température de départ extrapolée T_{eig} , (ii) la température médiane T_{mg} et (iii) la température finale extrapolée T_{efg} (**Figure III.10**). Selon la norme [104], la température T_{mg} est considérée comme la plus significative et peut être désignée comme la T_g pour la plupart des applications.

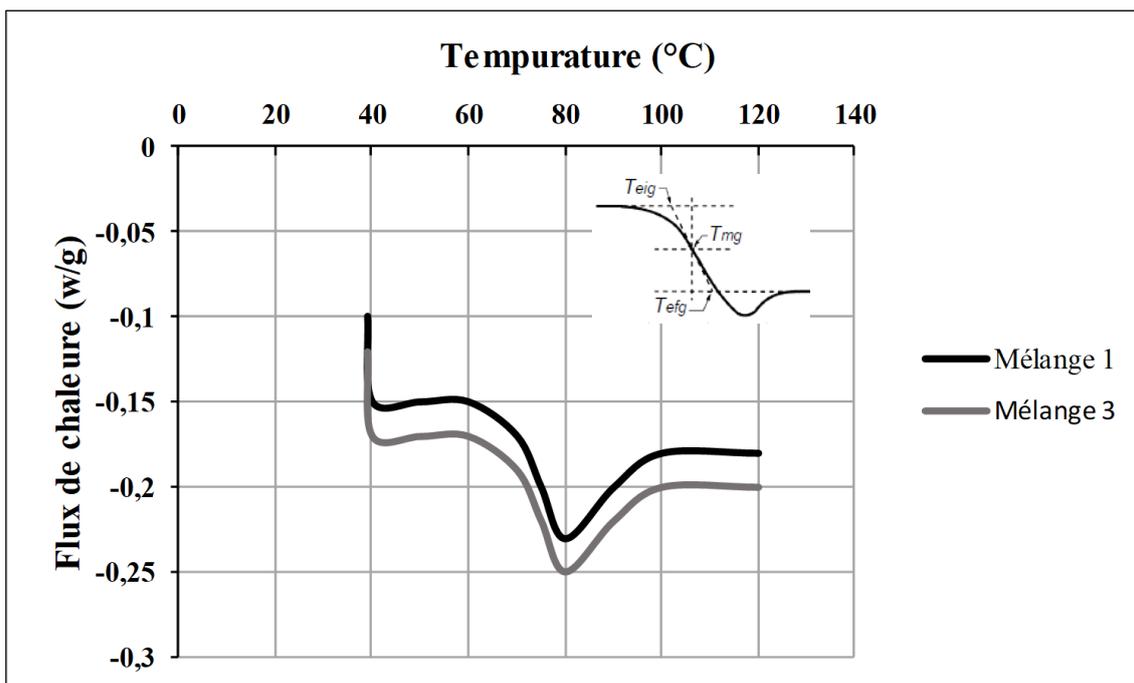


Figure III. 3 : Résultats du test de DSC pour les mélanges de résine 1 et 3.

De la **Figure III.10**, les températures de transition vitreuse pour le mélange 1 et le mélange 3 sont 67.5°C et 68 °C respectivement. **Laouchedi et al. [105]** ont démontré que la présence de la charge minérale n'a pas d'influence notable sur la température de transition vitreuse.

III.4.3.5. Analyse chimique

✚ Spectrométrie Infra-Rouge à transformée de Fourier

L'analyse par Spectroscopie infrarouge est une excellente technique pour l'analyse qualitative, le spectre du composé est caractéristique, des informations sur la structure d'une molécule et sa composition chimique peuvent souvent être obtenues à partir de son spectre d'absorption

Les spectres FTIR des résines et des polymères sont scannés par un Spectromètre FTIR de la plage des fréquences de 4000-400cm⁻¹.

Une bande d'absorption caractéristique du cycle oxirane est observée à 1790 cm⁻¹, elle est attribuée à la déformation CO du groupe oxirane.

La large bande qui se situe à 3700 cm⁻¹ environ est caractéristique de la fonction OH, Il existe également des bandes correspondantes à la liaison éther située à 1000-1100 cm⁻¹ dans les quatre cas.

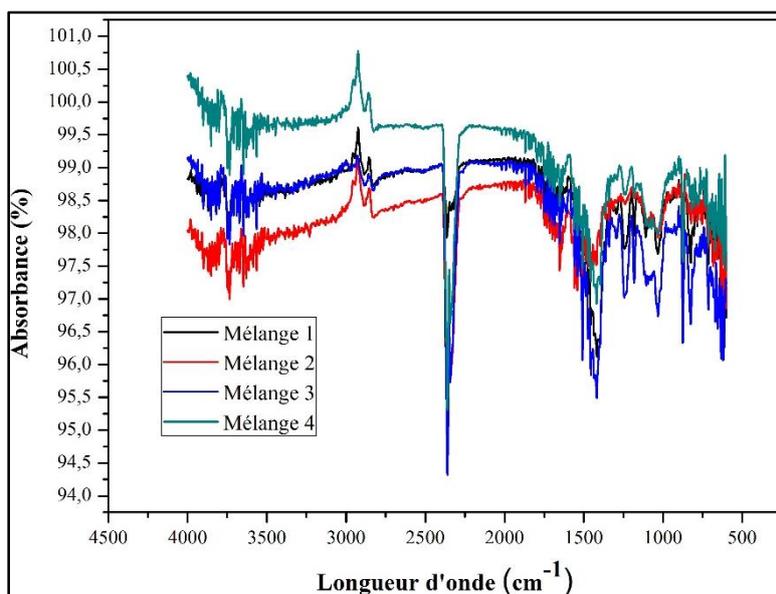


Figure III. 4 : Spectre FTIR de la résine +charge 0/45.

La bande située dans l'intervalle $3200 - 3800\text{cm}^{-1}$, avec des pics intenses à $3620 - 3800\text{cm}^{-1}$ et à 3400cm^{-1} , est très caractéristique des polymères. Entre $3620 - 3640\text{cm}^{-1}$, le pic correspond aux vibrations d'allongement de la liaison des groupements O–H libre (3640cm^{-1}).

Le spectre enregistré de la résine ne présente aucun pic pour une liaison Si–O par contre pour les matrices renforcées, des bandes d'absorption intenses dans les $1031.36 - 1119.9\text{cm}^{-1}$ et $500-608\text{cm}^{-1}$ sont observées. Cette bande est centrée vers $1030,00\text{cm}^{-1}$, elle caractérise les vibrations d'allongement de la liaison Si–O. Cette bande est recherchée dans nos travaux et selon l'intensité des pics, on peut soupçonner la teneur de la silice dans les nouveaux matériaux élaborés.

III.4.3.6. Microscope électronique à balayage

La morphologie et la microstructure du réseau époxy jouent un rôle important dans la tenue physique et chimique d'un matériau à base d'époxy. La **Figure III.12** montre les images obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage.

La **Figure III.12-a** illustre la distribution homogène et continue des phases granulaires. Cette image à faible grossissement ne présente pas de fissures ni de bulles et le matériau semble de bonne densité.

Par contre, la **Figure III.12-b** montre la présence des bulles d'air au cœur de la matrice due principalement au mauvais traitement lors de la préparation de mélange (dégazage), pour cela, un dégazage avec un bon malaxage sont exigés pour obtenir des mélanges homogènes.

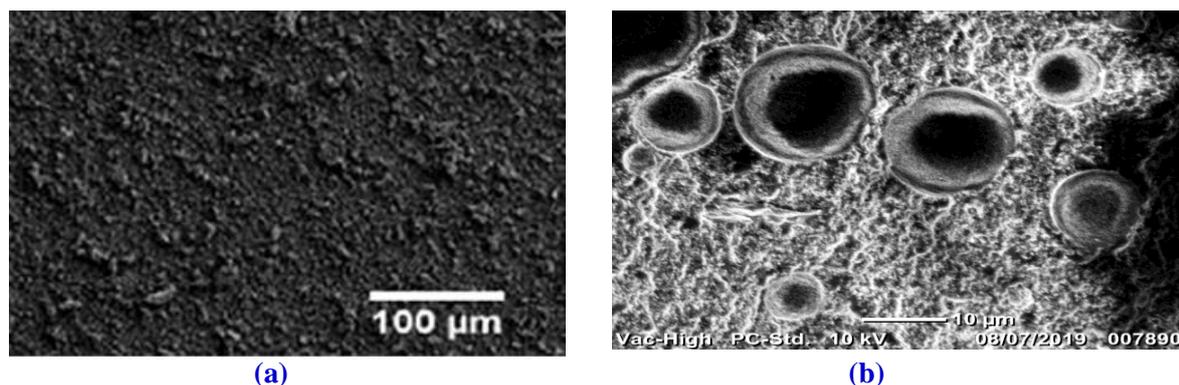


Figure III. 5 : Observation par microscope électronique à balayage des résines chargée et non chargée ; a) Mélange 1 ; b) Mélange 3.

III.5. Essai d'adhérence

Pour étudier l'effet d'ajout d'une charge minérale à la résine, quatre blocs en béton ont été coulés et testés selon des essais d'arrachement direct (pull-out test).

III.5.1. Description du matériel

Un seul mélange du béton avec un rapport de E/C = 0,61 a été utilisé dans cette étude, la formulation a été déterminée selon la méthode de Dreux Gorisse [80], la composition du béton et les caractéristiques mécaniques sont indiquées dans le **Tableau III.8**.

Tableau III. 7 : Composition et caractéristiques mécaniques du béton.

<i>Constitution</i>	<i>Quantité</i>
<i>Sable 0/3 (kg/m³)</i>	682,59
<i>Gravier 3/8 (kg/m³)</i>	125,10
<i>Gravier 8/15 (kg/m³)</i>	357,42
<i>Gravier 15/25 (kg/m³)</i>	357,42
<i>Ciment CPJ-CEM II 42.5 (kg/m³)</i>	350
<i>Eau (l/m³)</i>	215
<i>Résistance à la compression (MPa)</i>	30,5
<i>Résistance à la traction (MPa)</i>	3,3
<i>Module de Young (GPa)</i>	29,7

Les renforts utilisés pour l'essai d'arrachement sont des lamelles en PRFC, les propriétés mécaniques sont illustrées dans le **Tableau III.8**. Deux types de résine ont été utilisées, la première est une résine époxy SIKADUR 330 sans charge minérale, le deuxième type de matériau de scellement est une résine époxy SIKADUR 330 avec 10% de sable.

Tableau III. 8 : Propriétés mécaniques de la lamelle en PRFC.

Type de renforts	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Limite d'élasticité (MPa)	Module de Young (GPa)
Lamelle en PRFC	10	1,4	2500	205

III.5.2. Préparation des échantillons

La **Figure III.13** montre les principales étapes de la préparation des blocs arrachés. Les blocs de béton ($75 \times 75 \times 250 \text{ mm}^3$) ont été coulés, comme illustré sur la **Figure III.13-a**.

Immédiatement après le coulage, les échantillons ont été recouverts d'une feuille de plastique pendant 24 h, les prismes ont été ensuite placés dans un réservoir d'eau pendant 28 jours pour le durcissement puis ils ont été retirés du réservoir d'eau et les rainures ont été réalisées à l'aide d'une scie de béton (**Figure III.13-b**). La longueur d'encrage est de 120 mm, 50 mm ont été laissés non liés à l'extrémité chargée pour éviter toute défaillance du bord de l'échantillon, et 100 mm ont été prolongés à l'extérieur de l'échantillon pour être fixés aux plaques d'acier ($50 \times 35 \times 1 \text{ mm}$) afin de permettre l'application de la charge. Pour s'assurer que les lamelles en PRFC sont au centre de l'engravure et éviter la présence de matériau adhésif (époxy) dans les zones indésirables, une technique simple a été utilisée (**Figure III.13-c**). Le **Tableau III.10** indique les différents détails d'échantillons utilisés lors de ces essais.

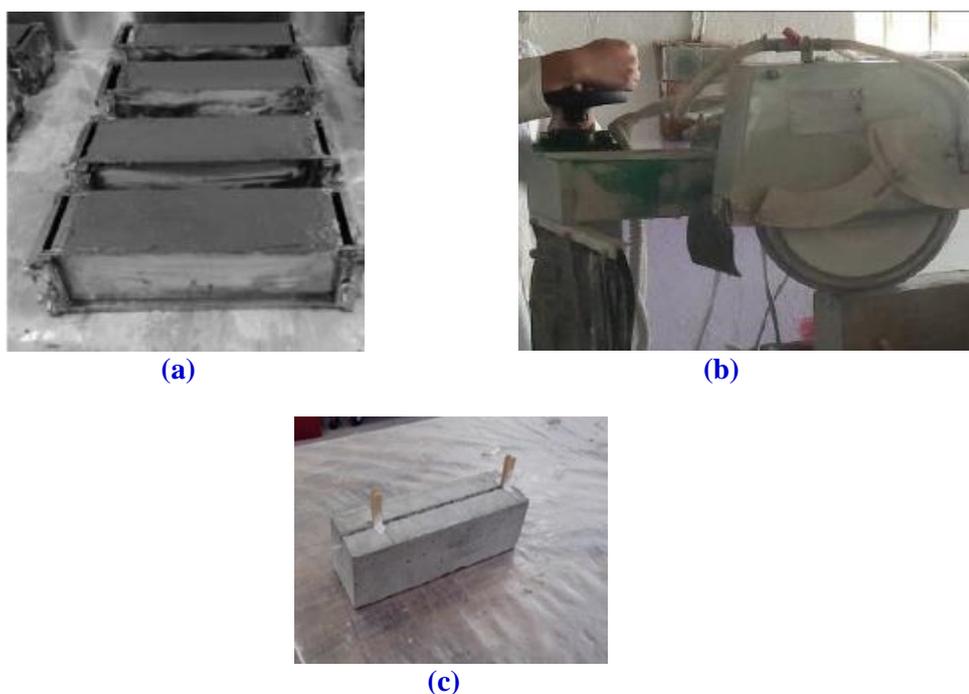
**Figure III. 6 :** Préparation des échantillons.

Tableau III. 9 : Détails des échantillons d'arrachement.

<i>Nom de l'échantillon</i>	<i>Type de résine</i>	<i>Longueur d'encrage</i>	<i>Type du renfort</i>	<i>Dimension du renfort</i>	<i>Taille d'engravure</i>
<i>Bloc 1</i>	Mélange 1	100 mm	PRFC	1,4×10	5×15 mm
<i>Bloc 2</i>	Mélange 3				

III.5.3. Déroulement de l'essai

Le dispositif adopté dans notre travail est similaire au dispositif utilisé par **Al Saidi et al. [75]**. La charge monotone a été appliquée à l'aide d'une machine d'essai universelle MTS (capacité 50 kN). La plaque et les cornières en acier situées au bas de l'échantillon ont été utilisées pour assurer l'alignement vertical des éprouvettes pendant l'essai.

Tableau III. 10: Résultats obtenus pour les essais d'arrachement directs.

<i>Échantillons</i>	$F_{max moy}$ (kN)	$S_{max moy}$ (mm)	$\sigma_{max moy}$ (MPa)	F_u (kN)
<i>Bloc 1</i>	14,21	0,38	7,11	15,61
<i>Bloc 2</i>	18,79	0,23	9,40	16,97

Avec

- $F_{max moy}$: force d'arrachement maximale moyenne (kN).
- $S_{max moy}$: glissement maximal moyen (mm).
- $\sigma_{max moy}$: contrainte d'arrachement moyenne (MPa)

$$\sigma_{max moy} = \frac{F_{max moy}}{2 \times w_f \times L_b} \quad \text{III.1}$$

- w_f et L_b : largeur de la lamelle et la longueur ancrée respectivement.
- F_u : force d'arrachement prédite (kN).

La **Figure III.14** montre un comportement d'adhérence similaire pour les deux graphes : une branche ascendante suivie d'une branche descendante, sauf que le renfort dans le bloc 1 glisse plus que le renfort 2, puisque la surface de contact résine/renfort utilisée dans le bloc 2 est plus rugueuse que le bloc 1. L'ajout du sable dans la résine améliore les deux forces, la liaison chimique et les forces de frottement. Le bloc 2 présente une force d'arrachement supérieure à celle du bloc 1 avec une augmentation de 18%.

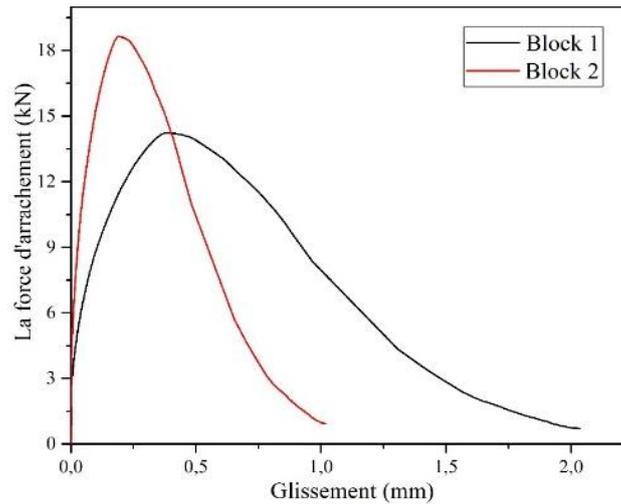


Figure III. 7 : Courbes force d'arrachement en fonction du glissement d'extrémités chargées.

III.5.4. Mode de rupture

Le changement du matériau de scellement du mélange 1 au mélange 3 va changer le mode de rupture ainsi que la force d'arrachement. Pour le bloc 1, le mode de rupture est un glissement entre le renfort en PRFC et le matériau de scellement. Aucune fissure n'a été observée le long de la longueur d'encrage.

La rupture dans le bloc 2 a été produite par écrasement du béton entouré d'engravure, aucune trace de glissement n'a été trouvée sur le renfort. D'après les résultats trouvés, on peut dire que l'ajout d'une charge minérale réduit le cout de la résine et améliore les propriétés mécaniques structurales.

III.5.5. Modèle théorique

Il existe de nombreux modèles théoriques pour prédire la résistance d'adhérence (force d'arrachement) des PRFB, comme les modèles empiriques, les modèles de mécanique de la rupture (**Teng et al. [64]**). D'autre part, il existe très peu de modèles théoriques pour prédire la résistance d'adhérence (force d'arrachement) des PRFs en béton selon la technique NSM.

Dans notre étude, un modèle statique a été suivi pour prédire la charge de rupture en utilisant l'équation suivantes :

$$P_u = \alpha \times \beta \times \sqrt{f_c} \times dp^{1.36} \times bp^{0.21} \quad \text{III.2}$$

Avec,

 P_u : force d'arrachement prévue (kN)

- ✚ α : valeur caractéristique pour tenir compte de l'influence du type de surface de la lamelle en PRFC (lisse, rugueuse) et les dimensions de la PRFC.
- ✚ $\alpha = 0,23$ For $1,4 \times 10$ mm les lamelles en PRFC lisses
- ✚ $\alpha = 0,25$ For $1,4 \times 10$ mm les lamelles en PRFC rugueux
- ✚ f_c : la résistance à la compression a 28 jours du béton.
- ✚ β : $L_b/200$, L_b c'est la longueur d'encrage.
- ✚ d_p : largeur de la lamelle.
- ✚ b_p : épaisseur de la lamelle.

Dans notre cas les valeurs de α utilisées pour prédire la charge d'arrachement sont 0,25 pour le bloc 2 et 0,23 pour le bloc 1. Les valeurs de la force d'arrachement prédite (P_u) par rapport à la force d'arrachement expérimentale (F_{max}) sont indiquées dans le **Tableau III.11**.

L'analyse des résultats figurant dans le **Tableau III.11** permet de conclure qu'il existe une bonne corrélation entre la force d'arrachement expérimentale et la force prévue.

Conclusion

Dans ce chapitre, une caractérisation des charges minérales a été effectuée en premier lieu pour déterminer la granulométrie et la composition chimique de la charge minérale. Ensuite, des éprouvettes de résine chargées avec différents taux de sable ont été confectionnées et testées pour déterminer l'influence d'ajout de sable à la résine époxy sur les propriétés mécaniques (traction, Charpy), thermiques et chimiques et sur la propriété d'adhérence au lamelle en PRFC.

Les résultats obtenus indiquent une amélioration dans le module de Young et une amélioration dans la contrainte de rupture avec une diminution dans la déformation de rupture. Par contre, la présence de la charge minérale n'a pas d'influence remarquable sur la température de transition vitreuse.

Des essais d'arrachement direct (pull-out test) ont été également réalisés sur des éprouvettes parallélépipédiques ($75 \times 75 \times 250$ cm³), en utilisant des lamelles en PRFC et deux types de matériaux de scellement (mélange1 et mélange3) selon la technique NSM. On a pu conclure que le changement du matériau de scellement de mélange 1 à un mélange 3 améliore l'adhérence et le mode de rupture d'un décollement inter facial résine-PRFC à une rupture d'écrasement dans le béton entourant l'engravure, avec une augmentation de la force d'arrachement d'environ 25%.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES POUTRES EN BA RENFORCÉES PAR NSM

IV.1. Introduction	74
IV.2. Récapitulatif des travaux antérieurs	74
IV.3. Mode de rupture	76
IV.4. Objectifs du travail expérimental.....	77
IV.5. Programme expérimental	78
IV.5.1. Dimensions des poutres	78
IV.5.2. Propriétés des matériaux	78
IV.5.3. Préparation des poutres	79
IV.5.4. Méthode de renforcement des poutres	81
V.5.5. Dispositif d'essai et instrumentation	82
IV.6. Résultats expérimentaux.....	82
IV.6.1. La charge de la première fissure et la charge ultime	83
IV.6.3. Mode de rupture	84
IV.6.4. La ductilité.....	85
IV.6.5. L'énergie d'absorption	86
Conclusion	86

IV.1. Introduction

Le renforcement des poutres existantes en béton armé est une nécessité en raison des conditions environnementales destructrices, de l'augmentation des charges de service, ainsi que des erreurs de conception et de construction. Le renforcement par le collage des renforts extérieurement ou intérieurement sont les principales techniques utilisées pour renforcer les structures en béton armé existantes [106–108]. La technique EBR [109] est largement appliquée sur le site, des recherches approfondies ont été menées dans ce domaine [110, 111].

Cependant, le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle souffre souvent d'un décollement prématuré dû à des contraintes de cisaillement élevées aux extrémités des plaques et aux propriétés mécaniques de la résine [112, 113]. Plusieurs chercheurs ont mis en place des ancrages d'extrémité pour résoudre ce type de défaillance [114, 115]. De plus, les plaques en acier ou en polymère renforcé de fibres (PRF) collées à l'extérieur sont exposées aux dommages thermiques, environnementaux et mécaniques. D'autre part, la technique de renforcement NSM [116] présente un certain nombre d'avantages par rapport à la technique EBR. En NSM, le renforcement du béton environnant protège les barres ou les lamelles NSM des dommages thermiques, environnementaux et mécaniques, Donc la durabilité des PRF sera améliorée, des mécanismes de partage des contraintes et des performances en fatigue sont d'autres avantages du fait que le renforcement NSM est placé à l'intérieur de l'élément structural [117].

Plusieurs études expérimentales ont été effectuées sur des poutres en béton armé renforcées avec des barres ou des lamelles selon la technique NSM [118-119]. Cependant, les matériaux en PRF sont très coûteux et limités sur le marché local. En outre, le renforcement par PRF montre une réduction dans la ductilité et subit une rupture brutale (fragile). Les fils d'acier de précontrainte, quant à elles, sont moins chères, facilement disponibles, avec une bonne durabilité et une bonne performance d'adhérence [120], ainsi qu'une ductilité suffisante. Des bâtiments en maçonnerie et des ponts en arc ont été renforcés avec cette technique où les matériaux de renforts sont des barres en acier inoxydable [121].

Dans ce chapitre, cinq poutres en béton armé ont été coulées, une poutre témoin, trois renforcées par des fils d'aciers de précontrainte, et une poutre renforcée avec un jonc en PRFC. Ces poutres sont soumises à une flexion de quatre points.

IV.2. Récapitulatif des travaux antérieurs

L'un des avantages du renforcement d'une poutre est l'augmentation de sa résistance à la flexion, la capacité d'absorption et la rigidité. L'utilisation de la méthode NSM avec les renforts a permis d'améliorer la capacité de flexion et d'éviter le décollement prématuré des

renforts composites. Un grand nombre de paramètres peuvent affecter le renforcement en flexion avec renforts-NSM. Donc plusieurs paramètres ont été investis dans la littérature. Certaines recherches ont été effectuées avec des joncs et de plats et d'autres avec des lamelles.

Hassan *et al.* [122, 123] ont effectué des essais de flexion sur des poutres en béton armé renforcées avec des joncs de carbone à haute adhérence et des plats de carbone d'une longueur de scellement variable avec la technique NSM. Ils ont conclu qu'il est peu probable que la rupture de la poutre soit due à la rupture en traction des joncs composites, que la déformation maximum de ces joncs doit être limitée à 0,7-0,8%, et que la longueur d'adhérence ne doit pas être inférieure à 80 cm.

Teng *et al.* [124] ont réalisé des essais de flexion sur des poutres en béton armé renforcées avec des plats composites selon la technique NSM et des longueurs de scellement variables.

Ils ont trouvé que l'augmentation de la longueur de scellement change le mode de rupture de la séparation du béton d'enrobage commençant par le décollement de l'extrémité du plat (cut-off) à l'écrasement du béton comprimé suivi par la séparation secondaire du béton d'enrobage près de la région du moment maximal.

Les résultats expérimentaux, tels que ceux rapportés par **Firas al-Mahmoud *et al.* [125, 126]**, ont montré que le type de matériau de scellement utilisé peut modifier le mode de rupture et donc empêcher l'utilisation de la pleine capacité du PRFC. La liaison entre le béton existant et le matériau de remplissage pourrait être un point critique. En conséquence, la poutre renforcée par des barres en PRFC utilisant le mortier comme matériau de remplissage montre un décollement interfacial mortier-béton, c'est pourquoi les guides de renforcement recommandent l'augmentation de la rugosité de surface de l'engravure.

L'effet de l'endommagement des éléments en béton armé puis la réparation par PRFC-NSM a été investi par **Gusheng *et al.* [127]**. Des poutres en béton armé ayant une section 150×250 mm² et une longueur de 2m ont été endommagées jusqu'à 30% de la charge ultime. La réparation des poutres s'effectue par différentes méthodes. Les résultats obtenus indiquent une amélioration de la charge ultime d'environ 18% à 53%.

Puisque les matériaux composites sont très chers et ne sont pas disponibles tout le temps sur le marché, une étude expérimentale a été effectuée par **Akter hossen *et al.* [108]** pour trouver une alternative ou un matériau qui a la capacité d'améliorer certaines propriétés. Donc ils ont utilisé les aciers, une comparaison a été effectuée avec des poutres qui ont été renforcées avec des lamelles de fibre de carbone. Ils ont conclu que les barres en PRFC augmentent la charge ultime plus de 7% par rapport aux barres en acier en raison de la plus grande résistance à la

traction, mais elles diminuent la ductilité de l'élément de 3% par rapport aux poutres renforcées par les aciers.

Un travail expérimental a été effectué par **Khalifa *et al.* [128]** pour comparer l'efficacité des deux techniques EBR et NSM. Ils ont conclu que pour le même taux de renforcement en PRFC, la charge ultime des poutres renforcées avec la technique NSM était supérieure à celle des poutres renforcées avec la méthode EBR. Cette amélioration est comprise entre 12 et 18%. Cela est dû à la force de liaison qui a été plus élevée dans le cas de la technique NSM grâce à la surface de contact puisque les lamelles de PRFC avec la technique NSM ont une surface de liaison double par rapport aux bandes de PRFC-EBR.

Le potentiel de renforcement et récupération des performances flexionnelles d'une poutre en béton armé endommagée thermiquement en utilisant les PRFC-NSM a été fait par **Rami *et al.* [129]**. Dix poutres ont été chauffées à 600°C pendant 2 h à l'aide d'un four électrique. Les performances mécaniques des différentes poutres ont été évaluées dans le cadre d'essais de flexion en quatre points. Ils ont conclu que l'utilisation de la technique NSM-PRF sert à améliorer les capacités de charge (la charge de la première fissure, la charge élastique et la charge ultime), mais une réduction importante de la ductilité a été enregistrée.

Le taux de renforcement des poutres par PRFC-NSM a été investi par **Dias *et al.* [130]**. Trois poutres ont été renforcées avec des taux en PRFC différents et testées sous un chargement monotone jusqu'à la rupture. Les résultats expérimentaux montrent que les lamelles de PRFC constituent une solution efficace pour augmenter la charge de la première fissure, la charge élastique et la charge de la rupture. En outre, la résistance élevée à la traction du PRFC a été efficacement mobilisée. En augmentant le pourcentage de PRFC, la capacité de charge des poutres a augmenté, tandis que le niveau de ductilité a diminué.

IV.3. Mode de rupture

Les modes de rupture possibles pour les poutres renforcées en flexion avec la technique NSM sont la plastification des aciers tendus suivie par l'écrasement du béton ou la rupture de la barre si une action composite complète se maintient entre la poutre RC et les renforts en PRF. La rupture peut être un décollement prématuré sous la forme d'une perte d'adhérence entre le renfort PRF et la structure d'origine. La rupture par décollement dépend de nombreux paramètres tels que, le rapport d'armature en acier ou en PRF, la forme et l'état de surface de l'armature en PRF, la rugosité de l'engravure et la résistance à la traction du béton et de l'époxy **[124]**.

La rupture par décollement peut se produire sous nombreuses formes, décollement béton-époxy, décollement PRF-époxy et séparation du béton d'enrobage. Ce dernier mode de rupture est considéré comme le mode de rupture le plus courant pour les poutres renforcées avec la technique NSM [123, 131]. La séparation du béton d'enrobage peut commencer aux points de coupure de l'armature NSM-PRF (extrémité de la barre), où la barre se termine à une distance significative de l'appui. Les fissures se propagent vers le haut des deux côtés de la poutre avec la même inclinaison jusqu'à atteindre le niveau de l'acier de traction, puis l'enrobage en béton commence à se fendre [133]. La séparation de l'enrobage du béton peut également commencer à la zone de moment maximum par décollement de la fissure intermédiaire (IC). Lorsque le décollement commence à une fissure de flexion majeure, il se propage ensuite vers l'un des supports [132].

IV.4. Objectifs du travail expérimental

Comme il a été mentionné dans la problématique générale, plusieurs ouvrages en Algérie ont été démolis à cause de la faible résistance de leur béton (erreur de coulage). En outre, beaucoup d'anciennes structures ont des bétons de faibles caractéristiques mécaniques nécessitant une urgente intervention pour réhabilitation. C'est pourquoi on a réfléchi d'étudier la possibilité de renforcer un élément structural par matériaux locaux disponibles et moins chers présentant de bonnes caractéristiques mécaniques tels que les fils d'acier de la précontrainte.

Ces matériaux fabriqués à l'usine de TRIFISOUD EL-EULMA, ont des modules de Young plus grands que les PRFC de type S, ainsi ils ont un comportement élastoplastique, cela permet à l'élément renforcé avec ces matériaux de subir une déformation plus grande que l'élément renforcé avec les matériaux composites. Cette caractéristique offre également aux usagers la sécurité lors de l'évacuation des gens dans une structure renforcée lors d'un séisme ou d'un effondrement imprévu.

Cinq poutres isostatiques sur appuis simples ont été testées au niveau du laboratoire de matériaux de Génie Civil de l'Université Mohamed EL-Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj.

Ce chapitre présente les détails des spécimens d'épreuve, les propriétés des matériaux utilisés, la fabrication des corps d'épreuve, le dispositif d'essai, l'instrumentation et la discussion des différents résultats expérimentaux obtenus.

IV.5. Programme expérimental

IV.5.1. Dimensions des poutres

Des poutres en béton armé ont été fabriquées puis testées sous une charge de flexion quatre points. Les dimensions des poutres sont indiquées dans la **Figure IV.1**. Les poutres ont une section transversale rectangulaire de $100 \times 150 \text{ mm}^2$, et une longueur totale de 1,2m. Deux aciers H.A de 8mm ont été mis en place dans la partie tendue et comprimée.

Afin de caractériser les aciers utilisés des tiges en acier de 8mm ont été coupées chaque 40 cm pour effectuer des essais de traction conformément à la réglementation en vigueur. La limite d'élasticité et le module de Young obtenus sont de 580MPa et 210Gpa respectivement. Des armatures transversales sous formes de cadres de 6mm de diamètre sont adoptées dans la zone soumise à l'effort tranchant pour éviter la rupture flexionnelle par effort tranchant.

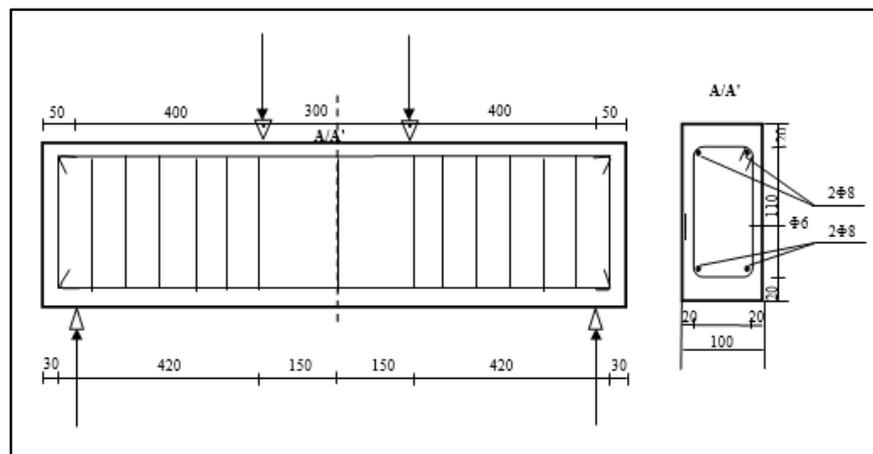


Figure IV. 1 : Caractéristiques géométriques et schémas de ferrailage des poutres préparées.

IV.5.2. Propriétés des matériaux

La fabrication des poutres a été effectuée avec le même type de béton que nous avons utilisé pour fabriquer les blocs d'adhérence. Les caractéristiques mécaniques et les matériaux utilisés sont présentés dans le **Chapitre II ; le paragraphe II.3.1, pp 39**. Un adhésif époxy Sikadur 30 a été utilisé comme matériau de scellement, le Sikadur 30 a deux composants A et B. Le composant A est une résine époxy de couleur blanche tandis que le composant B est un durcisseur de couleur noir. Les deux composants ont été mélangés dans un rapport de 3: 1 jusqu'à l'obtention d'une couleur grise uniforme.

Les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement ainsi que le module d'élasticité de l'adhésif sont indiquées dans le **Tableau IV.1**.

Tableau IV. 1: Propriétés de la résine époxy.

<i>Propriétés</i>	<i>Valeurs</i>
<i>La résistance à la compression (MPa)</i>	95
<i>La résistance à la traction (MPa)</i>	31
<i>La résistance au cisaillement (MPa)</i>	19
<i>Module d'élasticité (MPa)</i>	11200

Deux types de renforts ont été utilisés, un jonc de fibre de carbone et des fils aciers de précontrainte. Les caractéristiques mécaniques des renforts ont été obtenues selon la norme EN 1002 [84]. Le **Tableau IV.2** résume les résultats obtenus.

Tableau IV. 2 : Propriétés mécaniques des renforts.

<i>Renforts</i>	<i>Diamètre (mm)</i>	<i>La limite d'élasticité (MPa)</i>	<i>Module de Young (GPa)</i>
<i>Jonc de PRFC</i>	8	1800	120,45
<i>Acier de précontraint</i>	6	1800,43	160,22

IV.5.3. Préparation des poutres

Au cours du collage de béton, des morceaux de bois ont été collés sur la partie inférieure du moule pour créer des engravures. Dans le cas d'un seul renfort, nous les avons placés à mi-largeur de la poutre. Si deux renforts doivent être insérés, alors la distance entre le bord latéral de la poutre et le bord du morceau du bois a été fixée à 25mm. Les engravures formées sont des engravures carrées. Les dimensions des engravures ont été choisies selon le diamètre du renfort. ($2 \times d$ ou $d \times d$ c'est le diamètre du renfort), donc pour un renfort de 6 mm et de 8 mm les dimensions sont de 12×12 et de 16×16 mm respectivement.

Un jour après, les poutres ont été démoulées et exposées à l'air libre. Après 28 jours, les morceaux de bois ont été enlevés, les reliefs de béton restants ont été enlevés avec une brosse métallique, ce qui rend la surface inférieure de l'engravure rugueuse. Les engravures ont été nettoyées par un jet d'air comprimé à haute pression afin d'enlever les débris et les particules fines pour assurer une bonne liaison entre le matériau de scellement et l'ancien béton.

L'engravure a été remplie à moitié de matériau de scellement et le renfort a été alors placé au milieu et légèrement tassé, ce qui permet au matériau de scellement de couler autour du jonc de carbone. La résine époxy a été ajoutée pour remplir totalement l'engravure et la surface a été nivelée. Les poutres ont été laissées pendant une semaine pour assurer le durcissement total de la résine.

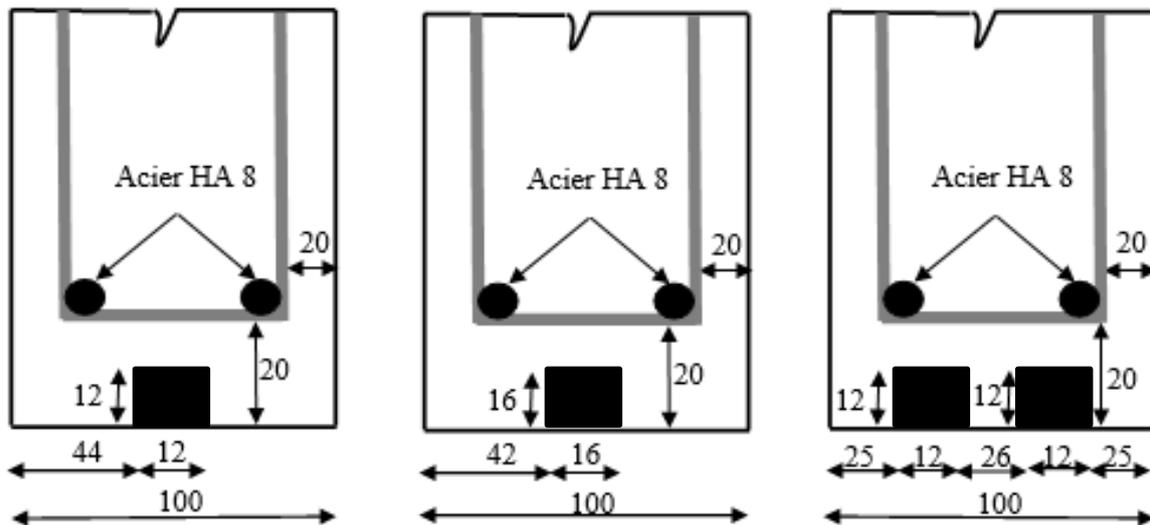


Figure IV. 2 : Dimensions et position des engravures.



Figure IV. 3: Procédure de fabrication et renforcement des poutres, a) création des engravures, b) traitement de surfaces des engravures, c) Nettoyage avec l'air comprimé, d) scellement des renforts.

IV.5.4. Méthode de renforcement des poutres

Le programme expérimental a été conçu avec cinq poutres en béton armé. Une de ces poutres a été assignée comme une poutre témoin et les poutres restantes ont été renforcées avec la technique NSM. Les principales variables de test sont le taux de renforcement et le type de renfort. Le **Tableau IV.3** et la **Figure IV.4** indiquent la dénomination et la configuration des poutres renforcées.

Tableau IV. 3 : Programme expérimental pour les essais de flexion quatre points.

Poutre ID	Les barres de renforts		Type du renfort
	Nombre	Diamètre (mm)	
CB	Poutre témoin		Non renforcée
N-1	1	6	Acier de précontrainte
N-2	2	6	
N-3	1	8	Jonc en PRFC
N-4	1	8	

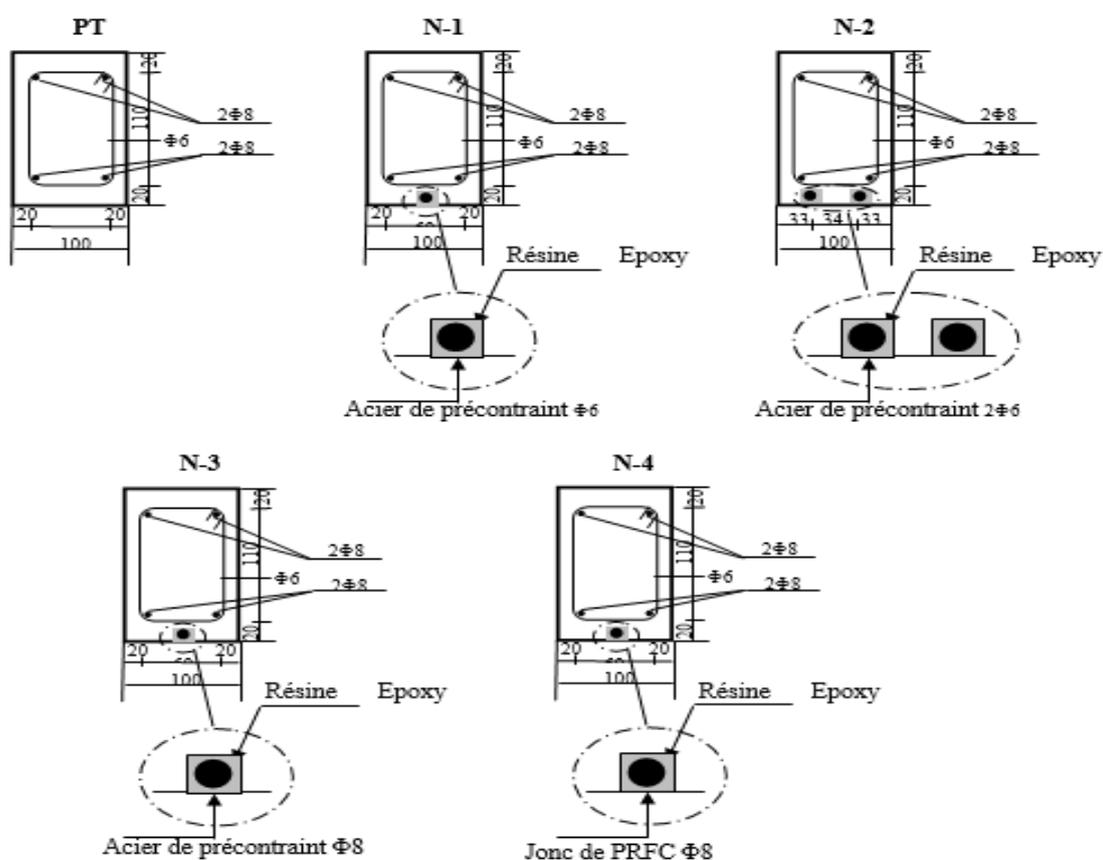


Figure IV. 4 : Paramètres d'étude.

V.5.5. Dispositif d'essai et instrumentation

Les poutres sont placées sur un bâti approprié pour être soumises à la flexion « quatre points ». Il s'agit d'une machine INSTRON équipée d'une cellule de charge de 150kN de capacité maximale, pilotée en déplacement (1,0mm/mn). La machine se compose d'une traverse supérieure mobile et d'une traverse inférieure qui permet de mettre en place les spécimens d'épreuve. L'acquisition de la flèche a été accomplie à l'aide d'un capteur de déplacement relié avec notre micro portable, l'enregistrement s'effectue manuellement chaque 0.5kN.



Figure IV. 5 : Dispositif d'essai adoptée pour les essais de flexion.

IV.6. Résultats expérimentaux

La réponse globale des poutres testées a été analysée en termes de capacité portante, la charge dans la première fissure, l'indice de ductilité, la capacité d'absorption d'énergie et le mode de rupture. Le **Tableau IV.4** résume le mode de rupture et les charges caractéristiques obtenues.

Tableau IV. 4: Résultats obtenus pour les poutres en flexion.

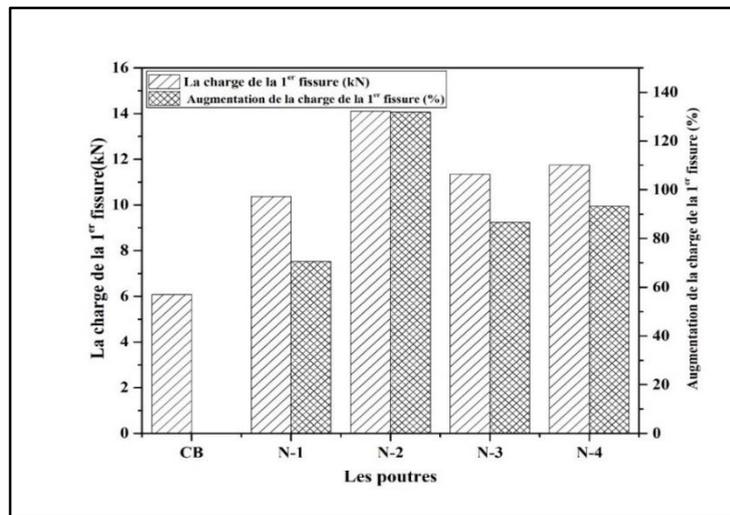
<i>Poutre</i>	P_f (kN)	P_{el} (kN)	P_{ru} (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	<i>Mode de rupture</i>
<i>C.B</i>	6,08	31,50	33,22	4	13,24	Écrasement du béton
<i>N-1</i>	10,37	47,21	56,44	5,01	11,29	Séparation du béton d'enrobage
<i>N-2</i>	14,10	58,07	68,60	4,086	9,97	
<i>N-3</i>	11,35	56,50	67,00	5,425	10,94	
<i>N-4</i>	11,75	59,00	69,07	4,455	7,98	

Avec :

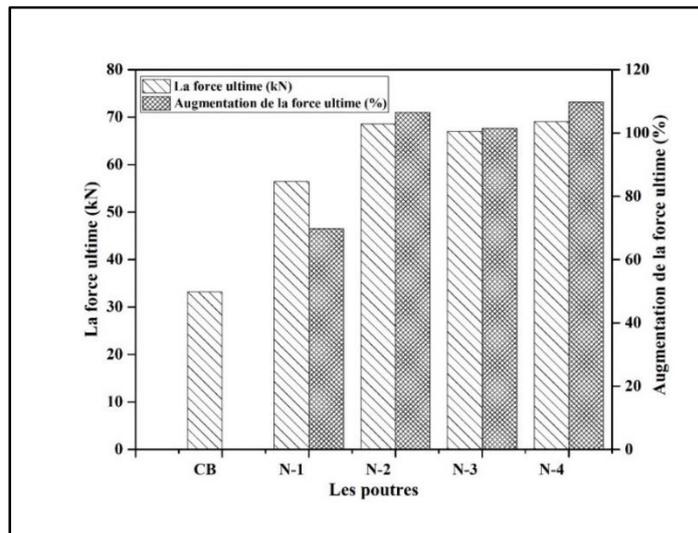
- ✚ P_f : la charge de la première fissure.
- ✚ P_{el} : la charge appliquée afin d’atteindre la limite d’élasticité.
- ✚ P_{ru} : la charge de rupture.
- ✚ Δ_y : la flèche enregistrée afin d’atteindre la limite d’élasticité.
- ✚ Δ_u : la flèche enregistrée afin d’atteindre la charge de rupture.

IV.6.1. La charge de la première fissure et la charge ultime

La **Figure IV.6** montre la charge de la première fissure ainsi que la charge de la rupture pour les poutres testées. Les poutres qui ont été renforcées présentent des charges plus grandes que la poutre témoin.



(a)



(b)

Figure IV.6: Les charges caractéristiques : (a) charge de la première fissure, (b) charge ultime.

Les poutres renforcées avec les barres en acier de précontraint ont amélioré la première charge de fissuration jusqu'à 2,32 fois par rapport à la poutre témoin. L'augmentation dans le taux de renforcement pour les poutres N-1 N-2 et N-3 induit une amélioration dans la charge de la première fissure de 70,6%, 131,9% et 86,67%, respectivement. Le renforcement des poutres N-4 a amélioré la charge de la première fissure de 93,2% par rapport à la poutre témoin. Cependant, toutes les poutres renforcées soit par les aciers de précontraint ou avec le jonc de fibre de carbone subissent une amélioration importante dans la charge de rupture.

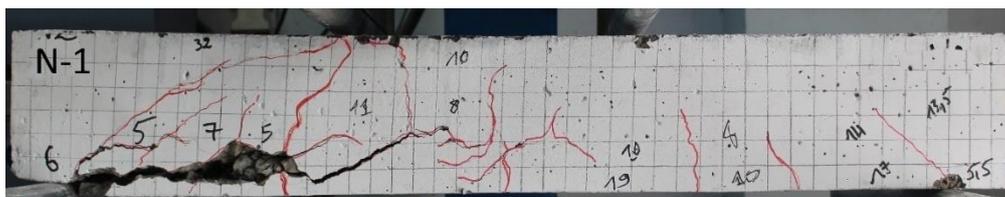
L'amélioration dans la charge de la rupture par rapport à la poutre témoin atteint 69,8%, 106,5%, 101,5% et 109,8% pour les poutres N-1, N-2, N-3 et N-4 respectivement.

IV.6.3. Mode de rupture

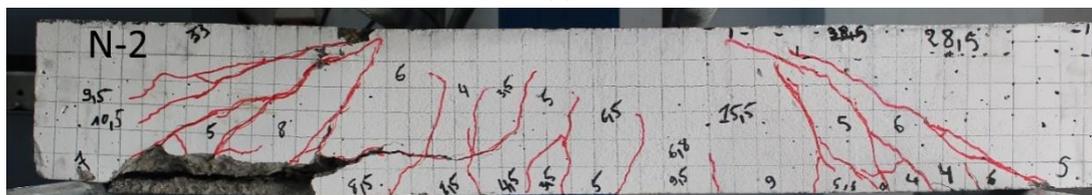
Le mode de rupture de toutes les poutres testées est résumé dans la **Figure IV. 7**. Pour la poutre témoin, la rupture est produite par l'écrasement de béton comprimé, tandis que la rupture de toutes les autres poutres renforcées avec la technique NSM se produit par la séparation du béton d'enrobage. Ce mode de rupture apparaît lorsque le renfort NSM est mis à une distance importante loin des appuis. Il commence par une apparition d'une fissure d'effort tranchant et une fissure de flexion au niveau de l'appui. L'intersection entre ces deux fissures engendre une fissure horizontale sous les aciers tendus qui se propagent vers la mi-portée de la poutre.



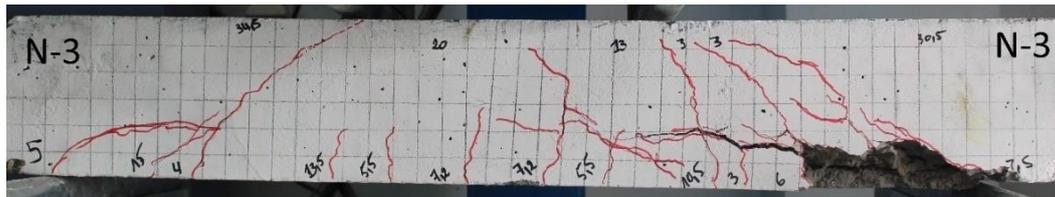
(a)



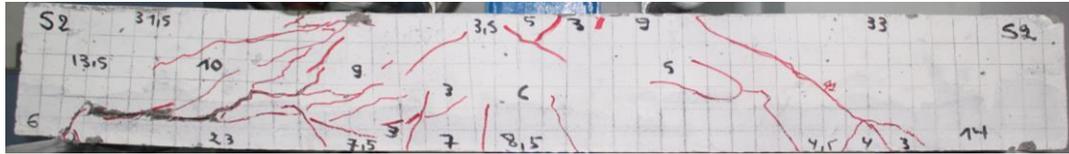
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure IV. 7: Modes de rupture des poutres testées, (a) poutre P.T, (b) poutre N-1, (c) poutre N-2, (d) poutre N-3, (e) poutre N-4.

IV.6.4. La ductilité

La ductilité est la capacité de l'élément à subir un comportement inélastique et d'absorber l'énergie sans risque de ruine précoce. La ductilité est une propriété importante dans le dimensionnement des structures, elle est étudiée cette partie expérimentale. Elle est exprimée par le rapport du déplacement ultime de la structure sur le déplacement à la fin de la phase élastique.

$$\mu_{\Delta_u} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Où μ_{Δ_u} , Δ_u , Δ_y sont l'indice de ductilité, la flèche à la rupture et la flèche à la limite d'élasticité.

Le **Tableau IV.5** récapitule les valeurs de la ductilité des poutres. D'après les résultats obtenus, toutes les poutres qui ont été renforcées subissent une diminution de la ductilité. L'augmentation du taux de renforts pour les poutres N-1 et N-2 a diminué la ductilité de la poutre, ainsi que le changement de type de renfort d'acier de précontraint au jonc de carbone induit une diminution dans la ductilité.

Tableau IV. 5: Flèches et ductilité de déplacement des poutres.

	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ_{Δ_u} (mm)	Rapport sur C.B
<i>Spécimens</i>				
CB	4	13,24	3,31	1
N-1	5,01	11,29	2,25	0,68
N-2	4,63	9,97	2,15	0,64
N-3	5,42	10,94	2,01	0,61
N-4	4,45	7,98	1,79	0,54

IV.6.5. L'énergie d'absorption

L'énergie d'absorption est la capacité d'un élément de subir une force et de la transmettre sous forme d'une déformation sans rupture. La capacité d'absorption d'énergie est déterminée par la surface sous le diagramme de charge-flèche. Les capacités d'absorption de toutes les poutres renforcées ont subi une amélioration importante. Les poutres qui ont été renforcées par les aciers de précontraint montrent une augmentation dans la capacité d'absorption d'énergie d'environ 30-50%. L'augmentation dans le taux de renforcement induit une augmentation dans l'énergie d'absorption. Ce qui peut être observé sur la **Figure IV.8**, plus l'énergie est grande plus la déformation est importante. Ainsi le changement du type de renfort d'acier de précontraint au jonc de fibre de carbone diminue cette énergie, le nombre de fissures et la déformation (**Figure IV.7**)

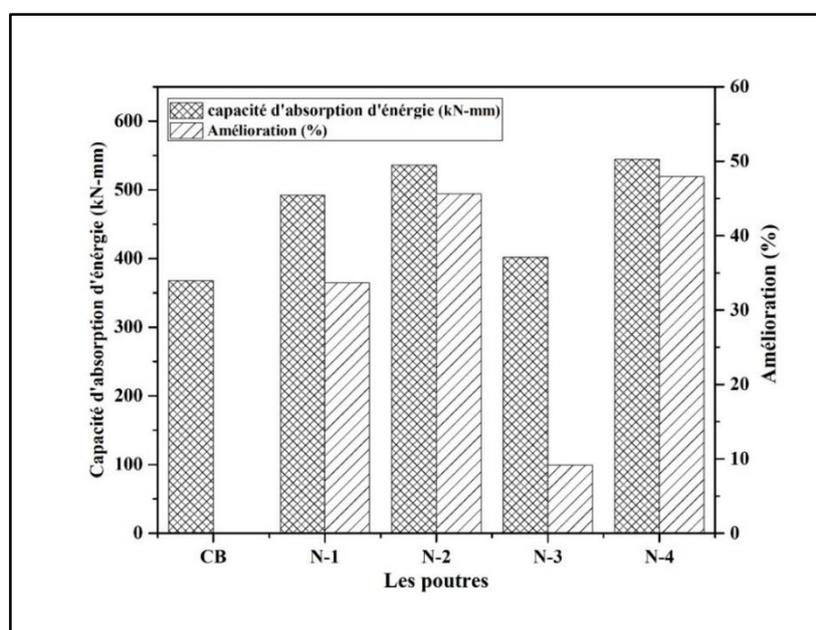


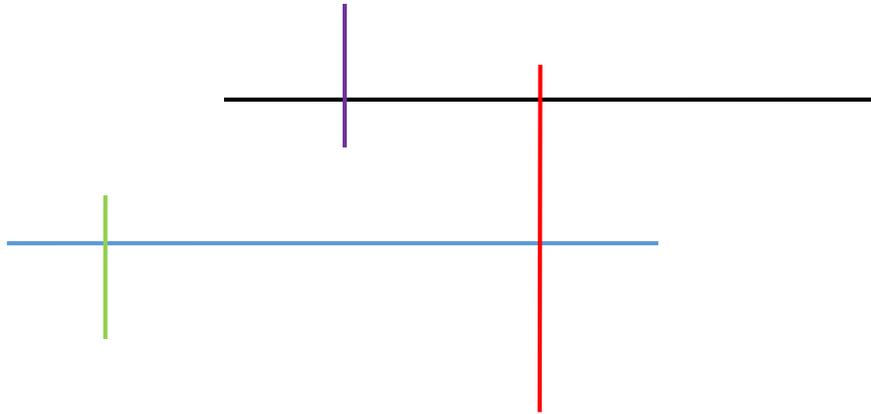
Figure IV. 8 : Influence du renforcement sur énergie d'absorption des poutres.

Conclusion

Le programme expérimental effectué dans ce chapitre nous a permis d'éclaircir les particularités dans le comportement des poutres confectionnées avec un béton de 15 MPa, et renforcées par l'insertion des fils d'aciers de précontrainte ou par un jonc de fibre de carbone dans leur partie tendue. Nous avons effectué des essais expérimentaux sur des poutres en béton armé renforcées soumises à un chargement monotone croissant jusqu'à la rupture, du point de vue du global (flèche), fissuration, mode de rupture et de résistances ultimes.

D'une part, on relève dans les deux cas (renforcement par les fils d'acier ou le jonc de PRFC) un accroissement important de la capacité portante des poutres renforcées et la capacité d'énergie d'absorption (dépassé 85%) ; et d'autre part, une réduction des déformations ultimes. Cependant, la ruine des poutres renforcées, soit par les fils d'aciers ou par le jonc de PRFC, est produite par le développement et la propagation d'une fissure horizontale en séparant le béton d'enrobage suivie par une fissure diagonale d'effort tranchant de l'appui vers le point d'application de la charge (délamination de béton).

Conclusion générale



CONCLUSION GENERALE

Les objectifs fixés dans cette étude, à savoir la caractérisation du comportement d'adhérence entre les renforts et le béton selon la technique NSM ; l'utilisation des matériaux composites pour renforcer les éléments structuraux qui ont de faibles caractéristiques mécaniques ; trouver une alternative aux matériaux composites ; réduire le coût et améliorer les propriétés mécaniques de la résine époxy ; et enfin améliorer les caractéristiques mécaniques (la ductilité, l'énergie d'absorption, la charge de la rupture) d'une poutre soumise à une flexion de quatre points ont été atteints. Ces objectifs ont contribué considérablement à l'amélioration de nos connaissances sur la faisabilité de renforcement des éléments en BA ayant une résistance mécanique faible.

L'étude bibliographique réalisée sur le processus de renforcement par les matériaux composites nous a éclairé, d'une part, sur les différents matériaux utilisés lors de l'opération du renforcement, les principales techniques émergentes de renforcement ou réparation appliquées dans les chantiers avec les matériaux PRFs, ainsi, une comparaison entre les différentes techniques nous a conduit à choisir la méthode NSM. D'autre part, elle nous a aussi permis de rassembler le maximum d'informations sur le comportement d'adhérence et les différents paramètres qui l'influencent. L'ensemble de ces connaissances a conduit à mettre en place une campagne expérimentale adaptée aux exigences de notre étude.

L'étude expérimentale adaptée a été divisée en plusieurs parties : la première partie a été consacrée à la caractérisation du comportement d'adhérence entre les différents renforts et le béton de faibles caractéristiques mécaniques selon la technique NSM, la seconde partie a été dédiée à la détermination de l'effet de l'ajout du sable à la résine sur la propriété d'adhérence PRF-NSM. Cependant, la dernière partie est consacrée à l'augmentation des performances mécaniques des poutres en BA soumises à une flexion de quatre points.

A travers cette étude, un ensemble de conclusions a été tiré. On cite essentiellement :

- ✚ Le procédé de renforcement NSM utilisant des renforts tels que les joncs et les plats ou les fils d'acier de précontrainte avec du béton à faibles caractéristiques mécaniques, peut être employé. Donc nous pouvons déduire que les fils d'acier présentent une bonne alternative aux renforts composites puisqu'ils ont de bonnes propriétés d'adhérence avec le béton.

- ✚ L'augmentation de la taille d'engravure pour les éprouvettes avec un adhésif époxy et le fil d'acier de précontraint n'a pas d'influence sur le mode de rupture, mais elle induit une augmentation de la charge de rupture.
- ✚ L'étude des propriétés mécaniques sur ces composites a montré une importante amélioration par rapport à la résine non chargée, avec une augmentation du module d'élasticité, de la contrainte seuil et une diminution très importante de l'allongement à la rupture, cependant, l'incorporation des charges dans la résine n'a pas une influence remarquable sur la température de transition vitreuse.
- ✚ La résine chargée induit une augmentation dans la charge de rupture lors de l'exécution des essais d'arrachement direct avec les lamelles en PRFC, ainsi le scellement avec ce type d'adhésif en changeant le mode de rupture d'une rupture interfaciale résine-lamelle en PRFC à une rupture dans le béton.
- ✚ Les poutres renforcées avec les fils d'aciers de la précontrainte présentent une amélioration de la ductilité, l'énergie d'absorption est supérieure de celles des poutres qui ont été renforcées avec le jonc en PRFC, cela peut être attribué aux fils d'aciers qui présentent de bonnes propriétés mécaniques (module de young, la limite d'élasticité) ainsi au comportement élastoplastique à la traction contrairement aux joncs de PRFC qui ont un comportement fragile à la traction (linéaire jusqu'à la rupture). Cette propriété essentielle nous a permis d'éviter la rupture fragile lors du renforcement des structures avec les fils d'acier.

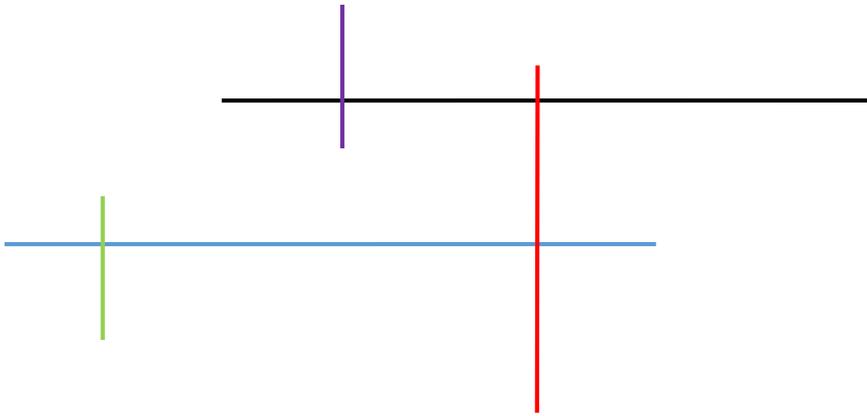
Perspectives

En se basant sur les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche, les thématiques suivantes seront évoquées prochainement :

- ✚ Élargir les travaux expérimentaux sur le comportement d'adhérence entre les fils d'acier-béton selon la technique NSM en prenant en considération les paramètres de durabilité, à savoir : la température, l'humidité, les attaques agressives et le phénomène gel-dégel ;
- ✚ Réalisation d'une modélisation et simulation numérique par éléments finis pour analyser les différents résultats (Abaqus).
- ✚ Etudier la possibilité d'éliminer le risque de décollement prématuré des renforts par l'emploi des résines chargées par différentes additions minérales ;

- ✚ Pour conclure, bien que l'utilisation des fils d'acier de la précontrainte sous cette forme d'application ait été abordée pour la première fois dans notre travail, la technique NSM s'avère appropriée du point de vue technologique avec ses performances apportées pour renforcer ou réparer les structures en béton armé. Un futur travail s'inscrivant dans la suite du programme de recherche initié par notre équipe semble nécessaire afin d'étudier d'autres configurations d'essai de flexion ou d'étudier la possibilité de réparer des poutres endommagées soumises à la flexion par cette technique.

Références



Références

- [1]. FIB Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. fib Task Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures, the International Federation for Structural Concrete. Lausanne, Switzerland, 2001.
- [2]. B. Täljsten, A. Carolin, and H. Nordin. Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. In: *Advances in structural engineering* 6.3, 2003: 201–213.
- [3]. U. Meier. Carbon fiber-reinforced polymers: modern materials in bridge engineering”. In: *Structural Engineering International* 2.1, 1992:7–12.
- [4]. J. Teng, J.-F. Chen, S. T. Smith, and L Lam. FRP: strengthened RC structures. In: *Frontiers in Physics*, 2002.
- [5]. L. C. Bank. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons, 2006.
- [6]. ACI 440.2R-17. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structures*. ACI Committee 440, American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, USA, 2017.
- [7]. P. Balaguru, A. Nanni, and J. Giancaspro. *FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: A guide to fundamentals and design for repair and retrofit*. CRC Press, 2008.
- [8]. R. Parretti and A. Nanni. Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites: Design overview. In: *Advances in Structural Engineering* 7.6, 2004: 469–483.
- [9]. L. De Lorenzis and J. Teng. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. In: *Composites Part B: Engineering* 38.2, 2007:119–143.
- [10]. L. De Lorenzis and A. Nanni. Bond between Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods and Concrete in Structural Strengthenings. In: *ACI Structural Journal* 99.2, 2002: 123–132.
- [11]. Neville AM. *Properties of concrete*. longman London; 1995.
- [12]. Gilbert RI, Ranzi G. *Time-dependent behaviour of concrete structures*. CRC Press; 2010.
- [13]. Taly N, GangaRao HV, Vijay PV. *Reinforced concrete design with FRP composites*. CRC press; 2006.

- [14]. Hensher DA. Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications. Elsevier; 2016.
- [15]. Jones RM. Mechanics of composite materials. CRC press; 2014.
- [16]. Hollaway LC, Teng J-G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Elsevier; 2008.
- [17]. Figueiro R. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Elsevier; 2011.
- [18]. Z. K. Szabó. Bond characteristics of NSM reinforcements based on advanced test method. PhD thesis. Budapest, Hungary: Budapest University of Technology and Economics, 2013.
- [19]. Pilakoutas K, Achillides Z, Waldron P. Non-ferrous reinforcement in concrete structures. Centenary Conference on Innovation in Civil and Structural Engineering. Civil-Comp Ltd. 1997. p. 47–58.
- [20]. Balaguru P, Nanni A, Giancaspro J. FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. CRC Press; 2014.
- [21]. Sheikh-Ahmad JY. Machining of polymer composites. Springer; 2009.
- [22]. Bisby LA, Fitzwilliam J. An introduction to FRP composites for construction. ISIS education module, Manitoba, Canada. 2006;
- [23]. Mallick PK. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. CRC press; 2007.
- [24]. Carolin A. Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements. Luleå tekniska universitet; 2003.
- [25]. B. Benmokrane, Note de cour GCI-717 matériaux composites pour la construction et la réhabilitation des structure, 2015
- [26]. J. Teng, J.-F. Chen, S. T. Smith, and L Lam. FRP: strengthened RC structures. In: Frontiers in Physics (2002), p. 266.
- [27]. M. Baena. Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete. ISBN: 978-84-694-2484-1. PhD thesis. Girona, Spain: University of Girona, 2010.
- [28]. El-Hacha R, Soudki K. Prestressed near-surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures — a review. Can. J. Civ. Eng. 2013;40:1127–1139.
- [29]. Nanni A. Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement. Concrete International. 1995;17:22–26..

- [30]. Khalifa Ahmed, Gold William J., Nanni Antonio, et al. Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members. *Journal of Composites for Construction*. 1998;2:195–202.
- [31]. T. C. Triantafillou. Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxybonded FRP composites. *Structural Journal* 95.2 (1998), pp. 107–115.
- [32]. Tumialan J. Gustavo, Vatovec Milan, Kelley Paul L. Case Study: Strengthening of Parking Garage Decks with Near-Surface-Mounted CFRP Bars. *Journal of Composites for Construction*. 2007;11:523–530.
- [33]. Michels Julien, Staśkiewicz Michał, Czaderski Christoph, et al. Prestressed CFRP Strips for Concrete Bridge Girder Retrofitting: Application and Static Loading Test. *Journal of Bridge Engineering*. 2016;21:04016003.
- [34]. Barros JAO, Dias SJE, Lima JLT. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. 2007;29:203–217.
- [35]. Bilotta A., Ceroni F., Di Ludovico M., et al. Bond Efficiency of EBR and NSM FRP Systems for Strengthening Concrete Members. *Journal of Composites for Construction*. 2011;15:757–772.
- [36]. Seo S-Y, Feo L, Hui D. Bond strength of near surface-mounted FRP plate for retrofit of concrete structures. *Composite Structures*. 2013;95:719–727.
- [37]. Fayolle, R. et Courtois, B., Ateliers de traitement thermique, Département Risques chimiques et biologiques, INRS, Hygiène et sécurité du travail - N° 183, Paris. p. 13, 2001.
- [38]. SIMONNET G. Tréfilage de l'acier. *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*. 1996;M645. 1-M645. 12..
- [39]. Laverroux M. Mise en forme des aciers inoxydables par tréfilage. *Revue de Métallurgie*. 1993;90:1293–1302.
- [40]. Hassan Tarek, Rizkalla Sami. Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *Journal of Composites for Construction*. 2003;7:248–257.
- [41]. Seracino Rudolf, Jones Nicola M., Ali M. S., et al. Bond Strength of Near-Surface Mounted FRP Strip-to-Concrete Joints. *Journal of Composites for Construction*. 2007;11:401–409.
- [42]. I. Sharaky. A study of the bond and flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with near surface mounted (NSM) FRP reinforcement. PhD thesis. Girona, Spain: Universitat de Girona, 2013.

- [43]. L. De Lorenzis. Strengthening of RC structures with near surface mounted FRP rods, PhD thesis. University of Missouri-Rolla, United States, 2001.
- [44]. D. Galati and L. De Lorenzis. Experimental Study on the Local Bond Behavior of NSM-FRP Bars to Concrete. In: Proceedings of Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006). 2006, pp. 95–98.
- [45]. M. A. Blaschko. Mechanical behaviour of concrete structures with CFRP strips glued into slits (Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen). PhD thesis. Technical University München, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau (In German), 2001.
- [46]. Parretti R, Nanni A. Strengthening of RC Members Using Near-Surface Mounted FRP Composites: Design Overview. *Advances in Structural Engineering*. 2004;7:469–483.
- [47]. Lorenzis LD, Lundgren K, Rizzo A. Anchorage Length of Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Concrete Strengthening—Experimental Investigation and Numerical Modeling. *SJ*. 2004;101:269–278.
- [48]. Soliman Shehab M., El-Salakawy Ehab, Benmokrane Brahim. Bond Performance of Near-Surface-Mounted FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*. 2011;15:103–111.
- [49]. F. Ceroni, M. Pecce, A. Bilotta, and E. Nigro. Bond behavior of FRP NSM systems in concrete elements. *Composites Part B: Engineering* 2012 : 99–109.
- [50]. Merdas, Contribution à l'étude de l'adhérence renfort-béton et du comportement des poutres en B.A. renforcées par PRFC utilisant la technique NSM (Near Surface Mounted), Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 2011.
- [51]. Tepfers R, A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars, Publication, Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Gothenburg (Sweden), 1973:73:2-328.
- [52]. neubauer, u. & rostasy, f. s. Bond failure of concrete fibre reinforced polymer plates at inclined cracks Experiments and fracture mechanics model. *ACI Special Publication*, 1999:188, 369382.
- [53]. Yuan, h., Teng, j. G., Seracino, r., Wu, z. S. & Yao, j. Full range behaviour of FRPtoconcrete bonded joints. *Engineering Structures*, 2004: 26 (5), 553565.
- [54]. Stratford, T. J. The shear of concrete with elastic FRP reinforcement, PhD Thesis. Jesus College, University of Cambridge, UK. 2001.

- [55]. CHEN, J. F., YUAN, H. & TENG, J. G. Debonding failure along a softening FRP to concrete interface between two adjacent cracks in concrete members. *Engineering Structures*, 2007; 29 (2), 259270.
- [56]. Eligehausen R. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations : experimental results and analytical model /. Berkeley, Calif. : Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California ;; 1983.
- [57]. Malvar LJ. Bond Stress-Slip Characteristics of FRP Rebars [Internet]. Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme Ca; 1994 [Cited 2019 May 26]. report no.: nfesc-tr-2013-shr. available from: <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ada277191>.
- [58]. Cosenza, e., Manfredi, g. & Realfonzo, R., Analytical modelling of bond between FRP reinforcing bars and concrete. In RILEM PROCEEDINGS. CHAPMAN & HALL, (1995).
- [59]. Cosenza, E., Manfredi, G. & Realfonzo, R., Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars. In 2nd International conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBSII), EIBADRY, M. (Ed.). Montreal, Canada. 1996.
- [60]. Cruz JS, Barros J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete. *Computers & Structures*. 2004;82:1513–1521.
- [61]. Capozucca R. Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*. 1995;9(5):295-303.
- [62]. Al-Mahmoud F, Castel A, François R, et al. Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. *Composite Structures*. 2009;91(2):138-147.
- [63]. Parretti R, Nanni A. Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites: Design overview. *Advances in Structural Engineering*. 2004;7(6):469-483.
- [64]. Chen J, Teng J. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Journal of structural engineering*. 2001;127(7):784-791.
- [65]. De Lorenzis L, Rizzo A, La Tegola A. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2002;33(8):589-603.
- [66]. Novidis D, Pantazopoulou S, Tentolouris E. Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2007;21(8):1760-1770.
- [67]. Galati D, De Lorenzis L. Effect of construction details on the bond performance of NSM FRP bars in concrete. *Advances in Structural Engineering*. 2009;12(5):683-700.
- [68]. Bilotta A, Ceroni F, Di Ludovico M, et al. Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members. *Journal of Composites for Construction*. 2011;15(5):757-772.

- [69]. Soliman SM, El-Salakawy E, Benmokrane B. Bond performance of near-surface-mounted FRP bars. *Journal of Composites for Construction*. 2010;15(1):103-111.
- [70]. Lee D, Cheng L, Yan-Gee Hui J. Bond characteristics of various NSM FRP reinforcements in concrete. *Journal of Composites for Construction*. 2012;17(1):117-129.
- [71]. Kalupahana W, Ibell T, Darby A. Bond characteristics of near surface mounted CFRP bars. *Construction and Building Materials*. 2013;43:58-68.
- [72]. Torres L, Sharaky IA, Barris C, et al. Experimental study of the influence of adhesive properties and bond length on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016;22(6):808-817.
- [73]. Sharaky IA, Torres L, Baena M, et al. An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete. *Composite Structures*. 2013;99:350-365.
- [74]. Sharaky IA, Torres L, Baena M, et al. Effect of different material and construction details on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;38:890-902.
- [75]. Al-Saadi NTK, Al-Mahaidi R, Abdouka K. Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete substrate using single-lap shear testing with cement-based adhesives. *Australian Journal of Structural Engineering*. 2016;17(1):28-38.
- [76]. Khshain NT, Al-Mahaidi R, Abdouka K. Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete substrate using single-lap shear testing with epoxy adhesive. *Composite Structures*. 2015;132:205-214.
- [77]. Kotynia R, Szczech D, Kaszubska M. Bond behavior of GRFP bars to concrete in beam test. *Procedia engineering*. 2017;193:401-408.
- [78]. Merdas A, Fiorio B, Chikh N-E. Étude de l'adhérence des joncs et des plats composite avec le béton par flexion (beam test) [Study of the adhesion of composite strips and rods to concrete by bending (the beam test)]. *Comptes Rendus Mécanique*. 2011;339(12):796-804. French.
- [79]. Merdas A, Fiorio B, Chikh N-E. Aspects of bond behavior for concrete beam strengthened with carbon fibers reinforced polymers—near surface mounted. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015;34(6):463-478.
- [80]. Deux G, Festa J. *Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants* [A New Guide to Concrete and Its Constituents]. Editions Eyrolles, Paris. 1998. French.
- [81]. NF P18-560, Essai d'analyse granulométrique par tamisage [Particle size distribution by sieving]; 1981. French.
- [82]. NF P18-406, Essai de compression [Compression test]; 1981. French.

- [83]. NF P18-408, Essai de traction [Tensile test]; 1981. French.
- [84]. EN 10002, metallic materials-tensile testingpart1: method of test at ambient, 2001.
- [85]. NF P18-937, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Détermination de la résistance à la compression pour les mortiers de réparation [Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of compressive strength of repair mortar]; 1998. French.
- [86]. NF P18-923, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de l'adhérence par traction [Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of direct traction adhesion]; 1999. French.
- [87]. RILEM. RILEM Technical Recommendations for the testing and use of construction materials: Taylor & Francis, 1994.
- [88]. Xing G, Zhou C, Wu T, Liu B Experimental study on bond behavior between plain reinforcing bars and concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015;2015:604280–604289.
- [89]. Gao B, Kim J-K, Leung CKY. Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber modified resins. *Composites Science and Technology*. 2004;64:2557–2564.
- [90]. Sen R, Mullins G, Shahawy M, et al. Effect of Environment On the Integrity of CFRP/Concrete Bond. International Society of Offshore and Polar Engineers; 2001
- [91]. Al-Safy R, Al-Mahaidi R, Simon GP, et al. Experimental investigation on the thermal and mechanical properties of nanoclay-modified adhesives used for bonding CFRP to concrete substrates. *Construction and Building Materials*. 2012;28:769–778.
- [92]. Hassan Tarek, Rizkalla Sami. Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *Journal of Composites for Construction*. 2003;7:248–257.
- [93]. Zapata-Massot C. Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux. PHD Thésés. 2004
- [94]. Irekti A., Hami B, Bezzazi B.; Iratni A. Synthetic Nanocomposite Materials Array and Thermosetting Mineral Fillers The International Workshops on Advanced Materials (IWAM), in Ras Al Khaimah, United Arab Emirates, from the 20th-22nd of February 2011.
- [95]. Lee H., Neville K., Handbook of epoxy resins, McGraw-Hill, New-York 1967

- [96]. Derouet D., Forgeard S., Brosse J.C., Emery J., Buzaré J.Y., J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.,1998: 36, 437-53.
- [97]. Benzaid R, Mesbah H-A. The confinement of concrete in compression using CFRP composites – effective design equations. Journal of Civil Engineering and Management. 2014;20:632–648.
- [98]. Chen W, Pham TM, Sichembe H, et al. Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet. Composites Part B: Engineering. 2018;134:114–126.
- [99]. Hernandez DA, Soufen CA, Orlandi MO, et al. Carbon Fiber Reinforced Polymer and Epoxy Adhesive Tensile Test Failure Analysis Using Scanning Electron Microscopy. Materials Research. 2017;20:951–961.
- [100]. Siad A, Bencheikh M, Hussein L. Effect of combined pre-cracking and corrosion on the method of repair of concrete beams. Construction and Building Materials. 2017;132:462–469.
- [101]. Al-Sulayvani BJ, Al-Talabani DN. Strengthening and repair of circular RC slabs with openings using CFRP strips under repeated loading. Construction and Building Materials. 2015;84:73–83.
- [102]. ISO 527-2 « Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. » Geneva: International Organization for Standardization, 1994.
- [103]. Standard ISO 604. Plastics. Determination of Compressive Properties.
- [104]. ASTM D3418. Standard Test Methods of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, 1999.
- [105]. Laouchedi D, Bezzazi B, Aribi C. Elaboration and characterization of composite material based on epoxy resin and clay fillers. Journal of Applied Research and Technology 2017;15:190–204.
- [106]. Bakis C. E., Bank Lawrence C., Brown V. L., et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. Journal of Composites for Construction. 2002;6:73–87.
- [107]. Sharif A, Al-Sulaimani GJ, Basunbul IA, et al. Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates. SJ. 1994;91:160–168.
- [108]. Hosen MA, Jumaat MZ, Islam ABMS. Side Near Surface Mounted (SNSM) technique for flexural enhancement of RC beams. Materials & Design. 2015;83:587–597.

- [109]. Martinelli E, Napoli A, Nunziata B, et al. RC Beams Strengthened with Mechanically Fastened Composites: Experimental Results and Numerical Modeling. *Polymers*. 2014;6:613–633.
- [110]. Yang D-S, Park S-K, Neale KW. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites. *Composite Structures*. 2009;88:497–508.
- [111]. Zhou Y, Gou M, Zhang F, et al. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation. *Materials & Design*. 2013;50:130–139..
- [112]. Ritchie PA, Thomas DA, Lu L-W, et al. External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics. *SJ*. 1991;88:490–500.
- [113]. Rahimi Hamid, Hutchinson Allan. Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates. *Journal of Composites for Construction*. 2001;5:44–56.
- [114]. Arduini M, Tommaso AD, Nanni A. Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams. *SJ*. 1997;94:363–370.
- [115]. Jumaat MZ, Alam MS. Behaviour of U and L shaped end anchored steel plate strengthened reinforced concrete beams. 2008.
- [116]. Shukri AA, Darain KMU, Jumaat MZ. The Tension-Stiffening Contribution of NSM CFRP to the Behavior of Strengthened RC Beams. *Materials (Basel)*. 2015;8:4131–4146.
- [117]. Rosenboom Owen, Rizkalla Sami. Behavior of Prestressed Concrete Strengthened with Various CFRP Systems Subjected to Fatigue Loading. *Journal of Composites for Construction*. 2006;10:492–502.
- [118]. Soliman SM, El-Salakawy E, Benmokrane B. Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010;37:1371–1382.
- [119]. El-Hacha R, Rizkalla SH. Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *Structures*. 2004;101:717–726.
- [120]. Abdellah Douadi, Abdelghani Merdas & Łukasz Sadowski. The bond of near-surface mounted reinforcement to low-strength concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019 ;33 :53–62.
- [121]. Garrity SW. Strengthening of masonry arch bridges with near-surface reinforcement: A case study. *International Journal of Engineering and Technology*. 2013;5:370–373..

- [122]. Hassan Tarek, Rizkalla Sami. Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *Journal of Composites for Construction*. 2003;7:248–257.
- [123]. Hassan TK, Rizkalla SH. Bond Mechanism of Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *Structures*. 2004;101:830–839.
- [124]. Teng J. G., De Lorenzis L., Wang Bo, et al. Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips. *Journal of Composites for Construction*. 2006;10:92–105.
- [125]. AL-mahmoud F, Castel A, François R, et al. Effect of surface pre-conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2007;29:677–689.
- [126]. Al-Mahmoud F, Castel A, François R, et al. Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. *Composite Structures*. 2009;91:138–147.
- [127]. Tong GS, Wang YX, Wu QL, et al. Experimental Study on Flexural Behavior of Damaged Concrete Beams Strengthened with NSM-CFRP Strips [Internet]. *Applied Mechanics and Materials*. 2013 [cited 2019 May 18]. Available from: <https://www.scientific.net/AMM.256-259.1012>.
- [128]. Khalifa AM. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55:1497–1505.
- [129]. Haddad RH, Almomani OA. Recovering flexural performance of thermally damaged concrete beams using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials*. 2017;154:632–643.
- [130]. Dias SJE, Barros JAO, Janwaen W. Behavior of RC beams flexurally strengthened with NSM CFRP laminates. *Composite Structures*. 2018;201:363–376.
- [131]. Kotynia R., 2006. Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips. *Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)*. 13-15 December 2006, Miami, Florida, USA.
- [132]. Kotynia R., 2007. Analysis of the Flexural Response of NSM FRP Strengthened Concrete Beams. In *proceeding of FRPRCS-8, Patras, Greece*.
- [133]. Smith ST, Teng JG. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*. 2002;24:385–395.

ملخص

يدور عمل هاته الأطروحة حول تقوية الخرسانة المسلحة باستخدام تقنية (NSM) Near Surface Mounted هاته الأخيرة تعتبر تقنية تحديث ناشئة، حيث يتم إدخال التعزيزات في الأخاديد. الهدف من البرنامج التجريبي الذي تم تطويره في هذا العمل هو دراسة إمكانية استخدام التعزيزات (قضبان وألواح الكربون أو الأسلاك الفولاذية) لزيادة القدرة الهيكلية للحزم الخرسانية المسلحة المصنوعة من الخرسانة ذات الخصائص الميكانيكية الضعيفة. لتحقيق هاته الأهداف، درسنا أولاً الخواص الميكانيكية والفيزيائية للتعزيزات وتفاعلها مع الخرسانة. أجريت اختبارات الالتصاق أو الانحناء المباشر لوصف سلوك إلتصاق هذه التعزيزات بالخرسانة من خلال تغيير العديد من المتغيرات. وقد تم قياس قوة التمزق في التعزيزات والانزلاق في النهايات المحملة. تم تحليل تأثيرات قوة الخرسانة ونوع التسليح وإضافة الحشوات المعدنية في الغراء الايبوكسي على سلوك الإلتصاق بين هذه المواد الثلاث (الخرسانة، الغراء الايبوكسي، التعزيز). تمت دراسة السلوك العام للحزم المقواة من NSM التي تتعرض للانحناء ذات أربع نقاط. أظهرت النتائج التجريبية أن تعزيز الحزم بواسطة تقنية NSM يثبت أنه مرضٍ للغاية.

الكلمات المفتاحية: الإلتصاق، تجارب الإلتصاق، الإنحناء، المدعمات، غراء الايبوكسي.

Abstract

The work of this thesis focuses on the reinforcement of concrete elements using the Near Surface Mounted (NSM) technique. This latter is considered as an emerging renovation technique that consists on the insertion of reinforcement in the grooves. The objective of the experimental program developed in this work is to study the possibility of using reinforcements (carbon rods and plates or prestressed steel wires) to increase the structural capacity of reinforced concrete beams manufactured from concrete with low mechanical characteristics. To achieve these objectives, we had first studied the mechanical and physical properties of the reinforcements and their interaction with concrete. Flexural or direct bond tests were carried out to characterize the bond behaviour of these reinforcements with concrete by varying several parameters. The tearing forces in the reinforcements and the sliding at the loaded ends were also measured. Moreover, the influences of concrete strength, the type of reinforcement and the addition of mineral fillers in the resin on the bond behaviour between these three materials (concrete, resin, reinforcement) were analyzed. The overall behaviour of NSM-reinforced beams subjected to four-point bending was studied. Experimental results show that the reinforcement of the beams using the NSM technique is very satisfactory.

Keywords : Bond, Bond test, Flexural, NSM, Reinforcement, Resin

Résumé

Ce travail de thèse s'articule autour du renforcement des éléments en béton armé selon la technique Near Surface Mounted (NSM). Cette dernière est considérée comme une technique de rénovation émergente, elle consiste à l'insertion d'un renfort dans des engravures. L'objectif du programme expérimental développé dans ce travail est d'étudier la possibilité d'utiliser des renforts (joncs et plats de carbone ou des fils d'acier de la précontrainte) pour augmenter la capacité structurale des poutres en béton armé fabriquées à partir d'un béton de faibles caractéristiques mécaniques. Pour atteindre ces objectifs, nous avons étudié en premier lieu les propriétés mécaniques et physiques des renforts et leurs interactions avec le béton. Des essais d'adhérence par flexion ou directs ont été effectués pour caractériser le comportement d'adhérence de ces renforts avec le béton en variant plusieurs paramètres. La force d'arrachement dans les renforts et le glissement aux extrémités chargées ont été mesurés. Les influences de la résistance du béton, le type du renfort et l'ajout des charges minérales dans la résine sur le comportement d'adhérence entre ces trois matériaux (béton, résine, renfort) ont été analysés. Le comportement global des poutres renforcées par la technique NSM soumises à une flexion de quatre points est étudié. Les résultats expérimentaux montrent que le renforcement des poutres par la technique NSM s'avère très satisfaisant.

Mots clés : Adhérence, Essai d'arrachement, Flexion, NSM, Renfort, Résine.

