

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

UNIVERSITE L'ARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI

Faculté des Sciences et Sciences Appliquées

Département de Génie Civil



Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat (LMD) en Génie Civil

Par

BOULEBD Adel

Thème

ÉTUDE DE RENFORCEMENT DES POUTRES DE BETON

ARME PAR MATERIAUX COMPOSITES

Membres du Jury de Soutenance :

Président :	Pr. Boudaoud Zein Eddine	Université Larbi Ben M'hidi Oum el bouaghi
Examineur :	Pr. Beroual Ahmed	Université Constantine 1
Examineur :	Dr. Boutagouga Djamel, M.C.A	Université Larbi Tebessi, Tebessa
Examineur :	Dr. Merdas Abdelghani, M.C.A	Université Ferhat Abass, Sétif
Rapporteur :	Dr. Ferhoune Noureddine, M.C.A	Université Larbi Ben M'hidi Oum el bouaghi
Co- Rapporteur :	Dr. Boukhezar Mohcene, M.C.B	Université Larbi Ben M'hidi Oum el bouaghi

Février 2021

REMERCIEMENT

Tout d'abord, je remercie DIEU, le tout-puissant, de m'avoir permis la réalisation de ce travail.

Je remercie également mon encadreur DR. FARHOUNE NOUREDDINE et mon Co-Encadreur DR. MOHCEN BOUKHEZAR ainsi que PR. BOUDAOUZ ZEIN EDDINE et DR. HABIB ABDELHAK MESBAH pour leurs aides et leurs orientations efficaces et positives ainsi que leur indéfectible soutien tout au long de ce projet mené sous leur conduite éclairée.

Je tiens aussi à remercier ma mère et mon père et ma femme pour leurs sacrifices me consternant, mes enfants (ANAS et RANIM) et mes frères pour leurs soutiens, sans oublier mes collègues doctorant d'Oum El boughi et de Sétif.

Je remercie les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer le présent travail.

RESUME

Ces dernières années, le renforcement des structures en béton armé en utilisant les matériaux composites a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs. Ceci a cause au besoin croissant de renforcement, réparations et réhabilitations. Ces matériaux représentent une alternative captivante aux procédés de renforcement et de réparation conventionnels. En effet, cette activité de recherche a permis de développer plusieurs techniques de renforcement afin de mieux exploiter l'avantage de ces matériaux.

Lors de cette recherche une étude numérique et analytique portant sur le comportement des poutres en béton armé renforcée par matériaux composites soumises à la flexion est présentée. Les trois techniques de renforcement EBR, NSM et SNSM ont été utilisées. L'objectif de cette étude en premier lieu est la mise en place d'un modèle analytique et un autre numérique moyennant le logiciel ABAQUS, dans le but de prédire le comportement des poutres étudiées. En deuxième lieu, c'est de comparer le comportement des trois techniques en étudiant leurs capacités flexionnelles leurs ductilités ainsi que leurs modes de ruptures.

A la lumière des résultats obtenus, les deux modèles ont montré qu'il est capable de prédire avec une bonne cohérence le comportement des poutres renforcées selon les trois techniques comparativement à la poutre témoin. Par la suite, les résultats ont été comparés aux travaux expérimentaux issues de la littérature. En outre, et en termes de capacité flexionnelle, une augmentation d'environ 170 % a été constatée, aussi qu'une diminution en termes de ductilité d'environ 40 à 47 % pour l'ensemble des poutres renforcées selon EBR et NSM. Contrairement aux poutres renforcées selon la technique SNSM où la ductilité est mieux conservée avec uniquement 27 % de perte. Par ailleurs, l'étude paramétrique a mis l'accent sur l'influence positif de l'augmentation de la résistance du béton, du taux de renforcement et de la longueur du renfort en matière de capacité flexionnelle. Par la même, il a été observé que les fibres de verre ont permis d'éviter un mode de rupture brusque pour l'NSM.

Enfin, des modes de rupture brusque et brutales ont été enregistrées pour les poutres renforcées par les techniques EBR et NSM. Tandis que pour les poutres renforcées par la technique SNSM une rupture flexionnelle (écrasement du béton comprimé et plastification des armatures) est constatée.

Mots-clés : Renforcement, Flexion, mode de rupture, EBR, NSM, SNSM, ABAQUS.

ملخص

في السنوات الأخيرة، أثار تقوية الهياكل الخرسانية المسلحة باستخدام المواد المركبة اهتمام العديد من الباحثين. هذا بسبب الحاجة المتزايدة لتقوية والإصلاحات وإعادة التأهيل. أثبتت هذه المادة أنها بديل جيد لعمليات التقوية والإصلاح التقليدية. في الواقع، مكن هذا النشاط الباحثين من تطوير العديد من تقنيات التقوية من أجل استغلال أفضل لمزايا هذه المادة.

تم خلال هذا البحث عرض دراسة رقمية وتحليلية تتعلق بسلوك الكمرات الخرسانية المسلحة المعرضة للانحناء والتي تم تقويتها بالمواد المركبة. باستخدام تقنيات التقوية الثلاثة EBR و NSM و SNSM. الهدف من هذه الدراسة في المقام الأول هو إنشاء نموذج تحليلي ونموذج رقمي باستخدام برنامج ABAQUS للتنبؤ بسلوك الروافد المدروسة. ثانيًا، هو مقارنة سلوك التقنيات الثلاث من خلال دراسة قدرتها على الانحناء وليونتها بالإضافة إلى أنماط انهيارها.

في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها، أظهر النموذجان أنهما قادران على التنبؤ الجيد بسلوك الروافد المدروسة وفقًا للتقنيات الثلاثة مقارنة بروافد التحكم. بعد ذلك، تمت مقارنة النتائج بالأعمال التجريبية المأخوذة من الدراسات السابقة. بالإضافة إلى ذلك، وفيما يتعلق بمقاومة الانحناء، لوحظ زيادة بنسبة 170٪ تقريبًا، كما لوحظ انخفاض في ليونة ما يقرب من 40 إلى 47٪ لجميع العينات التي تم تقويتها وفقًا لـ EBR و NSM على عكس العينات التي تم تقويتها باستخدام تقنية SNSM حيث يتم الحفاظ على الليونة بشكل أفضل مع خسارة 27٪ فقط. بالإضافة إلى ذلك، أكدت الدراسة البارامترية على التأثير الإيجابي لزيادة قوة الخرسانة، ونسبة وطول PRFC على قدرة الانحناء. في الوقت نفسه، لوحظ أن الألياف الزجاجية جعلت من الممكن تجنب الانهيار المفاجئ باستعمال تقنية .

NSM

أخيرًا، تم تسجيل أنماط الانهيار المفاجئ الروافد التي تم تقويتها بتقنيات EBR و NSM بينما بالنسبة الروافد التي تم تقويتها بتقنية SNSM، لوحظ حدوث انهيار مرغوب فيه

الكلمات الرئيسية : SNSM، NSM، EBR، التقوية، الانحناء، أنماط الانهيار.

ABSTRACT

In recent years the reinforcement of reinforced concrete structures using composite materials has aroused the interest of several researchers. This is due to the increasing need for reinforcement, repairs and rehabilitation. This material has emerged as an exciting alternative to conventional reinforcement and repair processes. Indeed, this research activity has allowed the development of several reinforcement techniques to better exploit the advantage of this material.

During this research, a numerical and analytical study of the behaviour of composite reinforced concrete beams subjected to bending is presented. The three reinforcement techniques EBR, NSM and SNSM were used. The objective of this study is first to set up an analytical and a numerical model using the ABAQUS software in order to predict the behaviour of the studied beams. Secondly, it is to compare the behaviour of the three techniques by studying their flexural capacities and ductility's as well as their failure modes.

In the light of the results obtained, the two models have shown that it is able to predict with a good consistency the behaviour of the reinforced beams according to the three techniques in comparison to the control beam. Subsequently, the results were compared with experimental literature. In addition, and in terms of flexural capacity, an increase of about 170% was found, as well as a decrease in ductility of about 40-47% for all reinforced beams according to RBE and NSM. In contrast to beams reinforced according to SNSM, where the ductility is better preserved with only 27% loss. In addition, the parametric study emphasized the positive influence of the increase in concrete strength, reinforcement ratio and the languor in terms of flexural capacity. By the same token, it was observed that glass fibers avoided a mode of abrupt failure in SNSM.

Finally, abrupt and abrupt failure modes were recorded for beams reinforced by RBE and NSM techniques. While for beams reinforced by the SNSM technique a bending failure (crushing of the compressed concrete and plasticization of the reinforcements) was observed.

Key words: Strengthening, bonding, failure mode, RBE, NSM, SNSM.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I. CHAPITRE 1 : Généralités Sur Les Méthodes De Renforcement Et Les Matériaux Composites	
1. Introduction	5
2. Les causes de renforcement des structures.....	5
3. Méthodes De Réparation Et Renforcement.....	6
3.1. Renforcement par chemisage en béton.....	6
3.2. Renforcement par projection du béton.....	7
3.2.1. Procédé par voie sèche	7
3.2.2. Procédé par voie humide.....	8
3.3. Renforcement par chemises en acier.....	9
3.4. Renforcement à l'aide des tôles collées.....	10
3.5. Renforcement à l'aide des matériaux composites « PRF » polymère renforcé de fibres.....	11
3.5.1. Renforcement à l'aide des matériaux composites collé (Technique EBR).....	11
3.5.2. Technique de renforcement NSM (Near Surface Mounted).....	12
3.5.3. Technique de renforcement SNSM (Side Near Surface Mounted).....	13
4. Matériaux Composites.....	14
4.1. Définition des matériaux composites.....	14
4.2. Les matériaux composites en « PRF ».....	14
4.3. Les fibres.....	16
4.1.1. Fibres de carbone	16
4.1.2. Fibres de verre.....	16
4.1.3. Fibres d'aramide.....	17
4.4. Matrice.....	18
5. Méthodes de fabrication des « PRFs ».....	19
5.1. Pultrusion.....	19
5.2. L'enroulement filamentaire.....	20
5.3. Le tressage.....	20
6. L'adhésif.....	21
7. Conclusion.....	22
II. CHAPITRE 2 : Etude Bibliographique Sur Les Techniques De Renforcement	
1. Introduction.....	24
2. Activité de recherche à travers le monde sur le renforcement par PRF.....	24
3. Technique EBR (externally bonded reinforced)	25
3.1. Méthode de mise en œuvre de la technique EBR.....	26
3.2. Modes de rupture relatifs à la technique EBR.....	26
3.2.1. Fissure intermédiaire de délaminage (intermédiaire crack : IC)	28
3.2.2. Fissure critique diagonale (Critical diagonal crack : CDC)	29
3.3. Influence du nombre des couches de PRFC et leurs longueurs sur les poutres en béton armé renforcées en flexion	29
3.4. L'effet de la corrosion de l'acier sur la réponse des poutres en béton renforcées par le PRFC selon les techniques EBR et NSM.....	31
4. Technique NSM (Near surface mounted)	32
4.1. Méthode de mise en œuvre de la technique NSM.....	33
4.2. Modes de rupture relatifs à la technique NSM.....	34
4.2.1. Mécanisme de rupture par séparation de l'enrobage	34
4.2.1. Mécanisme de rupture par détachement du renfort.....	34
4.3. Influence de la taille et le type du renfort en PRFC ainsi que l'épaisseur de l'enrobage en béton sur les poutres renforcées	36
4.4. Effet du taux et de la longueur du renforcement sur le comportement en flexion des poutres en béton armé	36

4.5. Effet de la rigidité du renfort en PRF du NSM et du confinement de l'enrobage du béton sur le comportement en flexion des poutres renforcées	39
4.6. Effet de la forme des extrémités du renfort sur les poutres renforcées	39
5. La combinaison entre la technique EBR et NSM appelé (EBROG/CEBNSM)	40
6. Technique SNSM (Side near surface mounted)	41
6.1. Influence du type et du taux de renforcement.....	41
6.2. Comportement des poutres en béton armés réparées par la technique SNSM.....	43
6.3. Influence du nombre et de l'orientation des stratifier sur les poutres en béton armés renforcées	44
6.4. Effet de la longueur et la position des tiges en PRFC ainsi que le type de matériaux de remplissage sur les poutres renforcées	45
7. Conclusion.....	46
III. CHAPITRE 3 : Modélisation analytique	
1. Introduction.....	49
2. Les différents codes de calcul des sections renforcées par matériaux composites.....	49
2.1. American Concrete Institute (ACI440.2R.08).....	49
2.2. NCHRP Rpt 655-10 (USA).....	50
2.3. ISIS CDM No.4-01 (Canada).....	50
2.4. Fédération internationale du Béton (FIB2001)(Mohcène, 2017).....	50
2.5. JSCE-01 (Japan).....	51
2.6. CNR-DT 200/04 (Italie)	51
2.7. CECS 146 :2003 (China).....	51
2.8. Les modes de ruptures traités par les différents codes	51
3. Modèle analytique proposé.....	52
3.1. Comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion.....	52
3.2. Lois de comportement des matériaux utilisés.....	53
3.2.1. Béton.....	53
3.2.2. L'acier	54
3.2.2. Le renfort en PRF.....	55
3.3. Analyse d'une section non renforcée.....	55
3.3.1. Section non fissurée $0 < M < MCR$	55
3.3.2. Section fissurée $MCR < M < MY$	56
3.3.3. Section plastifier $MY < M < MU$	57
3.4. Analyse d'une section renforcée.....	59
3.4.1. Section non fissurée $0 < M < MCR$	59
3.4.2. Section fissurée $MCR < M < MY$	59
3.4.3. Section plastifier $MY < M < MU$	59
3.5. Exemple de calcul.....	60
3.6. Résultats et discussions.....	60
3.6.1. Poutre non renforcée.....	61
3.6.2. Poutre renforcée selon la technique SNSM.....	61
3.6.3. Poutre renforcée selon la technique NSM.....	62
3.6.4. Poutre renforcée selon la technique EBR.....	62
3.6.5. Comparaison entre les poutres.....	63
4. Conclusion.....	64

IV.	CHAPITRE 4 : Modélisation Numérique	
1.	Introduction.....	66
2.	Objectif de l'étude	66
3.	Logiciel de calcul et type d'analyse utilisé.....	66
4.	Configuration des poutres modélisées	67
5.	Lois de comportement et caractéristique des matériaux	68
	5.1 le béton.....	69
	5.1.1. Comportement mécanique du CDP.....	69
	5.1.2. Paramètres utilisés	70
	5.2 l'acier.....	71
	5.3 le renfort en PRFC.....	71
	5.4 L'interface PRFC- Résine-Béton.....	72
6.	Maillage.....	73
7.	Résultats et discussions	74
	7.1. Capacité flexionnelle des poutres modélisées.....	74
	7.2. Influence du taux de renforcement sur les poutres modélisées.....	77
	7.3. Ductilité des poutres modélisées.....	80
	7.4. Déformations des matériaux.....	80
	7.5. Evolution de l'ouverture de la première fissure.....	81
	7.6. Modes de rupture des poutres modélisées.....	82
8.	Etude paramétrique	84
	8.1. Effet de la résistance caractéristique du béton.....	85
	8.2. Effet de la longueur du renfort en PRFC.....	86
	8.3. Effet du taux de renforcement avec des tiges de diamètre qui varie entre 8mm, 10 et 12mm. ...	88
	8.4. Effet de la nature du renfort entre aramide, verre et carbone.....	90
9.	Validation des résultats.....	91
10.	Conclusion.....	93
V.	CHAPITRE 5 : INFLUENCE DU PERIMETRE DE LIAISON ENTRE LE BETON ET LE RENFORT	
1.	Introduction.....	96
2.	Configuration des poutres modélisées	96
3.	Lois de comportement et caractéristique des matériaux	98
	3.1 Le béton.....	98
	3.2 L'acier.....	98
	3.3 Le renfort en PRFC.....	98
4.	Maillage.....	99
5.	Résultats et discussions	99
	5.1. Capacité flexionnelle des poutres modélisées.....	100
	5.2. Influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort.....	102
	5.3. Modes de rupture des poutres modélisées.....	102
	5.4. Validation des résultats.....	105
6.	Conclusion	105
	Conclusion Générale.....	106
	References bibliographiques	109

LISTES DES TABLEAUX ET DES FIGURES

1. Liste des figures

Figure I-1 : Chemisage en béton armé (A) d'un poteau,(B) d'une poutre	6
Figure I-2 : Projection par voie sèche.....	8
Figure I-3 : Projection par voie humide.....	8
Figure I-4 : Renforcement avec des chemises en acier (A) poteaux circulaires et rectangulaires (B) poutre ..	9
Figure I-5 : Tôles collées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet.....	10
Figure I-6 : Technique de renforcement EBR.	12
Figure I-7 : Plusieurs usages de la technique de renforcement EBR.....	12
Figure I-8 : Technique de renforcement NSM.....	13
Figure I-9 : Technique de renforcement NSM.	14
Figure I-10 : Matériaux composites en polymère renforcé de fibres « PRF ».	15
Figure I-12 : Les trois types des fibres pour « PRF ».	17
Figure I-13 : Méthodes de fabrication par pultrusion.	19
Figure I-14 : Méthodes de fabrication par enroulement filamentaire.	20
Figure I-15 : Méthodes de fabrication par tressage.	21
Figure II-01 : Procédure d'application des PRFC selon la technique EBR.	28
Figure II-02 : Résultat de l'étude de (Anju Antony et al.2019).	30
Figure II-03 : Détail de l'étude de (Triantafyllou et al., 2017).	31
Figure II-04 : Courbes de charge-déflexion des poutres testées selon le modèle expérimental et le modèle FE de l'étude de (Triantafyllou et al., 2017).	32
Figure II-05 : Procédure d'application des PRFC selon la technique NSM.	33
Figure II-06 : Les modes de rupture de la technique NSM.	34
Figure II-07 : Configuration des spécimens de l'étude de (Abdelghani, 2012 et al).	36
Figure II-08 : Configuration des spécimens de l'étude de (Hesham EL-Emam et al., 2020).	37
Figure II-09 : Les résultats de l'étude de (Hesham EL-Emam et al., 2020).	38
Figure II-10 : La configuration des poutres de l'étude de (Reda et al., 2016).	40
Figure II-11 : Configuration des poutres testés lors de l'étude de (Mostofinejad and Moghaddas, 2014).	40
Figure II-12 : Technique de renforcement SNSM.	41
Figure II-13 : Configuration des poutres testes lors de l'étude de (Hosen et al., 2015).....	42
Figure II-14 : Résultats de l'étude de (Hosen et al., 2015).....	43
Figure II-15 : Résultats de l'étude de (Shukri et al., 2016).....	43
Figure II-16 : Configuration des poutres testées par (Hosen et al., 2018).....	44
Figure II-17 : Résultats de l'étude de (Hosen et al., 2018).....	44
Figure II-18 : Configuration des poutres testées par (Abdallah et al., 2020).....	45
Figure II-19 : Résultats de l'étude de (Abdallah et al., 2020).....	46
Figure III-01 : Comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion.....	54
Figure III-02 : Influence du renforcement sur le comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion.....	54
Figure III-03 : Loi de comportement du béton.....	54
Figure III-04 : Loi de comportement de l'acier.....	54
Figure III-05 : Loi de comportement du renfort en PRF.....	55
Figure III-06 : Section en béton arme avant fissuration.....	55
Figure III-07 : Section en béton arme à l'état ultime.....	57

Figure III-08 : Section en béton renforcée selon les techniques de renforcement EBR, NSM et SNSM.....	59
Figure III-09 : Les résultats analytiques de la poutre de référence.	61
Figure III-10 : Les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique SNSM.....	62
Figure III-11 : Les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique NSM.....	63
Figure III-12 : Les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique EBR.....	63
Figure III-13 : Comparaison entre les poutres renforcée et la poutre de référence.....	64
Figure IV-01 : Détail des poutres testées.....	68
Figure IV-02 : Réponse du béton à une charge uni axiale en traction (A) et en compression (B).....	69
Figure IV-03 : Définition des surfaces d'écoulement et potentielle pour le modèle CDP (Ben Ftima, 2013): (A) Forme de la surface d'écoulement sur un plan déviatorique; (B) Forme de la surface potentielle sur un plan méridien.....	71
Figure IV-04 : Les lois de comportement. (A) L'acier, (B) le renforcement et (C) l'interface PRFC- résine-béton.....	73
Figure IV-05 : Maillage des poutres modélisées.....	73
Figure IV-06 : Courbe force déplacement de la poutre de référence.....	75
Figure IV-07 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique SNSM.....	75
Figure IV-08 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique NSM.....	76
Figure IV-09 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique EBR.....	76
Figure IV-10 : Comparaison entre les courbes force déplacement des poutres.....	77
Figure IV-11 : Courbe force déplacement de la poutre de référence et les deux poutres renforcées par la technique SNSM.....	77
Figure IV-12 : Courbe force déplacement de la poutre de référence et les deux poutres renforcées par la technique NSM.....	78
Figure IV-13 : Courbe force déplacement de la poutre de référence et les deux poutres renforcées par la technique EBR.....	77
Figure IV-14 : Courbes force déplacement des sept poutres modélisées.....	79
Figure IV-15 : Comparaison entre le facteur de ductilité des poutres modélisées.....	80
Figure IV-16 : Comportement en compression du béton.....	81
Figure IV-17 : Largeur des fissures / chargement.....	81
Figure IV-18 : Les distributions des contraintes et les modes de défaillance de l'étude numérique.....	82
Figure IV-19 : Comparaison des modes de rupture de la poutre de référence avec celle de (Hosen et al., 2015).....	82
Figure IV-20 : Comparaison des modes de rupture de la poutre renforcée par la technique SNSM avec celle de (Hosen et al., 2015).....	83
Figure IV-21 : Comparaison des modes de rupture de la poutre renforcée par la technique NSM avec une poutre issue de la littérature.....	83
Figure IV-22 : Le mode de rupture de la poutre renforcée par la technique EBR avec la distribution des déformations de l'intérieur et l'extérieur.....	85
Figure IV-23 : Comparaison entre les courbes charge-déformation.....	85
Figure IV-24 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM et NSM avec différentes valeurs de f_{c28}	86
Figure IV-25 : Modes de rupture (a) B30, (b) B48 et (c) B55.....	87
Figure IV-26 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM et NSM avec différentes longueurs de PRFC.....	88
Figure IV-27 : Modes de rupture (a) 1900, (b) 1500 et (c) 1000.....	89
Figure IV-28 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM avec différents taux de PRFC.....	89

Figure IV-29 : Modes de rupture (a) 08, (b) 10 et (c) 12.....	91
Figure IV-30 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM et NSM avec différents natures de PRF.....	91
Figure IV-31 : Modes de rupture (a) Verre, (b) Carbone et (c) Aramide.....	91
Figure V-01 : Détail des poutres testées.....	97
Figure V-02 : Matériaux et éléments de la modélisation 3D.....	99
Figure V-03 : Courbe force déplacement de la poutre de référence.....	100
Figure V-04 : Courbe force déplacement des poutres PLV et REF.....	100
Figure V-05 : Courbe force déplacement des poutres PLH et REF.....	101
Figure V-06 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique NSM.....	101
Figure V-07 : Comparaison entre les courbes force déplacement des poutres.....	102
Figure V-08 : Mode de rupture de la poutre de référence avec celle de (Hosen et al., 2018).....	103
Figure V-09 : Mode de rupture de la poutre PLH avec celle de (Hosen et al., 2018).....	103
Figure V-10 : Mode de rupture de la poutre PLV avec celle de (Hosen et al., 2018).....	104
Figure V-11 : Mode de rupture de la poutre PLI.....	104
Figure V-12 : Validation des courbes forces déplacement	105

2. Liste des tableaux

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé.....	7
Tableau I-2 : Avantages et inconvénients de la projection du béton.....	8
Tableau I-3 : Avantages et inconvénients du chemisage en acier.....	9
Tableau I-4 : Avantages et inconvénients des tôles collées.....	10
Tableau I-5 : Comparatif entre les trois types de composites « PRF ».....	15
Tableau I-6 : Caractéristiques moyennes des fibres.....	18
Tableau I-7 : Caractéristiques des résines.....	21
Tableau II-1 : Mode de rupture pour la technique EBR.....	27
Tableau II-2 : Mode de rupture pour la technique NSM.....	35
Tableau III-1 : Facteurs de sécurité du code JSCE.....	52
Tableau III-2 : Résumé des modes de rupture traités par les différents codes de conception des PRF.....	53
Tableau III-3 : Détail des poutres testées.....	61
Tableau III-4 : Résultat analytique.....	61
Tableau IV-1 : Détail des poutres testées.....	67
Tableau IV-2 : Résumé des paramètres du modèle CDP.....	71
Tableau IV-3 : Résumé des résultats de l'étude numérique.....	74
Tableau IV-4 : Résumé des déformations des matériaux.....	80
Tableau IV-5 : Effet de la résistance caractéristique du béton.....	85
Tableau IV-6 : Effet de la longueur du renfort en PRFC.....	87
Tableau IV-7 : Effet du taux de renforcement	89
Tableau IV-8 : Effet de la nature du renfort.....	90
Tableau IV-9 : Tableau récapitulatif des résultats des études antérieures.....	91
Tableau V-1 : Détail des poutres testées.....	97
Tableau V-2 : Résumé des paramètres du modèle CDP.....	98
Tableau V-3 : Résumé des résultats.....	99

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES NOTATIONS

Abréviations

- PRF** : Polymère renforcé en fibre
PRFC : Polymère renforcé en fibre de carbone
PRFG : Polymère renforcé en fibre de verre
PRFA : Polymère renforcé en fibre d'aramide
EBR : External bonded reinforced
NSM : Near surface mounted
SNSM : Side near surface mounted
ACI : "American Concrete Institut"
AFGC : Association Française de Génie Civil
BOA : béton ordinaire armé
EC : Eurocode
ELU : état limite ultime
ELS : état limite de service
FIB : Fédération internationale du béton
ISIS : "Intelligent Sensing for Innovative Structures"

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
 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 de composite
 E_s : Module de Young de l'acier
 F_c : La force dans le béton
 F_f : La force de traction du renfort
 F'_s : La force de compression des aciers comprimés
 F_s : La force de traction des aciers tendus

f : Résistance caractéristique du béton obtenue à partir d'un cylindre

f_f : Contrainte dans le composite

f_s : Contrainte dans l'acier

f'_s : La contrainte des aciers comprimés

f_{yk} : Contrainte limite d'écoulement de l'acier

h : Hauteur de la section

K_1 : Coefficient de remplissage

K_2 : Coefficient de positionnement.

L : La portée de la poutre

La : la longueur entre le point d'application de la force et l'appuis

M_u : Le moment fléchissant ultime

M_y : le moment correspondant au point d'écoulement des armatures

M_{cr} : le moment correspondant à l'apparition de la première fissure

y : La profondeur de l'axe neutre

γ_c : Coefficient de sécurité du béton

γ_s : Coefficient de sécurité de l'acier

ϵ_{cu} : Déformation relative maximale dans le béton

ϵ_f : La déformation du renfort

ϵ_{fu} : Allongement à la rupture du renfort

ϵ_s : Déformation relative dans les aciers tendus

ϵ'_s : Déformation dans les aciers comprimé

ϵ_y : Déformation élastique

b_f : Largeur du PRFC

b_c : Largeur du béton.

B_w : Le ratio de la largeur du PRFC dans le béton.

G_f : L'Energie de la rupture totale interraccial.

S_o : La séparation effective à la rupture

T_{max} : La force maximale de l'interface

η : Le facteur de ductilité de la déformation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

Les ouvrages en béton armé doivent résister d'une part à leurs poids propres, aux surcharges d'exploitations et d'une autre part, aux sollicitations accidentelles telles que les séismes les chocs et le vent. Malheureusement, un nombre important d'ouvrages se trouve dans l'incapacité de résister face à ces contraintes.

Par conséquent, ces ouvrages auront besoin de renforcement et / ou de réparation. Cette réhabilitation se fait généralement par le renforcement des éléments portants de la structure afin d'accroître la capacité portante de l'ouvrage lui permettant de faire face aux multiples contraintes supportées pendant sa durée de vie.

Il existe plusieurs techniques de renforcement à travers le monde. Ces dernières ont fait l'objet de nombreuses études enrichissant l'état de connaissance sur le sujet. Une activité qui a permis la mise en exergue des avantages et des inconvénients de chaque technique dans le but de les améliorer. L'évolution des techniques de renforcement conventionnelles difficiles à réaliser et parfois coûteuses et peu efficaces a incité à l'élaboration de nouvelles techniques. Ces dernières se basent sur le renforcement par les matériaux composites PRF qui se caractérisent par leurs efficacités et leurs facilités d'exécution.

Les matériaux composites se distinguent par un rapport résistance légèreté très élevée comparé aux autres matériaux conventionnels, l'utilisation de ce matériau de renforcement se réalise suivant plusieurs techniques. Chacune de ces techniques a ses spécificités et ses limites ce qui fait que le choix d'une stratégie de renforcement n'est pas évident et que le choix d'une technique adéquate nécessite une bonne connaissance de cette dernière.

La technique la plus utilisée est la technique EBR (Externally Bonded Reinforced). Cette dernière est caractérisée par un mode de rupture brusque et prématuré, c'est le détachement du renfort. A cet effet, les chercheurs ont proposé une autre technique nommée NSM (Near Surface Mounted) Malgré cela, cette dernière présente un inconvénient majeur, c'est la rupture par séparation de l'enrobage du béton. Enfin, pour surmonter ces lacunes une technique appelée SNSM (Side Near Surface Mounted) est proposée.

2. Objectifs de la thèse

Pour répondre à la problématique citée à l'introduction, les objectifs de cette thèse sont les suivants :

- Passer en revue les différentes causes conduisant au renforcement et les différentes techniques de renforcement.
- Exposer l'état des connaissances sur les différentes techniques de renforcement par matériaux composites.
- Proposer un modèle analytique pour prédire le comportement des poutres en béton armé renforcées selon trois techniques de renforcement soumises à la flexion.
- La mise en place d'une simulation numérique permettant de prédire le comportement des poutres en béton armé soumises à la flexion renforcée selon trois techniques de renforcement.
- Comparer trois techniques de renforcement par matériaux composites en étudiant l'influence de plusieurs paramètres.
- S'assurer que la technique SNSM permet d'améliorer le mode de rupture.
- Valider les modèles élaborés par des résultats expérimentaux issus de la littérature.
- Tirer des conclusions et des orientations pour contribuer à la connaissance sur les trois techniques de renforcement.

3. Structuration de la thèse

Afin d'atteindre les objectifs préalablement exposés cette thèse sera structurée comme suite :

- Après une introduction générale le premier chapitre portera sur des généralités sur les méthodes de renforcement et sur les matériaux composites.
- Le deuxième chapitre sera dédié à une recherche bibliographique sur les techniques de renforcement par les matériaux composites.
- Les différents codes de conception et le modèle analytique proposé seront dans le chapitre trois.
- Le quatrième chapitre sera consacré à une étude numérique dont les résultats seront validés et comparés par les résultats analytiques et ceux expérimentaux de la littérature.
- Le cinquième portera sur l'étude de l'influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort moyennant un deuxième modèle numérique.
- Et à la fin une conclusion générale et les références bibliographiques.

CHAPITRE 1

I

GENERALITES SUR LES METHODES DE RENFORCEMENT ET LES MATERIAUX
COMPOSITE

II. CHAPITRE 1 : METHODES DE REPARATION ET RENFORCEMENT DES OUVRAGES

1. Introduction

La capacité portante d'un ouvrage n'est pas toujours garantie. En effet, plusieurs raisons peuvent empêcher une structure d'assurer ces fonctions en état de service. Ceci peut être en conséquence d'un vieillissement, en raison d'un chargement excessif, d'une pathologie susceptible de nuire à sa durabilité, ou à cause d'une mauvaise conception.

C'est dans cette thématique, que ce chapitre porte sur l'évolution des méthodes de renforcement des ouvrages ainsi que leurs avantages et inconvénients. Ceux après avoir énuméré les causes de détériorations ainsi que les pathologies à l'origine des dégradations des ouvrages. Additivement à ce qui précède, ce chapitre est également consacré pour la définition des matériaux composites et des trois techniques de renforcement par PRF (polymère renforcé par fibres), en l'occurrence, la technique EBR (externally bonded reinforced), NSM (Near surface mounted), et SNSM (Side Near surface mounted).

2. Les causes de renforcement des structures

Le renforcement, la réparation, et la réhabilitation sont des solutions permettant d'éviter la démolition et la reconstruction des ouvrages. Les causes qui engendrent un tel besoin sont énumérées comme suit : (Benzaid et al. 2010) :

- L'augmentation des sollicitations de la structure :
 - ✓ Réaménagement de la nature d'usage de la structure (d'une habitation à une école par exemple),
 - ✓ Accroissement des charges d'exploitation (le cas des ouvrages d'art avec l'augmentation du parc automobile),
 - ✓ Nouvelle installation (une machine le cas des bâtiments industriels),
- Une mauvaise conception ou exécution de la structure
 - ✓ Des erreurs de calcul (dimensionnement, disposition constructive ...),
 - ✓ Qualité médiocre des matériaux de construction,
- Dégradations et pathologies du béton
 - ✓ Altérations d'origine chimique (Action des chlorures, Milieux sulfatiques),
 - ✓ Altérations d'origine physico-chimique (gel-dégel, Retraits),
- Des modifications, ou rénovation d'une structure
 - ✓ La suppression d'un élément porteur,

- ✓ Des structures conçues avec des méthodes de calcul dépassé
- Situations accidentelles
 - ✓ Un tremblement de terre,
 - ✓ Explosion,
 - ✓ Incendie,

3. Méthodes De Réparation Et Renforcement

Le renforcement d'un ouvrage en béton armé vise à l'amélioration des caractéristiques mécaniques de ces éléments de manière qu'elles soient plus aptes à tenir face aux sollicitations et aux contraintes des états de service et des états ultimes. En effet, le renforcement s'effectue moyennant plusieurs techniques, il s'agit principalement des techniques qui interviennent sur les sections des éléments de la structure (chemisage, projection et ...) d'une part, ou d'autres techniques avec l'incorporation des profils et tôles métalliques d'autre part. En revanche, plus récemment, les techniques de renforcement sont basées sur l'usage des matériaux composites.

3.1. Renforcement par chemisage en béton

Le renforcement par chemisage peut être considéré comme un confinement de la section primaire par une nouvelle couche secondaire en béton armé. Ce dernier s'accroche à l'ancienne pour augmenter sa résistance par l'accroissement de la section du béton et l'ajoute d'une section d'armature additionnelle voir (Figure I-1) (Fukuyama and Sugano, 2000).

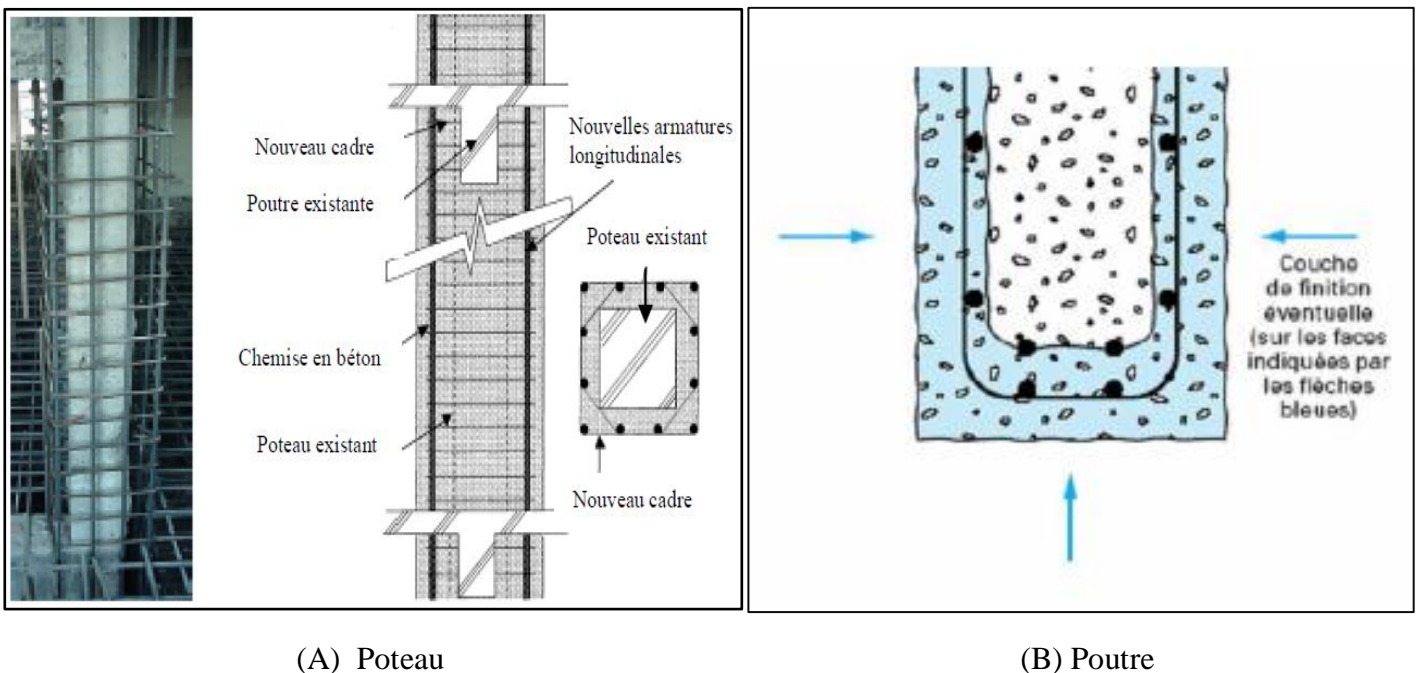


Figure I-1 : Chemisage en béton armé (A) d'un poteau (Fukuyama and Sugano, 2000), (B) d'une poutre (Merdas et al 2012).

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé (Benzaid et al., 2010).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Technique peu coûteuse en raison de l'usage des matériaux traditionnels - Cette technique n'exige pas une main d'œuvre qualifiée. 	<ul style="list-style-type: none"> - l'agrandissement des sections augmente le poids de la structure et influence négativement sur l'esthétique. - Durée des travaux importante avec nécessité de vider les lieux. - Coffrages indispensables. - Difficulté d'exécution.

3.2. Renforcement par projection du béton

Le béton projeté est un mélange des granulats de ciment de l'eau et souvent des ajouts ou des adjuvants. Cette technique préconise de projeter sur le support à renforcer à l'aide de l'air comprimé. Selon le cas de dégradation, on peut distinguer deux types de réparation par béton projeté (Merdas et al 2012) :

- ✓ Les réparations superficielles (la réparation d'une paroi en béton présentant de légères ségrégations).
- ✓ Les réparations profondes (le renforcement des structures par la disposition de nouvelle armature)

Cette technique est exécutée selon deux procédés, par voie sèche ou voie humide.

3.2.1. Procédé par voie sèche

Ce procédé consiste à transporter les matériaux secs dont le ciment et les granulats à l'aide de l'air comprimé. Ceci à travers une canalisation jusqu'à la lance où ils se mélangent à l'eau sous pression introduite par une bague perforée. La Figure I-2 montre l'appareillage utilisé pour la mise en œuvre de béton projeté par voie sèche (Gagnon et al., 2004).

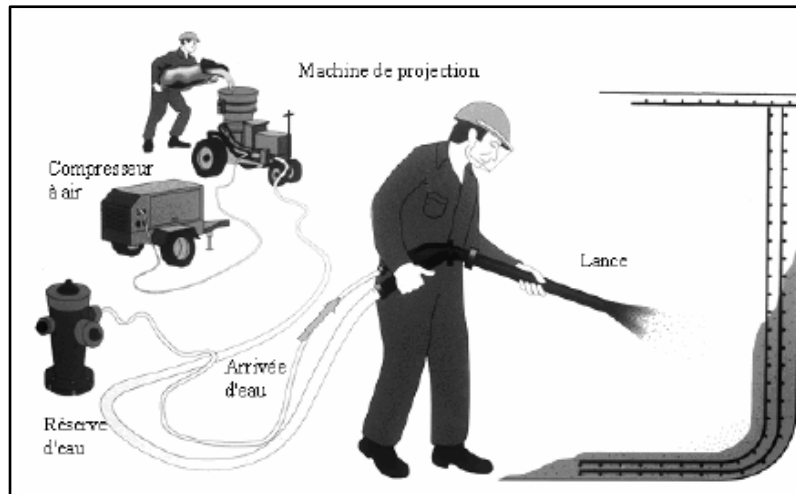


Figure I-2 : Projection par voie sèche (Gagnon et al., 2004).

3.2.2. Procédé par voie humide

Ce procédé consiste à pomper un béton conventionnel dans un boyau et à le projeter à une vitesse élevée face à une surface au support en utilisant de l'air comprimé additionné à la lance. Ce procédé est utilisé pour les réparations profondes et volumineuses. La Figure I-3 montre l'appareillage utilisé pour la mise en œuvre de béton projeté par voie humide (Gagnon et al., 2004).

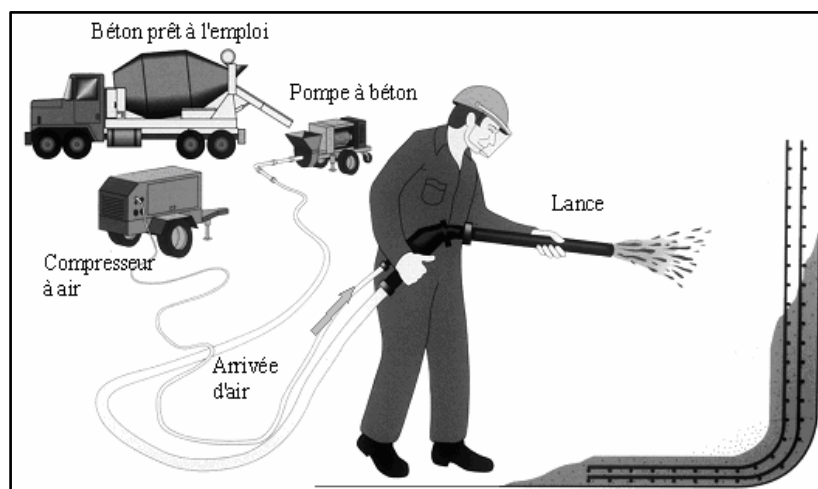


Figure I-3 : Projection par voie humide (Gagnon et al., 2004).

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients de la projection du béton (Benzaid et al., 2010).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Une bonne adhérence au support - Caractéristiques similaires à ceux du béton coffré. - Procédé assez économique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de mise en œuvre. - Nécessité d'un matériel adéquat. - Problèmes d'hygiène et de sécurité.

3.3. Renforcement par chemises en acier

Le chemisage en acier est un procédé de renforcement des poteaux de forme circulaire et rectangulaire. Ce procédé vise à améliorer la résistance des éléments ayant subi des charges supplémentaires ou en cas d'endommagement issu à des situations accidentelles, des séismes à titre d'exemple. Par conséquent, les éléments de forme circulaire leurs chemisages se réalise en incorporant deux demi-tubes en acier légèrement surdimensionné qui seront soudés verticalement. Par la suite, le vide entre l'ancien élément et le nouveau profilé est rempli en béton (Priestley et al., 1996). Tandis que, pour les éléments de forme rectangulaire le renforcement se fait sous une forme elliptique. Cette forme permet d'exercer un confinement par retenue passif notamment au niveau des rotules plastiques. La Figure I-4 présente un poteau de forme rectangulaire avec un renforcement par chemisage elliptique et une autre circulaire (Priestley et al., 1996). Par ailleurs, ces procédés ont démontré une bonne tenue face aux efforts sismiques, particulièrement pendant le tremblement de terre de Northbridge en 1994, où plusieurs ponts renforcés par se procéder n'ont pas subi des dommages importants (Benzaid et al., 2010).

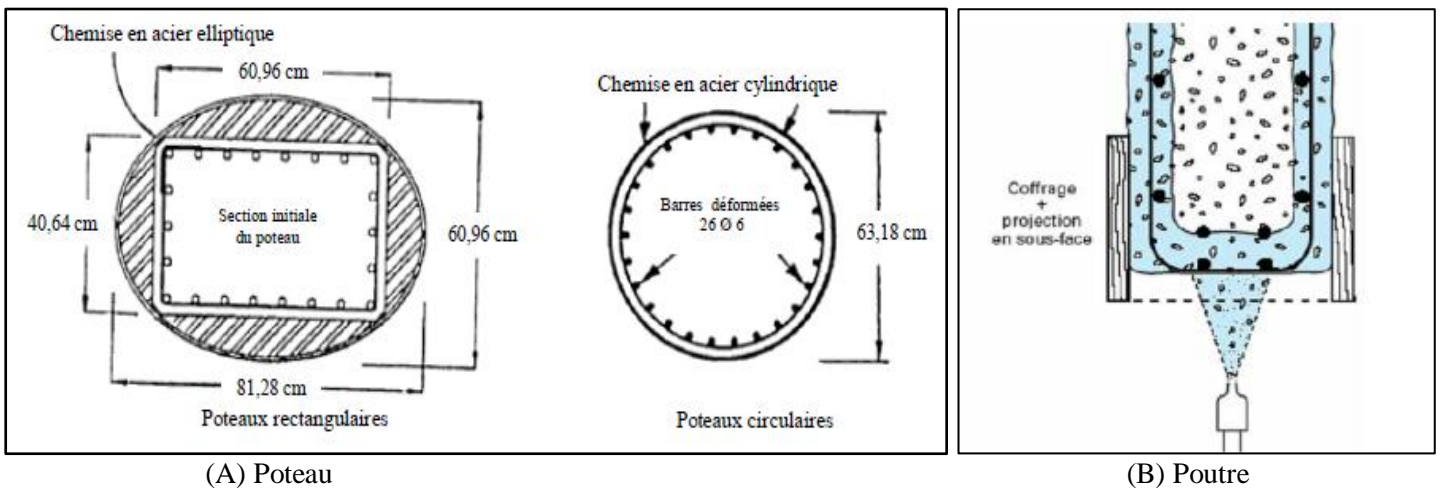


Figure I-4 : Renforcement avec des chemises en acier (A) poteaux circulaires et rectangulaires (Priestley et al., 1994) (B) poutre (Merdas et al 2012).

Tableau I-3 : Avantages et inconvénients du chemisage en acier (Benzaid et al., 2010).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Durée de réalisation relativement courte. - Amélioration de la rigidité des éléments renforcés - L'augmentation de la section est petite a celui du chemisage en béton. 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins économique par rapport au chemisage en béton. - Nécessité une technicisée supplémentaire pour la soudure. - Exige un entretien pour éviter la corrosion. - Impose un poids supplémentaire.

3.4. Renforcement à l’aide des tôles collées

Cette technique n’a pu voir le jour qu’une fois la colle adhésive à base d’époxy fut développée. La particularité d’époxy est d’avoir un niveau élevé d’adhésion permettant de transmettre des efforts de façon acceptable. La première utilisation de cette technique a eu lieu à Durban à l’Afrique du Sud. Le rôle de ce dernier été de compenser le manque d’acier oublié lors de l’exécution de l’ouvrage (Merdas et al, 2012). Ensuite, cette technique a été étudiée scientifiquement comme une technique de renforcement des poutres fléchies. Plusieurs chercheurs ont constaté son efficacité. Chose qui a motivé les Japonais à utiliser cette technique pour la réparation de 240 ponts à faible portance (David, 1999). En 1977 Freyssinets Internationaux ont décroché un brevet pour la technique des tôles perforées qui augmente l’adhérence des tôles avec la résine. La Figure I-5 présente un exemple de la technique de renforcement par tôles collées. (Luyckx, 1999).



(A) difficulté de manutention

(B) Renforcement du viaduc de Terrenoire

Figure I-5 : Tôles collées ; (A) difficulté de manutention ; (B) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet (Luyckx, 1999).

Tableau I-4 : Avantages et inconvénients des tôles collées (Luyckx, 1999).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Ça ne nécessite pas des démolitions ou des modifications sur les structures ; - La flexibilité de la tôle offre une certaine souplesse. - Comme le renfort se colle à la surface il n’occupe aucun volume. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige un entretien pour éviter la corrosion - La surface à renforcer doit être bien préparé et assez plat pour assurer une couche uniforme d’adhésif - Un collage sous pression pour éviter de laisser des bulles d’air est nécessaire. - Technique limitée aux petites et moyennes surfaces à cause de la difficulté de manutention des tôle

3.5. Renforcement à l'aide des matériaux composites « PRF » polymère renforcé de fibres

Les matériaux composites ont été développés au départ pour les industries aérospatiales et aéronautiques. C'est ensuite et à cause de la demande accrue des matériaux des constructions plus performants où les matériaux composites ont été introduits dans le domaine du bâtiment. La technique de renforcement par matériaux composites a été utilisée pour la première fois par MEIER en 1991 sur des structures réelles en Suisse (Foo et al., 2001). MEIER et son équipe ont eu recours à cette technique pour le renforcement d'une poutre du pont IBACH BRIDGE ayant une longueur totale de 228 mètres (Meier et al., 1993).

Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de cette technique comme Kachlakev et McCurry 2000, Parvin et Granata 2000, Teng et al. 2002, Alampalli et al. 2002, Nassif et Najm 2003, Hag-elsafi et al. 2003, Hwang et Yun. Leurs études ont démontré les performances de cette technique en matière de renforcement des éléments en béton (Benzaid et al., 2010).

La technique renforcement à l'aide de matériaux composites représente une alternative prometteuse aux autres techniques de renforcement. Ceci à travers ses nombreuses caractéristiques avantageuses notamment :

- ✓ Un rapport résistance /poids très élevé.
- ✓ La flexibilité des matériaux composites qui offre la possibilité d'épouser différentes formes.
- ✓ Absence de corrosion.
- ✓ Résistance élevée notamment à la traction.

3.5.1 Renforcement à l'aide des matériaux composites collé (Technique EBR)

En 1998 Komlan et al ont classé les méthodes de renforcement par matériaux composites en trois catégories (Merdas et al, 2012) :

La première est celle de Meier (Meier et al., 1993) elle consiste à coller à l'aide d'une résine époxy un plat ou plusieurs avec un durcissement à température ambiante.

La deuxième celle de Hamelin est différente à de la première par la colle utilisée qui est du type thermodurcissable où le durcissement se fait par apport de chaleur et de pression. Cette méthode se distingue aussi par le renfort où Hamelin à utiliser un tissu a la place des plats en composite.

La troisième technique proposée par La société SOFICAR et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris) est similaire à la deuxième à l'exception du durcissement qui se fait à température ambiante.

L'ensemble des trois méthodes se résume à coller à la surface du béton au niveau de la partie tendue des plats ou des tissus en polymères renforcés de fibres « PRF » par l'intermédiaire d'une colle époxydique. La mise en place du renfort se fait après préparation de la surface à coller qui consiste à

enlever les parties fragiles afin d'assurer une surface uniforme pour une bonne adhérence entre la résine et le béton. Cette technique de renforcement est connue sous le nom de (Externally Bonded Reinforcement) EBR voire la Figure I-6 et la Figure I-7.

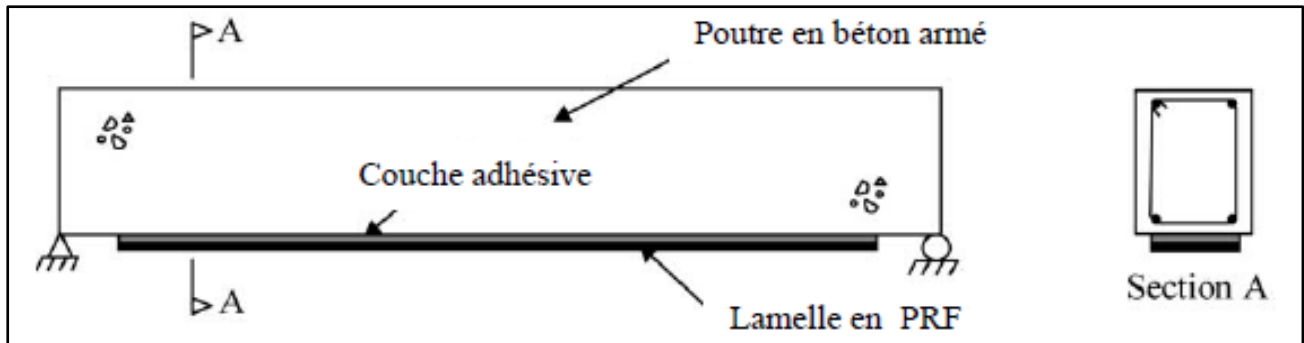


Figure I-6 : Technique de renforcement EBR (Teng et al., 2002).



Figure I-7 : Plusieurs usage de la technique de renforcement EBR (Teng et al., 2002).

3.5.2. Technique de renforcement NSM (Near Surface Mounted)

Le renforcement par PRF a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Plusieurs études parmi eux ont porté sur l'amélioration et la compréhension de la technique EBR. Cependant, d'autres études ont proposé une nouvelle technique appelée NSM (Near Surface Mounted). Représentant une innovation prometteuse dans le domaine du renforcement des structures en béton armé. Les chercheurs

l'ont suggéré comme une alternative à la première. Au début, cette technique a été inspirée d'une ancienne technique similaire. Cette dernière a été utilisée en Europe, précisément en Suède dans les débuts des années 50. Une technique qui a été mise en œuvre pour le renforcement d'un pont en béton armé. Les ingénieurs ont creusé des rainures sur le béton où des barres d'acier ont été placées puis ils ont rempli les rainures par du mortier de ciment. En effet, la méthode **NSM** est similaire à la précédente à l'exception des tiges ou des plats en « PRF » qui remplace les barres d'acier, et la résine époxy au lieu du mortier de ciment. (De Lorenzis et al., 2000), (Figure I-8).

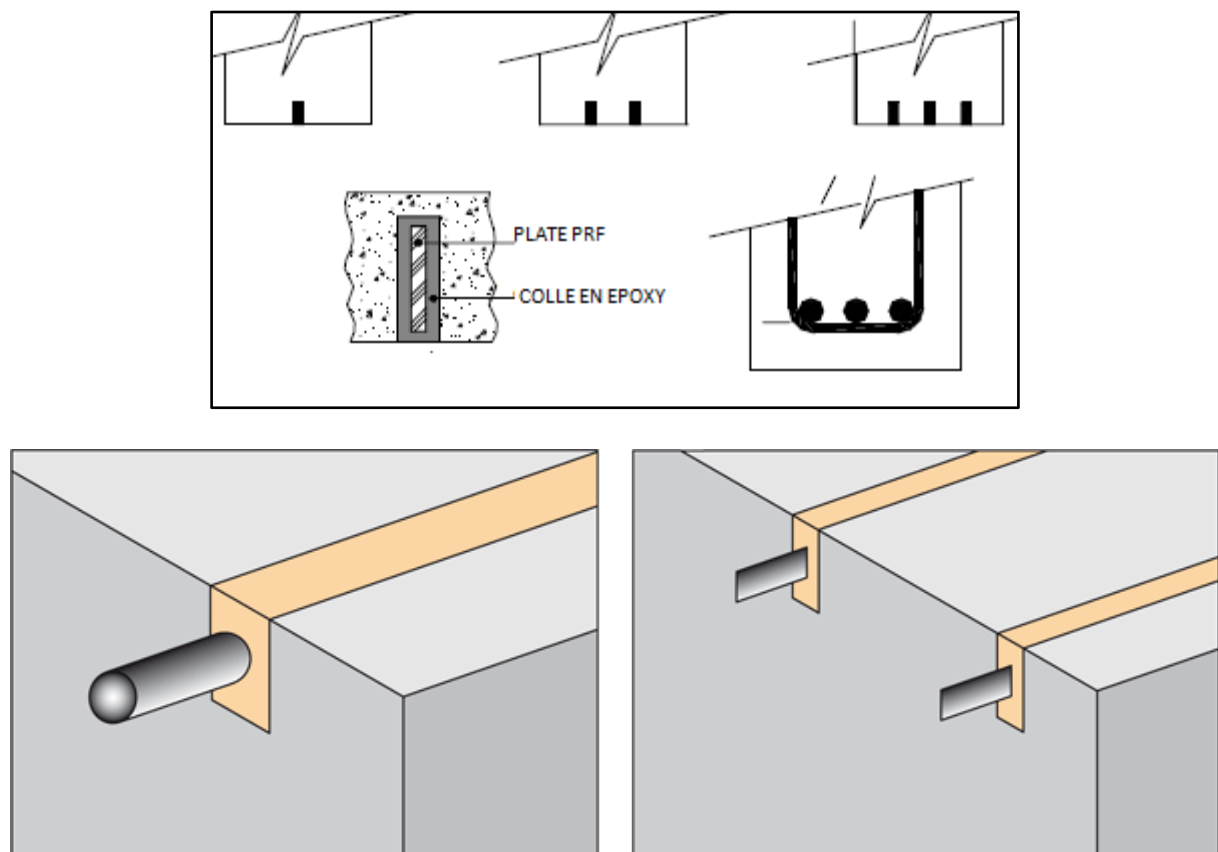


Figure I-8 : Technique de renforcement NSM.

3.5.3 Technique de renforcement SNSM (Saide Near Surface Mounted)

Au cours des cinq dernières années, des chercheurs comme (Sharaky et al., 2014), (Bilotta et al., 2015), ont développé une nouvelle technique appelée SNSM (Side Near surface mounted). Cette dernière est similaire à l'NSM à l'exception de la position des renforts placés au niveau des facettes latérales au lieu de la partie inférieure de la poutre.

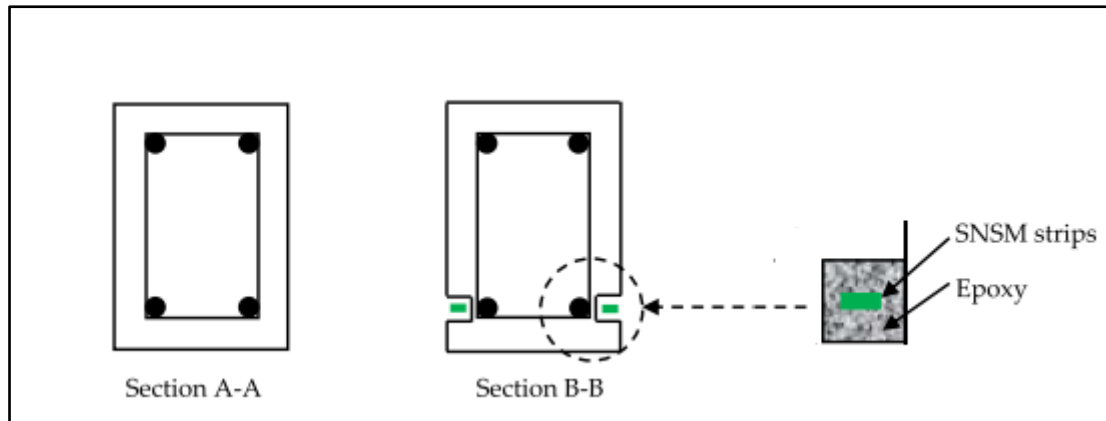


Figure I-9 : Technique de renforcement NSM.

4. Matériaux Composites

4.1. Définition des matériaux composites

On peut définir le matériau composite comme étant le résultat d'un assemblage entre deux matériaux de nature différente, et qui ensemble donne des caractéristiques plus performantes que celle des deux matériaux séparés.

D'une manière générale, on distingue deux phases (Redjeb, 2007):

- Une phase continue appelée la matrice,
- Une phase discontinue appelée le renfort ou matériau renforçant.

Toutefois, pour lui conférer d'autres caractéristiques l'occurrence la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu, on rajoute généralement des charges. Ces charges se présentent sous la forme d'éléments fragmentaires ou des poudres ou des liquides (CARMA, 2006).

4.2. Les matériaux composites en « PRF »

Parmi les différents types de matériaux composites, on a le polymère renforcé en fibres « PRF ». Il se différencie par rapport aux autres types par un renfort du type fibreux et une matrice thermodurcissable. Les caractéristiques de ce type de matériaux composites dépendent du taux de fibre ainsi que leur direction. Les PRF sont anisotropes avec un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture (Benzaid et al., 2010).

Les avantages du PRF sont :

- Une densité faible ;
- Des caractéristiques mécaniques directionnelles ;
- Une bonne tenue face à la corrosion
- Une très bonne résistance à la fatigue ;
- Une flexibilité qui facilite sa manipulation.

Les inconvénients sont :

- Une forte anisotropie ;
- Une rupture fragile ;
- Un cout élevé par rapport à l'acier (Luyckx, 1999).

Les matériaux composites de type « PRF » sont classés selon trois catégories :

- Polymère renforcé de fibres de verre (Glass Fibre Reinforced Polymer) : « GFRP ».
- Polymère renforcé de fibres de carbone (Carbon Fibre Reinforced Polymer) : « CFRP ».
- Polymère renforcé de fibres d'aramide (Aramid Fibre Reinforced Polymer) : « AFRP ».

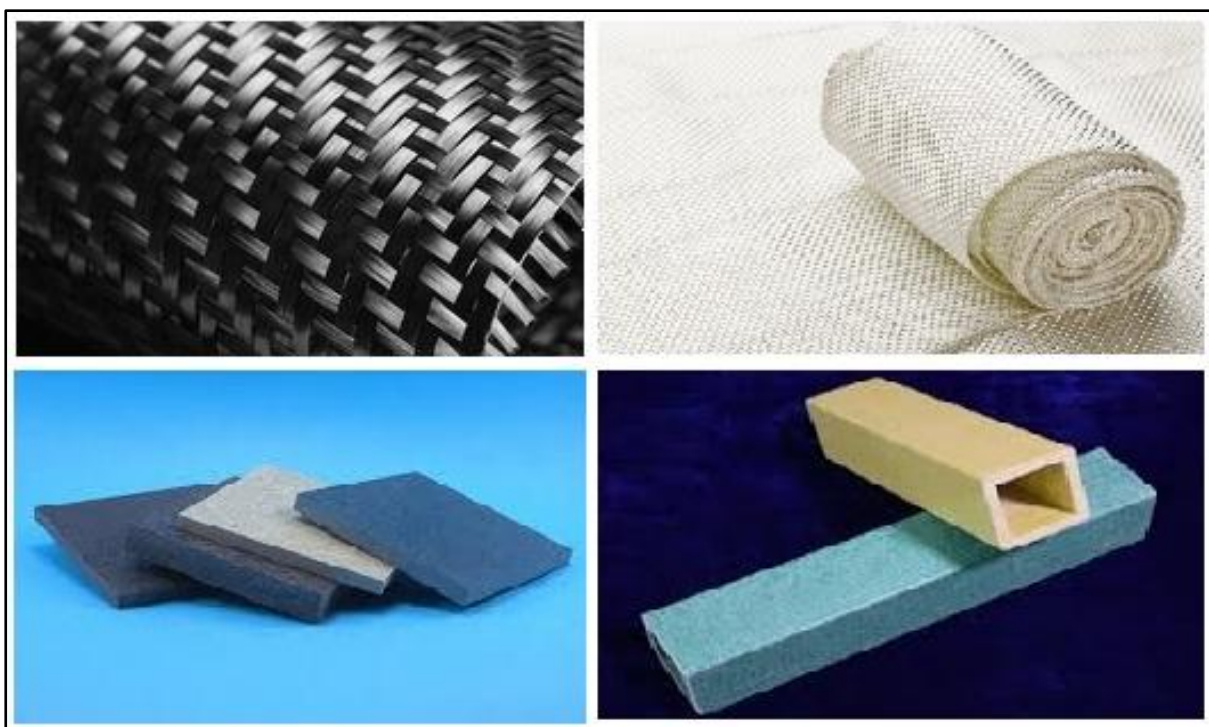


Figure I-10 : Matériaux composites en polymère renforcé de fibres « PRF ».

Tableau I-5 : Comparatif entre les trois types de composites « PRF » (Teng et al., 2002).

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en fibres (%/kg)	Densité (kg / m3)	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (PRFG laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (PRFC laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (PRFA laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

4.3. Les fibres

Les types des fibres utilisées dans les polymères renforcés de fibres « PRF » sont les fibres longues ou bien les fibres continues. Contrairement à ceux utilisés lors du procédé de pulvérisation pour la construction des bateaux ainsi que les fibres utilisées dans des matériaux cimentaires renforcés qui mesurent de 10 à 50 mm. Ces fibres continues sont utilisées avec des taux élevés allons de 20 à 60% du volume de la résine polymère d'où l'appellation de polymère renforcé par des fibres (PRF) (Bank, 2006).

4.3.1. Fibres de carbone

Les fibres de carbone se caractérisent par un module d'élasticité très élevé qui de l'ordre de 200 à 800 GPa. Elles ont un allongement extrême qui peut attendre jusqu'à 2,5 %.

Les avantages des fibres de carbone sont :

- Une absorption nulle de l'eau ;
- Une tenue face à plusieurs solutions chimiques ;
- Une meilleure endurance à la fatigue.

La fibre de carbone présente quelques limites telles que :

- Une conductivité électrique qui peut engendrer des corrosions galvaniques au contact avec l'acier ;
- Un mauvais comportement au choc et à l'abrasion notamment ceux du type stratifié.

En fonction du taux du carbone, les fibres en carbone se divisent en trois types :

- HR des fibres « à haute résistance » ;
- HM des fibres « à haut module » ;
- THM des fibres « à très haut module » ou et des fibres intermédiaires (Châtain, 2001).

4.3.2. Fibres de verre

Les fibres de verre sont les fibres les moins chères par rapport aux autres types, ils représentent le matériau le plus utilisé pour les composites. Elles sont constituées essentiellement de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). Leur module d'élasticité est de 70 à 85 GPa leur allongement extrême varie de 2 à 5 % en fonction de leur qualité, en revanche les principaux inconvénients des fibres de verre sont :

- La relaxation ;
- La sensibilité face à l'humidité.

Il existe trois types de fibres :(CARMA, 2006),(Benzaid et al., 2010).

- E : pour les composites, de grandes diffusions et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques)

4.3.3. *Fibres d'aramide*

Les fibres d'aramide sont composées en molécules de polyamide aromatiques. Ils ont d'abord été développés et brevetés par DuPont en 1965 sous le nom commercial Kevlar. Plusieurs propriétés font de ce type de fibre le mois utiliser pour les pièces PRF pour usage dans le domaine du génie civil, tel que :

- Le prix élevé en comparaison avec les fibres de verre,
- La difficulté de manipulation,
- L'absorption d'humidité élevée qui attend jusqu'à 6% en poids.

Cependant, leurs avantages impliquent une ténacité extrêmement élevée. Cette dernière est la raison de leurs utilisations dans de nombreux produits industriels, soit sous forme de tissu nu, soit comme renforts pour des composites PRF dont l'absorption énergétique est sollicitée. Par exemple ont peu trouvé des fibres d'aramide dans des gilets pare-balles (casques), des casques et Atténuateurs de chantier ou dans le domaine automobiles (Bank, 2006).

Les fibres d'aramide ont un module d'élasticité qui varie de 70 à 200 GPa et un allongement extrême varie de 1,5 à 5 % en fonction de la qualité (Benzaid et al., 2010).

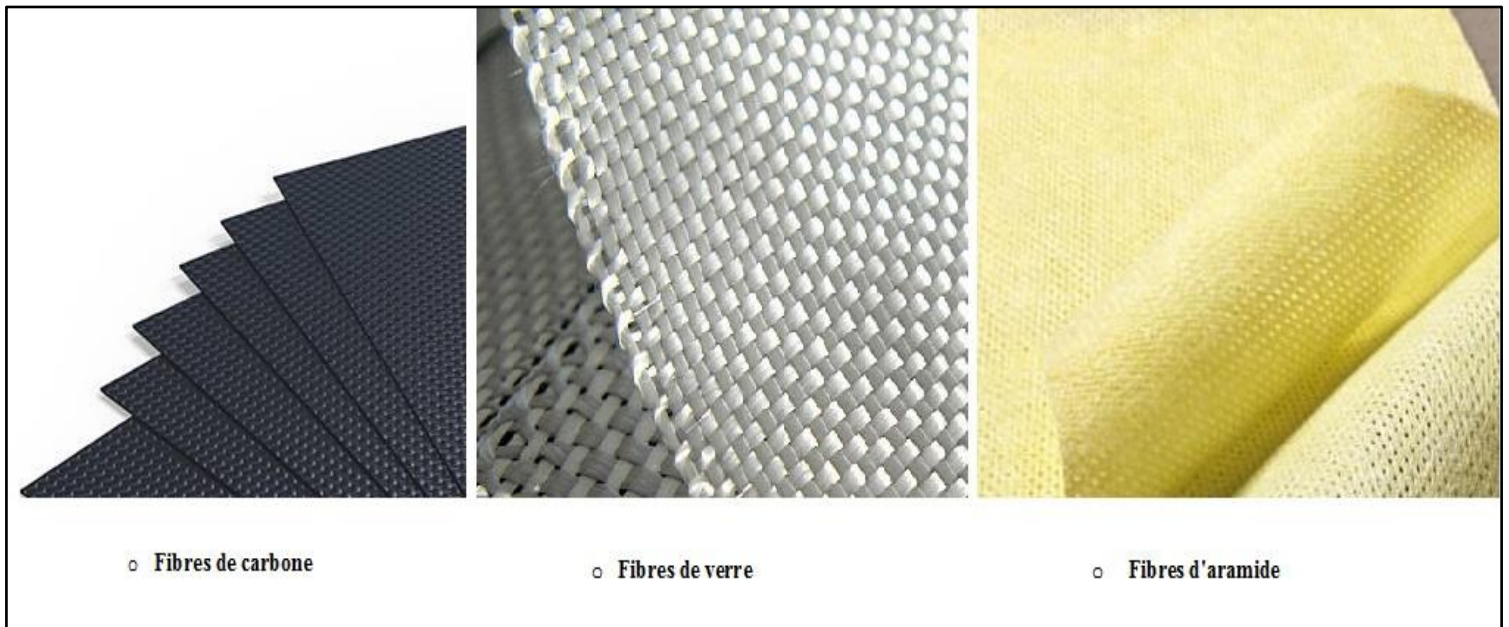


Figure I-11 : Les trois types des fibres pour « PRF ».

Tableau I-6 : Caractéristiques moyennes des fibres (CARMA, 2006).

Fibres	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	Cr	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0,5 \times 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000	-	0.2	3 200	4	$0,3 \times 10^{-5}$
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0,08 \times 10^{-5}$
Carbone HR	07	1 750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	$0,02 \times 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$-0,2 \times 10^{-5}$

4.4. Matrice

Le terme polymère est utilisé pour décrire un matériau constitué d'un ensemble de molécules, appelées macromolécules. Ces macromolécules consistent des unités répétitives ou des chaînes dans lesquelles les atomes sont maintenus ensemble par des liaisons covalentes. Le terme résine polymère ou bien plus simplement résine est utilisés dans l'industrie des composites pour désigner l'ingrédient polymère primaire dans la partie non fibreuse du matériau PRF. Cette partie non fibreuse est également connue sous le nom de matrice (Bank, 2006).

Les matrices permettent de coller les fibres ensemble et de transmettre les efforts à ces derniers. Elle peut aussi résister aux efforts tranchants ainsi qu'aux forces transversales et aux forces de compression. La matrice isole les fibres dans le but de les protéger contre l'humidité l'oxydation et à l'agression chimique (Wu, 2004).

On peut distinguer deux groupes primaires de polymères

- Des polymères thermodurcissables (TD) par exemple le polyester, le vinylester, l'époxy et le phénolique. ;
- Des polymères thermoplastiques (TP).

Ils se distinguent l'un de l'autre par la manière dont les chaînes moléculaires sont connectées lorsque le polymère est sous sa forme solide. Les polymères thermodurcissables ont une structure moléculaire réunie pour former un réseau tridimensionnel continu par des atomes fortement liés, une structure de polymère thermodurcissable ne peut pas être chauffée et ramollie puis transformée en une autre forme elle est irréversible (Bank, 2006).

Les polymères thermoplastiques se constituent par des chaînes moléculaires maintenues ensemble par des forces faibles. Cela affecte leurs propriétés mécaniques et physiques en raison de l'encollage croisé. Ce polymère ne se fige pas, mais il reste plastique, et les chaînes moléculaires peuvent " s'écouler ". Toutefois, lorsque le polymère solide est chauffé, il peut être réinitialisé sous une forme différente lors du refroidissement donc il est réversible (Bank, 2006).

5. Méthodes de fabrication des « PRF »

Il existe plus au moins une quinzaine de méthodes pour la fabrication des matériaux composites destinés à différents usages. Cela dit, pour les méthodes de fabrication utiliser pour le domaine du génie civil trois méthodes principales sont distinguées, le tressage, la méthode de fabrication par pultrusion, et l'enroulement filamentaire.

5.1. Pultrusion

Ce procédé est destiné au moulage des longueurs continues ou des profils constants ou presque constants. Ce dernier consiste à faire tirer les matériaux de renforcement tels que les fibres, les rowings et les tapis à travers un bain de résine thermodurcissable, à l'aide des plaques de guidage et à travers une matrice chauffée. Cette matrice a généralement une forme pointue pour obtenir à la fois le compactage et le durcissement du PRF voire là (Figure I-12) après avoir parcouru le dispositif de traction à traction continue, les profils sont découpés à la longueur voulue avec une scie (Hensher, 2016).

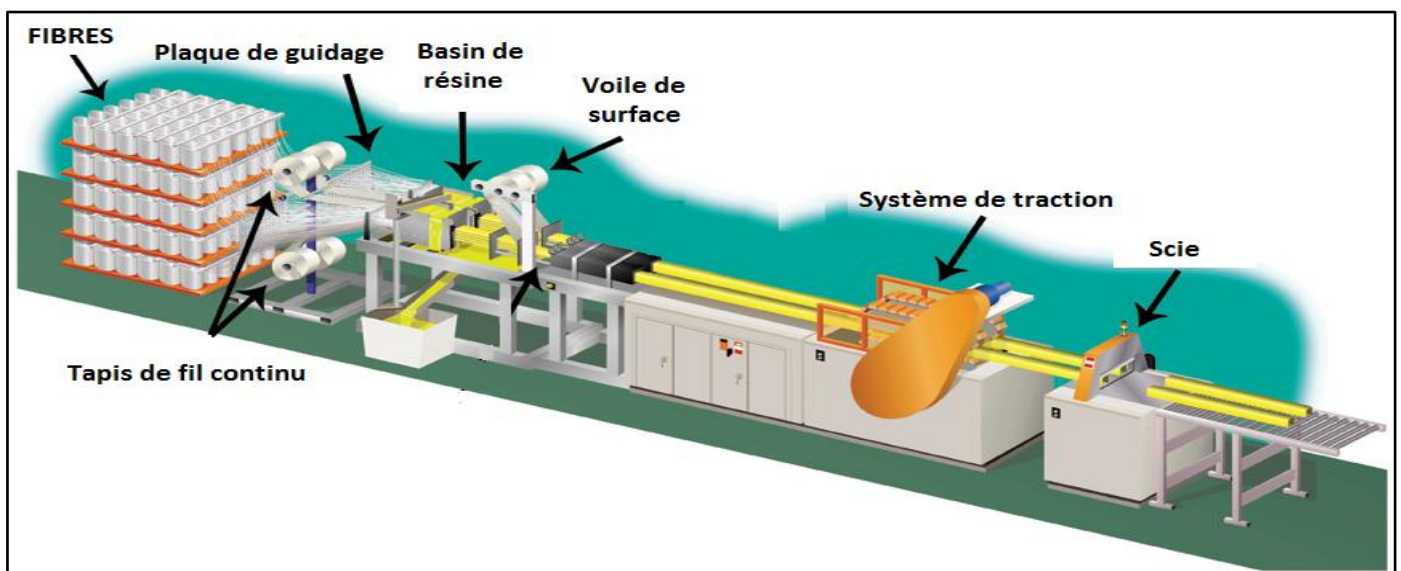


Figure I-12 : Méthodes de fabrication par pultrusion.

5.2 L'enroulement filamentaire

L'enroulement de filaments s'effectue moyennant un mandrin rotatif autour duquel une bande imprégnée est enveloppée de résine. La bande en question est passée par la suite au four afin d'obtenir une structure creuse durcie. (Peters and Humphrey, 1993)

Ce procédé permet de réaliser des tubes circulaires, elliptiques, ovales et carrés, ainsi que des stratifiés plats en ajustant les paramètres d'enroulement. Ce procédé permet de modifier l'angle des fibres entre 0° (Enroulement longitudinal ou polaire) et 90° (bobinage) (Hensher, 2016).

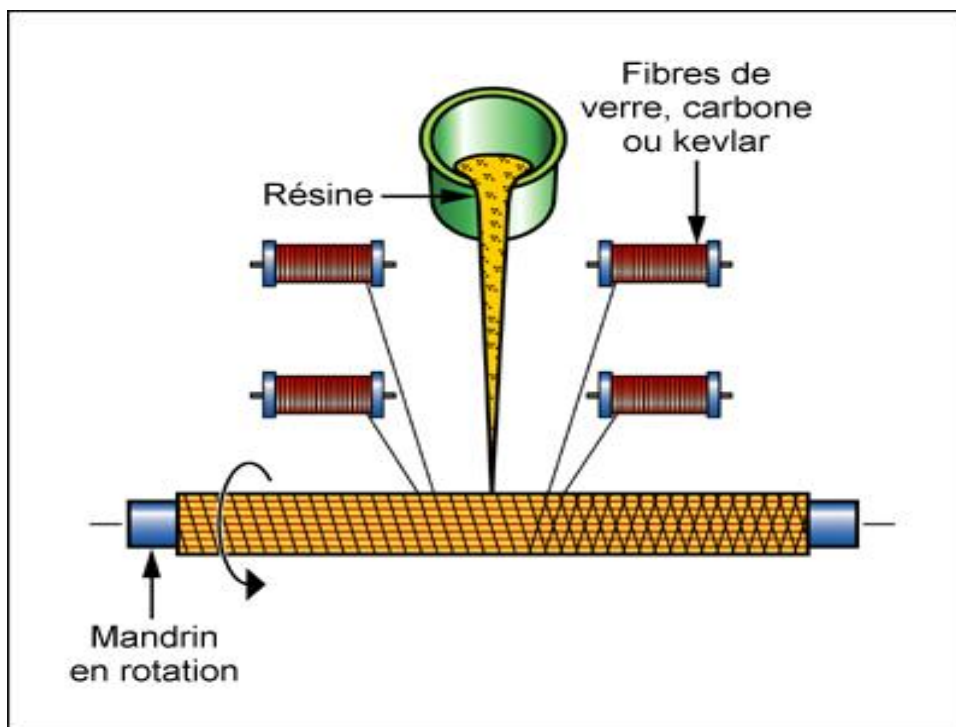


Figure I-13 : Méthodes de fabrication par enroulement filamentaire.

5.3 Le tressage

Ce procédé peut être considéré parmi les anciennes technologies textiles connues. Il compromet l'entrelacement de deux fils ou plus pour former une structure intégrée. En comparaison avec les autres techniques, les PRF tressés offrent une meilleure résistance à l'impact et à l'abrasion en raison des fils tressés. D'autre part, ils offrent aussi une rigidité et une force légèrement pure dans le plan. Cette rigidité est obtenue par la courbure des fibres et de la faible teneur en fibres.

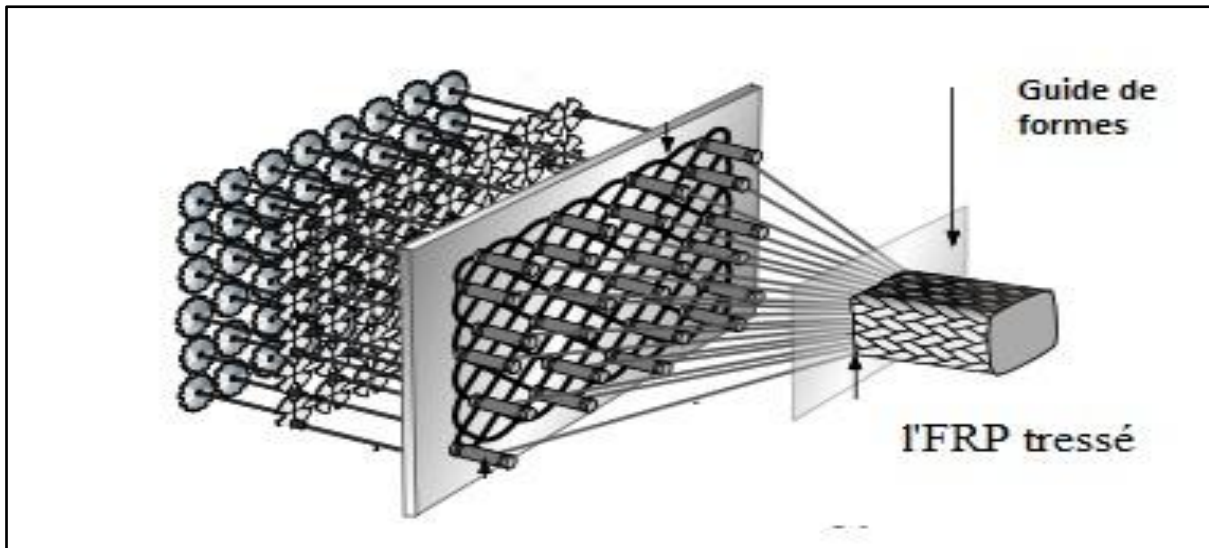


Figure I.14 : Méthodes de fabrication par tressage.

6. L'adhésif

L'adhésif ou bien les colles, sont les résines époxydes à base de polymères qui permet de fixer le matériau composite à l'élément à renforcer en assurant une bonne transmission des contraintes de cisaillement.

Le durcissement de cette résine se fait moyennant un durcisseur qui provoque la polymérisation, par conséquent ce processus est irréversible et sa vitesse est en fonction de la température, notamment plus la température est élevée, plus il est rapide.

Parmi les avantages des adhésifs de type résine, un retrait assez petit, voire négligeable, un bon tenu face aux produits chimiques, une résistance à l'abrasion acceptable.

Il y lieu de différencier deux durées de vie pour la résine : la durée de vie du produit stocké et la durée de vie du mélange. (Merdas et al, 2012).

Tableau I-7 : Caractéristiques des résines (Täljsten, 1994).

Densité (kg/m^3)	1100- 1700
Module d'Young (GPa)	0,5 - 20
Modules de cisaillement (GPa)	0,8 - 8
Coefficient de Poisson	0,3 – 0,4
Résistance en traction (MPa)	9 - 30
Résistance à l'effort tranchant (MPa)	10 - 30
Résistance en compression (MPa)	55- 110
Déformation en traction à la rupture (%)	0,5 -5
Température de transition vitreuse ($^{\circ}C$)	45 - 80

7. Conclusion

Il a été antérieurement exposé, que pour de multiples raisons, les structures en béton armé nécessitent un renforcement ou une réparation. À cet effet et en se basant sur la littérature la méthode de renforcement par matériaux composites reste la meilleure même si les matériaux composites demeurent plus chers que l'acier et les autres matériaux.

Les nombreux avantages des PRF offrent aux techniques de renforcement l'habileté à renforcer efficacement et facilement plusieurs types d'éléments. Ceci pour faire face à de nombreuses sollicitations par exemple la flexion, le cisaillement, et aussi pour assurer un confinement des poteaux afin de mieux supporter le flambement. À l'aide des PRF, il est possible de procéder à la réparation des éléments endommagés. Un procédé qui permet de sauvegarde des ouvrages, de réhabiliter des structures notamment dans le cadre de la préservation du patrimoine à titre d'exemple.

Néanmoins, les techniques de renforcement par PRF ne sont pas parfaites. En effet, les chercheurs à travers leurs études ont pu constater des lacunes ou autrement dites des limites concernant ces techniques. C'est dans cette dynamique, que des chercheurs visent à comprendre le comportement de ces techniques dans l'objectif de proposer des solutions permettant d'améliorer leur efficacité et leurs rendements.

CHAPITRE 2

II

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT

II. Chapitre 2 : Etude Bibliographique sur les techniques de renforcement

1. Introduction

Ces dernières années, l'usage des composites en Polymères Renforcés de Fibres (PRF) comme matériau de renforcement ne cesse d'augmenter. Cela est constaté par l'accroissement du nombre des projets de renforcement en PRF. En conséquence, l'usage de ce matériau est désormais plus avantageux par rapport aux autres techniques de renforcement, notamment lors des conceptions innovantes.

Comme il a été précédemment dévoilé, les PRF sont déployés pour le renforcement des structures en béton selon trois principales techniques qui peuvent être combinées. Les trois dites techniques sont : EBR, NSM et SNSM. Ce chapitre expose leurs méthodes d'application pour le renforcement des poutres en béton soumises à la flexion. Ce dernier donne à travers une revue bibliographique détaillée un aperçu sur leurs comportements, les paramètres influençant leur efficacité, et les modes et les mécanismes de rupture relatifs à chaque technique.

2. Activité de recherche à travers le monde sur le renforcement par PRF

En Europe, les systèmes PRF ont été développés en alternance avec le collage en tôle d'acier. Cette technique a été utilisée pour renforcer de nombreux ponts et bâtiments à travers le monde. C'est à cause de la corrosion des tôles en acier qui endommage les zones entre le béton et la tôle ainsi que la difficulté de mise en œuvre de cette technique (ACI 440.2R-02, 2002) que des chercheurs ont proposé les matériaux PRF comme alternative à l'acier.

Au cours des 20 dernières années, plusieurs études en Europe, au Japon, au Canada et aux États-Unis, ont été publiées pour le développement des techniques de renforcement par matériaux composites.

a. Pour le Japon

Le Japan Society of Civil Engineers (JSCE) Et le Japan Concrete Institute (JCI) Et l'Institut de recherche technique du chemin de fer (RTRI) Ont publié plusieurs études sur les systèmes de renforcement par PRF dans le cadre du projet de développement technologique intitulé "Technological Development of New Construction Materials.". Ce travail a abouti à la publication de la version japonaise du guide en 1995(Carse et al., 2002) provoquant ainsi une augmentation de l'utilisation des PRF au Japon notamment après le séisme Hyogoken Nanbu de 1995(ACI 440.2R-02, 2002).

b. Aux États Unis

Les États Unis ont commencé à étudier le renforcement par PRF dès les années 1930, néanmoins le développement réel de l'utilisation des matériaux PRF pour le renforcement des structures en

béton a concrètement été entamé qu'à partir des années 1980, et ceux en raison de l'activité de la Nationale Science Fondation (NSF) et de l'Administration fédérale des autoroutes (FHWA).

Également, l'institut ACI (American Concrete Institute) a formé le comité 440 relatives aux renforts en PRF afin de regrouper plusieurs études et applications portant sur la réparation, la réhabilitation et le renforcement par PRF. Ce comité a œuvré moyennant l'organisation de plusieurs colloques internationaux, dont le premier a eu lieu en mars de l'année 1993 au Canada (ACI 440.2R-02, 2002), (Merdas et al 2012)

c. En Europe

Le premier travail expérimental signalé en Europe, c'était en 1978 en Allemagne. Ce dernier a porté sur la modernisation des structures en béton moyennant des matériaux PRF (Wolff and Miessler, 1989). Toutefois, la première application des matériaux PRF pour le renforcement des structures réelles n'a pu voir le jour qu'au 1991 en Suisse. la mise en œuvre de cette application a été réalisée par MEIER.(Meier et al., 1993), depuis de nombreux projets ont été menés, comme BRITE/EURAM intitulé "Fiber Composite Elements and Techniques as Non-Metallic Reinforcement for Concrete 1991" , et le projet EUROCRETE, qui englobe tout un programme entre communautés Européennes entamé en 1993 , ainsi que le travail réalisé par Task Group 9.3 appartenant à la Fédération internationale du béton structurel (FIB) dont les résultats était un bulletin qui a mis l'accent sur les lignes directrices de conception pour le renforcement des structures par PRF (Fib-Bulletin 14, 2001).

d. Au Canada

Le Canada a dû s'intéresser à cette technique de renforcement par PRF comme solution à multiples dégradations constatées au niveau des ponts et des ouvrages d'art. Par conséquent, les Canadiens ont formé en 1989 Le comité Canadien de génie civil relative à la technique des matériaux composites avancés (ACM) ainsi que L'ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures) formés en 1995. Ce comité regroupe un réseau de plus de 200 chercheurs, dont les résultats les plus remarquables sont les guides de conception pour le béton armé de PRF et le renforcement des bâtiments et ponts au Canada, publiés en 2001 par les chercheurs d'ISIS (Benmokrane et al., 1996), (Merdas et al 2012).

3. Technique EBR (externally bonded reinforced)

Ces dernières années, le polymère renforcé par des fibres (PRF) s'est imposé comme le matériau de choix pour le renforcement structurel, en raison de son efficacité de renforcement et de sa légèreté. Tout d'abord, le PRF a été appliqué pour le renforcement des poutres en béton armé selon la technique, et ceux en raison de l'activité de la Nationale Science Fondation (NSF) et de l'Administration fédérale des autoroutes (FHWA).

Également, l'institut ACI (American Concrete Institute) a formé le comité 440 relatives aux renforts en PRF afin de regrouper plusieurs études et applications portant sur la réparation, la réhabilitation et le renforcement par PRF. Ce comité a œuvré moyennant l'organisation de plusieurs colloques internationaux, dont le premier a eu lieu en mars de l'année 1993 au Canada (ACI 440.2R-02, 2002), (Merdas et al 2012)

c. En Europe

Le premier travail expérimental signalé en Europe, c'était en 1978 en Allemagne. Ce dernier a porté sur la modernisation des structures en béton moyennant des matériaux PRF (Wolff and Miessler, 1989). Toutefois, la première application des matériaux PRF pour le renforcement des structures réelles n'a pu voir le jour qu'au 1991 en Suisse. la mise en œuvre de cette application a été réalisée par MEIER.(Meier et al., 1993), depuis de nombreux projets ont été menés, comme BRITE/EURAM intitulé "Fiber Composite Elements and Techniques as Non-Metallic Reinforcement for Concrete 1991" , et le projet EUROCRETE, qui englobe tout un programme entre communautés Européennes entamé en 1993 , ainsi que le travail réalisé par Task Group 9.3 appartenant à la Fédération internationale du béton structurel (FIB) dont les résultats était un bulletin qui a mis l'accent sur les lignes directrices de conception pour le renforcement des structures par PRF (Fib-Bulletin 14, 2001).

d. Au Canada

Le Canada a dû s'intéresser à cette technique de renforcement par PRF comme solution à multiples dégradations constatées au niveau des ponts et des ouvrages d'art. Par conséquent, les Canadiens ont formé en 1989 Le comité Canadien de génie civil relative à la technique des matériaux composites avancés (ACM) ainsi que L'ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures) formés en 1995. Ce comité regroupe un réseau de plus de 200 chercheurs, dont les résultats les plus remarquables sont les guides de conception pour le béton armé de PRF et le renforcement des bâtiments et ponts au Canada, publiés en 2001 par les chercheurs d'ISIS (Benmokrane et al., 1996), (Merdas et al 2012).

3. Technique EBR (externally bonded reinforced)

Ces dernières années, le polymère renforcé par des fibres (PRF) s'est imposé comme un matériau de choix pour le renforcement structurel, en raison de son efficacité de renforcement et de sa légèreté. Tout d'abord, le PRF a été appliqué pour le renforcement des poutres en béton armé selon la technique EBR (External Bonded reinforced). Cette technique se caractérise par un processus de mise en œuvre facile, et une bonne efficacité de renforcement (Khalifa, 1999) (Oehlers and Seracino, 2004).

Plusieurs études à travers le monde ont été menées visant à comprendre le comportement des poutres renforcées selon la technique EBR et l'influence de plusieurs paramètres.

3.1 Méthode de mise en œuvre de la technique EBR

Le renforcement des poutres par des tissus et plates en PRF selon la technique de EBR (externally bonded reinforced) peut être résumer comme suit (Khalifa, 1999) :

- a) La première étape consiste à préparer la surface du béton sur la partie tendue à l'aide d'un sablage ou bien un arrosage par de l'eau ou toute autre technique d'abrasion mécanique afin d'ouvrir les pores et favoriser l'adhérence, en effet la surface du béton doit être exempte des impuretés.
- b) Ainsi la surface du béton préparée, elle peut recevoir une couche primaire à base de résine étalé à l'aide d'un rouleau à serviette courte, permettant à cette dernière de pénétrer les pores du béton offrant à la liaison entre le béton et le renfort le maximum d'adhésion.
- c) Ensuite, une mince couche de mastic (une pâte époxy épaisse), est appliquée à l'aide d'une spatule afin de niveler la surface et combler les trous.
- d) Une première couche de résine saturante sera appliquée à l'aide d'un rouleau après que le mastic est devenu sans adhésif. Les fonctions de la résine saturante consistent à imprégner les fibres sèches, à maintenir les fibres dans leur orientation prévue.
- e) Les tissus ou les plats en PRFC seront mesurés et découpés en suite collée à la surface, éliminer les bulles d'air à l'aide d'une spatule. Pour faciliter l'imprégnation, on utilise un rouleau à nervures pour laminer dans le sens des fibres.
- f) Les tissus ou les plats peuvent être ensuite repeintes par une couche protectrice en résine saturante et la résine qui déborde sera retirée.

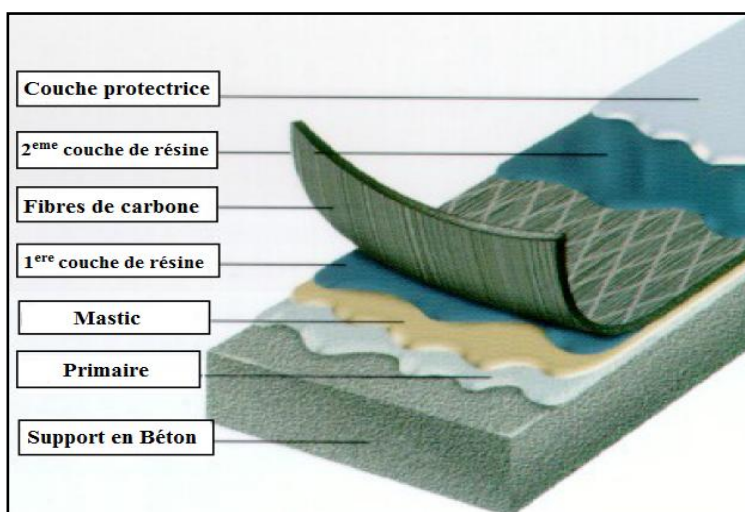
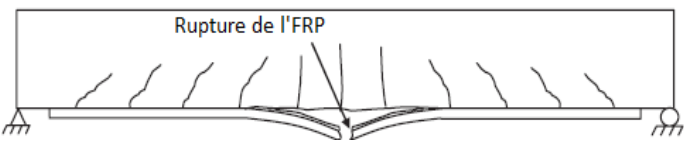
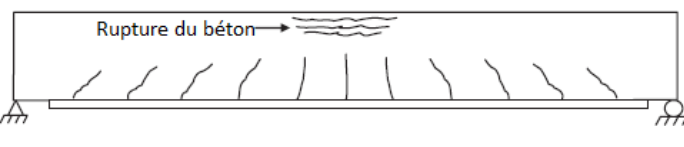
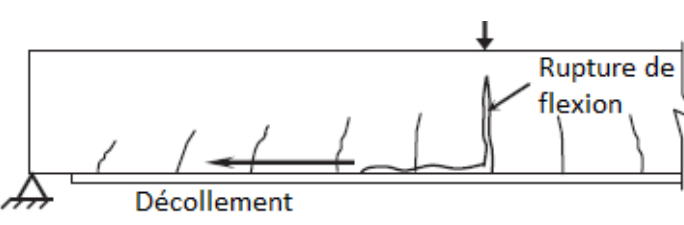


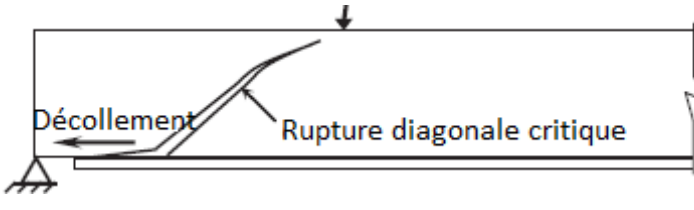



Figure II-1 : Procédure d'application des PRFC selon la technique EBR (Khalifa, 1999).

3.2. Modes de rupture relatifs à la technique EBR

Les recherches antérieures ont différencié plusieurs modes de rupture des poutres renforcées par PRF selon la technique EBR tel que (Oehlers and Seracino, 2004) et (Teng et al., 2002a). Le tableau suivant présente lesdites modes de ruptures :

Tableau II-1 : Mode de rupture pour la technique EBR.

N°	Type de rupture	Description	Source
01		Rupture du renfort en PRF après perte de l'effet combiné PRF /Béton (mauvaise adhésion)	(Teng et al., 2002a)
02		Rupture du béton dans la partie comprimée une bonne combinaison PRF /Béton	(Teng et al., 2002a)
03		Le Décollement se propage du centre vers les extrémités dû à une rupture de flexion dans la zone du moment max Décollement de l'interface époxy-béton	(Teng et al., 2002a), (Lu et al., 2007)

04		critical diagonal crack (CDC)	Le décollement se produit à ou près d'une extrémité de la plaque (c'est-à-dire des ruptures de décollement de la plaque) à cause d'une fissuration diagonale critique	(Oehlers and Seracino, 2004)
05		CDC concrete cover separation	Le décollement se produit à ou près d'une extrémité de la plaque avec une séparation d'enrobage du béton	(Yao and Teng, 2007)
06			Séparation de l'enrobage du béton	(Teng et al., 2002a)
07			Décollement de l'extrémité de la plaque Décollement de l'interface renfort-époxy	(Teng et al., 2002a)

3.2.1. Fissure intermédiaire de délaminage (intermédiaire crack : IC)

Les modes de rupture représentés sur le Tableau II-1 ligne 03, il se manifeste par l'ouverture d'une fissure qui commence à s'ouvrir sur le béton sollicitant la plaque en PRF collée à ce dernier par des contraintes créées à cause de la séparation des deux extrémités de la fissure. Ces contraintes provoquent ainsi des fissurations horizontales au niveau de l'interface adhésive entre le béton et le renfort. Ce mode de rupture est baptisé, la fissure intermédiaire de l'interface (IC), cette fissure se propage à cause des contraintes normales engendrées par l'ouverture de la fissure verticale combinée avec les sollicitations de cisaillement qui augmente avec le chargement (Mesbah and Chikh, 2017).

3.2.2 Fissure critique diagonale (Critical diagonal crack : CDC)

La fissure diagonale critique (Tableau II-1 ligne 04) est un mode de rupture qui se produit en conséquence d'un glissement entre deux compartiments rigides sous l'effet des sollicitations de cisaillement ou de flexion. Ce glissement s'effectue par une fissure diagonale qui provoque le détachement du renfort sous une action de rotation à partir de la fissure vers l'extrémité (Mesbah and Chikh, 2017).

3.3. Influence du nombre des couches de PRFC et leurs longueurs sur les poutres en béton armé renforcées en flexion.

L'étude de (Anju Antony et al.2019) a porté sur l'évaluation du comportement des poutres renforcées selon la technique EBR exécutée conventionnellement et la technique EBR exécutée selon la méthode GM. La spécificité de cette méthode est de réaliser un traitement plus en profondeur des surfaces a renforcée de sorte à augmenter la surface de liaison entre le renfort et le béton.

Dans cette recherche expérimentale, quatorze poutres en béton armé ont subi une flexion à trois points, leurs dimensions sont 120x140x1000 mm. Lesdites poutres ont été renforcées par des lamelles en PRFC, dont une poutre de référence et quatre renforcées par la technique EBR et neuf selon la méthode GM avec différents motifs de rainures et longueurs de liaison.

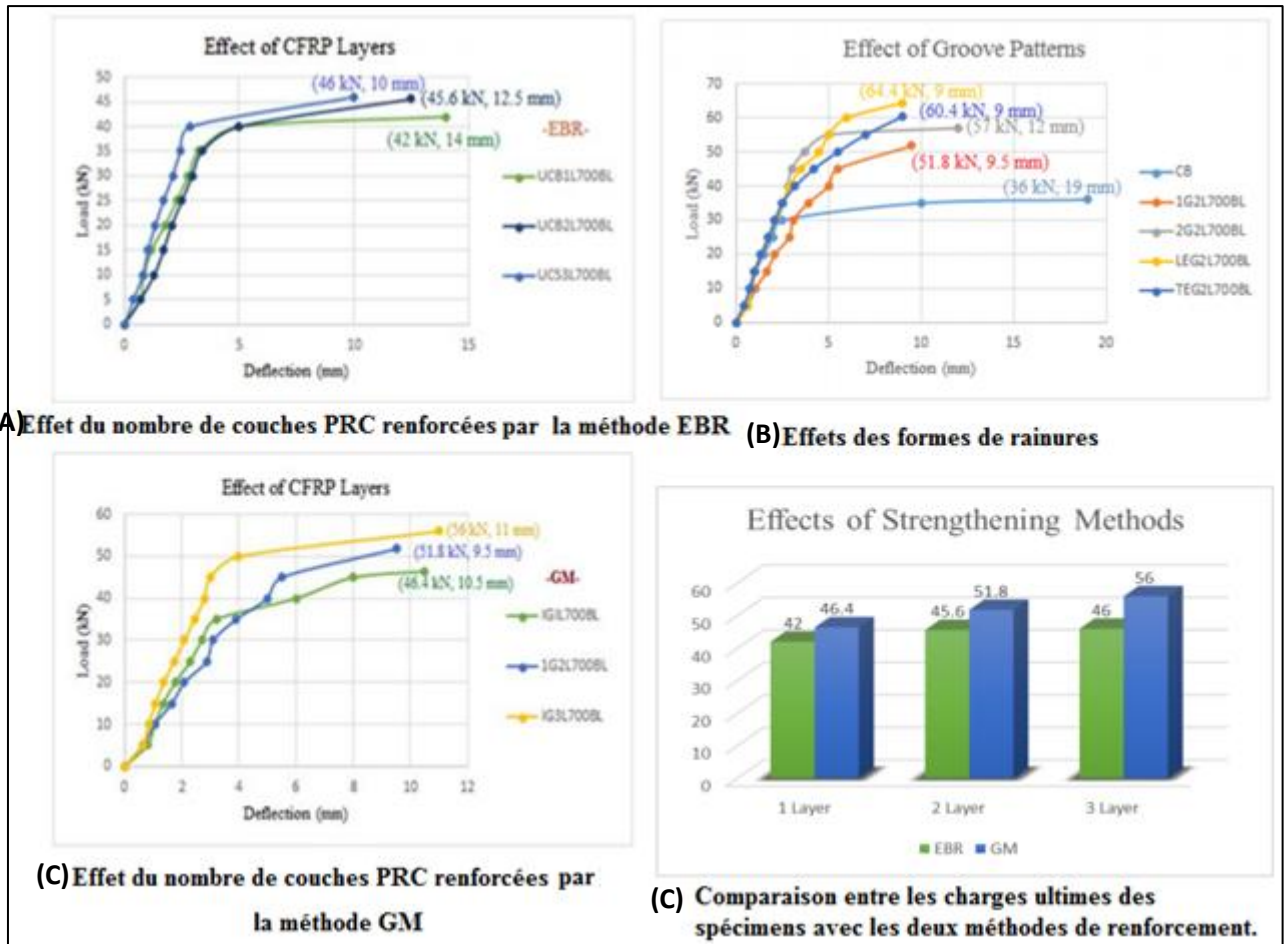


Figure II-2 : Résultat de l'étude de (Anju Antony et al.2019).

A partir des résultats représentés sur la Figure II-2 les chercheurs ont conclu que :

- Les tissus en PRFC correctement collés à la face de traction peuvent améliorer considérablement la résistance à la flexion des poutres. Les spécimens d'EBR présentent une augmentation de la résistance à la flexion de 16,67% pour une seule couche, 26,67% pour deux couches et 27,78% pour trois couches de feuilles de PRFC. Toutefois, un décollement prématuré a été le principal problème observé pour tous les spécimens renforcés par la méthode EBR.
- Les échantillons GM avec un seul motif de rainures longitudinales présentent une augmentation de la résistance à la flexion de 28,89% pour simple couche, 43,89% pour deux couches et 55,56% pour trois par rapport aux spécimens sans aucune préparation de surface.
- La méthode GM est très performante et plus efficace lorsque deux couches de feuilles de PRFC ont été utilisées, où le décollement prématuré a complètement été éliminé.
- La capacité de charge est également affectée par la longueur de la liaison des PRFC. La longueur de la liaison en PRFC a varié de 700 mm, 650 mm et 600. Il a été observé que la diminution de la longueur d'adhérence diminue la capacité de charge des spécimens renforcés.

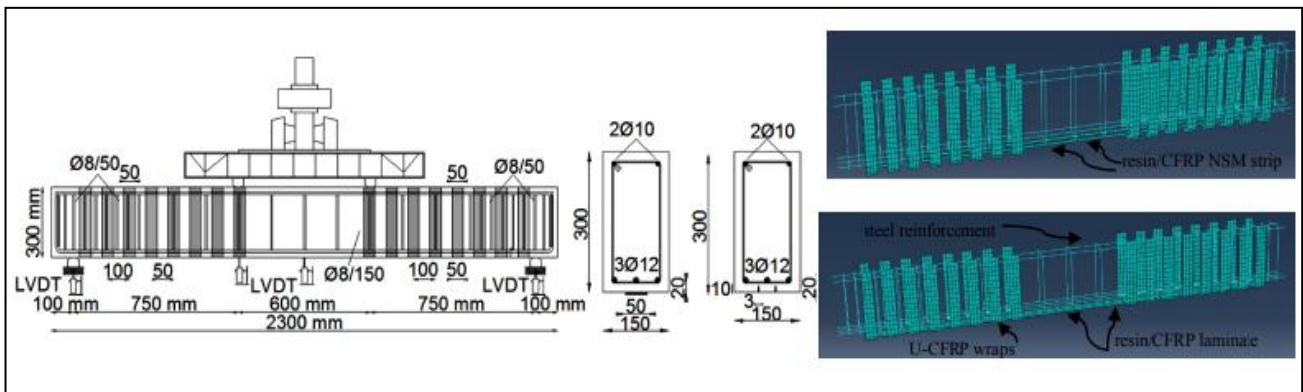
par la méthode EBR et GM. La longueur du liant de 700 mm donne le meilleur résultat parmi toutes les poutres renforcées.

- La méthode GM est une technique très efficace pour les poutres renforcées par des lamelles de PRFC multicouches. Les poutres renforcées avec cette méthode ont eu une augmentation de la charge de rupture ultime de 28 à 79 % par rapport aux spécimens sans préparation de surface.

3.4. L'effet de la corrosion de l'acier sur la réponse des poutres en béton renforcées par le PRFC selon les techniques EBR et NSM

Les travaux publiés par (Triantafyllou et al., 2017) présentent une investigation expérimentale et une étude numérique qui porte sur le comportement des poutres renforcées par la technique EBR avec des aciers à faible et moyenne corrosion.

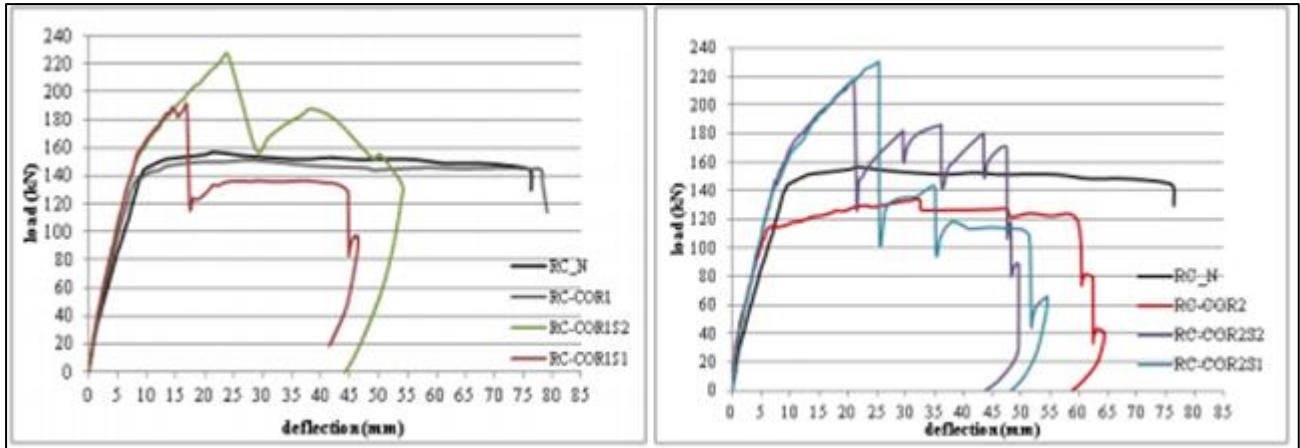
Six poutres en béton armé ont été corrodées par une technique de corrosion accélérée à des niveaux de corrosion faibles et moyens respectivement. Deux poutres ont été utilisées comme référence, tandis que les quatre autres ont été réparées par patch et renforcées par un renfort collé à l'extérieur (EBR) et monté près de la surface (NSM) avec une rigidité axiale équivalente. Les poutres ont été testées jusqu'à la rupture sous une charge en quatre points. Les modèles d'éléments finis 3D développés tiennent compte des différentes propriétés mécaniques et les détails des barres corrodées ainsi que la pièce de mortier et l'interface béton - mortier existant.



(A) Configuration

(B) modélisation numérique

Figure II-3 : Détail de l'étude de (Triantafyllou et al., 2017).



(A) Expérimentale

(B) Numérique

Figure II-3 : Courbes de charge-déflexion des poutres testées selon le modèle expérimental et le modèle FE de l'étude de (Triantafyllou et al., 2017).

Il a été montré dans cette étude que toutes les poutres renforcées ont enregistré une capacité de charge supérieure à la poutre de référence non corrodée. Cette augmentation a été également perçue pour les poutres renforcées en traction avec une corrosion moyenne.

Si l'enrobage du béton est correctement repris, les deux techniques EBR et NSM peuvent réparer efficacement les structures avec des barres d'acier corrodées.

Les modèles 3D en éléments finis développés ont été capables de reproduire le comportement des poutres non corrodées et les poutres corrodées ainsi que les poutres de références.

Les principaux modes de défaillance sont le décollement et le laminage des PRFC et le décollement de l'interface des bandes en époxy- PRFC.

4. Technique NSM (Near surface mounted)

Plusieurs chercheurs comme (Rahimi and Hutchinson, 2001), (Teng et al., 2002b), (Soudki and Alkhrdaji, 2005), (Hollaway and Leeming, 1999), (Oehlers et al., 2008), (Yao and Teng, 2007), (Arduini and Nanni, 1997) ont prouvé que la technique de renforcement EBR malgré son efficacité reste limitée. Les inconvénients, qu'ils ont constaté, sont le décollement précoce et prématuré du renfort et l'exposition du renfort aux chocs et aux incendies. Raison pour lesquelles d'autres chercheurs comme (Nanni, 2000), (Barros and Fortes, 2005), (Rizkalla et al., 2003) (de Sena Cruz and Oliveira de Barros, 2004), (De Lorenzis and Nanni, 2002), (De Lorenzis et al., 2004), (El-Hacha and Rizkalla, 2004) ont développé une technique de renforcement par PRF appelé NSM (Near surface mounted). Cette alternative consiste à installer des tiges ou des barres de PRF dans des rainures au niveau de l'enrobage du béton dans la partie tendue. Une nouvelle technique qui permet une application

relativement rapide. En effet, l'NSM n'exige pas des préparations spéciales sur le béton, contrairement à l'EBR.

Les barres de PRF les plus utilisées des applications selon la technique NSM ont des dimensions de 1,2 à 4,5 mm en largeur et une hauteur de 9 à 25 MM. Tandis que, pour tiges ils ont un diamètre qui varie entre 9 à 12,7 mm (Barros and Kotynia, 2008).

4.1. Méthode de mise en œuvre de la technique NSM

D'une manière générale, pour réaliser un renforcement avec la technique NSM, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes (Almassri, 2015) :

- ✓ Ouvrir une rainure au niveau de l'enrobage du béton suivant la direction voulue à l'aide d'une scie mécanique.
- ✓ Nettoyer les poussières à l'aide de l'air comprimé ainsi que les gravats restants.
- ✓ Préparez la colle en résine époxy conformément aux recommandations du fabricant.
- ✓ Remplissez la rainure à mi-hauteur en résine époxy puis placer le renfort en PRFC à l'intérieur.
- ✓ Presser le PRFC dans la rainure pour être recouverte de tous les facettes.
- ✓ Remplir le reste de la quantité de résine époxy dans la rainure afin de s'assurer qu'il n'y a pas des vides
- ✓ Pour terminer niveler la surface de la rainure.

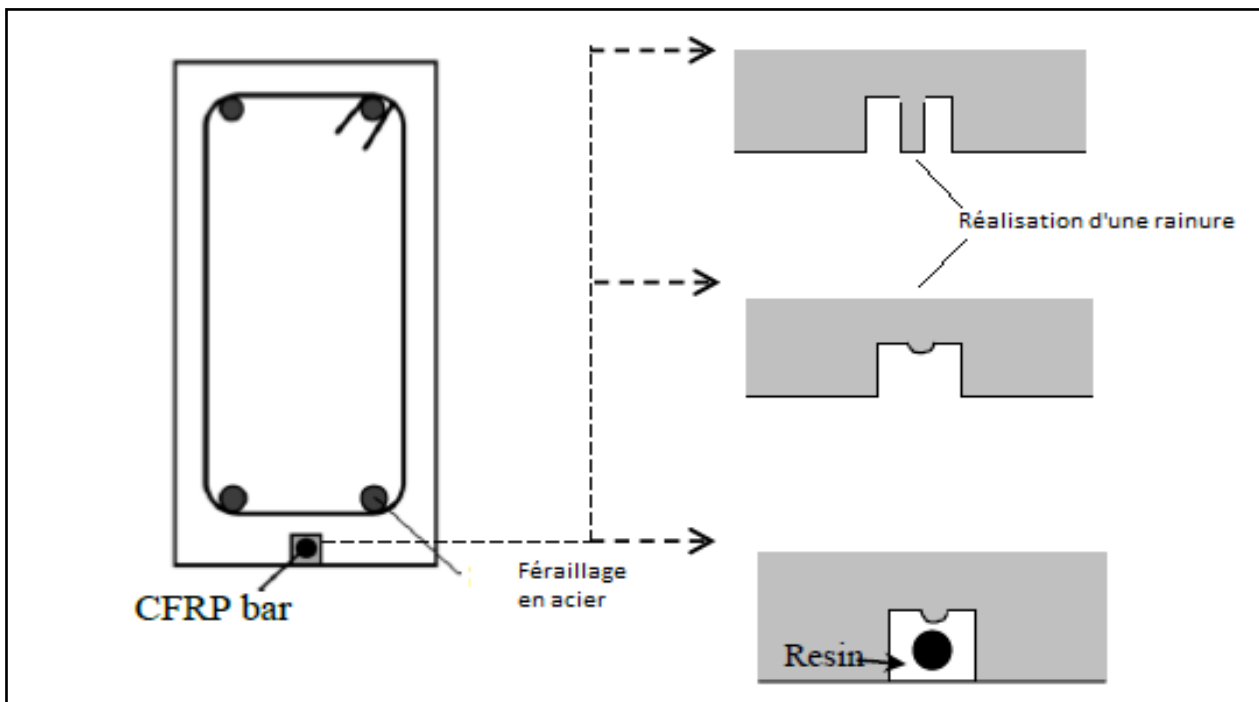


Figure II-5 : Procédure d'application des PRFC selon la technique NSM (Almassri, 2015).

4.2. Modes de rupture relatifs à la technique NSM

Dans le cas idéal, la rupture des éléments renforcés par des PRFC avec la méthode de renforcement NSM sera soit par rupture du renfort en PRFC ou par rupture du béton par compression (Figure II-6 a et b). Cependant, dans certains cas, on constate d'autres modes de rupture, tels que signaler par des chercheurs comme (Rashid et al., 2008), (Oehlers et al., 2008) et (De Lorenzis and Teng, 2007). En l'occurrence, des ruptures qui se manifestent par séparation de l'enrobage du béton ou par détachement du renfort.

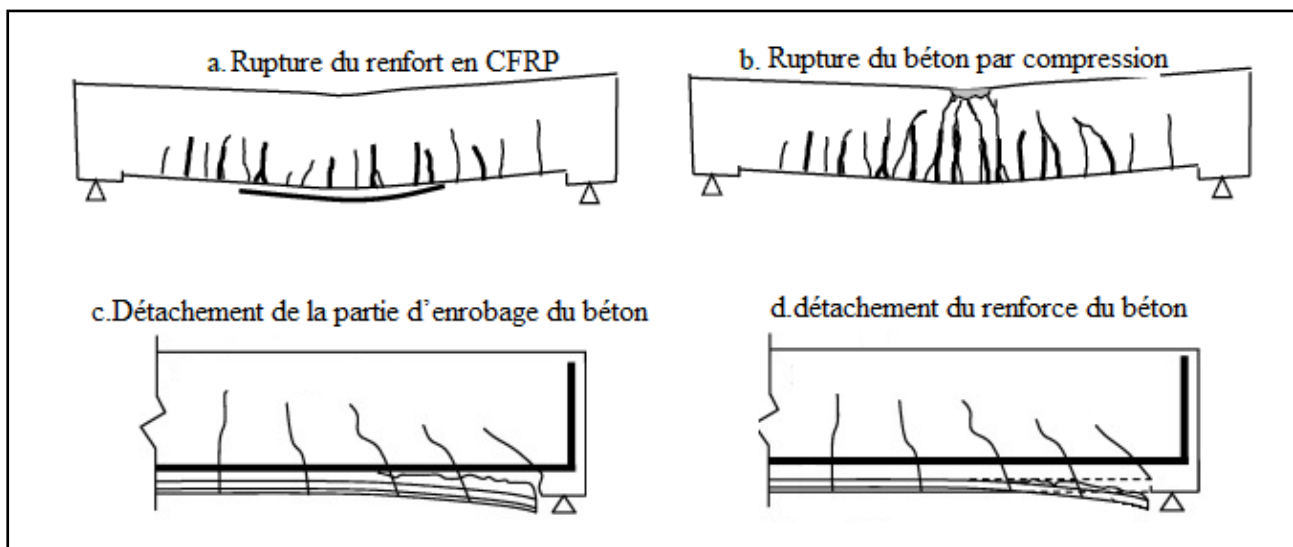


Figure II-2 : Les modes de rupture de la technique NSM.

4.2.1. Mécanisme de rupture par séparation de l'enrobage

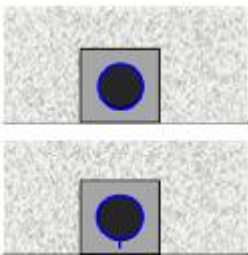
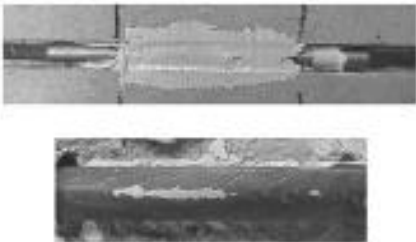
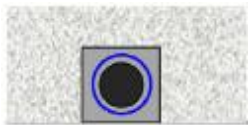







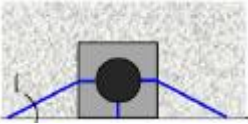

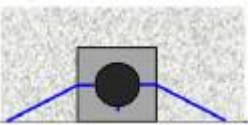

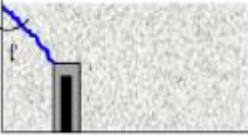

Cette rupture se produit rapidement et brusquement, où on constate un détachement de la partie inférieure et une mise à nu des armatures en acier (Figure II-6 c). Généralement, la raison de ce mode de rupture est la bonne adhérence du renfort et la résistance de l'interface entre le béton et le renfort. Cette adhérence engendre deux corps rigides qui se séparent au niveau de la partie basse des armatures tendues.

4.2.2. Mécanisme de rupture par détachement du renfort

Le détachement du renfort représenté sur la (Figure II-6 d) aura lieu à défaut de l'insuffisance d'adhérence. Le mécanisme de cette rupture est similaire au mode de rupture précédemment évoqué, relatif à la technique EBR à savoir (intermédiaire crack IC and interfacial Failure)

Le Tableau II-2 montre toutes les possibilités de séparation à l'origine des ruptures

Tableau II-2 : Mode de rupture pour la technique NSM (De Lorenzis and Teng, 2007).

N°	Mode rupture	Photo	Descriptif
01			Rupture interfaciale de l'interface tige-époxy
02			Rupture de cisaillement cohésive de l'interface tige-époxy dans l'époxy
03			Rupture interfaciale de l'interface béton-époxy
04			Rupture cohésive de cisaillement interface époxy béton dans le béton
05			Fraction de la couverture époxy sans rupture du béton
06			Fraction de la couverture époxy avec rupture du béton selon un plan incliné
07			Fraction invisible de la couverture époxy avec rupture du béton selon un plan incliné
08			Rupture du bord du béton

4.3. Influence de la taille et le type du renfort en PRFC ainsi que l'épaisseur de l'enrobage en béton sur les poutres renforcées

L'étude expérimentale de (Merdas et al 2012) mise l'accent sur l'influence de la forme du renfort en PRFC et l'épaisseur de l'enrobage en béton sur les poutres renforcées selon la technique NSM. Afin d'étudier les paramètres expérimentaux suivants : type de renfort PRFC ; l'épaisseur de l'enrobage du béton ; taille et type de renfort ; types de montage, 12 poutres en BA renforcées par PRFC selon la technique NSM ont été réalisées et mise sous flexion quatre.

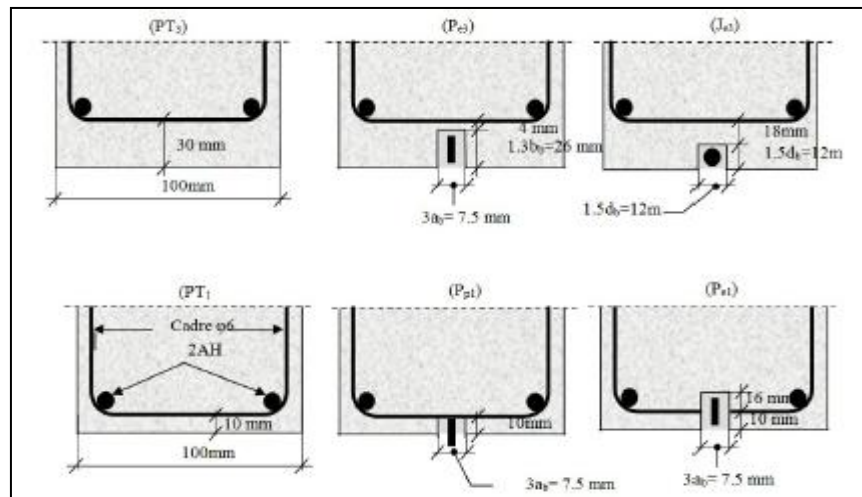


Figure II-7 : Configuration des spécimens de l'étude de (Merdas et al 2012).

Les résultats de cette étude montrent que pour des faibles niveaux de charge génère moins de 17% de la charge ultime, ce sont toujours les poutres en béton renforcées par les plats et les joncs de carbone qui se déforment le moins dans chaque série par rapport aux poutres témoins.

On note que la charge ultime des poutres renforcées par jonc et plat de carbone a subi une augmentation de résistance de 30 à 75 % par rapport aux poutres témoins.

On observe que les poutres témoins avec un enrobage plus faible, ont à une résistance en flexion plus importante. Ce qui est cohérent sachant que nos aciers sont placés davantage sur les extrémités de la poutre. Le bras de levier est donc plus important, ce qui conduit à augmenter le moment de flexion. Ces poutres ont une résistance en flexion moins importante que les poutres avec joncs et plats carbonés.

4.4. Effet du taux et de la longueur du renforcement sur le comportement en flexion des poutres en béton armé

Des études ont portées sur l'effet du taux et de la longueur du renforcement sur le comportement en flexion des poutres en béton armé renforcées selon NSM. Parmi elles ont à l'étude de (Hesham EL-Emam et al., 2020). Lors de cette étude, neuf poutres divisées en trois groupes principaux ont été

testées sous flexion en quatre points. Les trois poutres du premier groupe ont été renforcées par différentes longueurs de PRFV et ayant un enrobage en béton de 50 mm, tandis que les trois poutres du second groupe ont été renforcées de la même manière que le premier avec un enrobage de 30 mm.

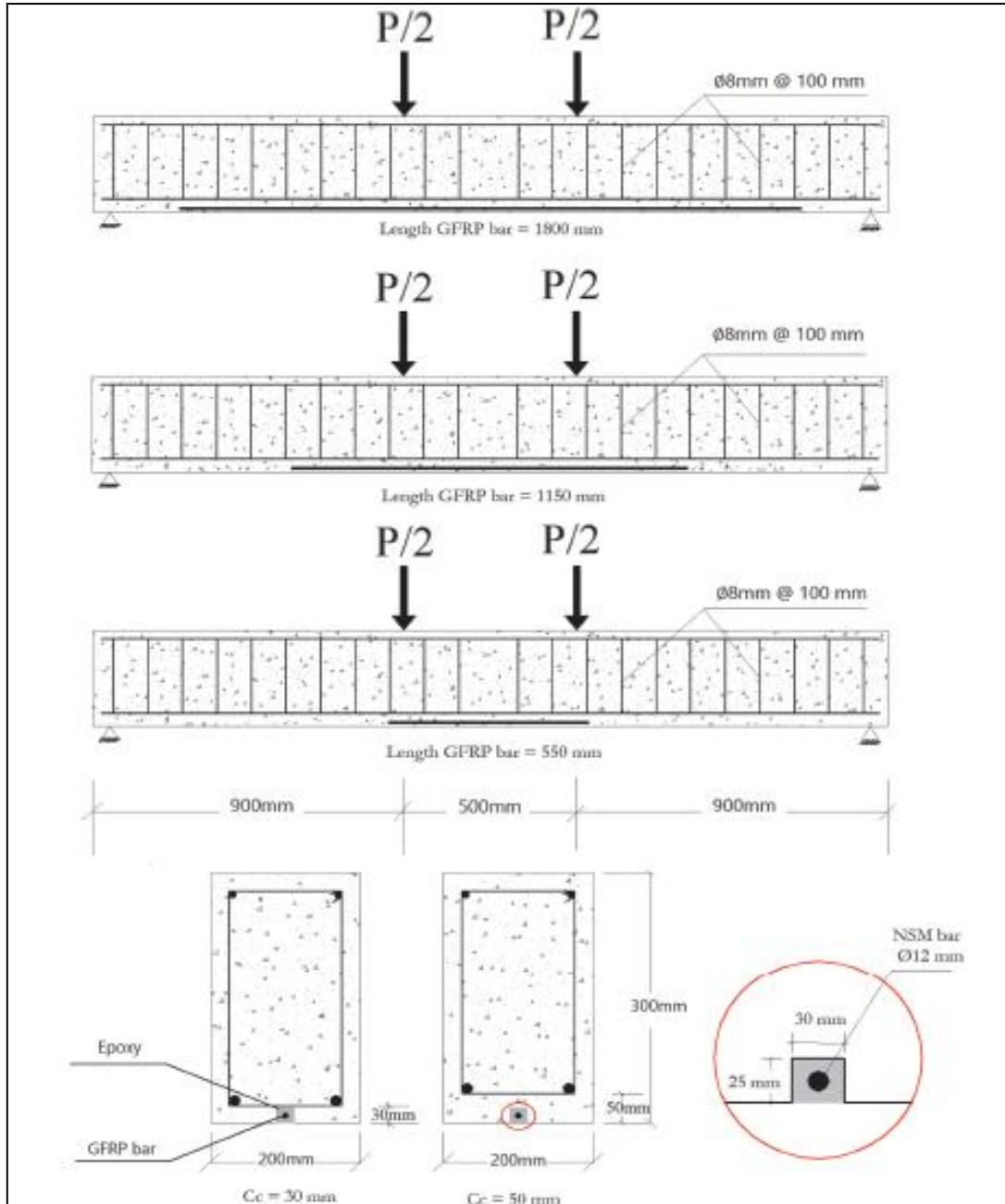


Figure II-8 : Configuration des spécimens de l'étude de (Hesham EL-Emam et al., 2020).

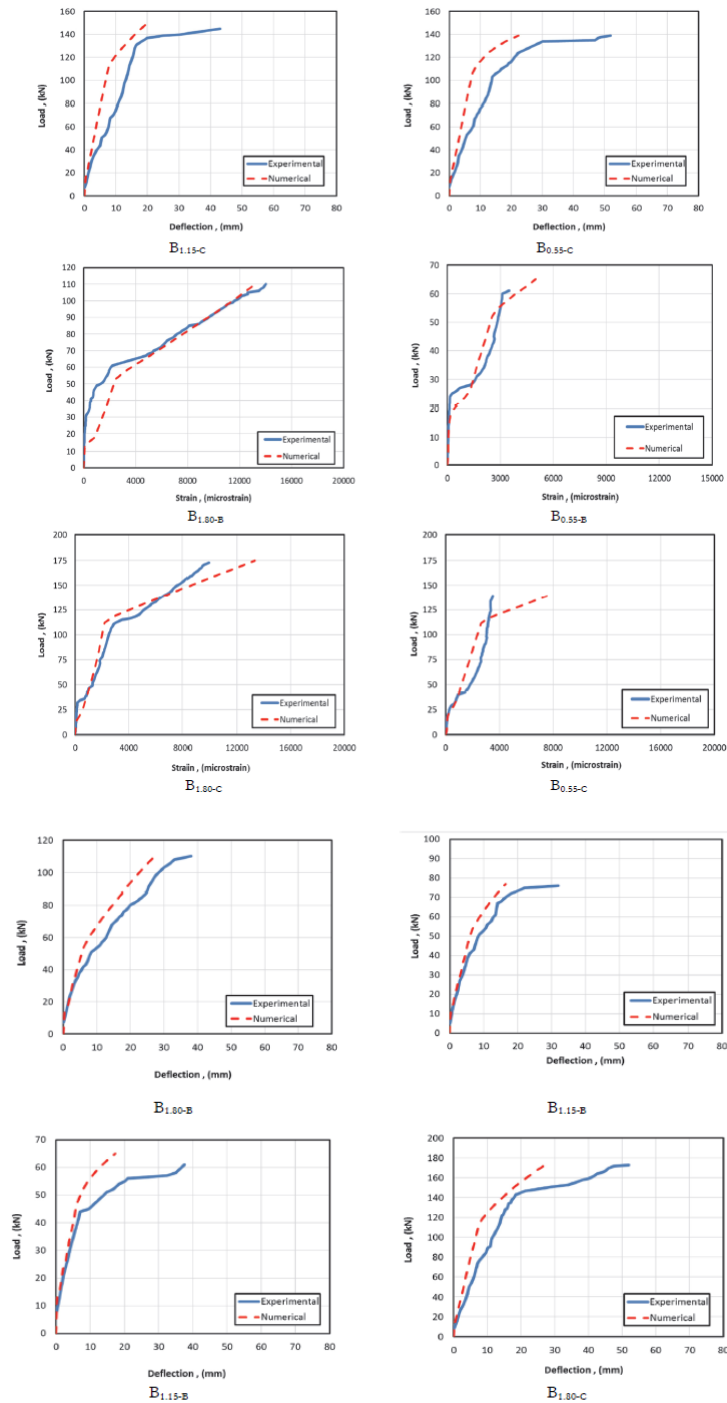


Figure II-9 : Les résultats de l'étude de (Hesham EL-Emam et al., 2020).

La lecture des graphes ci-dessus, permet de conclure que :

La diminution de l'enrobage de béton a une influence positive sur la capacité de flexion des poutres renforcées par des tiges en PRFV NSM. Contrairement à la diminution de la longueur des barres PRFV NSM qui a contre balancé cette amélioration.

La résistance à la flexion des poutres en béton armé a été augmentée avec l'augmentation de la longueur et le taux de renforcement. L'augmentation du renforcement en acier de traction de 2-Ø10mm

à 2-Ø16mm a influencé positivement sur la capacité des poutres en béton armé avec un gain de l'ordre de 57,27%, 90,7% et 127,8% pour les longueurs de barres en PRFV NSM de 1800mm, 1150 mm et 550 mm respectivement.

4.5. Effet de la rigidité du renfort en PRF du NSM et du confinement de l'enrobage du béton sur le comportement en flexion des poutres renforcées

(Sharaky et al., 2018) ont étudié l'efficacité de la rigidité et le type de confinement des barres en PRF sur le rendement et les modes de rupture des poutres renforcées par la technique NSM. Lors de cette étude, le confinement de l'enrobage en béton a été mis en place moyennant un verrouillage mécanique avec des connecteurs de cisaillement, où un emballage transversal a également été utilisé.

A l'issue de cette investigation il s'est avéré que le confinement a augmenté considérablement la capacité de charge des poutres. Le renforcement sans confinement de la couverture en béton a influencé positivement sur la charge ultime des poutres ceux-ci avec 50% et 70% de gain par rapport à la poutre de référence. Tandis que, le verrouillage mécanique avec des connecteurs de cisaillement et un enroulement transversal, ont permis une augmentation jusqu'à 23,3% et 33% respectivement.

Une rupture produite par séparation d'enrobage du béton lorsqu'une valeur critique du rapport de rigidité axiale a été atteinte. Par conséquent, la charge ultime des poutres renforcées n'a pas été affectée par l'augmentation du rapport de rigidité axiale au-delà de cette valeur.

4.6. Effet de la forme des extrémités du renfort sur les poutres renforcées

(Reda et al., 2016) ont plié les extrémités des barres en PRFV dans l'objectif d'empêcher le décollement du PRF et la séparation de l'enrobage du béton et ainsi augmenter la capacité de charge des poutres renforcées. Dans cette recherche, les angles d'inclinaison des barres en PRFV à extrémités recourbées étaient de 90° et 45°. Des barres droites en PRFV de longueurs variables ont également été utilisées comme références. A travers cette étude, les chercheurs ont démontré que les barres en PRFV aux extrémités pliées empêchaient la séparation de l'enrobage en béton et augmentaient la capacité de charge des poutres renforcées. La capacité de charge des poutres renforcées par des barres droites NSM et celles ayant des extrémités inclinées à 45° et 90° était respectivement de 177%, 201% et 185% comparés à la poutre de référence.

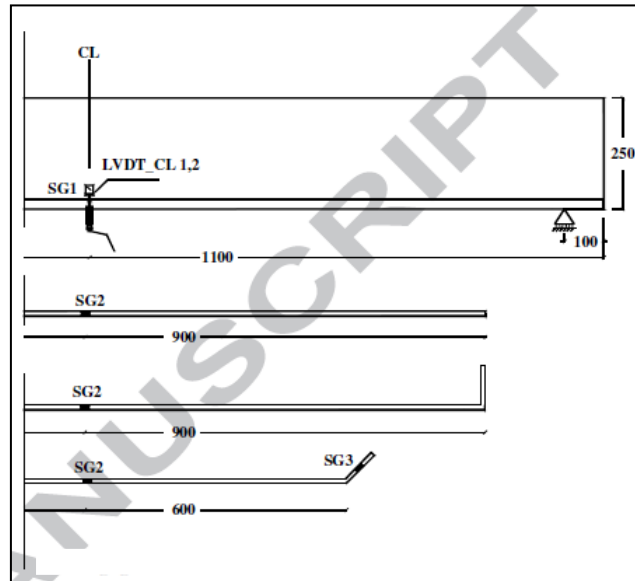


Figure II-10 : La configuration des poutres de l'étude de (Reda et al., 2016).

5.La combinaison entre la technique EBR et NSM appelé (EBROG/CEBNSM)

De nombreux chercheurs ont pensé à combiner les deux techniques de renforcement dans l'objectif d'augmenter la surface de liaison entre le renfort et le béton. Cette technique est mise en place pour éviter les inconvénients des deux techniques notamment les modes de rupture brusque et fragile. C'est la raison pour laquelle (Mostofinejad and Moghaddas, 2014) ont testé douze poutres en béton armé selon la configuration qui apparait sur la Figure 2-11. Les résultats de cette étude permettent de constater que la technique combinée peut augmenter la capacité de charge ultime et la ductilité, et d'absorber l'énergie dans les poutres en évitant la rupture précoce.

Outre à la difficulté d'exécution de cette technique, elle nécessite une quantité importante de renfort et de résine époxy en comparaison aux autres techniques.

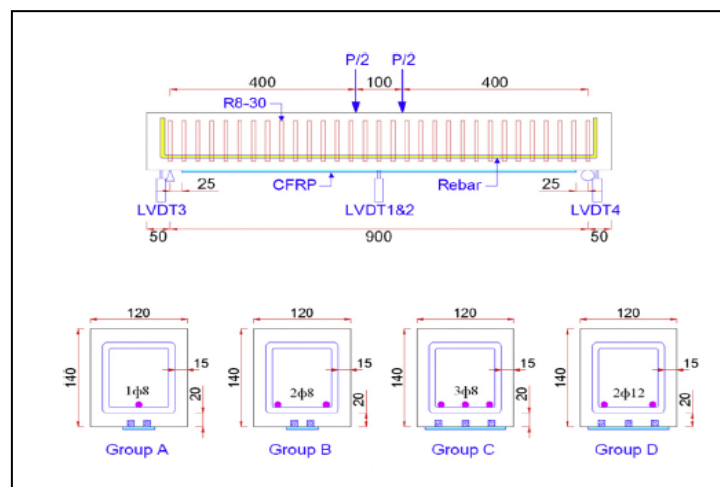


Figure 2-11 : Configuration des poutres testés lors de l'étude de (Mostofinejad and Moghaddas, 2014).

6. Technique SNSM (Side near surface mounted)

La technique NSM (Near Surface Mounted) est une technique de renforcement efficace. Toutefois, la mise en pratique de cette technique est parfois difficile notamment lors des réparations des poutres touchées par des pathologies comme la corrosion des armatures. Ces pathologies qui touchent les parties basses font que cette technique devient inutilisable. La technique NSM est aussi difficile à réaliser lorsque les bâtiments sont en occupation où on trouve fréquemment des cloisons au-dessous des poutres (Abdallah et al., 2020). C'est pour ces raisons que Md Akter Hosen et al ont proposé une technique alternative appelée SNSM (Side Near surface mounted) dont la spécificité est de placer le renfort au niveau des facettes latérales verticales au lieu de la partie basse. Ceci répond aux difficultés citées précédemment et permettra également d'augmenter le nombre des barres en PRF vue le gain de surface par rapport à la technique NSM.

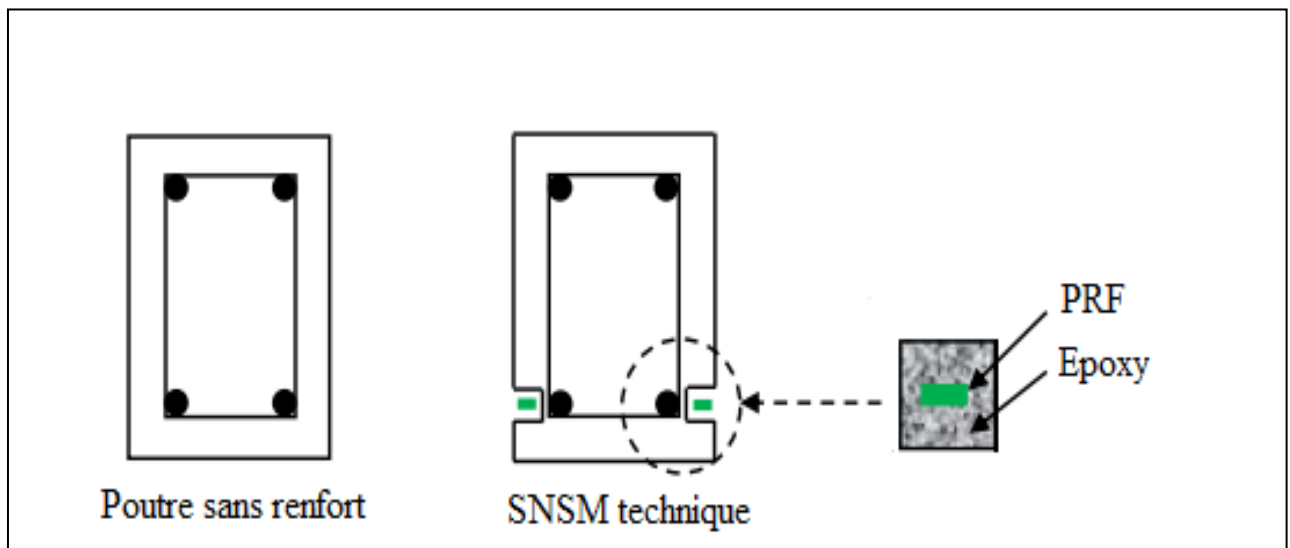


Figure 2-12 : Technique de renforcement SNSM.

6.1 Influence du type et du taux de renforcement

Md Akter Hosen et al (Hosen et al., 2015) ont étudié la technique SNSM particulièrement l'influence du type du renfort entre acier et PRFC et l'impact de la quantité de ce dernier sur la résistance des poutres où des barres de plusieurs diamètres ont été utilisées. Cette investigation expérimentale a porté sur sept poutres en béton armées selon la configuration représentée sur la Figure II-13 ont été soumis à un essai de flexion quatre points.

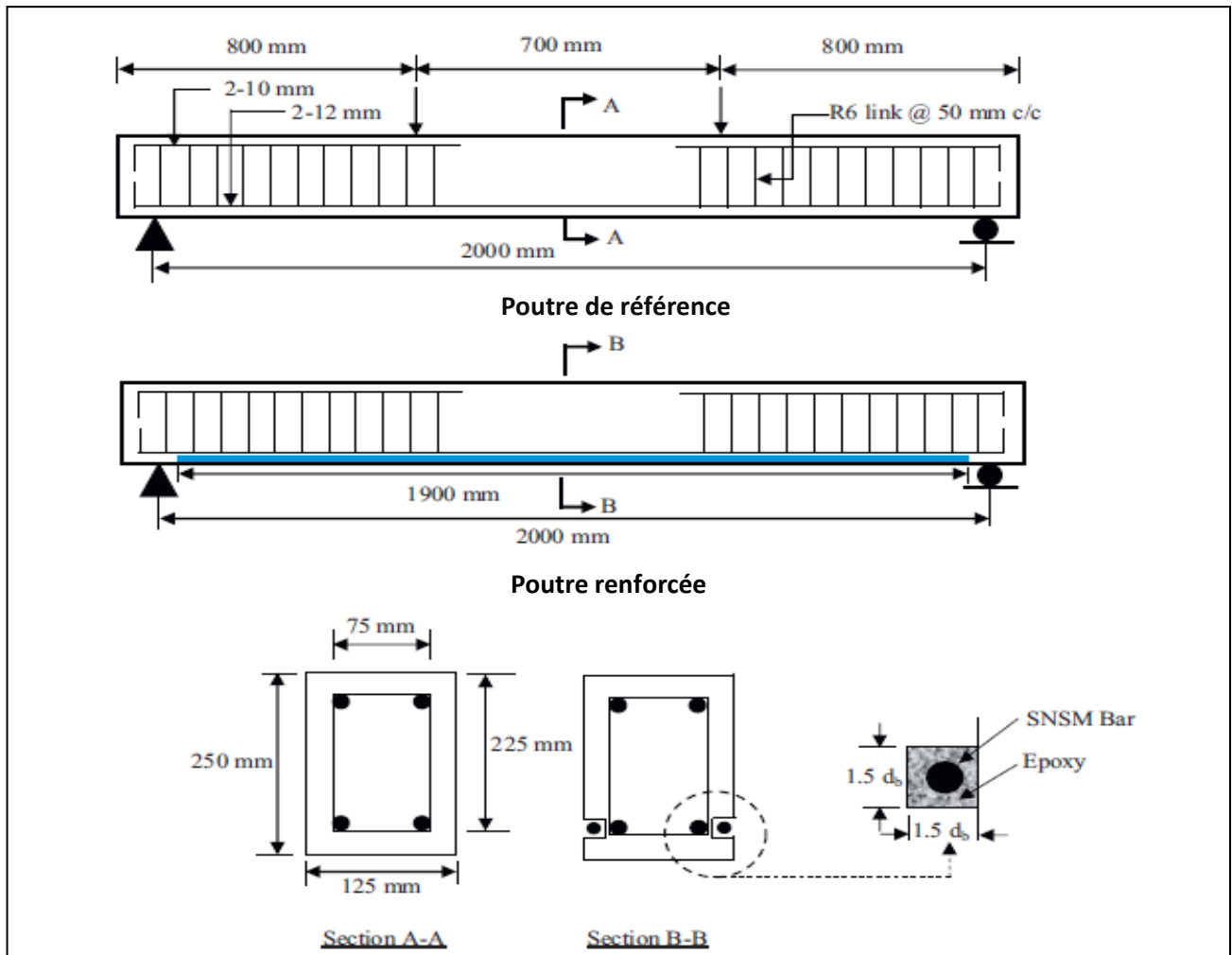


Figure II-13 : Configuration des poutres testes lors de l'étude de (Hosen et al., 2015).

Les résultats de cette étude (voir Figure II-14) ont permis de constater que la technique SNSM améliore de manière significative le comportement en flexion des poutres. Le rendement et les capacités de charge ultime des poutres ont été multipliés par 2 et 2,38 fois, respectivement. Les charges de fissuration se sont améliorées de manière plus notable (3,17 fois), cependant la ductilité a été mieux préservée au niveau des poutres renforcées par de l'acier en comparaison avec ceux renforcée par du PRFC. Il a été également constaté que la quantité du renfort en acier ou en PRFC permet d'augmenter les premières charges de fissurations.

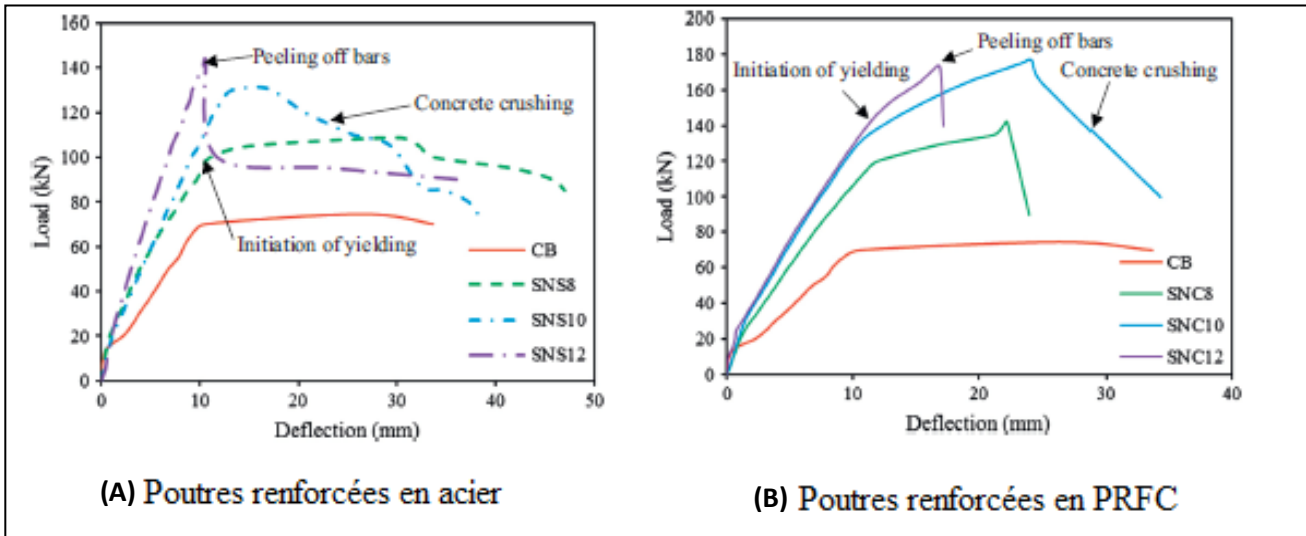


Figure II-14 : Résultats de l'étude de (Hosen et al., 2015).

6.2. Comportement des poutres en béton armés réparées par la technique SNSM

Le comportement des poutres en béton arme pré fissuré renforcées par la technique SNSM a fait l'objet d'une étude expérimental mené par (Shukri et al., 2016), les chercheurs ont testé sept poutres ayant la même configuration que celle de l'étude précédente, où trois poutres ont été testées après fissuration et une poutre de référence et les trois autres ont été renforcées sans fissuration au préalable.

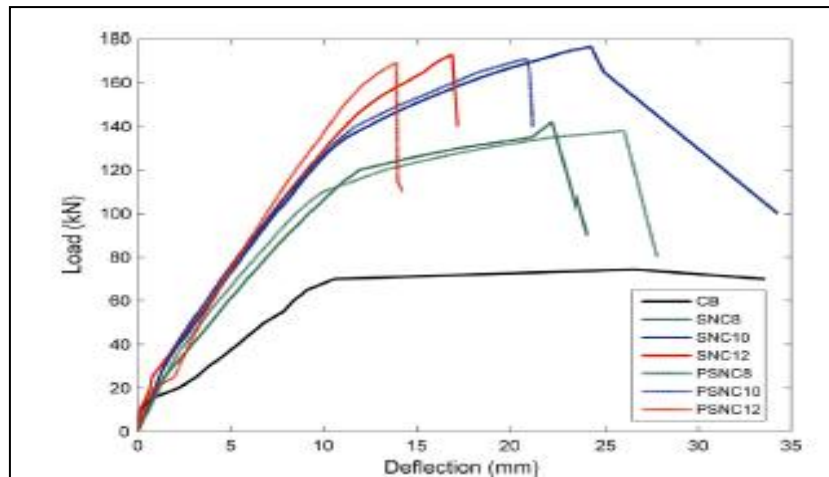


Figure II-15 : Résultats de l'étude de (Shukri et al., 2016).

Les résultats qui apparurent sur la Figure II-15, permettent de conclure que la charge ultime des poutres testées a subi une diminution de l'ordre 3,3 % en raison de la pré fissuration et que la rigidité des poutres pré fissuré s'est avérée supérieure à celle des poutres non-pré fissuré, jusqu'à 28,4 %, il a été constaté aussi, que les modes de rupture des poutres renforcées selon la technique SNSM ne sont pas affectés par la pré-fissuration.

6.3. Influence du nombre et de l'orientation des stratifiés sur les poutres en béton armées renforcées

(Hosen et al., 2018), ont mis en œuvre une campagne expérimentale ayant pour objet l'étude de l'Influence du nombre et de l'orientation des stratifiés sur les poutres en béton armé renforcées selon la technique SNSM. Un total de sept poutres de 2300 mm de longueur avec une section de (250X125) mm ont subi une flexion à quatre points. Dont une poutre de référence sans renfort et trois poutres renforcées avec 2,3, et 4 couches de stratifiés verticaux chaque une, et les trois autres avec les mêmes stratifiés horizontaux voire Figure II-16.

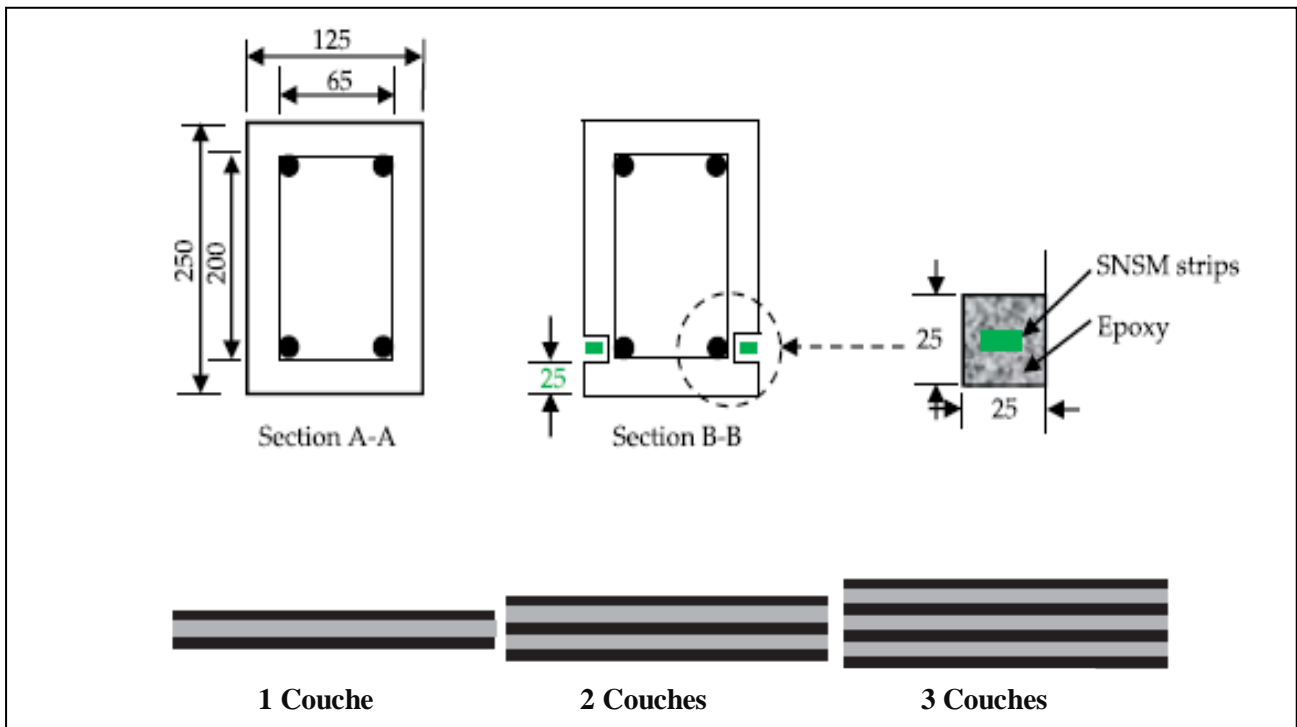


Figure II-16 : Configuration des poutres testées par (Hosen et al., 2018).

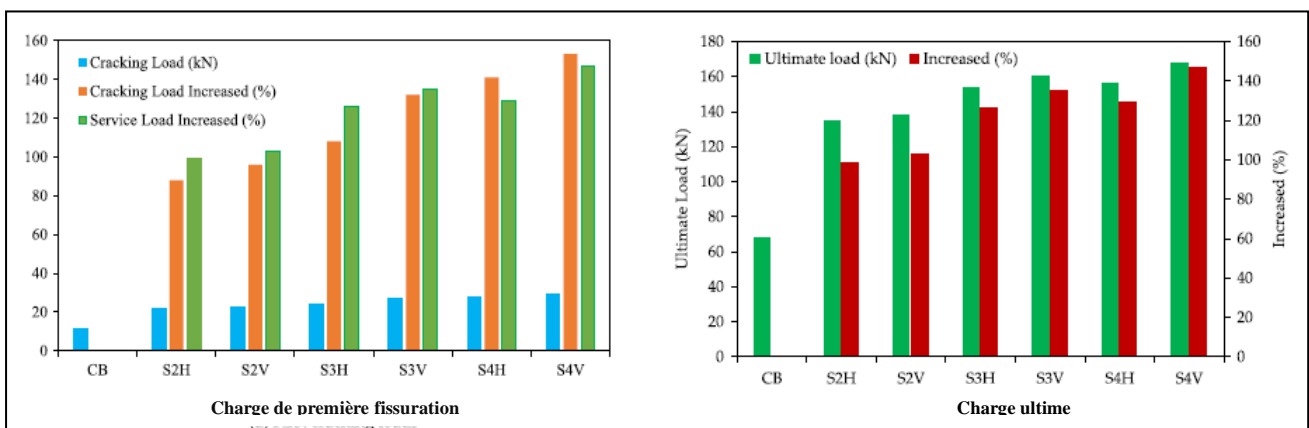


Figure II-17 : Résultats de l'étude de (Hosen et al., 2018).

A l'issue de cette étude il est clair que la capacité de charge ultime a augmenté considérablement jusqu'au 147% par rapport à la poutre de référence avec une légère augmentation pour les stratifiés verticaux en faveur des stratifiés horizontaux.

6.4. Effet de la longueur et la position des tiges en PRFC ainsi que le type des matériaux de remplissage sur les poutres renforcées

Lors de l'étude de (Abdallah et al., 2020), six poutres rectangulaires selon la configuration représentée sur la Figure II-18, ont été testées jusqu'à la rupture en appliquant des charges monotones de flexion en quatre points.

Dont une poutre de référence, et deux poutres renforcées par des tiges de 210 mm de longueur de 6mm de diamètre, une tige a été noyée dans la résine époxy et l'autre dans un mortier en ciment les deux sont placées au même niveau des armatures tendues, et deux autres identiques à l'exception de la longueur du renfort qui est 270mm, et la sixième poutre a été noyée dans la résine époxy avec une longueur de renfort de 270 mm, placé 20mm au-dessus du niveau armatures tendues.

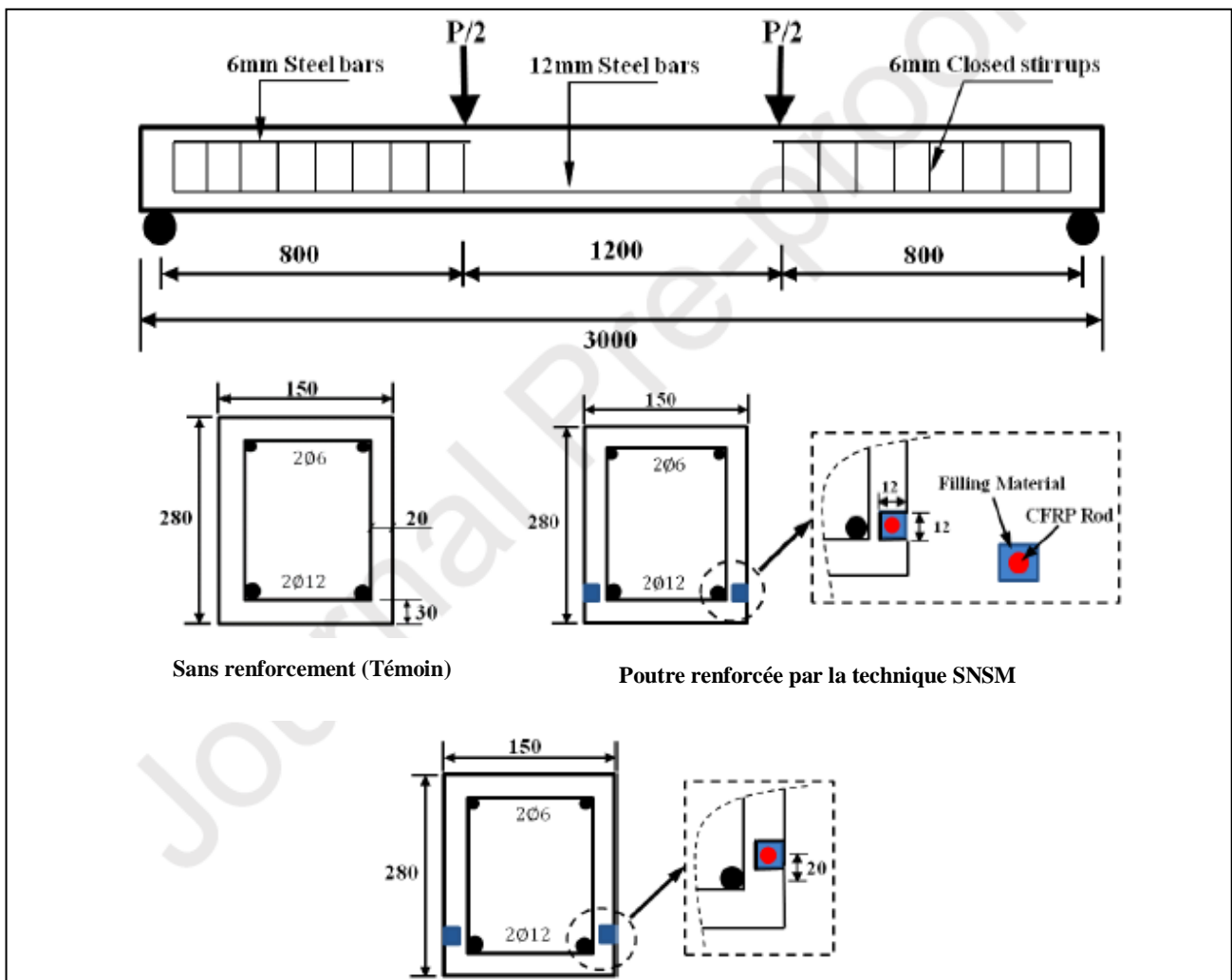


Figure II-18 : Configuration des poutres testées par (Abdallah et al., 2020).

Les résultats de cette étude ont montré que la longueur des tiges de PRFC avait une influence de l'ordre de 14 à 16 % d'écart sur la capacité flexionnelle, et un impact considérable sur le mode de rupture et la capacité d'absorption d'énergie, où les poutres avec des longueurs des tiges plus élevées ont subi une rupture plus ductile.

Les tiges en PRFC placées latéralement à côté des barres d'acier et noyées dans la résine ont montré des performances meilleures que les autres.

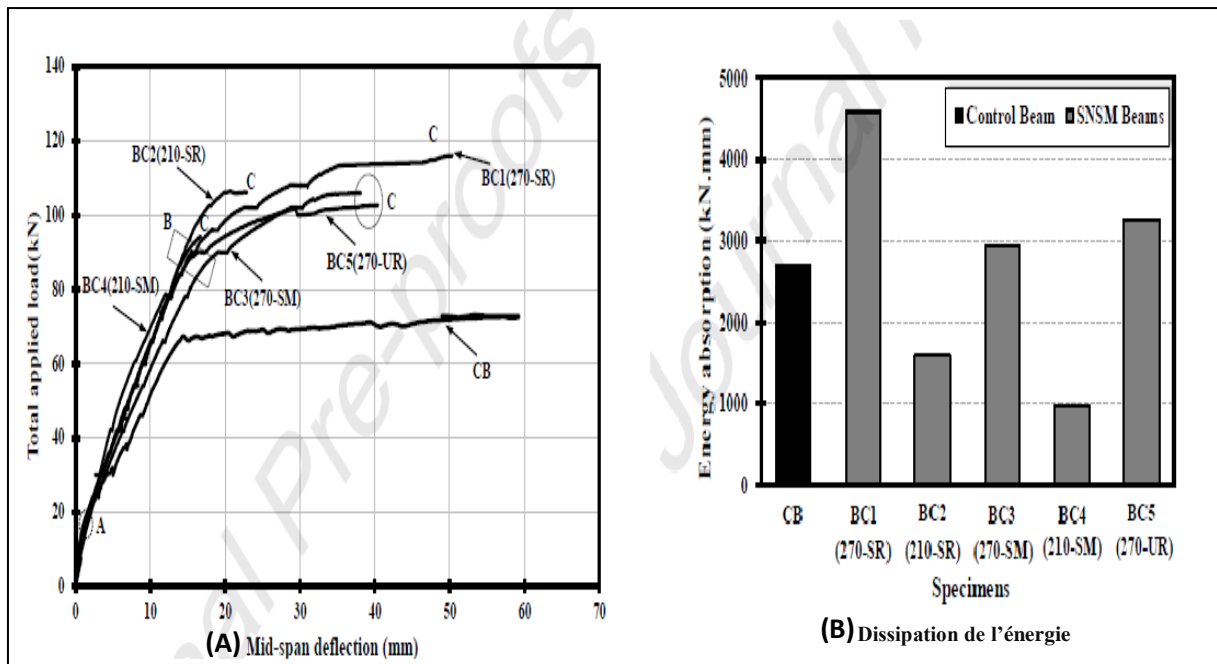


Figure II-19. Résultats de l'étude de (Abdallah et al., 2020).

7 Conclusion

La tendance des recherches effectuées ces dernières années était de développer des techniques de renforcement plus efficaces les unes aux autres. Cela était dans la perspective de reprendre les inconvénients constatés auparavant. Cet acharnement a permis la mise en place de plusieurs techniques de renforcement parmi lesquelles la technique EBR. Cette dernière a un inconvénient c'est le mode de rupture imprévisible par détachement du renfort. Une deuxième technique qui est l'NSM proposée comme solution au mode de rupture de la précédente. Cependant, cette technique malgré son efficacité est caractérisée par un mode de rupture indésirable, c'est la séparation de l'enrobage du béton. Enfin, la troisième technique est l'SNSM qui est désormais proposée comme solution efficace permettant d'éviter les modes de ruptures des deux autres techniques.

A cet égard, notre travail se base sur l'étude comparative numérique et analytique qui mise l'accent sur les trois techniques leurs comportements vis-à-vis de la flexion leurs modes de rupture et leurs ductilités.

CHAPITRE 3

III

MODELISATION ANALYTIQUE

III. Chapitre 3 : MODELISATION ANALYTIQUE

1. Introduction

Ce chapitre présente un modèle analytique ayant pour objectif de prédire le comportement à la flexion des poutres rectangulaires en béton armé renforcées par PRF selon les trois techniques de renforcement à savoir les techniques EBR, NSM et SNSM.

Afin de proposer ce modèle, les différents codes qui portent sur le renforcement par matériaux composites seront également présentés.

2. Les différents codes de calcul des sections renforcées par matériaux composites

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

L'ACI 440.2R.02 vise à déterminer la capacité portante des éléments en béton armé renforcés par matériaux composites. En outre, la résistance flexionnelle des poutres calculées à partir des équations de compatibilité des déformations, l'équilibre des forces interne et par la même occasion le contrôle des modes de rupture des poutres renforcées.

Cette capacité flexionnelle n'est calculée qu'après détermination de la position de l'axe neutre. Ce dernier est obtenu en utilisant la méthode d'essais successifs qui vise à résoudre l'équation d'équilibre ayant trois inconnues interdépendantes les uns aux autres. Ceci en attribuant à chaque fois et de manière arbitraire une valeur de "c" (axe neutre), avec une valeur initiale de $c=0.5d$, ensuite à l'aide de la compatibilité des déformations relative, on détermine les déformations des différents matériaux de la section. Enfin pour vérifier l'équilibre de l'équation et donc la valeur de "c" les contraintes des armatures et du PRF sont tirées des diagrammes contrainte-déformation. Dans le cas où on ne constaterait pas cet équilibre le calcul est refait avec une valeur différente de "c".

Toutefois pour empêcher une déformation inélastique du béton armé renforcé par des PRF, ce code préconise de limiter à 80% la contrainte dans les armatures par rapport à la contrainte d'écoulement, et aussi limiter à 45% la résistance à la compression du béton (ACI Committee 440, 2017).

Par ailleurs, les hypothèses spécifiques à ce code sont (Boukhesar M et al, 2017):

- Ce code adopte la théorie générale soit une conception par un seul pivot.
- Ce code suppose qu'un gain allant de 10 à 160% sur la résistance flexionnelle est possible par le collage du PRF au niveau la partie tendue des poutres.
- Afin de considérer les différents modes de rupture spécialement le décollement des PRF d'une part et prouver la fiabilité de la résistance prédite d'autre part. Il est recommandé que la combinaison des charges exigées par le ACI318-05 soit utilisée pour le calcul du moment

ultime de la section. Et ceux en ajoutant un facteur de réduction pour le PRF ψ_f . Ce dernier doit être également appliqué dans la contribution du M_{nf} .

- Au lieu d'une déformation relative limite du béton de $\varepsilon_c=3.5\%$, ce code admet une valeur de $\varepsilon_c=3\%$.
- Ce code suppose que la rupture par décollement se manifeste quand ε_f atteint ε_{fu} avant que le béton n'atteigne sa limite de déformation maximale. Et qu'un renfort transversal de forme de U permet de surmonter ce décollement.

2.2 NCHRP Rpt 655-10 (USA)(Zureick et al., 2010)

Le NCHRP Rpt 655 est un guide de conception qui présente des directives pour étudier les éléments de pont renforcés par PRF. Ce guide prend en considération les effets de chargement, d'usure et des charges dynamiques. Ce guide préconise que la rupture par décollement du PRF peut être évitée en limitant les valeurs de déformations dans un intervalle de 0,003 à 0,008. En effet, pour prendre en compte la ductilité lors de l'analyse du renforcement en flexion, la déformation du PRF est limitée à 0,005. En conséquence de l'usage d'une valeur inférieure à 0,005 une rupture plus fragile est généralement provoquée. D'une autre part, ce code conseille pour éviter le décollement du PRF de limiter à la moitié les contraintes interfaciales béton/ PRF par rapport aux contraintes de tension ultime du PRF. Ceci peut se faire lors de l'analyse en fixant la limite de déformation dans les PRF à 0,005.

Le NCHRP Rpt impose des limites aux déformations dans le béton, l'acier et les PRF pour pouvoir offrir une bonne durée de vie aux charges cycliques pour les ponts.

2.3. ISIS CDM No.4-01 (Canada)(Vuddandam et al., 2013a)

Le code canadien ISIS CDM, porte sur l'ensemble des modes de rupture relatifs aux poutres renforcées par mâtereaux composites, sauf pour la rupture par décollement de l'enrobage du béton. Dans le but d'utiliser la capacité complète du PRF et d'éviter le décollement du renfort se code préconise l'usage d'une longueur d'ancrage et de liaison suffisante.

Plusieurs facteurs de résistances sont proposés par l'ISIS CDN No4-01. Parmi ces facteurs, on a celui relatif aux PRF (ϕ_{frp}), qui prend la valeur de 0.7 pour la rupture des PRF et 0.75 pour une rupture par délaminage du PRF. Et aussi le facteur (ϕ_{frpe}) relatif à la réduction environnementale. Par ailleurs, pour le béton et l'armature leurs facteurs de résistance sont différents selon le type de structure.

2.4 Fédération internationale du Béton (FIB2001) (Boukhezar M et al , 2017)

La spécificité de ce code, c'est la prise en compte de l'influence des charges appliquées sur le béton avant chargement. Ce dernier se base sur la théorie d'élasticité. Pour les modes de rupture des éléments soumis en flexion renforcée par PRF ce code envisage deux possibilités. La première est une rupture ductile par écrasement de la partie comprimée ou par rupture du PRF à cause des efforts de traction

donc une exploitation optimale du renfort. La deuxième possibilité envisagée est le décollement qui se produit au niveau de l'enrobage du béton particulièrement au niveau de la surface de liaison.

FIB2001 adopte la même méthode de calcul que l'ACI 440 notamment la méthode des essais successifs avec une valeur ε_0 qui représente la déformation initiale. Et aussi la contrainte dans les armatures sous la charge de service qui doit être limitée à 80% afin d'éviter une déformation inélastique au niveau de l'élément en béton armé renforcé par des PRF.

2.5. JSCE-01 (Japan)(Vuddandam et al., 2013a)

Le code JSCE donne des orientations afin d'éviter le mode de rupture par délaminage, dont la limitation de la contrainte maximale de conception des PRF ainsi que la longueur d'ancrage.

Ce code propose comme les codes précédents des facteurs de sécurité. Le Tableau III-1 présente ces facteurs.

Tableau III-1 : Facteurs de sécurité du code JSCE.

Facteur de sécurité		État limite ultime	État limite de service
(γ_m)	Béton	1.3	1.0
	Acier	1.0(1.05)	1.0
	PRF	1.2-1.3	1.0
(γ_b)	Flexion	1.15	1.0
	Cisaillement	1.25	1.0
	Ductilité	1.3	1.0
(γ_i)	Facteur de structure	1.0-1.2	1.0
(γ_f)	Facteur de charge	1.0-1.2	1.0
(γ_a)	Facteur d'analyse	1.0	1.0

2.6. CNR-DT 200/04 (Italie)(Vuddandam et al., 2013b)

Le CNR-DT 200/04 se distingue par sa proposition d'une loi de glissement qui modélise le comportement interfacial entre le béton et le renfort. Aussi, par sa manière de classer les modes de rupture ce code est similaire au FIB Bull 14. En revanche pour les facteurs de sécurité le CNR-DT 200/04 suggère un facteur partiel γ_m de PRF, un facteur de conversion environnemental η_a et un facteur de conversion des effets à long terme η_a .

2.7. CECS 146 :2003 (China)

Le code CECS 146 :2003 propose une équation du moment empirique où les facteurs de résistance du PRF sont associés. Une équation dans laquelle le niveau de contrainte effective dans le PRF est limité. Ce code traite aussi les trois modes de rupture (a, b, c) voir Tableau III-2.

2.8 les modes de ruptures traités par les différents codes

Le Tableau III-2 passe en revue les modes de rupture et comment les surmonter selon les différents codes et guildes de conception des éléments en béton armé renforcés par matériaux composites. Ce tableau expose uniquement les modes de ruptures des poutres soumises à la flexion.

Tableau III-2 : Résumé des modes de rupture traités par les différents codes de conception des PRF
(Vuddandam et al., 2013a).

Code	Rupture	Prevention
ACI 440.2R-08	a, b, c, d, e	Prévenu en limitant le niveau de contrainte dans les PRF et en prévoyant une longueur d'ancrage suffisante
NCHRP Rpt 655-10	a, b, c, d, e	Prévention par la limitation du niveau de contrainte dans les PRF
ISIS CDM No.4-01	a, b, c, d, e	On suppose qu'elle peut être évitée en fournissant un ancrage ou une longueur de lien suffisants
fib Bull 14-01	a, b, c, d, e	Prévenu en limitant la déformation ultime, en limitant la contrainte de traction maximale dans les PRF et en prévoyant une longueur d'ancrage suffisante
JSCE-01	a, b, c, e	Prévenu en limitant la contrainte de traction maximale dans les PRF et en prévoyant une longueur d'ancrage suffisante
CNR-DT 200/04	a, b, c, e	Le décollement du PRF est empêché en fournissant une longueur de liaison optimale, le décollement du CI est empêché en limitant la résistance maximale dans les PRF
ECP 208-05	a, b, c, d, e	Prévenu en limitant le niveau du contrainte des PRF
CS TR55-2000	a, b, c, e	Prévenu en limitant la contrainte de cisaillement longitudinale entre les PRF et le substrat, en fournissant une longueur d'ancrage suffisante et en limitant la déformation finale dans les PRF
CECS 146 :2003	a, b, c	Supposé être empêché
(a) Écrasement du béton en compression avant la déformation de l'acier d'armature ; (b) Déformation de l'acier en tension suivie de la rupture de la stratifié de PRF ; (c) déformation de l'acier sous tension suivie d'un écrasement du béton ; (d) délaminage par cisaillement / tension du revêtement en béton (délaminage du revêtement) ; (e) décollement du PRF du substrat en béton (décollement du PRF).		

3. Modèle analytique proposé

3.1. Comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion

Le comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion peut être schématisé selon la Figure III.1, où la courbe force déformation est divisée en trois parties :

- **Section non fissurée** $0 \leq M \leq M_{CR}$: entre le zéro et le point de fissuration du béton (P_{cr}, Δ_{cr})
- **Section fissurée** $M_{CR} \leq M \leq M_Y$: entre le point de fissuration du béton et la plastification des armatures longitudinales tendues (P_y, Δ_y)
- **Section plastifiée** $M_Y < M \leq M_U$: entre le point de plastification des armatures longitudinales et la limite ultime de l'élément (P_u, Δ_u).

La Figure III-2 montre l'influence du renforcement en PRF sur le comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion.

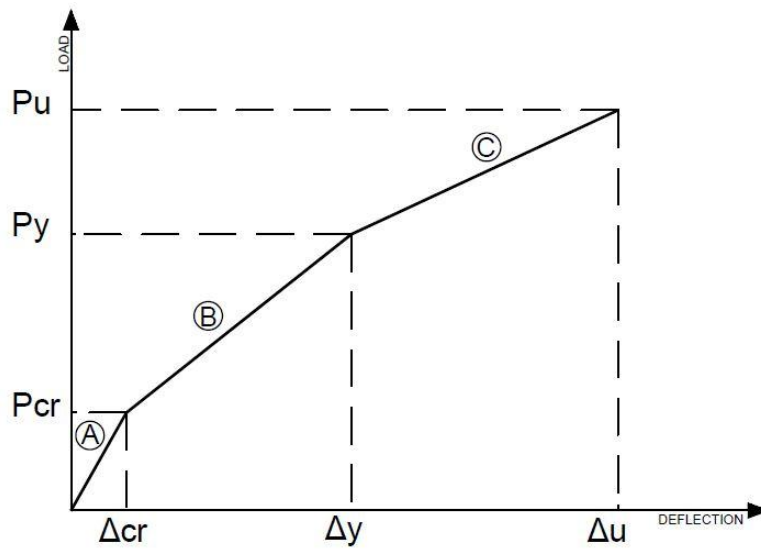


Figure III-1 : Comportement d’une poutre en béton armé soumise à la flexion.

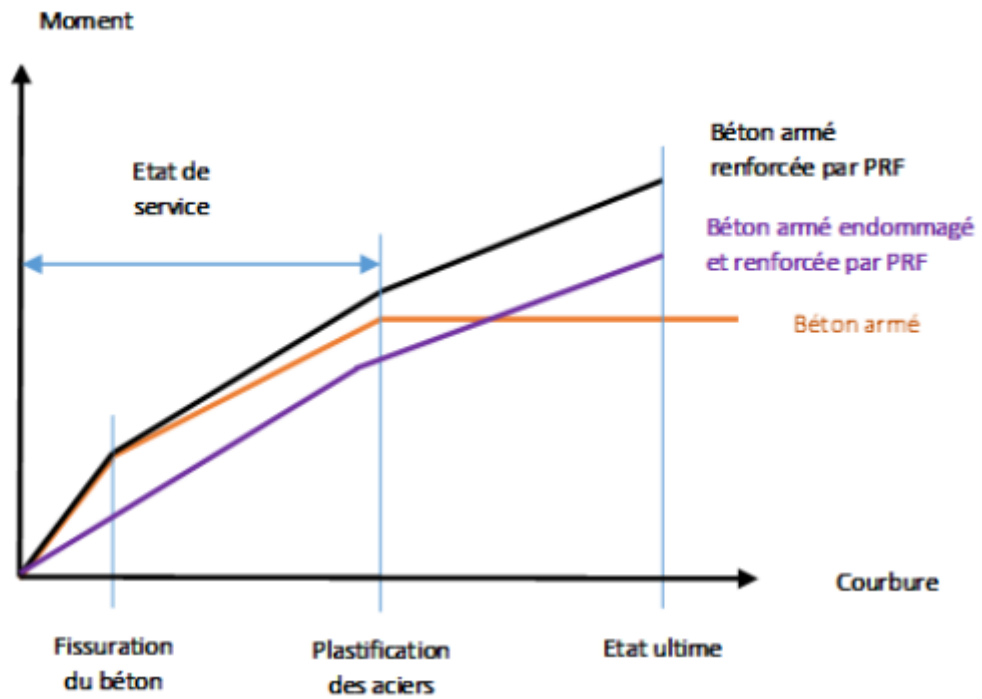


Figure III-2 : Influence du renforcement sur le comportement d’une poutre en béton armé soumise à la flexion (Laraba, 2017).

3.2. Lois de comportement des matériaux utilisés

3.2.1. Le béton

La loi utilisée pour schématiser le comportement du béton est une relation contrainte-déformation (Figure III-3) de forme parabolique entre l’intervalle $\epsilon=0$ à $\epsilon=\epsilon_0$ et une forme rectangulaire entre ϵ_0 et ϵ_{cu} . La contrainte du béton est calculée comme suite :

$$\frac{\alpha f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 f_{ck}}{1.5} = 0.567 f_{ck} \tag{3-1}$$

La valeur de la déformation en compression à la rupture ϵ_{cu} égale à 3.5‰(EC2)..

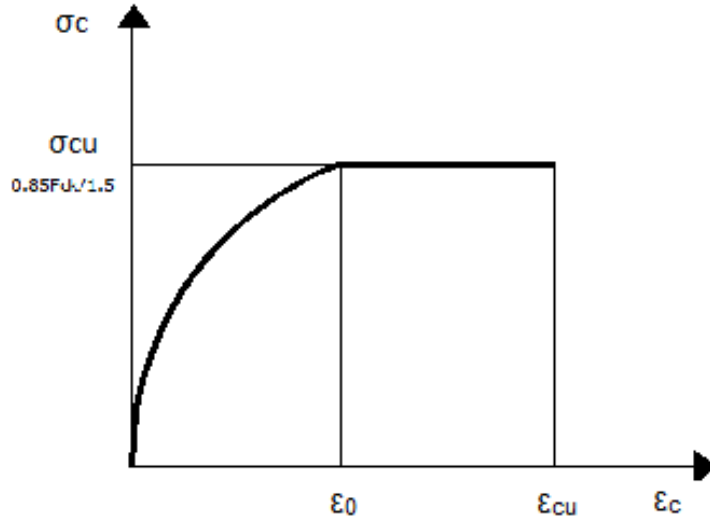


Figure III-3 : Loi de comportement du béton.

3.2.2. L'acier

La loi de comportement bilinéaire élasto-plastique représenté sur la Figure III-4 est utilisée pour l'acier. Ce comportement de l'acier est le même, soit en traction soit en compression (EC2).

La contrainte de traction des armatures d'acier est donnée par les relations suivantes :

$$f_s = E_s \epsilon_s, \text{ pour } \epsilon_s \leq \epsilon_y \tag{3-2}$$

$$f_s = f_y, \text{ Pour } \epsilon_s \geq \epsilon_y \tag{3-3}$$

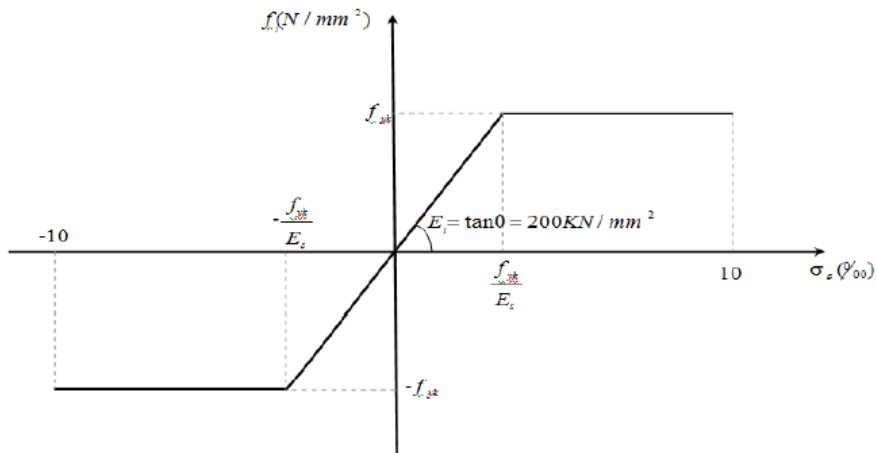


Figure III-4 : Loi de comportement de l'acier.

3.2.3. Le renfort en PRF

Le renfort en PRF est modélisé selon une loi de comportement linéaire telle que représenté sur la Figure III-5 f_f désigne la contrainte de rupture du renfort PRF en traction et ϵ_{fu} est la déformation de la rupture du renforcement en PRF.

Avec $f_f = E_f \epsilon_f$ (3-4)

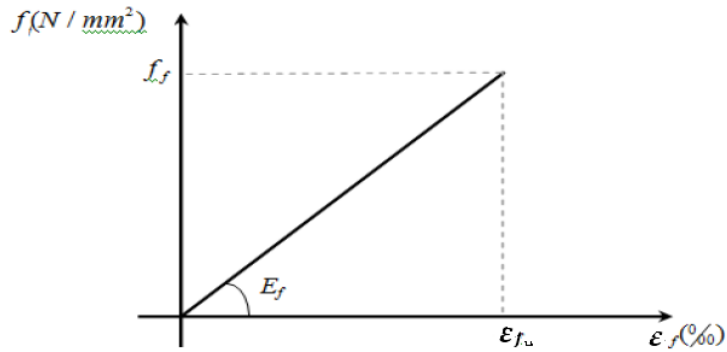


Figure III-5 : Loi de comportement du renfort en PRF.

3.3. Analyse d'une section non renforcée

3.3.1. Section non fissurée $0 \leq M \leq M_{CR}$:

Cette phase concerne une valeur des moments allant de 0 à M_{cr} où les premières fissures commencent à apparaître, la flèche, quant à elle, varie de 0 à Δ_{cr} , cette partie est représentée par la force P_{cr} . La section relative est schématisée sur la Figure III-6.

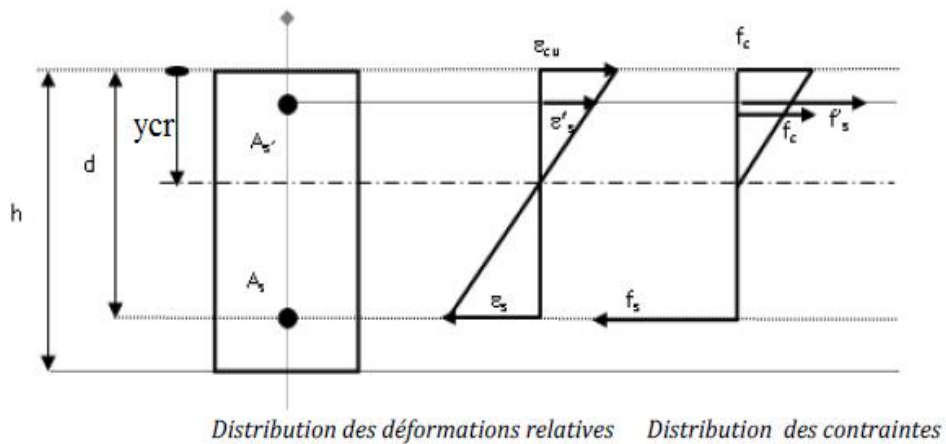


Figure III-6 : Section en béton armé avant fissuration.

Afin d'analyser une section non fissurée les lois de la RDM sur une poutre en béton armé seront utilisées. En effet, la section réelle sera remplacée par une section équivalant ou une section idéalisée dans ce cas la section $A_c = by_{cr}$, et le coefficient d'équivalence égal a

$$\frac{(E_s - E_b)}{E_b} = n - 1 \quad (3-5)$$

Le moment d'inertie de la section avant la formation de la première fissure dans le béton tendu I_{cr} est comme suite :

$$I_{cr} = \frac{by_{cr}^3}{3} + \frac{b(h - y_{cr})^3}{3} + (n - 1)A_s(d - y_{cr})^2 + (n - 1)A'_s(y_{cr} - d')^2 \quad (3-6)$$

La profondeur de l'axe neutre à la fibre la plus comprimée y_{cr} sera calculée par l'équilibre du moment statique supérieures et inférieurs de la section.

$$\frac{by_{cr}^2}{2} + (n - 1)A'_s(y_{cr} - d') - \frac{b(h - y_{cr})^2}{2} - (n - 1)A_s(d - y_{cr}) = 0 \quad (3-7)$$

La résolution de cette équation du premier degré nous donne :

$$y_{cr} = \left[(n - 1)(A'_s d' + A_s d) - \frac{bh^2}{2} \right] / \left[[(n - 1)(A'_s + A_s)] + bh \right] \quad (3-8)$$

$$\text{Donc à partir de : } \sigma_{tr} = \frac{M_{cr} y_{cr}}{I_{cr}} \quad (3-9)$$

$$\text{On calcule : } M_{cr} = \frac{I_{cr} \sigma_{tr}}{y_{cr}} \quad (3-10)$$

$$P_{cr} = \frac{2M_{cr}}{L_a} \quad (3-11)$$

$$\Delta_{cu} = \frac{\left(\frac{P_{cr}}{2}\right)L_a}{24E_c I_{cr}} (3L^2 - 4L_a^2) \quad (3-12)$$

Avec, A_s , A'_s et A_f les sections des aciers tendus et comprimés et du renfort respectivement E_c le module d'élasticité du béton, L_a longeuentre l'appui et le point d'application de la force et L la longeuentre appui. La distance entre la fibre la plus comprimée et le centre de gravité des armatures tendues nommée "d", est dite hauteur utile de la section.

3.3.2. Section fissurée $M_{cr} < M < M_y$

Cette phase concerne une valeur des moments allant de M_{cr} à M_y dès les premières fissures jusqu'à écoulement des armatures tendues, la flèche quant à elle varie de Δ_{cr} à Δ_y , cette partie est représentée par la force P_y .

Comme la section précédant ont utilisé une section équivalant transformer, toutefois vue que la section tendue du béton ne contribue plus dans la résistance à ce stade le coefficient d'équivalence sera

$$\frac{E_s}{E_b} = n \tag{3-13}$$

Le moment d’inertie de la section dans le béton tendu I_y est donner par l’équation :

$$I_y = \frac{by_y^3}{3} + (n)A_s(d - y_y)^2 + (n)A'_s(y_y - d')^2 \tag{3-14}$$

La profondeur de l'axe neutre à la fibre la plus comprimée y_y sera calculée par l’équilibre du moment statique supérieures et inférieures de la section.

$$\frac{by_y^2}{2} + (n)A'_s(y_y - d') - (n)A_s(d - y_y) = 0 \tag{3-15}$$

La résolution de cette équation du deuxième degré nous donne y_y .

On calcule : $M_y = \frac{I_y \sigma_{tr}}{y_y} \tag{3-16}$

$$P_y = \frac{2M_y}{L_a} \tag{3-17}$$

$$\Delta_y = \frac{\left(\frac{P_y}{2}\right)L_a}{24E_c I_y} (3L^2 - 4L_a^2) \tag{3-18}$$

3.3.3. Section plastifiée $MY < M < MU$

Cette phase concerne une valeur des moments allant de M_y à M_u dès l’écoulement des armatures tendues jusqu’à atteinte du moment ultime de la section, la flèche quant à elle varie de Δ_y a Δ_u , cette partie est représentée par la force P_u . Cette section est schématisée sur la Figure III-7.

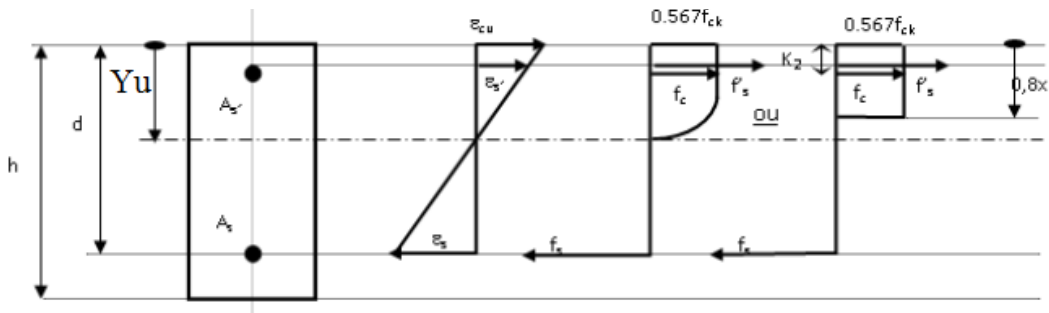


Figure III-7 : Section en béton armé à l’état ultime.

Sur la Figure III-7, apparait le bloc des contraintes rectangulaire simplifié adopté par l’EC2, où le diagramme parabole rectangle a été simplifié par la création d’un bloc rectangulaire fictif avec un centre de gravité qui se positionne au même niveau du centre de gravité du bloc réel. Ce bloc représente 80% de la valeur de la profondeur de l'axe neutre et ceux à partir de la fibre la plus comprimée (principe de Whitney).

La valeur de la déformation relative du béton comprimée est fixée à 3.5‰, pour cette section.

Par leurs compatibilités, on peut également constater les expressions des déformations des matériaux acier et béton, qui s'exprime comme suite :

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-y_u}{y_u}\right)\varepsilon_{cu} \quad (3-19)$$

$$\varepsilon'_s = \left(\frac{y_u-d'}{y_u}\right)\varepsilon_{cu} \quad (3-20)$$

Par ailleurs, on exprime l'équation d'équilibre des forces internes de la section :

$$F_c + F'_s = F_s \quad (3-21)$$

Avec F_c la force de compression dans le béton qui égale à :

$$F_c = \frac{0.85}{\gamma_b} f_{ck} A_c \gamma \quad (3-22)$$

Et F_s et F'_s est la force au niveau des armatures comprimées et tendu respectivement

$$F_s = f_s A_s \quad (3-23)$$

$$F'_s = f'_s A'_s \quad (3-24)$$

L'équation (3-21) devient alors :

$$\frac{0.85}{\gamma_b} f_{ck} A_c \gamma + f'_s A'_s = f_s A_s \quad (25)$$

Cette équation comprend trois inconnus par conséquence pour la résolution de cette équation nous utilisons la méthode des essais successifs.

En premier lieu, nous allons fixer une valeur arbitraire pour l'axe neutre y_u avec laquelle nous calculons à partir des équations (3-19) et (3-20) les déformations relatives ε_s et ε'_s . Ceci va permettre de calculer F_s et F'_s .

En deuxième lieu, nous allons vérifier l'équilibre de la section moyennant l'équation (3-25), si cette dernière n'est pas correcte, nous reprendrons avec une autre valeur de y_u jusqu'à obtention de l'équilibre et la détermination de la valeur de la profondeur de l'axe neutre. Ceci permettra le calcul de M_u par la formule suivante :

$$M_u = F_s(d - 0.4y_u) + F'_s(0.4y_{cr} - d') \quad (3-26)$$

$$\text{Donc } P_u = \frac{2M_u}{L_a} \quad (3-27)$$

Tandis que pour Δ_u est calculé à partir de la courbure φ :

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{y_u} \quad (3-28)$$

$$\varphi_s = \frac{\varepsilon_s}{(d-y_u)} \quad (3-29)$$

$$\varphi = \varphi_s + \frac{M - M_y}{M_u - M} (\varphi_u - \varphi_s) \tag{3-30}$$

$$I_u = \frac{M}{E_c \varphi} \tag{3-31}$$

$$\Delta_u = \frac{(P_u/2)L_a}{24E_c I_u} (3L^2 - 4L_a^2) \tag{3-32}$$

3.4. Analyse d'une section renforcée

La Figure III-8 montre les sections des poutres renforcées selon les trois techniques de renforcements. Cette figure montre également leurs diagrammes suivant les trois phases en l'occurrence la section fissurée, non fissurée et plastifiée.

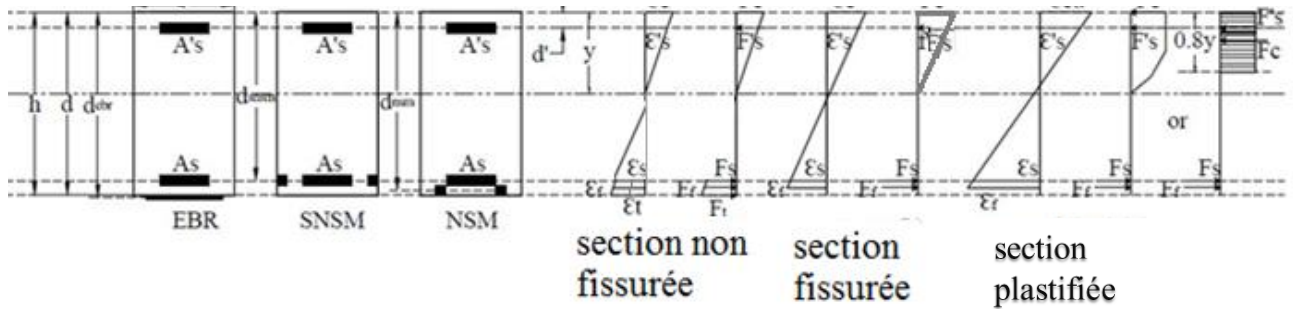


Figure III-8 : Section en béton renforcée selon les techniques de renforcement EBR, NSM et SNSM.

3.4.1. Section non fissurée $0 > M > M_{cu}$

La force et le déplacement (P_{cu} , Δ_{cu}) représentant cette phase sont calculées à partir de l'axe neutre y_{cr} selon l'équilibre des moments statiques de la section et le moment M_{cr} et I_{cr} l'inertie de la section selon la méthode des sections transformées :

$$I_{cr} = \frac{by_{cr}^3}{3} + \frac{b(h-y_{cr})}{3} + (n-1)A_s(d-y_{cr})^2 + (n-1)A'_s(y_{cr}-d')^2 + (n_f-1)A_f(d_f-y_{cr})^2 \tag{3-33}$$

$$M_{cr} = \frac{I_{cr}\sigma_{tr}}{y_{cr}} \tag{3-34}$$

$$P_{cr} = \frac{2M_{cr}}{L_a} \tag{3-35}$$

$$\Delta_{cu} = \frac{(P_{cr}/2)L_a}{24E_c I_{cr}} (3L^2 - 4L_a^2) \tag{3-36}$$

3.4.2. Section fissurée $M_{cu} > M > M_y$

Selon la même méthode toute en éliminant la partie tendue de la section du béton y_y est calculé selon l'équilibre des moments statiques de la section et le moment M_y et I_y l'inertie de la section par les formules suivantes :

$$I'_y = \frac{by_{cr}^3}{3} + (n)A_s(d-y_{cr})^2 + (n)A'_s(y_{cr}-d')^2 + (n_f)A_f(d_f-y_{cr})^2 \tag{3-37}$$

$$I_y = I'_y / [1 - (1 - \frac{I'_y}{I_{cr}})(\frac{M_{cr}}{M})] \tag{3-38}$$

$$M_y = \frac{I_y \sigma_f}{n_f (d_f - y_y)} \quad (3-39)$$

$$P_y = \frac{2M_y}{L_a} \quad (3-40)$$

$$\Delta_y = \frac{(P_y/2)L_a}{24E_c I_y} (3L^2 - 4L_a^2) \quad (3-41)$$

3.4.3. Section plastifiée $M_y > M > M_u$:

Le moment ultime M_u qui représente le point de rupture de la poutre est calculé avec la méthode d'essais successifs qui permet de déterminer la profondeur de l'axe neutre y_u en se basant sur la compatibilité des déformations du béton prise $\epsilon_{cu}=3.5\%$, et les aciers ϵ_s et ϵ'_s , le matériau composite ϵ_f sont exprimés par les relations suivantes :

$$\epsilon_s = \left(\frac{d - y_u}{y_u} \right) \epsilon_{cu} \quad (3-42)$$

$$\epsilon'_s = \left(\frac{y_u - d'}{y_u} \right) \epsilon_{cu} \quad (3-43)$$

$$\epsilon_f = \left(\frac{d_f - y_u}{y_u} \right) \epsilon_{cu} \quad (3-44)$$

Donc la formule du moment, peut-être, exprime à partir de l'équilibre des forces internes F_s , F'_s des armatures et F_f du renfort tel que :

$$M_u = F_s(d - 0.4y_u) + F'_s(0.4y_{cr} - d') + F_f(d_f - 0.4y_{cr}) \quad (3-45)$$

$$\text{Donc } P_{y_u} = \frac{2M_u}{L_a} \quad (3-46)$$

Tandis que, pour Δ_u est calculer à partir de la courbure φ :

$$\varphi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{y_u} \quad (3-47)$$

$$\varphi_s = \frac{\epsilon_s}{(d - y_u)} \quad (3-48)$$

$$\varphi = \varphi_s + \frac{M - M_y}{M_u - M} (\varphi_u - \varphi_s) \quad (3-49)$$

$$I_u = \frac{M}{E_c \varphi} \quad (3-50)$$

$$\Delta_u = \frac{(P_u/2)L_a}{24E_c I_u} (3L^2 - 4L_a^2) \quad (3-51)$$

3.5. Exemple de calcul

L'étude consiste à analyser le comportement à la flexion en quatre points quatre poutres en béton armé. Les dimensions desdites poutres sont : 2300 mm de longueur, une section transversale rectangulaire de 125 mm de largeur et 250 mm de hauteur et une portée entre appuis de 2000 mm. Le ferrailage des poutres est composé d'armature en acier haute adhérence, soit 2 HA 12 en traction et 2 HA 10 en compression. Trois parmi les quatre poutres ont été renforcées selon le Tableau III-3 par des

tiges en PRFC de 10 mm de diamètre pour les poutres renforcées par les techniques NSM et SNSM et une plaque de PRFC de 2X70 mm pour la poutre renforcée selon la technique EBR, l'ensemble des pièces de PRFC ont une longueur de 1900 mm.

Tableau III-3 : Détail des poutres testées.

N°	DESIGNATION	ID
01	Poutre de référence sans renfort	REF
02	Poutre renforcée selon la technique EBR avec une plaque de PRFC de (2X70) mm	EBR-10
03	Poutre renforcée selon la technique NSM avec des tiges en PRFC de 10 mm de diamètre	NSM-10
04	Poutre renforcée selon la technique SNSM avec des tiges en PRFC de 10 mm de diamètre	SNSM-10

3.6. Résultats et discussions

Le Tableau III-4 montre une récapitulation des résultats obtenus en termes de force et déplacement pour les quatre poutres étudiées et selon les trois phases représentant le comportement d'une poutre soumise à la flexion simple.

Tableau III-4 : Résultat analytique.

N°	ID	Section non fissurée $0 < M < MCR$		Section fissurée $MCR < M < MY$		Section plastifiée $MY < M < MU$		Taux / ref
		Pcr kN	Δcr mm	Py kN	Δy mm	Pu kN	Δu mm	
01	REF	9.19	0.2	64.20	5.9	71.21	31.99	-
02	EBR-10	39.09	0.87	186.06	11.84	209.40	23.27	294 %
03	NSM-10	22.24	0.88	140.00	10.49	170.00	25.20	238 %
04	SNSM-10	26.92	0.57	126.98	12.02	159.77	29.13	224 %

3.6.1. Résultats de la poutre non renforcée

La Figure III-9, montre les résultats analytiques de la poutre de référence sans renfort. Par laquelle on constate que la force à la rupture est de 71.21 kN et la flèche est de 31.99 mm.

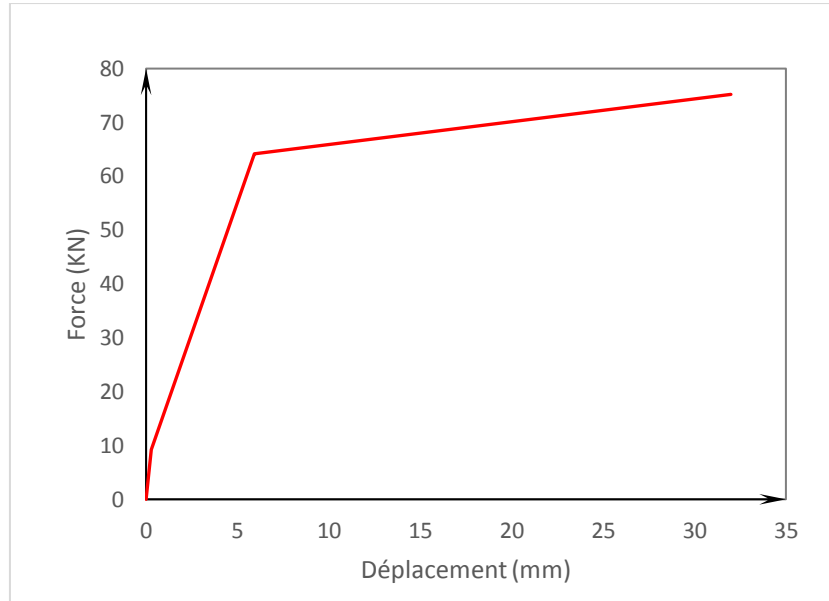


Figure III-9 : Les résultats analytiques de la poutre de référence.

3.6.2. Poutre renforcée selon la technique SNSM

La Figure III-10, montre les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique SNSM, où il est observé une augmentation de la capacité flexionnelle de l'ordre de 112 % à l'état ultime comparée à la poutre de référence.

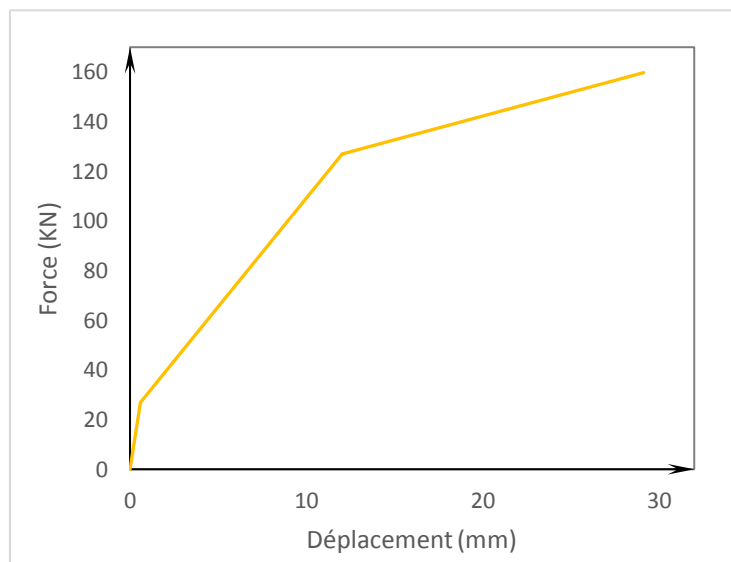


Figure III-10 : Les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique SNSM.

3.6.3. Poutre renforcée selon la technique NSM

Il est présenté par la Figure III-11 les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique NSM. Cette dernière montre une augmentation de la capacité flexionnelle de l'ordre de 126 % à l'état ultime par rapport à la poutre de référence.

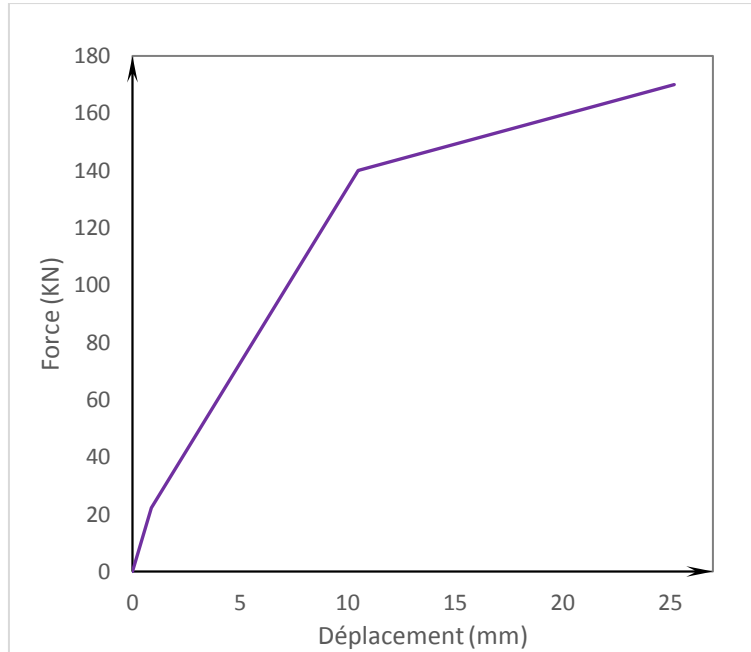


Figure III-11 : Les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique NSM.

3.6.4. Poutre renforcée selon la technique EBR

La capacité flexionnelle de la poutre renforcée selon la technique EBR montrée par la Figure III-12 a subi une augmentation de l'ordre de 178 % par rapport à la poutre de référence.

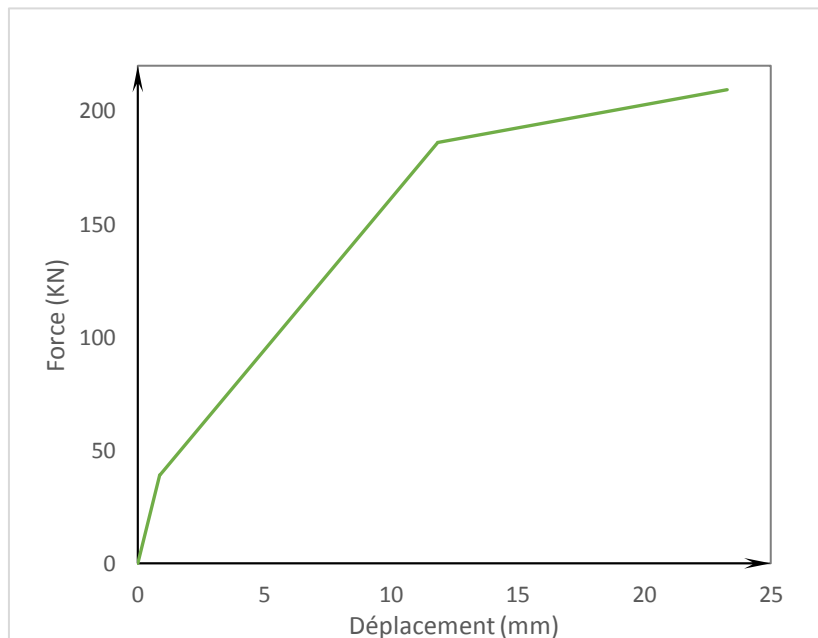


Figure III-12 : Les résultats analytiques de la poutre renforcée selon la technique EBR.

3.6.5. Comparaison entre les poutres

Il est constaté à travers la Figure III-13 que l'augmentation de la capacité flexionnelle engendrée par le renforcement est supérieure pour la technique EBR et NSM par rapport à la technique SNSM. Ceci

est justifier par l'augmentation du bras de levier ou la hauteur utile d_f qui augmente d'une technique à l'autre.

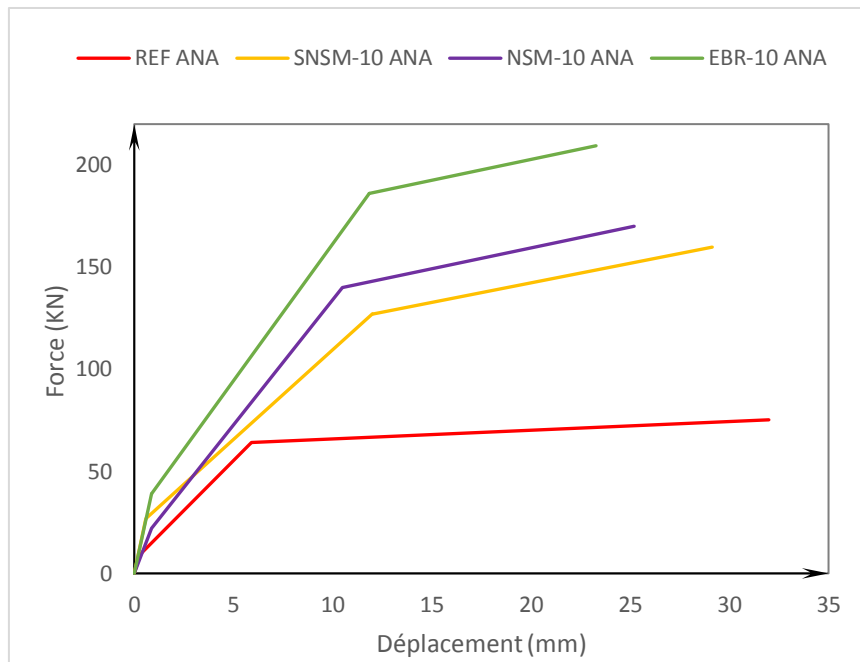


Figure III-13 : Comparaison entre les poutres renforcées et la poutre de référence.

4. Conclusion

Le fait d'envisager une conception par matériau composite ou une réparation efficace nécessite de connaître au préalable le comportement de l'élément. Ceci pour permettre son dimensionnement ou le dimensionnement du renfort. Ce chapitre a démontré la possibilité de prédire théoriquement le comportement d'une poutre renforcées par PRF en passant en revue les différents codes et en proposant un modèle de calcul simplifié.

Le renforcement des poutres étudiées a augmenté la capacité flexionnelle de ces dernières avec un taux de 294 % pour l'EBR, un taux de 238 % et 224 % pour NSM et SNSM respectivement.

Toutefois, cette méthode théorique peut s'avérer difficile à mettre en œuvre lors des conceptions des éléments compliqués. Également, lors d'un calcul analytique la liaison entre le béton et le renfort est supposée être parfait. Cette hypothèse ne permet pas l'estimation réelle du comportement des poutre. A cet effet, dans le prochain chapitre nous proposons un modèle numérique. Ce modèle permettra la prise en compte de l'interface béton/renfort comme un contacte cohésif et non un contact parfait tel que considéré lors du modèle analytique. Il sera comparé par la suite aux résultats théoriques expérimentaux issus de la littérature.

CHAPITRE 4

IV

MODELISATION NUMÉRIQUE

IV. Chapitre 4 : MODELISATION NUMERIQUE

1. Introduction

Aux égards, des résultats obtenus par le modèle analytique ce chapitre porte sur la mise en place d'un modèle numérique capable de prendre en considération le contact interfacial entre le béton et le renfort. Ce dernier permettra un calcul plus approfondi offrant la possibilité d'étudier plusieurs paramètres ainsi que des structures plus complexes. Les résultats obtenus seront comparés et validés par les résultats analytiques et des résultats expérimentaux issus de la littérature.

2. Objectif de l'étude

Le but de cette étude est la mise en place d'une simulation numérique suivant la méthode des éléments finis mené par le logiciel ABAQUS. Cette simulation a pour objectif de :

- Prédire le comportement d'une poutre en béton armé soumise à la flexion quatre points et le comportement de six poutres renforcées selon les trois techniques (NSM, SNSM et EBR).
- L'effet du renforcement sur la résistance et la ductilité des poutres renforcées selon les trois techniques.
- L'influence du taux renforcement sur la résistance et la ductilité des poutres renforcées selon les trois techniques.
- L'analyse des modes de ruptures des poutres modélisées.
- Le rendement des matériaux sur la résistance des poutres renforcées selon les trois techniques.
- L'effet du renforcement selon les trois techniques sur l'évolution des premières fissurations.
- Etudier l'effet de plusieurs paramètres sur le comportement des poutres renforcées en SNSM et NSM.
- Comparé les trois techniques et valider les résultats.

3. Logiciel de calcul et type d'analyse utilisé

Le logiciel de calcul ABAQUS a été choisi pour la mise en œuvre d'un modèle 3D par éléments finis. Ce logiciel a été choisi en raison de sa précision dans la modélisation des poutres en béton armé renforcées (Sharaky et al., 2018), (Obaidat et al., 2010a). Ce logiciel est l'un parmi les grands fournisseurs de logiciels sur le marché aujourd'hui. Il permet de résoudre les problèmes de multiphysique. (Hellman, 2008).

En peu trouver le logiciel ABAQUS sous trois produits principaux : Abaqus/Standard pour la résolution par éléments finis général en utilisant un schéma d'intégration implicite traditionnel. Abaqus/Explicit pour la résolution des situations dynamiques transitoires de haute non-linéarité. Et enfin Abaqus/CAE qui fournit une visualisation et un environnement intégré de modélisation (Hellman, 2008).

Analyse statique

L'analyse statique a été choisie pour notre modélisation. Cette analyse étudier la réponse à long terme d'une structure à une charge statique appliqué par la résolution de l'équation matricielle suivante :

$$KU = R \quad (3-1)$$

Avec K, représente la matrice de rigidité élémentaire R est le vecteur de charge externe et U la matrice des déplacements.

Par ailleurs, pour la prise en charge du non-linéarité du modèle l'équation 3-1 sera résolue par la méthode de Newton.

4. Configuration des poutres modélisées

Cette étude comprend la modélisation de sept poutres en béton armé. Lesdites poutres ont été soumises à une flexion en quatre points. Ce test de flexion en quatre points est choisi pour cette simulation numérique afin d'éviter la rupture en cisaillement. La charge est modélisée comme une force de réaction à un déplacement imposé en deux points de référence couplée à la surface d'application de la charge. Les dimensions des poutres en béton armé sont les suivantes : 2300 mm de long, une section rectangulaire de 125 mm de large et 250 mm de hauteur, avec une portée entre appuis de 2000 mm. Le renforcement des poutres béton armé est composé d'un acier de haute adhérence avec 2 HA 12 en traction et 2 HA 10 en compression. Afin d'éviter une rupture par cisaillement, un renfort transversal à cadre lisse de 6 mm espacé de 50 mm a été placé le long de la poutre. Les sept poutres ont été renforcées selon la Figure IV-1 et le Tableau IV-1, avec des tiges en PRFC de 10 mm et 12 mm de diamètre, et une plaque de 2x70 mm et 3x70 mm afin d'avoir des sections de renforcement très proches. Tous les éléments de renforcement ont une longueur de 1900 mm.

Afin de valider les résultats de cette simulation, les dimensions et les caractéristiques des matériaux seront identiques à ceux de l'étude expérimentale de (Hosen et al., 2015).

Tableau IV-1 : Détail des poutres testées.

N°	DESIGNATION	COUPE	ID
01	Poutre de référence sans renfort	COUPE A-A	REF
02	Poutre renforcée selon la technique EBR avec une plaque de PRFC de (2X70) mm	COUPE B-B	EBR-10
03	Poutre renforcée selon la technique EBR avec une plaque de PRFC de (3X70) mm	COUPE B-B	EBR-12
04	Poutre renforcée selon la technique NSM avec des tiges en PRFC de 10 mm de diamètre	COUPE C-C	NSM-10
05	Poutre renforcée selon la technique NSM avec des tiges en PRFC de 12 mm de diamètre	COUPE C-C	NSM-12
06	Poutre renforcée selon la technique SNSM avec des tiges en PRFC de 10 mm de diamètre	COUPE D-D	SNSM-10
07	Poutre renforcée selon la technique SNSM avec des tiges en PRFC de 12 mm de diamètre	COUPE D-D	SNSM-12

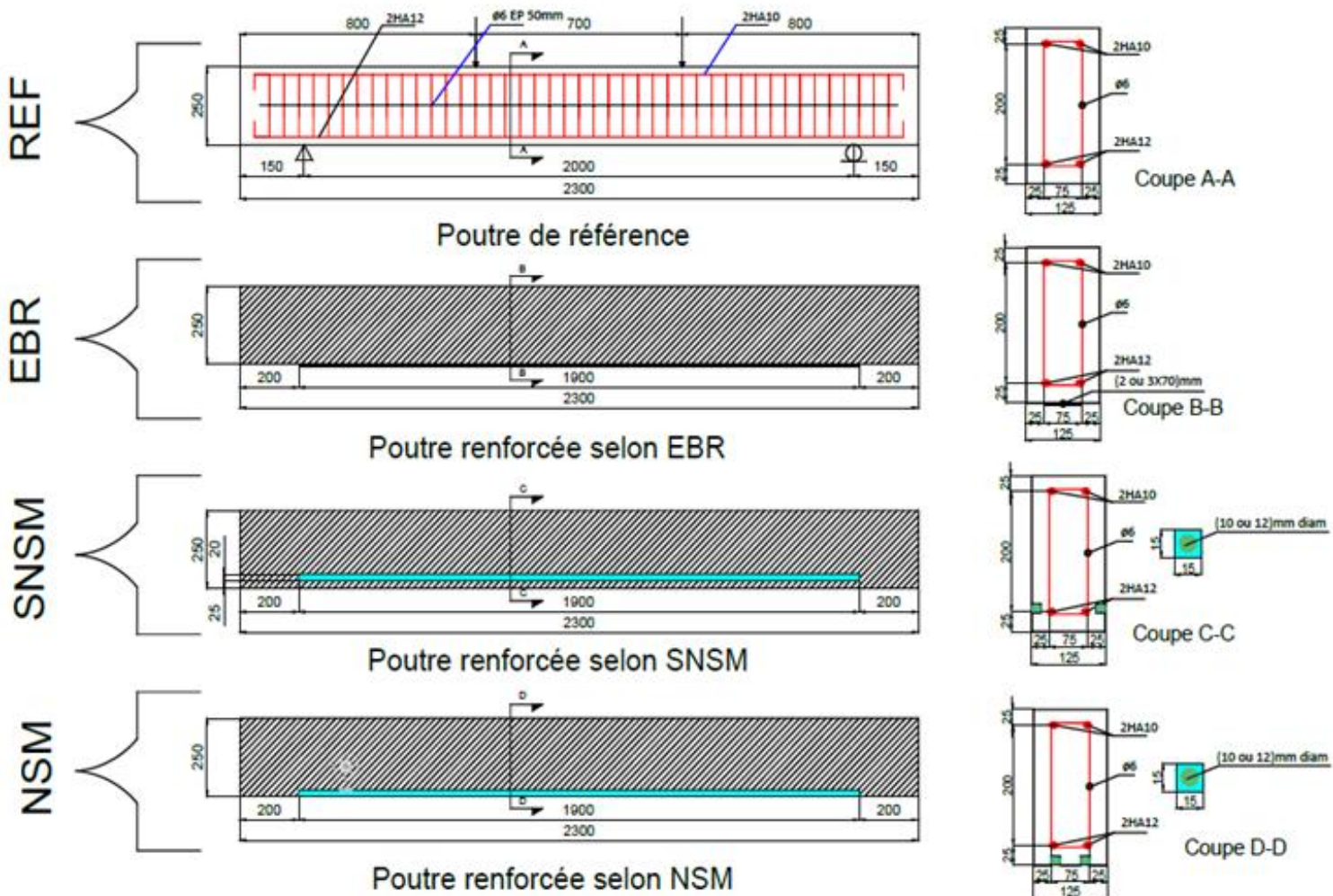


Figure IV-1 : Détail des poutres testées.

5. Lois de comportement et caractéristique des matériaux

5.1. Le béton

Le béton a été modélisé comme un élément solide avec une résistance à la compression de 48,4 MPa et une résistance à la traction de 3,6 MPa. La loi de comportement utilisée est le modèle de plasticité du béton endommagé (CDP) qui est un critère reproduisant un comportement très proche de celui du béton.

Ce dernier est un critère d'écoulement qui a été proposé par Lubliner et al. (1989) et Lee et Fenves (1998). En effet, la spécificité de ce modèle est la possibilité de modéliser le béton armé avec raidissement en traction. Il permet aussi de modéliser le béton non armé par l'énergie de fissuration G_f .

Le CDP utilise la théorie plastique d'endommagement du béton avec une règle d'écoulement non associative. Il permet la modélisation de la dégradation ou de récupération de la rigidité lors des cycles de chargement déchargement, la modélisation des effets du taux de chargement lors des chargements rapides (Hibbitt et al. 2010)(Ben Ftima, 2013).

5.1.1. Comportement mécanique du CDP

Le CDP est un modèle d'endommagement continu, basé sur la plasticité du béton. Il suppose que les deux principaux mécanismes de rupture sont la fissuration par traction et l'écrasement par compression du béton. L'évolution de la surface d'élasticité (ou de rupture) est contrôlée par deux variables d'écrouissage, ε_t^{pl} et ε_c^{pl} , liés respectivement aux mécanismes de rupture sous tension et compression. On se réfère par ces deux variables sous forme de déformations plastiques équivalentes à la traction et à la compression, respectivement.

a- Comportement uni axial en tension et en compression

La plasticité du béton endommagé supposée par le modèle comme une réponse unie axiale à la traction et à la compression du béton est représenté sur la Figure IV-2 .

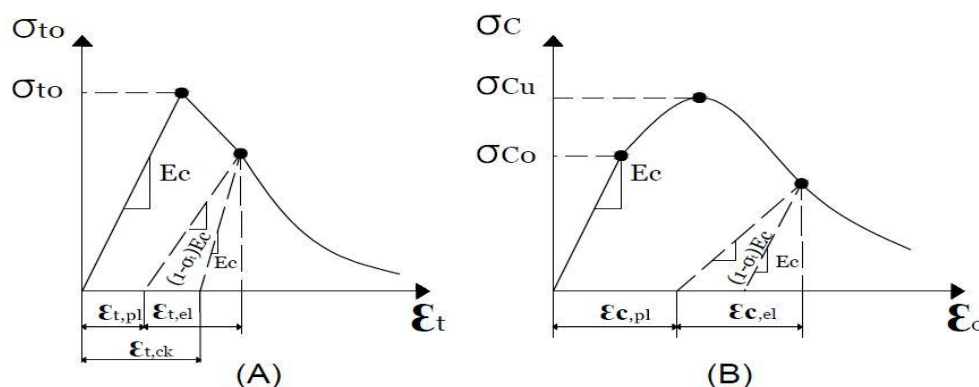


Figure IV-2 : Réponse du béton à une charge uni axiale en traction (A) et en compression (B).

Tel que montre la Figure IV-2 la réponse contrainte-déformation sous tension unie axiale suit une relation élastique linéaire jusqu'à atteint de la valeur de la contrainte de rupture, σ_{t0} . La contrainte de rupture correspond à l'apparition de microfissures dans le matériau béton. Après atteinte de la contrainte de rupture, une réponse contrainte-déformation adoucissante représentée de manière macroscopiquement des microfissures, permettant de symboliser la déformation dans la structure du béton. En revanche, sous compression uni axiale, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur du rendement initial, σ_{c0} . Une fois la partie plastique atteinte après la contrainte ultime, σ_{cu} la réponse sera caractérisée par un durcissement sous contrainte suivi d'un adoucissement sous contrainte.

5.1.2. Paramètres utilisés

La fonction d'écoulement sur laquelle est basée la surface d'écoulement F proposé par Lubliner et al. (1989) et modifier par Lee et Fenves (1998). Le paramètre d'entrée K_c est utilisé pour définir la géométrie dans le plan déviatorique. Ce dernier a pour but de déterminer le ratio entre le deuxième invariant de contraintes par rapport à la surface d'écoulement qui se situe sur le méridien de traction segmenté par celui situé sur le méridien de compression (Ben Ftima, 2013).

À la suite des bons résultats obtenus par (Chen 1982) relatifs aux états de contrainte de traction ou de faible pression de confinement la valeur par défaut de $K_c = 2/3$ a été utilisée. Additivement, et pour définir la forme de la surface F le paramètre η qui représente le ratio entre la résistance en compression biaxiale et la résistance en compression unie axiale a été prise par défaut $\eta = 1.16$ et ceux en raison de la concordance des essais entrepris par Kupfer et al. (1969). Cependant, lors d'une plasticité non associative, la direction de l'écoulement plastique est agie selon une fonction potentielle G distincte de F . Elle est déterminée par l'équation (4-2), la fonction hyperbolique de Drucker-Prager :

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0}\tan\psi)^2 + q^2} - p\tan\psi \quad (4-2)$$

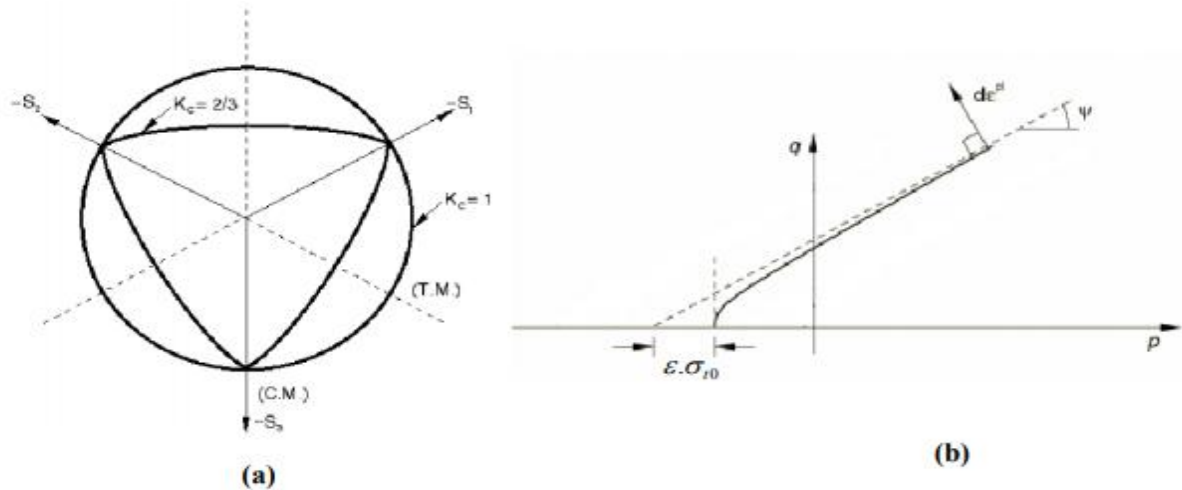


Figure IV-3 : Définition des surfaces d'écoulement et potentielle pour le modèle CDP (Ben Ftima, 2013): (a) Forme de la surface d'écoulement sur un plan déviatorique; (b) Forme de la surface potentielle sur un plan méridien.

Le Tableau IV-2 récapitule les valeurs utilisées pour le paramétrage du mode CDP pour cette étude.

Tableau IV-2 : Résumé des paramètres du modèle CDP.

Paramètres	Valeurs
Angle de dilatation	36°
Excentricité	0.1
$\Gamma = \sigma_{B0} / \sigma_{C0}$	1.16
K	0.667
Viscosité	0

5.2. L'acier

Afin de modéliser le comportement des armatures en acier, un élément de (wire) intégré dans le béton a été utilisé. Ceci en utilisant une loi de comportement élasto-plastique bilinéaire (Figure IV-4(A)) avec une densité de 7850 kg /m³, un module d'élasticité $E_s = 200$ GPa, un coefficient $\nu=0,3$, et une limite d'élasticité de 550 MPa pour la traction et la compression et de 300 MPa pour le cadre transversal.

5.3. Le renfort en PRFC

Le renforcement des techniques NSM et SNSM est modélisé selon un modèle linéaire (Figure IV-4 (B)) comme un élément solide encastré dans un autre élément solide, qui est une résine avec une interface béton/résine et résine/renforcement de type cohésif. Le renforcement de la technique EBR est modélisé comme un élément de type coque lié par une interaction cohésive au béton. Le PRFC a un module élastique $E_f = 165$ GPa et une résistance à la traction de 3100 MPa. La résine époxy a un module d'élasticité en compression de 11,2 GPa, une résistance à la traction de 9,6 GPa, une résistance

à la compression de 95 MPa, une résistance au cisaillement de 19 MPa et une résistance à la traction de 31 MPa.

5.4. L'interface PRFC- Résine-Béton.

En ce qui concerne les interactions cohésives, nous avons opté pour un modèle de séparation en traction, qui détermine la fonction de l'ouverture entre les deux surfaces reliées par cette interaction (Obaidat et al., 2010a), (Obaidat et al., 2010b), (Obaidat et al., 2010c). Il fonctionne selon un comportement élastique linéaire au début, puis les dommages se traduisent par des ouvertures qui se poursuivent jusqu'à la dégradation totale. Cette dégradation représente le détachement du renfort (Camanho and Dávila, 2002). La Figure IV-4 (C) et les équations 4-3 à 4-6 peuvent représenter ce modèle de comportement.

$$T_{\max} = 1.5B_w \times f_t \quad (4-3)$$

$$B_w = \sqrt{\frac{\left(2.25 - \frac{bf}{bc}\right)}{\left(1.25 + \frac{bf}{bc}\right)}} \quad (4-4)$$

$$S_0 = 0.0195B_w^2 \times \sqrt{f_t} \quad (4-5)$$

$$G_f = 0.308B_w^2 \times \sqrt{f_t} \quad (4-6)$$

bf : largeur du PRFC

bc: largeur du béton.

Bw: le ratio de la largeur du PRFC dans le béton.

Gf: l'Energie de la rupture total interraccial.

So: la séparation effective à la rupture

Tmax: la force maximale de l'interface

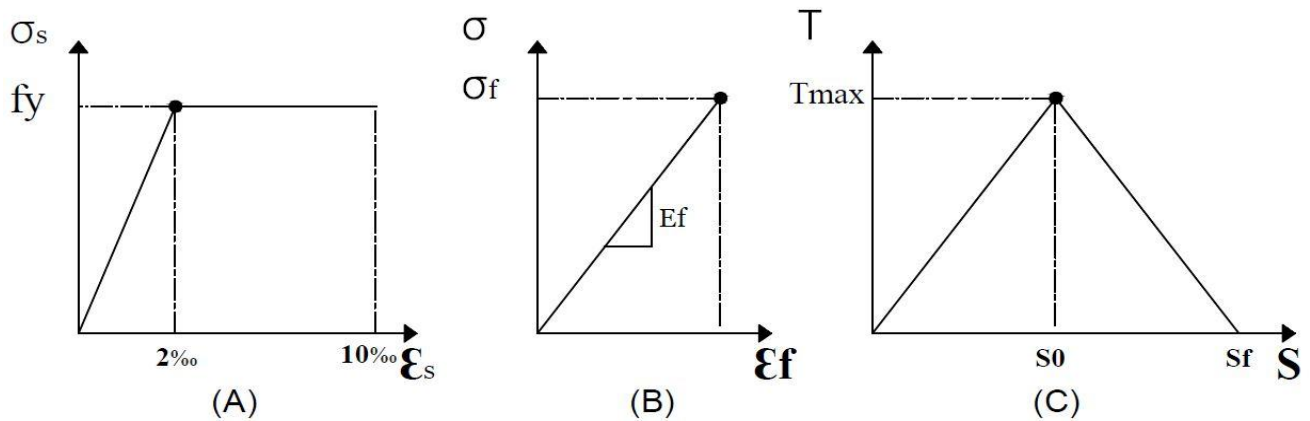


Figure IV-4 : Les lois de comportement. (A) L'acier, (B) le renforcement et (C) l'interface PRFC- résine-béton.

6. Maillage

Le maillage de renforcement est de type S4R5 : une fine coque à quatre nœuds à double courbure, à intégration réduite, utilisant cinq degrés de liberté par nœud pour la technique EBR. Pour l'acier et le renfort des techniques NSM et SNSM, le maillage est de type T3D2 : une poutre linéaire tridimensionnelle à deux nœuds. Alors que pour la poutre, il est de type C3D8R : une brique linéaire à huit nœuds, intégration réduite. Cependant, les zones de renforcement ont eu un maillage plus raffiné, qui a été nécessaire pour converger. Le nombre total d'éléments pour la poutre de référence est de 5064 avec 17 672 nœuds alors que pour les poutres renforcées, le nombre moyen d'éléments est de 9986 avec 50 887 nœuds.

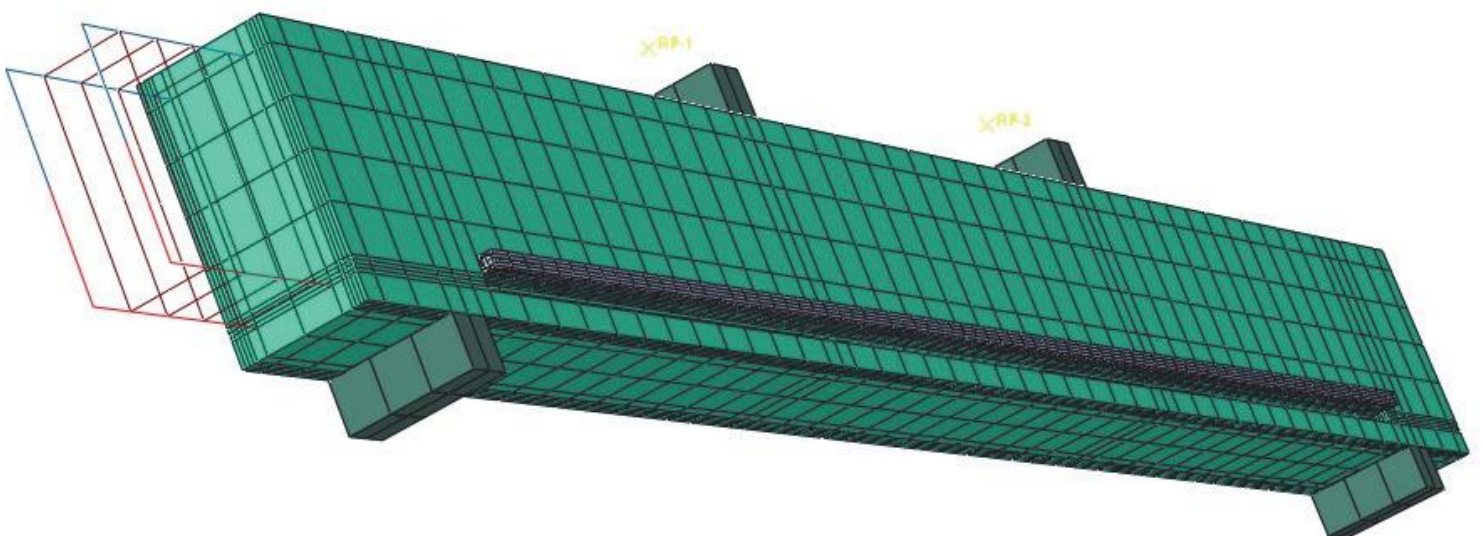


Figure IV-5 : Maillage des poutres modélisées.

7. Résultats et discussions

Les résultats de cette étude numérique seront présentés de la manière suivante :

- Capacité flexionnelle des poutres modélisées
- Influence du taux de renforcement sur les poutres modélisées
- Ductilité des poutres modélisées
- Déformations des matériaux
- Evolution de la première fissuration des poutres modélisées
- Modes de rupture des poutres modélisées

Tous ces aspects seront présentés en comparant les trois techniques de renforcement étudiées, à savoir la technique EBR, NSM et SNSM.

Le Tableau IV-3 recapitule une partie des résultats de cette étude

Tableau IV-3 : Résumé des résultats de l'étude numérique.

ID	N°	Pu (kN)	Taux (%) Pu/REF	Δy (mm)	Δu (mm)	μ Facteur de Ductilité	Taux (%) Perte en ductilité	Mode de rupture
REF	01	75.84	0%	5.74	39.04	6.80	0.00%	Rupture flexionnelle
SNSM-10	02	171.98	127%	6.76	33.36	4.94	27.35%	Ecrasement du béton comprimé
SNSM-12	03	194.57	157%	6.36	31.37	4.94	27.39%	Ecrasement du béton comprimé
NSM-10	04	201.71	166%	6.86	28.09	4.09	39.77%	Séparation de l'enrobage du béton
NSM-12	05	236.66	212%	6.63	26.95	4.06	40.22%	Séparation de l'enrobage du béton
EBR-10	06	195.48	158%	6.78	25.65	3.78	44.36%	Détachement du renfort
EBR-12	07	225.37	197%	6.78	24.11	3.56	47.67%	Détachement du renfort

7.1. Capacité flexionnelle des poutres modélisées

Les résultats relatifs à la capacité flexionnelle des poutres modélisées seront exprimés par des figures montrant les courbes force déplacement des sept poutres modélisées

Poutre de référence

La Figure IV-6 montre le comportement de la poutre de référence sans renforcement où la charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 75.84$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta u = 39.04$ mm.

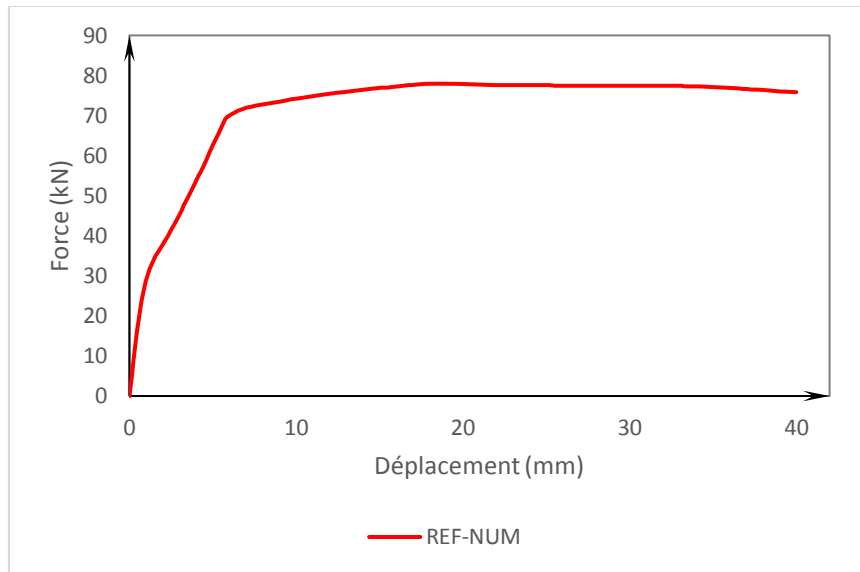


Figure IV-6 : Courbe force déplacement de la poutre de référence.

Cette figure montre que le comportement modélisé obier a un comportement typique des poutres en béton armé soumis à la flexion. En effet, ont peu remarquer les trois phases : avant fissuration, écoulement des aciers et rupture de la poutre.

Poutre renforcée par la technique SNSM

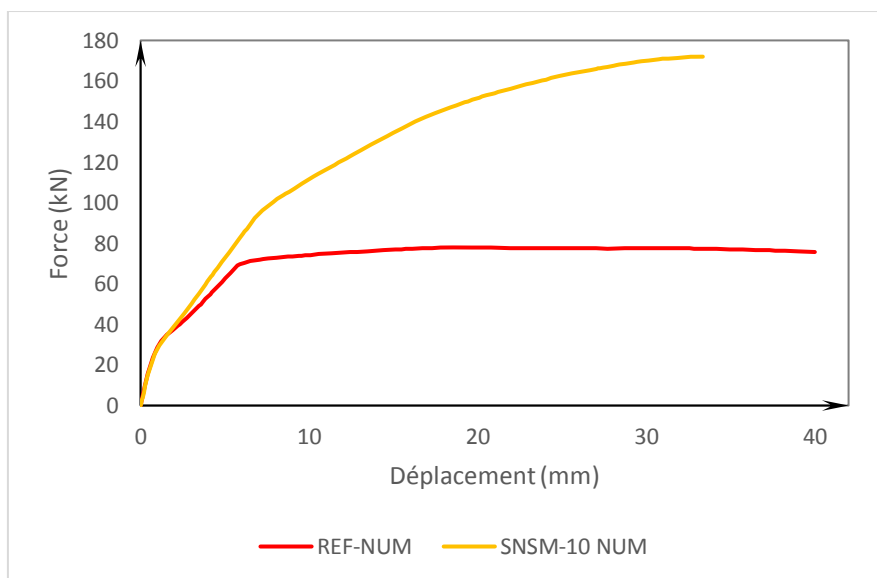


Figure IV-7 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique SNSM.

La Figure IV-7 présente l'allure de la courbes force déplacement relative à la poutre renforcée par la technique SNSM où la charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 171.98 \text{ kN}$ avec un déplacement ultime de $\Delta u = 33.36 \text{ mm}$ soit un taux d'augmentation de 127% en matière de capacité flexionnelle par rapport à la poutre de référence.

Poutre renforcée par la technique NSM

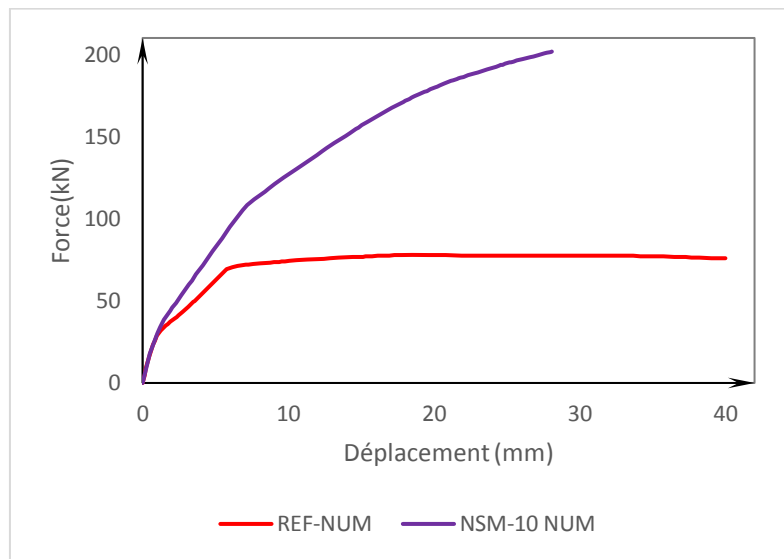


Figure IV-8 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique NSM.

Le comportement de la poutre renforcée par la technique NSM est montré par la Figure IV-8, où la charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 201.71$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta u = 28.09$ mm soit une augmentation de la capacité flexionnelle de l'ordre 166 % en comparaison à la poutre de référence.

Poutre renforcée par la technique EBR

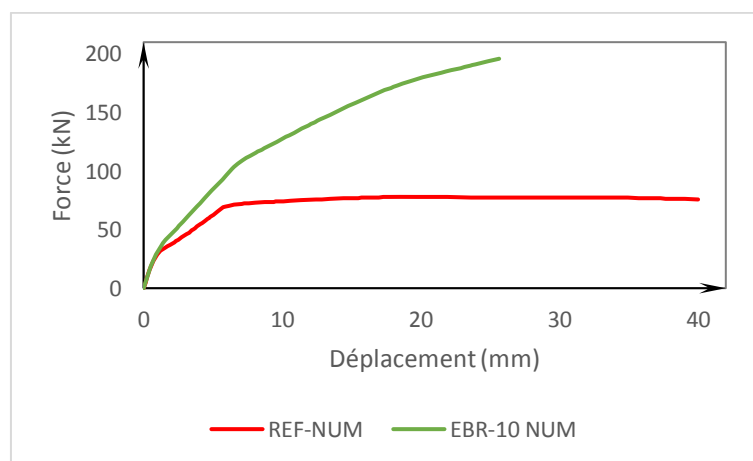


Figure IV-9 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique EBR.

La Figure IV-9 exprime le comportement de la poutre renforcée par la technique EBR. La charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 195.48$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta u = 25.65$ mm soit un gain de capacité de l'ordre de 158 % par rapport à la poutre témoin.

Comparaison

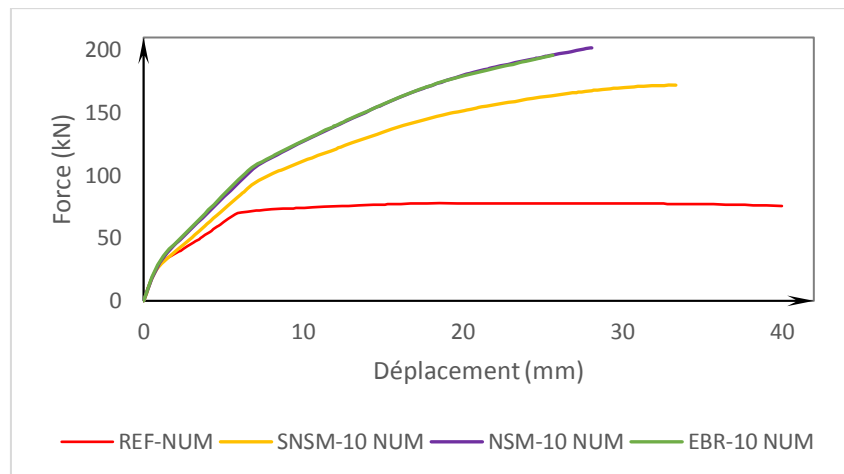


Figure IV-10 : Comparaison entre les courbes force déplacement des poutres.

A partir de la Figure IV-10 on peut noter une amélioration significative de la capacité de flexion des poutres renforcées d'environ 127% pour le SNSM-10, 166% pour le NSM-10 et 158% pour l'EBR-10 par rapport à la poutre de référence. Cette amélioration peut s'expliquer par l'augmentation du bras de levier interne des sections renforcées. Cette augmentation varie d'une technique à l'autre en fonction de la position du renforcement.

7.2. Influence du taux de renforcement sur les poutres modélisées

Poutre renforcée par la technique SNSM

La Figure IV-11 démontre qu'une augmentation du taux du renfort de 20% a engendré une augmentation considérable de la capacité flexionnelle entre les poutres renforcées par SNSM et la poutre de référence, où la poutre SNSM-12 NUM à enregistrer un gain de 30% par rapport SNSM-10 NUM.

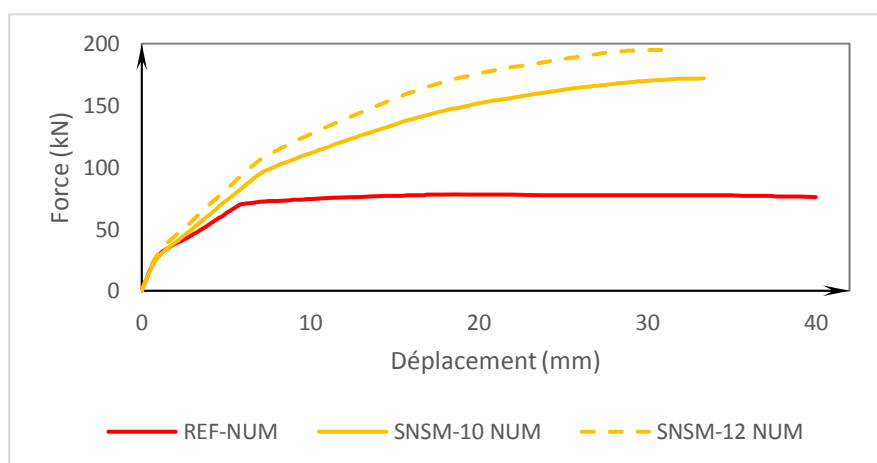


Figure IV-11 : Courbe force déplacement de la poutre de référence et les deux poutres renforcées par la technique SNSM.

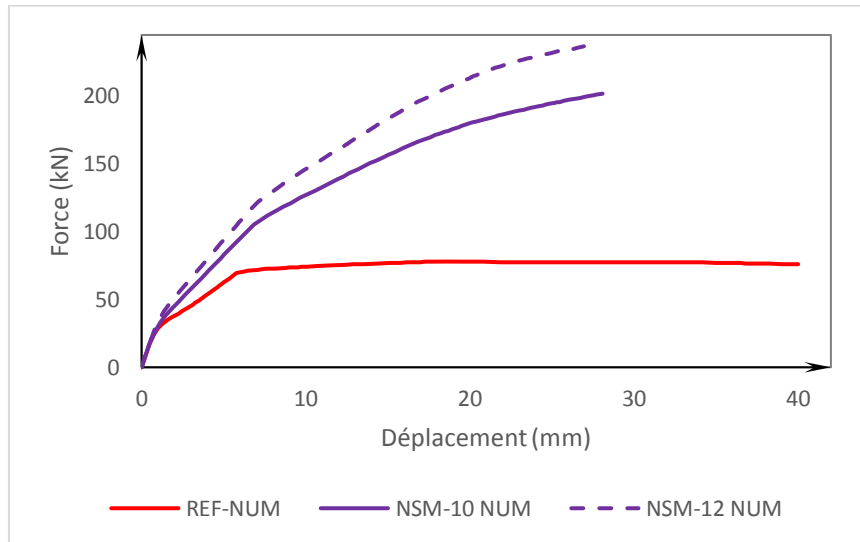
Poutre renforcée par la technique NSM

Figure IV-12 : Courbe force déplacement de la poutre de référence et les deux poutres renforcées par la technique NSM.

Il est constaté sur la Figure IV-12 une augmentation de la capacité flexionnelle en fonction de l'augmentation du taux de renfort. Ce gain est de l'ordre de 46% entre la poutre NSM-12 NUM et NSM-10-NUM.

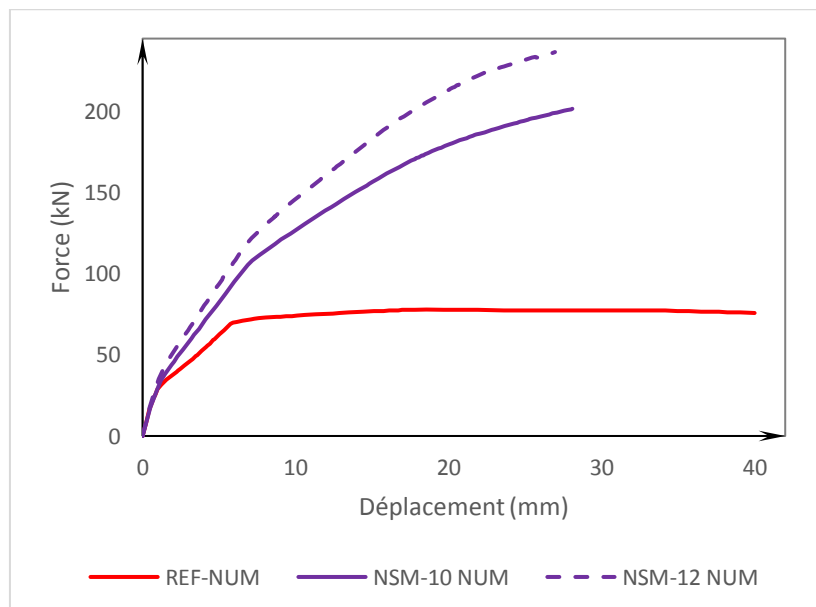
Poutre renforcée par la technique EBR

Figure IV-13 : Courbe force déplacement de la poutre de référence et les deux poutres renforcées par la technique EBR.

Comme pour les deux techniques précédents, l'augmentation du taux du renfort pour la technique EBR a un effet positif, où la poutre EBR-12 NUM a augmenté la capacité flexionnelle de 39% en comparaison à la poutre EBR-10-NUM. (Figure IV-13)

Comparaison

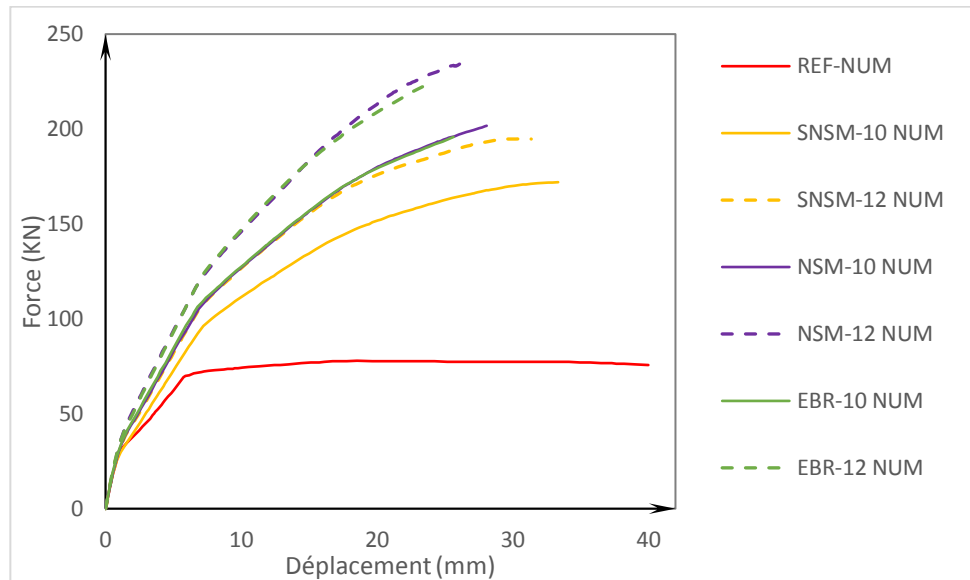


Figure IV-14 : Courbes force déplacement des sept poutres modélisées.

Il a également été distingué par la Figure IV-14 que l'augmentation de la section des renforts a une influence positive sur la résistance à la flexion des poutres renforcées de différentes manières d'une technique à l'autre. Où le gain est moins ressenti pour la technique SNSM par rapport aux deux autres.

7.3. Ductilité des poutres modélisées

L'effet du renforcement sur la ductilité des poutres modélisées a été estimé par le facteur de ductilité. Ce facteur représente la capacité des matériaux à résister à la déformation plastique sans réduction significative des contraintes. (Équation 4-7)

$$\mu = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \quad (4-7)$$

μ : le facteur de ductilité de la déformation.

ε_u : déformation ultime.

ε_y : déformation élastique.

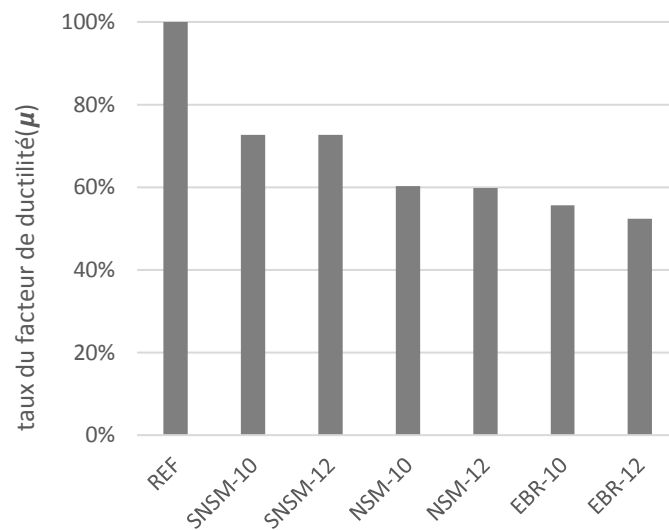


Figure IV-15 : Comparaison entre le facteur de ductilité des poutres modélisées.

A travers la Figure IV-15, nous pouvons remarquer que toutes les poutres renforcées ont perdu environ 40 à 47% de leurs ductilités par rapport à la poutre de référence en raison de l'absence d'un palier plastique dans le cas du PRFC. Par ailleurs, les poutres renforcées par la technique SNSM ont perdu environ 27,35% et 27,39% pour le SNSM-10 et le SNSM-12 respectivement.

7.4. Déformations des matériaux

Tableau IV-4 : Résumé des déformations des matériaux.

ID	Béton			Acier			Renfort en PRFC		
	ϵ_c (mm/m)	ϵ_{cu} (mm/m)	Rate (%)	ϵ_s (mm/m)	ϵ_{su} (mm/m)	Rate (%)	ϵ_f (mm/m)	ϵ_{fu} (mm/m)	Rate (%)
REF NUM	2.40 ‰	3.5 ‰	68.50%	9.99 ‰	10 ‰	99.90%	-	-	-
SNSM-10 NUM	3.50 ‰	3.5 ‰	100%	9.00 ‰	10 ‰	90.00%	13.90 ‰	17 ‰	81.70%
NSM-10 NUM	2.77 ‰	3.5 ‰	79.14%	7.77 ‰	10 ‰	77.70%	10.00 ‰	17 ‰	58.82%
EBR-10 NUM	2.85 ‰	3.5 ‰	81.43	8.00 ‰	10 ‰	80.00%	8.80 ‰	17 ‰	51.76 %

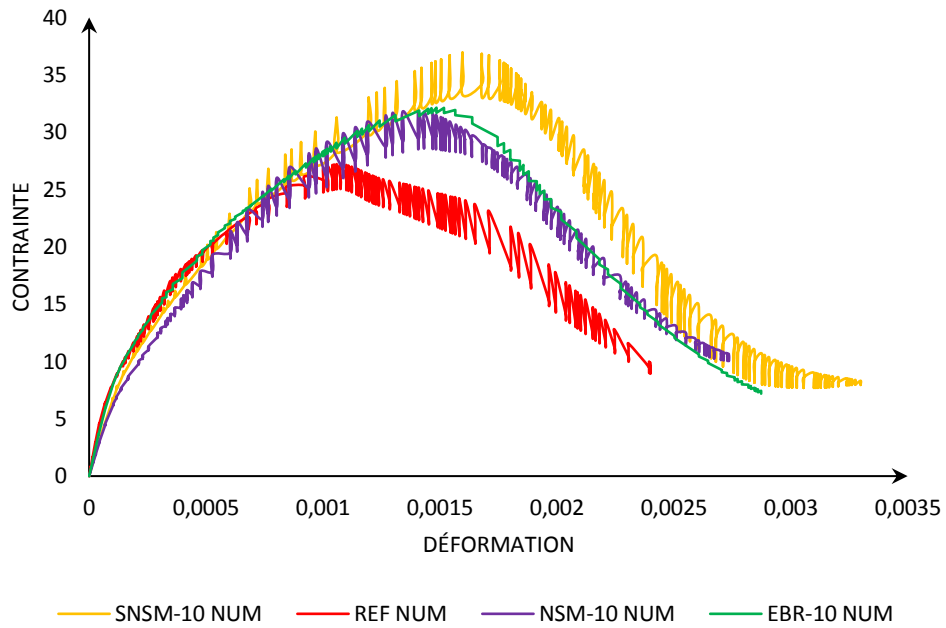


Figure IV-16 : Comportement en compression du béton.

Le Tableau IV-4 et la Figure IV-16 montre un rendement de renforcement de 81,7 % pour la poutre SNSM-10 NUM, avec une pleine utilisation de la capacité du béton en compression. Le Tableau IV-4 montre également que les poutres NSM-10 NUM et EBR-10 NUM ont eu des taux d'efficacité de 58% et 51% respectivement, ceci peu explique les modes de rupture fragile des deux poutres.

7.5.Evolution de l'ouverture de la première fissure

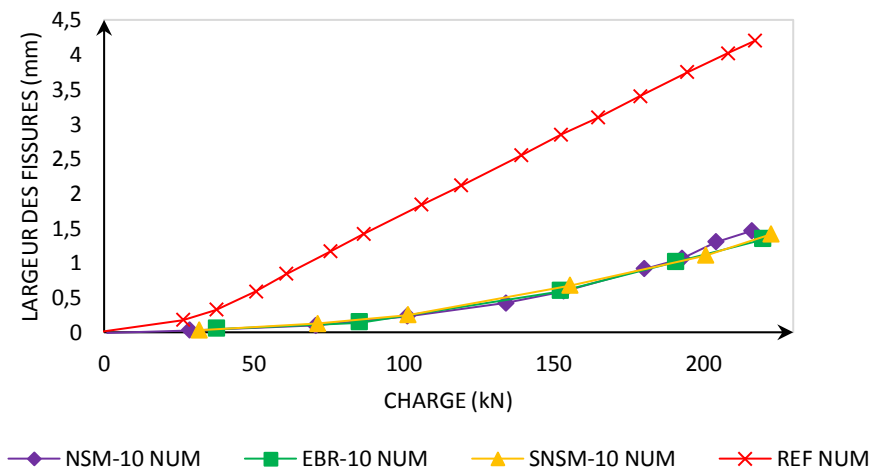


Figure IV-17 : Largeur des fissures /chargement.

La Figure IV-17 montre que les trois techniques ont réduits la propagation des fissures par rapport à la poutre de référence pour un taux moyen de 34%.

7.6. Modes de rupture des poutres modélisées

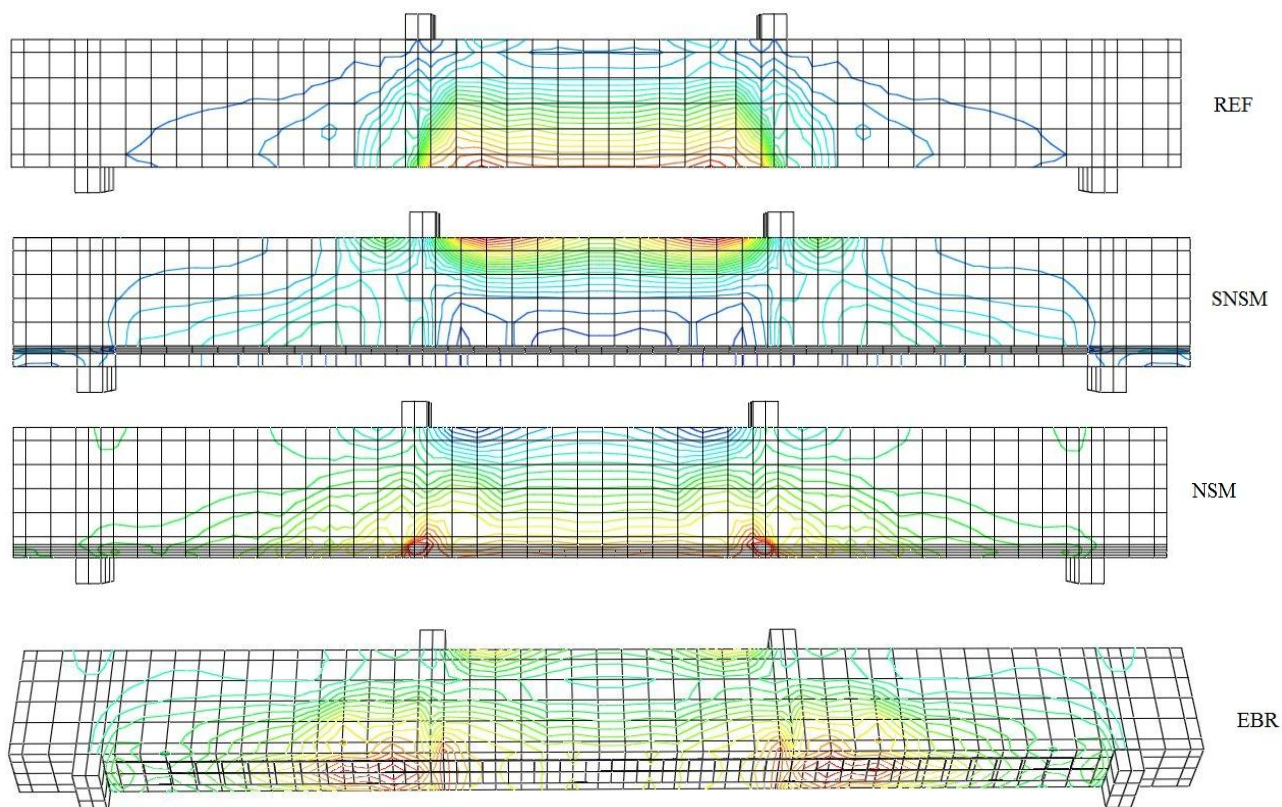


Figure IV-18 : Les distributions des contraintes et les modes de défaillance de l'étude numérique.

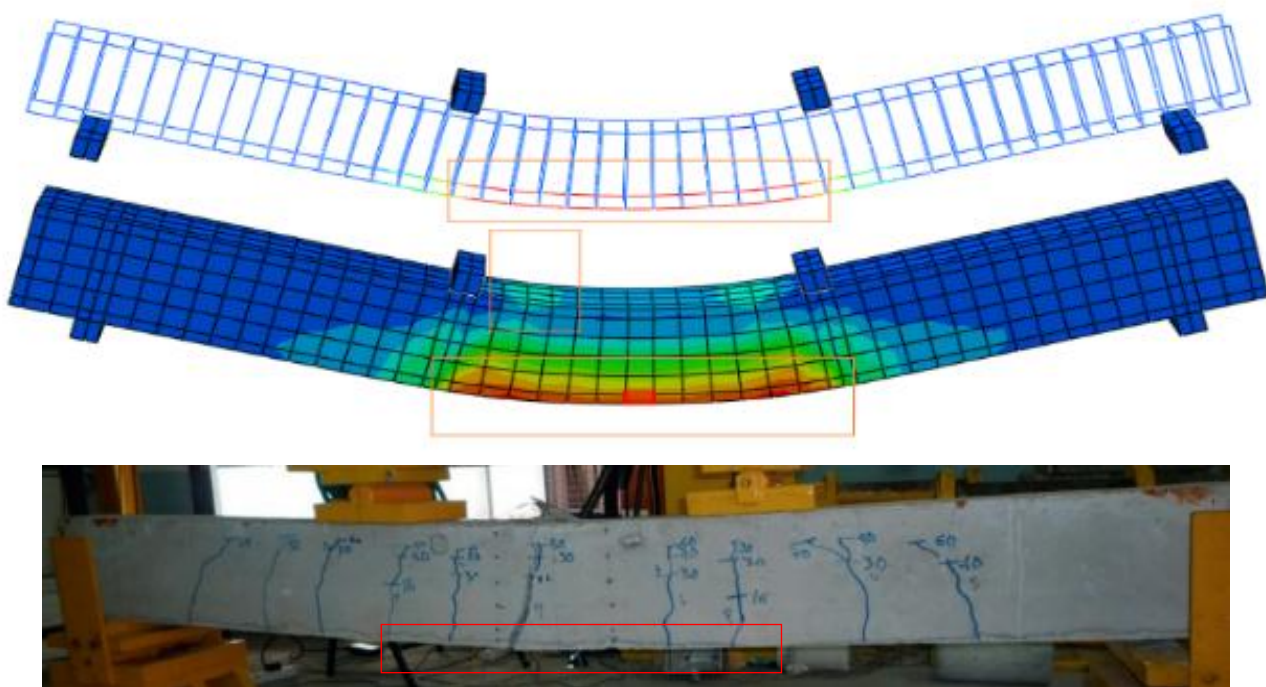


Figure IV-19 : Comparaison des modes de rupture de la poutre de référence avec celle de (Hosen et al., 2015).

Les Figure IV-18 et IV-19 (REF) montrent les distributions de contraintes et le mode de rupture de la poutre de référence. Cette poutre a subi une rupture en flexion typique, qui s'est manifestée par des fissures dans la partie tendue, qui commence à s'ouvrir à partir de 8 kN (Figure IV-17) et continue à se propager jusqu'à ce que les armatures tendues soient plastifiées.

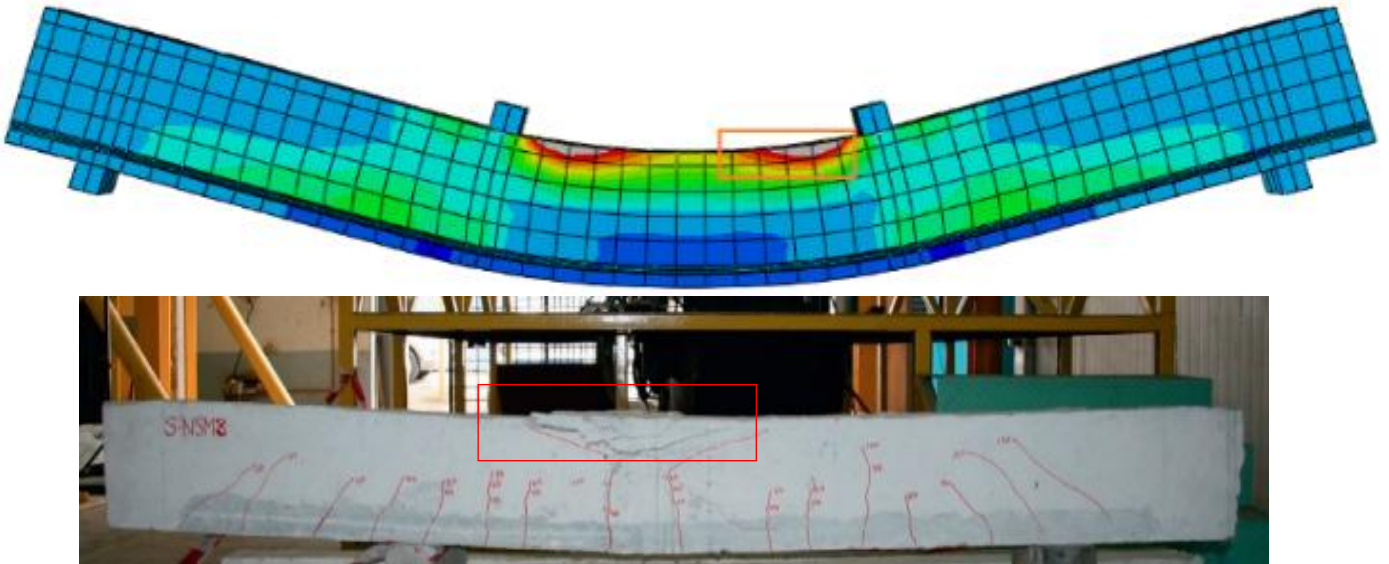


Figure IV-20 : Comparaison des modes de rupture de la poutre renforcée par la technique SNSM avec celle de (Hosen et al., 2015).

Les poutres SNSM-10-NUM et SNSM-12-NUM qui apparaissent à la Figure IV-20 et 4.18 (SNSM) ont subi une rupture par écrasement du béton comprimé. Le renforcement a permis de réduire les premières fissures où la première est apparue à 30 kN.

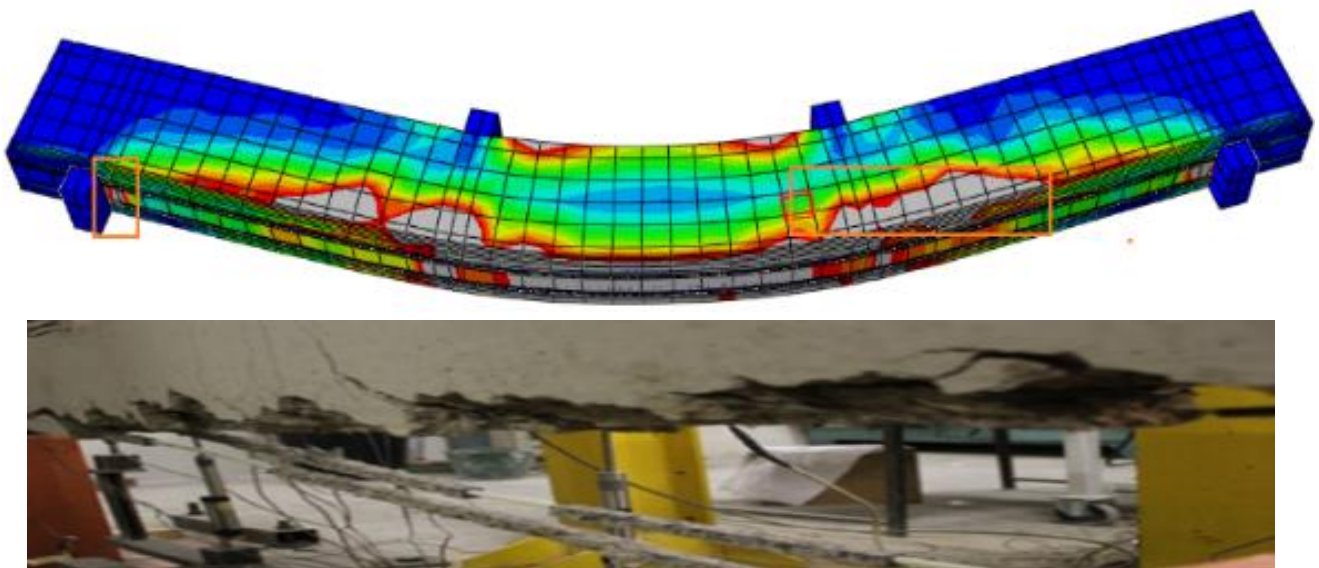


Figure IV-21 : Comparaison des modes de rupture de la poutre renforcée par la technique NSM avec une poutre issue de la littérature.

Une rupture par séparation de l'enrobage en béton est illustrée dans les Figures IV-21 et IV-18 (NSM), concernant les poutres NSM-10-NUM et NSM-12-NUM. Cette rupture s'est manifestée rapidement et brusquement par un décollement de la partie inférieure et l'exposition de l'armature en acier. Ceci est dû à la bonne adhérence du renfort et à la résistance de l'interface entre le béton et le renfort. Cette parfaite adhérence provoque la création de deux corps rigides qui se séparent sous les armatures tendues.

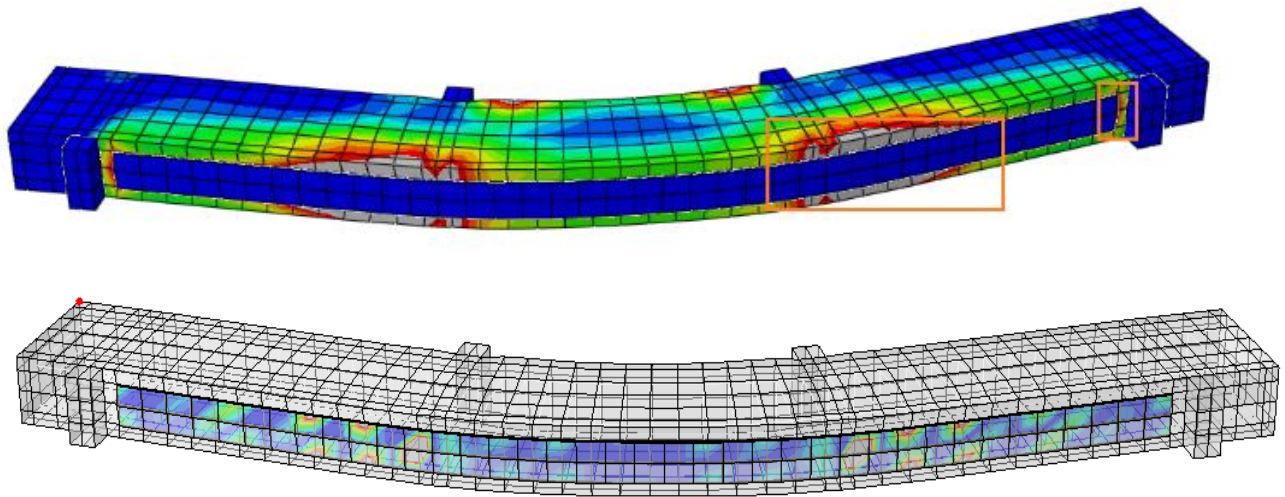


Figure IV-22 : Le mode de rupture de la poutre renforcée par la technique EBR avec la distribution des déformations de l'intérieur et l'extérieur.

Les figures IV-22 et IV-18 (EBR) montrent le mode de rupture des poutres EBR-10-NUM et EBR-12-NUM. Ce mode de rupture se manifeste par l'ouverture d'une fissure qui commence à s'ouvrir dans le béton en sollicitant la plaque de PRF qui y est fixée. Les contraintes créées par la séparation des deux extrémités de la fissure provoquent une fissuration horizontale à l'interface adhésive entre le béton et le renforcement. Cette fissuration entraîne le décollement du renforcement. En effet, il s'agit d'une fissure intermédiaire induite par le décollement de l'interface.

8. Etude paramétrique

Il a été préalablement exposé que la technique SNSM permet de surmonter le mode de rupture par détachement du renfort et par séparation de l'enrobage du béton. A cet effet, une étude paramétrique entre la technique SNSM et NSM a été élaborée dont les paramètres étudiés sont

- La résistance caractéristique du béton avec $f_{c28}=30\text{MPa}$ (SNSM-10-B30), $f_{c28}=48\text{MPa}$ (SNSM-10-B48) et $f_{c28}=55\text{MPa}$ (SNSM-10-B55).
- La longueur du renfort en PRFC entre 1000mm, 1500mm et 1900mm.
- Le taux de renforcement avec des tiges d'un diamètre qui varie entre 8mm, 10 et 12mm.

- Nature du renfort : aramide, verre et carbone

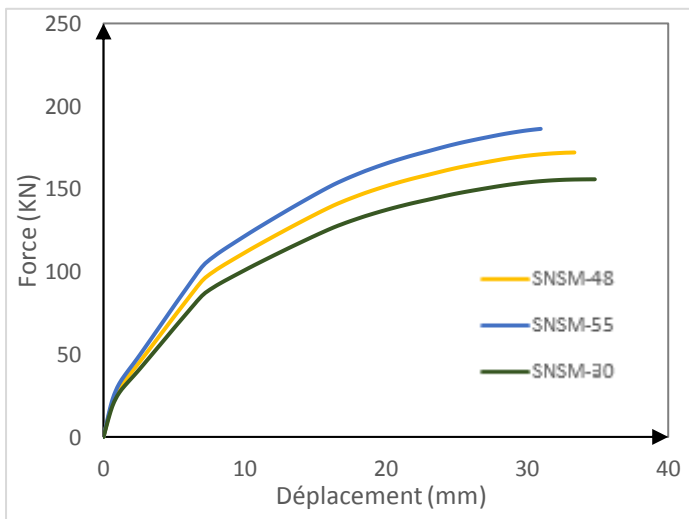
Cette partie a pour but d'étudier l'influence des paramètres cités ci-dessus sur la capacité flexionnelle des poutres renforcées selon la technique SNSM et NSM et leurs modes de rupture.

8.1. Effet de la résistance caractéristique du béton

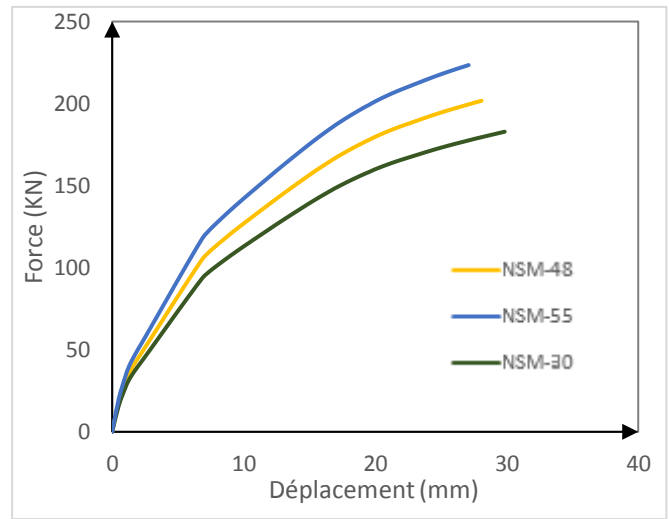
Les résultats reflétant l'effet de la résistance caractéristique du béton sont représentés sur la Figure IV-23 et le Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Effet de la résistance caractéristique du béton

ID	Pu (kN)	Δu mm	Taux (%) Pu/B 48	Béton	Acier	Renfort en PRFC	Mode de rupture
				ϵ_c ‰	ϵ_s ‰	ϵ_f ‰	
SNSM-10-B30	155,76	34,80	9.43	3.50	9.00	14.90	Ecrasement du béton comprimé
SNSM-10-B48	171.98	33.36	-	3.50	9.00	13.90	Ecrasement du béton comprimé
SNSM-10-B55	186.24	30,968	8.15	3.50	10.00	12.90	Ecrasement du béton comprimé
NSM-10-B30	182,85	29,85	10.32	3.4	8.00	11.00	Séparation de l'enrobage du béton
NSM-10-B48	201.71	28.09	-	2.77	7.77	10.00	Séparation de l'enrobage du béton
NSM-10-B55	223.46	27,10	10.78	2.68	9.5	09.50	Séparation de l'enrobage du béton



SNSM



NSM

Figure IV-23 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM et NSM avec différentes valeurs de f_{c28} .

La courbe IV-23, permet de constater que l’résistance caractéristique du béton influe positivement sur la résistance des poutres. Cette influence est traduite par un gain en termes de capacité flexionnelle qui est d’un ordre de 9.43% entre (SNSM-10-B30) et (SNSM-10-B48) et d’un l’ordre de 8.15 % entre (SNSM-10-B48) et (SNSM-10-B55). Cependant, ce gain est de l’ordre de 10.32% entre les poutres (NSM-10-B30) et (NSM-10-B48) et de l’ordre de 10.78% entre (NSM-10-B48) et (NSM-10-B55). Par ailleurs, on constate qu’on a toujours le même schéma entre les deux techniques où la capacité flexionnelle est supérieure pour l’NSM et la ductilité est meilleur pour l’SNSM.

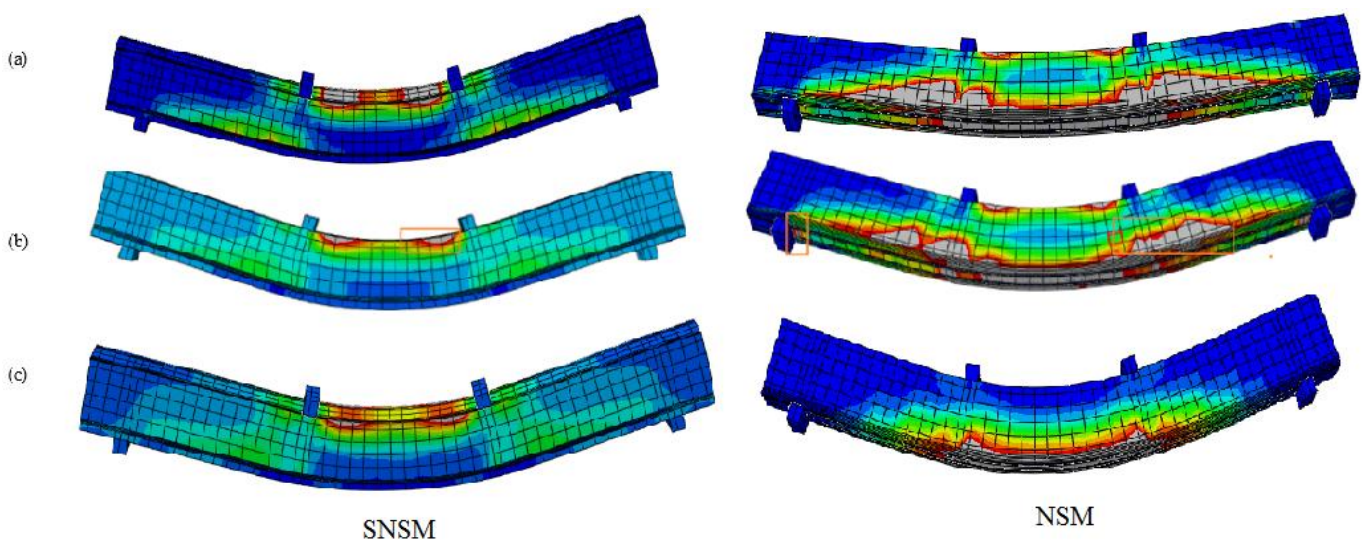


Figure IV-24 : Modes de rupture (a) B30, (b) B48 et (c) B55.

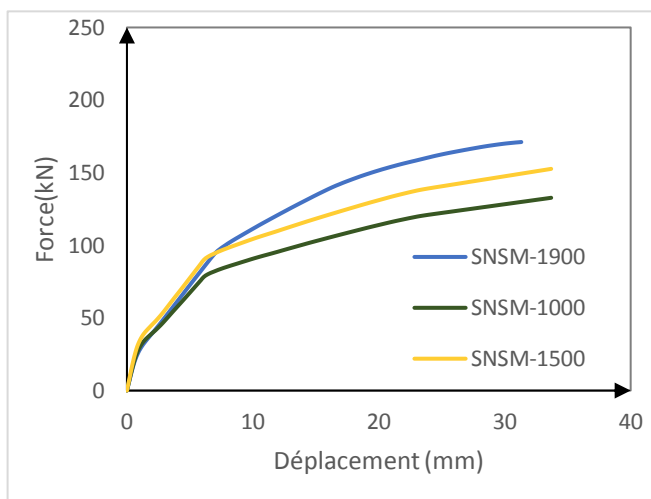
En observant les résultats obtenus en matière de mode de rupture, on remarque que le changement de la résistance caractéristique du béton n’a pas d’effet sur les modes de ruptures des poutres modélisées où on constate une rupture par écrasement du béton et plastification des armatures tendues pour les trois poutres renforcées par SNSM, et détachement du renfort pour les poutres renforcées selon NSM. Toutefois, la poutre avec $F_{c28}=55\text{MPa}$ la partie tendue est moins endommagée en comparaisons aux autres. Par ailleurs, l’exploitation de la capacité du renfort est influencée par la résistance du béton où l’augmentation de cette dernière engendre plus de rigidité par conséquent le renfort est moins sollicité.

8.2. Effet de la longueur du renfort en PRFC

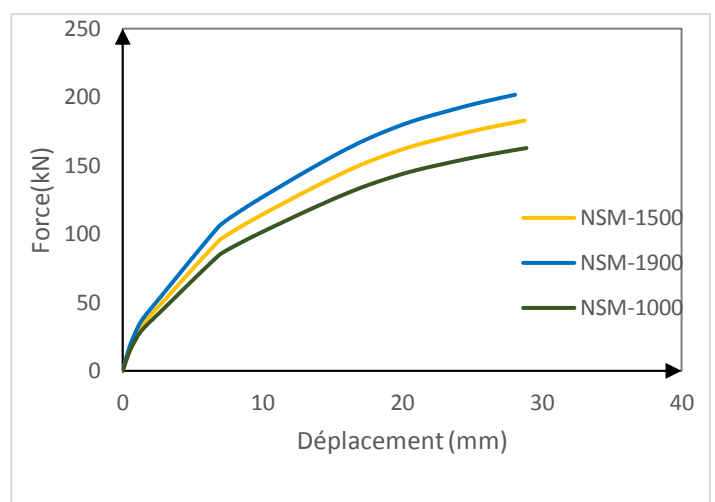
Des barres en PRFC de 1000mm, 1500mm et 1900mm ont été utilisé pour renforcées des poutres selon la technique SNSM et NSM Les résultats obtenus sont les suivantes :

Tableau IV-6 : Effet de la longueur du renfort en PRFC

ID	Pu (kN)	Δu mm	Taux (%) Pu/1900	Béton	Acier	Renfort en PRFC	Mode de rupture
				ϵ_c ‰	ϵ_s ‰	ϵ_f ‰	
SNSM-1000	132.73	31.32	22.82	3.1	10	15	Fissuration de la partie tendue et plastification d'armature
SNSM-1500	152.64	33.69	11.25	3.50	8.5	14.5	Ecrasement du béton comprimé
SNSM-1900	171.98	33.36	-	3.50	9.00	13.90	Ecrasement du béton comprimé
NSM-1000	162.76	28.90	19.30	3.50	9.00	13.40	Ecrasement du béton comprimé
NSM-1500	182.88	28.78	9.34	3.5	7.90	11.00	Séparation de l'enrobage du béton
NSM-1900	201.71	28.09	-	2.77	7.77	10.00	Séparation de l'enrobage du béton



SNSM



NSM

Figure IV-25 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM et NSM avec différentes longueurs de PRFC

La Figure IV-25 montre qu'une diminution de la longueur du renfort a engendrée une perte de capacité flexionnelle de l'ordre de 11.25% et 22.82% pour les poutres SNSM-1500 et SNSM-1000 respectivement, et 9.34% pour la poutre NSM-1500 et 19.30% pour la poutre NSM-1000. Cette influence est similaire entre les deux techniques où la capacité flexionnelle est supérieure concernant l'NSM et la ductilité est meilleur pour l'SNSM.

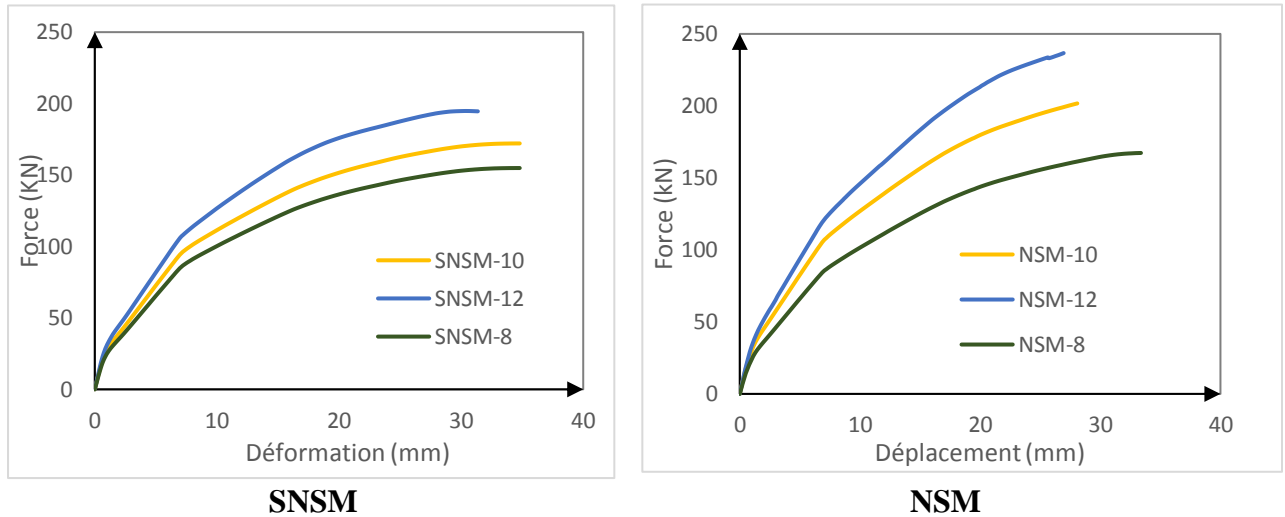


Figure IV-27 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM avec différents taux de PRFC

On constate à partir de la Figure IV-27 que l’effet du taux de renforcement sur la capacité flexionnelle des poutres est plus accentué pour les poutres en NSM avec 17.06 % entre NSM-8 et NSM-10 et 17.32% entre NSM-10 et NSM-12. Contre 9.93% entre SNSM-8 et SNSM-10 et 13.13% entre SNSM-10 et SNSM-12. Il s’est avéré que la poutre NSM-8 a eu une meilleure capacité flexionnelle par rapport à SNSM-8 et une bonne ductilité à l’encontre des autres poutres. Toutefois, le matériau composite n’est pas totalement exploité d’où la rupture par séparation de l’enrobage du béton qui s’est manifesté

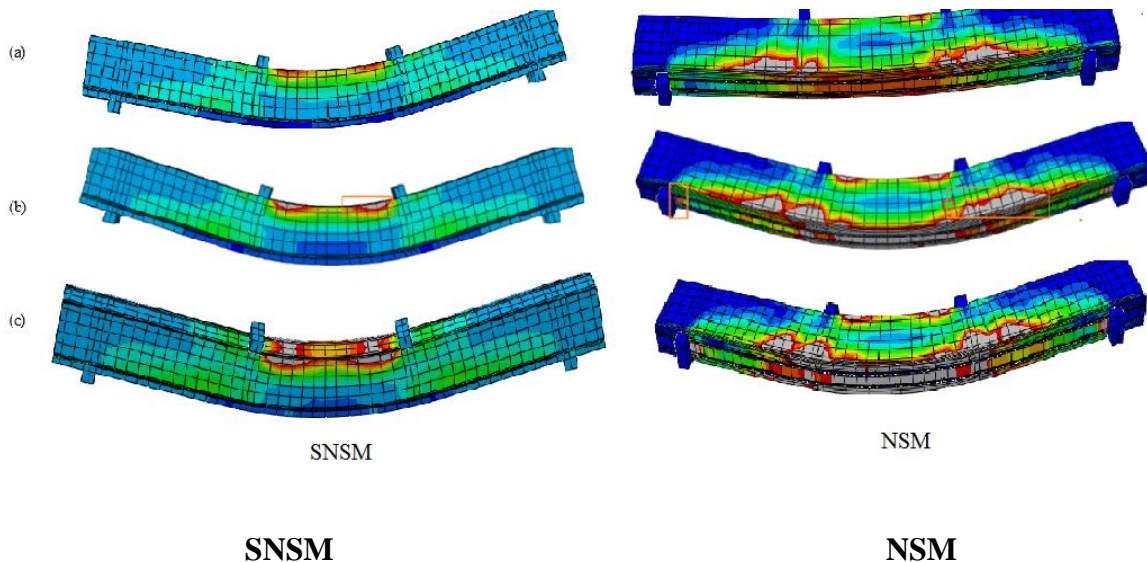


Figure IV-28 : Modes de rupture (a) 08, (b) 10 et (c) 12.

Les modes de ruptures constatés pour les poutres renforcées selon la technique SNSM demeure inchangé par écrasement du béton comprimé pour l’ensemble. Pareillement, le mode de rupture des poutres renforcées par la technique NSM reste la séparation de la partie de l’enrobage du béton.

Ceci avec une meilleure exploitation du renfort pour les techniques en SNSM en particulier SNSM-8.

8.4. Effet de la nature du renfort entre aramide, verre et carbone

L'impact de ce paramètre est étudié par la modélisation de trois poutres renforcées en SNSM et trois renforcées en NSM par des barres dont les caractéristiques sont les suivantes :

- SNSM-V : Fibres de verre, Module d'élasticité longitudinale 30 GPa, Résistance à la traction 800 MPa.
- SNSM-C : Fibres de carbone, Module d'élasticité longitudinale 124 GPa, Résistance à la traction 1850 MPa.
- SNSM-A : Fibres d'aramide, Module d'élasticité longitudinale 55 GPa, Résistance à la traction 1100 MPa.

Tableau IV-8 : Effet de la nature du renfort

ID	Pu (kN)	Δu mm	Taux (%) Pu/C	Béton	Acier	Renfort en PRFC	Mode de rupture
				ϵ_c ‰	ϵ_s ‰	ϵ_f ‰	
SNSM-V	132.73	33.68	21%	3.1	10	48	Rupture du renfort
SNSM-C	171.98	33.36	-	3.50	9.00	13.90	Ecrasement du béton comprimé
SNSM-A	141.95	28.24	29%	2.5	8.00	25	Rupture du renfort
NSM-V	125.44	34.45	60%	3.5	9	38	Ecrasement du béton comprimé
NSM-C	201.71	28.09	-	2.77	7.77	10.00	Séparation de l'enrobage du béton
NSM-A	167.44	32.98	20.5	2.6	7.5	18	Séparation de l'enrobage du béton

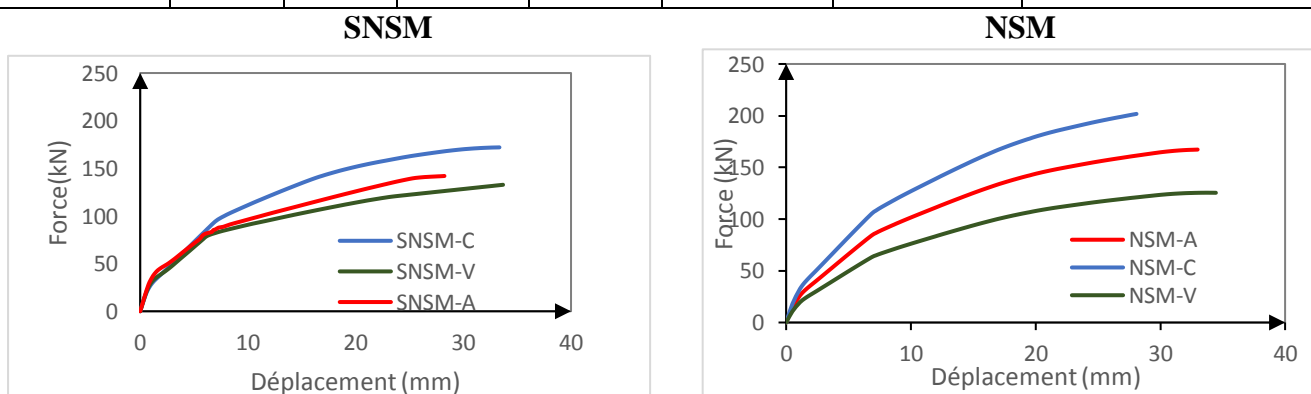


Figure IV-29 : Courbes force déplacement des poutres renforcées en SNSM et NSM avec différents natures de PRF

La Figure IV-29 montre que la résistance de la poutre renforcée en fibre de carbone est supérieure à celle renforcée par fibre d'aramide avec un taux de 29 % entre les poutres en SNSM et 21 % les poutres

en NSM. Cependant, les poutres en fibre de verre sont inférieures avec un taux de 30 % à ceux en fibres de carbone renforcées selon SNSM et 60% selon NSM. La poutre NSM-V a enregistré une bonne ductilité en comparaison avec NSM-A et NSM-C avec un meilleur mode de rupture. Chose qui n'a pas été constaté pour la technique SNSM où le carbone reste le meilleur choix en matière de capacité flexionnelle et ductilité

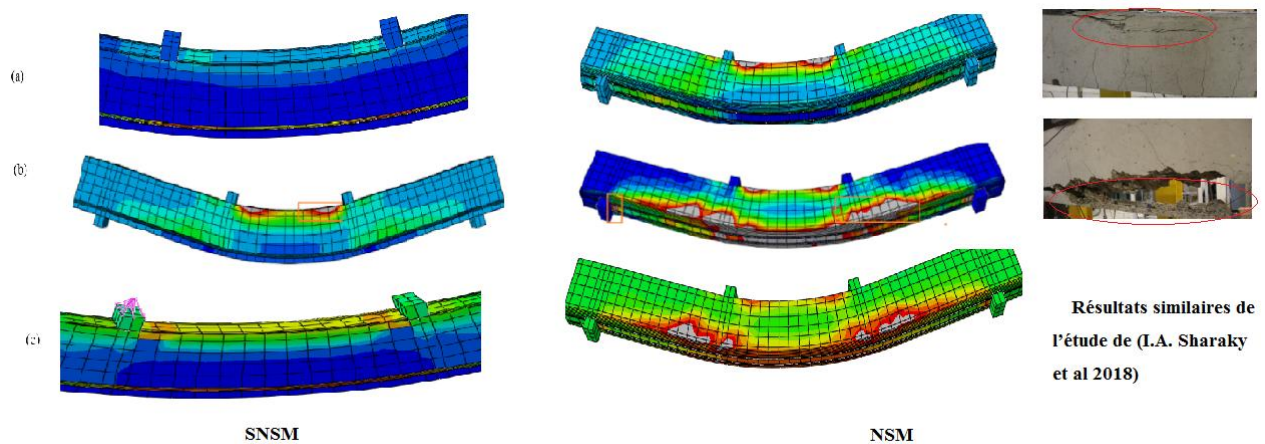


Figure IV-30 : Modes de rupture (a) Verre, (b) Carbone et (c) Aramide

La Figure IV-30 montre que les poutres renforcées par les fibres de verre et les fibres d'aramide selon SNSM ont subi une rupture par écrasement du béton et rupture par traction du renfort. Tandis que, la poutre renforcée en fibres de carbone le renfort n'a pas atteint sa résistance maximale. Néanmoins, les poutres renforcées par la technique NSM-C et NSM-A ont subi une rupture par séparation de l'enrobage du béton contrairement à celle renforcées en fibre de verre qui a subi un écrasement du béton comprimé.

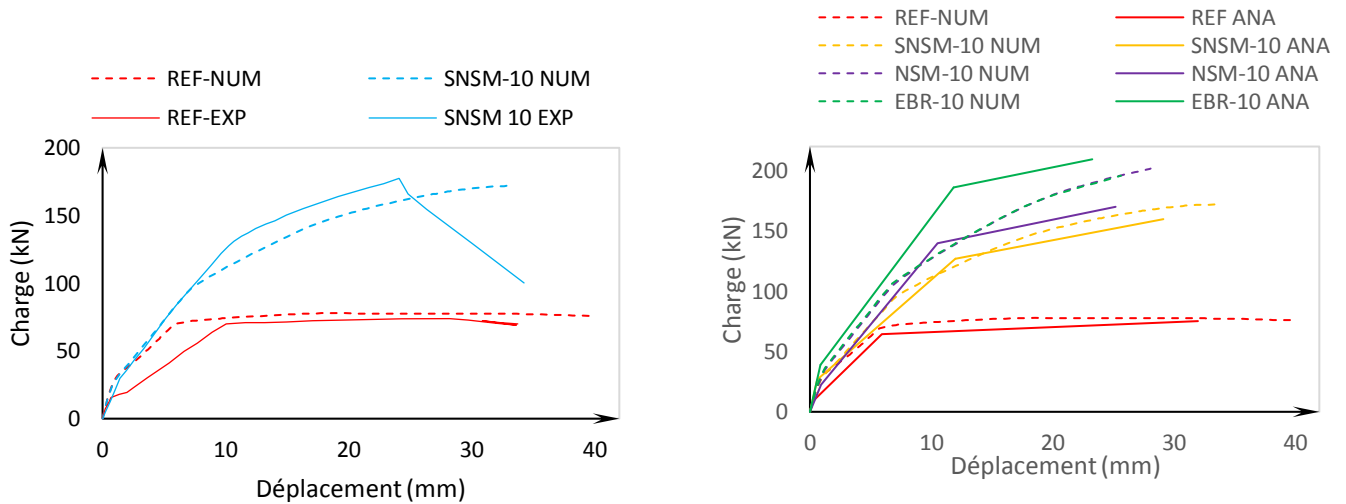
Les ruptures des poutres renforcées en fibres de verres et carbonées par la technique NSM sont similaires à ceux de l'étude expérimentales de (I.A. Sharaky et al 2018).

9. Validation des résultats

Afin de valider l'étude numérique, les résultats obtenus, en particulier les courbes forces déplacements, ont été comparés aux résultats analytiques et à ceux de l'étude expérimentale menée par (Hosen et al., 2015). Où les poutres testées dans cette dernière sont identiques aux poutres modélisées.

La Figure IV-23 (A) illustre la comparaison entre les courbes forces déplacements des poutres de l'étude numérique et de l'étude expérimentale, où une bonne cohérence est perçue. Cette cohérence se traduit par des taux de précision de la charge ultime de 95% et 96% pour les poutres REF et SNSM-

10, respectivement. En outre, la Figure IV-23 (B) montre la comparaison entre les courbes de déplacement force des poutres de l'étude numérique et analytique. Où la précision de la charge ultime des poutres REF et EBR-10 est de 97% avec 93% et 80% pour les poutres SNSM-10 et NSM-10, respectivement.



(A) Comparaison entre l'étude expérimentale et l'étude numérique.

(B) Comparaison entre l'étude analytique et l'étude numérique.

Figure IV-23 : Comparaison entre les courbes charge-déplacement.

Comparaison avec d'autres travaux de la littérature :

Tableau IV-9 : Tableau récapitulatif des résultats des études antérieures.

Auteurs	Désignation	b (mm)	l (mm)	h (mm)	Sections des armatures		Pu (KN)	Δmax (mm)	Mode de rupture
					Comprimés (mm ²)	Tendus (mm ²)			
Md. AKTER HOSEN 2018	CB	125	2300	250	157	226,08	68	35.33	Rupture flexionnelle
	S2H				157	226,08	153	47.60	Rupture flexionnelle
	S2V				157	226,08	138	46.85	Rupture flexionnelle
	S3H				157	226,08	154	48.23	Rupture flexionnelle
	S3V				157	226,08	160	48.06	Rupture flexionnelle
	S4H				157	226,08	156	27.03	Séparation de l'enrobage
	S4V				157	226,08	168	42.63	Rupture flexionnelle
Md. AKTER HOSEN 2015	CB	125	2300	250	157	226,08	70	35	Rupture flexionnelle
	SNS8				157	226,08	140	25	Rupture flexionnelle
	SNS10				157	226,08	180	28	Rupture flexionnelle
	SNS12				157	226,08	180	18	Séparation de l'enrobage
	SNC8				157	226,08	110	40	Rupture flexionnelle
	SNC10				157	226,08	130	20	Rupture flexionnelle
	SNC12				157	226,08	140	18	Rupture flexionnelle

									Séparation de l'enrobage
A.A. Shukri ET AL 2015	CB	125	2300	250	157	226,08	74.37	33.61	Rupture flexionnelle
	SNC8				157	226,08	142.03	22.27	Rupture flexionnelle
	SNC10				157	226,08	176.78	24.03	Rupture flexionnelle
	SNC12				157	226,08	173.02	16.89	Rupture flexionnelle
	PSNC10				157	226,08	141.54	25.99	Rupture flexionnelle
	PSNC12				157	226,08	171.13	20.95	Rupture flexionnelle
					157	226,08	169.41	13.86	Séparation de l'enrobage
Abdallah, M et al 2019	CB	150	3000	280	56,5	226,08	72.8	59.3	Rupture flexionnelle
	BC1				56,5	226,08	116.0	50.4	Rupture flexionnelle
	BC2				56,5	226,08	106.4	22.9	Rupture flexionnelle
	BC3				56,5	226,08	106.0	38.2	Rupture flexionnelle
	BC4				56,5	226,08	94.1	16.2	Rupture flexionnelle
	BC5				56,5	226,08	102.7	40.4	Rupture flexionnelle
					56,5	226,08			

La comparaison de ces travaux antérieurs a démontré que le renforcement par PRFC augmente la résistance et la rigidité des poutres, en réduisant la ductilité d'une façon importante pour les poutres renforcées selon la technique NSM par rapport aux poutres de contrôle, inversement aux techniques SNSM où la perte de ductilité reste minime en comparaison avec la technique NSM.

La majorité des poutres renforcée par la technique SNSM étudiée par les travaux présentés ont subi une rupture flexionnelle à l'encontre des poutres renforcées par la technique NSM où la séparation de l'enrobage est le mode de rupture dominant.

10. Conclusion

Le but de ce chapitre est d'établir une simulation numérique pour comparer les trois techniques de renforcement : SNSM, NSM et EBR. Durant lequel la capacité de flexion, la ductilité et les modes de rupture des poutres ont été étudiés. Additivement, une étude paramétrique portant sur l'effet de plusieurs paramètres comparant la technique SNSM et NSM a eu lieu. Les résultats obtenus, nous ont permis de conclure ce qui suit :

- Le modèle numérique utilisé permet de prédire le comportement des poutres en béton armé renforcées selon les trois techniques avec une bonne cohérence entre les résultats numériques, expérimentaux et analytiques.
- La modélisation numérique permet de prédire les modes de rupture des poutres modélisées en comparaison avec la littérature.
- Une augmentation significative de la capacité de flexion a été observée pour les trois techniques de renforcement avec des gains de l'ordre de 171.98%, 201.71% et 195.48% pour

SNSM, NSM et EBR respectivement. Cependant, une augmentation considérable de la rigidité a entraîné des modes de rupture fragiles et brusque pour les poutres en NSM et ceux en EBR, contrairement aux poutres renforcées selon SNSM, où la ductilité est mieux préservée avec 27 % de perte uniquement.

- Les résultats relatifs aux déformations et à l'allongement des matériaux permettent de constater que les poutres renforcées selon la technique SNSM ont une meilleure optimisation de renforcement d'environ 81,7%.
- La technique SNSM a permis d'éviter le mode de rupture par décollement et par séparation de l'enrobage du béton, Ceci a entraîné un meilleur mode de rupture par écrasement du béton comprimé.
- L'augmentation du taux de renforcement a une influence positive sur la capacité de flexion des poutres renforcées. Cette augmentation est plus ressentie pour les poutres selon la technique NSM avec un gain de 17% en comparaison à ceux selon la technique SNSM où le gain est de 13%.
- L'augmentation de la résistance caractéristique du béton permet d'augmenter la capacité flexionnelle des poutres renforcées selon les deux techniques étudiées avec un gain d'environ 9.5% pour l'SNSM et 10.5% pour l'NSM.
- L'augmentation de la longueur du renfort permet également d'augmenter la capacité flexionnelle de toutes les poutres.
- Le fait de placer un renfort court a amélioré le mode de rupture de la technique NSM.
- Les fibres de verre ont permis à la technique NSM de préserver plus de ductilité que les fibres de carbone et aramide. Seulement, les fibres de carbone restent le meilleur choix pour la technique SNSM avec une capacité flexionnelle supérieure et un mode de rupture préférable.

CHAPITRE 5

V

INFLUENCE DU PÉRIMÈTRE DE LIAISON ENTRE LE BÉTON ET LE RENFORT

V. Chapitre 5 : Influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort

1. Introduction

C'est dans la même thématique du chapitre précédent que le présent chapitre port sur une deuxième modélisation numérique à l'aide du logiciel ABAQUS afin d'étudier l'influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort. Les spécimens ont été inspirés d'un travail expérimental tiré de la littérature, cette étude vise à :

- 1- Eloigner les deux barres en PRFC dans le but d'éviter leur interaction qui peut être à l'origine de la rupture en bloc de la partie inférieure de la poutre afin d'éviter la zone la plus solliciter et protéger l'enrobage du béton.
- 2- Vérifier l'influence de la position du renfort notamment le périmètre de liaison et l'inertie du renfort.

2. Configuration des poutres modélisées

L'étude consiste à soumettre à la flexion en quatre points, quatre poutres en béton armé, avec 2300 mm de longueur et une section transversale rectangulaire de 125 mm de largeur et 250 mm de hauteur et une portée entre appuis de 2000 mm. Le ferrailage des poutres est composé d'armature en acier haute adhérence, soit (2 HA 12) en traction et (2 HA 10) en compression, pour éviter une rupture par cisaillement, des armatures lisse transversales en cadre de $\varnothing 6$ mm espacé de 50 mm ont été placées le long de la poutre, trois parmi les quatre poutres ont été renforcés selon la (Figure V-1) et le (Tableau V-1) par deux barres en PRFC de 1900 mm de longueur et une section de (5X15) mm ancrés dans des rainures de (10X20) mm remplis en raiiné époxy, et la quatrième a été considérée comme poutre de référence. Pour vérifier l'influence du périmètre de liaison entre le béton est le renfort pour les poutres renforcées selon la technique SNSM le renfort sera placé une fois verticalement et une autre fois horizontalement. En effet, le fait de positionner le renfort horizontalement donne plus de périmètres de liaison que verticalement.

Afin de valider les résultats de cette simulation, les dimensions et les caractéristiques des matériaux seront identiques à ceux de l'étude expérimental de (Hosen et al., 2018).

Tableau V-1 : Détail des poutres testées.

N°	DESIGNATION	COUPE	ID
01	Poutre de référence sans renfort	COUPE A-A	REF
02	Poutres renforcées par la méthode SNSM avec deux barres de PRFC 15x5 mm position vertical	COUPE B-B	PLH
03	Poutres renforcées par la méthode SNSM avec deux barres de PRFC 15x5 mm position horizontal	COUPE C-C	PLV
04	Poutres renforcées par la méthode NSM avec deux barres de PRFC 15x5 mm	COUPE D-D	PLI

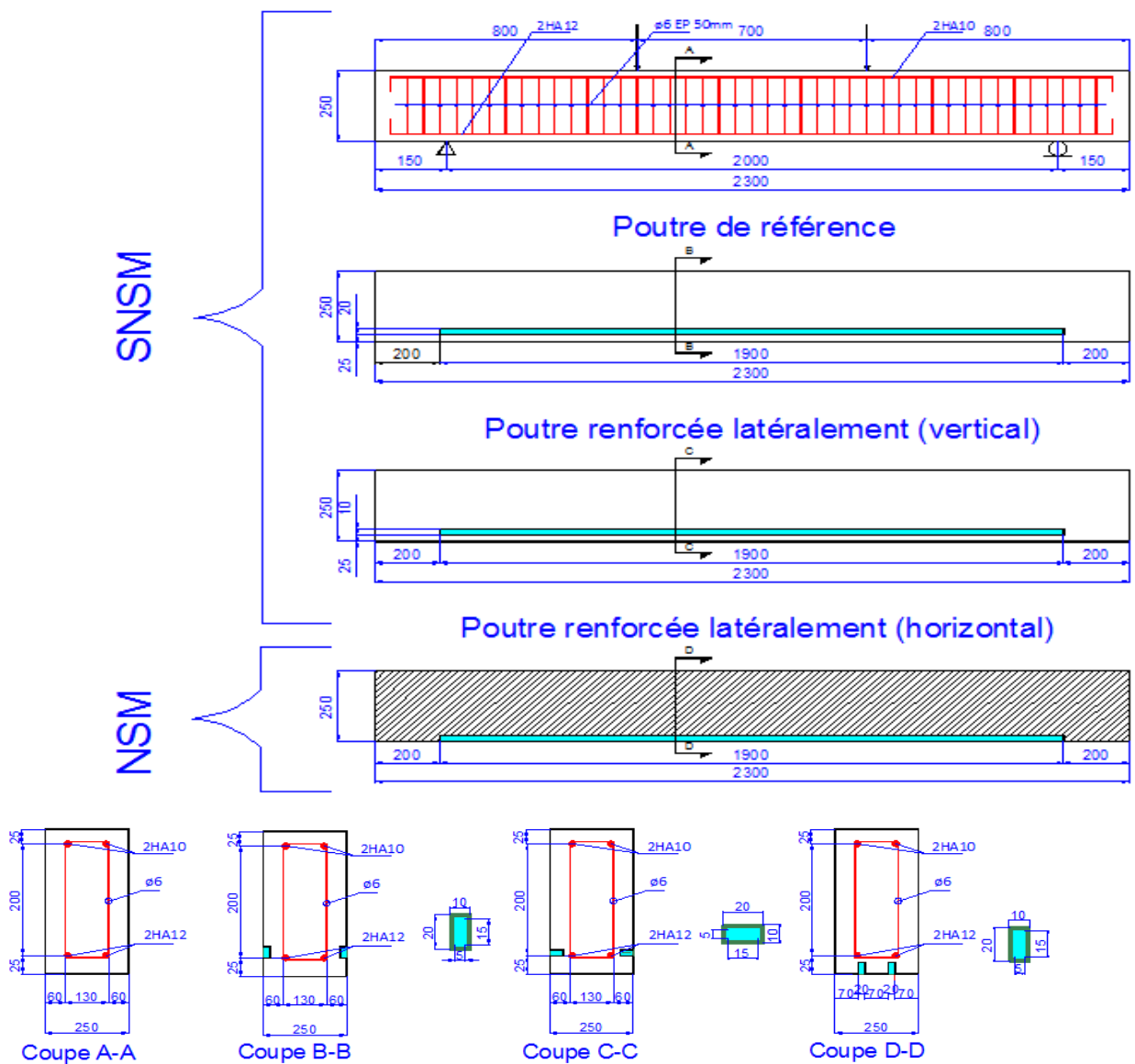


Figure V-1 : Détail des poutres testées.

3. Lois de comportement et caractéristique des matériaux

3.1. Le béton

On a opté pour un élément solide pour modéliser un béton ordinaire de 48.4 MPa de résistance à la compression et de 9.6 MPa de résistance à la traction, on a eu recouru à un modèle appelé (CDP) CONCRETE DAMAGED PLASTICITY MODÈLE.

Tableau V-2 : Résumé des paramètres du modèle CDP.

Paramètres	Valeurs
Angle de dilatation	36°
Excentricité	0.1
$\Pi = \sigma_{B0} / \sigma_{C0}$	1.16
K	0.667
Viscosité	0

3.2.L'acier

Le ferrailage a été modélisé comme étant un élément de type (wire) dans le béton selon un modèle élasto-plastique parfait. Ça masse volumique est de 7850 kg /m³ du type FE550 pour les barres de traction et de compression, avec un FE300 pour les cadres avec un module d'élasticité de E= 200 GPa et un coefficient de poisson de $\nu=0.3$.

3.3.Le renfort en PRFC

Le renforcement se résume en deux éléments solides l'un incorporé dans l'autre suivant un modèle de comportement cohésif. Le premier élément est le renfort en PRFC avec un module d'élasticité de E= 165 GPa et une résistance à la traction de 3100 MPa. Le deuxième est une résine époxy de 11.2 GPa de module d'élasticité à la compression et de 9.6 GPa a la traction, et une résistance de 95 MPa, 19 MPa et 31 MPa à la compression au cisaillement et à la traction respectivement.

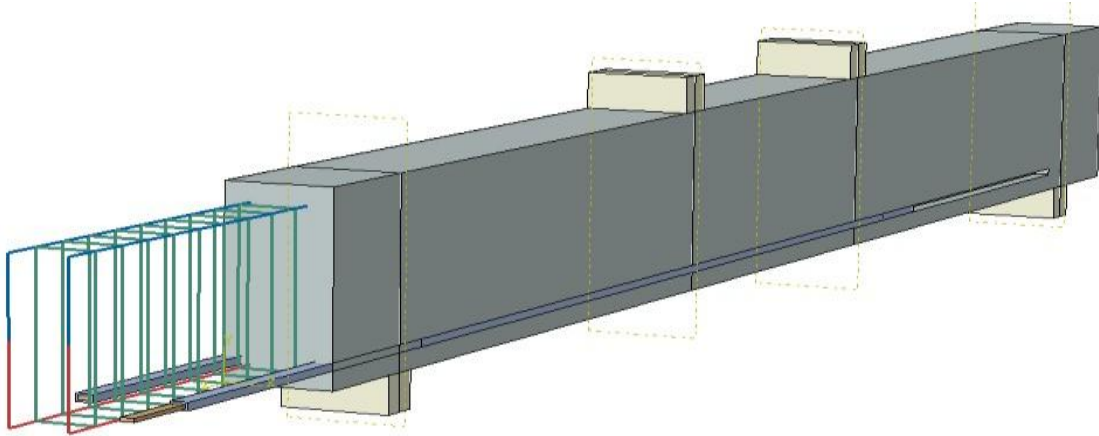


Figure V-2 : Matériaux et éléments de la modélisation 3D.

4. Maillage

Le maillage de renforcement et l'acier sont de type T3D2 : une poutre linéaire tridimensionnelle à deux nœuds. Alors que pour la poutre, il est de type C3D8R : une brique linéaire à huit nœuds, intégration réduite. Cependant, les zones de renforcement ont eu un maillage plus raffiné, qui était nécessaire pour converger.

5. Résultats et discussions

Les résultats de cette étude numérique seront présentés de la manière suivante :

- Capacité flexionnelle des poutres modélisées
- Influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort analyse de l'effet du renforcement sur la ductilité des poutres modélisées
- Analyse des modes de rupture des poutres modélisées
- Validation des résultats

Tableau V-3 : Résumé des résultats.

ID	déplacement ultime (mm)	La force à la rupture (kN)	Taux d'augmentation (%)	Mode de rupture
REF	41,68	64,45	-	Rupture flexionnelle
PLV	29,75	111,17	172,50%	Séparation de l'enrobage du béton
PLH	30,55	114,82	178,17%	Rupture flexionnelle
PI	22,85	117,09	181,68%	Séparation de l'enrobage du béton

5.1. Capacité flexionnelle des poutres modélisées

Les résultats relatifs à l'effet du renforcement sur la résistance des poutres modélisées seront exprimés par des figures montrant les courbes force déplacement des sept poutres modélisées

Poutre de référence

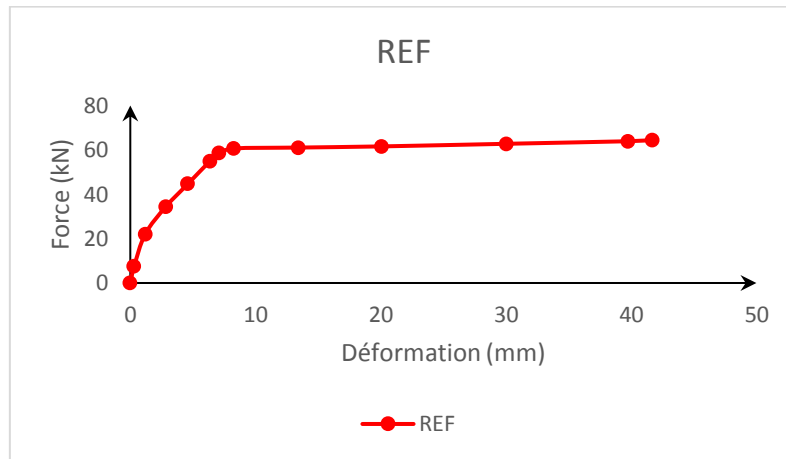


Figure V-3 : Courbe force déplacement de la poutre de référence.

La Figure V-3 présente le comportement de la poutre de référence sans renforcement où la charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 64,45$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta_u = 41,68$ mm.

Cette figure montre que le comportement modélisé obier a un comportement typique des poutres en béton armé soumis à la flexion. Et ceux en remarquant les trois phases avant fissuration, écoulement des aciers et rupture de la poutre.

Poutre renforcée par la technique SNSM avec renforcement vertical

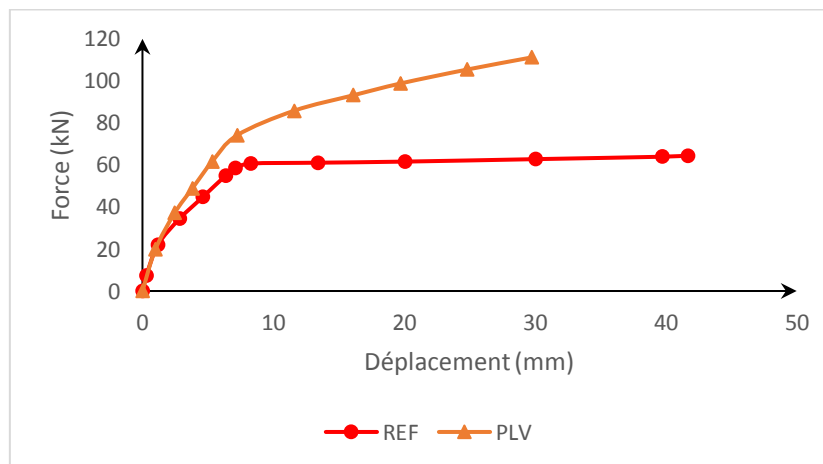


Figure V-4 : Courbe force déplacement des poutres PLV et REF.

Il est constaté par la Figure V-4 que la poutre PLV a enregistré une augmentation de la capacité flexionnelle par rapport à la poutre de référence de 172,50%. La charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 111,17$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta u = 29,75$ mm.

Poutre renforcée par la technique SNSM avec renforcement horizontal

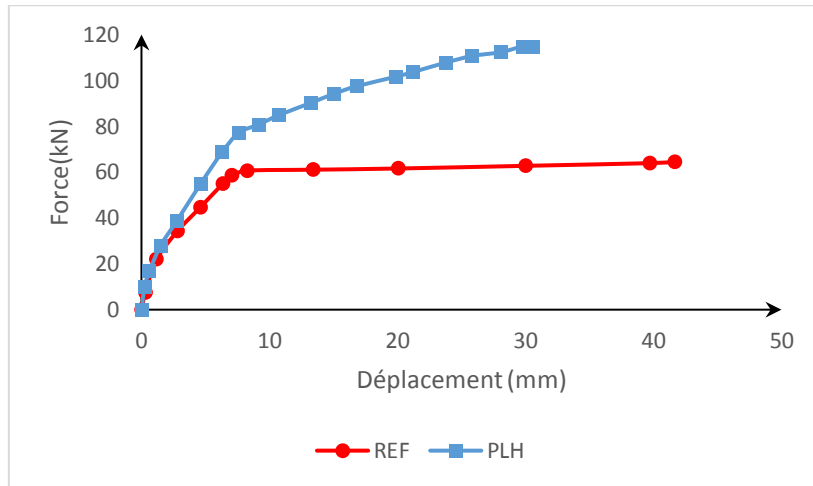


Figure V-5 : Courbe force déplacement des poutres PLH et REF.

Pareillement, il est aussi constaté par la Figure V-5 que la poutre PLH a subi une augmentation de la capacité flexionnelle par rapport à la poutre de référence de 178,17%. La charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 114,82$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta u = 30,55$ mm.

Poutre renforcée par la technique NSM

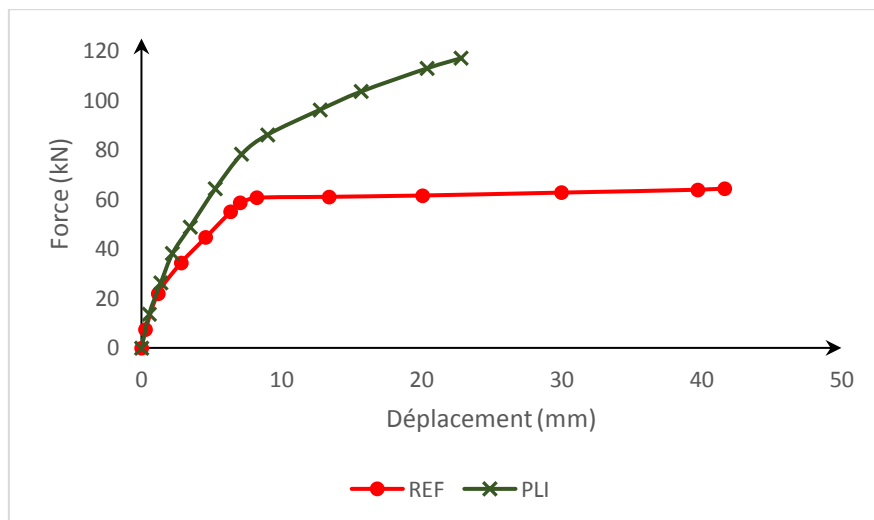


Figure V-6 : Courbe force déplacement de la poutre renforcée par la technique NSM.

La Figure V-6 exprime le comportement de la poutre renforcée par la technique NSM où la charge à la rupture a été de l'ordre de $P_u = 117,09$ kN avec un déplacement ultime de $\Delta_u = 22,85$ mm soit un taux d'augmentation de 181,68% par rapport à la poutre de référence.

5.2. Influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort analyse de l'effet du renforcement sur la ductilité des poutres modélisées

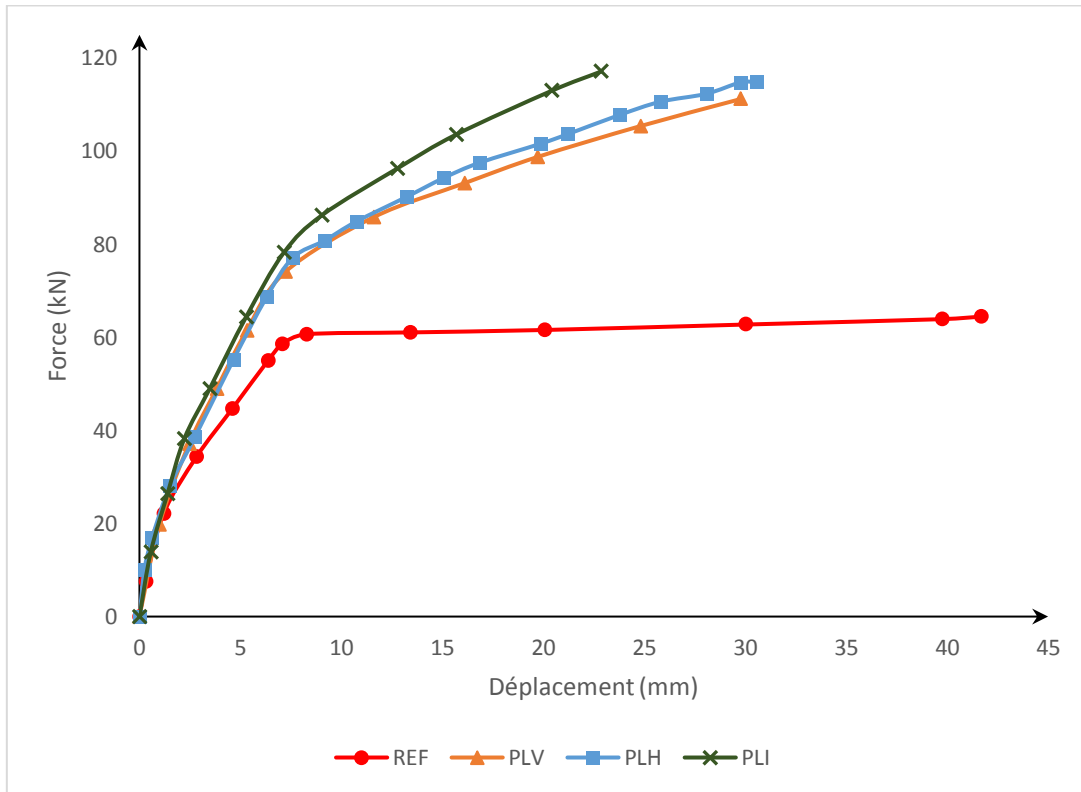


Figure V-7 : Comparaison entre les courbes force déplacement des poutres.

La comparaison entre les courbes forces déplacements des quatre poutres modélisées démontre l'avantage de 5,67% avec un comportement légèrement plus ductile pour la poutre PLH par rapport à la poutre PLV. En revanche, les poutres renforcées par la technique SNSM soit PLH et PLV ont enregistrées un comportement largement plus ductile par rapport à la poutre PLI renforcée par la technique NSM. Toutefois, cette dernière a eu une résistance supérieure aux autres poutres.

5.3. Modes de rupture des poutres modélisées

Les modes de rupture sont aussi très similaires de ceux de l'étude de (Md. Akter Hosen, et al 2018) où ont constate les modes suivantes :

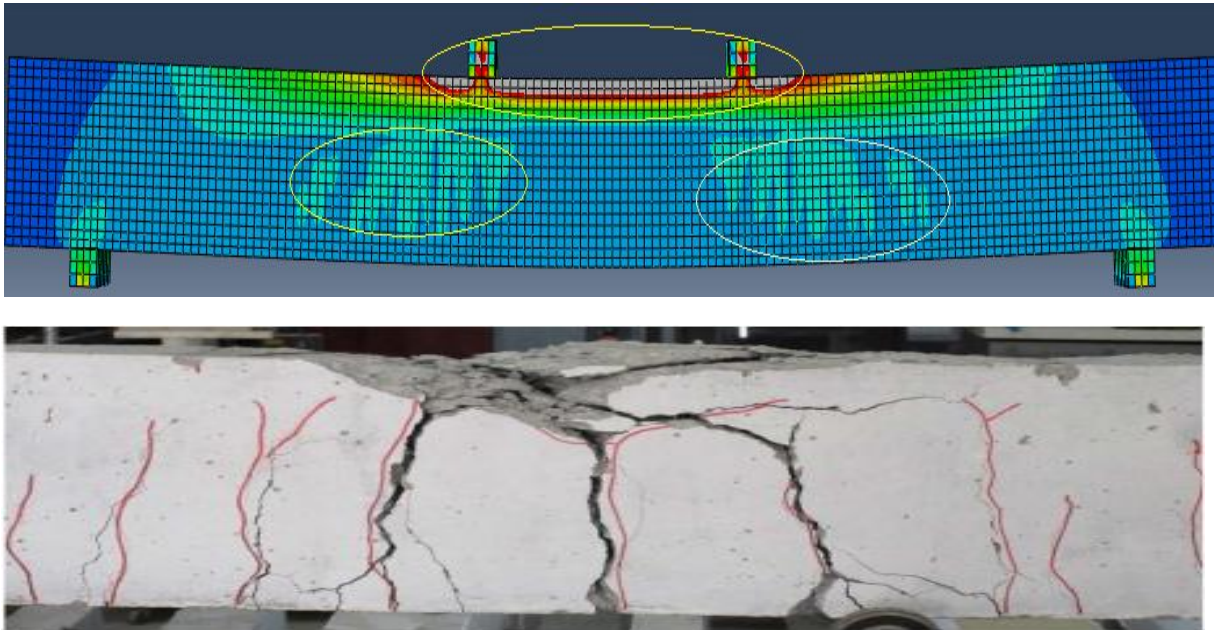


Figure V-8 : Mode de rupture de la poutre de référence avec celle de (Hosen et al., 2018).

La Figure V-8 montre une rupture classique des poutres soumises à la flexion par écrasement de la zone comprimée. Une similitude est aussi constatée entre la poutre modélisée et la poutre issue de la littérature.

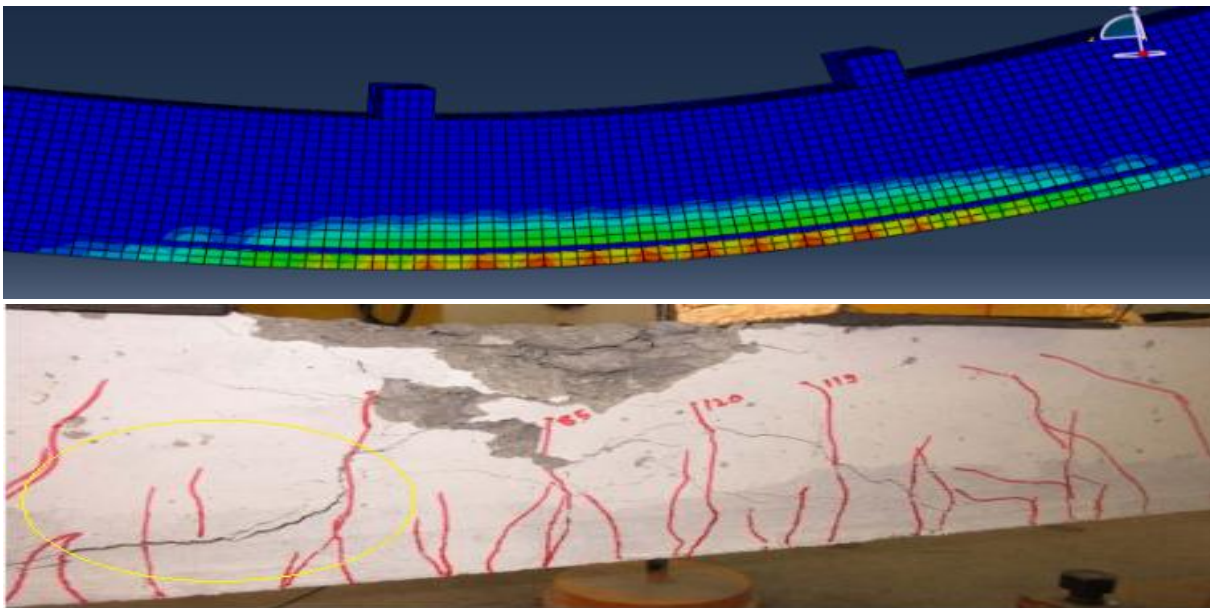


Figure V-9 : Mode de rupture de la poutre PLH avec celle de (Hosen et al., 2018).

Sur la Figure V-9 la poutre renforcée par la technique SNSM avec un renfort horizontal a eu une rupture par écoulement des armatures tendues et fissuration sur la partie tendue du béton. La rupture constatée lors de l'étude expérimental de (Hosen et al., 2018) montre aussi des fissures sur la partie tendue avec une rupture flexionnelle avec écrasement du béton comprimé.

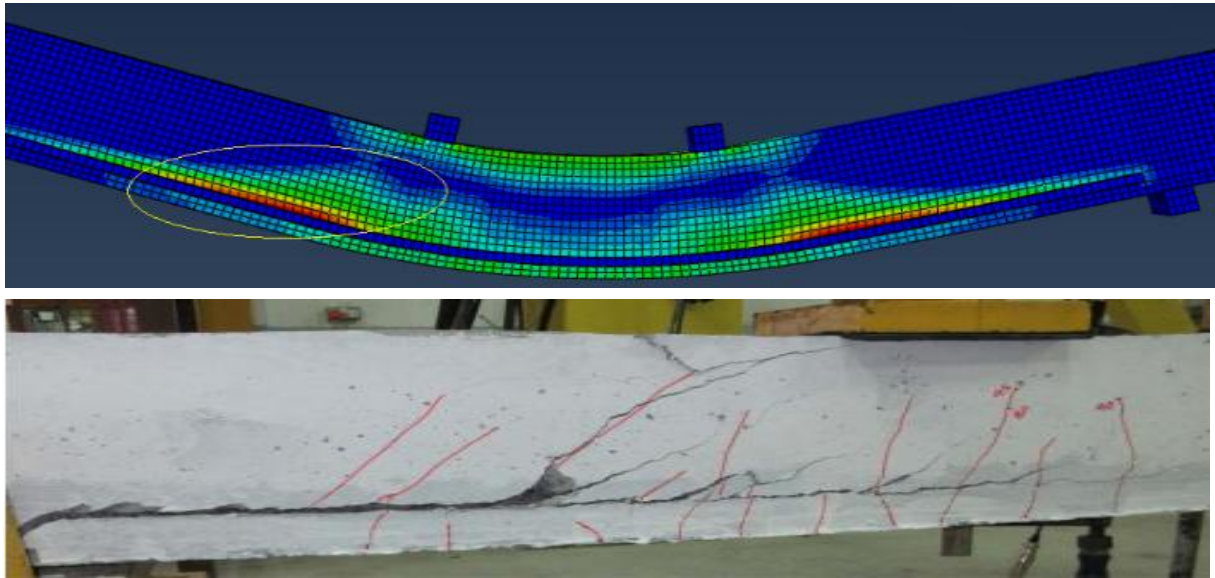


Figure V-10 : Mode de rupture de la poutre PLV avec celle de (Hosen et al., 2018)

La Figure V-10 montre un détachement de l'enrobage du béton constaté pour la poutre PLV et la poutre similaire de l'étude expérimentale de (Hosen et al., 2018).

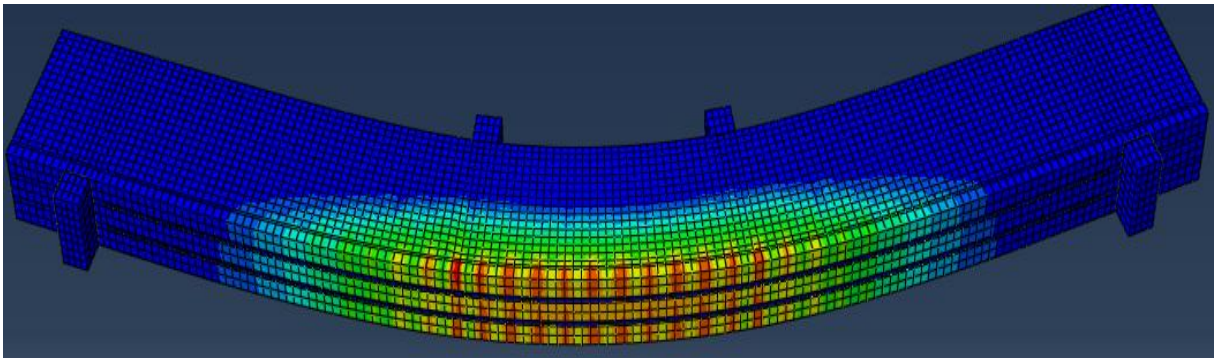


Figure V-11 : Mode de rupture de la poutre PLI.

Pour la poutre renforcée par la technique NSM, une constatation des contraintes sur la partie tendue au niveau des sollicitations maximales a été constatée, cette dernière sera probablement à l'origine d'une rupture par séparation de l'enrobage du béton.

5.4. Validation des résultats

Afin de valider les résultats numériques obtenus les courbes force déplacement ont été comparées à ceux de l'étude expérimentale et analytique de l'étude de (Hosen et al., 2018)

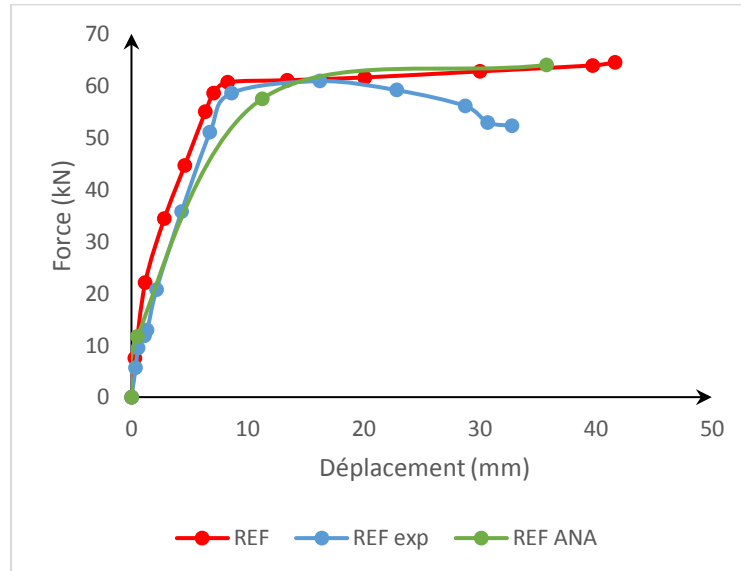


Figure V-12 : Validation des courbes forces déplacement.

La Figure V-12 montre une cohérence de l'ordre de 99,31% entre l'étude numérique et analytique et de l'ordre de 94,45 % entre l'étude numérique et expérimentale.

6. Conclusion

En se basant sur les résultats affichés ci-dessus spécialement la comparaison entre cette étude et celle de (Md. Akter Hosen, et al 2018), et la courbe (force /déplacement) reliant les quatre spécimens testés, ainsi que les modes de rupture observés, les conclusions suivantes sont tirées :

- Une confirmation qu'une simulation par la méthode des éléments finis peut se faire avec une précision assez acceptable à l'aide du logiciel ABAQUS en vue de l'accord observé, et la similitude des modes de ruptures entre la partie numérique et celles tirées de la littérature.
- La technique SNSM augmente significativement la capacité des poutres avec un taux de 172,50%, cependant le fait de positionner les renforts à l'extrémité (NSM) augmente le bras de levier donc améliore la capacité flexionnelle avec un taux de 181,68%.
- Le fait de positionner le renfort horizontalement augmente le périmètre de liaison qui influe positivement sur la capacité flexionnelle des poutres avec un gain de 5,67% et leurs ductilités par conséquent un meilleur mode de rupture a été constaté.

CONCLUSION GÉNÉRALE

VI. Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites. Trois techniques de renforcement ont été abordées. En l'occurrence, la technique EBR, NSM et SNSM. Le but de ce travail est de comparer le comportement des poutres renforcées par ces trois techniques en étudiant leurs résistances à la flexion quatre points, leurs ductilités, leurs modes de rupture, la déformation des matériaux, l'influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort ainsi que l'influence de plusieurs paramètres. Ceci moyennant un modèle numérique et un autre analytique dont les résultats seront confrontés à eux-mêmes et aux résultats expérimentaux issus de la littérature afin de valider les deux modèles.

Le modèle analytique a été réalisé afin de prédire le comportement de quatre poutres en béton armé dont une poutre témoin et trois autres renforcées selon les trois techniques de renforcement étudiées. Les résultats de cette partie ont montré la possibilité de prédire avec une exactitude allant de 80% à 97% le comportement des poutres étudiées. Le modèle permet également de tracer la courbe force déplacement des poutres en trois phases.

Le modèle numérique mené par ABAQUS a porté sur la simulation d'un total de vingt et une poutres. Une poutre de référence et six poutres renforcées, où chaque deux poutres ont été renforcées selon une des trois techniques étudiées avec un taux de renforcement différents. Par la suite, quatorze poutres ont fait l'objet d'une étude paramétrique relevant l'impact de plusieurs paramètres sur les poutres renforcées selon SNSM et NSM. Les résultats de cette étude ont montré une bonne cohérence entre le comportement des poutres testées en laboratoires et les poutres modélisées. Cette partie a montré aussi l'aptitude des trois techniques à augmenter la capacité flexionnelle des poutres. Néanmoins, cette augmentation a été accompagnée avec une diminution considérable de la ductilité pour les poutres renforcées selon EBR et NSM. En revanche pour les poutres renforcées selon la technique SNSM, la ductilité est mieux conservée. Cette perte de ductilité a provoqué des ruptures brutales et fragiles pour les poutres en EBR et en NSM, contrairement à ceux renforcées en SNSM où une rupture flexionnelle a été constatée.

On a constaté à travers l'étude paramétrique que l'augmentation de la résistance caractéristique du béton et le taux de renforcement ainsi que la longueur du renfort permet d'augmenter la capacité flexionnelle tout en préservant les mêmes modes de rupture constatée pour chaque technique. Sauf pour la poutre renforcée selon la technique NSM avec un renfort court où le mode de rupture brusque a été évité.

Le renforcement des poutres par fibres de verre selon NSM a donné lieu à un mode de rupture par écrasement du béton comprimé, contrairement à ceux renforcées par fibres de carbone et aramide. Tandis que, pour la technique SNSM le carbone a augmenté la capacité flexionnelle en assurant un maximum de ductilité des poutres renforcées.

La partie consacrée à l'étude de l'influence du périmètre de liaison entre le béton et le renfort a exposé que l'augmentation du périmètre permet de croître la capacité flexionnelle des poutres modélisées et améliore le mode de rupture de ces dernières.

Enfin, il est possible de prédire le comportement des poutres en béton armé renforcées par les techniques EBR, NSM et SNSM soit numériquement soit analytiquement. Et que la technique SNSM permet d'augmenter la capacité flexionnelle des poutres sans pour autant dégrader leurs ductilités avec le meilleur mode de rupture possible.

En perspective de cette étude, il est envisagé d'entamer une campagne expérimentale portant sur la comparaison des trois techniques dans l'objectif de consolider les conclusions tirées.

L'influence de la longueur du renfort observé lors de cette étude en particulier, mérite d'être confirmé par une étude expérimentale.

Afin de mieux maîtriser la technique SNSM une étude expérimentale paramétrique peut-être réalisée englobant plusieurs paramètres influençant la résistance et la rupture des poutres renforcées. Cette étude peut être menée en utilisant les plans d'expériences.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

- Bank, L.C., 2006. Composites for construction: structural design with FRP materials. John Wiley & Sons.
- Benzaid, R., Mesbah, H.A., Chikh, N.-E., 2010. Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton. Editions Universitaires Européennes.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E., Pecce, M., 2015. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Compos. Struct.* 124, 163–175.
- CARMA, 2006. GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES.
- Châtain, M., 2001. Matériaux composites : présentation générale. *Tech. Ing. Plast. Compos.* AM5000–1.
- David, E., 1999. Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composites- Etude expérimentale et modélisation.
- De Lorenzis, L., Nanni, A., La Tegola, A., 2000. Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods, in: *International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Proceedings, Advancing with Composites.* pp. 9–11.
- Foo, S., Naumoski, N., Saatcioglu, M., 2001. Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens. *Ott. Ont. Can.*
- Fukuyama, H., Sugano, S., 2000. Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. *Cem. Concr. Compos.* 22, 59–79.
- Gagnon, F., Jolin, M., Beaupré, D., 2004. Enrobage de l'armature dans le béton projeté : évaluation et effets. Université Laval.
- Hensher, D.A., 2016. Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications. Elsevier.
- Luyckx, J., 1999. Composites à fibres de carbone dans le génie civil. Ed. Techniques Ingénieur.
- Peters, S.T., Humphrey, W.D., 1993. Filament winding. *Eng. Mater. Handb.* 1, 503–518.
- Priestley, M.N., Seible, F., Calvi, G.M., 1996. Seismic design and retrofit of bridges. John Wiley & Sons.
- Priestley, M.N., Seible, F., Xiao, Y., Verma, R., 1994. Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-part 1: Theoretical considerations and test design. *Struct. J.* 91, 394–405.
- Redjeb, A., 2007. Simulation numérique de l'orientation de fibres en injection de thermoplastique renforcé. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Sharaky, I.A., Torres, L., Comas, J., Barris, C., 2014. Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Compos. Struct.* 109, 8–22.
- Täljsten, B., 1994. Plate bonding: Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics. *Luleå tekniska universitet.*
- Teng, J.G., Chen, J.-F., Smith, S.T., Lam, L., 2002. FRP: strengthened RC structures. *Front. Phys.* 266.
- Wu, Z.Y., 2004. Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue. Ecole des Ponts ParisTech.
- Abdallah, M., Al Mahmoud, F., Boissiere, R., Khelil, A., Mercier, J., 2020. Experimental study on strengthening of RC beams with Side Near Surface Mounted technique-CFRP bars. *Compos. Struct.* 234, 111716.
- Merdas, Abdelghani ., 2012. Contribution à l'étude de l'adhérence renfort-béton et du comportement des poutres en BA renforcées par PRFC utilisant la technique NSM (Near Surface Mounted. Université Ferhat Abbas de Sétif 1.

- ACI 440.2R-02, A., 2002. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute Committee 440.
- Almassri, B., 2015. Strengthening of corroded reinforced concrete (RC) beams with near surface mounted (NSM) technique using carbon fiber polymer (CFRP) rods: an experimental and finite element (FE) modelling study (phdthesis). INSA de Toulouse.
- Arduini, M., Nanni, A., 1997. Parametric study of beams with externally bonded FRP reinforcement. *ACI Struct. J.* 94, 493–501.
- Barros, J.A., Fortes, A.S., 2005. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cem. Concr. Compos.* 27, 471–480.
- Barros, J.A., Kotynia, R., 2008. Possibilities and challenges of NSM for the flexural strengthening of RC structures, in: *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*.
- Benmokrane, B., Chaallal, O., Masmoudi, R., 1996. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars. *ACI Struct. J.* 93, 46–55.
- Carse, A., Spathonis, M.J., Chandler, M.L., Gilbert, M.D., Johnson, M.B., UWS, A.J., Pham, L., 2002. Review of strengthening techniques using externally bonded fiber reinforced polymer composites. *CRC Constr. Innov.* Brisb.
- De Lorenzis, L., Lundgren, K., Rizzo, A., 2004. Anchorage length of near-surface mounted fiber-reinforced polymer bars for concrete strengthening—Experimental investigation and numerical modeling. *Struct. J.* 101, 269–278.
- De Lorenzis, L., Nanni, A., 2002. Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening. *ACI Struct. J.* 99, 123–132.
- De Lorenzis, L., Teng, J.G., 2007. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Compos. Part B Eng.* 38, 119–143.
- De Sena Cruz, J.M., Oliveira de Barros, J.A., 2004. Bond between near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer laminate strips and concrete. *J. Compos. Constr.* 8, 519–527.
- El-Hacha, R., Rizkalla, S.H., 2004. Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Struct. J.* 101, 717–726.
- Fib-Bulletin 14, 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Task group 9.3, International Federation of Structural Concrete (FIB).
- Hesham EL-Emam, Alaa El-Sisi, Ramy Reda, Mohamed Bneni, Mohamed Seleem, 2020. Effect of concrete cover thickness and main reinforcement ratio on flexural behavior of RC beams strengthened by NSM-GFRP bars. *Frat. Ed Integrità Strutt.* 14, 197–210. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.52.16>
- Hollaway, L.C., Leeming, M., 1999. Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering. Elsevier.
- Hosen, M.A., Jumaat, M.Z., Alengaram, U.J., Sulong, N.R., 2018. CFRP strips for enhancing flexural performance of RC beams by SNSM strengthening technique. *Constr. Build. Mater.* 165, 28–44.
- Khalifa, A., 1999. Shear performance of reinforced concrete beams strengthened with advanced composites. PhD thesis, Department of Structural Engineering, University of Alexandria, Egypt.
- Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P., Jiang, J.J., 2007. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model. *J. Compos. Constr.* 11, 161–174.
- Meier, U., Deuring, M., Meier, H., Schwegler, G., 1993. CFRP bonded sheets. Elsevier Science, Amsterdam.
- Mesbah, H.-A., Chikh, N.E., 2017. Contribution à l'étude de la réparation et du renforcement des poutres endommagées en béton armé avec des matériaux composites

- Mostofinejad, D., Moghaddas, A., 2014. Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams. *Constr. Build. Mater.* 54, 605–614.
- Nanni, A., 2000. FRP reinforcement for bridge structures, in: *Proceedings, Structural Engineering Conference, The University of Kansas, Lawrence, KS.*
- Oehlers, D., Seracino, R., 2004. *Design of FRP and steel plated RC structures: retrofitting beams and slabs for strength, stiffness and ductility.* Elsevier.
- Oehlers, D.J., Rashid, R., Seracino, R., 2008. IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in reinforced concrete beams. *Constr. Build. Mater.* 22, 1574–1582.
- Rahimi, H., Hutchinson, A., 2001. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates. *J. Compos. Constr.* 5, 44–56.
- Rashid, R., Oehlers, D.J., Seracino, R., 2008. IC debonding of FRP NSM and EB retrofitted concrete: plate and cover interaction tests. *J. Compos. Constr.* 12, 160–167.
- Rizkalla, S., Hassan, T., Hassan, N., 2003. Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 5, 16–28.
- Shukri, A.A., Hosen, M.A., Muhamad, R., Jumaat, M.Z., 2016. Behaviour of precracked RC beams strengthened using the side-NSM technique. *Constr. Build. Mater.* 123, 617–626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.066>
- Soudki, K., Alkhrdaji, T., 2005. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2 R-02), in: *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond.* pp. 1–8.
- Teng, J.G., Chen, J.-F., Smith, S.T., Lam, L., 2002a. FRP: strengthened RC structures. *Front. Phys.* 266.
- Teng, J.G., Chen, J.-F., Smith, S.T., Lam, L., 2002b. FRP: strengthened RC structures. *Front. Phys.* 266.
- Triantafyllou, G.G., Rousakis, T.C., Karabinis, A.I., 2017. Corroded RC beams patch repaired and strengthened in flexure with fiber-reinforced polymer laminates. *Compos. Part B Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.032>
- Wolff, R., Miessler, H.-J., 1989. New materials for prestressing and monitoring heavy structures. *Concr. Int.* 11, 86–89.
- Yao, J., Teng, J.G., 2007. Plate end debonding in FRP-plated RC beams—I: Experiments. *Eng. Struct.* 29, 2457–2471.
- Anju Antony., Reshmi P.R., Preetha Prabhakaran., 2019. EBR and GM Methods for External Flexural Strengthening of RC Beams. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*
- Hesham EL-Emam, Alaa El-Sisi, Ramy Reda, Mohamed Bneni, Mohamed Seleem, 2020. Effect of concrete cover thickness and main reinforcement ratio on flexural behavior of RC beams strengthened by NSM-GFRP bars. *Frat. Ed Integrità Strutt.* 14, 197–210. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.52.16>
- Sharaky, I.A., Baena, M., Barris, C., Sallam, H.E.M., Torres, L., 2018. 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* 173, 987–1001. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.062>
- Reda, R. M. *et al.* (2016) ‘Flexural behavior of RC beams strengthened by NSM GFRP Bars having different end conditions’, *Composite Structures.* doi: 10.1016/j.compstruct.2016.03.018.
- ACI Committee 440, 2017. 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/51700867>

- Laraba, A., 2017. Contribution à l'étude de la réparation et du renforcement des poutres endommagées en béton armé avec matériaux composites (PhD Thesis). Rennes 1.
- Boukhezar M., 2017. Comportement et analyse d'éléments structuraux en béton armé renforcés par des matériaux composites PRF en flexion simple.
- Vuddandam, R., Toutanji, H., Ueno, S., 2013a. Review of Design Code Provisions on Externally Strengthened Concrete Structures with FRP Laminates. ii.
- Vuddandam, R., Toutanji, H., Ueno, S., 2013b. Review of Design Code Provisions on Externally Strengthened Concrete Structures with FRP Laminates. ii.
- Zureick, A.H., Ellingwood, B.R., Nowak, A.S., Mertz, D.R., Triantafillou, T.C., 2010. NCHRP REPORT 655. Recommended Guide Specification for the Design of Externally Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements. Transp. Res. Board Biogr. Inf.
- Lublinter, J., Oliver, J., Oller, S. et Onate, E. (1989). "A plastic-damage model for concrete". *International Journal of Solids Structures*, 25, 299–326.
- Chen W.F. Plasticity in reinforced concrete, McGraw- Hill, New York, 1982.
- Kupfer, H.B., Hillsdorf, H.K. et Rusch H. (1969). " Behavior of concrete under biaxial stress." *ACI Journal*, 66, 356-366. Lee, J. et Fenves, G.L. (1998). "A plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 124, 892–900.
- Ben Ftima, M., 2013. Utilisation de la méthode des éléments finis non-linéaires pour la conception des structures en béton armé : application aux structures massives (PhD Thesis). École Polytechnique de Montréal.
- Camanho, P.P., Dávila, C.G., 2002. Mixed mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials.
- Hellman, A., 2008. Simulation of complete vehicle dynamics using FE code Abaqus.
- Hosen, M.A., Jumaat, M.Z., Islam, A.S., 2015. Side Near Surface Mounted (SNSM) technique for flexural enhancement of RC beams. *Mater. Des.* 83, 587–597.
- Obaidat, Y.T., Dahlblom, O., Heyden, S., 2010a. Nonlinear FE modelling of shear behaviour in RC beam retrofitted with CFRP. *Struct. Retrofit. Reinf. Concr. BEAMS USING CARBON FIBRE Reinf. Polym.* 47.
- Obaidat, Y.T., Heyden, S., Dahlblom, O., 2010b. FEM study on the effect of CFRP stiffness and width on retrofitted reinforced concrete beam behaviour. *Struct. Retrofit. Reinf. Concr. BEAMS USING CARBON FIBRE Reinf. Polym.* 57.
- Obaidat, Y.T., Heyden, S., Dahlblom, O., 2010c. The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. *Compos. Struct.* 92, 1391–1398.
- Sharaky, I.A., Baena, M., Barris, C., Sallam, H.E.M., Torres, L., 2018. Effect of axial stiffness of NSM FRP reinforcement and concrete cover confinement on flexural behaviour of strengthened RC beams: Experimental and numerical study. *Eng. Struct.* 173, 987–1001. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.062>

ANNEXE

1- Images du modèle numérique

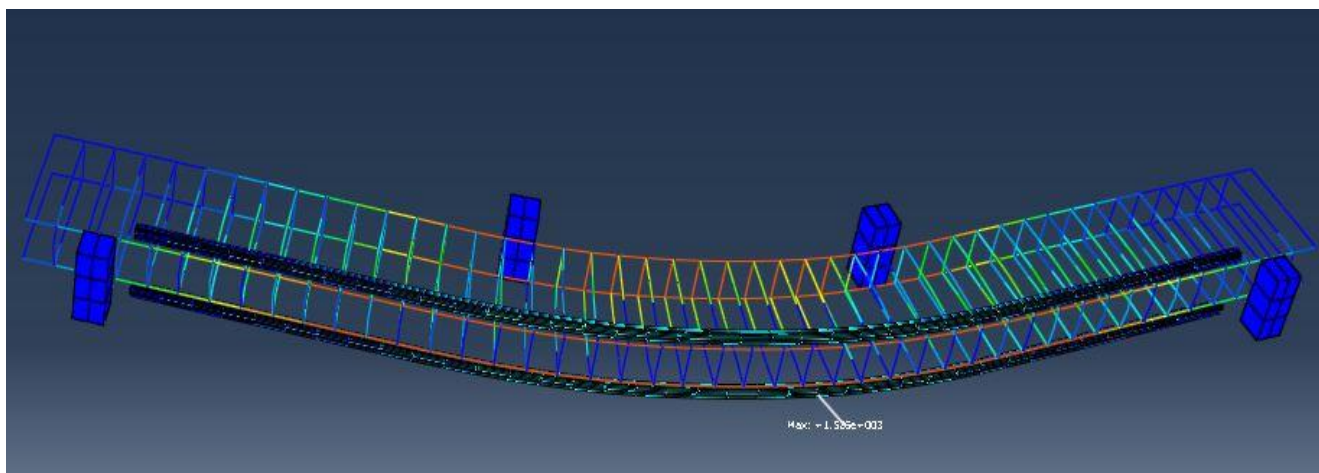


Figure 1 : les contraintes au niveau des armatures de la poutre renforcée par la technique SNSM

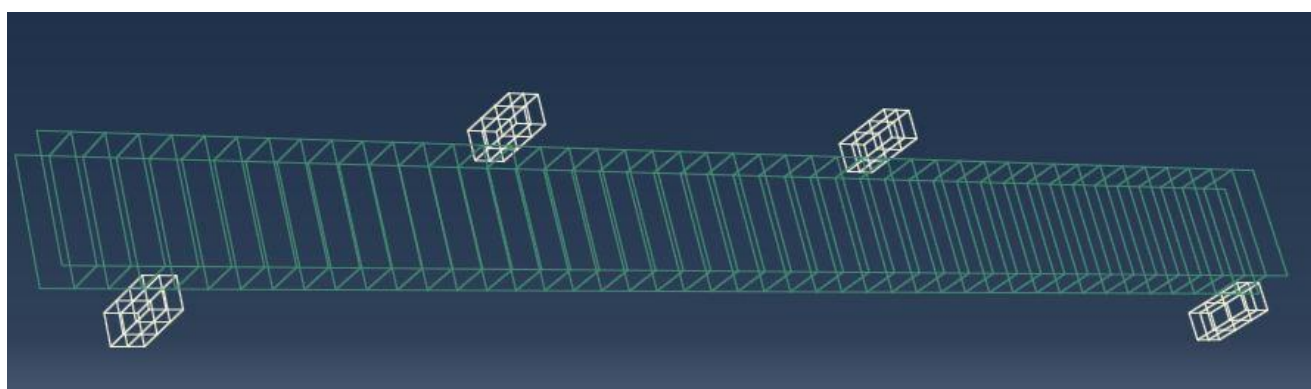


Figure 2 : Modélisation des armatures de la poutre renforcée par la technique SNSM

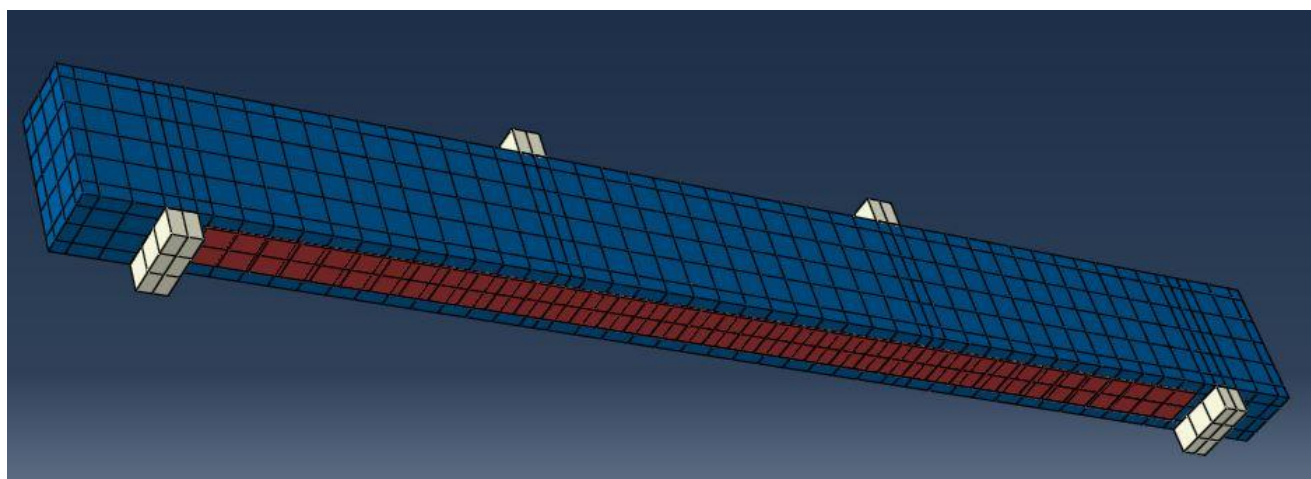


Figure 3 : Maillage de la poutre renforcée par la technique EBR

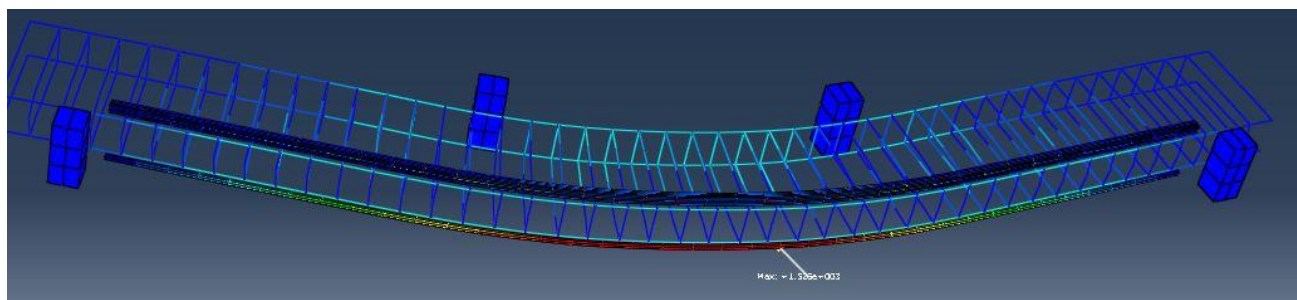


Figure 4 : les contraintes au niveau du renfort de la poutre renforcée par la technique SNSM

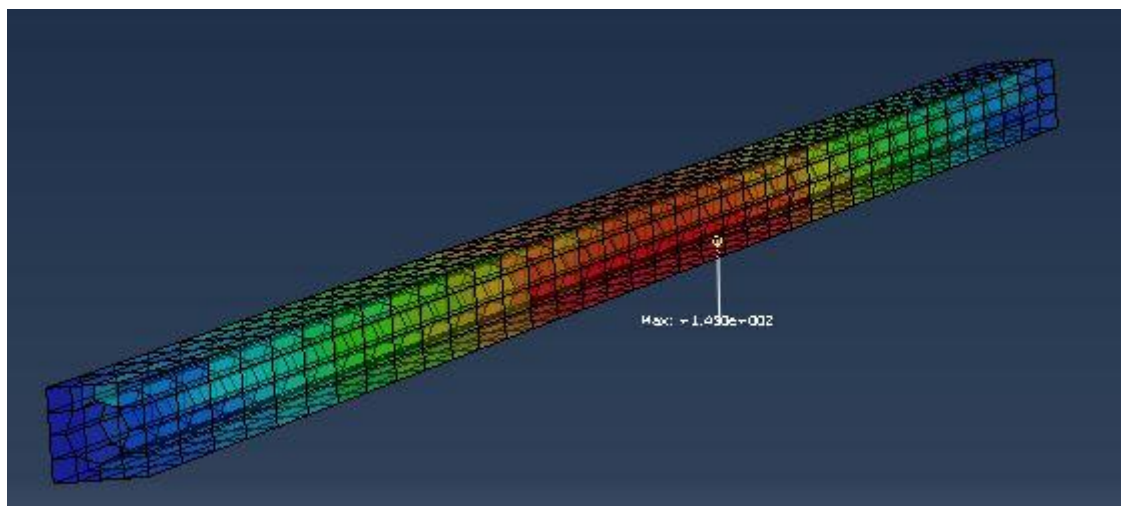


Figure 5 : les contraintes au niveau de la résine de la poutre renforcée par la technique SNSM

2- Tableau d'une partie des résultats

Tableau 1 : Résultats analytique et numérique correspondante

EBR-10 ANA		REF ANA		SNSM-10 ANA		NSM-10 ANA	
0	0	0	0	0	0	0	0
0,878856	39,0909006	0,28891014	9,18915572	0,57303755	26,9209756	0,88697379	22,2442863
11,8481595	186,066851	5,92205654	64,20034	12,0211063	126,985666	10,498498	140
23,2785844	209,40458	31,9901824	75,2107894	29,1384014	159,7777	25,2007148	170
EBR-10 NUM		REF-NUM		SNSM-10 NUM		NSM-10 NUM	
0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	18,757	0,125	4,57834	0,03125	1,08998	0,5	17,9465
0,875	28,8482	0,25	9,15668	0,0625	2,18026	1	30,1313
1,25	36,0468	0,4375	15,8485	0,109375	3,81546	1,1875	33,9964
1,39063	38,2899	0,71875	23,447	0,179688	6,26826	1,46875	38,465
1,60156	41,2076	0,824219	25,7798	0,285156	9,94746	1,89063	43,9729
1,91797	45,1747	0,982422	28,6838	0,443359	15,1751	2,04883	45,9017
2,39258	51,1561	1,21973	31,7887	0,562012	18,7204	2,28613	48,7775
2,57056	53,4056	1,57568	34,8667	0,680664	21,7602	2,64209	53,1519
2,83752	56,8528	1,70917	35,8144	0,858643	25,4025	3,17603	59,8331
3,23798	62,0261	1,90939	37,1731	1,12561	29,6783	3,37625	62,323
3,83865	69,7018	2,20973	39,302	1,52606	34,4212	3,67659	66,0915

4,06391	72,5456	2,32236	40,105	2,12674	40,6797	4,1271	71,7452
4,40179	76,8185	2,4913	41,3443	2,57725	45,5232	4,80286	80,2158
4,90861	83,2242	2,74471	43,2836	3,02776	50,5439	5,05627	83,3539
5,66884	92,8464	3,12483	46,344	3,1967	52,4318	5,43639	88,0694
5,95393	96,4297	3,26737	47,4902	3,45011	55,2699	6,00656	95,0618
6,38156	101,778	3,48119	49,2711	3,83022	59,5401	6,86182	105,311
6,54192	103,778	3,56137	49,9405	3,97277	61,1374	7,18255	108,106
6,78246	106,239	3,68164	50,9627	4,18658	63,5421	7,66363	111,698
7,14328	109,082	3,86204	52,5229	4,26676	64,4395	8,38526	116,573
7,41389	111,04	4,13265	54,8754	4,38703	65,7896	8,65587	118,369
7,6845	112,891	4,23413	55,7453	4,56744	67,8333	9,06178	121,039
8,09041	115,566	4,38635	57,0585	4,83805	70,8969	9,67066	124,891
8,24263	116,542	4,61468	59,0652	5,24397	75,4331	10,584	130,501
8,47096	117,992	4,7003	59,8143	5,85284	82,1574	11,9539	138,776
8,55658	118,534	4,82874	60,9435	6,08117	84,6933	12,2964	140,873
8,68502	119,344	5,02139	62,6645	6,16679	85,6533	12,6389	142,911
8,87767	120,564	5,31036	65,3128	6,29522	87,0574	13,1526	145,924
9,16664	122,4	5,74383	69,194	6,48787	89,1571	13,9233	150,386
9,60011	125,112	5,90638	69,8376	6,77685	92,2967	14,2122	152,044
10,2503	129,103	6,1502	70,4308	7,21032	96,2812	14,6457	154,509
10,4941	130,584	6,51594	71,1372	7,86051	100,314	14,8082	155,429
10,8599	132,806	7,06454	71,9533	8,10434	101,73	15,0521	156,793
11,4085	136,114	7,27027	72,1877	8,47007	103,684	15,4178	158,796
11,8199	138,584	7,57886	72,4826	8,60722	104,401	15,9664	161,729
11,9228	139,2	8,04174	72,8611	8,81295	105,441	16,7893	165,955
12,0771	140,116	8,73607	73,3485	9,12154	107,007	17,0979	167,485
12,3085	141,485	8,99644	73,5155	9,58443	109,322	17,5608	169,618
12,3953	141,988	9,387	73,7689	10,2788	112,774	17,7344	170,419
12,5255	142,736	9,53346	73,8653	10,5391	114,051	17,7995	170,702
12,7208	143,858	9,75315	74,017	10,9297	115,922	17,8971	171,141
13,0137	145,536	10,0827	74,2455	11,5155	118,696	18,0436	171,793
13,4531	148,067	10,577	74,5856	11,7352	119,731	18,2633	172,752
14,1121	151,84	11,3184	75,0226	12,0647	121,273	18,3456	173,083
14,3593	153,233	12,4306	75,6043	12,1883	121,85	18,4692	173,613
14,73	155,315	12,8477	75,8204	12,3737	122,708	18,6546	174,396
15,2861	158,399	13,4733	76,1383	12,6517	123,993	18,9326	175,545
16,1202	162,868	14,4117	76,5717	13,0688	125,91	19,3497	177,215
17,3714	168,946	15,1155	76,879	13,6944	128,738	19,5061	177,753
17,8406	171,037	15,2914	76,952	14,6328	132,919	19,7407	178,745
18,0166	171,804	15,4674	77,0233	14,9847	134,459	20,0926	180,093
18,2805	172,928	15,7313	77,1286	15,5125	136,723	20,2245	180,561
18,6764	174,561	16,1272	77,3031	16,3043	139,984	20,4225	181,256
19,2702	176,859	16,721	77,5276	16,8982	142,141	20,7194	182,287
20,161	179,939	16,9437	77,5993	17,492	144,181	21,1648	183,752

21,4971	184,054	17,2777	77,7046	18,3827	147,031	21,3318	184,278
21,8311	185,009	17,7788	77,854	18,7168	148,041	21,5823	185,051
22,1652	185,953	18,5304	77,9428	19,2178	149,473	21,6763	185,343
22,6662	187,363	19,6577	77,8522	19,4057	149,996	21,8172	185,756
22,8541	187,889	20,7851	77,7336	19,6875	150,77	22,0286	186,358
23,1359	188,679	21,9124	77,6377	20,1103	151,894	22,3456	187,265
23,5587	189,86	23,6034	77,5691	20,2688	152,306	22,8212	188,596
23,7172	190,297	24,2376	77,5493	20,5066	152,908	22,9996	189,109
23,955	190,961	25,1888	77,523	20,8633	153,785	23,2671	189,839
24,3117	191,98	25,5455	77,5111	20,9971	154,106	23,6684	190,971
24,8468	193,512	26,0805	77,4783	21,1977	154,58	24,2703	192,617
25,6494	195,848	26,2812	77,4587	21,4987	155,282	24,4961	193,228
		26,5821	77,4344	21,9502	156,295	24,5807	193,448
		27,0336	77,4161	22,6273	157,727	24,7077	193,779
		27,7108	77,4026	22,8813	158,251	24,8981	194,256
		28,7265	77,4162	23,2622	159,056	25,1838	194,988
		30,2502	77,4498	23,8335	160,268	25,2909	195,253
		30,8215	77,4564	24,0478	160,714	25,4516	195,645
		31,0358	77,4568	24,3692	161,386	25,6927	196,235
		31,3572	77,4539	24,8513	162,319	26,0542	197,107
		31,8393	77,4444	25,5744	163,63	26,5966	198,355
		32,5624	77,4141	26,6591	165,417	26,8	198,811
		32,8336	77,3971	26,8625	165,74	27,1051	199,52
		32,9353	77,3895	27,0659	166,06	27,5627	200,578
		33,0878	77,3741	27,1422	166,179	27,7343	200,957
		33,3166	77,3495	27,2566	166,358	27,9917	201,504
		33,6598	77,3116	27,4282	166,626	28,0882	201,713
		34,1746	77,2453	27,6856	167,025		
		34,9469	77,0927	28,0717	167,606		
		35,7191	76,935	28,2165	167,819		
		36,4913	76,7649	28,4337	168,127		
		36,7809	76,6938	28,7594	168,563		
		36,8895	76,6662	29,2481	169,173		
		37,0524	76,6238	29,4314	169,392		
		37,2967	76,554	29,7062	169,711		
		37,6632	76,4403	30,1185	170,14		
		38,2129	76,2896	30,737	170,687		
		39,0376	76,0759	30,9689	170,866		
				31,3168	171,114		
				31,8387	171,44		
				32,6214	171,793		
				32,9149	171,882		
				33,3552	171,987		