

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences en Génie Civil
Option : Structures et Géo-matériaux

Sous le Thème :

**Contribution à l'étude du comportement et de la
performance des poutres en béton armé renforcées en
flexion simple**

Présentée par :

BOUTLIKHT Mourad

Devant le jury composé de :

M. MANSOURI Tarek	MCA	Université de Batna2	Président
M. LAHBARI Nouredine	Prof.	Université de Batna2	Rapporteur
M. BOUFARH Rafik	MCA	Université de Tébessa	Examineur
M. DJELLALI Adel	MCA	Université de Tébessa	Examineur

Juin 2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, le Professeur **LAHBARI Noureddine**, pour avoir accepté de diriger cette thèse et dont l'aide précieuse m'a été indispensable sur le plan scientifique. Je tiens également à le remercier pour la confiance et la sympathie qu'il m'a témoignées au cours des années de thèse.

Je suis gré au Docteur **FIORIO Bruno**, de l'université de Cergy Pontoise, je le remercie très particulièrement pour ses conseils scientifiques et orientations dans le domaine du comportement des poutres en BA renforcées par composites.

Comme guise de reconnaissances j'adresse mes sincères remerciements, mon grand respect et ma noble gratitude à M. **MANSOURI Tarek**, Docteur à l'université de Batna 2 ; le président de jury que je remercie profondément pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Toute ma gratitude à Dr. **BOUFARH Rafik**, de l'université de Tébessa d'avoir accepté de participer à ce jury de soutenance. Je le remercie de trouver le temps et la volonté de faire le déplacement pour examiner ce travail.

M. **DJELLALI Adel**, maître de conférences à l'université de Tébessa; acceptez monsieur mes respectueux remerciements pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'être examinateur de la présente thèse.

Mes remerciements sont destinés à Docteur K. Hebbache aujourd'hui maître de conférence A à l'université Sétif 1, à qui je dois énormément pour son soutien et ses orientations durant cette recherche. Mes remerciements sont destinés de même à, Docteur S. Tabchouche de l'université Sétif 1, à qui je dois énormément pour l'encouragement et toute l'aide qu'il m'a apporté.

J'adresse également mes remerciements à mes amis et collègues du département de génie civil, en particulier Abderraouf Messai, Abdelhamid Karrouche et Abdelah Douadi pour leur aide et soutien lors de l'élaboration des essais.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de la présente thèse de Doctorat.

Enfin, je tiens à adresser mes sincères remerciements ainsi que ma gratitude la plus dévouée, pour leur dévouement et surtout pour leur amour et le sacrifice qu'ils m'ont accordés, à mes deux étoiles scintillantes (mes parents), à ma très chère épouse, à mes enfants et surtout "Assoula".

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mes parents, très chers parents Mohamed et Nazia BENAMAR
A mon épouse et mes enfants,*

A mes frères, Rassim, Redha et Hakou

A l'ensemble de ma famille et à mes amis.

Résumé

Les Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PRFC) ont été largement adoptés pour le renforcement en flexion et en cisaillement des structures en béton armé en raison de leurs nombreux avantages, à savoir, une faible densité, un rapport résistance-rigidité élevé, un excellent comportement à la fatigue, la résistance à la corrosion et la durabilité élevée dans des conditions d'environnement typique aux constructions de génie civil. Ces matériaux composites peuvent être appliqués en utilisant soit la technique EBR (*Externally Bonded Reinforcing*) ou la technique NSM (*Near Surface Mounted*). L'ajout de renfort en PRFC va déplacer l'axe neutre de la section pour rétablir l'équilibre des forces internes. Dans ce cas-là, la ruine peut atteindre les éléments renforcés, par rupture prématurée du béton. Théoriquement pour assurer un comportement ductile des sections en B.A, il faut jouer sur les dimensions du béton, acier et renforts en PRFC. Chose qui n'est pas pratique du fait que les poutres à renforcer existaient déjà et les fibres de carbone seront collées pour améliorer la résistance. La présente investigation vise à examiner la question de performance des poutres renforcées par des plats en PRFC, notamment l'influence de la disposition des renforts, la technique utilisée, et le taux d'armatures tendues sur le comportement des poutres en BA renforcées. Au total, onze poutres rectangulaires dont trois poutres de contrôle (CB) et huit poutres renforcées par des plats en PRFC, selon deux techniques NSM et EBR. Différents paramètres influents ont été examinés tels que la disposition des renforts, le taux d'armatures tendus et la technique de renforcement. La présente étude a révélé que la capacité portante, la ductilité et la rigidité des poutres renforcées augmentent avec la disposition dispersée des renforts. L'augmentation est plus marquée pour la technique EBR.

Mots clés : Flexion simple, Poutre renforcée, NSM-EBR, Disposition de PRFC, Mode de ruine, Capacité flexionnelle.

Abstract

Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) have been widely adopted for flexural and shear reinforcement of reinforced concrete structures because of their several advantages, such as low density, high ratio of strength to stiffness, excellent fatigue behavior, corrosion resistance and high durability under environmental conditions typical to civil engineering constructions. These composites can be applied using two techniques, EBR (Externally Bonded Reinforcing) or NSM (Near Surface Mounted). The addition of CFRP reinforcement will displace the neutral axis of the section to restore the internal forces equilibrium. In this case, the failure can reach the reinforced elements, by the premature rupture of the concrete. Theoretically, to ensure a ductile behavior of the RC sections, it is necessary to work on the dimensions of concrete, steel and CFRP reinforcements. This is impractical, because the beams to be reinforced were already existed and the carbon fibers will be bonded to improve the strength. The present investigation aims to examine the performance of beams strengthened with CFRP plates, including the influence of the arrangement of strips, the technique used, and the ratio of reinforcement bars, on the behavior of reinforced beams. A total of eleven rectangular beams including three control beams (CB) and eight beams strengthened with CFRP plates using two techniques NSM and EBR. Different influenced parameters were examined such as the arrangement of the reinforcements, the rate of tensile reinforcement and the strengthening technique. The present study revealed that the flexural load capacity, the deflection, the ductility and the stiffness of strengthened beams increased with increasing of plates distribution.

Keywords: Simple bending strengthened beam, NSM-EBR, Arrangement of strips, Failure modes, Flexural capacity.

ملخص

تم تبني البوليمرات المعززة بألياف الكربون (PRFC) على نطاق واسع من أجل تعزيز الهياكل الخرسانية المعززة تحت الانحناء أو القص وذلك لمزاياها المتعددة، مثل انخفاض الكثافة، ارتفاع نسبة القوة إلى الصلابة، والسلوك الممتاز للإرهاق، ومقاومة الصدأ، وارتفاع قابلية الاستدامة في ظل الظروف البيئية الشائعة لمنشآت الهندسة المدنية. يمكن تطبيق هذه المواد باستخدام تقنيتين؛ التعزيز الخارجي (EBR)، أو التعزيز شبه السطحي (NSM).

من حيث السلوك، فإن التصميم المثالي فقط هو المفضل، من أجل دفع البناية إلى تبديد الطاقة الممتصة، وتؤدي إلى خاصية اللدونة للبناية. من ناحية أخرى، ستؤدي إضافة التعزيزات إلى تعديل المحور المحايد لمقطع الروافد لاستعادة توازن القوى الداخلية وفي هذه الحالة، يمكن أن يصل الفشل إلى العناصر المعززة، عن طريق التكسر القبلي للخرسانة.

نظرياً، لضمان السلوك اللدن للروافد، من الضروري العمل على أبعاد الخرسانة والتسليح الفولاذي والتعزيزات البوليميرية حيث يتم بعده ربط الروافد بالألياف الكربونية لتحسين المقاومة. وهذا أمر غير عملي لأن الروافد المراد تعزيزها متواجدة قبل التعزيز لذلك وجب اللجوء إلى حلول أخرى قائمة على تقنيات التعزيز والأساليب المستعملة.

يهدف هذا التحقيق إلى دراسة أداء الروافد المعززة بشرائط البوليمار المعزز بما في ذلك تأثير ترتيب الشرائط، والتقنية المستخدمة، ونسبة التسليح الطولي، على سلوك الروافد المعززة.

أحدا عشرة رافده مستطيلةً منها ثلاثة روافد غير معززة للتحكيم، وثمانية روافد معززة باستخدام التقنيتين حيث تم بحث مختلف البارامترات المؤثرة مثل ترتيب التعزيزات، معدل التسليح، وتقنية التعزيز المستعملة.

كشفت هذه الدراسة عن أن القدرة على التحميل، الانحناء، اللدونة والصلابة للروافد المعززة قد ازدادت بزيادة توزيع الشرائط.

الكلمات المفتاحية: الانحناء البسيط، الروافد المعززة، NSM-EBR، ترتيب الشرائط، طرق الانهيار، قدرة احتمال الانحناء.

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

TABLE DES MATIERES..... I

LISTE DES FIGURES..... IV

LISTE DES TABLEAUX VII

LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS VIII

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....2

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

1.1 Introduction6

1.2 Matériaux composites.....6

1.3 Fabrication des matériaux composites en PRF7

1.3.1 Pultrusion8

1.3.2 Le moulage par contact (*Wet lay-up*)9

1.3.3 L'enroulement filamentaire9

1.4 Propriétés mécaniques des PRF11

1.5 Adhésifs utilisés pour renforcement par PRF12

1.6 Techniques de renforcement.....16

1.6.1 Technique renforcement par collage externe (EBR)16

1.6.2 Technique Near surface mounted (NSM)18

1.7 Travaux de recherches antérieures.....19

1.8 Conclusion.....22

CHAPITRE 2: COMPORTEMENT EN FLEXION DES ELEMENTS EN BA RENFORCES

2.1 Introduction24

2.2 Portée de cisaillement et son influence sur les poutres.....24

2.3 Comportement d'une poutre en béton armé26

2.3.1 Réponse globale moyenne à une charge croissante.....26

2.3.2 Modes de rupture.....29

2.4	Comportement d'une poutre en béton armé renforcée par composites PRF	31
2.4.1	Réponse globale moyenne à une charge croissante.....	31
2.4.2	Modes de rupture.....	32
2.4.2.1	Poutre renforcée par la technique EBR	32
2.4.2.2	Poutre renforcée par la technique NSM.....	35
2.5	Modèle théorique et codes de calcul des éléments en BA renforcés par PRFC	37
2.5.1	American Concrete Institute (ACI440.2R.08)	37
2.5.1.1	État limite ultime	39
2.5.1.2	État limite de service	40
2.5.2	Association Française de Génie Civil (AFGC)	40
2.5.2.1	État limite ultime	41
2.5.2.2	État limite de service	45
2.5.3	Fédération Internationale du Béton (FIB2001)	45
2.5.3.1	État limite ultime	46
2.5.3.2	État limite de service	47
2.6	Conclusion	47

CHAPITRE 3: PROGRAMME EXPERIMENTAL

3.1	Introduction	50
3.2	Objectifs du programme expérimental	53
3.3	Programme expérimental.....	54
3.4	Caractéristiques des matériaux	54
3.4.1	Le Béton	54
3.4.2	Les armatures de ferrailage	58
3.4.3	Le renfort.....	59
3.4.4	L'adhésif époxy	60
3.5	Préparation des spécimens.....	61
3.6	Préparation des surfaces et collage des renforts	63
3.7	Dispositif d'essai	66
3.8	Instrumentation des essais	67
3.9	Configuration des spécimens.....	68
3.10	Conclusion.....	72

CHAPITRE 4: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1	Introduction	74
-----	--------------------	----

4.2	Poutres de la série 01 (effet de la disposition).....	76
4.2.1	Capacité flexionnelle.....	76
4.2.2	Courbes de charge-flèche.....	77
4.2.3	Modes de rupture.....	79
4.2.4	Ductilité et Déformabilité.....	82
4.2.5	L'énergie d'absorption.....	84
4.2.6	La rigidité des poutres.....	85
4.2.7	Courbes de réponse Charge-déformation.....	86

CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

1.1	Synthèse du travail expérimental effectué.....	90
1.2	Conclusions.....	90
1.2.1	Effet de la disposition des plats en PRFC.....	90
1.3	Recommandations et perspectives.....	95

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 97

ANNEXES

	Annexe A- Mise en œuvre du renfort.....	120
A.1.	Préparation du support.....	120
A.2.	Préparation du renfort.....	120
A.3.	Préparation de la résine.....	120
A. 4.	Etape d'application du renforcement.....	121
	Annexe B- Fixation des jauges de déformation.....	124
B.1.	Jauges sur le béton.....	124
B.2.	Jauges sur le renfort en composite.....	126
B.3.	Jauges sur les barres d'acier.....	128

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Techniques de renforcement	3
Figure 1. 1. Applications des PRF dans le domaine du génie civil, (a) le pont au Sud du Yard Country Club au Japon , (b) le pont de Brandon sur la rivière Assiniboine, Manitoba au Canada , (c) Renforcement d'un mur en maçonnerie avec du PRFG et (d) Renforcement de la poutre d'un pont avec du tissu de PRFC.....	7
Figure 1. 2. Fabrication du PRF par pultrusion	8
Figure 1. 3. Traitement de surface de quelques barres en PRF	8
Figure 1. 4. Fabrication du PRF par enroulement filamentaire.....	9
Figure 1. 5. Différents types de renforts en PRF composites : (a) Plats, (b) Tissus, (c) Barres et (d) Profilées.....	10
Figure 1. 6. Diagramme contrainte-déformation des barres de PRF et d'acier.	12
Figure 1. 7. Organigramme des différentes familles de fibres	12
Figure 1. 8. Organigramme des différentes familles de matrice	13
Figure 1. 9. Sollicitations agissant sur un joint collé.....	14
Figure 1. 10. Techniques de renforcement.....	17
Figure 1. 11. Applications des produits PRF selon différentes techniques, (a) collage direct des plaques de PRF, (b) tiges rondes et carrées, lamelles de PRF utilisées selon NSM et (c) tissu de PRF collé avec époxy.....	17
Figure 2. 1. Poutres en flexion simple.....	25
Figure 2. 2. Modes de rupture des poutres en BA sans armatures de cisaillement.	26
Figure 2. 3. Courbe charge-flèche pour une poutre en béton armé.	28
Figure 2. 4. Comportement des poutres sous armée et sur armée en flexion.....	29
Figure 2. 5. Rupture par flexion d'une poutre en BA.	29
Figure 2. 6. Rupture par contrainte principale oblique.....	30
Figure 2. 7. Rupture par cisaillement due à la compression.....	31
Figure 2. 8. Diagramme moment-courbure d'une poutre en BA renforcée par composite.	32
Figure 2. 9. Ruine par rupture du composite en PRF d'une poutre en BA renforcée	33
Figure 2. 10. Rupture par écrasement du béton d'une poutre en BA renforcée.....	33
Figure 2. 11. Rupture par cisaillement d'une poutre en BA renforcée	33
Figure 2. 12. Rupture par décollement d'une poutre en BA renforcée	34
Figure 2. 13. Rupture par séparation de l'enrobage du béton	34
Figure 2. 14. Rupture par décollement du renfort en PRF à l'extrémité.....	35
Figure 2. 15. Rupture par décollement du composite à mi-portée de la poutre	35
Figure 2. 16. Modes de rupture des poutres renforcée selon NSM	36

Figure 2. 17. Distribution des déformations et des efforts internes pour une section rectangulaire en flexion à l'état limite ultime.....	38
Figure 2. 18. Bloc de contrainte rectangulaire simplifié du béton et diagramme (σ - ϵ) des aciers adoptés par le BAEL	41
Figure 2. 19. Distribution des déformations et des contraintes dans une section.....	42
Figure 2. 20. Distribution des déformations et des contraintes dans une section.....	42
Figure 2. 21. Bloc de contrainte rectangulaire simplifié du béton et diagramme (σ - ϵ) des aciers adoptés par L'EC2	47
Figure 3. 1. Essais pour détermination des caractéristiques du béton, a) Essai de compression et détermination du module d'élasticité, b) Essai de traction par fendage.	56
Figure 3. 2. Essais sur béton, a) Essai au cône d'Abrams, b) Surfaçage au soufre des éprouvettes.	58
Figure 3. 3. Lamelles en PRFC (SIKA).	60
Figure 3. 4. Résine époxy utilisée.	60
Figure 3. 5. Configuration de l'essai de flexion.....	60
Figure 3. 6. Préparation et réalisation des spécimens.....	62
Figure 3. 7. Étapes de l'installation du PRFC sur les poutres selon EBR	64
Figure 3. 8. Étapes de l'installation du PRFC sur les poutres selon NSM.....	64
Figure 3. 9. Dispositif expérimental et système d'acquisition.	66
Figure 3. 10. Capteur LVDT pour la mesure des déplacements.	67
Figure 3. 11. Installation des jauges de déformation sur : (a) l'armature, (b) le plats) and (c) le béton.....	68
Figure 4. 1. Capacité de charge en flexion des poutres renforcées.	76
Figure 4. 2. Courbe Charge-flèche à mi-portée des poutres testées. a) Poutres renforcées par la technique NSM. b) Poutres renforcées par la technique EBR.	78
Figure 4. 3. Mode de rupture de la poutre contrôle (CB.1.U).	80
Figure 4. 4. Mode de rupture des poutres renforcées selon la technique EBR.....	81
Figure 4. 5. Mode de rupture des poutres renforcées selon la technique NSM.....	82
Figure 4. 6. Facteurs de ductilité et de déformabilité des poutres.....	83
Figure 4. 7. Influence de la disposition des PRFC sur la capacité d'absorption d'énergie des poutres testées.	85
Figure 4. 8. Influence de la disposition des PRFC sur la rigidité des poutres testées.	86
Figure 4. 9 . Déformation de l'armature tendue et du béton de comprimé à mi-portée des poutres testées.	88

Figure 4. 10. Déformation de l'armature tendue et du PRFC à mi-portée des poutres testées.....	89
Figure A. 1. Préparation de la résine époxy.	121
Figure A. 2. Préparation de surface, traçage et application de la résine pour le renforcement selon EBR.	122
Figure A. 3. Préparation de surface, traçage et application de la résine pour le renforcement selon NSM.	124
Figure B. 1. Kits d'installation des jauges de déformation.	124
Figure B. 2. Fixation de la jauge sur le béton.....	125
Figure B. 3. Nettoyage de la surface du renfort par les produits solvants, catalytiques et neutralisant	126
Figure B. 4. Manipulations pour la prise et la fixation de la jauge de déformation sur le PRFC	127
Figure B. 5. Manipulations pour la prise et la fixation de la jauge de déformation sur le ferrailage	129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1. Propriétés des différentes barres en PRF et en acier	11
Tableau 1. 2. Propriétés typiques des résines.....	13
Tableau 1. 3. Facteur de réduction environnementale pour le renforcement interne par PRF.....	15
Tableau 1. 4. Facteur de réduction environnementale pour le renforcement externe par PRF....	16
Tableau 2. 1. Classification des poutres en BA sollicitées en flexion simple.....	25
Tableau 3. 1. La composition du béton adoptée pour les spécimens	55
Tableau 3. 2. Caractéristiques du béton obtenues à partir des essais	58
Tableau 3. 3 . Caractéristiques des armatures en acier.....	59
Tableau 3. 4. Caractéristiques des lamelles en PRFC et de l'adhésif époxy.	59
Tableau 3. 5. Notation des spécimens de la Série 01	70
Tableau 3. 6. Notation des spécimens de la Série 02	71
Tableau 4. 1. Résultats des essais pour l'ensemble des poutres.....	75
Tableau 4. 2. Résumé des facteurs de ductilité et de déformabilité.....	82
Tableau 4. 3. Résumé de l'énergie d'absorption et de la rigidité des poutres testées	84
Tableau 4. 4. Résultats des déformations du béton à la ruine pour différentes dispositions de renfort	87
Tableau 4. 5. Résultats des déformations des armatures à la ruine pour différentes dispositions de renfort.	87
Tableau 4. 6. Résultats des déformations des plats de PRFC à la ruine pour différentes dispositions de renfort.	89

LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

Abréviations

ACI	American Concrete Institut
AFGC	Association Française de Génie Civil
BA	Béton armé
EBR	Externally Bonded Reinforcement
EC	Eurocode
ELU	Etat limite ultime
ELS	Etat limite de service
FIB	Fédération Internationale du Béton
ISIS	Intelligent Sensing for Innovative Structures
NSM	Near-Surface Mounted
PRFC	Polymère Renforcé de Fibre de Carbone
SBA	Structure en Béton Armé

Notations

$A_c(x)$	Aire de la partie comprimée du béton, en fonction de x
A_f	Aire de la section du renfort
A_s	Aire de la section d'aciers tendus
A'_s	Aire de la section d'aciers comprimé
A_u	Section utile
a	Longueur de cisaillement
b	Largeur de la section
d	Hauteur utile de la section
d'	Enrobage des armatures tendues
E_c	Module de Young du béton
E_f	Module de Young du renfort en composite (PRFC)

E_s	Module de Young de l'acier
F_C	Force dans le béton
F_f	Force de traction dans le renfort en PRFC
F'_s	Force de compression des aciers comprimés
F_s	Force de traction des aciers tendus
f_{cd}	Résistance de calcul du béton
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton (à partir d'un cylindre)
f_f	Contrainte dans le renfort en PRFC
f_{fu}	Contrainte limite du renfort en PRFC
f_s	Contrainte dans l'acier tendu
f'_s	Contrainte dans l'acier aciers comprimés
f_t	Résistance à la traction par fendage du béton
f_{yk}	Contrainte limite d'écoulement de l'acier
h	Hauteur de la section
I_{cr}	Moment d'inertie critique de la section
K_1	Coefficient de remplissage du bloc de contrainte du béton
K_2	Coefficient de positionnement du bloc de contrainte du béton
L	Longueur totale de la poutre
M_u	Moment fléchissant ultime
M_y	Moment correspondant au point d'écoulement des armatures tendues
M_{cr}	Moment correspondant à l'apparition de la première fissure
t_f	Épaisseur du renfort en PRFC
x	Profondeur de l'axe neutre
α_f	Facteur permettant de prendre en compte les effets liés au vieillissement
γ_c	Coefficient de sécurité du béton
$\gamma_{f,u}$	Facteur pour carbone- époxyde pultrudés
γ_s	Coefficient de sécurité de l'acier
Δ_u	Flèche à la rupture

ε_{cu}	Déformation relative limite du béton
ε_{c0}	Déformation relative limite du béton
ε_f	Déformation relative du renfort
ε_{fu}	Allongement limite du renfort
ε_s	Déformation relative dans les aciers tendus
ε'_s	Déformation relative dans les aciers comprimé
ε_{yk}	Déformation relative maximale dans les aciers
ε_0	Déformation initiale du composite
μ_d	Coefficient de Poisson
ρ_f	Taux du renfort en composite
ρ_s	Taux d'armature tendue
ρ'_s	Taux d'armature comprimée

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Introduction

L'effort économique de réhabilitation et d'entretien des ouvrages en génie civil sera de plus en plus augmenté durant les prochaines années, en raison de la tendance croissante à la réhabilitation et au renforcement des infrastructures civiles existantes devant l'énorme budget destiné aux nouvelles constructions. Par conséquent, le renforcement des structures en béton pendant leur durée de vie est l'une des difficultés essentielles qu'il faudra affronter par les ingénieurs en structure dans le monde. Ces structures en béton seront probablement insuffisantes suite aux changements de fonctionnalité, augmentation des charges appliquées, erreurs de conception, corrosion et dégradation suite aux conditions environnementales et climatiques.

Les structures en béton armé (**SBA**) peuvent être renforcées à l'aide de différentes solutions, à savoir, les enveloppes en acier ou en béton, la post-tension externe, le renforcement par des plaques d'acier fixées par la technique **EB** (*Externally-Bonded*), le remplacement des éléments dégradés ou l'ajout d'éléments supplémentaires. Bien que ces méthodes de réparation traditionnelles puissent améliorer la résistance, la capacité portante et la rigidité des structures en béton, elles peuvent également augmenter le poids propre des structures réparées et le délai de réparation s'avère parfois exagérer. Ainsi, pour réparer ou renforcer les éléments de structure en béton existants, la réflexion à d'autres matériaux et méthodes de renforcement était plus que nécessaire. Comme alternative, les polymères renforcés de fibres (PRF) s'imposent dans le secteur du génie civil pour le renforcement et la réhabilitation des infrastructures existantes. Les composites PRF (Polymère Renforcé de Fibre), souvent légères, présentent des résistances élevées à la traction, une bonne tenue à la corrosion, une faible conductivité thermique, une résistance à la fatigue, une disponibilité sous diverses formes facilitant l'installation, ainsi qu'une période réduite de fixation. Les techniques les plus courantes pour renforcer les structures en BA utilisant les FRP sont celles généralement connues sous le nom "*Externally Bonded Reinforcement* (EBR)" et "*Near Surface Mounted* (NSM)", représentées sur la figure 1. Des études ont révélé que la technique de renfort par PRFC NSM offre une meilleure efficacité du renforcement en cisaillement et en flexion que la technique EBR [1, 2]. De plus, cette technique (NSM), en plus de la réduction de la possibilité de rupture prématurée par décollement des renforts, offre une meilleure résistance au feu [3].

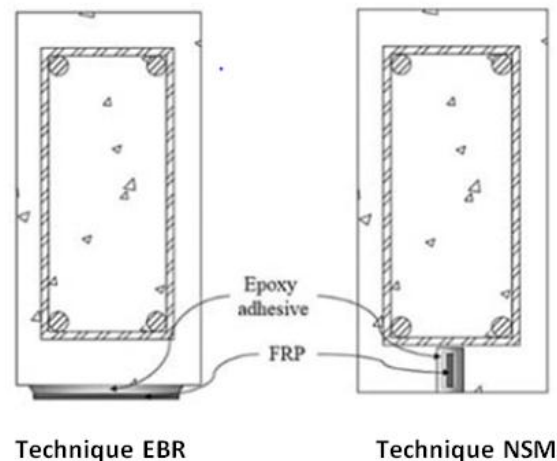


Figure 1. Techniques de renforcement [3].

La technique NSM est basée sur l'insertion de renforts en PRF dans une rainure réalisée sur la surface tendue des éléments de structures en béton armé (BA). Cependant la technique EBR consiste au collage de PFR sur la surface tendue des structures BA.

Dans différentes situations de renforcement, bien que la capacité de charge ultime des poutres renforcées par des **PRFC** (Polymère Renforcé de Fibre de Carbone) s'est améliorée d'une façon significative par rapport aux poutres non renforcées, l'augmentation des charges correspondant à la formation de la première fissure du béton et à l'écoulement des aciers sont généralement modérées, voire insuffisantes dans certains cas [4].

Bien que de nombreux experts dans le monde aient effectué de multiples tests et analyses théoriques sur le renforcement des poutres en béton armé à l'aide de PRFC, il n'y a pas eu des recherches comparatives sur la répartition des renforts et leur effet, lors du renforcement selon les deux techniques, sur le comportement global des éléments renforcés et éventuellement son influence sur la rigidité, la ductilité et la déformabilité.

1.2 Objectifs de la thèse

Les différents objectifs de la thèse sont résumés comme suit :

- Approfondissement des connaissances en matière de comportement des structures renforcées et d'optimisation du comportement,
- Conduite d'un programme expérimental sur des éléments poutres en BA à échelle réduite (des poutres contrôles, poutres renforcées par NSM et poutres renforcées par EBR),
- Interprétation et analyse des résultats des essais expérimentaux,

- Etude de l'effet des différents paramètres sur le comportement et la performance des poutres renforcées tels que la disposition des renforts PRFC, le taux d'armatures longitudinales et la taille d'engravures pour la technique NSM,
- Etude comparative sur les différents spécimens testés,
- Apports de conclusions et recommandations pratiques.

1.3 Structuration de la thèse

La thèse est structurée comme suit :

- **Chapitre I** : Après une introduction générale sur la problématique traitée dans le présent travail de recherche où les objectifs recherchés sont dévoilés, le chapitre 1 est consacré à un aperçu général sur les matériaux composites en PRF en exposant les modes de fabrication, les produits composites existants, leurs propriétés mécaniques et les adhésifs utilisés avec les PRF dans les applications de renforcement des ouvrages en génie civil. Ensuite, les aspects pertinents des techniques de renforcement EBR et NSM sont présentés.
- **Chapitre II** : Une synthèse bibliographique sur la théorie du comportement en flexion des poutres en BA et des poutres en BA renforcées, est présentée dans ce chapitre. Les modes de ruine possibles pour les poutres en BA non renforcées et les poutres renforcées sont décrits et une attention particulière a été accordée au phénomène de décollement. Ensuite une présentation a été effectuée de quelques codes et normes internationales relatifs au calcul des poutres en BA renforcées par des composites. Des modèles théoriques de calcul basés sur ces différents codes ont été proposés.
- **Chapitre III** : Les détails du programme expérimental mené dans le cadre de la présente étude sont présentés. En premier lieu, la caractérisation des matériaux, où les résultats et les discussions sont illustrés en détail. La matrice d'essai des spécimens est fournie, suivie d'une description de la réalisation des poutres, comportant la préparation des poutres en BA et l'application des renforcements selon les deux techniques NSM et EBR. A la fin, l'instrumentation et la configuration des tests sont décrites.
- **Chapitre IV** : Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des différents résultats pertinents obtenus à travers l'ensemble des essais effectués sur les poutres. Enfin, la thèse est achevée avec une conclusion générale en plus de quelques perspectives et suggestions pour des travaux futurs.

Chapitre **1**

ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART

1.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les techniques de renforcement utilisées pour la réparation et le renforcement des éléments de structure en béton armé (**BA**). Les aspects pertinents des techniques de renforcement par collage externe (**EBR**) et par montage à proximité de la surface (**NSM**) sont présentés. Une synthèse sur les matériaux composites en PRF est effectuée, présentant les produits existants en PRF, leurs modes de fabrication, leurs propriétés mécaniques ainsi que les types d'adhésifs utilisés dans l'application des renforcements. Une étude détaillée sur l'adhérence entre le PRF et le béton est présentée, incluant les modes de rupture ainsi que les paramètres affectant la capacité d'adhérence des résines. Une présentation des travaux existants sur le comportement en flexion des éléments en BA renforcés par des PRF est présentée, particulièrement les modes de rupture observés. Enfin, un aperçu détaillé sur le comportement des éléments en béton armé renforcés par PRF est présenté, y compris les travaux de recherche effectués sur les éléments en béton armé renforcés par PRF selon les techniques (EBR et NSM).

1.2 Matériaux composites

L'utilisation des matériaux composites présente de nombreux avantages par rapport aux matériaux classiques de renforcement. Ils offrent plus d'avantages fonctionnels et techniques, tels que : facilité de montage, légèreté, durabilité et résistance mécanique et chimique. Le PRF est le matériau composite le plus couramment utilisé dans une grande variété d'applications en génie civil, à savoir, les structures en PRF, le béton armé de barres en PRF, la réparation et la réhabilitation des structures par les PRF (figure 1.1).

Les PRF sont une sous-famille de la grande famille des composites. Le mot composite vient de la symbiose de deux ou de plusieurs matériaux, et une fois composite, ce matériau formé aura des propriétés plus avantageuses que celles de ses constituants pris individuellement.

Les PRF sont constitués de différents types de fibres (carbone, verre, aramide et basalte) incorporées dans une matrice en polymères (époxy, vinyl-ester et polyester) [5]. Cependant, une variété de produits peut être utilisée comme fibre, exemple les fibres de bouteilles en Polyéthylène Téréphtalate (PET), qui ont été utilisées pour améliorer la ductilité du béton [6, 7].

Contrairement aux barres en acier, la résistance à la traction des barres PRF ne peut être considérée comme constante et dépend de la section transversale. Lorsqu'une barre de PRF est sollicitée en traction, un glissement différentiel entre la matrice et la surface des fibres peut se produire et

entraîne une distribution non uniforme des contraintes normales à travers la section transversale de la barre [8].

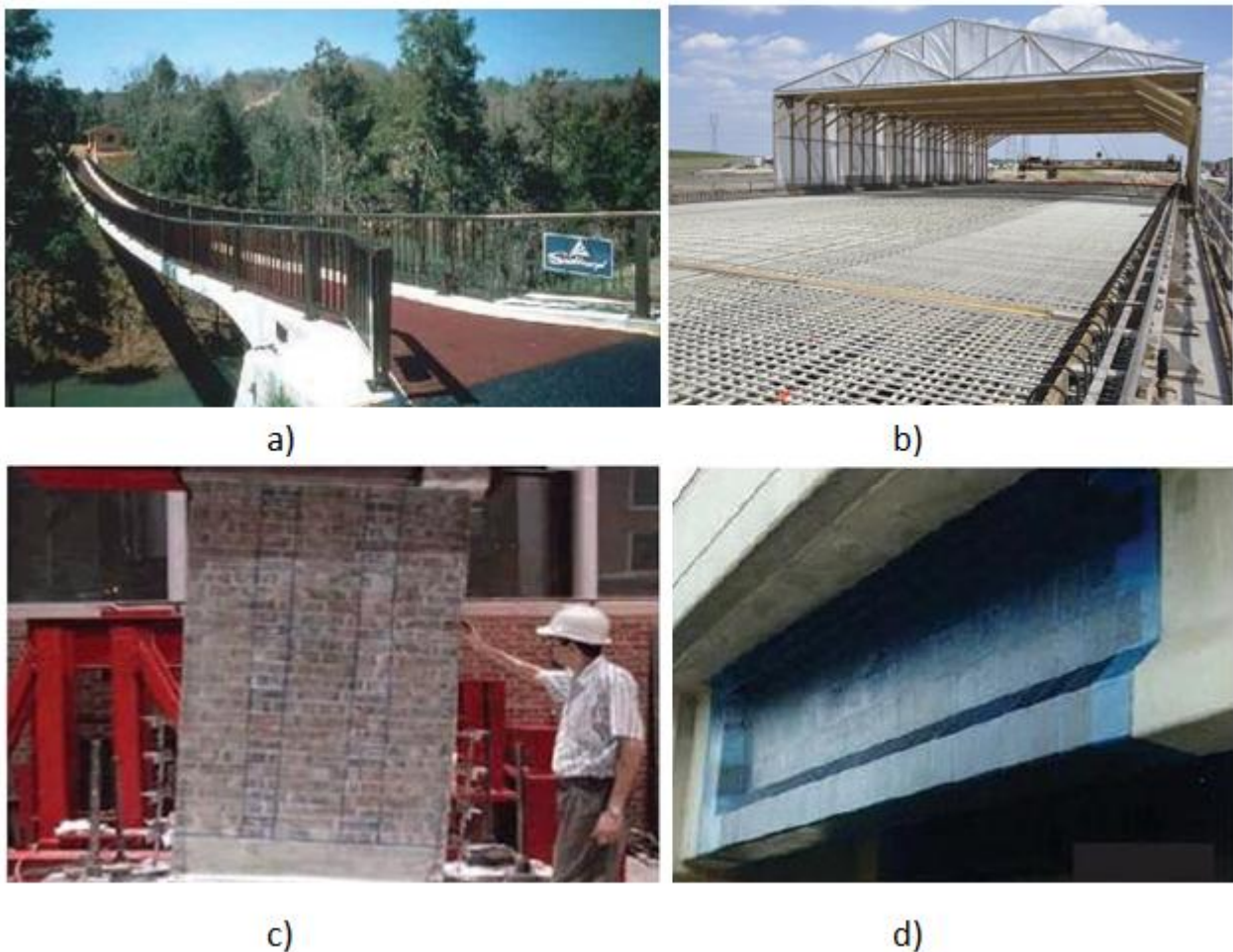


Figure 1. 1. Applications des PRF dans le domaine du génie civil, (a) le pont au Sud du Yard Country Club au Japon , (b) le pont de Brandon sur la rivière Assiniboine, Manitoba au Canada , (c) Renforcement d'un mur en maçonnerie avec du PRFG et (d) Renforcement de la poutre d'un pont avec du tissu de PRFC [1, 9, 10] .

Les barres en PRF sont également fabriquées avec divers traitements de surface qui affectent considérablement leur adhérence lorsqu'elles sont utilisées comme armature [9]. La figure 1.2 illustre les traitements de surface de certaines barres en PRF disponibles dans le secteur de génie civil.

1.3 Fabrication des matériaux composites en PRF

Parmi une grande variété de techniques permettant de fabriquer des composites en PRF, trois d'entre elles sont plus intéressantes pour l'ingénierie structurelle :

1.3.1 Pultrusion

La présente technique est utilisée pour la fabrication de composites PRF de sections transversales uniformes telles que les barres, les tiges, les tendons, les lamelles et les profilés structuraux en PRF. La fabrication par pultrusion est un processus continu qui combine un réseau de fibre et la matrice thermodurcissable (figure 1.2).

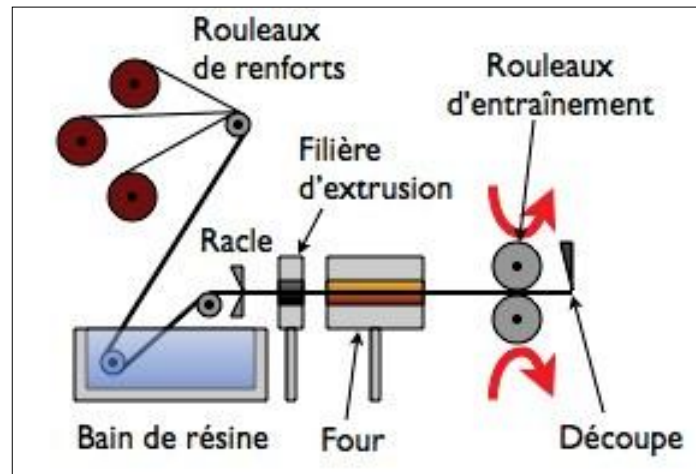


Figure 1. 2. Fabrication du PRF par pultrusion [9].

Partant de différentes bobines, les fibres convergent vers un bain de résine chaude et liquide où elles sont noyées. Les fibres subissent la première moulure pour définir la section. Après le passage dans le bain, les fibres imprégnées passent dans la moulure finale, alors que la résine est encore à l'état liquide. Par la suite, la surface finale du PRF est traitée : sablé, tressé, ou enroulé sous forme hélicoïdale. La figure 1.3 montre certains traitements de surface de barres en PRF. Dans le cas du sablage du PRF, le sable est projeté sur la barre pour bien améliorer son adhérence après durcissement de la résine. Par la suite, un passage du PRF dans le four à température bien précise où le processus de polymérisation se fait. Enfin les barres sont coupées à des longueurs définies.

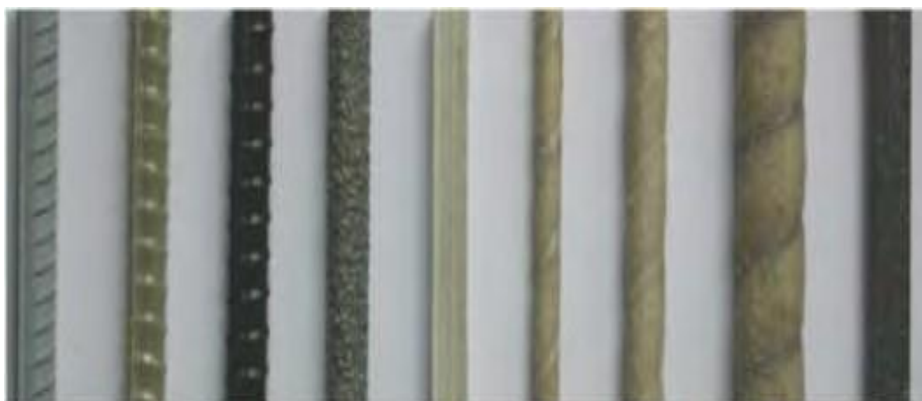


Figure 1. 3. Traitement de surface de quelques barres en PRF [5].

Cette technique a l'avantage de produire des formes et des longueurs selon les spécifications et les conditions d'utilisation. Les fibres dans cette technique sont alignées selon la longueur, créant ainsi un PRF unidirectionnel.

1.3.2 Le moulage par contact (*Wet lay-up*)

Comme son nom l'indique, c'est tout simplement le moulage par contact liquide. Pour ce type de PRF, le produit est livré sans résine (produit prévu de matrice époxy), il s'agit d'une texture de fibres disposées selon différentes directions. Il est particulièrement utilisé dans la réhabilitation des structures où des feuilles ou tissus en PRF sont collés à l'extérieur des éléments en béton armé, en acier, en aluminium ou en bois. Les tissus ou feuilles sont préalablement saturés de résine époxy. Le principe est de couvrir la surface de l'élément de structure à renforcer par le mélange de résine époxy. Par la suite, à l'aide d'un rouleau, on applique le tissu imbibé de résine et on le presse pour qu'il s'enfonce. A la fin une couche supplémentaire de résine est ajoutée afin de s'assurer que les fibres du tissu soient complètement imprégnées. Plusieurs couches de tissu peuvent également être superposées.

1.3.3 L'enroulement filamentaire

C'est un processus automatisé dans lequel les fibres brutes, tirées de bobines sont passées à travers un bain de résine. Ensuite elles sont enroulées sur un mandrin rotatif et disposées selon des schémas bien déterminés. L'opération est automatisée et pilotée par ordinateur. Cette méthode est utilisée dans des coffrages permanents tels que les pieux en béton où le tube en PRF, permet d'assurer une protection du béton confiné.



Figure 1. 4. Fabrication du PRF par enroulement filamentaire.

Les renforts en PRF peuvent être produits sous différentes formes ; des barres, des lamelles, des plaques et des profilés (figure 1.5). Les barres en PRF sont principalement utilisées comme armatures internes pour les structures en BA ou comme renforcement par la technique NSM. Une large gamme de barres en PRF est disponible sur le marché, avec diverses classifications basées

sur différentes caractéristiques telles que le type de fibre, la forme de la section transversale, la texture de surface et le traitement de surface. Cependant, les tissus et les bandes/plats en PRF sont principalement utilisés pour le renforcement et la réhabilitation de structures existantes. Les tissus sont généralement fournis sous forme de rouleau comme illustré sur la figure 1.5b. Ils présentent une large polyvalence comme avantages, alors que leur principal inconvénient est qu'il est difficile de déterminer a priori la quantité d'adhésif nécessaire. Dans le cas des plats en PRF, la matrice polymérique confère de la rigidité au renfort (figure 1.5a).

Parmi les différentes formes et sections transversales de PRF disponibles, les plats et les barres sont la forme la plus couramment utilisée pour les systèmes de renforcement par NSM, puisqu'elles doivent être insérées dans une rainure relativement étroite dans l'enrobage de béton. Les plats en PRF sont moins susceptibles de se décoller du béton [1].

En outre, l'utilisation de plats minces optimise le rapport (surface de contact/section) pour un volume de résine spécifique, ce qui minimise le risque de décollement [11].

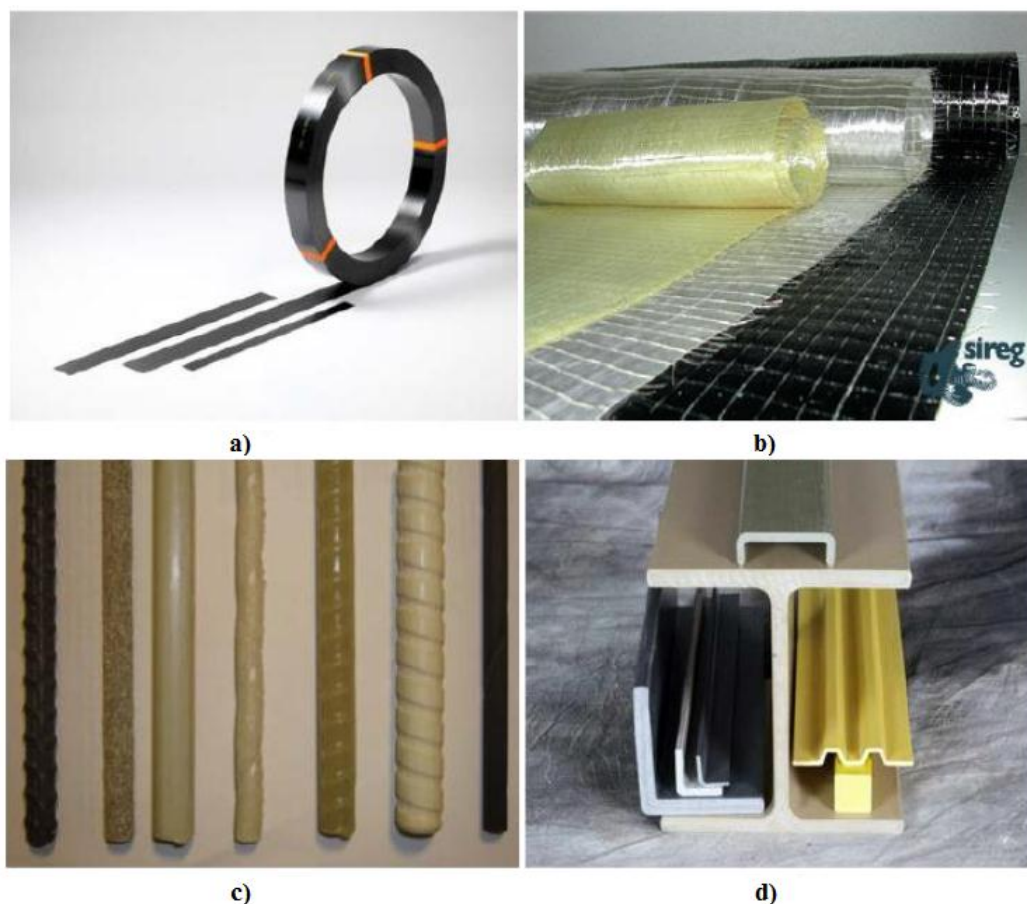


Figure 1. 5. Différents types de renforts en PRF composites : (a) Plats, (b) Tissus, (c) Barres et (d) Profilées [10].

Dans le cas de l'utilisation des plats en PRF, les contraintes normales accompagnant les contraintes tangentielles dans l'adhésif agissent contre les deux côtés du plat dans la surface du béton, confinant ainsi efficacement le renfort PRF et améliorent la performance de l'adhérence. Par contre, dans le cas du renforcement par des barres rondes en PRF, les contraintes normales agissent vers l'extérieur dans toutes les directions, provoquant ainsi la rupture de la couverture époxy une fois la résistance à la traction de l'adhésif est atteinte [12, 13, 14]. Une adhérence plus élevée a été constatée lors du renforcement par des plats en PRF selon la technique NSM par rapport à celle donnée par le renforcement avec des tiges en PRF ainsi que pour le renforcement selon la technique EBR [14, 15].

1.4 Propriétés mécaniques des PRF

Le module d'élasticité des produits en PRF est généralement inférieur à celui de l'acier et reste pratiquement constant jusqu'au point de rupture (comportement parfaitement élastique jusqu'à la rupture), contrairement aux barres d'acier, pour lesquelles un comportement ductile est attendu et pratiquement, pris en compte dans tous les codes de calcul. En raison des basses valeurs du module d'élasticité, les déformations attendues dans les structures en béton armé avec des PRFs sont plus importantes que celles des structures en béton armé avec des aciers. Cette différence dans les propriétés mécaniques affectera la performance d'adhérence et il est donc important de la prendre en considération lors du développement des codes de calcul.

Tableau 1. 1. Propriétés des différentes barres en PRF et en acier [16].

Types de PRF	PRFG	PRFC	PRFA	ACIER
Densité (kg/m ³)	1600-2000	1600-1900	1050-1250	7850
Module élastique (GPa)	35-51	120-580	41-125	200
Résistance en traction (MPa)	483-1600	600-3690	1720-2540	483-690
Déformation à la Rupture (%)	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4	6-12

Les barres en Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFG) (ayant la plus faible valeur de module d'élasticité) sont moins chères que les autres types de FRP. La résistance à la traction des barres en PRF est supérieure à celle des barres en acier. Un exemple, la résistance à la traction des barres en PRFG peut être supérieure plus de deux fois que celle des barres en acier, alors que les Polymères Renforcés par des Fibres de Carbone (PRFC) et les Polymères Renforcés par des Fibres d'Aramide (PRFA) peuvent atteindre des résistances trois fois plus que celles de l'acier. Cela

dépend de la nature des fibres et de la matrice époxy. Une comparaison des propriétés des barres en PRF et en acier est présentée sur le tableau 1.1 et la figure 1.6.

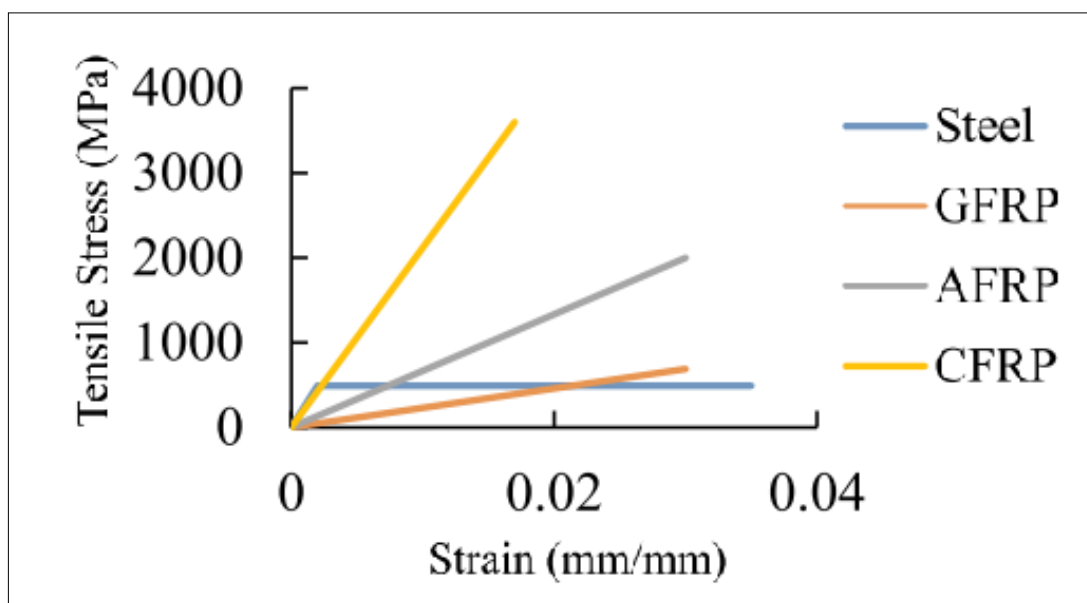


Figure 1. 6. Diagramme contrainte-déformation des barres de PRF et d'acier[16].

1.5 Adhésifs utilisés dans le renforcement par PRF

Les résines jouent un rôle important dans la plupart des industries, que ce soit pour un usage structurel ou non. Leur rôle essentiel est de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les adhésifs doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres.

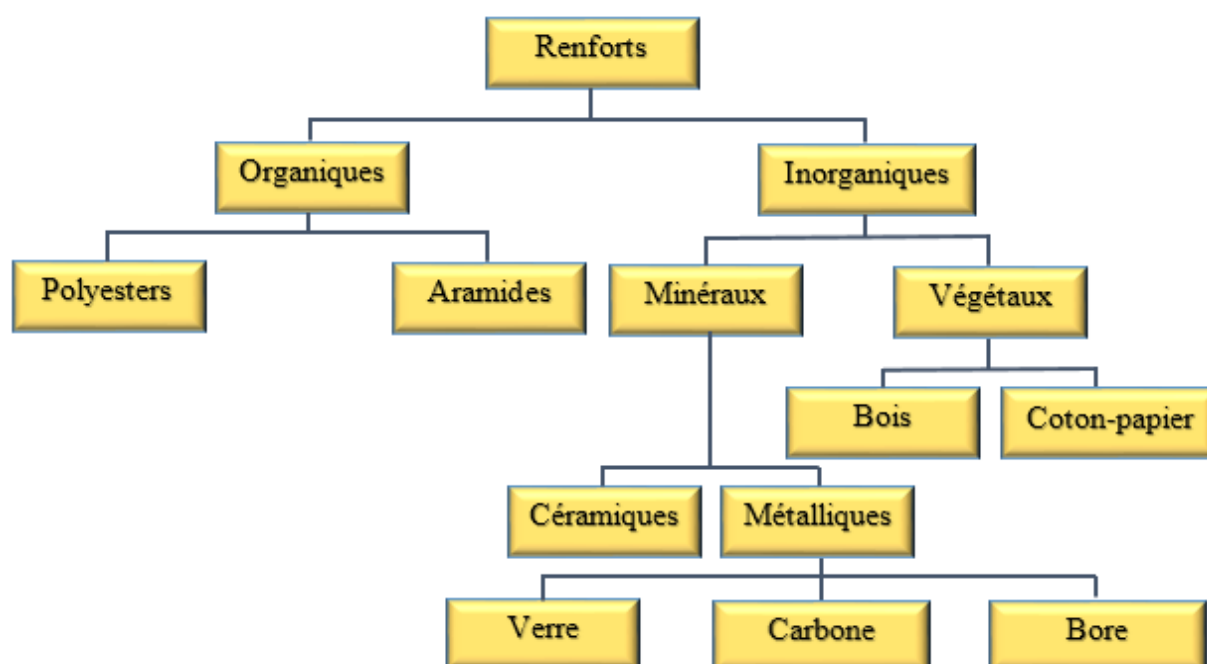


Figure 1. 7. Organigramme des différentes familles de fibres.

Deux grandes familles de résines existent : les résines **thermodurcissables** et les résines **thermoplastiques**. Les thermoplastiques englobent les polymères tels que le polyéthylène, le nylon et les polyamides, tandis que les matériaux thermodurcissables comprennent les époxydes et les vinyl-esters. En général, les thermodurcissables couvrent presque la majorité du domaine de renforcement des éléments structuraux. De plus, ces polymères présentent une bonne stabilité thermique, une bonne résistance chimique, un taux de fluage et de relaxation très faible comparativement aux thermoplastiques. Les thermodurcissables sont irréversibles, la durée de conservation est courte mais le temps de fabrication est assez long. Les résines les plus utilisées sont les époxy, les polyesters et les vinyl-esters. Les propriétés typiques de ces résines sont présentées sur le tableau 1.2.

Tableau 1. 2. Propriétés typiques des résines.

Résine	Densité	Résistance en traction (MPa)	Module élastique (MPa)	Coefficient d'expansion thermique (*10-mm/(mm*C))	Coefficient de poisson
Époxy	1.2-1.3	55-130	2.8-4.1	2.2	0.37
Polyester	1.1-1.4	35-105	2.1-3.5	1.5	0.39
Vinyl-ester	1.1-1.3	75-80	3.0-3.4	1.8	0.38

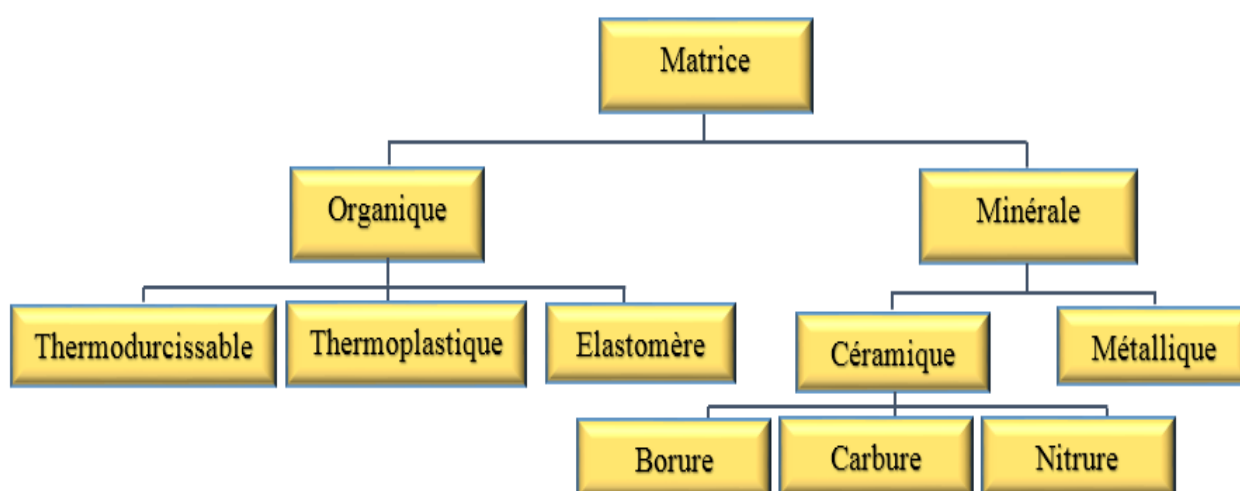


Figure 1. 8. Organigramme des différentes familles de matrice.

a) Résine d'époxy

Les avantages de cette résine sont : une haute résistance mécanique, facilité de mise en œuvre, un retrait limité durant la cure et une bonne adhésion avec la plupart des fibres. Elle présente une résistance chimique élevée, donc moins affectée par l'eau et la température. Ses principaux inconvénients sont le coût et la période de cure élevée. Cette résine est la plus compatible avec toutes les fibres existant dans le domaine de renforcement des ouvrages en génie civil.

b) Résine de polyester

Son principal avantage est un équilibre entre la bonne résistance mécanique et électrique, sa stabilité dimensionnelle, son coût et sa mise en œuvre pratique. Également, avec ce type de résine, on peut obtenir des caractéristiques spécifiques tels que : flexibilité, résistance à la corrosion, résistance au feu et résistance aux ultra-violets. Par contre, ce genre de résine présente une résistance chimique limitée, comparativement à la résine de vinyl-ester.

c) Résine de vinyl-ester

Généralement, c'est la résine la plus utilisée pour les barres de PRFG. Elle présente les avantages suivants : résistance chimique, résistance mécanique, viscosité, cure rapide, bonne adhérence à la fibre de verre.

L'adhésif joue un rôle très important dans le renforcement des structures en BA, elle est responsable de la jonction des deux matériaux : Béton-PRFC.

Bien qu'un joint collé soit de préférence chargé en cisaillement, la couche adhésive peut être soumise à diverses sollicitations, en fonction de la conception du joint collé, à savoir, la traction, la compression, la compression, le cisaillement, le décollement et le pelage (figure 1.9).

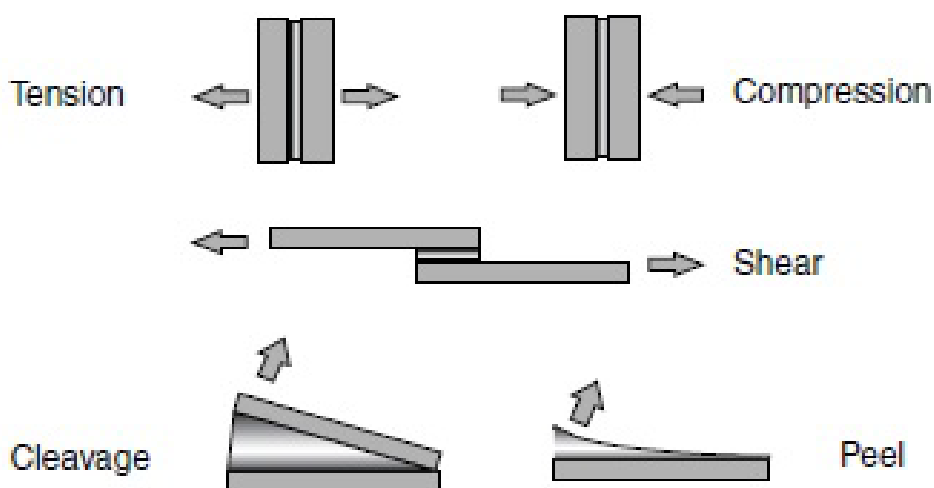


Figure 1. 9. Sollicitations agissant sur un joint collé [17].

Les résines sont un type courant d'adhésifs utilisés pour coller plusieurs matériaux, tels que les métaux, le verre, la céramique, le béton, les plastiques et les composites, en fournissant un joint qui peut assurer la transmission des sollicitations [17]. Les adhésifs à base d'époxy sont les adhésifs structurels les plus communément acceptés pour renforcer les structures en BA avec des PRF. Ils ont été utilisés pour la première fois en 1930 en Allemagne, aux États-Unis et en Suisse [17]. Basées sur des matériaux polymères, ils présentent des propriétés caractéristiques des polymères, exemple, le passage d'un comportement relativement dur à un comportement élastique de type verre et à un comportement relativement caoutchouteux à une certaine température.

Bien que les adhésifs à base d'époxy possèdent un large panel de propriétés mécaniques et physiques qui en font de lui le matériau de collage le plus efficace dans le domaine du bâtiment, leur principal inconvénient est que ses propriétés peuvent être affectées sous des températures relativement basses ou élevées [17]. Les guides de dimensionnement ACI 440.1R-15 et ACI440.2R-08 (normes canadiennes) proposent des facteurs de réduction à utiliser dans certaines conditions d'exploitation. Défini comme C_E (facteur de réduction environnemental), la déformation ultime et la contrainte ultime sont multipliées par ce facteur pour prendre en compte une éventuelle dégradation suite aux conditions extérieures (Tableau 1.3 et Tableau 1.4).

Ainsi, la contrainte ultime, la déformation ultime et le module élastique se calculent comme suit :

$$f_{fu} = C_E f'_{fu} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon'_{fu} \quad (1.2)$$

Où f'_{fu} et ε'_{fu} sont successivement, les résistances et les déformations garanties par les fabricants.

Tableau 1. 3. Facteur de réduction environnementale pour le renforcement interne par PRF. [17]

Conditions d'utilisation	Type de fibre	C_E
Béton non exposé aux intempéries ou enterré	Carbone	1,0
	Verre	0,8
	Aramide	0,9
Béton exposé aux intempéries ou enterré	Carbone	0,9
	Verre	0,7
	Aramide	0,8

Tableau 1. 4. Facteur de réduction environnementale pour le renforcement externe par PRF. [3]

Conditions d'utilisation	Type de fibre	CE
Exposition intérieure	Carbone	0,95
	Verre	0,75
	Aramide	0,85
Exposition extérieure (ponts, piles et stationnements multi-étages non protégés)	Carbone	0,85
	Verre	0,65
	Aramide	0,75
Environnement agressif (réservoir chimique et de traitement des eaux usés)	Carbone	0,85
	Verre	0,50
	Aramide	0,70

1.6 Techniques de renforcement

Les principales techniques de renforcement des structures en BA utilisant des matériaux PRF sont le renforcement par collage externe **EBR** (*Externally Bonded Reinforcement*), et le renforcement par montage près de la surface **NSM** (*Near Surface mounted*). Des exemples illustrant les deux techniques de renforcement sont présentés sur les figures 1.10 et 1.11.

1.6.1 Technique de renforcement par collage externe (EBR)

La technique EBR consiste à coller des tissus ou des plats en PRF à la surface tendue du béton pour renforcer les différents éléments de structures existantes en BA (dalles et poutres). Dans l'histoire du renforcement, les systèmes de collage externe ont prouvé leur efficacité dans le renforcement des structures. L'utilisation de plaques et de barres d'acier collées pour la réhabilitation des structures en BA est populaire depuis des décennies. [18] Récemment, de nombreuses nouvelles techniques ont utilisé les PRF légers, avec haute résistance et très résistants à la corrosion, pour des travaux de réparation et de réhabilitation [19].



Figure 1. 10. Techniques de renforcement. [20]

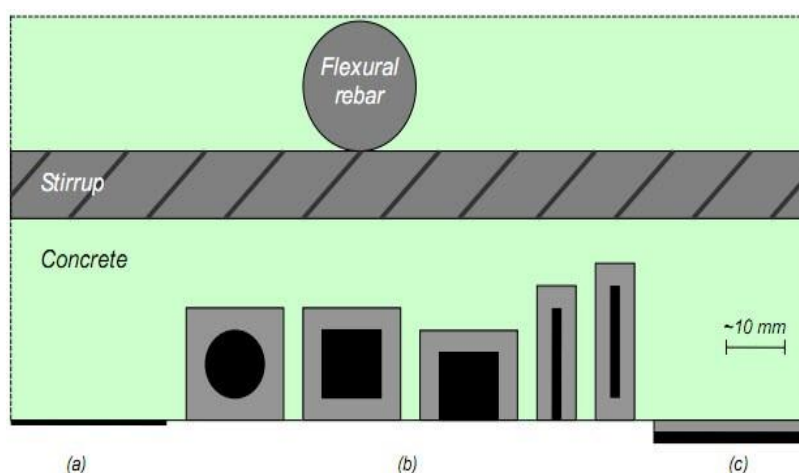


Figure 1. 11. Applications des produits PRF selon différentes techniques, (a) collage direct des plaques de PRF, (b) tiges rondes et carrées, lamelles de PRF utilisées selon NSM et (c) tissu de PRF collé avec époxy. [21].

L'utilisation de lamelles en PRF selon la technique EBR a été l'une des méthodes les plus intéressantes pour renforcer les structures en BA et de nombreux travaux de recherche numériques et expérimentaux ont été effectués pour examiner l'efficacité de ce genre de renforcement [22, 23]. Le collage adhésif de plaques de PRFC sur les surfaces de structures en BA est désormais une solution reconnue pour la réhabilitation des structures, avec des règles de conception avancées et des modèles mathématiques qui quantifient les mécanismes de ruine et d'éventuelle décollement. Cependant, les plaques collées à l'extérieur ont tendance à se décoller aux faibles déformations, ce qui limite l'efficacité de cette technique de renforcement [24].

La performance de l'interface PRF-béton dans le transfert efficace des contraintes est une question importante. En effet, un certain nombre de modes de rupture dans les éléments en BA renforcés par des PRF sont principalement provoqués par le décollement interfacial entre le PRF et le béton. L'un des modes de défaillance, le décollement provoqué par une fissure intermédiaire, entraîne un décollement qui se déclenche au niveau d'une fissure majeure et se propage le long de l'interface PRF-béton. Des recherches sur le phénomène de décollement interfacial (IC) des plaques PRF ont permis de mettre au point des modèles mathématiques fondamentaux et d'identifier et de quantifier les principaux paramètres influant sur le décollement [14, 25, 26]. De même, l'augmentation de la capacité en cisaillement des poutres en BA par le collage de PRF sur les côtés latéraux est maintenant devenue une procédure pratique, peu coûteuse et bien connue [27, 28, 29].

1.6.2 Technique Near surface mounted (NSM)

Le renforcement par PRF selon la technique NSM est devenu une technique intéressante pour renforcer les éléments en béton armé et la maçonnerie, en augmentant ainsi leur résistance à la flexion et au cisaillement. Dans cette technique, le renfort en PRF est inséré dans des rainures ménagées dans l'enrobage du béton. La technique NSM a été utilisée dans de nombreuses applications de renforcement et présente divers avantages par rapport à la technique EBR lors du renforcement des structures en béton et des murs en maçonnerie [11, 30, 31, 32, 33].

L'avantage le plus marqué de la technique NSM est que son application ne nécessite aucune préparation de la surface, à l'exception de la préparation des engravures recevant le PRF. Une fois que l'armature NSM est protégée par l'enrobage du béton et la résine, elle peut alors participer au renforcement des zones du moment négatif des poutres et des dalles ; une réduction significative des préjudices résultant du feu, des dommages mécaniques et d'autres effets ; l'armature NSM est moins susceptible au décollement du substrat du béton. En outre, l'aspect esthétique des structures renforcées par NSM est pratiquement conservé [11, 30].

Bien que la performance de l'adhérence soit considérablement améliorée par rapport au procédé EBR, elle reste le facteur déterminant dans la conception des éléments renforcés par la technique NSM. Deux types d'interfaces existent pour cette technique, le PRF-époxy et le béton-époxy, dans lesquelles la liaison est affectée par de nombreux facteurs, notamment les propriétés du PRF, son traitement de surface, ses dimensions, la surface de la rainure, la géométrie de la rainure, l'adhésif, les sollicitations et les propriétés du béton [11].

Actuellement, cette technologie est incluse dans certains codes et directives existants [3, 16, 34]. Les détails de la procédure de la mise en place des lamelles et des barres en PRF sur le béton avec la technique NSM peuvent être trouvés dans la littérature [1, 5, 11, 35, 36]. Deux principales

méthodes pour former les rainures sont présentées. L'application des lamelles en PRF selon NSM dans le béton à l'aide de l'une des méthodes a été présentée en détail par Barros et Fortes [4] comme suit :

1. Des rainures sont réalisées dans la couverture de béton sur la face tendue de la poutre à l'aide d'une découpeuse à disque de diamant,
2. L'air comprimé a été utilisé pour nettoyer les entailles,
3. Les lamelles de PRFC sont nettoyées à l'acétone,
4. Les rainures sont ensuite remplies avec l'adhésif époxy,
5. L'adhésif époxy est appliqué sur les faces des plats en PRFC,
6. Les renforts en PRFC sont introduits dans les rainures et l'excès d'adhésif époxy est nivelé.

La deuxième méthode, plus facile, est destinée pour les tests expérimentaux [36]. Avant le coulage du béton, des bandes de plastique ou de bois ayant les dimensions des rainures nécessaires sont installées au fond du moule en bois aux endroits nécessaires. Après le durcissement du béton, les bandes sont retirées et les rainures sont ainsi ménagées sur la surface inférieure de la poutre. Les barres ou lamelles en PRFC sont appliquées comme indiqué précédemment [4]. Lorsque le renfort en PRF précontraint est utilisé selon NSM, la précontrainte est exercée sur les lamelles ou les barres avant le collage [37].

1.7 Travaux de recherches antérieures

Lorsque les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement des poutres en BA en flexion, les tissus, les barres ou les plats rectangulaires sont les types les plus couramment utilisés comme renfort. L'utilisation de ces renforts a permis d'améliorer la capacité portante flexionnelle et la rigidité des poutres renforcées. De nombreux travaux de recherche ont été investis dans la littérature et qui ont examiné différents paramètres influant sur l'efficacité des renforcements par PRF. Basé sur les recherches publiées dans le domaine du renforcement avec des barres/bandes en PRF, les recherches les plus intéressantes sont décrites et discutées dans les paragraphes suivants.

De Lorenzis et al. [38] ont effectué l'un des premiers essais sur les poutres en T renforcées par des barres en PRFC et en PRFG. Les résultats ont dévoilé une augmentation de la charge ultime des éprouvettes renforcées par rapport aux éprouvettes de référence (non renforcées). En outre, ils ont montré que l'efficacité du renforcement selon la technique NSM dépend de la longueur d'ancrage du renfort.

Täljsten et al. [32] ont testé des poutres rectangulaires en flexion à quatre points. Deux dimensions différentes des rainures carrées ont été utilisées, 10 mm pour le joint de ciment et de 15 mm pour

le joint d'époxy. Les tiges se sont rompues dans la poutre avec l'adhésif époxy, tandis qu'un glissement entre l'adhésif et le PRF s'est produit dans la poutre avec le joint en ciment.

R. El-Hacha, S.H. Rizkalla [1] ont étudié le comportement en flexion de poutres renforcées par la technique NSM en utilisant des PRFC. Les paramètres examinés étaient le type de charge, le nombre de plats/tiges en PRFC. Ils ont trouvé que le renforcement par les composites en PRF a permis améliorer la rigidité flexionnelle et d'augmenter considérablement la charge ultime des éprouvettes renforcées. Ils ont trouvé aussi qu'un glissement prématuré se produit davantage à l'interface renfort-époxy dans le cas du renforcement par des tiges que dans le cas des plats. Ceci est dû aux contraintes de traction élevées au niveau de cette interface.

Barros et al [2] et Barros et Fortes [4] ont étudié le comportement en flexion des poutres en BA renforcées avec un nombre variable de bandes en PRFC-NSM et avec différents rapports d'armature en acier. Les résultats des essais ont montré une augmentation presque doublée de la capacité portante. Des augmentations significatives de la charge d'écoulement des aciers et de la charge de fissuration du béton des poutres renforcées, ont prouvé l'efficacité élevée de la technique NSM par rapport à la technique EBR.

Teng et al. [14] ont étudié l'influence de la longueur d'encastrement des renforts en PRF. Les résultats des essais des poutres renforcées avec la longueur d'ancrage la plus courte (500 mm) ont montré que le renforcement n'a donné aucun effet sur la charge ultime et la rigidité de la poutre. Les poutres avec une longueur moyenne d'ancrage (entre 1200 et 1800 mm) ont présenté une amélioration de la capacité portante. Ces poutres se sont rompues par la séparation de l'enrobage du béton. Enfin, la longueur d'ancrage la plus longue a donné une valeur de charge ultime plus élevée que celles des autres cas et la propagation du décollement s'est produit à partir de la région du moment maximal vers l'arrêt du PRFC.

Novidis et Pantazopoulou [39] ont trouvé des résultats très prometteurs de la technique NSM par rapport à EBR. Les résultats trouvés ont révélé que la profondeur à laquelle le PRF est collé dans les rainures, influence considérablement sur le gain de la capacité portante.

Kotynia [40] a réalisé des essais sur trois séries de poutres en BA renforcées avec des plats en PRFC selon la technique NSM. L'influence des paramètres suivants sur l'efficacité du renforcement a été étudiée : profondeur d'insertion du PRFC, épaisseur de l'enrobage du béton, taux d'acier tendu, taux du renfort en PRFC et résistance du béton. Les résultats trouvés ont révélé aussi que le découpage des étriers en acier dans la zone tendue de la poutre suite à l'application du renforcement n'a pas affecté la capacité portante des poutres.

Sharaky et al. [41] ont étudié expérimentalement et numériquement, le comportement des poutres en BA renforcées par des barres en PRFG (polymère renforcé de fibre de verre) selon la technique NSM. Le renforcement a été appliqué sur le fond et sur les côtés des poutres avec et sans ancrage d'extrémité. Ce dernier a été incliné par 45° ou 90° . Ils ont trouvé que la capacité portante des poutres en BA renforcées sur la face inférieure était supérieure à celle des poutres renforcées latéralement. Le gain le plus élevé de la capacité portante par rapport à la poutre non renforcée était de 201 % pour les poutres renforcées sur la face inférieure et dont l'ancrage était incliné de 45° , tandis que le gain le plus bas était de 142 % pour le même type de renforcement, mais appliqué latéralement.

Sharaky et al. [42] ont étudié l'influence de la rigidité axiale et du type de confinement adopté pour l'ancrage du renfort en PRF, appliqué selon NSM, sur la capacité portante des poutres renforcées et sur leurs modes de ruine. Ils ont trouvé que le rapport de la charge d'écoulement des aciers des poutres renforcées selon NSM, par rapport aux poutres de contrôle, est proportionnel à leur rapport de rigidité axiale. La ruine des poutres renforcées devient par séparation de l'enrobage du béton lorsque le rapport de rigidité axiale atteint une valeur critique. Au-delà de cette valeur critique, la charge ultime des poutres renforcées n'a pas été affectée par l'augmentation du rapport de rigidité axiale. Cette valeur a été expérimentalement trouvée égale à environ 1.25. Le confinement de l'enrobage du béton a amélioré considérablement, la capacité portante des poutres en BA avec une légère augmentation de la charge d'écoulement des aciers. La charge ultime des poutres renforcées sans confinement se situait entre 150 % et 170 % de la charge ultime de la poutre de contrôle.

Une étude expérimentale menée par El-Gamal et al. [43] a montré que le type de PRF, le taux de renforcement en acier et la quantité de PRF peuvent modifier le comportement et le mode de ruine des poutres renforcées. Dans ce cas d'étude, les chercheurs n'ont pas étudié la disposition des renforts en composite, mais ils ont traité l'influence de la variation du taux de renfort sur l'efficacité du renforcement. Ils ont trouvé que le renforcement avec la technique NSM a donné des capacités portantes plus élevées pour le renforcement avec deux tiges en PRFC et une meilleure ductilité pour le renforcement par les tiges en PRFG.

Récemment, de nouveaux développements et de nouvelles recherches ont étudié certains aspects des méthodes de renforcement des structures en BA, les avantages, les limitations, les défis et les progrès des renforcements par PRF dans les constructions en génie civil, tel que présenté par Nasser [44].

1.8 Conclusion

La synthèse des travaux de recherche et des expérimentations effectuées sur les poutres en BA renforcées par matériaux composites a mis en exergue la complexité de l'évaluation du comportement de ces éléments de structure. Il s'avère que plusieurs paramètres sont impliqués d'une façon directe ou indirecte dans le comportement des poutres renforcées.

Les matériaux composites présentent des avantages très intéressants, comparativement aux plaques d'acier, tels que, résistance mécanique élevée, faible densité, facilité de mise en œuvre, le non nécessité d'une fixation mécanique, faible dégradation sous le feu et le non-besoin d'entretien. Un nouveau domaine d'utilisation des matériaux composites vient de s'ajouter parmi ses avantages; qui est la possibilité de son exploitation sous précontrainte.

Chapitre **2**

**COMPORTEMENT EN
FLEXION DES ELEMENTS
EN BÉTON ARMÉ
RENFORCÉS**

CHAPITRE 2

COMPORTEMENT EN FLEXION DES ELEMENTS EN BA RENFORCES

2.1 Introduction

Les poutres en béton armé sont habituellement composées de deux matériaux : du béton et des armatures en acier. La sollicitation des éléments structuraux en flexion va créer une zone de traction dans la partie inférieure des poutres, et qui va provoquer une rupture précoce si l'élément n'est pas renforcé par des armatures en acier pour compenser le manque de résistance en traction du béton. Parfois ces éléments de structures, malgré la présence des deux matériaux (acier et béton) se trouvent incapables de supporter les sollicitations suite à un manque de résistance dû généralement à des erreurs de dimensionnements ou de changement des conditions d'exploitation. Des situations pareilles imposent l'utilisation des renforcements par matériaux composites (PRF) qui participent à combler le manque de résistance. Deux types de maintenance peuvent s'appliquer aux éléments structuraux d'un ouvrage ; maintenance corrective et maintenance préventive, leur utilisation dépend de la nature des structures ou des éléments de structure à renforcer.

Le recours à la maintenance corrective est adopté lorsqu'une perte de performance et/ou de résistance sont constatées. Dans ce cas il est nécessaire de réparer ou de remplacer les éléments défaillants. Cependant, la maintenance préventive est recommandée pour éviter la défaillance ou la dégradation de l'ouvrage. Il s'agit d'une maintenance systématique effectuée régulièrement quel que soit l'état de l'ouvrage (ex: curage des avaloirs d'un pont, remplacement des appareillages d'appuis des ponts, réparation des enduits de protection des éléments en BA exposés à l'extérieur). Autrement dit, la maintenance préventive permet de ralentir la dégradation des ouvrages en génie civil.

Dans le présent chapitre, une étude du comportement des éléments en BA et des éléments en BA renforcés par des PRFC est présentée. En outre, une présentation est effectuée sur quelques codes adoptés par différents pays, relatifs aux calculs des éléments en BA renforcés par des composites.

2.2 Portée de cisaillement et son influence sur les poutres

Le rapport de cisaillement est une valeur très importante pour prédire le mode de rupture des poutres sollicitées en flexion simple. Sa valeur est estimée au rapport (a/d) , avec (a) la distance

entre l'appui et le point d'application de la charge (appelée portée de cisaillement) et (d) la hauteur utile de la section de la poutre en béton armée.

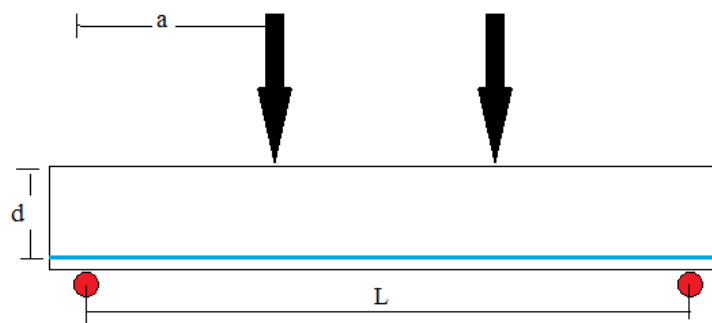


Figure 2. 1. Poutres en flexion simple.

La classification des poutres et leurs modes de ruine en fonction de la portée de cisaillement sont représentés sur le tableau 2.1.

Tableau 2. 1. Classification des poutres en BA sollicitées en flexion simple.[45]

Rapport (a/d)	Classification des poutres	Mode de rupture
$a/d < 1$	Poutre très profonde	Rupture de l'ancrage des armatures à l'appui ou rupture par écrasement du béton
$1 < a/d < 2.5$	Poutre profonde	Rupture par écrasement du béton dans la zone comprimée
$2.5 < a/d < 6$	Poutre élancée	Rupture en cisaillement-flexion
$a/d > 6$	Poutre très élancée	Rupture en flexion

Les poutres en béton armé sollicitées en flexion quatre points présentent l'un des modes de rupture illustrés sur la figure 2.2. Les modes de rupture sont relatifs au rapport (a/d).

Le premier cas où $a/d < 1$ (poutre profonde), la rupture se produit par perte d'encrage des armatures tendues au niveau des extrémités de la poutre ou par écrasement du béton comprimé dit aussi, rupture en compression (figure 2.2.a).

La poutre de classe profonde pour laquelle $1 < a/d < 2.5$, le mode de rupture se manifeste par un glissement des armatures tendues suite à la perte d'adhérence suivie d'un écrasement du béton comprimé (figure 2.2.b).

Dans le cas de $2.5 < a/d < 6$ (poutre élancée), la rupture est caractérisée par une propagation des fissures jusqu'à la partie supérieure de la poutre et un écrasement de la partie comprimée du béton suivi d'un écoulement des aciers de ferrailage (figure 2.2c).

En fin, la poutre très élancée ($a/d > 6$) présente une rupture par flexion où les fissures de cisaillement sont carrément absentes (figure 2.2d).

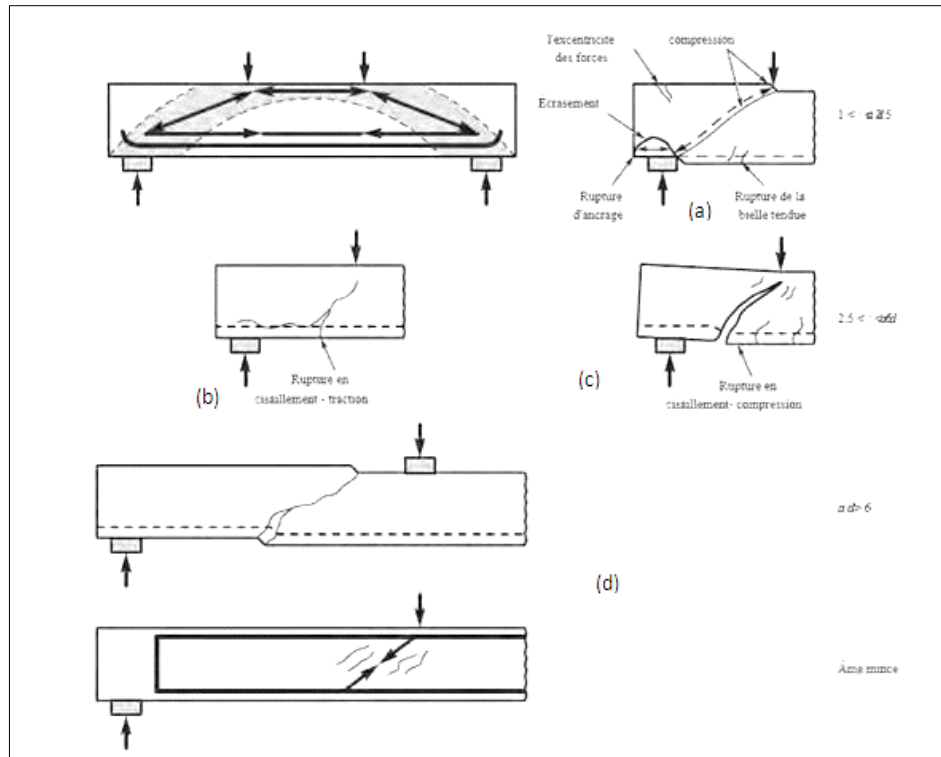


Figure 2. 2. Modes de rupture des poutres en BA sans armatures de cisaillement.[45]

Nous rappelons que les modes de rupture présentés plus ci-dessus, concernent les poutres en BA qui ne contiennent pas de ferrailage de cisaillement. Pour éviter toute rupture en cisaillement des cadres et des étriers en aciers sont à prévoir dans la conception.

2.3 Comportement d'une poutre en béton armé

2.3.1 Réponse globale moyenne sous une charge croissante

Bien connu, le béton armé est un matériau non homogène, ayant, en particulier, une faible résistance à la traction et un bon comportement sous contrainte normale de compression.

Dans ce paragraphe nous allons présenter la réponse d'une poutre en béton armé reposant sur deux appuis simples soumise à la flexion sous chargement monotone jusqu'à la ruine. Au cours du

chargement, le comportement de la poutre en flexion trois points ou quatre points, passe par les phases suivantes (figure 2.3):

1^{ère} phase OA : Cette phase est telle que les petites valeurs de la charge n'entraînent pas la fissuration du béton tendu et ainsi les différentes sections se comportent élastiquement. Cette étape correspond aux déformations faibles de l'armature qui adhère parfaitement au béton sur toute sa longueur avant l'apparition des fissures. Dans cette première étape, la rigidité est constante sur toute la longueur de la poutre et la courbure est directement proportionnelle au moment fléchissant.

2^{ème} phase AB : Dans la seconde phase, l'augmentation de la charge entraîne la fissuration du béton dans les sections les plus sollicitées, mais la poutre se comporte toujours élastiquement. Au cours de cette étape, la rigidité chute brusquement au fur et à mesure de l'apparition des fissures. Les fissures n'atteignent pas toutes les sections le long de la poutre en même temps, notamment vers les appuis où le moment fléchissant tend vers zéro. Généralement, la fissuration commence avec l'apparition de fissures due à la flexion dans la partie inférieure centrale de la poutre (fissure de flexion). Ensuite, ces premières fissures se propagent vers la partie supérieure de la poutre. Les fissures dans les zones de cisaillement maximal se développent suite à la contrainte principale oblique (fissures de cisaillement par flexion) [46]. Dans les parties fissurées, le béton compris entre deux fissures successives est plus ou moins pris en compte et la profondeur des fissures varie d'une section à l'autre.

3^{ème} phase BC : Si la charge continue à augmenter, l'armature s'allonge et le béton commence à se raccourcir de plus en plus. La section la plus sollicitée du béton se plastifie et son raccourcissement continu à augmenter jusqu'à atteindre sa valeur limite (ϵ_{cu}) au niveau de la section critique. Lorsque sa contrainte de rupture est atteinte, le béton équilibre encore la composante de compression du couple de flexion et comme l'armature tendue n'a pas atteint un allongement de rupture et peut équilibrer la composante de traction, le moment extérieur de flexion est équilibré dans cette section où la rotation est très importante, on dit qu'il y a eu formation d'une rotule plastique.

Au chargement, la poutre présente une courbure permanente et la section est considérée comme fragile vis-à-vis des chargements répétés et surtout alternés. En effet, sous des actions réversibles et répétées, il y a un affaiblissement de la rigidité qui provient en particulier de la chute de la contrainte d'adhérence consécutive à la détérioration du béton.

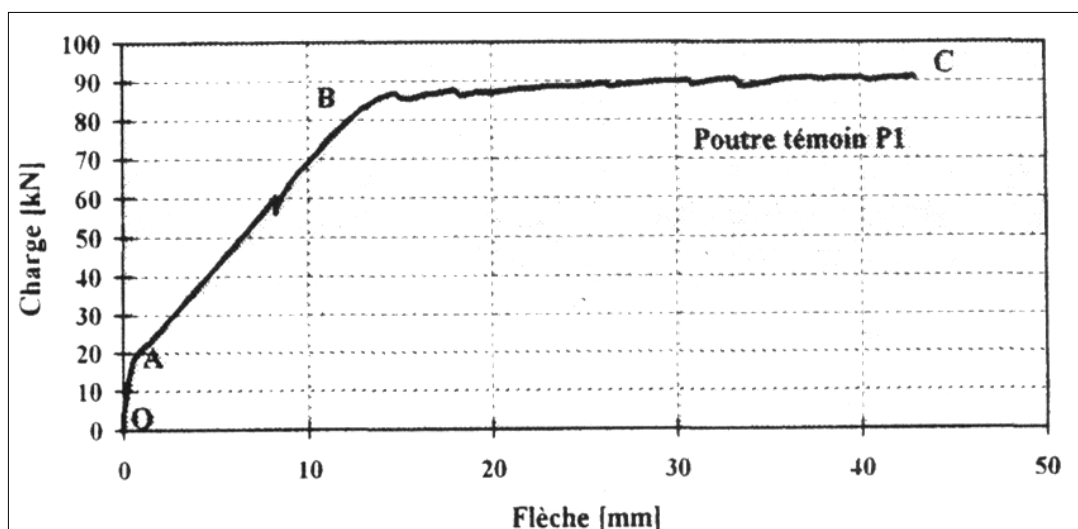


Figure 2. 3. Courbe charge-flèche pour une poutre en béton armé.

Le comportement en flexion quatre points des poutres en béton armé est affecté par le taux d'armatures d'acier, de ce fait deux cas peuvent surgir :

a) Section Sous-armée (faible pourcentage d'acier)

Dans les poutres où le pourcentage d'armatures (ρ) est assez faible, soit :

$$\rho = \frac{A_s}{A_u} \leq \rho_{eq} \quad (2.1)$$

Avec ρ_{eq} est le pourcentage d'armature équilibré correspondant à la section équilibrée où le béton atteint sa déformation limite (ε_{cu}) et en même temps l'acier atteint sa déformation limite (ε_y).

L'acier tendu quitte le domaine élastique au moment où la fibre extrême du béton comprimé atteint son raccourcissement limite (ε_{cu}). La rupture dans ce cas est lente et les armatures présentent une large déformation plastique (figure 2.4a), elle survient par rupture de l'acier tendu (rupture lente par traction primaire). La courbe présente un plateau plastique et le comportement est ductile.

b) Section Sur-armée (à pourcentage d'acier élevé)

Dans ce cas l'acier a un comportement élastique au moment où la fibre la plus comprimée du béton atteint sa valeur limite (ε_{cu}), (figure 2.4b). La rupture se manifeste par écrasement du béton, c'est une rupture brusque ou autrement dit, rupture par compression primaire. La courbe ne présente pas un plateau plastique et la réponse est similaire à une rupture par cisaillement (absence de ductilité).

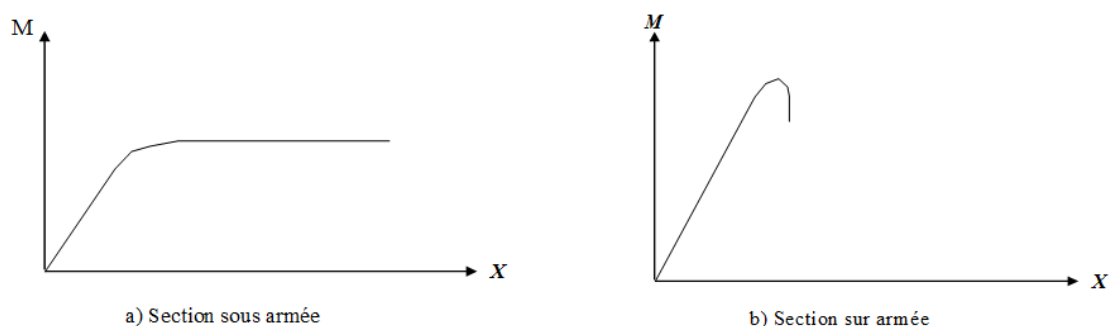


Figure 2. 4. Comportement des poutres sous armée et sur armée en flexion.

2.3.2 Modes de rupture

a) Rupture par plastification de l'armature principale

Ce genre de rupture est dû à la flexion, il se manifeste si la quasi-majorité des fissures sont verticales et concentrés dans le tiers central de la distance entre les appuis (figure 2.5).

En premier lieu, c'est la partie tendue du béton qui commence à se fissurer. C'est pratiquement, des fissures verticales très fines concentrées au centre de la poutre sollicitée. Ensuite, de nouvelles fissures se développent d'une façon plus rapide, dans la partie centrale de la poutre et l'épaisseur des premières fissures s'élargissent et se propagent vers la partie supérieure de la poutre jusqu' au-delà de l'axe neutre. A ce moment-là, les armatures tendues se plastifient et le comportement est dit ductile.

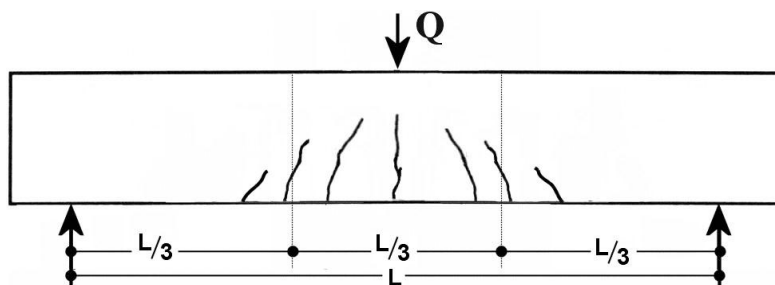


Figure 2. 5. Rupture par flexion d'une poutre en BA. [46]

b) Rupture par écrasement excessif du béton comprimé avec une plastification de l'armature principale

Le début des fissures dans ce mode de rupture se manifeste de la même manière que le mode précédent avec l'apparition de fissures dans la zone centrale de la poutre. Ensuite, des déformations

très importantes dans le béton comprimé se développent suite à l'écrasement excessif du béton sur la face supérieure de la poutre. Cette déformation est associée à une plastification des armatures tendues et une ouverture excessive des fissures du béton de la partie inférieure de la poutre. Dans ce cas de rupture le comportement est aussi dit ductile.

c) Rupture provoquée par la contrainte principale oblique

Ce mode de rupture commence avec le développement de quelques fissures fines verticales au milieu de la poutre (type flexion), puis il est suivi par une perte d'adhérence ou de glissement entre l'acier tendu et le béton qui l'entoure (au niveau des supports d'appuis). Ensuite des fissures à 45° commencent à se développer dans la partie où l'effort tranchant est dominant (provoquées par la contrainte principale oblique). Une fois que les fissures de flexion n'évoluent plus, une des fissures inclinées dues à la contrainte principale oblique s'ouvre davantage vers les points de chargement (zone en compression de la poutre). Ce qui entraîne une ruine instantanée de la poutre, dite rupture fragile (figure 2.6).

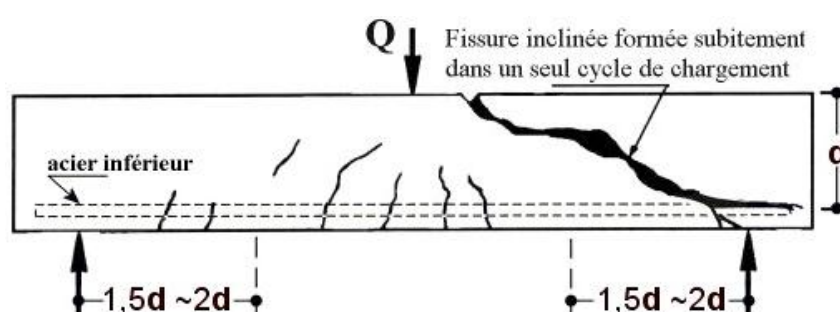


Figure 2. 6. Rupture par contrainte principale oblique.[46]

d) Rupture par cisaillement due à la compression

Comme montré sur la figure 2.7, ce mode de rupture commence de la même façon que celui dû à la contrainte principale oblique. Ensuite une fissure, plus importante et plus inclinée que dans le cas de la rupture par contrainte oblique, se développe à partir des points de support de la poutre vers l'axe neutre. Le développement de ces fissures est moins rapide que dans le cas de rupture par contrainte principale oblique. Cela est dû à l'écrasement du béton dans la zone comprimée supérieure et à la redistribution des efforts internes dans cette zone. Une fois la fissure principale inclinée atteint la zone supérieure comprimée du béton, la poutre subira une ruine brusque et la ruine est dite par "rupture fragile". Il est à noter que la charge ultime de la poutre où la ruine se produit par cisaillement est plus élevée que dans le cas de la rupture par contrainte principale. Cela est dû à la propagation plus rapide des fissures inclinées dans le cas de ruine par contrainte oblique.

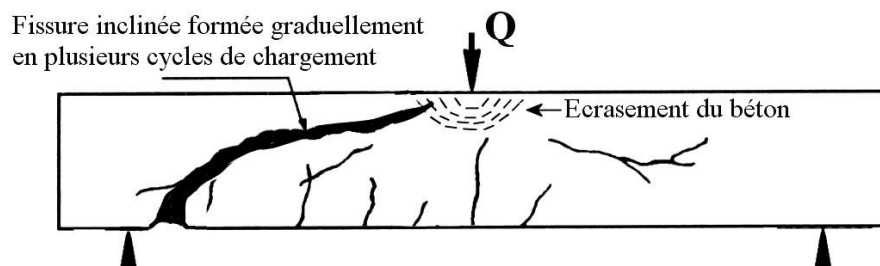


Figure 2. 7. Rupture par cisaillement due à la compression [46].

2.4 Comportement d'une poutre en béton armé renforcée par composites (PRF)

2.4.1 Réponse globale moyenne sous une charge croissante

Le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par matériaux composites (PRF) est représenté sur la figure 2.8 en matière de courbure en fonction du moment de flexion. Le comportement de la poutre renforcée dévoile trois phases principales :

Phase 01 : Dans cette phase le comportement est linéaire élastique. C'est le cas de la non fissuration de la poutre sollicitée. La courbure dans cette phase est proportionnelle au moment fléchissant.

Phase 02 : Pour cette phase le comportement est toujours linéaire avec une diminution de la rigidité suite à la formation des premières fissures. Elle correspond à l'état de service de la poutre. On constate que dans cette phase, le renforcement en PRF conduit à une légère augmentation de la rigidité par rapport à la poutre en BA non renforcée. Cette amélioration de la rigidité se traduit par une retardation de la formation des premières fissures, comme elle conduit à limiter leur propagation vers l'axe neutre.

Phase 03 : Cette phase correspond à la plastification des armatures tendues. La courbure continue à évoluer avec la charge et la rigidité diminue légèrement, contrairement au cas de la poutre non renforcée où la charge est presque stable et la rigidité est pratiquement nulle. On constate que le renforcement par PRF améliore la capacité portante des poutres et limite l'ouverture des fissures.

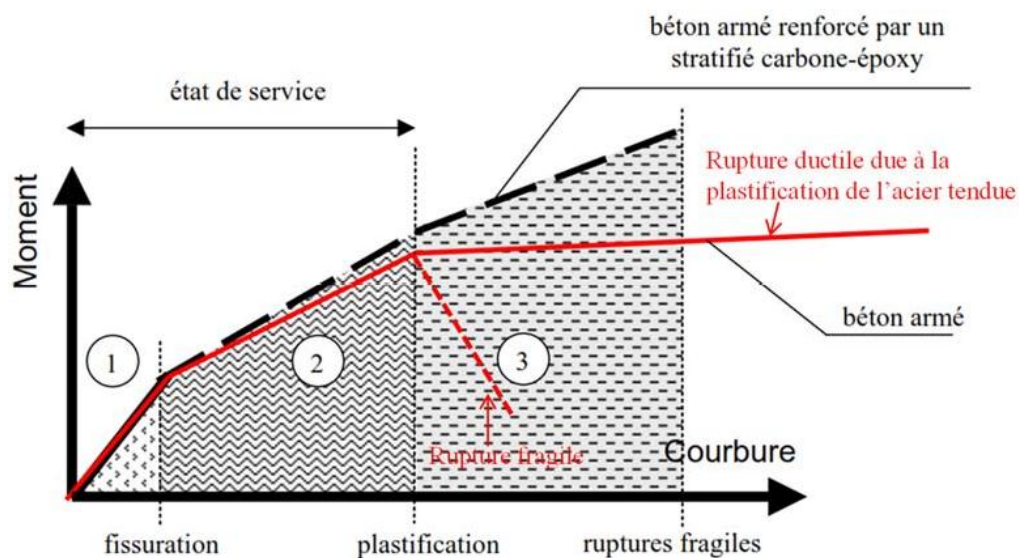


Figure 2. 8. Diagramme moment-courbure d'une poutre en BA renforcée par composite.[47]

2.4.2 Modes de rupture

2.4.2.1 Poutre renforcée par la technique EBR

Dans le cas des poutres renforcées selon la technique EBR soumises à la flexion simple, différents modes de rupture ont été constatés lors des études expérimentales effectuées par plusieurs chercheurs [5, 44, 48, 49, 50, 51]. Ces modes de rupture sont regroupés en trois catégories selon les causes principales de ruine : rupture due à la flexion, au cisaillement et au décollement du composite. Ces causes possèdent différentes origines et des combinaisons de ces causes peuvent être possibles. Les modes de rupture les plus courants sont décrits ci-dessous :

a) Rupture due à la flexion

Le mode de rupture en flexion des poutres en BA renforcées par PRF se produit principalement pour deux causes :

- **Ruine par rupture du renfort composite (PRF)**

Ce mode de rupture se manifeste par la plastification des armatures principales de traction et la rupture du renfort composite en PRF. Ce mode de ruine est généralement constaté dans le cas des poutres présentant des faibles taux d'armatures tendues ou dans le cas où le renfort présente une très forte adhérence avec le béton. La rupture du renfort se produit souvent au milieu de la poutre (figure 2.9).

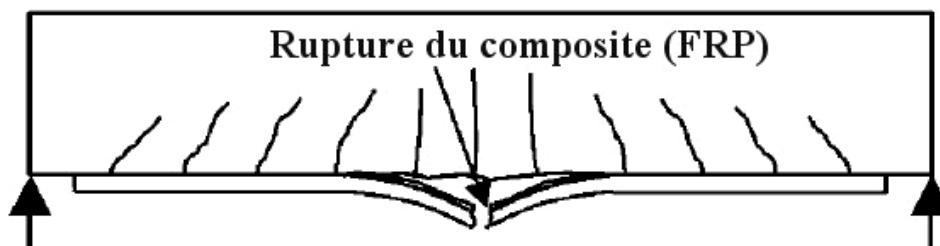


Figure 2. 9. Ruine par rupture du composite en PRF d'une poutre en BA renforcée.[46]

- **Ruine par écrasement du béton comprimé**

Comme montré sur la figure 2.10, ce mode de ruine est dû simultanément à la plastification de l'armature principale tendue et à la ruine du béton comprimée (face supérieure de la poutre). La ruine se produit d'une façon brutale et plus rapide que dans le cas de rupture par flexion. Ce mode de ruine est observé dans le cas des poutres sur-armées (taux d'armature élevé) ou dans le cas de l'excès de renfort en PRF utilisé.

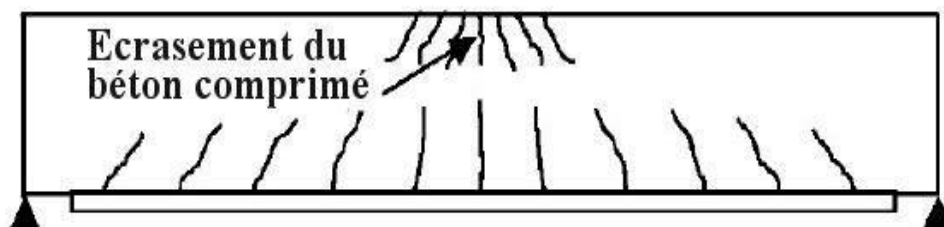


Figure 2. 10. Rupture par écrasement du béton d'une poutre en BA renforcée.[46]

b) Rupture due au cisaillement

Dans ce mode de ruine, la rupture des poutres est due à l'effort tranchant ; particulièrement, elle se produit dans le cas d'une faible résistance au cisaillement des poutres. La fissuration se manifeste par la formation des fissures inclinées commençant en premier lieu, au niveau des extrémités du renfort en PRF, ensuite elles se propagent vers le point d'application de la charge (figure 2.11). Conséquence de la concentration des contraintes à l'extrémité du renfort PRF, ce mode de rupture est similaire à la rupture par contrainte principale oblique, observé dans le cas des poutres non renforcées.

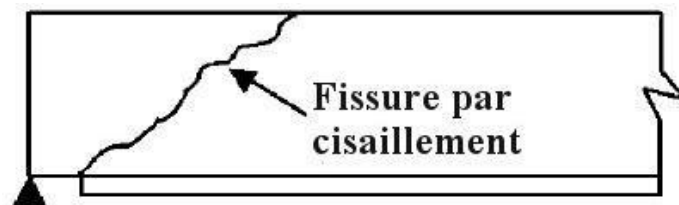


Figure 2. 11. Rupture par cisaillement d'une poutre en BA renforcée.[46]

c) Rupture due au décollement

Dans ce type de ruine, le décollement peut se produire dans différentes parties de la poutre et qui est cernées entre l'armature d'acier et le renfort composite (figure 2.12). Les cas possibles sont : (1) à l'interface barre d'acier tendue-béton, (2) dans l'enrobage du béton, (3) à l'interface béton-résine, (4) à l'interface résine - composite PRF, (5) dans la résine, (6) dans le renfort en PRF. Les recherches ont montré que les modes de rupture les plus fréquents sont la séparation de l'enrobage du béton à l'interface acier-béton et le décollement du composite ou délaminage [46, 47].

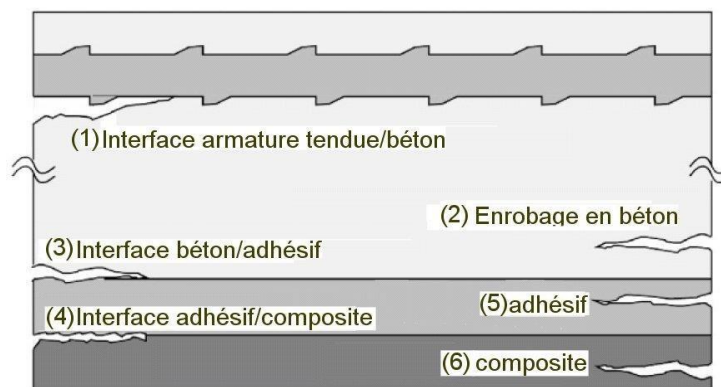


Figure 2. 12. Rupture par décollement d'une poutre en BA renforcée. [52]

- **Séparation de l'enrobage du béton**

Ce mode de rupture commence par la formation d'une fissure au niveau de la zone proche de l'extrémité du composite en PRF. Ensuite la fissure se propage jusqu'aux aciers tendus. Une fois elle atteint les aciers, elle change de direction et se propage dans la direction horizontale et parallèlement aux aciers, en déclenchant la séparation de l'enrobage du béton (figure 2.13). Les fissures sont dues à la concentration des contraintes de traction dans la zone de l'extrémité du PRF.

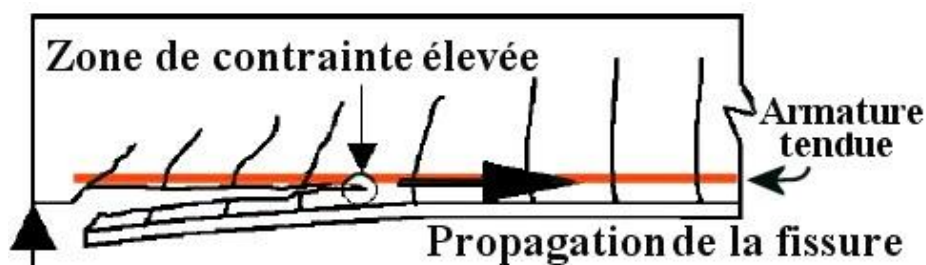


Figure 2. 13. Rupture par séparation de l'enrobage du béton. [46]

- **Décollement du renfort en composite PRF**

Suite à la concentration des contraintes de traction et de cisaillement à l'interface résine-béton, des fissures se développent à l'extrémité du renfort PRF au niveau de cette interface. Ce mode de ruine est caractérisé par l'apparition de petits morceaux de béton sur le renfort en PRF (figure 2.14). Ceci est dû à la résistance au cisaillement élevée de la résine comparativement à celle du béton. Ce genre de rupture est observé dans les poutres renforcées par PRF lorsque des conditions sont

présentes à savoir: (1) une faible portée provoquant un cisaillement élevé proche des supports, (2) arrêt des renforts en composite éloignés des appuis, (3) utilisation des renforts en PRF avec des épaisseurs excessives ce qui limite la flèche de la poutre et provoque une concentration des contraintes de cisaillement au niveau de l'extrémité du renfort.

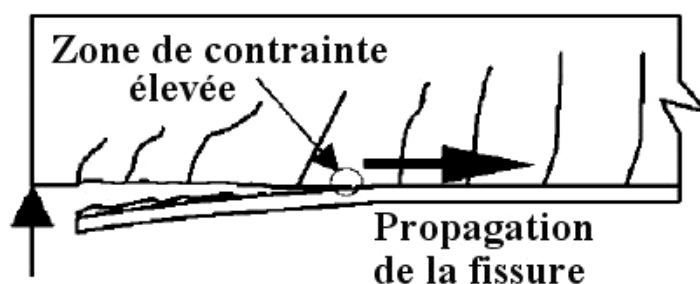


Figure 2. 14. Rupture par décollement du renfort en PRF à l'extrémité.[46]

Une autre forme de décollement peut se produire pour les poutres renforcées par composites. Il s'agit du décollement du renfort à mi-portée de la poutre (figure 2.15). Le développement des fissures dans ce mode de rupture est pratiquement le même que celui du décollement à l'extrémité du PRF. La seule différence est que ces fissures proviennent de l'importante déformation du PRF due à la combinaison des efforts de cisaillement et du moment fléchissant. Trois conditions peuvent générer ce mode de rupture, (1) grande portée de l'effort tranchant, (2) arrêt du renfort proche des appuis, (3) épaisseur faible du renfort utilisé.

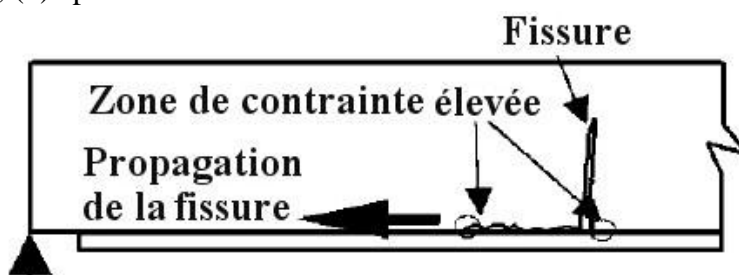


Figure 2. 15. Rupture par décollement du composite à mi-portée de la poutre.[46]

2.4.2.2 Poutre renforcée par la technique NSM

Dans le cas des poutres renforcées par matériaux composites selon la technique NSM, les modes de ruine sont pratiquement similaires aux trois premiers modes observés dans le cas des poutres renforcées par la technique EBR. La différence est constatée dans le mode de rupture caractérisé par le phénomène de décollement. Ce mode de ruine est influencé par plusieurs paramètres, à savoir: l'état de surface du composite, le type d'adhésif et la taille des engravures contenant le renfort. Les différents modes de rupture possibles dans cette technique sont présentés ci-dessous.

a) Rupture par perte d'adhérence à l'interface résine-composite

Noté par (IRC), ce mode de rupture peut se manifester sous deux formes (figure 2.16). La première correspond à la perte d'adhérence à l'interface résine-composite (matériau de collage). Elle est

observée dans le cas du renforcement par des barres lisses en PRFC (les joncs). La seconde, correspond à la rupture par cisaillement du matériau de collage à l'interface avec le composite. Ceci est dû à l'effort de traction radiale exercé sur le renfort en composite (effort parallèle à la génératrice du PRFC ou composante radiale de la force d'adhérence). La deuxième forme est souvent observée lors de l'utilisation de renforts en PRFC ayant une surface rugueuse (renforts en PRFC sablés).

b) Rupture par perte d'adhérence à l'interface résine-béton

Notée par **(IRB)**, ce mode est généralement observé lorsque la résine utilisée comme matériau de collage présente une très grande 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 renforcements par des PRFCs en utilisant les mortiers comme adhésifs (**figure 2.16**).

c) Rupture mixte des interfaces Noté par **(IRB/IRC)**, ce mode de rupture correspond à la rupture par les deux modes précédents en même temps, c'est-à-dire la rupture à l'interface résine-composite et résine-béton.

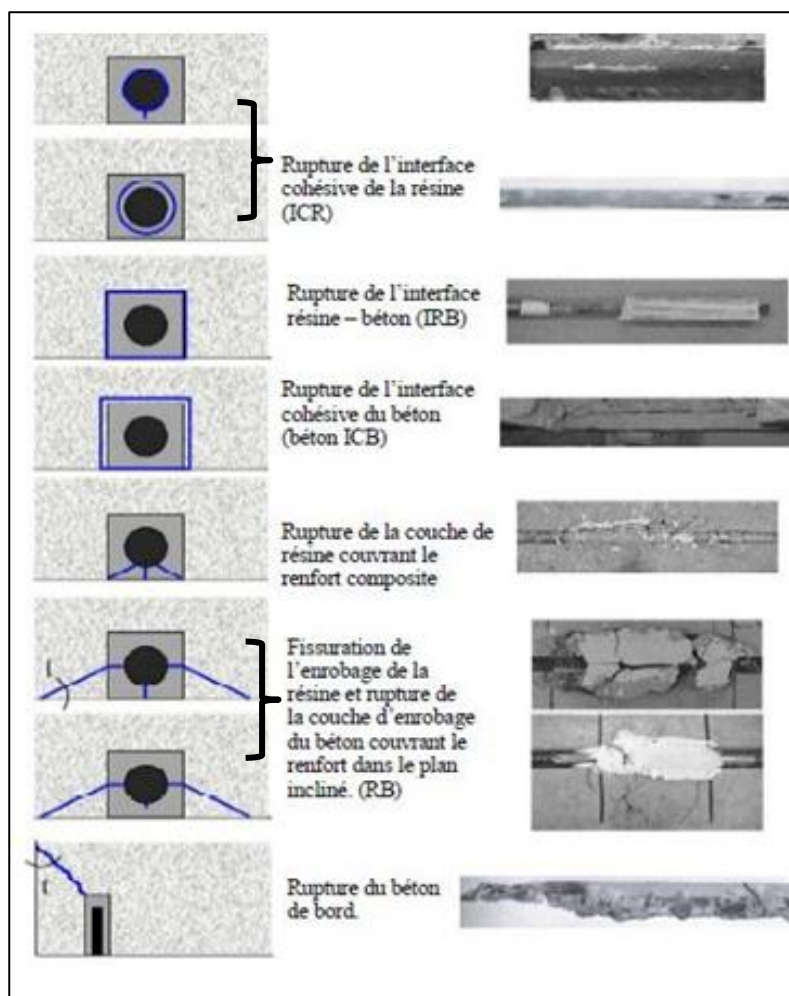


Figure 2. 16. Modes de rupture des poutres renforcée selon NSM.[11]

d) Rupture par éclatement de la résine couvrant le renfort (splitting)

Ce mode est caractérisé par la fissuration longitudinale de la résine et/ou du béton environnant selon des plans inclinés le long de la poutre. Ce phénomène est observé pour les renforts en barres nervurées ou enroulées en spirale. Dans ce mode de rupture, la composante radiale des contraintes d'adhérence est équilibrée par les contraintes de traction dans la couche d'adhésif couvrant le renfort en composite et qui entraîne la formation de fissures qui se propagent longitudinalement, conduisant ainsi à la rupture par "*splitting*".

La fissuration peut aussi atteindre le béton entourant l'engravure lorsque celui-ci atteint sa résistance limite de traction. Ce mode de rupture dépend principalement des dimensions des rainures et des caractéristiques du matériau de collage.

e) Fissuration de la résine et de la couche du béton couvrant le renfort selon un plan incliné

Noté par (**RB**), ce mode de rupture est observé dans le cas de la présence d'une adhérence parfaite entre le renfort et l'adhésif et aussi d'un béton de faible résistance. La fissuration du béton commence dès que la couche d'époxy se fissure et que les contraintes de traction sont redistribuées [11]. Les plans de rupture inclinés dans le béton forment, généralement, un angle d'environ 30° avec le plan horizontal (face inférieure de la poutre).

f) Rupture du béton du bord

Ce genre de rupture est constaté dans le cas du renforcement par plats de PRFC insérés dans les engravures remplies de résine. Notamment lorsque le plat est très proche des bords de l'élément en béton armé, ce qui provoque l'éclatement du béton du bord (figure 2.16).

Tous les modes de ruptures présentés ci-dessus sont constatés pour le renforcement par des joncs de PRFC, mais ils peuvent être aussi obtenus dans le cas du renforcement par des plats de PRFC, particulièrement les deux modes **ICR** et **ICB** ainsi que le dernier mode (rupture du béton de bord).

2.5 Modèle théorique et codes de calcul des éléments en BA renforcés par PRFC

2.5.1 American Concrete Institute (ACI440.2R.08)

La conception adoptée par le code américain (ACI440.2R.08 ou ACI440.2R.17) est basée sur les principes de conception des états limites. Cette approche fixe des niveaux de sécurité acceptables pour l'apparition des états limites de service (flèches excessives et fissures) et des états limites ultimes (rupture sous contrainte et fatigue). Le présent code recommande que le moment ultime de la section soit calculé en utilisant les combinaisons de charges exigées par l'ACI318-05 en prévoyant un facteur de réduction pour le PRF (Ψ_f) et qui doit être appliqué à la contribution de

flexion du renfort en PRF (M_{nf}). Le facteur (Ψ_f), égal à 0.85, est employé pour améliorer les résultats de prédiction de la résistance ultime en tenant compte des différents modes de rupture possibles pour les éléments renforcés par des PRF, particulièrement le décollement ou la délamination du renfort en PRF. La valeur donnée à (Ψ_f) était basée sur les propriétés calibrées expérimentalement de la résistance à la flexion [53].

Ce code opte pour le concept d'un seul pivot (concept de la théorie générale). L'écrasement du béton est supposé se produire lorsque la déformation en compression du béton atteint sa déformation limite ($\varepsilon_c=0.003$) au lieu de 0.0035 ; valeur limite prise par les autres codes de calcul [3]. Cependant, la rupture du PRF se produit lorsque sa déformation atteint la déformation limite ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$). Le décollement de l'enrobage ou du PRF peut se produire lorsque la force interne dans le PRF ne peut pas être soutenue par le substrat en béton. Pour exclure un tel mode de rupture, le code ACI 440 exige que la déformation effective du renfort PRF doit être limitée à la déformation à laquelle le décollement peut se produire (ε_{fd}).

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{cu} \quad (2.2)$$

Les hypothèses suivantes sont retenues pour déterminer la capacité flexionnelle d'une section renforcée par un renfort PRF :

- Les calculs sont basés sur les dimensions, la disposition interne de l'armature en acier et les propriétés des matériaux de l'élément de structure à renforcer,
- Les déformations de l'armature en acier et du béton sont directement proportionnelles à la distance de l'axe neutre,
- La section plane avant la charge reste plane après la charge (hypothèse de Bernoulli),
- Il n'y a pas de glissement relatif entre le renfort en PRF et le béton,
- La déformation de cisaillement à l'intérieur de la couche adhésive est négligée car elle est très mince et ses variations d'épaisseur sont pratiquement très faibles,
- La résistance à la traction du béton est négligée et le renfort en FRP a un comportement élastique et linéaire jusqu'à la rupture.

Ces hypothèses ne reflètent pas exactement le comportement réel et fondamental du renforcement PRF, mais elles sont supposées pour des raisons de simplification. Le facteur de réduction de la résistance compensera de manière conservatrice les écarts.

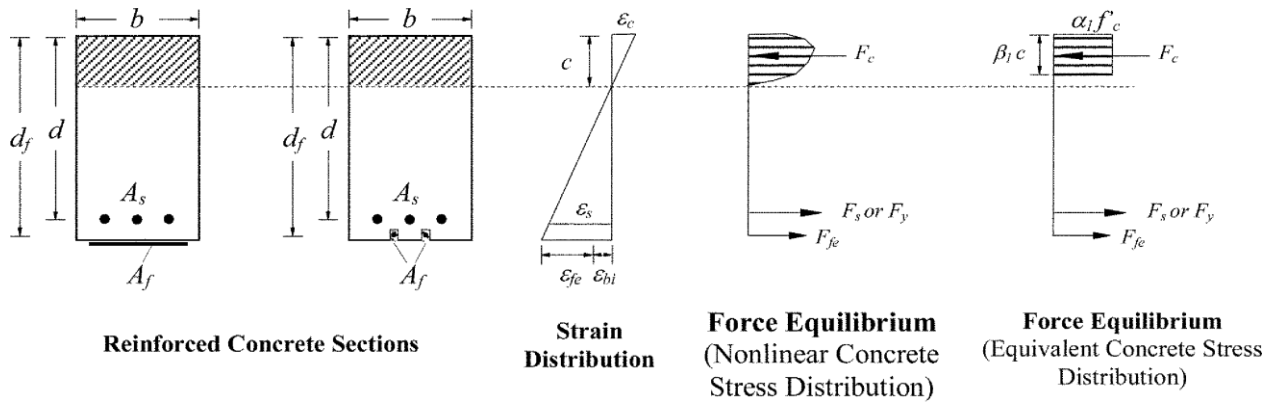


Figure 2. 17. *Distribution des déformations et des efforts internes pour une section rectangulaire en flexion à l'état limite ultime.[3]*

2.5.1.1 État limite ultime

Le calcul de la capacité portante des éléments sollicités en flexion est effectué à l'état limite ultime. La détermination de la charge ultime est dépendante de la position de l'axe neutre (figure 2.16). La détermination de la position de l'axe neutre (c) s'effectue à l'équilibre des forces internes obtenu à travers la formule suivante :

$$c = \frac{A_p f_{ps} + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (2.3)$$

En tenant compte que : $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$

α_1 et β_1 : sont des coefficients de remplissage et de positionnement du bloc de contrainte équivalent à la distribution non-linéaire des contraintes du béton. Ils peuvent être prises comme les valeurs associées au bloc de contrainte de Whitney ($\alpha_1 = 0,85$ et β_1 est déterminé de la section 10.2.7.3 de l'ACI 318-05).

La résolution de l'équation à trois inconnus s'effectue par la méthode des essais successifs. Cette dernière consiste à supposer une valeur de départ de la valeur de l'axe neutre (c), soit $c=0,5d$. Ensuite un calcul est effectué pour déterminer les déformations des différents matériaux de la section. Ce calcul est basé sur les équations de compatibilité des déformations suivantes :

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (2.5)$$

Pour ε_{fd} , les valeurs varient entre $0.6 \varepsilon_{cu}$ à $0.9 \varepsilon_{cu}$. Basée sur des recherches expérimentales [13, 54], le comité de l'ACI a recommandé la valeur de $\varepsilon_{fd} = 0.7\varepsilon_{fu}$.

Une fois que les déformations sont déterminées, un simple remplacement dans les diagrammes contraintes-déformations est effectué pour en extraire les contraintes dans les PRFs et les aciers de ferrailage. En fin, une vérification de l'équation d'équilibre des efforts internes est effectuée. Si l'équilibre est atteint, la valeur de (c) est retenue, sinon, une augmentation ou diminution de cette valeur est nécessaire et les étapes précédentes sont reprises jusqu'à l'obtention de l'équilibre des forces internes.

2.5.1.2 État limite de service

Elle consiste à faire une vérification pour s'assurer que la structure ne s'effondrera pas sous des charges de service et des flèches excessives dépassant les valeurs limites. La contrainte dans les armatures sous la charge de service doit être limitée à 80% de la contrainte d'écoulement (f_y), et la contrainte du béton ne doit pas dépasser 45% de la résistance limite à la compression (f'_c) [45, 55].

2.5.2 Association Française de Génie Civil (AFGC)

L'association Française de génie civil a publié la première version du code en 2003. Cette version a traité le calcul des poutres renforcées par les renforts en PRFC. Ensuite d'autres versions ont été publiées au cours des années 2007 et 2013. Ces dernières versions actualisées ont traité le calcul des poteaux et des dalles renforcées.

Les hypothèses de calcul sont les mêmes que celles adoptées par le BAEL (l'article A.3.3.2). Ces hypothèses sont évoquées ci-dessous:

- Les sections droites restent droites après déformation,
- Absence de glissement relatif entre les armatures d'acier et le béton, et entre le renfort en PRFC et le béton,
- La résistance à la traction du béton est négligée,
- La résistance à la compression du composite est négligée,
- Les diagrammes contrainte – déformation de calcul du béton, de l'acier de ferrailage et du renfort en PRFC sont ceux de l'article A.3.3 du BAEL. Les contraintes limites pour le béton et l'acier et les diagrammes relatifs sont ceux adoptées par le BAEL (figure 2.18),

- Un groupe de plusieurs barres de ferrailage est considéré comme centré au centre de gravité de la section équivalente. Le même principe est adopté pour les renforts en PRFC,
- En aucun cas les sections des aciers et des composite PRFC ne sont regroupés.

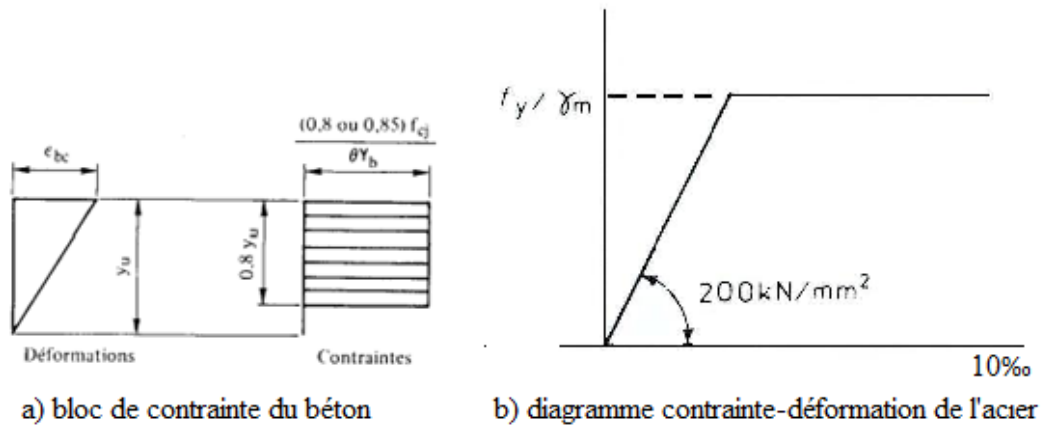


Figure 2. 18. Bloc de contrainte rectangulaire simplifié du béton et diagramme (σ - ϵ) des aciers adoptés par le BAEL.

2.5.2.1 État limite ultime

Les déformations des matériaux de la section considérée sont limitées pour l'allongement unitaire de l'acier à 10‰, pour le raccourcissement unitaire du béton à 3.5‰. Cependant la déformation limite du renfort composite est limitée à la valeur donnée par la formule suivante :

$$\epsilon_{fud} = \text{Min} \left\{ \frac{f_{f,d}}{E_f}; 0.85\text{‰} \right\} \quad (2.6)$$

Les contraintes limites du béton, de l'acier et des renforts en composite sont données, successivement par les valeurs suivantes :

$$f_{bu} = \frac{0.85f_{cj}}{\theta \cdot \gamma_b} \quad (2.7)$$

$$f_{su} = \frac{f_y}{\gamma_s} \quad (2.8)$$

$$f_{f,d} = \frac{\alpha_f f_f}{\gamma_{f,u}} \quad (2.9)$$

α_f : est un facteur permettant de prendre en compte les effets liés au vieillissement des matériaux et la diminution de leurs caractéristiques mécaniques avec le temps ($\alpha_f=0,65$).

$\gamma_{f,u} = 1,25$ pour les carbone- époxyde pultrudés.

Ces facteurs permettent de réduire la contrainte limite du PRFC de 52%.

Selon l'AFGC, le calcul peut se faire en prenant en considération l'un des pivots présentés sur la figure 2.19. Comparativement au BAEL91, un autre pivot est introduit dans le calcul, c'est le pivot (D) qui correspond à l'atteinte de l'allongement limite des renforts en PRFC. La distribution des contraintes et des déformations au moment de la ruine est considérée similaire à l'état représenté sur la figure 2.20.

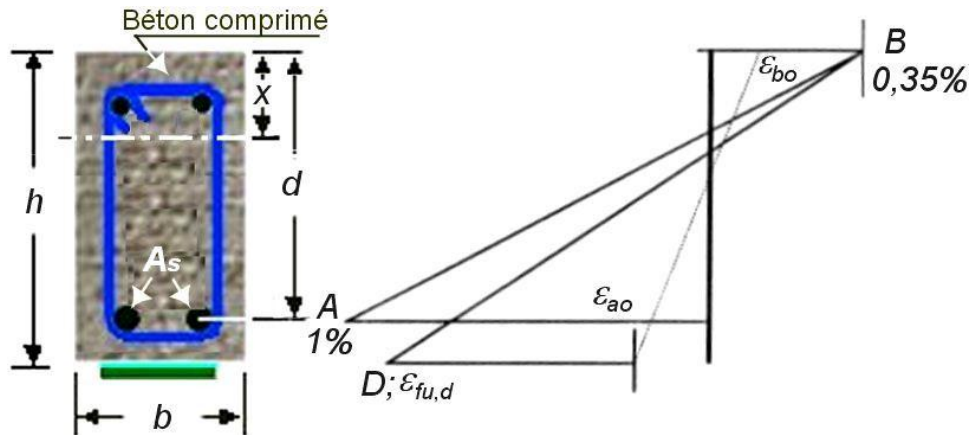


Figure 2. 19. Concept des (trois +un) pivots adoptés par l'AFGC.[46]

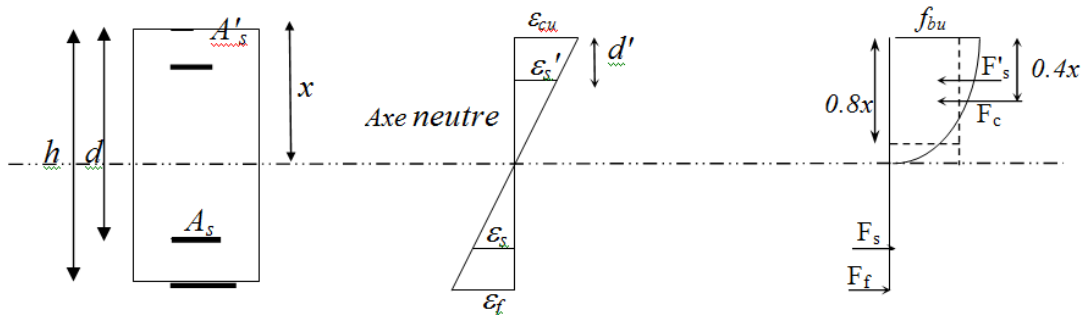


Figure 2. 20. Distribution des déformations et des contraintes dans une section.

L'équation d'équilibre des efforts sollicitant la section s'écrit alors :

$$F_c + F'_s = F_s + F_f \tag{2.10}$$

Avec :

La force interne dans le béton comprimé est :

$$F_c = 0.85 f_{cu} A_c(x) / \gamma_b \tag{2.11}$$

$$F_c = 0.567 f_{cu} A_c(x) \tag{2.12}$$

La force interne dans la barre d'acier comprimée est :

$$F'_s = A'_s f'_s \tag{2.13}$$

La force interne dans la barre d'acier tendue est :

$$F_s = A_s f_s \quad (2.14)$$

Et la force interne dans le renfort en PRFC est :

$$F_f = A_f f_f \quad (2.15)$$

f_s , f'_s et f_f : Sont, respectivement les contraintes dans les armatures tendues, comprimées et les renforts en PRFC, à prendre à partir des diagrammes contrainte-déformation appropriés.

L'équilibre des forces internes donne :

$$0.567 f_{cu} b (0.8 x) + f'_s A'_s = f_s A_s + f_f A_f \quad (2.16)$$

C'est une équation à quatre inconnues interdépendantes : x , f'_s , f_s et f_f . La résolution de cette équation ne peut se faire que par la méthode des essais successifs.

La méthode des essais successifs consiste à :

- Fixer " x ", en premier lieu il est pris égal ($d/2$),
- Calculer ε_s , ε'_s et ε_f à partir des équations de compatibilité des déformations des matériaux béton, acier et PRFC,

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_f = \frac{h+(0.5t_f-x)}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (2.19)$$

- Tirer f_s , f'_s et f_f à partir des diagrammes contrainte-déformation des aciers et des renforts en PRFC appropriés,
- Injecter x , f_s , f'_s et f_f dans l'équation d'équilibre, s'il y a équilibre arrêter le calcul itératif, la valeur de (x) est solution. S'il n'y a pas d'équilibre, il faut changer (x) et refaire les opérations précédentes jusqu'à l'équilibre des forces internes.

Une fois l'équilibre atteint et la position de l'axe neutre connue, le moment ultime que peut équilibrer la section (moment résistant) est donné par :

$$M_u / A_s = F'_s (d - d') + F_c (d - 0.4x) - F_f (d' + 0.5t_f) \quad (2.20)$$

$$M_u / C.D.G = F_s (d - 0.4x) + F'_s (0.4x - d') + F_f (h + 0.5t_f - 0.4x) \quad (2.21)$$

Avec :

$$M_u / A_s = M_u / C.D.G = M_u \quad (2.22)$$

En effet, le moment résistant exprime la capacité flexionnelle de la poutre. En considérant le pivot A ou B, le moment ultime repris par la section est :

$$M_u / C.D.G = f_e A_s (h - 0.4x) + f'_s A'_s (0.4x - d') + f_f A_f (h + 0.5t_f - 0.4x) \quad (2.23)$$

$$M_u / A_s = f'_s A'_s (d - d') + 0.567 f_{cu} b (0.8x)_c (d - 0.4x) - f_f A_f (d' + 0.5t_f) \quad (2.24)$$

La déformation du PRFC est calculée en se basant sur les équations de compatibilité des déformations.

Dans le cas du pivot (B ou D) et en considérant la plastification des armatures., les déformations des aciers tendues sont données par :

$$\varepsilon_{se} = \frac{f_e / \gamma_s}{E_s} \quad (2.25)$$

Le moment ultime repris par la section est :

$$M_u / C.D.G = f_e A_s (h - 0.4x) + f'_s A'_s (0.4x - d') + f_{fu} A_f (h + 0.5t_f - 0.4x) \quad (2.26)$$

$$M_u / A_s = f'_s A'_s (d - d') + 0.567 f_{cu} b (0.8x)_c (d - 0.4x) - f_{fu} A_f (d' + 0.5t_f) \quad (2.27)$$

Dans le cas du pivot (B ou D) et en considérant qu'il n'y a pas de plastification des armatures, la déformation des aciers tendus est prise comme suit :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{a0} + 0.91 \varepsilon_{fu} \quad (2.28)$$

Avec : $\varepsilon_s < \varepsilon_{se}$ (acier non plastifié).

Le moment ultime repris par la section est :

$$M_u / C.D.G = f_s A_s (h - 0.4x) + f'_s A'_s (0.4x - d') + f_{fu} A_f (h + 0.5t_f - 0.4x) \quad (2.29)$$

$$M_u / A_s = f'_s A'_s (d - d') + 0.567 f_{cu} b (0.8x)_c (d - 0.4x) - f_{fu} A_f (d' + 0.5t_f) \quad (2.30)$$

La flèche à la rupture, calculée à mi-portée de la poutre, peut être calculée par :

$$\Delta_u = \frac{M_u}{24E_c I_{cr}} (3L^2 - 4a^2) \quad (2.31)$$

Avec :

I_{cr} : Moment d'inertie de la section donné par:

$$I_{cr} = \left(\frac{1}{3}\right) b x^3 + \frac{E_s}{E_c} A'_s (x - d')^2 + \frac{E_s}{E_c} A_f (h - x)^2 \quad (2.32)$$

Dans le cas où les aciers sont considérés plastifiés, les déformations des aciers seront :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{se} = \frac{f_e / \gamma_s}{E_s} \quad (2.33)$$

La déformation du PRFC est calculée en se basant sur les équations de compatibilité des déformations.

2.5.2.2 État limite de service

A l'état limite de service, les vérifications suivantes sont effectuées :

- La contrainte ultime du béton comprimé est limitée à $\sigma_{bl} = 0,6 f_{cj}$ (BAEL -article A.4.5, 2),
- L'état limite de service limite l'ouverture des fissures, cela se traduit par une limitation de la contrainte dans les aciers tendus en cas de fissuration préjudiciable ou très préjudiciable (BAEL-article A.4.5,3),
- La contrainte dans le renfort en PRFC est limitée à $\sigma_{f,L} = \text{Min} (f_{fu} \text{ à l'ELS}; 450 \text{ MPa})$.

2.5.3 Fédération Internationale du Béton (FIB2001)

La fédération internationale du béton propose de prendre en considération dans le calcul l'effet de la charge existante avant le renforcement de l'élément de structure. Le principe est de déterminer le moment de service (correspondant à la fissuration) et sera comparé au moment critique. S'il est inférieur à M_{cr} la déformation initiale est négligée. Dans le cas contraire, la prise en considération de la déformation initiale est nécessaire. La **FIB** fait référence dans le calcul des poutres renforcées par PRFC à l'Eurocode2. Ainsi les hypothèses de calcul sont les mêmes que celles adoptées par l'EC2.

Les modes de rupture des éléments renforcés considérés par la FIB sont :

- Rupture par écrasement du béton et du PRFC en traction, elle est caractérisée par l'exploitation optimale du béton et du PRFC,

- Rupture par décollement du PRFC. Ce décollement peut se produire au niveau de l'enrobage du béton, à l'interface béton-résine, dans la résine, ou à l'interface résine-PRF. En général, ce mode de ruine est associé avec un écoulement des aciers tendus.

2.5.3.1 État limite ultime

Le même principe de calcul de la capacité flexionnelle que les autres codes est utilisé. Le principe est de déterminer la position de l'axe neutre par la méthode des essais successifs en se basant sur les équations d'équilibres des forces internes. La différence est de prendre en considération la déformation initiale ε_0 (déformation initiale du composite) et de prendre aussi le bloc de contrainte du béton adopté par l'EC2 (figure 2.21).

La valeur de la déformation initiale du composite est donnée par :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \frac{h-x_0}{x_0} \quad (2.34)$$

Avec :

ε_{c0} : est la déformation initiale du béton comprimé pour la poutre avant le renforcement.

x_0 = hauteur de l'axe neutre de la poutre avant renforcement.

Les déformations des matériaux sont données par :

$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad \text{Notée par } \varepsilon_{s1} \text{ (selon la FIB)} \quad (2.35)$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x-d'}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \quad \text{Notée par } \varepsilon_{s2} \text{ (selon la FIB)} \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_f = \frac{h + (0.5t_f - x)}{x} \cdot \varepsilon_{cu} - \varepsilon_0 \quad (2.37)$$

Le coefficient de remplissage du bloc de contrainte (K_1) adopté par le BAEL est remplacé dans l'EC2 par un coefficient (η) qui est tributaire de la résistance caractéristique du béton (f_{ck}). La résistance de calcul du béton est prise égale à :

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_b \quad (2.38)$$

Avec :

$\alpha_{cc} = 1$ pour le béton armé et 0,8 pour le béton non armé.

$\gamma_b = 1.5$ (coefficient de sécurité du béton).

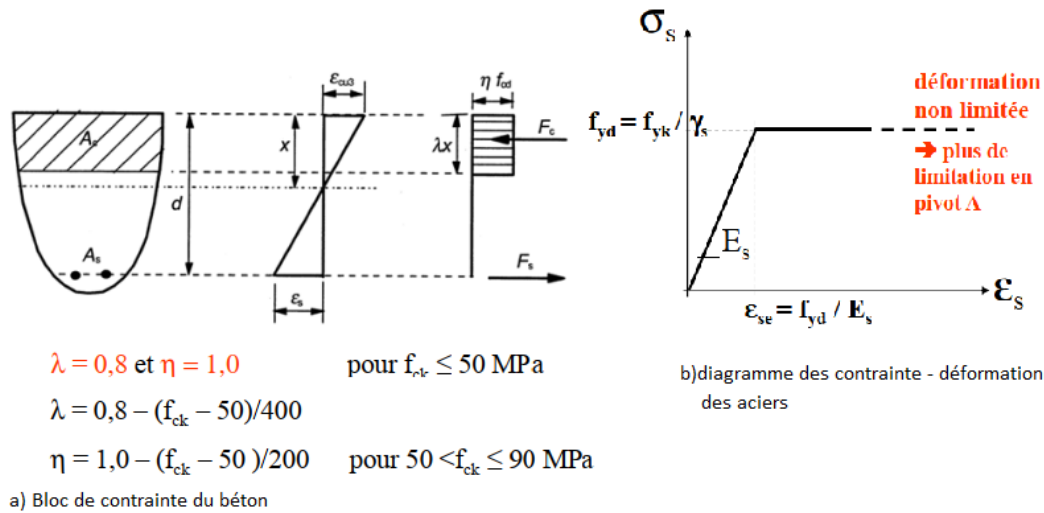


Figure 2. 21. Bloc de contrainte rectangulaire simplifié du béton et diagramme (σ - ϵ) des aciers adoptés par L'EC2.

Les forces internes seront ainsi :

$$F_c = (\eta/\gamma_b) f_{ck} A_c(x) \tag{2.39}$$

$$F'_s = A'_s f'_s \tag{2.40}$$

$$F_s = A_s f_s \tag{2.41}$$

$$F_f = A_f f_f \tag{2.42}$$

Avec : $F_{yd} = F_{yk} / \gamma_s$ (limite de calcul des aciers).

L'équation d'équilibre des forces internes est :

$$(\eta/\gamma_b) f_{ck} b (\lambda x) + f'_s A'_s = f_s A_s + f_f A_f \tag{2.43}$$

Une fois la résolution de l'équation ci-dessus est effectuée par la méthode des essais successifs et que la position de l'axe neutre est trouvée, les moments ultimes des sections sont donnés par :

$$M_u / A_s = F'_s (d - d') + F_c (d - 0.5\lambda x) - F_f (d' + 0.5t_f) \tag{2.44}$$

$$M_u / C.D.G = F_s (d - 0.5\lambda x) + F'_s + (0.5\lambda x - d') + F_f (h + 0.5t_f - 0.5\lambda x) \tag{2.45}$$

La déformation des aciers tendus et du renfort en PRFC doit vérifier les conditions suivantes :

- Les aciers tendus sont plastifiés ($\epsilon_s > \epsilon_{sy} = f_{yd}/E_s$),
- La déformation du renfort en PRFC ne doit pas dépasser la valeur limite ϵ_{fud} .

2.5.3.2 État limite de service

D'après la FIB, pour limiter les déformations excessives, les contraintes dans les armatures tendues à l'état de service (charge de service) doivent être limitées à 80% de la contrainte limite d'écoulement des aciers (f_{cd}).

Une fois que la première fissure apparaisse, le moment atteint une valeur dite "moment critique" et sa valeur est estimée par :

$$M_{cr} = \frac{2I_g f_t}{h} \quad (2.46)$$

Avec :

$$I_g = bh^3/12 \quad (2.47)$$

f_t : est la résistance à la traction du béton donnée par: $f_t = 0.3 f_{ck}^{2/3}$

2.6 Conclusion

Dans le présent chapitre une présentation du comportement à la flexion simple des poutres en BA et des poutres en BA renforcées par des composites en PRFC a été effectuée. Plusieurs facteurs permettent de classifier les modes de rupture possibles et l'évolution des fissures pour ce genre de poutres. Le mode de ruine le plus recommandé est celui de la rupture par écoulement des aciers tendus, car il permet d'avoir plus de ductilité et d'éviter la ruine brutale de l'ouvrage, ce qui permet de prendre les mesures nécessaires avant la ruine totale de l'ouvrage.

La majorité des modes de rupture pour les poutres renforcées sont pratiquement les mêmes pour les deux techniques de renforcement (EBR et NSM) sauf quelques différences ont été constatées pour la rupture par décollement (mode de rupture le plus rapporté comme cause principale de la ruine des poutres renforcées). Plusieurs méthodes ont été conçues pour limiter le phénomène de décollement des renforts en PRFC, à savoir l'ancrage des plaques aux extrémités par des tissus composites et l'adoption de la technique d'insertion de renforts en composite dans la section de la poutre (technique NSM).

Le calcul et la vérification des poutres en BA renforcées par des composites en PRFC sont menés par les mêmes hypothèses proposées par la réglementation appliquée au calcul des poutres en BA. Plusieurs codes de calcul sont proposés dans le secteur de génie civil pour l'étude des poutres en BA renforcées par PRFC, à savoir l'ACI 440.2R.08, l'AFGC et la FIB. Quelques différences sont à noter entre ces codes, tels que les blocs de contraintes simplifiés du béton adoptés, la prise en considération des déformations avant renforcement et le coefficient d'équivalence béton-acier. Ce dernier est pris égale à 15 pour l'AFGC03, alors qu'il est pris comme étant égal à sa valeur réelle (E_s/E_c) pour les autres codes.

Les calculs adoptés par l'AFG font référence au BAEL91 alors que la FIB se réfère à l'Eurocode 2. Par contre l'ACI440.2R.08 fait référence dans ses calculs au code Américain ACI 318.

Chapitre **3**

**PROGRAMME
EXPERIMENTAL**

CHAPITRE 3

PROGRAMME EXPERIMENTAL

3.1 Introduction

Ces dernières années, l'application du renforcement par PRF des éléments en BA a été fortement appréciée, principalement en raison de l'ultra-haute résistance et de l'élasticité améliorée des PRF. En outre, les PRF offrent une longue durée de vie, ne sont que légèrement affectés par les conditions environnementales corrosives et ne nécessitent qu'un entretien minimal [56]. Les barres et les tissus de PRF ont récemment démontré un potentiel innombrable en tant qu'alternatives aux plaques d'acier pour le renforcement ou la réparation des structures en béton [57]. De plus, les PRF ont trouvé leur place pour le renforcement des éléments en béton armé dans des applications où les techniques de renforcement traditionnelles pourraient être difficiles et délicates [58]. Les PRF sont similaires à la technique la plus courante et la plus populaire pour améliorer la résistance des éléments en béton armé au moyen de plaques d'acier collées à la surface par des résines époxy. Cette technique est simple, efficace et rentable.

Cependant, cette technique présente quelques limites et obstacles : difficulté de mise en place sur chantier des plaques d'acier lourdes, dégradation de l'adhérence entre l'acier et le béton due à la corrosion de l'acier, les longueurs de livraison des plaques d'acier limitées (cas du renforcement des éléments de construction longs) [59]. Dans ces circonstances, les laminés, les tissus et les barres en PRF sont considérés comme alternatives aux plaques d'acier pour le renforcement des éléments en BA. Ainsi, les PRF pourraient être le remplacement de l'acier pour le renforcement et la réparation des éléments en BA en raison de leur facilité d'installation, de leur grande disponibilité (longueur et types), de leur transport facile, de leur entretien minimal, de leur résistance à la corrosion et d'autres caractéristiques intéressantes.

De nombreuses études ont été menées pour évaluer l'influence du renforcement par PRFC sur le comportement global et les modes de défaillance des éléments en BA. Toutes ces études ont proposé différents types d'installation de matériaux PRFC. Les matériaux PRFC utilisés dans la construction sont disponibles sous forme de tissus, de barres ou de bandes. Ces derniers peuvent être installés en fonction de la nature d'application pour les éléments de construction en béton armé. Les bandes composites en PRFC peuvent être collées aux zones tendues externes des poutres et des dalles afin d'augmenter leur résistance flexionnelle. En revanche, les tissus de PRFC peuvent être enroulés autour des poteaux en BA pour améliorer le confinement et la résistance axiale. En outre, les PRFC augmentent la résistance à la flexion, au cisaillement et à la torsion des poteaux

et des poutres [60]. Diverses techniques de renforcement des éléments en BA par PRFC sont disponibles, et chaque technique donne lieu à différents types de réponses lors de la défaillance des éléments renforcés. Cependant, comme mentionné plus haut, les PRFC dans les éléments en béton armé visent essentiellement à renforcer et à réparer ces éléments.

De nombreuses études ont été menées pour analyser le comportement des éléments en BA renforcés, et les résultats ont montré que divers paramètres peuvent influencer leur comportement et particulièrement leur mode de rupture. L'apparition fréquente de catastrophes naturelles et d'autres charges accidentelles sur les éléments en béton armé a également démontré un niveau de sécurité insuffisant face à l'effondrement et aux dommages des bâtiments [46]. Le scénario actuel consiste à récupérer ces structures en améliorant leur résistance en raison des coûts élevés de la démolition et de la reconstruction et à augmenter la ductilité de certains éléments en béton armé. Par conséquent, l'étude du comportement des éléments en BA renforcés et réparés par des PRFC, est un domaine de recherche pertinent dans les structures.

De nombreuses études expérimentales ont été menées pour comprendre le comportement des éléments en BA renforcées, éventuellement les poutres.

Hawileh et al. [61] ont étudié et inspecté expérimentalement les paramètres affectant la performance en flexion des poutres en béton armé renforcées par des tissus de PRF collés latéralement (CL). Ils ont trouvé que les tissus collés latéralement améliorent considérablement la capacité en flexion des poutres. La largeur du PRFC et le taux de l'acier de ferrailage ont un effet significatif sur le comportement des poutres renforcées par matériaux composites.

Salama et al. [62] ont mené une étude expérimentale comparative entre des poutres renforcées en flexion avec différentes configurations de tissus de PRFC collés sur la face inférieure et sur les côtés latéraux des poutres. Cette étude a révélé que le renforcement par des tissus collés à la face inférieure améliore la résistance à la flexion de 62% à 92% par rapport à la poutre témoin. D'autre part, les poutres renforcées par des tissus collés sur les côtés latéraux offrent une augmentation de la résistance à la flexion de 39,7 à 93,4 %.

El-Hacha et Rizkalla.[1] ont étudié le comportement en flexion de poutres renforcées par la technique NSM en utilisant des PRFC. Les paramètres examinés étaient les types de charge, le nombre de bandes et de tiges en PRFC. Ils ont trouvé qu'un glissement prématuré se produit davantage entre le PRFC et l'interface époxy dans le cas de renforcements par des tiges que dans le cas des plats.

Tang et al. [35] ont étudié les effets du type de béton (béton léger et normal), du renfort (acier et PRFG) et du type de matériau de collage sur la performance flexionnelle. Les poutres renforcées par PRFG ont atteint une augmentation d'environ 23% et 53% de leur capacité de charge ultime par rapport à la poutre de contrôle. L'influence du type d'époxy a nettement dominé la réponse moment-déflexion jusqu'au moment ultime.

De Lorenzis et al.[63] ont étudié les effets du type de renforcement NSM-PRF et du taux de renforcement interne en acier sur la capacité ultime et l'adhérence. Ils ont enregistré une augmentation d'environ 60% de la charge ultime des poutres renforcées par rapport aux poutres de contrôle. Ils ont trouvé aussi, que l'augmentation de la longueur de scellement change le mode de rupture passant de la séparation du béton d'enrobage et commençant par le décollement de l'extrémité du plat à l'écrasement du béton comprimé suivi par la séparation secondaire du béton d'enrobage près de la région du moment maximal.

Ceroni et al. [64] ont étudié l'influence des paramètres incluant les dimensions de la rainure, la rugosité de la surface du béton, les propriétés du matériau PRF et le type d'adhésif, sur les poutres renforcées par la technique NSM. Ils ont obtenu que le changement de ces paramètres conduit à des distributions différentes de la déformation axiale dans le renfort et des contraintes de cisaillement le long des interfaces.

Boukhezar et al. [55] ont mis en exergue l'efficacité de différents taux de barres de renforcement sur le comportement des poutres en BA renforcées pour un béton de faible résistance caractéristique. Les résultats obtenus à partir du modèle analytique indiquent que l'augmentation du ratio des barres de renforcement, donne des résultats appropriés par rapport aux courbes expérimentales. L'augmentation du taux de renforcement permet d'augmenter la charge ultime et les déformations des aciers.

Douadi et al. [65] ont étudié la possibilité d'utilisation de l'acier de précontrainte comme renforcement de poutres en béton à faible résistance au lieu des barres en PRFC. Les résultats obtenus affirment que l'utilisation de ces barres augmente considérablement les charges de rupture. L'augmentation de la taille des rainures pour le renforcement par l'acier de précontrainte selon NSM n'a pas présenté d'impact sur le mode de rupture.

Al Nuaimi et al. [66] ont étudié le comportement en flexion de poutres en BA renforcées par des treillis en acier galvanisé à haute et moyenne densité. Ils ont prouvé que le renforcement par les treillis en acier galvanisé augmente considérablement la capacité de flexion ultime des poutres.

En outre, plusieurs études expérimentales ont été menées pour étudier l'utilisation d'autres matériaux de renforcement. Abdalla et al.[67] ont étudié le glissement sous contrainte d'interface des lamelles en alliage d'aluminium (AA), utilisées comme matériau de renforcement par collage externe sur les éléments en BA.

Les résultats expérimentaux, tels que ceux rapportés par El-Gamal et al. [43] ont montré que le type de PRF, le taux de renforcement en acier et la quantité de PRF peuvent modifier le comportement et le mode de ruine des poutres renforcées. Les chercheurs dans ce cas n'ont pas traité la question de disposition de plats PRF, mais ils ont examiné l'effet de variation du taux de renfort en PRF. Ils ont déclaré que le renforcement avec la technique NSM a donné des capacités plus élevées avec deux tiges en PRFC et une meilleure ductilité pour le renforcement par des tiges PRFG.

Récemment, de nouveaux développements et de nouvelles recherches ont étudié certains aspects des méthodes de renforcement des structures en BA, les avantages, les limitations, les défis et les progrès des renforcements par PRF dans les constructions en génie civil, tel que présenté par Nasser [44].

3.2 Objectifs du programme expérimental

L'objectif principal de ce travail de recherche est de mener un programme expérimental sur des poutres en béton armé soumises à la flexion simple à quatre points. Les effets de plusieurs paramètres devant être quantifiés tels que :

- L'effet de la disposition des renforts en PRFC utilisés selon la technique EBR,
- L'effet de la disposition des renforts en PRFC utilisés selon la technique NSM,
- L'effet du taux d'armatures longitudinales tendues (0.71, 1.12 et 1.61 %),
- L'effet du taux d'armatures longitudinales tendues sur les deux techniques EBR et NSM.

Les résultats principaux devant être étudiés pour les poutres testées sont comme suit :

- La charge ultime,
- La flèche à la mi- travée,
- La relation charge-flèche,
- La déformation relative au niveau des armatures longitudinales,
- La déformation enregistrée sur le béton comprimé,
- La déformation enregistrée sur le matériau composite,
- La position de l'axe neutre (à la rupture),

- Le mode de rupture.

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

3.3 Programme expérimental

Onze poutres en BA à section rectangulaire ont été préparées et testées, trois d'entre elles étant des poutres de contrôle sans renforcement et les autres ayant des configurations de renforcement et des taux d'armatures tendues différents. Les spécimens ont été répartis en trois séries. La première série se compose d'une poutre de contrôle et de quatre poutres renforcées avec des plats en PRFC, dont deux renforcées selon les techniques EBR et deux autres renforcées par la même section de PRFC mais selon la technique NSM. Toutes les dimensions des poutres renforcées par PRFC sont maintenues les mêmes. La seule différence est la répartition des plats en PRFC, où deux dispositions ont été prises (un plat et deux plats pour chaque technique).

La deuxième série est constituée de deux poutres contrôles, armées avec des taux d'armatures tendues différents de celles de la série 1 (1.12 et 1.61%), et de quatre poutres renforcées par des PRFC, dont deux renforcées selon la technique EBR et deux autres renforcées avec la même section de PRFC mais selon la technique NSM. Pour ces poutres renforcées, les mêmes caractéristiques géométriques des poutres contrôles ont été prises (deux taux d'aciers tendus différents, 1.12 et 1.61%).

3.4 Caractéristiques des matériaux

3.4.1 Le béton

Les poutres ont été réalisées en utilisant du béton ordinaire formulé par des matériaux locaux et du ciment Portland ordinaire (CPJ42.5). La méthode Dreux-Gorisse a été utilisée pour la formulation du mélange de béton [68], les dimensions des granulats utilisés ont été choisies conformément à la norme NF P18-560 [69]. La composition du béton utilisée dans la présente étude est indiquée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3. 1. La composition du béton adoptée pour les spécimens.

Constitutions du béton/m ³	Quantité (kg)
Sable 0/5	765
Gravier 8/15	465
Gravier 15/25	560
Ciment CPJ-CEM II 42.5	350
Eau	179

Pour la préparation du béton, le sable, les graviers et le ciment sont mélangés à sec pendant une minute, puis l'eau est ajoutée progressivement. Le mélange est malaxé pendant une autre minute.

Pour chaque série de béton, des éprouvettes de contrôle standard (cylindres de 16× 32 cm²) ont été coulées et durcies dans les mêmes conditions que les spécimens de tests.

Le coulage du béton des éprouvettes et des poutres a été effectué en deux couches compactées avec une aiguille vibrante électrique (CONTROLS 12000 vibrations / min-50 Hz). Après le remplissage des moules, les surfaces supérieures sont lissées manuellement et recouvertes d'une toile en polyéthylène. Les spécimens ont été décoffrés après 24 heures de la date de coulage. Les échantillons ont été conservés au laboratoire à une température ambiante de 25 °C et une humidité moyenne de 40% pendant 28 jours. La résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité du béton ont été déterminés à 28 jours (conformément à la norme NF P 18-406 [70] et NF P 18-408 [71]) (figure 3.1). Un traitement de deux surfaces des éprouvettes a été fait à l'aide de soufre pour rendre leurs surfaces planes, ceci a été effectué moyennant un dispositif de surfacage (figure 3.2)

- **Essai à la compression simple**

L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de Poisson « ν ») et la loi de comportement du béton. Pour déterminer la résistance du béton en compression et le module de Young, trois éprouvettes de contrôle pour chaque série de poutres ont été testées en compression directe au moyen de la presse CONTROLS MCC8 d'une capacité de 3000kN. La mise sous charge doit être effectuée sans choc et d'une manière continue à une vitesse de 0.24 MPa/seconde (**figure 3.2**). La résistance à la compression correspond à la charge de rupture (F) qui est la force maximale enregistrée au cours de l'essai [70]. La contrainte limite du béton à la compression est calculée par la formule suivante :

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (3.1)$$

Avec :

F_c : Force maximale enregistrée lors de l'essai de compression.

A_c : Section transversale de l'éprouvette en béton.

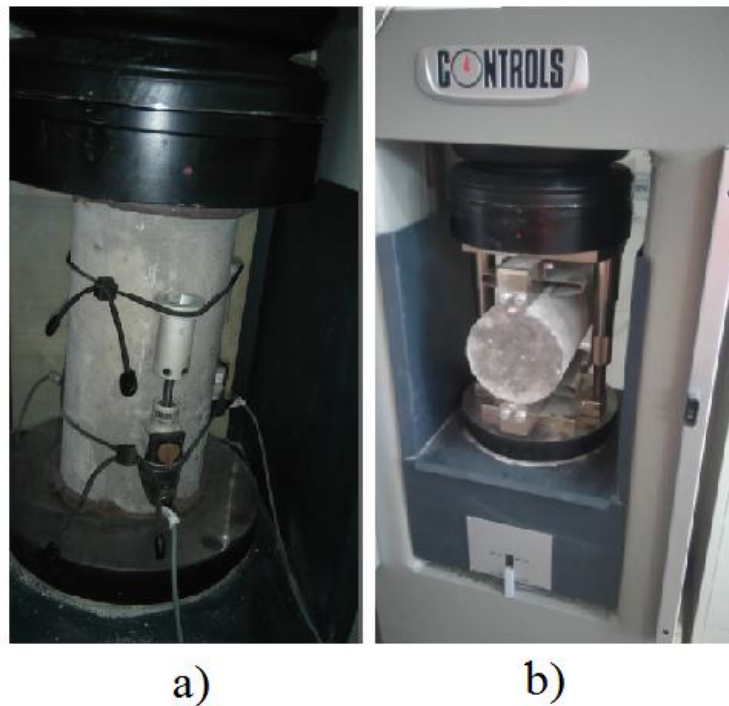


Figure 3. 1. Essais pour la détermination des caractéristiques du béton, a) Essai de compression et détermination du module d'élasticité, b) Essai de traction par fendage.

- **Essai à la traction par fendage**

L'essai permet de déterminer la résistance à la traction par fendage. Il a été effectué sur deux éprouvettes cylindriques (160 x 32 cm²). Le dispositif intermédiaire permettant d'appliquer la charge sur deux génératrices opposées, doit être parfaitement centré sur les plateaux de la presse de chargement. La vitesse de chargement est de 0,05 ± 0,01 MPa/s.

La résistance à la traction est donnée par la formule suivante :

$$f_t = \frac{2F_t}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (3.2)$$

Avec :

F_t : charge de rupture lors de l'essai,

d : diamètre de l'éprouvette cylindrique,

h : hauteur de l'éprouvette cylindrique.

La résistance moyenne à la compression, la résistance moyenne à la traction et le module d'élasticité moyen obtenus sont 35 MPa, 2.90 MPa et 34.4 GPa, respectivement.

- **Détermination du module d'élasticité**

La détermination du module d'élasticité a été effectuée avec la même presse de l'essai de compression. Un dispositif spécial a été utilisé, il est composé de trois comparateurs qui mesurent les déformations longitudinales du cylindre (du béton). Les comparateurs sont liés directement à l'ordinateur qui est chargé du pilotage de l'essai et de l'acquisition des données. L'essai consiste à appliquer une charge d'un tiers de la résistance à la compression du cylindre sur trois cycles de charge-décharge (figure 3.1a).

- **Essai au cône d'Abrams (Slump test)**

Des tests au cône d'Abrams sur le béton préparé ont été effectués. Cet essai connu aussi comme l'essai d'affaissement, consiste à mesurer l'affaissement du béton frais conformément à la norme (NF EN 12350-2). L'essai est effectué avec un moule tronconique rempli de béton frais (figure 3.2). Le mode opératoire est comme suit:

- Mouiller l'intérieur du moule,
- Placer le moule sur un support rigide et horizontal et non absorbant,
- A l'aide d'une Main écope, remplir le moule de béton frais, en trois couches de même hauteur,
- Compacter chaque couche par 25 coups avec la barre,
- Araser le dessus du moule et nettoyer le support autour du moule,
- Retirer le moule verticalement avec précaution en 3 à 5 secondes,
- Mesurer l'affaissement du béton par rapport à la hauteur initiale (hauteur du moule).

Les résultats des tests effectués sur le béton extrait des gâchis ont donné un affaissement moyen égal à 8 cm (béton plastique de classe S2).

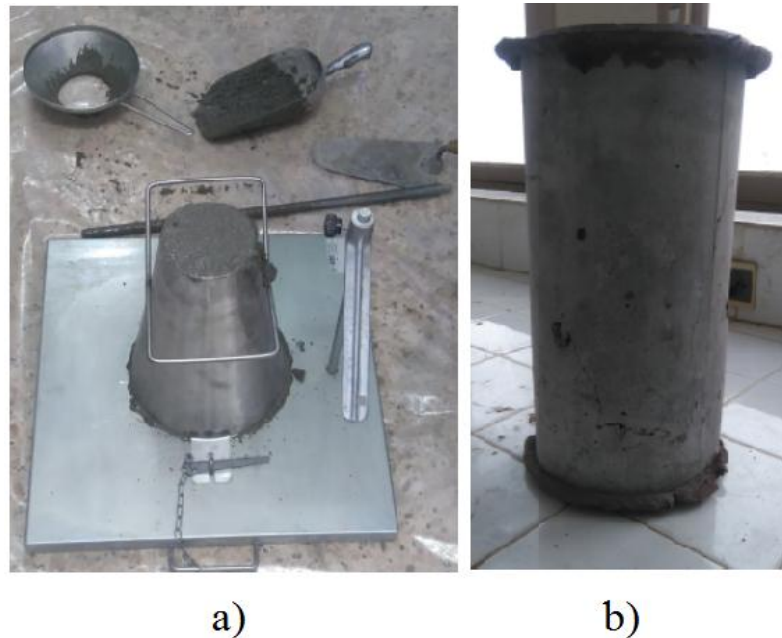


Figure 3. 2. *Essais sur béton, a) Essai au cône d'Abrams, b) Surfaçage au soufre des éprouvettes.*

Les résultats des essais effectués pour déterminer les caractéristiques du béton utilisé sont présentés au tableau 3.2.

Tableau 3. 2. *Caractéristiques du béton obtenues à partir des essais.*

Caractéristiques du béton utilisé	Valeurs
Résistance à la compression (MPa)	35.00
Résistance à la traction (MPa)	2.90
Module d'élasticité E_c (GPa)	34.40
Coefficient de poisson ν_c	0.20
Affaissement (cm)	8.00

3.4.2 Les armatures de ferrailage

Pour la fabrication des poutres, nous avons utilisé pour les armatures longitudinales un acier à haute adhérence (FeE 500) et pour les armatures transversales un acier (FeE 235). Les caractéristiques mécaniques des armatures utilisées sont celles fournies par le fabricant comme montrée sur le tableau 3.3. Le comportement mécanique de l'acier est du type élasto-plastique.

Tableau 3. 3 . Caractéristiques des armatures en acier.

Nuance	E_s (MPa)	f_y (MPa)	ϵ_{sy}	f_{su} (MPa)	ϵ_{su}
FeE500	200 000	500	0.002	550	0.012
FeE235	200 000	235	0.0012	410	0.022

3.4.3 Le renfort

Les renforts composites utilisés pour le renforcement des poutres est constitué de lamelles en polymères de fibres de carbone type (Sika®CarboDur®S), fournis par la compagnie SIKA (<https://dza.sika.com/>). Elles sont fournies sous forme de rouleaux ; afin de faciliter la coupe des longueurs souhaitées (figure 3.3). Les largeurs souhaitées ont été découpées par une découpeuse en laser afin d'assurer une coupure parfaitement parallèle aux génératrices (aux fibres de carbone). Leurs caractéristiques sont données dans le tableau 3.4.

Tableau 3. 4. Caractéristiques des lamelles en PRFC et de l'adhésif époxy.

Type de PRFC/Adhésif	E_f/E_a (MPa) Module d'élasticité	f_{fu}/f_{au} (MPa) Résistance de traction	$\epsilon_{fu}/\epsilon_{au}$ (%) Elongation à la rupture	Epaisseur (mm)	Densité	Couleur
Sika®CarboDur® S1012	165 000	3100	> 1.7	1.2	1.6	Noire
Sikadur 330	4500	30	> 0.9	/	1.3	Gris clair

Les lamelles (plats) de carbone présentent une surface extérieure très lisse. La section transversale des plats en PRFC se compose de fibres de carbone assemblées dans une matrice de résine époxy. Les fibres sont disposées parallèlement les unes aux autres et séparées entre elles par des films de résine [65].



Figure 3. 3. Lamelles en PRFC (SIKA).

3.4.4 L'adhésif époxy

L'adhésif utilisé dans le présent travail expérimental est une résine époxy type (Sikadur-330) fournie par la société SIKA (<https://dza.sika.com/>). Ce type de résine est une colle spécialement formulée pour le collage des matériaux composite aux éléments de béton. Il est fourni sous forme de kit composé de deux composants " A : résine et B : durcisseur" (figure 3.4). Les deux composants mixés donnent un matériau homogène de collage. Le durcissement final de la résine époxy est atteint au bout de sept jours à une température ambiante moyenne de 20 °C. Les propriétés des résines employées sont fournies par le fournisseur sont présentées dans le tableau 3.4.



Figure 3. 4. Résine époxy utilisée.

3.5 Préparation des spécimens

Le programme expérimental regroupe onze poutres en béton armé de dimensions 170 mm de hauteur, 100 mm de largeur et 1000 mm de longueur totale ont été testées en flexion quatre points. La portée totale entre les supports était de 800 mm et la portée en cisaillement utilisée était de 200 mm (figure 3.5). Des armatures de 4HA8 ont été utilisées comme armatures longitudinales, avec deux barres supérieures et deux barres inférieures. Le ferrailage transversal de cisaillement a été composé de cadres en barres lisses de 6 mm de diamètre, réparties sur toute la longueur de la poutre avec un espacement de 10 cm. Le taux d'armatures tendues ($\rho_s = A_s / b_c \times d$) a été pris égale à 0.72, 1.12 et 1.61%, selon le cas étudié.

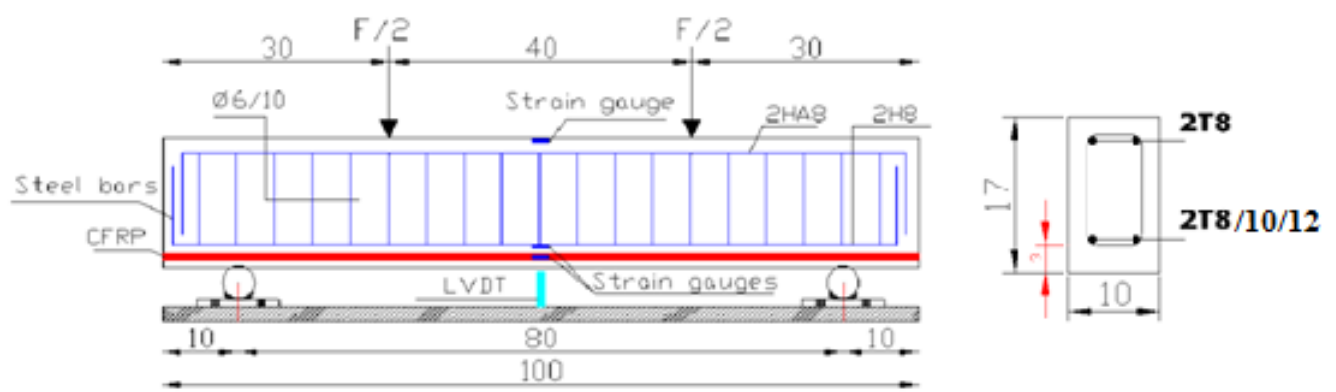


Figure 3. 5. Configuration de l'essai de flexion.

Des moules en bois ont été préparés pour recevoir le béton, leurs parois ont été imbibées d'huile pour éviter l'adhérence entre les parois des moules et le béton lors du décoffrage [55]. Pendant le coulage du béton des poutres, la vibration du béton a été assurée avec un vibreur électrique (CONTROLS-50Hz) pour éviter toute éventuelle ségrégation (figure 3.6). Les spécimens sont conservés dans les moules et protégés par un film en polyéthylène (plastique) pendant 24 heures. Après décoffrage, les poutres ont été conservées à l'intérieur du laboratoire à l'air libre jusqu'au jour de la réalisation des essais (à une température ambiante de 25 °C et une humidité relative d'environ 40 %) [72].



Figure 3. 6. Préparation et réalisation des spécimens.

3.6 Préparation des surfaces et collage des renforts

Les engravures ont été formées en réalisant des barres rectangulaires en bois ayant la forme des rainures. Ces barres, fixées préalablement à l'intérieur des moules, permettent de préserver les engravures après démoulage.

Après démoulage, on a procédé à un nettoyage des faces inférieures, latérales et des engravures des poutres au moyen d'une ponceuse et d'air comprimé, pour éliminer toutes impuretés, et rendre les surfaces aussi planes et propres que possible afin de garantir un parfait collage et une parfaite adhérence (béton-lamelle PRFC). Après découpage des longueurs souhaitées des lamelles en PRFC, ces dernières ont été nettoyées à l'aide d'acétone pour éliminer toute éventuelle souillure [73].

Pour le renforcement des poutres par la technique EBR, les étapes à suivre sont:

- Nettoyage de la surface du béton recevant le renfort en composte par l'air comprimé,
- Nettoyage des surfaces des plats en PRFC à l'aide d'acétone pour éliminer toute souillure,
- Application d'une couche de résine époxy d'environ (1 mm) d'épaisseur sur la face inférieure du béton,
- Application d'une couche d'époxy d'environ (1 mm) d'épaisseur sur les plats de carbone,
- Collage des plats en PRFC sur la face inférieure du béton puis une légère pression doit être appliquée par un rouleau pour éliminer les vides.

La procédure de collage du renfort selon la technique EBR dans le présent travail expérimental est illustrée sur la figure 3.7 (voir annexe A pour plus de détails).

Pour le renforcement des poutres par la technique NSM, les étapes à suivre sont:

- Nettoyage des engravures du béton au moyen d'air comprimé,
- Nettoyage des surfaces des plats en PRFC à l'aide d'acétone,
- Les rainures ont été remplies par l'adhésif époxy,
- Les plats de PRFC ont été placés dans les rainures en exerçant une légère pression afin que l'époxy enveloppe parfaitement le PRFC,
- La résine époxy a été ajoutée pour remplir les rainures et la surface finale a été nivelée pour éliminer l'excès de résine.

La procédure du renforcement selon la technique NSM dans la présente étude est illustrée sur la figure.3.8 (voir annexe A pour plus de détails).

L'adhésif époxy a été laissé durcir pendant deux semaines pour tous les échantillons préparés. Un tissu en PRFC a été utilisé comme renfort latéral pour éviter le décollement des lamelles aux extrémités des spécimens lors des essais (poutres renforcées par EBR).

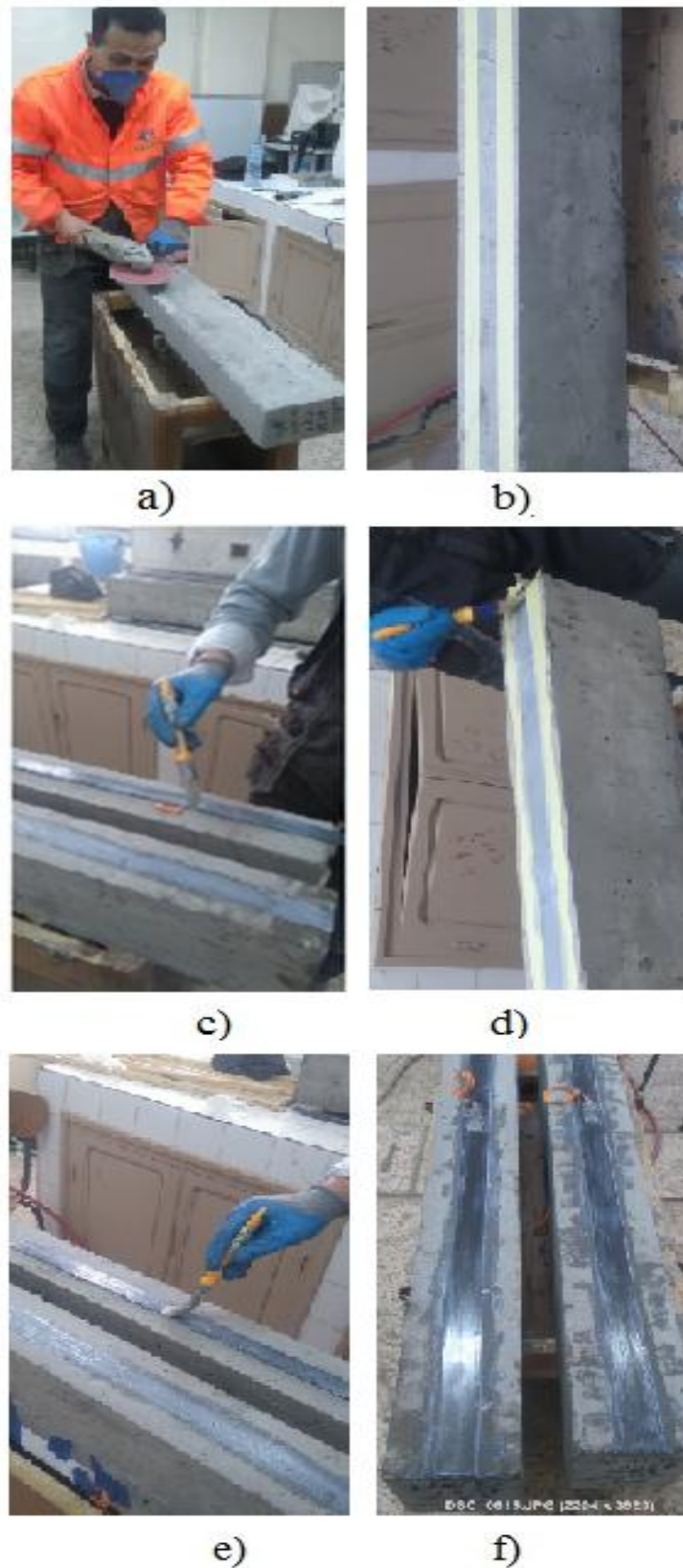


Figure 3. 7. Étapes de l'installation du PRFC sur les poutres selon EBR.

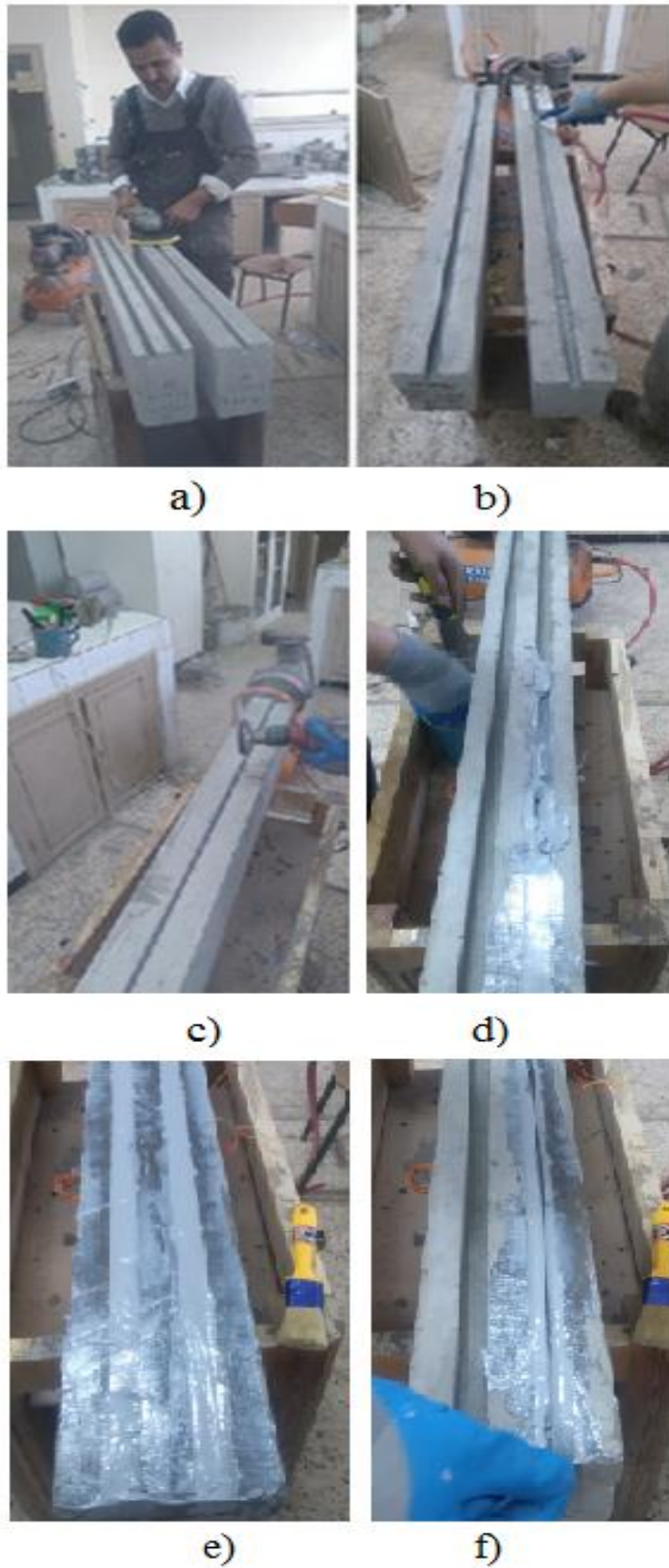


Figure 3. 8. Étapes de l'installation du PRFC sur les poutres selon NSM.

3.7 Dispositif d'essai

Tous les spécimens ont été testés en flexion à quatre points sur une presse hydraulique de type CONTROLS MCC8 (*CONTROLS S.P.A, Liscate, Italie*) d'une capacité maximale de 3000kN [74, 75]. Les charges ont été transmises à la poutre au moyen d'une poutre de distribution de charge en acier dur avec un écart de 400 mm entre points de chargement. La charge a été appliquée avec une vitesse de chargement de 250 N/s (figure 3.9) et toutes les données ont été collectées par un système d'acquisition de données. Le dispositif d'essai est présenté sur la figure 3.9. La poutre a été soigneusement placée sur les supports d'appuis et toutes les instrumentations ont été placées et connectées au système d'acquisition de données par le biais d'un boîtier de connexion. Ce dernier est raccordé à un DATALOG. Les données ont été enregistrées en temps réel et ont été transférées numériquement sur un PC. Chaque seconde, l'ordinateur fait un balayage de tous les capteurs et jauges.

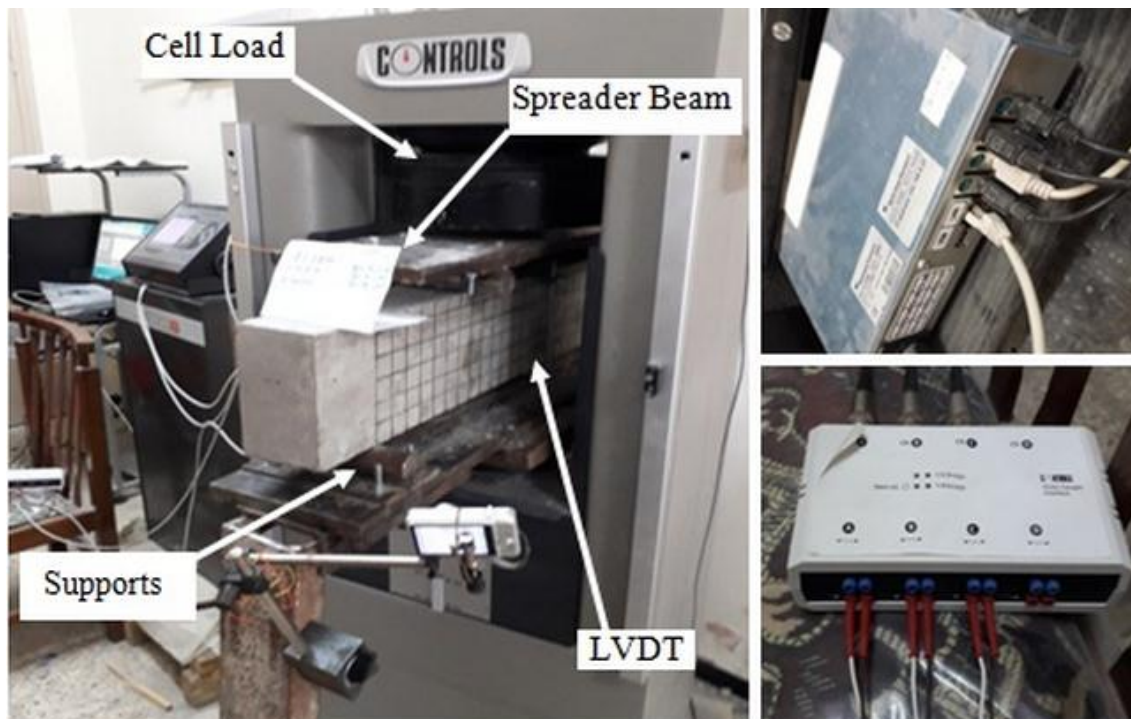


Figure 3. 9. Dispositif expérimental et système d'acquisition.

3.8 Instrumentation des essais

En ce qui concerne l'instrumentation des essais, les spécimens sont testés en flexion quatre points avec une presse hydraulique d'une capacité de 3000 KN pilotée par ordinateur. La flèche à mi-portée de la poutre a été mesurée à l'aide d'un capteur différentiel linéaire variable LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) d'une résolution de $\pm 0,01$ mm et d'une course de 25 mm (figure 3.10).



Figure 3. 10. Capteur LVDT pour la mesure des déplacements.

Les déformations ont été mesurées à l'aide de trois jauges de déformation fixées à mi-portée de chaque poutre. La première jauge de déformation de 10 mm de longueur a été fixée au milieu de l'armature inférieure tendue. Cette jauge était du type **FLA-10-11** de la compagnie TML (*Tokyo sokki Kenkyujo Co., Ltd*), avec les caractéristiques suivantes : de type filaire, à trois fils, avec une résistance de $120 \pm 0.3 \Omega$, un facteur de jauge de $2.12 \pm 1 \%$, une longueur de jauge de 10 mm et une épaisseur de 1 mm.

La deuxième jauge de déformation mesurant 30 mm a été fixée au centre des lamelles en PRFC. Cette jauge était du type **PFL-30-11** de la compagnie TML (*Tokyo sokki Kenkyujo Co., Ltd*), avec les caractéristiques suivantes : de type filaire, à trois fils, avec une résistance de $120 \pm 0.3 \Omega$, un facteur de jauge de $2.11 \pm 1 \%$, une longueur de jauge de 30 mm et une épaisseur de 1 mm. La jauge de déformation a été collée à la surface des barres d'acier et des plats de PRFC avec un adhésif mono-composant type LOCTITE 496 à base de cyanoacrylate. Avant de coller la jauge, la surface de la barre d'acier a été traitée pour la recevoir (voir annexe B). Un ruban siliconé transparent a été appliqué comme couche protectrice pour isoler les jauges de l'humidité et de l'environnement alcalin du béton.

La dernière jauge mesurant 60 mm a été placée sur la face du béton comprimé et à mi-portée de la poutre. Cette jauge était du type **PL-60-11** de TML (*Tokyo sokki Kenkyujo Co., Ltd*), avec les caractéristiques suivantes : de type filaire, à trois fils, avec une résistance de $120 \pm 0.3 \Omega$, un facteur de jauge de $2.13 \pm 1 \%$, une longueur de jauge de 60 mm et une épaisseur de 1 mm. La jauge a été

collée à la surface du béton, préalablement traitée, avec la colle LOCTITE 496 appliquée sur une couche mince d'une résine époxy à deux composants.

La figure 3.11 présente les détails d'installation des jauges de déformation sur l'armature d'acier, le plat en PRFC et le béton.

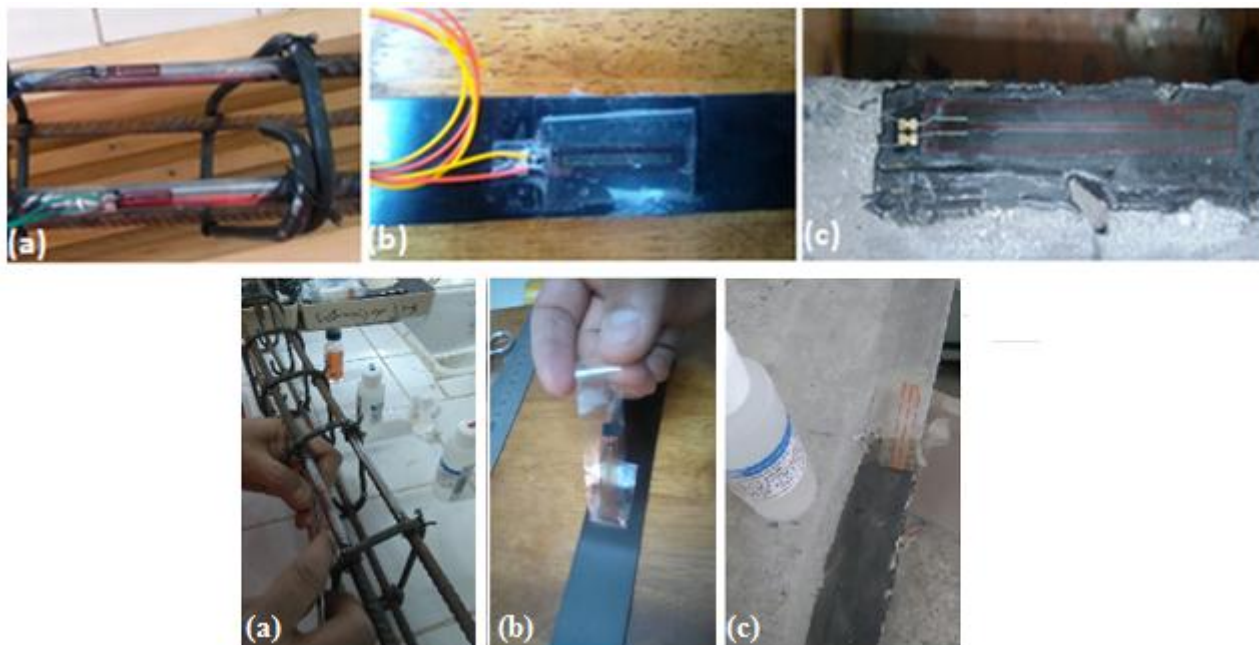


Figure 3. 11. Installation des jauges de déformation sur : (a) l'armature, (b) le plats) et (c) le béton.

3.9 Configuration des spécimens

Onze éprouvettes testées ont été identifiées par une notation qui comporte trois termes, formés de lettres et chiffres, séparés par un point. Les spécimens sont regroupés en deux catégories : **Série 01**, comprenant une poutre contrôle et quatre poutres renforcées par des plats en PRFC (05 spécimens). Alors que la **série 02** est composée de deux poutres contrôles et quatre poutres renforcées (06 spécimens). Les poutres de la série 01 ont été armées avec un taux d'acier de 0.72% et renforcées selon deux techniques (NSM et EBR) avec la même section de PRFC. Cependant, les poutres de la série 2 ont été armées avec deux taux d'aciers tendus différents (1.12% et 1.61%).

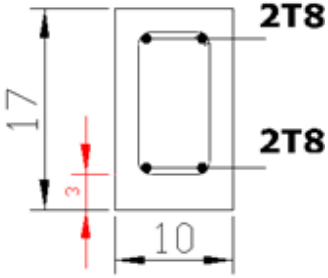
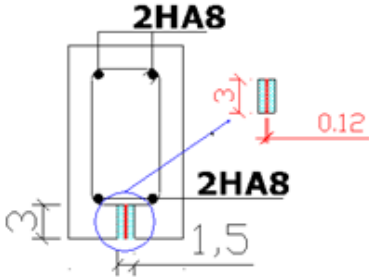
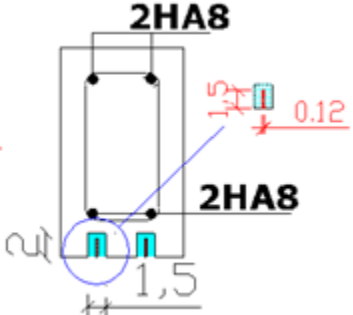
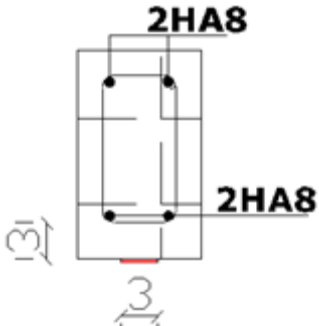
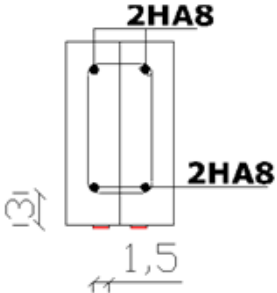
La dénomination adoptée pour les spécimens testés est faite comme suit :

Le premier terme se compose de deux lettres **CB** ou **SB** indiquant si la poutre est de contrôle ou renforcée (*Control Beam Et Strengthened Beam*), le deuxième terme est un chiffre (**1,2** ou **3**) représentant le taux des armatures longitudinales tendues utilisées (de 0.72%, 1.12% et 1.61%), le troisième est formé d'un chiffre et une lettre (**1** ou **2** et **E** ou **N**) spécifiant le nombre de plats de

PRFC utilisés et la lettre exprime la technique de renforcement (**E** : EBR et **N** : NSM). La lettre (**U**) indique que la poutre est non renforcée (*Unstrengthened*).

Les tableaux 3.5 et 3.6 présentent les différentes configurations adoptées dans le présent programme expérimental.

Tableau 3. 5. Notation des spécimens de la Série 01.

Série d'essai	Notation des spécimens	Configuration des spécimens
SERIE 01	CB.1.U	
	SB.1.1N	
	SB.1.2N	
	SB.1.1E	
	SB.1.2E	

3.10 Conclusion

Le montage du dispositif d'un programme expérimental nécessite un savoir-faire indispensable pour s'assurer que, à la fin des essais, les résultats obtenus soient fiables et reflètent le comportement réel des éléments testés. Dans cette partie d'étude, une attention particulière a été donnée à la fixation et au montage des instruments de mesure (capteur de déplacement et jauges de déformations). Le choix des jauges de déformation utilisées n'a pas été aléatoire, où une recherche approfondie a été effectuée pour arriver au choix des jauges utilisées. Les colles utilisées pour la fixation des jauges de déformation ont été choisies de telle façon qu'elles soient compatibles avec la déformabilité des matériaux (béton, acier et renfort en PRFC).

Chapitre 4

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

CHAPITRE 4

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1 Introduction

Les résultats expérimentaux obtenus lors des essais de flexion décrits au chapitre 3 sont présentés dans ce chapitre. À partir des données expérimentales, la capacité portante, les déformations des aciers tendus, des plats en polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) et du béton, ainsi que le mode de rupture des poutres en béton armé (BA) renforcées ont été obtenues et discutées.

Des spécimens avec différentes dispositions de renforts en PRFC, différents taux d'armatures et pour deux techniques de renforcement (EBR et NSM) ont été étudiés dans le présent travail. L'effet des détails de disposition des plats de PRFC et du taux de ferrailage des poutres renforcées sur la capacité portante des poutres en BA testées a été examiné et discuté. Les paramètres d'essai des spécimens testés et les détails complets de chaque série ont été décrits au chapitre 3. Les résultats expérimentaux pour tous les spécimens testés sont présentés dans le tableau 4.1. Ces résultats sont présentés en termes de relation entre la charge appliquée et la déflexion à mi-portée (figure 4.2). Une discussion des résultats des tests est présentée dans les sections suivantes en termes de résistance à la flexion, de déflexion, de mode de rupture, de ductilité, de déformabilité, de capacité d'absorption d'énergie et de rigidité des poutres.

Les charges de la première fissuration, les charges élastiques, ultimes et de rupture ainsi que la déflexion à mi-portée ont été analysées pour comprendre le comportement des poutres en béton armé renforcées en évaluant les différents paramètres influents.

Les résultats d'essais des différents spécimens testés sont représentés sur le tableaux 4.1.

Tableau 4. 1. Résultats des essais pour l'ensemble des poutres.

	ID Spécimens	P_f (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	Gain de la charge élastique (%)*	Gain de la charge ultime (%)*	Δ_f (mm)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_r (mm)	\mathcal{E}_c (‰)**	\mathcal{E}_s (‰)**	\mathcal{E}_f (‰)**
Série 01	CB.1.U	39.80	59.10	89.40	-	-	2.39	3.80	8.82	9.54	2.21	2.25	-
	SB.1.1N	41.37	101.70	111.10	72.08	24.27	1.94	6.26	7.60	7.75	3.82	3.17	3.82
	SB.1.2N	41.30	97.90	115.60	65.65	29.30	1.63	5.84	8.29	8.84	3.17	2.42	3.18
	SB.1.1E	43.60	72.70	111.70	23.01	24.94	2.42	4.19	8.55	9.01	1.42	2.78	3.59
	SB.1.2E	47.30	88.60	131.50	49.92	47.09	1.50	4.38	10.23	10.70	0.93	3.37	3.62
Série 02	CB.2.U	42.90	91.30	102.00	-	-	3.40	6.49	8.11	8.93	0.90	1.93	-
	SB.2.1N	64.90	91.20	104.50	-0.11	2.45	4.47	6.46	8.66	8.93	0.99	2.06	2.52
	SB.2.1E	40.80	76.80	93.40	-15.88	-8.43	2.17	5.07	8.47	10.95	1.10	1.71	2.03
	CB.3.U	48.60	99.20	109.40	-	-	3.49	6.91	8.07	8.85	1.05	1.85	-
	SB.3.1N	61.30	92.60	113.30	-6.65	3.56	4.19	6.61	9.58	10.12	1.35	1.74	2.88
	SB.3.1E	45.00	71.20	94.80	-28.23	-13.35	2.10	3.94	6.51	14.38	0.88	1.52	3.52

*Différence relative par rapport aux poutres contrôles.

** Déformations mesurées à la rupture.

4.2 Poutres de la série 01 (effet de la disposition des renforts)

4.2.1 Capacité flexionnelle

La capacité flexionnelle est la charge ultime que peut supporter une poutre sollicitée en flexion simple. Les résultats obtenus relatifs à la capacité flexionnelle des poutres testées sont présentés dans le tableau 4.1. Ces résultats mettent en évidence l'effet de la disposition des plats de PRFC sur la capacité des poutres en flexion. Les résultats sont présentés en termes de charge de première fissure, d'élasticité, ultime, de rupture et de flèche à mi-portée. Rappelons que toutes les poutres testées ont la même section transversale du béton, d'acier et du renfort en PRFC. Les seules variables sont, la disposition des plats, la configuration et la technique de renforcement utilisées (1 ou 2 plats, EBR ou NSM).

Les résultats des essais ont révélé que l'ajout de renforts en PRFC (selon les deux techniques NSM et EBR) améliore considérablement la rigidité et la capacité de la charge ultime des poutres renforcées (figure 4.1), ce qui est complètement en accord avec les travaux de recherches antérieurs [1, 29, 32]. Les poutres en BA renforcées avec des plats de carbone ont donné une augmentation significative de la charge ultime de 24%, 29%, 25% et 47% pour les spécimens SB.1.1N, SB.1.2N, SB.1.1E et SB.1.2E, respectivement, par rapport à la poutre de contrôle (CB.1.U).

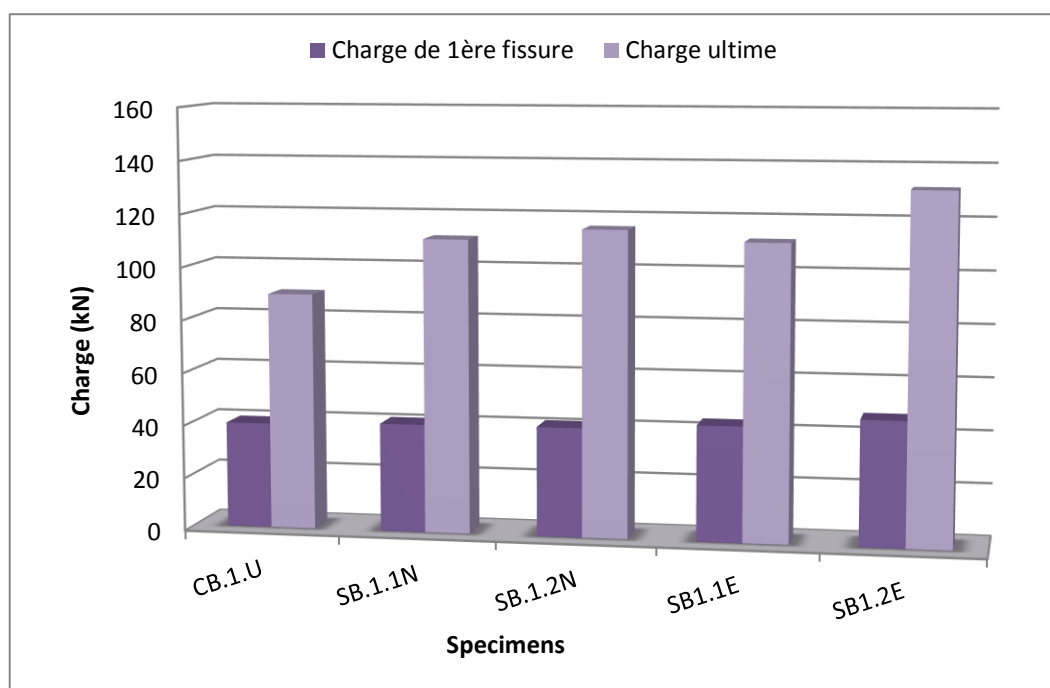


Figure 4. 1. Capacité de charge en flexion des poutres renforcées.

La charge de première fissure et la charge ultime des spécimens ont également augmenté de manière significative après le renforcement selon les deux techniques. Ces augmentations sont plus remarquables dans le cas des poutres renforcées selon EBR. En outre, l'effet de la disposition des plats en PRFC sur la capacité de la charge ultime est plus marqué pour la disposition en deux plats que pour celle en un seul plat. Par rapport à une seule bande de PRFC, la disposition en deux bandes de PRFC a permis d'enregistrer un gain de 47.09 % au lieu de 24.94 % pour la technique EBR et de 29.30% au lieu de 24.27 % pour la NSM, comparativement avec la poutre de référence (CB.1.U).

L'analyse des résultats des essais nous a permis aussi de constater que l'écart entre la charge ultime et la charge de la première fissure, pour l'ensemble des poutres testées, a été pratiquement très proche, les écarts varient entre 25% et 28%.

4.2.2 Courbes de charge-flèche

Les courbes de charge en fonction de la flèche à mi-portée pour la poutre témoin et pour l'ensemble des poutres renforcées par PRFC sont présentées sur la figure 4.2.

En général, les courbes présentent une réponse approximativement tri-linéaire définie par les stades de fissuration du béton, de l'écoulement des aciers et du stade post-écoulement. La flèche est proportionnelle à la charge jusqu'à l'apparition de la première fissure puis la courbe change de rigidité jusqu'au point correspondant à la limite élastique. Par la suite, la charge se stabilise et le déplacement continue à subir de légères variations jusqu'à la rupture dans le cas du renforcement selon NSM.

En revanche, dans le cas de la poutre renforcée par la technique EBR, la charge et la flèche continuent d'augmenter jusqu'à la ruine, mais avec une valeur de flèche plus élevée par rapport aux valeurs enregistrées dans le cas de NSM. La flèche à la charge ultime était bien supérieure aux valeurs obtenues lors du renforcement par la technique NSM (8,55 mm et 10,23 mm pour SB.1.1E et SB.1.2E, respectivement, et 7,60 mm et 8,29 mm pour SB.1.1N et SB.1.2N, respectivement). Cela s'explique par le fait que les poutres renforcées par la technique EBR ont un comportement légèrement ductile par rapport à la technique NSM.

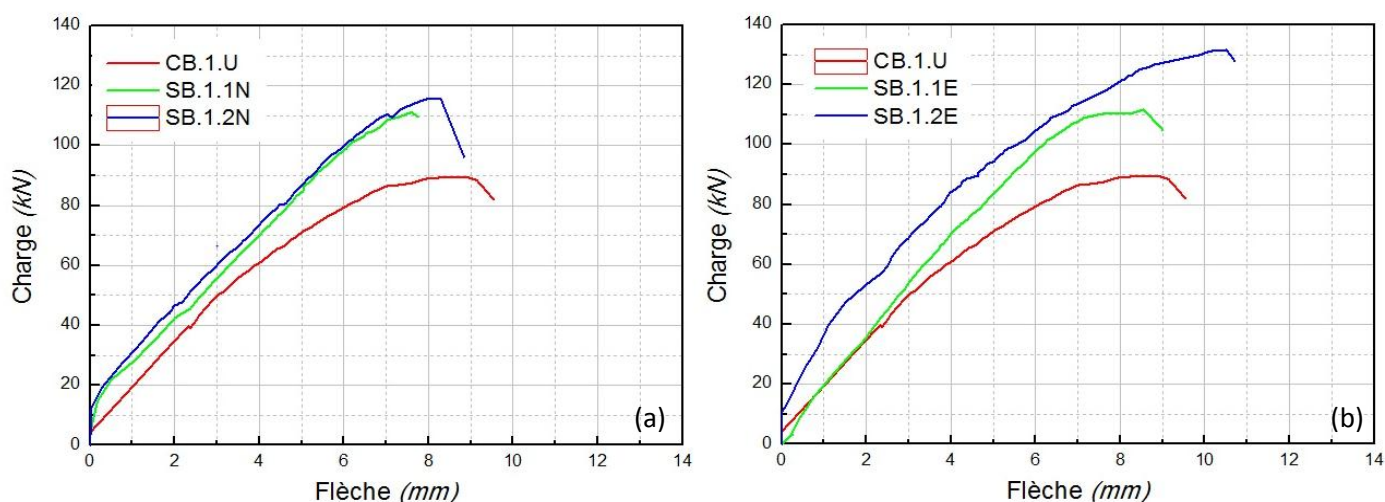


Figure 4. 2. Courbe Charge-flèche à mi-portée des poutres testées. a) poutres renforcées par la technique NSM. b) poutres renforcées par la technique EBR.

Les courbes présentées sur la figure 4.2 indiquent que lorsque les poutres sont renforcées, leur déflexion diminue alors que la charge et la rigidité augmentent de manière significative.

Comme évoqué précédemment, les spécimens testés ont les mêmes paramètres géométriques, à savoir la section transversale du béton, l'armature en acier et les plats de PRFC. La différence réside dans la technique de renforcement et la disposition des bandes de PRFC. Théoriquement, toutes les poutres renforcées devraient avoir le même comportement et les mêmes charges de rupture.

Dans le cas des spécimens renforcés par la technique EBR, la disposition en deux plats de PRFC a entraîné une augmentation de la rigidité, de la charge ultime et de la flèche maximale. Ces augmentations n'ont pas été observées dans le cas du renforcement par la technique NSM, où la différence n'est pas vraiment représentative.

La poutre renforcée par une bande de PRFC (SB.1.1N) a présenté un comportement très similaire à celui observé pour la poutre avec deux bandes (SB.1.2N) jusqu'à la limite d'élasticité. Au-delà de cette phase, une légère distinction a été constatée. L'analyse des résultats obtenus indique que, dans la technique NSM, l'utilisation d'une disposition dispersée des bandes en PRFC n'est pas toujours avantageuse pour améliorer la charge de rupture, en raison de la fragilisation excessive de la couverture en béton entraînant l'accélération de la propagation des fissures du béton. Cependant, dans la seconde instance (poutres renforcées par la technique EBR), les essais ont

montré une remarquable différence dans l'allure de la courbe charge-déflexion, dès le début du chargement (figure 4.2b). Après l'écoulement des armatures en acier, l'augmentation de la déflexion était plus marquée pour les poutres renforcées par la technique EBR, ce qui a diminué la rigidité de la poutre.

Toutes les études antérieures ont révélé que la technique NSM permet également une meilleure exploitation des propriétés du PRFC et présente moins de problèmes de décollement par rapport à la technique EBR [76]. En revanche, nos essais ont révélé que cela n'a pas été le cas lors du renforcement par plus d'une bande sur la face inférieure de la poutre. L'augmentation du nombre de plats en PRFC dans le renforcement selon NSM conduit à la fragilisation de l'enrobage du béton et favorise le décollement de ce dernier.

4.2.3 Modes de rupture

Dans la section suivante, les modes de rupture des poutres testées dans le présent travail expérimental sont discutés. Les figures 4.3, 4.4 et 4.5 exposent les différents modes de rupture observés lors des essais.

Comme montré sur la figure 4.3, de très légères fissures de flexion ont été observées dans la zone du moment maximal pour la poutre contrôle (CB.1.U) et ensuite, des fissures diagonales critiques (**FDC**) se sont développés commençant des points de chargement vers les appuis.

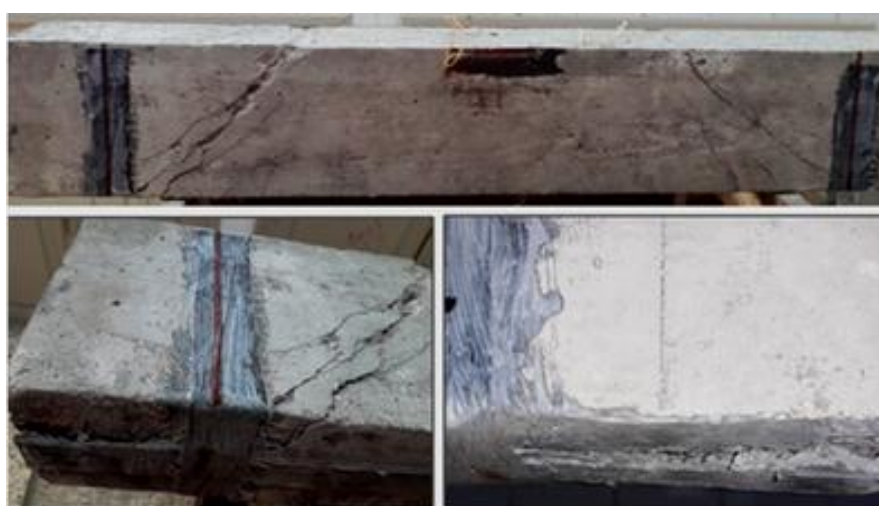
La figure 4.4a présente les différents modes de rupture pour la poutre renforcée par un plat selon EBR (SB.1.1E). Les résultats obtenus montrent l'apparition de fissures de traction à proximité des supports, suivies de fissures diagonales critiques. Ces FDC [77] apparaissent dans la zone de cisaillement maximal. On a également observé un décollement aux extrémités (DE) du PRFC par rupture à l'interface béton-adhésif (IBA).

La figure 4.4b (cas de SB.1.2E) montre clairement deux types de fissures à la rupture. La première se propage vers le point de chargement (fissure diagonale critique[77]), tandis que la seconde est parallèle à l'armature en acier en tension à mi-portée, ce qui signifie qu'une légère rupture par séparation de la couverture de béton (SCB) s'est produite. Les fissures diagonales critiques étaient dans ce cas plus importantes que dans le cas du renforcement par la technique NSM, tandis que les fissures de flexion ont été carrément absentes.

Pour la poutre renforcée par deux plats avec la technique EBR, des fissures diagonales critiques et un décollement externe (DEX) ont été constatés. Cependant, aucune fissure de flexion n'a été notée (figure 4.4b).



Figure 4. 3. Mode de rupture de la poutre contrôle (CB.1.U).



(a) Poutre renforcée par 1EBR (SB.1.1E)



(b) Poutre renforcée par 2EBR (SB.1.2E)

Figure 4. 4. Mode de rupture des poutres renforcées selon la technique EBR.



Figure 4. 5. Mode de rupture des poutres renforcées selon la technique NSM.

La poutre renforcée par un plat de composite selon NSM (SB.1.1N) a présenté des fissures de traction plus importantes que tous les autres spécimens testés, notamment par rapport à CB (figure 4.5a). Alors que les fissures diagonales étaient moins marquées que dans les autres poutres testées. Le décollement n'a pas été observé et la rupture des plats de PRFC s'est produite au niveau des points d'appui, ce qui n'a pas été observé pour les autres spécimens.

En ce qui concerne la poutre renforcée avec deux plats par NSM, des fissures diagonales critiques se sont développées. De plus, des fissures de traction moins importantes que les autres cas ont été constatées. Des fissures se sont développées aussi sur la face inférieure de la poutre à proximité des engravures, et d'autres sur la face supérieure au niveau des points de charge (figure 4.5b). À la

fin de l'essai, une rupture par séparation de l'enrobage du béton (SEB) au bord de la poutre est survenue.

4.2.4 Ductilité et Déformabilité

La ductilité est la capacité des structures ou des éléments de structures à tolérer des déformations post-élastiques avant la ruine (dissipation d'énergie).

Dans cette section, l'effet du renforcement et de la disposition des plats de fibres de carbone sur la ductilité des poutres renforcées a été examiné.

La déformabilité des poutres est définie comme la capacité de l'élément structurel à atteindre des flèches plus importantes avec ouvertures plus profondes des fissures. Pour estimer la ductilité et la déformabilité des poutres, les facteurs de ductilité ($\mu_{\Delta u}$) et de déformabilité ($\mu_{\Delta f}$) sont exprimés comme suit [78]:

$$\mu_{\Delta u} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (4.1)$$

$$\mu_{\Delta f} = \frac{\Delta_r}{\Delta_y} \quad (4.2)$$

Où Δ_u , Δ_r et Δ_y sont, la flèche à la charge ultime (maximale) à la rupture et à la limite élastique respectivement.

Tableau 4. 2. Résumé des facteurs de ductilité et de déformabilité des spécimens.

ID Spécimens	Facteur de Ductilité ($\mu_{\Delta u}$)	Ratio par rapport à CB	Facteur de Déformabilité ($\mu_{\Delta f}$)	Ratio par rapport à CB
CB.1.U	2.32	1.00	2.51	1.00
SB.1. 1N	1.21	0.52	1.24	0.49
SB.1. 2N	1.42	0.61	1.51	0.60
SB.1. 1E	2.04	0.88	2.15	0.86
SB.1. 2E	2.34	1.01	2.44	0.97

De nombreuses études ont montré que l'augmentation du taux de renforcement des poutres entraîne une réduction de la ductilité [79]. Les résultats des essais effectués dans la présente recherche, révèlent que la ductilité diminue avec le renforcement des poutres par PRFC pour les deux techniques (NSM et EBR), comparativement à la poutre témoin. Cependant, l'augmentation de la dispersion des plats améliore la ductilité des poutres et l'augmentation était plus marquée dans le

cas de la technique EBR. Le tableau 4.2 récapitule les valeurs des facteurs de ductilité et de déformabilité des poutres testées. On peut aussi remarquer que l'augmentation du nombre de plats de PRFC réduit leur déformation, car les forces internes sont distribuées sur les deux plats. Cela entraîne de plus grandes déformations dans la poutre ainsi que dans l'armature et par conséquent la ductilité augmente.

L'amélioration de la ductilité est moins observée dans la technique NSM lorsque le nombre de plats est augmenté. Dans tous les cas, la ductilité des poutres renforcées reste toujours inférieure à celle de la poutre CB.

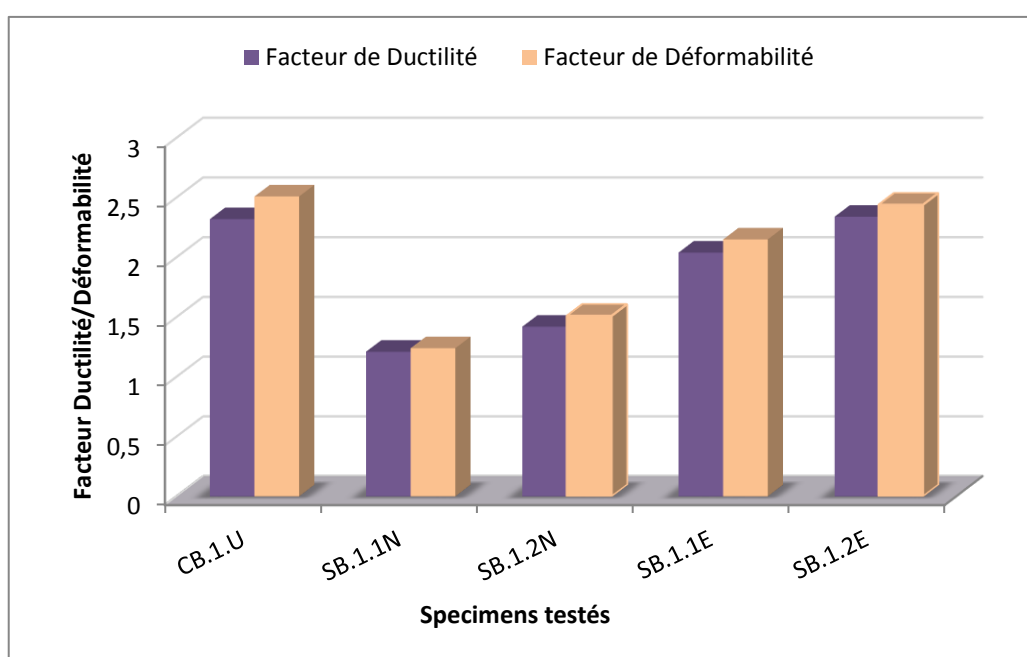


Figure 4. 6. Facteurs de ductilité et de déformabilité des poutres.

Il est clair que l'utilisation de deux plats de PRFC, en particulier dans le cas des poutres renforcées par EBR, améliore considérablement la ductilité, qui est presque similaire à la valeur donnée par l'éprouvette CB. Ceci est dû au fait que l'acier a tendance à se déformer dans le domaine post-élastique et que sa contrainte se stabilise, donc les PRFC reprennent l'excès de contrainte.

De plus, la déformabilité des poutres renforcées augmente avec l'augmentation du nombre de plats en PRFC, particulièrement pour le renforcement selon EBR. Cependant, elle reste toujours inférieure aux résultats de la poutre CB (figure 4.6). Ceci fait apparaître que le renforcement par une disposition distribuée des plats en PRFC est favorable à la ductilité et à la déformabilité des poutres renforcées.

Les valeurs de la ductilité et de la déformabilité des poutres renforcées par la technique NSM sont plus faibles que celles données par la technique EBR. Ceci est dû à l'encastrement des plats de PPRFC dans la section transversale du béton. D'autre part, la quantité excessive d'époxy utilisée augmente la rigidité de la poutre et par conséquent, la ductilité diminue. Cela indique une action composite entre la poutre et le renforcement, où la capacité maximale du renforcement en PRFC est exploitée.

4.2.5 L'énergie d'absorption

L'absorption d'énergie est une propriété structurelle essentielle des éléments structuraux en BA, éventuellement lorsqu'elles sont réparées et renforcées avec différents matériaux ou techniques [78]. La capacité d'absorption, est la capacité d'une structure ou d'un élément de structure à absorber l'énergie induite par une sollicitation puis dissipée par de larges déformations inélastiques de ces structures. Elle est aussi l'énergie absorbée par unité de section transversale des spécimens, calculée en tout point de déplacement extrême [78]. Elle est déterminée en calculant l'aire qui se trouve sous la courbe charge-déplacement obtenue à travers les essais (à mi-portée de la poutre). L'absorption d'énergie pour toutes les poutres testées est présentée dans le tableau 4.3.

Tableau 4. 3. Résumé de l'énergie d'absorption et de la rigidité des poutres testées.

ID Spécimens	Energie d'absorption (kN.mm)	Ratio par rapport à CB	Rigidité (kN/m)	Ratio par rapport à CB
CB.1.U	584.22	1.00	17850.30	1.00
SB.1. 1N	521.21	0.89	22281.44	1.25
SB.1. 2N	664.58	1.14	25017.96	1.40
SB.1. 1E	635.73	1.09	18317.37	1.03
SB.1. 2E	967.36	1.66	29538.92	1.65

D'après les résultats des essais effectués, toutes les poutres renforcées présentent des valeurs d'énergie d'absorption supérieures à celles de la poutre témoin (CB.1.U). Le gain de la capacité d'absorption varie de 9% à 67%. La poutre renforcée SB.1.1N a présenté une diminution de l'énergie d'absorption d'environ 11%. Cependant, les spécimens renforcés SB.1.2N, SB.1.1E et SB.1.2E ont présenté une augmentation de l'énergie d'absorption d'environ 14%, 9% et 66%, respectivement. L'augmentation de l'énergie d'absorption des poutres renforcées est due au retard dans la formation des fissures, de l'amélioration de la limite d'élasticité et de la charge ultime des poutres (figure 4.7). Cette étude révèle que la disposition dispersée des plats de PRFC contribue à

améliorer la capacité d'absorption d'énergie des poutres. L'augmentation est plus significative dans le cas des poutres renforcées par deux plats selon EBR (SB.1.2E) où l'absorption d'énergie de la poutre a augmenté de 66%. Alors, on peut noter que l'amélioration de l'énergie d'absorption est considérablement importante pour les spécimens renforcés par la technique EBR par rapport à ceux renforcés par NSM.

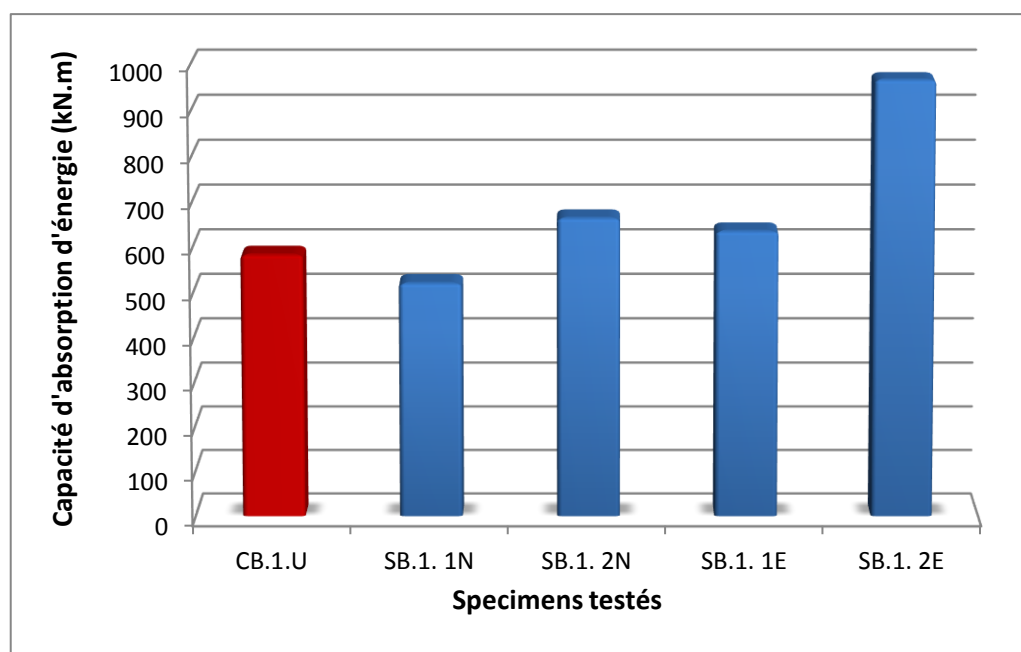


Figure 4. 7. Influence de la disposition des PRFC sur la capacité d'absorption d'énergie des poutres testées.

4.2.6 La rigidité des poutres

La rigidité est définie comme la capacité à résister à la flexion ou à la flèche des poutres soumises à une sollicitation, également appelée rigidité flexionnelle. Une rigidité élevée a une incidence sur les caractéristiques structurelles telles que le développement de fissures, la flèche, la ductilité et l'absorption d'énergie. La rigidité des poutres testées a été évaluée à partir des courbes charge-flèche à l'état de service (figure 4.2). La flèche de la poutre de contrôle d'environ 1.66 mm a été déterminée comme étant égale à la portée effective/480 et qui correspond à la limite de service [78, 80]. Les valeurs de rigidité à la limite de service de toutes les poutres testées sont présentées sur la figure 4.8 et le tableau 4.3.

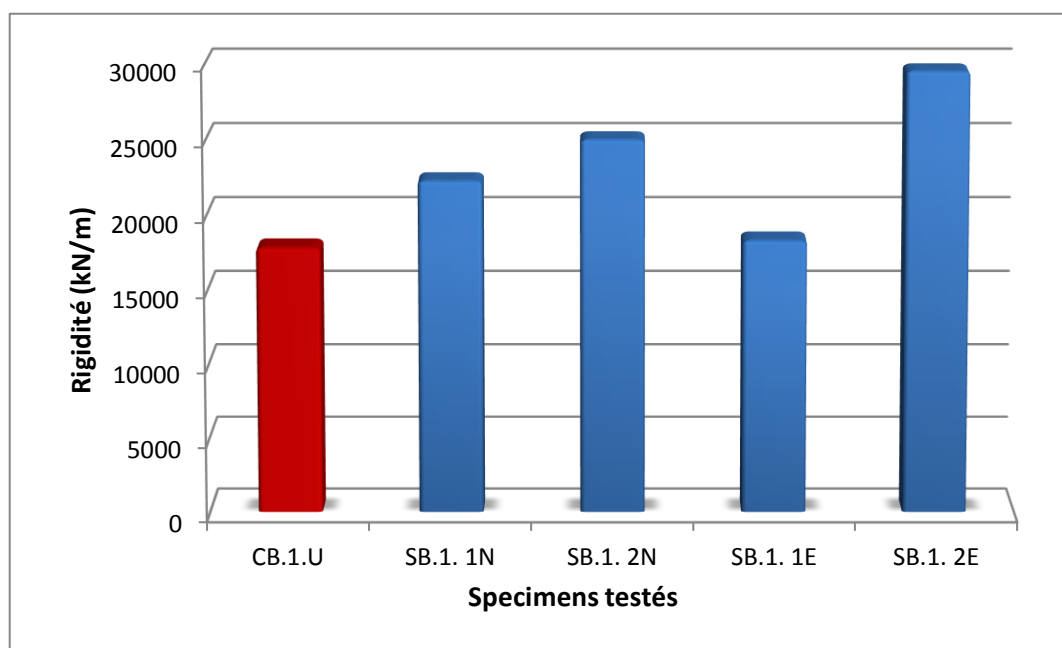


Figure 4. 8. Influence de la disposition des PRFC sur la rigidité des poutres testées.

Toutes les poutres renforcées ont présenté une augmentation de la rigidité par rapport à la poutre de contrôle (CB.1.U). Les résultats des tests effectués révèlent que la disposition dispersée des plats en PRFC, passant d'un plat à deux plats (SB.1.1E à SB.1.2E) a entraîné une augmentation de la rigidité de 3 % à 65 %, respectivement; soit un gain de 62%. De plus, la même configuration utilisée selon NSM (SB.1.1N et SB.1.2N) a également augmenté la rigidité par rapport à la poutre contrôle (CB.1.U) de 25% à 40%, respectivement; soit un gain de 15%. Il est clairement visible que la disposition des PRFC a plus d'effet dans la technique EBR que dans NSM.

Les essais ont montré aussi que la poutre renforcée par 1NSM présente une rigidité supérieure à celle de la poutre renforcée par 1EBR, tandis que la poutre renforcée par 2NSM présente une rigidité inférieure à celle de la poutre renforcée par 2EBR.

4.2.7 Courbes de réponse Charge-déformation

Les figures 4.9 et 4.10 illustrent les charges en fonction des déformations des armatures longitudinales, des déformations du béton comprimé et des déformations des plats en PRFC. Les déformations, comme expliqué au chapitre précédent, ont été mesurées à mi-portée des poutres.

Les résultats des tests ont montré que les déformations du béton pour l'ensemble des poutres renforcées par la technique NSM étaient supérieures à celles enregistrées pour la poutre témoin, l'augmentation était de 73% à 44% pour SB.1.1N et SB.1.2N, respectivement (figure 4.9a). Cependant, dans le cas des poutres renforcées par la technique EBR, les déformations du béton

étaient inférieures à celles de la poutre CB, la diminution était de l'ordre de 35% et 58% pour SB.1.1E et SB.1.2E, respectivement (figure 4.9b). Ceci indique que le béton est plus sollicité dans le cas du renforcement par NSM que dans le cas EBR. Pour les poutres renforcées par NSM, la disposition dispersée des plats en PRFC a entraîné une diminution des déformations du béton de 17% (par rapport à SB.1.1N).

Le renforcement des poutres par PRFC selon la technique NSM a induit une augmentation de 8% à 41%, par rapport à l'éprouvette CB de la déformation des aciers tendus à la rupture (spécimens SB.1.2N et SB.1.1N, respectivement). Alors le renforcement selon la technique EBR a donné une augmentation de 24% et 50% pour les poutres SB.1.1E et SB.1.2E, respectivement. À la rupture, la déformation des aciers pour la poutre SB.1.2N était inférieure à celle donnée par la poutre SB.1.2N.

Tableau 4. 4. Résultats des déformations du béton à la ruine pour différentes dispositions de renfort.

ID Spécimens	ϵ_c (‰)	Ratio par rapport à CB
CB.1.U	2.21	1.00
SB.1. 1N	3.82	1.73
SB.1. 2N	3.18	1.44
SB.1. 1E	1.42	-0.65
SB.1. 2E	0.94	-0.42

Tableau 4. 5. Résultats des déformations des armatures à la ruine pour différentes dispositions de renfort.

ID Spécimens	ϵ_s (‰)	Ratio par rapport à CB
CB.1.U	2.25	1.00
SB.1. 1N	3.17	1.41
SB.1. 2N	2.42	1.08
SB.1. 1E	2.78	1.24
SB.1. 2E	3.36	1.50

Au même niveau de charge, la déformation des barres d'acier tendues des poutres renforcées par 1NSM était supérieure à celle de la CB, tandis que, pour les poutres renforcées par 2NSM, la déformation des barres d'acier était inférieure à celle de la poutre CB (figure 4.9a).

Comme le montre la figure 4.9a (spécimens renforcés selon NSM), l'augmentation de la disposition des plats de PRFC diminue les déformations des barres d'acier en traction de 24%. Cependant, pour les poutres renforcées par la technique EBR, l'augmentation de la disposition des plats a, également augmenté les déformations de l'armature en acier de 21% (figure 4.9b).

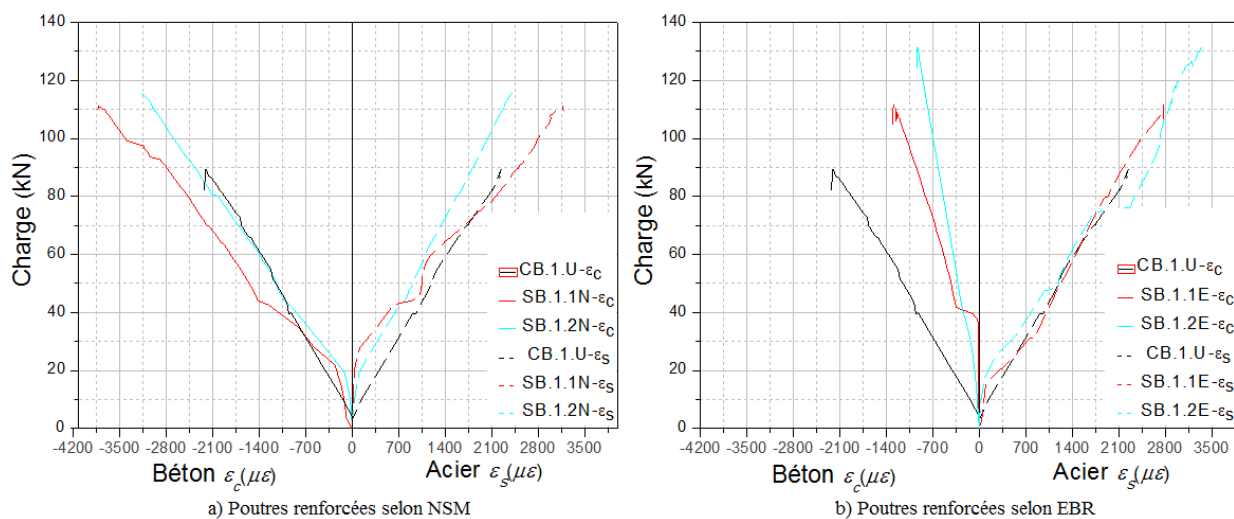


Figure 4.9. Déformation de l'armature tendue et du béton de comprimé à mi-portée des poutres testées.

La comparaison des déformations des barres d'acier tendues et des plats de PRFC en fonction des charges est présentée dans la figure 4.10. Dans le cas du renforcement par la technique NSM, les déformations des plats de PRFC pour l'éprouvette SB.1.1N étaient supérieures aux déformations des armatures d'acier. L'écart entre les déformations des deux matériaux (acier-PRFC) devient plus faible au-delà de la charge d'élasticité. De plus, pour la poutre renforcée par deux plats (SB.1.2N), les déformations du PRFC étaient également supérieures à celles de l'armature principale en acier, mais l'écart était plus important lorsque la poutre atteignait des charges élevées (figure 4.10a). Les PRFC prenaient plus d'avance en termes de déformation que les barres d'acier. Dans le cas de la disposition dispersée (deux bandes), les bandes de PRFC étaient plus déformées que les barres d'acier. L'écart de déformation entre PRFC et acier est plus important dans la poutre renforcée par deux plats que celui de la poutre avec un seul plat.

En dessous de la limite élastique, les déformations des bandes de PRFC de la poutre renforcée par 1EBR étaient presque similaires à celles des barres d'acier tendues. Au-delà de cette limite, l'écart entre les déformations des deux matériaux (acier et PRFC) augmente au fur et à mesure que la charge progresse. Cela signifie que, lorsque la poutre atteint des charges plus élevées, les bandes de PRFC subissent plus de sollicitation que les barres d'armature en acier.

Cependant, pour la poutre renforcée par deux bandes de PRFC (SB.1.2E), les déformations des bandes de PRFC et des barres d'aciers tendus étaient très proches avant la limite élastique, mais en atteignant des charges élevées, les déformations des deux matériaux présentent des courbes très similaires (figure 4.10b). On peut dire que l'adoption d'une disposition dispersée dans le renforcement avec la technique EBR permet une meilleure exploitation simultanée des deux matériaux (acier et PRFC).

Les résultats des tests effectués révèlent que dans la technique NSM, l'utilisation de deux plats PRFC permet de diminuer les déformations des plats de 16%. Alors que dans la technique EBR, la disposition en deux plats ne donne qu'une légère augmentation des déformations des PRFC, soit 0.5%.

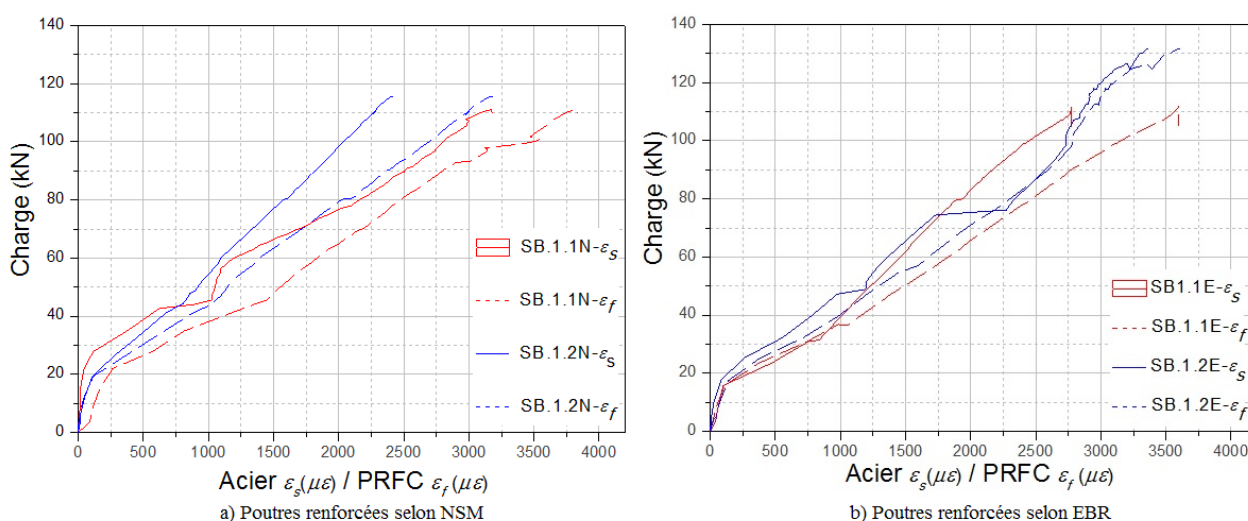


Figure 4. 10. Déformation de l'armature tendue et du PRFC à mi-portée des poutres testées.

Tableau 4. 6. Résultats des déformations des plats de PRFC à la ruine pour différentes dispositions de renfort.

ID Spécimens	ϵ_f (‰)	Ratio par rapport à SB
CB.1.U	/	/
SB.1. 1N	3.82	1.00
SB.1. 2N	3.18	0.83
SB.1. 1E	3.60	1.00
SB.1. 2E	3.62	1.055

**CONCLUSIONS,
RECOMMANDATIONS
ET PERSPECTIVES**

CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

1.1 Synthèse du travail expérimental effectué

Dans le présent travail de recherche, nous avons étudié le comportement en flexion de poutres en béton armé renforcées par des plats en PRFC. Les deux techniques de renforcement les plus connues dans le secteur du génie civil ont été examinées. Onze poutres rectangulaires en béton armé de dimensions (170 x 100 x 1000 mm³) ont été confectionnées et renforcées avec différentes configurations de PRFC. Les variables de la présente étude étaient la technique de renforcement (NSM et EBR), la disposition des PRFC et le taux d'armatures de traction. Les poutres testées ont été réparties en deux groupes. La première série de poutres concerne l'étude de l'effet de la disposition des PRFC. Cependant, la deuxième série concerne l'évaluation de l'effet du taux du ferrailage tendu des poutres sur l'efficacité et la performance du renfort en PRFC.

Les poutres étudiées ont été testées à la flexion simple à quatre points avec une presse hydraulique d'une capacité de 3000 kN.

Les résultats des essais du programme expérimental effectué ont permis de tirer des conclusions qui sont présentées dans la présente section.

1.2 Conclusions

1.2.1 Effet de la disposition des plats en PRFC

- Le renforcement des poutres en béton armé sollicitées en flexion au moyen de PRFC, quel que soit la technique utilisée (NSM ou EBR) améliore la capacité flexionnelle et la rigidité des poutres. Cependant, elle a un impact négatif sur la capacité de déformation et sur la ductilité des éléments structuraux renforcés.
- Contrairement à la charge ultime, le déplacement des poutres renforcées a connu une diminution variant de 6% à 19% par rapport à la poutre contrôle.
- L'augmentation de la disposition des bandes (nombre de plats) améliore de manière significative la capacité portante des poutres renforcées par PRFC. L'augmentation varie de 24% à 29% pour la technique NSM et de 29% à 47% pour l'EBR.
- L'effet de la disposition des bandes est plus important dans la technique EBR que dans la technique NSM. Le gain de charge est de 18% pour la technique EBR, alors qu'il ne dépasse pas 5% pour NSM.

- La charge de la première fissure a augmenté par le renforcement avec du PRFC, et elle s'est améliorée davantage lorsque la disposition des plats est dispersée. Ainsi, l'augmentation du nombre de bandes retarde la formation de la première fissure.
- Les poutres renforcées par PRFC présentaient un mode de ruine caractérisé par le développement des fissures diagonales critiques dues à la contrainte principale oblique. L'augmentation du nombre de plats empêche la formation des fissures de traction.
- L'utilisation de deux plats dans le renforcement par la technique NSM favorise la séparation de l'enrobage du béton suite à la fragilisation de la partie tendue du béton.
- La flèche de la poutre renforcée par deux plats en EBR a atteint des valeurs supérieures à celles de la poutre CB, bien que sa rigidité était supérieure à celle de tous les cas y compris la poutre contrôle.
- La ductilité des poutres renforcées est réduite suite au renforcement par rapport à CB. Par contre, l'augmentation du nombre de plats de PRFC permet d'augmenter et de rétablir la ductilité perdue ; elle a atteint des valeurs similaires à celles de la poutre CB dans le cas du renforcement selon EBR.
- L'utilisation de deux plats de renfort améliore considérablement l'absorption d'énergie des poutres, ceci est davantage observé dans le renforcement par la technique EBR que dans le cas de la technique NSM. L'augmentation est de l'ordre de 66% par rapport à CB et de 59% par rapport à SB.1.1E. L'amélioration de l'absorption d'énergie favorise la dissipation d'énergie et par conséquent la déformabilité des poutres s'améliore.
- L'augmentation du nombre de plats de PRFC permet d'améliorer la rigidité des poutres estimée à la limite de service; l'augmentation était plus marquée dans le cas du renforcement par la technique EBR. Elle a atteint 65%, comparativement à CB.
- La disposition dispersée a provoqué une augmentation de la rigidité mais pas au détriment de la ductilité, cas du renforcement selon la technique EBR où la perte de ductilité due à l'augmentation du nombre de PRFC est minimale.
- L'augmentation de la rigidité et la perte de ductilité des poutres renforcées sont beaucoup plus observées dans le cas du renforcement par la technique NSM que dans le cas EBR. En outre, la disposition en deux plats PRFC a permis d'augmenter légèrement la ductilité de la poutre renforcée par NSM.

- Le renforcement par la technique EBR entraîne des résultats intéressants, notamment dans le cas d'adoption d'une disposition dispersée. Son seul inconvénient est le phénomène de rupture prématuré par décollement des renforts et qui peut être corrigé par des solutions techniques efficaces, à savoir l'utilisation d'ancrage par tissus de PRFC dans les zones de décollement.
- On a constaté que, quelle que soit la disposition des renforts adoptée, la déformation du béton comprimé était plus importante dans les poutres renforcées selon la technique NSM que celles renforcées selon EBR. Ceci indique que le béton est plus sollicité dans le cas du renforcement par NSM. Le renforcement des poutres selon NSM fait augmenter la déformation du béton. Alors qu'elle diminue dans le cas EBR.
- Le renforcement des poutres en BA par composites fait augmenter la déformation des aciers tendus et cela a été constaté pour les deux techniques de renforcement.
- L'adoption de la disposition dispersée (deux plats) dans le renforcement par composites, a permis la réduction de la déformation du béton en compression pour les deux techniques (NSM et EBR). La régression était de l'ordre de 17% et 34 % pour EBR et NSM, respectivement.
- L'adoption de la disposition dispersée, a permis aussi une réduction de la déformation des aciers de 24% dans le cas du renforcement selon NSM. Mais dans le cas EBR, elle a induit une augmentation de la déformation des aciers de 21%.
- L'augmentation de la disposition des renforts a permis la réduction des déformations du composite de 17%. Alors que, dans le cas EBR la réduction était insignifiante.

1.2.2 Effet du taux d'armature

- Le taux d'armature présente une influence directe sur la charge de la première fissure et sur la capacité flexionnelle des poutres en BA renforcées.
- Dans le cas des poutres renforcées selon la technique EBR, l'augmentation du taux d'armature a induit une diminution de la charge ultime de l'ordre de 15% à 16.4%, comparativement à la poutre ayant un faible taux d'acier. Par contre, dans le cas des poutres renforcées selon NSM l'augmentation du taux d'armature a donné une faible diminution de la charge ultime de l'ordre de 6%, par rapport à la poutre avec le taux d'acier le plus faible.
- L'influence du taux d'armature tendue sur la capacité portante est moins importante dans le cas du renforcement selon la technique NSM que dans EBR.

- Le renforcement par matériaux composites, des poutres en BA ayant des taux d'acier tendu élevés n'a pas réellement un apport significatif pour la capacité flexionnelle.
- Le taux d'armature a une influence directe sur l'évolution des fissures et sur la nature des modes de ruine. Il a été constaté que dans le cas du renforcement selon NSM et pour un taux de 0.71%, les fissures de traction sont plus marquées et le mode de ruine, caractérisé par l'écoulement des aciers suivi par rupture du renfort, prédomine le comportement.
- Dans le cas du renforcement selon EBR et pour un taux d'acier de 0.71%, c'est les fissures diagonales critique qui sont les plus observées. Le mode de ruine prédominant est caractérisé par le décollement des plats après écoulement des aciers. Mais pour un taux supérieur (1.61%), les fissures diagonales critiques sont plus observées. Le mode de ruine par cisaillement prédomine la défaillance de la poutre mais il provoque une rotation excessive de la section transversale de la poutre.
- Quelle que soit la technique de renforcement utilisée, le renforcement des poutres en BA par composite et pour un taux d'acier de 0.71% diminue la ductilité de la poutre. La réduction était plus significative dans la technique NSM où elle a atteint 48%. Alors qu'elle n'a atteint que 12% dans le cas du renforcement selon la technique EBR.
- L'augmentation du taux d'acier tendu des poutres en BA non renforcées (CB) conduit à la diminution de la ductilité et de la déformabilité de 52% à 53%.
- Pour des faibles taux d'acier (soit 0.71%), le renforcement des poutres par PRFC conduit à la diminution de la ductilité. Ceci est observé pour les deux techniques (NSM et EBR).
- L'augmentation du taux d'armature des poutres renforcées selon les deux techniques a permis d'améliorer la ductilité par rapport aux poutres contrôles associées. Le gain obtenu était de 36% et 20% pour EBR et NSM, respectivement (pour un taux d'acier de 1.61%).
- En comparant les poutres renforcées selon EBR, l'augmentation du taux d'acier fait diminuer la ductilité, alors qu'elle conduit à l'augmentation de la déformabilité des poutres.
- Par contre, pour la technique NSM, l'augmentation du taux d'armature fait augmenter simultanément la ductilité et la déformabilité des poutres renforcées.
- L'augmentation du taux d'acier tendu des poutres renforcées selon la technique EBR a conduit à un accroissement de l'énergie d'absorption de 38% (entre les poutres SB.1.1E et SB.3.1E).
- Cependant, dans le cas du renforcement selon NSM l'augmentation du taux d'acier tendu diminue la capacité d'absorption d'énergie des poutres, mais elle reprend son augmentation pour des taux plus élevés (1.61%).

- L'augmentation du taux d'acier des poutres renforcées selon EBR a permis d'amplifier la rigidité jusqu'à 25% par rapport à la poutre SB.1.1E.

1.3 Recommandations et perspectives

Basés sur les résultats de la présente recherche, les points suivants sont suggérés pour des futurs travaux :

- Des études plus approfondies sur le comportement des poutres renforcées par PRFC et des techniques de renforcement sont encore requises, avec d'autres paramètres supplémentaires pouvant influencer le comportement des poutres renforcées.
- Élargir les travaux expérimentaux sur le comportement de poutres renforcées selon les deux techniques NSM et EBR en prenant en considération d'autres dispositions de plus de deux bandes.
- Elaboration d'abaques permettant aux ingénieurs calculateurs de comparer les dispositions de renforts possibles avec les différents paramètres d'analyse afin de leur permettre le choix de conception optimale lors du renforcement des structures.
- Simulation numérique et proposition de modèles permettant d'analyser le comportement des poutres renforcées par PRF.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] El-Hacha R, Rizkalla SH. Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Structural Journal*. 2004;101:717-26.
- [2] Barros JA, Dias SJ, Lima JL. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cement and Concrete Composites*. 2007;29:203-17.
- [3] Committee A. ACI 440.2 R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures. USA: Farmington Hills. 2.008
- [4] Barros JA, Fortes A. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*. 2005;27:471-80.
- [5] Sharaky IA, Torres L, Baena M, Miàs C. An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete. *Composite Structures*. 2013;99:350-65.
- [6] Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and building materials*. 2011;25:1906-15.
- [7] Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*. 2013;96:396-404.
- [8] FIB. Bond of reinforcement in concrete-State of the art report. 2000.
- [9] Confreze A. Développement d'une méthode d'analyse structurelle de bâtiments en béton armé: application aux poutres renforcées par des armatures PRF: Université Claude Bernard-Lyon I; 2015.
- [10] Malnati P. A hidden revolution: FRP rebar gains new strength. *Composites Technology*. 2011;17.
- [11] De Lorenzis L, Teng J-G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*. 2007;38:119-43.
- [12] Blaschko M. Bond behaviour of CFRP strips glued into slits. *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes)*: World Scientific; 2003 .p. 205-14.
- [13] De Lorenzis L. Anchorage length of near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods for concrete strengthening—Analytical modeling. *Structural Journal*. 2004;101:375-86.
- [14] Teng J-G, De Lorenzis L, Wang B, Li R, Wong T, Lam L. Debonding failures of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Journal of Composites for Construction*. 2006;10:92-105.
- [15] De Sena Cruz JM, Oliveira de Barros JA. Bond between near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer laminate strips and concrete. *Journal of Composites for Construction*. 2004;8:519-27.

- [16] Committee A. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440. 1R-15). Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute. 2015.
- [17] Ebnesajjad S, Landrock AH. Adhesives technology handbook: William Andrew; 2014.
- [18] Asplund S, Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement. 1949: Publisher.
- [19] Tavakkolizadeh M. Strengthening and repair of steel-concrete composite girders using CFRP laminates: The University of Arizona; 2001.
- [20] Attia Abdelgayed Abdelgawad Sharaky I. A study of the bond and flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with near surface mounted (NSM) FRP reinforcement. 2013.
- [21] Karimi MS, Nasserri M, Maroofi E. Using NSM Method in R/C Beams Strengthening by FRP Strips.1390 ; CIVILICA.
- [22] 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.
- [23] Chen JF, Teng J. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. Journal of structural engineering. 2001;127:784-91.
- [24] Ali MM, Oehlers D, Griffith M, Seracino R. Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints. Engineering Structures. 2008;30:1861-8.
- [25] Yuan H, Teng J, Seracino R, Wu Z, Yao J. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. Engineering Structures. 2004;26:553-65.
- [26] Schué F. FRP: strengthened RC structures. JG Teng, JF Chen, ST Smith and L Lam. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2001. pp 245, ISBN 0-471-48706-6. Polymer International. 2004;53:232-3.
- [27] Ebead U, Saeed H. Hybrid shear strengthening system for reinforced concrete beams: An experimental study. Engineering Structures. 2013;49:421-33.
- [28] Panda K, Bhattacharyya S, Barai S. Shear strengthening of RC T-beams with externally side bonded GFRP sheet. Journal of reinforced plastics and composites. 2011;30:1139-54.
- [29] Siddiqui NA. Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites. Latin American journal of solids and structures. 2009:343-62.
- [30] Parretti R, Nanni A. Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites: Design overview .Advances in structural engineering. 2004;7:469-83.
- [31] Täljsten B, Carolin A, Concrete beams strengthened with near surface mounted CFRP laminates. 2001: Publisher.

- [32] Täljsten B, Carolin A, Nordin H. Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. *Advances in structural engineering*. 2003;6:201-13.
- [33] Prota A, Parretti R, Nanni A. Upgrade of RC silos using near surface mounted FRP composites. *L'Industria Italiana del Cemento*. 2003;73:170-83.
- [34] Triantafillou T, Matthys S, Audenaert K, Balázs G, Blaschko M, Blontrock H, Czaderski C, David E, Di Tomasso A, Duckett W. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. *International Federation for Structural Concrete (fib)*; 2001.
- [35] Tang W, Balendran R, Nadeem A, Leung H. Flexural strengthening of reinforced lightweight polystyrene aggregate concrete beams with near-surface mounted GFRP bars. *Building and environment*. 2006;41:1381-93.
- [36] Liu I, Oehlers D, Seracino R. Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates. *Journal of Composites for Construction*. 2006;10:106-14.
- [37] Nordin H, Täljsten B. Concrete beams strengthened with pre-stressed near surface mounted reinforcement. *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. p. 1077-86.
- [38] De Lorenzis L, Nanni A, La Tegola A, Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. 2000: Publisher.
- [39] Novidis D, Pantazopoulou S, Beam tests of NSM-FRP laminates in concrete. 2007 : Publisher.
- [40] Kotynia R, Analysis of the flexural response of NSM FRP-strengthened concrete beams. 2007: Publisher.
- [41] Sharaky I, Reda R, Ghanem M, Seleem M, Sallam H. Experimental and numerical study of RC beams strengthened with bottom and side NSM GFRP bars having different end conditions. *Construction and Building materials*. 2017;149:882-903.
- [42] Sharaky I, Baena M, Barris C, Sallam H, Torres L. Effect of axial stiffness of NSM FRP reinforcement and concrete cover confinement on flexural behaviour of strengthened RC beams: Experimental and numerical study. *Engineering Structures*. 2018;173:987-1001.
- [43] El-Gamal S, Al-Nuaimi A, Al-Saidy A, Al-Lawati A. Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams. *Construction and building materials*. 2016;118:52-62.
- [44] Naser M, Hawileh R, Abdalla J. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*. 2019;198:109542.

- [45] Boukhezar M. Comportement et analyse d'éléments structuraux en béton armé renforcés par des matériaux composites PRF en flexion simple. 2014.
- [46] Croston T. Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion trois points réparée par matériaux composites (approche probabiliste): Paris, ENSAM; 2006.
- [47] Truong BT. Formulation, performances mécaniques, et applications, d'un matériau TRC pour le renforcement et la réparation de structures en béton/et béton armé: Approches expérimentale et numérique: Université de Lyon; 2016.
- [48] Ceroni F. Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials. *Construction and Building materials*. 2010;24:1547-59.
- [49] Hollaway L. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building materials*. 2010;24:2419-45.
- [50] Bilotta A, Ceroni F, Di Ludovico M, Nigro E, Pecce M, Manfredi G. Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members. *Journal of Composites for Construction*. 2011;15:757-72.
- [51] Al-Tamimi AK, Hawileh R, Abdalla J, Rasheed HA. Effects of ratio of CFRP plate length to shear span and end anchorage on flexural behavior of SCC RC beams. *Journal of Composites for Construction*. 2011;15:908-19.
- [52] Buyukozturk O, Gunes O, Karaca E. Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites. *Construction and Building materials*. 2004;18:9-19.
- [53] Okeil AM, Bingol Y, AlKhrdaji T. Analyzing model uncertainties for concrete beams flexurally strengthened with FRP laminates. 2007.
- [54] Hassan T, Rizkalla S. Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips. *Journal of Composites for Construction*. 2003;7:248-57.
- [55] Boukhezar M, Samai ML, Mesbah HA, Houari H. Flexural behaviour of reinforced low-strength concrete beams strengthened with CFRP plates. *Structural Engineering and Mechanics*. 2013;47:38-819.
- [56] Osman BH, Wu E, Ji B, Abdulhameed SS. Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) Beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2017;11:171-83.

- [57] Panjehpour M, Farzadnia N, Anwar MP, Ali AAA. FRP sheets contribution in common repair techniques of concrete structures with emphasis on concrete columns. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2011;2.
- [58] Jumaat MZ, Rahman M, Alam M, Rahman M. Premature failures in plate bonded strengthened RC beams with an emphasis on premature shear: A review. *International Journal of Physical Sciences*. 2011;6:156-68.
- [59] Jumaat MZ, Alam MA. Strengthening of RC beams using externally bonded plates and anchorages. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2009;3:2207-11.
- [60] Fib B. 10, Bond of reinforcement in concrete, state of the art Report prepared by Task Group Bond Models, former CEB, Task Group 5.2. CH-1015. 2000.
- [61] Hawileh R, Musto H, Abdalla J, Naser M. Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2019;173:106952.
- [62] Salama A, Hawileh R, Abdalla J. Performance of externally strengthened RC beams with side-bonded CFRP sheets. *Composite Structures*. 2019;212:281-90.
- [63] De Lorenzis L, Micelli F, La Tegola A, Passive and active near surface mounted FRP rods for flexural strengthening of RC beams. 2002: Publisher.
- [64] Ceroni F, Pecce M, Bilotta A, Nigro E. Bond behavior of FRP NSM systems in concrete elements. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43:99-109.
- [65] Douadi A, Merdas A, Sadowski L. The bond of near-surface mounted reinforcement to low-strength concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2019;33:1320-36.
- [66] Al Nuaimi N, Sohail MG, Hawileh RA, Abdalla JA, Douier K. Durability of reinforced concrete beams strengthened by galvanized steel mesh-epoxy systems under harsh environmental conditions. *Composite Structures*. 2020.249:112547;
- [67] Abdalla JA, Hraib FH, Hawileh RA, Mirghani AM. Experimental investigation of bond-slip behavior of aluminum plates adhesively bonded to concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2017;31:82-99.
- [68] Dreux G. Nouveau guide Du Béton-3e édition. COLLECTION UTI-ITBTP. 1981.
- [69] NF P18-560 N. Essai d'analyse granulométrique par tamisage. NF. 1990. French.
- [70] NF P18-406. Essai de compression [Compression test]. NF. 1981. French.
- [71] NF P18-408. N. Essai de traction [Tensile test]. NF. 1981. French.
- [72] NF EN 12390-2. Essais pour béton durci - Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes. NF. 3 Février 2003 , French.

-
- [73] Hollaway LC, Teng J-G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites: Elsevier; 2008.
- [74] Boutlikht M, Samai ML, Contribution à l'étude du comportement des poutres en béton armé et en charpente métallique (Caractérisation de sections en BA en utilisant les caractéristiques réelles et celles adoptées par deux codes: CP110 et BAEL). 2015: Publisher.
- [75] Kabashi N, Avdyli B, Krasniqi E, Këpuska A. Comparative approach to flexural behavior of reinforced beams with GFRP, CFRP, and steel bars. *Civil Engineering Journal*. 2020;6:50-9.
- [76] Bilotta A, Ceroni F, Nigro E, Pecce M. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures*. 2015;124:163-75.
- [77] Anil O, Bulut N, Ayhan M. Strain distribution between CFRP strip and concrete at strengthened RC beam against shear. *Structural engineering and mechanics: An international journal*. 2012;41:509-25.
- [78] Hosen M, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Sulong N, Darain K. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars for enhancing the flexural performance of RC beams using side-NSM technique. *Polymers*. 2017;9:180.
- [79] Akbarzadeh H, Maghsoudi A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials & Design*. 2010;31:1130-47.
- [80] Standard AA ,Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11). 2011: Publisher.

ANNEXES

Annexe A- Mise en œuvre du renfort

A.1 Préparation du support

Les surfaces des poutres doivent être propres et exemptes de tout type de souillures, laitance, huiles ou impuretés qui peuvent gêner l'adhérence, en particulier les zones en contact direct avec la résine. Cela est assuré par un ponçage des surfaces au moyen d'une meule électrique et de l'air comprimé. Les poutres doivent aussi être sèches et avoir plus de 28 jours d'âge (figure B.1).

A.2 Préparation du renfort

Découper les plats en PRFC selon les dimensions souhaitées, en veillant à ne pas altérer l'extrémité découpée (dans notre travail la découpe a été effectuée au moyen de découpeuse en LAZER de façon à ne pas altérer la continuité des fibres de carbone). Les plats de PRFC fournis en rouleaux par le fabricant, ne doivent en aucun cas être pliés afin qu'ils ne soient pas endommagés. Avant leur utilisation, ils doivent être nettoyés avec de l'acétone.

A.3 Préparation de la résine

La résine utilisée est du type Sikadur-330. Ce type de résine est une colle spécialement formulée pour le collage des matériaux composites aux éléments de béton. Elle est fournie sous forme de kit composé de deux composants (A : résine et B : durcisseur). La préparation de la pâte de résine de collage est effectuée de la façon suivante :

- Chaque composant est séparément malaxé manuellement dans son emballage dans le but d'assurer l'homogénéisation du produit,
- Verser dans un récipient la quantité nécessaire du composant B dans le composant A (respecter le rapport de mélange fourni par le fabricant, 4B/A),
- Malaxer le mélange avec un malaxeur équipé d'une hélice pendant environ 3 minutes, jusqu'à obtention d'une consistance homogène et d'une teinte uniforme de couleur grise claire.
- Effectuer un deuxième malaxage avec une faible vitesse maximale de 300 tours/minute) pendant une minute pour limiter l'entraînement d'air dans la pâte de résine.
- Opter pour des petites quantités de résine puisque une fois mélangées la durée d'utilisation est très limitée.



Figure A. 1. Préparation de la résine époxy.

A.4. Etape d'application du renforcement

Pour procéder à l'application du renforcement en PRFC aux poutres, les étapes suivantes sont à suivre :

Etape 01 :

Après nettoyage de la surface de l'élément à renforcer, appliquer une couche mince de résine époxy sur la partie recevant le renfort. Ceci est pour le renforcement selon la technique EBR. Dans le cas du renforcement selon la technique NSM, remplir à moitié les rainures par la résine.

Etape 02 :

Appliquer une couche primaire de résine d'épaisseur de 1mm sur la surface du renfort en PRFC qui sera en contact direct avec le support. La surface doit être, préalablement nettoyée avec de l'acétone. Ensuite placer le plat sur la couche primaire de résine, en veillant à l'orientation correcte des fibres. Enfin appliquer une pression pour assurer que toutes les surfaces seront plaquées et éliminer les éventuelles bulles d'air.

Pour la technique NSM, enfoncer le plat dans la résine et appliquer une légère pression pour s'assurer qu'elle soit totalement immergée.

Etape 03 :

Ajouter une seconde couche de résine jusqu'à ce que toute la rainure soit remplie. Puis araser pour enlever l'excès d'époxy (Cas du renforcement selon NSM). Enfin laisser durcir durant au moins sept jours avant la réalisation des tests.

L'ajout de la 2ème couche de résine peut se faire au maximum une heure après la pose de la 1^{ère} couche (à 20°C). Si la température ambiante est différente de 20°C, on ne peut procéder à l'ajout de la couche supplémentaire qu'après 12 heures de temps.

NB : Les étapes susmentionnées ont été effectuées pour les poutres de tests au laboratoire. Dans la pratique d'autres recommandations du fabricant relatives à l'application des composites sont à prendre en considération, éventuellement le cas de traitement de surface des éléments renforcés pour recevoir les enduits et les finitions nécessaires.



Figure A. 2. Préparation de surface, traçage et application de la résine pour le renforcement selon EBR.



Figure A. 3. Préparation de surface, traçage et application de la résine pour le renforcement selon NSM.

Annexe B- Fixation des jauges de déformation

B.1. Jauges sur le béton

Les étapes à suivre pour fixer la jauge de déformation sur le béton sont :

- a) Au moyen d'une ponceuse, poncer et nettoyer la surface du béton recevant la jauge.
- b) Appliquer une couche primaire de la résine sur laquelle sera collée la jauge. Le but est d'éliminer toutes imperfections géométriques pouvant gêner la planéité de la jauge.
- c) Poncer la surface de la couche primaire de la résine avec du papier abrasif pour éliminer les bosses et les imperfections, puis nettoyer par un dissolvant et éliminer toutes les impuretés possibles.
- d) Prendre la jauge et les borniers au moyen d'un ruban adhésif.
- e) Avant la pose de la jauge, nettoyer par un dissolvant la surface de la résine et la surface de la jauge à fixer. Puis appliquer une couche d'agent neutralisant et catalytique (flacons rouge et bleu) sur la résine et la jauge ; le but est d'éliminer les charges électriques pouvant affecter les mesures. Ensuite, poser une goutte de colle (Loctite 490) sur le support puis étaler là en appuyant sur la jauge par le doigt et en faisant des mouvements de va et vient sur la jauge pour assurer la couverture de toute la surface par la colle.
- f) Fixer les fils électriques aux bornes de la jauge par soudure en étain.
- g) Couvrir la jauge par un film protecteur jusqu'au jour de l'essai.



Figure B. 1 . Kits d'installation des jauges de déformation.



Figure B. 2. Fixation de la jauge sur le béton.

B.2. Jauges sur le renfort en composite

Les étapes à suivre pour fixer la jauge de déformations sur le composite sont :

- a) Nettoyer la surface du renfort composite par un dissolvant et éliminer toute impureté possible.
- b) Faire passer une couche d'agent neutralisant et catalytique (flacons rouge et bleu) sur le plat de carbone pour éliminer toute décharge électrique pouvant affecter les résultats de mesures.
- c) Prendre la jauge et les borniers au moyen d'un ruban adhésif.
- d) Avant la pose de la jauge, nettoyer par un dissolvant la surface du composite et la surface de la jauge à fixer. Puis appliquer une couche d'agent neutralisant et catalytique sur les deux surfaces ; le but est d'éliminer les décharges électriques pouvant affecter les mesures. Ensuite, poser une goutte de colle cyano-acrylate (Loctite 490) sur le support puis l'étaler en appuyant sur la jauge par le doigt et en faisant des mouvements de va et vient sur la jauge pour assurer la couverture de toute la surface par la colle.
- e) Nettoyer les bornes du bornier avec le stylo de gratteur de colle.
- f) Fixer les fils électriques aux bornes de la jauge par soudure en étain.
- g) Couvrir la jauge par un film protecteur pour éviter le contact de la 2^{ème} face de la jauge avec le béton.



Figure B. 3. Nettoyage de la surface du renfort par les produits solvants, catalytiques et neutralisant.

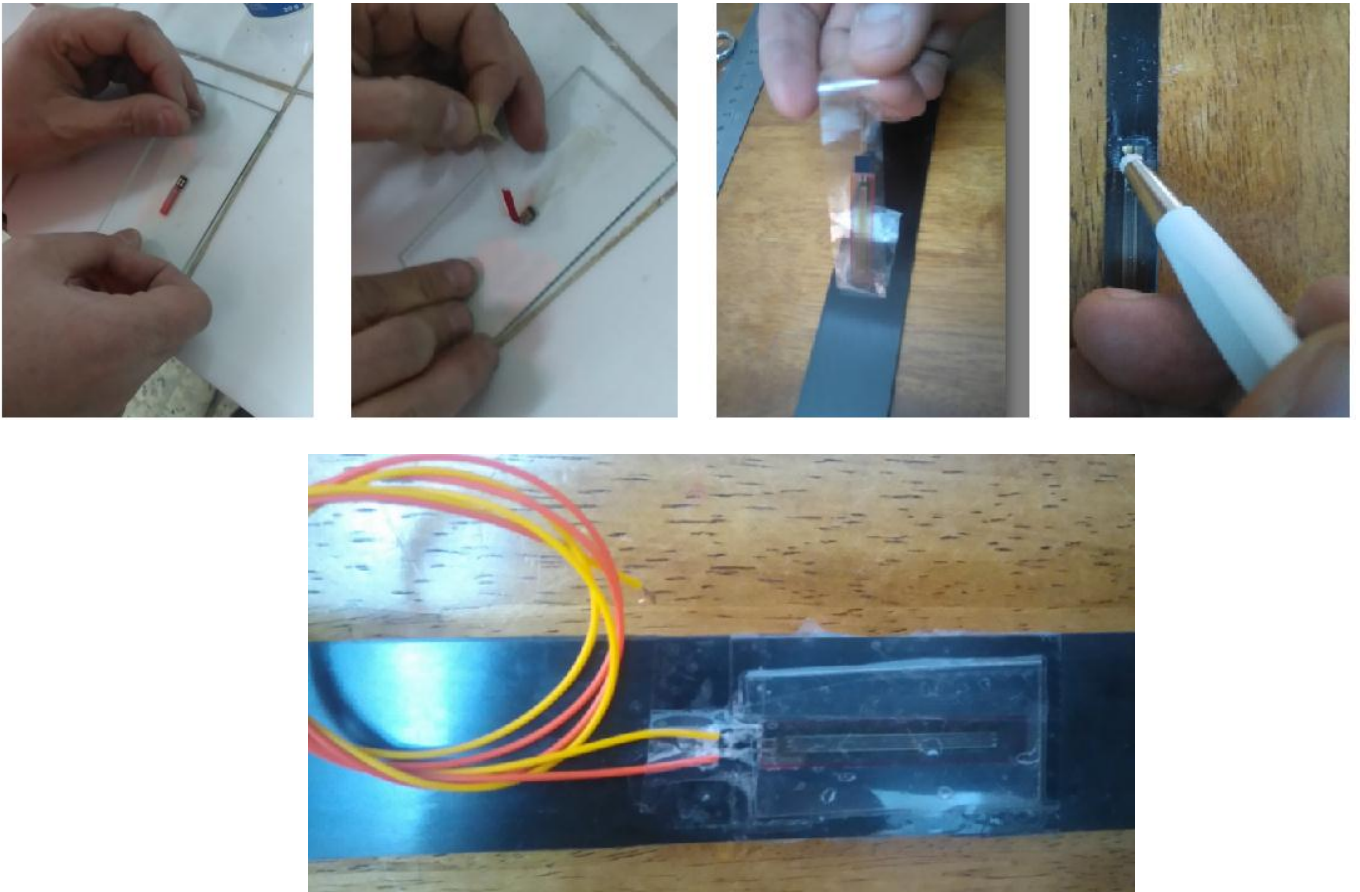


Figure B. 4. Manipulations pour la prise et la fixation de la jauge de déformation sur le PRFC.

B.3. Jauges sur les barres d'acier

Les étapes à suivre pour fixer la jauge de déformation sur le ferrailage sont :

- a) Faire un ponçage de la surface de l'acier au moyen d'une ponceuse à disque et éliminer le tréfilage.
- b) Nettoyer la surface du renfort composite par un dissolvant et éliminer toute impureté possible.
- c) Faire passer une couche d'agent neutralisant et catalytique (flacons rouge et bleu) sur le plat de carbone pour éliminer toute décharge électrique pouvant affecter les résultats de mesures.
- d) Prendre la jauge et les borniers au moyen d'un ruban adhésif.
- e) Avant la pose de la jauge, nettoyer par un dissolvant la surface de l'acier et la surface de la jauge à fixer. Puis appliquer une couche d'agent neutralisant et catalytique sur les deux surfaces ; le but est d'éliminer les décharges électriques pouvant affecter les mesures. Ensuite, poser une goutte de colle cyano-acrylate (Loctite 490) sur le support puis l'étaler en appuyant sur la jauge par le doigt et en faisant des mouvements de va et vient sur la jauge pour assurer la couverture de toute la surface par la colle.
- f) Nettoyer les bornes du bornier avec le stylo de gratteur de colle.
- g) Fixer les fils électriques aux bornes de la jauge par soudure en étain.
- h) Couvrir la jauge par un film protecteur pour éviter le contact de la 2^{ème} face de la jauge avec le béton.

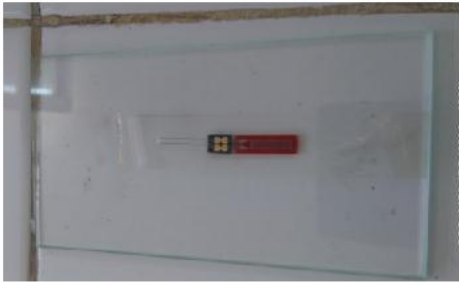


Figure B. 5 Manipulations pour la prise et la fixation de la jauge de déformation sur le ferrailage

