

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Des Frères Mentouri - Constantine -



Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Civil
Option : Structures

THESE

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences en Génie Civil

ETUDE DU RENFORCEMENT DES POUTRES VIS –À –VIS DES EFFORTS DE CISAILLEMENT

Présentée par : **BAROUR SABIHA**

Dirigée par : **ZERGUA ABDESSELAM**

Soutenue le 18/07/2022

Devant le jury composé de :

Président	Boumekik Ahmed	Prof	Univesité des frères Mentouri - Constantine 1.
Rapporteur	Zergua Abdesselam	Prof	Univesité des frères Mentouri - Constantine 1.
Examineurs	Bouziadi Farid	M.C.A	Université Hassiba Benbouali - Chlef.
	Himeur Mohamed	M.C.A	Université 8 mai 1945 - Guelma.
	Zarza Tahar	M.C.A	Univesité des frères Mentouri - Constantine 1.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement le professeur Zergua Abdesselam, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité. Soyez assuré de ma profonde gratitude.

Je suis très honorée de leur présence à mon jury de thèse et je tiens à remercier :

Monsieur Boumekik Ahmed, Professeur, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse. Je tiens à l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il porte à ce travail.

Monsieur Bouziadi Farid, Maitre de Conférences à l'université de Hassiba Benbouali (Chlef) pour l'honneur qu'il m'a fait par sa participation à mon jury de thèse en qualité d'examineur, pour le temps consacré à la lecture de cette thèse, et pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'il m'a indiquées.

Monsieur Himeur Mohamed, Maitre de conférences à l'université de 8 mai 1945 (Guelma) pour sa participation à mon jury de thèse en qualité d'examineur de mon travail et pour toutes remarques intéressantes qu'il m'a faites. Je le remercie pour le temps consacré à la lecture de ce travail ainsi que pour les commentaires m'ayant permis de l'améliorer

Monsieur Zarza Tahar, Maitre de conférences à l'université des frères Mentouri (Constantine) d'avoir accepté de faire parti du jury de cette thèse. Je le remercie pour les conseils scientifiques qu'il a apportés en qualité d'examineur de mon travail, ainsi que pour son immense aide pour mener à bien ces travaux.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux enseignants du département de génie civil de l'université des frères Mentouri avec qui j'ai appris les bases du génie civil, sans lesquelles je n'aurais pas arrivé à ce niveau.

Toute ma gratitude va aux Messieurs SEREIR Zouaoui et BENNEGADI Mohammed El Larbi qui m'ont accueilli dans leur laboratoire à l'université d'Oran et avec qui j'ai passé de bons jours. Qu'ils trouvent ici l'assurance de mon estime et mon profond respect. Finalement, je remercie mes parents pour leurs soutiens qui m'ont été bien utiles durant ma thèse.

Barour Sabiha.

RÉSUMÉ

Cette thèse traite de l'analyse non linéaire du comportement de poutres, renforcées par les matériaux composites, vis à vis des efforts de cisaillement. Cette modélisation est réalisée en utilisant le programme d'éléments finis à usage général ANSYS[®]. Plusieurs modèles tridimensionnels non linéaires ont été développés. Ces modèles sont obtenus en tenant en compte les propriétés mécaniques et géométriques des différents composants des poutres étudiées. Les éléments 'SOLID 65' ; 'LINK180' ; 'SHELL181' et 'SOLID185' ont été utilisés pour modéliser, respectivement ; le béton ; le renfort en acier ; les polymères renforcés de fibres de (PRF) et les supports en plaques d'acier.

Les modèles ainsi obtenus ont été validés par comparaison avec les résultats expérimentaux. Ensuite une étude paramétrique, notamment la configuration et la quantité des renforts, la géométrie des poutres, a eu lieu, suivie d'une comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux de la littérature et les différents codes de calcul des structures tel que ACI (American Concrete Institute) et FIB (Fédération Internationale du Béton). De concordants et satisfaisants résultats ont été observés concernant la capacité portante de la poutre, les déformations, les modes de rupture, la distribution et l'évolution des fissures. Il a été conclu que les modèles obtenus sont fiables, prédisent convenablement la réponse et le comportement des poutres testées. Ils sont, également, capables de simuler toute l'historique de la poutre jusqu'à la rupture.

Mots clés : renforcement des Poutres, efforts de cisaillement, analyse numérique, ANSYS, matériaux composites.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة التحليل غير الخطي لدراسة سلوك الروافد بالخرسانة المسلحة المقواة خارجياً باستخدام المواد المركبة PRF، تحت تأثير قوى القص. يتم تنفيذ هذه النمذجة باستخدام برنامج العناصر المنتهية ANSYS. وتم تطوير عدة نماذج غير خطية ثلاثية الأبعاد. وقد تم الأخذ بعين الاعتبار في تلك النماذج للخصائص الميكانيكية والهندسية للروافد المدروسة. لقد تم استخدام العناصر: "SOLID 65"، "LINK180"، "SHELL181"، و "SOLID185" لنمذجة كل من الخرسانة، حديد التسليح، البوليمرات المقواة بألياف (PRF) والدعامات من الألواح الفولاذية على التوالي. و لقد تم التحقق من صحة النماذج الذي تم الحصول عليها من خلال المقارنة مع نتائج التجريبية. كما تم إجراء دراسة تأثير عدة معاملات، ولاسيما شكل وكمية التعزيزات، وشكل الروافد الخرسانية، متبوعة بمقارنة النتائج العددية للنتائج العددية و البيانات التجريبية للأدبيات و القوانين المختلفة لحساب الهياكل مثل ACI (American Concrete Institute) و FIB (Fédération Internationale du Béton) حيث لوحظ تقارب جيد بين النتائج الرقمية والتجريبية في جميع مراحل التحميل للعينات التي تم اختبارها، والتشوهات، وأنماط الإنهيار، وتوزيع وتطور الشقوق. وهذا يثبت أيضاً صحة التحليل العددي بواسطة ANSYS، ويتنبأ بشكل صحيح لسلوك الروافد المختبرة. كما انه قادر على محاكاة جميع مراحل التحميل حتى الإنهيار.

الكلمات المفتاحية: تقوية الروافد، قوى القص، تحليل رقمي، ANSYS، المواد المركبة.

ABSTRACT

This thesis deals with the non-linear analysis of the behaviour of beams, reinforced with composite materials, with respect to shear forces. The modelling is carried out using the general purpose finite element program ANSYS©. Several three-dimensional non-linear models have been developed. These models are obtained by taking into account the mechanical and geometrical properties of the different components of the studied beams. The elements 'SOLID 65'; 'LINK180'; 'SHELL181' and 'SOLID185' were used to model, the concrete; the steel reinforcement; the fibre reinforced polymers (FRP) and the steel plate supports, respectively.

The resulting models were validated by comparison with experimental results. Then a parametric study, notably the configuration and quantity of reinforcements, the geometry of the beams, was carried out, followed by a comparison of the numerical results with experimental results of the literature and the various structural codes such as ACI (American Concrete Institute) and FIB (International Federation of Structural Concrete). Consistent and satisfactory results were observed regarding the beam's load-bearing capacity, deformations, failure modes, cracks distribution and evolution. It was concluded that the models obtained are reliable, predicting adequately the response and behaviour of the tested beams. They are also capable of simulating the entire history of the beam up to failure.

Keywords: reinforcement of beams, shear force, numerical analysis, ANSYS, composite material.

SOMMAIRE

Introduction générale.....1

Chapitre N°1 : Synthèse Bibliographique

Première partie : Techniques de renforcement

1.1. Introduction.....5

1.2. Méthodes de renfort.....5

1.2.1. Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier ou addition d'armatures en acier sans augmentation de la section5

1.2.2. Adjonction de platines en acier dans les poutres, dalles, murs, piliers7

1.2.3. Adjonction de lamelles ou bandes en matériaux composites.....8

1.3. Matériaux composite Polymère Renforcé de Fibres (PRF).....9

1.3.1. Fibres.....10

1.3.1.1. Fibre de carbone.....10

1.3.1.2. Fibre de verre.....11

1.3.1.3. Fibre d'aramide.....11

1.3.2. Matrice.....13

1.3.3. Composites «PRF».....14

1.4. Synthèse des travaux portant sur les applications des ' PRF ' en génie civil15

1.4.1. Renforcement des poutres en béton armé par PRF15

1.4.2. Renforcement des poutres en béton armé par PRF à la zone de cisaillement.....18

Deuxième partie : analyse analytique du renforcement

1.5. Code de calcul pour la prédiction de la résistance en cisaillement des poutres en béton armé renforcée par PRF.....26

1.5.1. ACI 440.2R (2008).....26

1.5.2. FIB 14.....28

1.5.3. EUROCODE 2.....30

1.5.4. CNR-DT200 (2004).....31

Troisième partie : modélisation numérique des poutres renforcées

1.6. Synthèse des modélisations numériques des poutres renforcées.....33

1.6.1. Analyse par éléments finis des poutres en béton armé renforcées avec le PRF en flexion.....34

SOMMAIRE

1.6.2. Analyse par éléments finis des poutres en béton armé renforcées avec le PRF au cisaillement.....	35
1.7. Conclusion.....	37

Chapitre N°2 : Modélisation Par La Méthode Des Eléments Finis

2.1. Introduction.....	39
2.2. Méthode des éléments finis.....	39
2.2.1. Avantage de la méthode des éléments finis.....	40
2.3. Procédures de base de la méthode des éléments finis.....	40
2.3.1. Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites.....	41
2.3.2. Discrétisation géométrique.....	41
2.3.3. Approximation sur un élément.....	41
2.3.4. Assemblage et application des conditions aux limites.....	42
2.3.5. Résolution du système global.....	42
2.4. Utilisation d'un logiciel des éléments finis.....	42
2.4.1. Analyse du problème (Choix du modèle).....	43
2.4.2. Choix du type d'éléments.....	43
2.4.3. Création et vérification des données.....	45
2.4.4. Exécution du calcul.....	45
2.4.5. Exploitation des résultats.....	46
2.5. Organigramme d'un logiciel éléments finis.....	47
2.6. Conclusion.....	48

CHAPITRE N°3 : Modélisation non-Linéaire

3.1. Introduction.....	50
3.2. Définition de programme ANSYS.....	50
3.2.1. Interface utilisateur.....	51
3.3. Présentation globale du logiciel ANSYS.....	51
3.3.1. Description de la phase pre-processing.....	53
3.3.1.1. Définition des types d'éléments et des constantes réelles.....	53
3.3.1.2. Définition des propriétés des matériaux.....	53
3.3.1.3. Création de la géométrie du modèle.....	53
3.3.1.4. Application de Charges.....	54
3.3.2. Description de la phase Solution.....	54
3.3.3. Description de la phase Post-processing.....	54

SOMMAIRE

3.4. Techniques de solution Non-linéaires.....	55
3.4.1. Méthode de Newton-Raphson.....	55
3.5. Les paramètres de solution non linéaires par ANSYS.....	56
3.5. 1. L'option pour l'incrémentation des charges dans ANSYS	56
3.5. 2.Nombre d'itération de l'équilibre.....	58
3.5.3.Choix de solutionner (Solve).....	58
3.5.4. Convergence.....	59
3.6. Types d'éléments.....	60
3.6.1. Description des éléments béton.....	60
3.6.1.1. Propriétés des bétons.....	61
3.6.2. Description des éléments acier.....	64
3.6.3. Polymère renforcé de fibre de (PRF).....	65
3.6.4. Supports des appuis.....	65
3.7. Conclusion.....	66

Chapitre N°4 : Résultats et discussions

4.1 Introduction.....	68
4.2. Elaboration et validation des modèles	68
4.2.1. Premier modèle	68
4.2. 1.1.Géométrie et caractéristiques des matériaux utilisés.....	68
4.2. 1.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	70
4.2. 1.3. Modélisation des poutres.....	70
4.2. 1.4. Résultats et discussions.....	71
4.2. 1.5.Calcul selon le code ACI 318-19.....	75
4.2. 1.6. Effet d'épaisseur de PRFC.....	75
4.2.2. Deuxième modèle	76
4.2.2.1. Caractéristiques des matériaux utilisés	76
4.2.2.2. Modélisation des poutres.....	78
4.2.2.3. Résultats et discussion	79
4.2.2.4. Evolution des fissures.....	86
4.2.2.5. Effet de longueur du PRFC.....	90

SOMMAIRE

4.2.2.6. Calcul selon le code ACI 440.2R-08.....	94
4.2.3. Troisième modèle.....	95
4.2.3.1. Caractéristiques des matériaux utilisés	95
4.2.3.2. Modélisation des poutres.....	97
4.2.3.3. Résultats et discussions.....	98
4.2.3.4. Codes de calcul de la résistance au cisaillement des poutres renforcées par le PRFC.....	104
4.2.4. Quatrième modèle.....	105
4.2.4.1. Caractéristiques des matériaux utilisés	105
4.2.4.2. Modélisation des poutres.....	107
4.2.4.3. Résultats et discussions.....	108
4.2.4.4. Évolution des fissures	112
4.2.4.5. Calcul de la charge ultime à l'aide du code ACI 318-19.....	116
4.2.4.6. Calcul de la charge ultime à l'aide du code ACI 544.1R-96	117
4.3. Conclusion	119

Conclusion générale et perspectives

Conclusions et Perspectives.....	121
----------------------------------	-----

ANNEXE

ANNEXE 1 : La charge ultime de la poutre sont calculées à l'aide du code ACI 440.2R (2008).....	124
ANNEXE 2 : Les charges ultimes des poutres testées sont calculées à l'aide des codes ACI 440.2R (2008) et FIB14 (2001).....	126
ANNEXE 3 : La charge ultime de la poutre avec SFRC renforcées au cisaillement par PRFC selon le code ACI 544.1R-96.....	129
Références bibliographiques.....	131

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 . Adjonction d'armatures complémentaires	6
Figure 1.2. Chemisage en acier pour poutre en béton arme	6
Figure 1.3. Réparation de poutre par béton projeté	7
Figure 1.4. Renforcement d'un viaduc par tôles collées.....	7
Figure 1.5. Détails sur les différentes couches d'un béton réparé	8
Figure 1.6. Définition d'un matériau composite ou PRF	9
Figure 1.7. Fibres Carbone	10
Figure 1.8. Fibres de verre.....	11
Figure 1.9. Fibres d'aramide.....	12
Figure 1.10. Organigramme illustrant les différentes familles de matrice.....	13
Figure 1.11. Rupture en flexion de la poutre.....	15
Figure 1.12. Renforcement vis-à-vis de la flexion par collage de plaque composite.....	16
Figure 1.13. Différents configurations du renforcement vis –à-vis de l'effort tranchant.....	18
Figure 2.1. Formes classique des éléments	44
Figure 2.2. Organigramme d'un logiciel éléments finis	47
Figure 3.1. Organigramme du logiciel ANSYS	52
Figure 3.2. Solution de Newton –Raphson après une itération	56
Figure 3.3. Control de solution- de base.....	57
Figure 3.4. Contrôle de solution - non linéaire.....	58
Figure 3.5. Control de solution - option de solution.....	59
Figure 3.6. Critère de convergence L2 (force et le déplacement)	60
Figure 3 .7. Géométrie de l'élément SOLID65	61
Figure 3.8. Courbe contrainte-déformation typique du béton	61
Figure 3.9. Diagramme contrainte -déformation simplifié du béton en compression uniaxiale.....	63
Figure 3.10. Géométrie des éléments LINK 180	64
Figure 3.11. Relation contrainte-déformation pour l'acier.....	64
Figure 3.12. Elément SHELL 181	65
Figure 3.13. Géométrie des éléments SOLID 185	66

Figure 4.1. Armatures et dimensions des poutres (en mm) adoptées par Akram et al.....	69
Figure 4.2. Géométrie et maillage du modèle par EF.....	71
Figure 4.3 (a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	72
Figure 4.3 (c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c-d). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	73
Figure 4.3 (e). Courbes charge-déplacement pour la configurations (e). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	74
Figure 4.4. Courbes charges - déplacements pour différentes épaisseurs de PRFC.....	76
Figure 4.5. Détails du programme expérimental selon El-sayed	77
Figure 4.6. Géométrie et maillage du modèle par EF.....	79
Figure 4.7 (a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	80
Figure 4.7 (c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c-d). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	81
Figure 4.7 (e-f). Courbes charge-déplacement pour les configurations (e-f). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	82
Figure 4.7 (g). Courbes charge-déplacement pour la configurations (g). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	83
Figure 4.8. Comparaison entre les déplacements (expérimentaux et numériques).	85
Figure 4.9. Comparaison entre les charges (expérimentale et numérique).....	85
Figure 4.10. Les charges correspondantes aux fissurations initiales pour différentes poutres.....	86
Figure 4.11. les modes d'endommagement : (a) fissures de flexion; (b) fissures de compression; (c) fissures diagonales.	87
Figure 4.12. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre C-1.0.....	87
Figure 4.13. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PL-1.0-0.43.....	88
Figure 4.14. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PL-1.0-0.85.....	88
Figure 4.15. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PH-1.0-0.36.....	88
Figure 4.16. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre S-1.0-0.27.....	89
Figure 4.17. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre C-1.5.....	89
Figure 4.18. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PL-1.5-0.85.....	89
Figure 4.19. Modèle de poutres renforcées extérieurement en PRFC.....	91
Figure 4.20. Courbes charges - déplacements pour différentes longueurs des PRFC.....	91
Figure 4.21. Développement des déplacements mi-portés des poutres.....	93

Figure 4.22. Détails du programme expérimental de Sherif	96
Figure 4.23. Modélisation par éléments finis de la poutre (Bandes de PRFC verticales)	97
Figure 4.24. Modélisation par éléments finis de la poutre (Bandes de PRFC inclinées).....	97
Figure 4.25 (a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	100
Figure 4.25 (c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c-d). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	101
Figure 4.25 (e-f). Courbes charge-déplacement pour les configurations (e-f). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	102
Figure 4.26. Comparaison entre les déplacements (expérimentales et numériques).....	103
Figure 4.27. Comparaison entre les charges (expérimentale et numérique).....	103
Figure 4.28. Courbes charges - déplacements pour l'effet de résistance à la compression du béton.....	104
Figure 4.29. Détails du programme expérimental selon Keskin et al.....	106
Figure 4.30. Modélisation des poutres.....	107
Figure 4.31(a-b). Courbes charge-déplacement pour configurations (a-b). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	109
Figure 4.31 (c-d). Courbes charge-déplacement pour configurations (c-d). Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.	110
Figure 4.32. Comparaison entre la charge (expérimental et numérique) à mi-portée pour toutes les poutres testées.....	111
Figure 4.33. Comparaison entre déplacement (expérimental et numérique) à mi-portée pour toutes les poutres testées.....	112
Figure 4.34. Propagation de fissures à différentes charges (poutre A2.5RC10/10).....	113
Figure 4.35. Fissures sur la poutre A2.5RC10/10.(expérimentation).....	114
Figure 4.36. Fissures sur la poutre A2.5RC10/10.(numérique).....	114
Figure 4.37. Fissures sur la poutre A2.5F2.0C10/10.(expérimentation).....	114
Figure 4.38. Fissures sur la poutre A2.5F2.0C10/10.(numérique).....	114
Figure 4.39. Déplacement du modèle EF à travers les poutres.....	115
Figure 4.40. Evolution des déplacements en fonction du chargement.....	115
Figure 4.41. Contrainte de cisaillement maximale dans la direction XY pour la poutre A2.5F2.0C10/10.....	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	9
Tableau 1.2. Propriétés des fibres.....	12
Tableau 1.3. Comparaison qualitative entre Verre-E, Carbone-H.T et fibres Aramide.....	12
Tableau 1.4. Propriétés mécaniques typiques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA».....	14
Tableau 4.1. Détails du programme expérimental selon Akram et al.....	69
Tableau 4.2. Caractéristiques des bétons et acier selon Akram et al.....	70
Tableau 4.3. Propriétés des matériaux de PRF selon Akram et al.....	70
Tableau 4.4. Comparaison entre les résultats expérimentales et résultats numériques.....	74
Tableau 4.5. Comparaison entre la charge ultime numérique et celle obtenu par le code ACI 318-19	75
Tableau 4.6. Détails des poutres testées selon El- sayed.....	78
Tableau 4.7. Caractéristiques des bétons et des aciers selon El-sayed.....	78
Tableau 4.8. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.....	84
Tableau 4.9. Variations des charges ultimes (expérimentales et numériques).....	84
Tableau 4.10. Variations des déplacements ultimes (expérimentales et numériques).....	84
Tableau 4.11. Différentes configurations du renforcement de la poutre. $E_f = 165$ GPa, épaisseur de la couche = 1.4 mm.....	90
Tableau 4.12. Valeurs des charges ultimes (numériques) pour les de différentes configurations.....	92
Tableau 4.13. Propriétés mécaniques des matériaux.....	94
Tableau 4.14. Comparaison entre la charge ultime numérique et celle obtenu par le code ACI 440.2R-08 pour différentes poutres.....	95
Tableau 4.15. Détails des poutres testées par Sherif	96
Tableau 4.16. Comparaison entre les données expérimentales et les résultats numériques.....	99
Tableau 4.17. Propriétés mécaniques du béton et PRFC (B3Va1Lb-21c).....	104
Tableau 4.18. Comparaison entre les charges ultimes numériques et ceux calculées selon les 440.2R et FIB14.....	105
Tableau 4.19. Caractéristiques des poutres selon Keskin et al.....	106
Tableau 4.20. Comparaison entre les résultats (numériques et expérimentaux).....	111
Tableau 4.21. Propriétés mécaniques du béton et des armatures d'acier.....	116
Tableau 4.22. Comparaison entre la charge numérique et celle calculée par le code ACI 318-08.....	117

Tableau 4.23. Propriétés mécaniques du béton et des PRFC.....	118
Table au 4.24. Comparaison entre la charge ultime numérique et celle calculée par ACI 544.1R-96 poutre A2.5F2.0C10 / 10.....	118

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton armé est un matériau qui est le plus souvent utilisé dans des constructions grâce à ses performances et souplesse d'emploi. Cependant, les ouvrages en béton armé peuvent être endommagés durant leur durée de vie par plusieurs facteurs tel que le vieillissement des matériaux ; une modification des conditions d'exploitation ; la corrosion des aciers d'armatures, la fissuration du béton, des changements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution des normes, les secousses telluriques ...etc.. d'où le recours aux renforcements et aux réparations de ces ouvrages devient nécessaire.

Il existe diverses méthodes de renforcement qui ont évolué avec le temps. On cite le renforcement utilisant des matériaux composites, qui est devenu une option efficace qui offre de nombreux avantages physiques et mécaniques, telles qu'une haute résistance, une bonne capacité d'amortissement, une fabrication légère et facile à mettre en œuvre, ainsi qu'une haute résistance à la corrosion, et la facilité d'exécution.

Les techniques de renforcement des poutres ont fait l'objet de plusieurs études expérimentales. Néanmoins, le cout élevé et la longue durée de l'expérimentation et la limitation des résultats aux enregistrements par les jauges de contrainte et LVDT, fixés à quelques points dans la poutre, à un moment ou à une charge spécifiés, on conduit les chercheurs avec le développement de l'outil informatique, à la modélisation numériques de ces essais. L'avantage de la modélisation par les éléments finis réside dans le gain du temps et du cout avec des résultats qui couvrent plusieurs paramètres à la fois.

La modélisation par éléments finis présente un avantage par rapport aux essais expérimentaux. Elle permet d'étudier différents cas qui ne peuvent être mesurés expérimentalement.

- **Objectif**

Dans cette étude, nous effectuons une modélisation non linéaire par éléments finis (EF) du comportement de poutres vis-à-vis des efforts de cisaillement. L'objectif est d'aboutir à des modèles numériques capables prédire le comportement des poutres en béton armé renforcée par les matériaux composites (PRF).

L'analyse numérique s'effectuera à l'aide du code ANSYS. L'importance de cette étude vient du fait que si une approche numérique est validée, elle aidera les chercheurs à prédire le comportement de différentes poutres sans avoir à passer par les programmes expérimentaux longs et coûteux.

- **Organisation du manuscrit**

Le travail présenté dans cette thèse est structuré autour de quatre chapitres, en plus de l'introduction et des conclusions et perspectives.

Le chapitre 01 : Présente une étude bibliographique en relation avec le sujet. On y présente les différents types de dégradation des ouvrages en béton armé, et les différentes techniques employées dans les travaux de renforcement ou de réparation des structures en béton armé et un rappel sur la technologie des matériaux composites appliquée au renforcement externe des structures. On présentera, les matériaux composites, les constituants, les propriétés mécaniques et les différents procédés de mise en œuvre des renforts composites, ainsi que les codes des calculs pour la prédiction de la résistance en cisaillement des poutres en béton armé (BA) renforcées par (PRF), en passant par une revue de la littérature sur le renforcement les poutres en BA par PRF est également présentée.

Le chapitre 02 : Est un exposé, sur la méthode des éléments finis. Sa structuration, sa formulation et les étapes de calcul. Un examen détaillé sera effectué sur la théorie des éléments finis et son application.

Le chapitre 03 : Présente le programme de modélisation appelé ANSYS. On y trouve également une description détaillée des éléments utilisés pour modéliser les poutres en BA renforcées par PRF ; le béton, le renfort en acier ; le polymère et le support des plaques d'aciers, respectivement. Il comprend également synthèse exhaustive de tous les travaux traitant la modélisation des poutres renforcées par PRF.

Le chapitre 04 : Présente les résultats des modèles numériques obtenus. Un examen de ces résultats est également inclus, ainsi qu' une section pour la validation des résultats par rapport aux résultats expérimentaux. Une étude paramétrique, notamment, l'effet des couches de PRF, l'effet des longueurs des PRF, l'effet des configurations des renforcements a eu lieu et les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de la littérature.

Enfin, des conclusions et des perspectives les principaux résultats et des recommandations pour d'éventuelles futures recherches sont présentés.

CHAPITRE 01

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Première partie : Techniques de renforcement

1.1. Introduction

Les ouvrages en génie civil sont conçus pour une durée de vie donnée, soit cent ans en moyenne. Cependant, plusieurs types de désordre, chimiques ou mécaniques, viennent réduire cette période de vie prévisionnelle, tels que la corrosion des aciers, les chocs ; l'action des cycles de gel-dégel ; altération physico-chimique du béton ...etc, d'où la nécessité d'une maintenance pour assurer la sécurité de ces ouvrages. Parmi les moyens utilisés dans la maintenance des ouvrages on peut citer les renforcements et les réparations.

Il existe diverses méthodes de renforcement qui ont évolué avec le temps. Les plus anciennes ont des inconvénients tels que la difficulté de mise en œuvre et le faible gain de la capacité portante. Cependant, les nouvelles techniques de renforcement utilisant des matériaux composites sont plus attrayantes vu les nombreux avantages qu'elles offrent du point de vue des propriétés mécaniques et la facilité d'exécution.

1.2. Méthodes de renfort

Différentes techniques de réparation ou renforcement des ouvrages en béton armé existent. On cite les plus courantes :

1.2.1. Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier ou addition d'armatures en acier sans augmentation de la section

Cette technique est basée sur l'ajout d'armatures pour remplacer l'acier corrodé ou renforcer la structure. Ces armatures ajoutées contribuent à la résistance des sections renforcées. Le renforcement ajouté est protégé par un béton coulé ou projeté. Il y a une possibilité de lier les armatures anciennes et les nouveaux par le recouvrement ou la soudure [1].

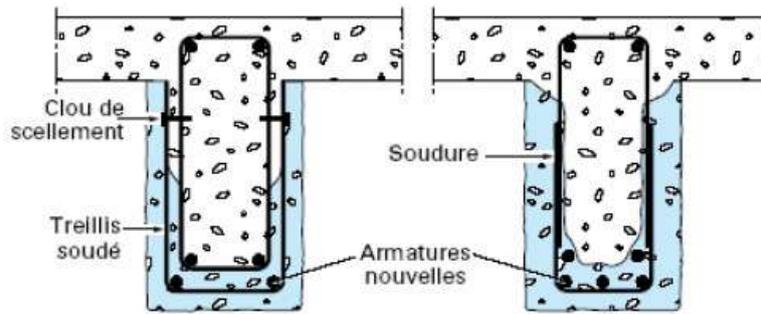


Figure 1.1. Adjonction d'armatures complémentaires [2].

Parmi les avantages de cette technique, on cite le faible prix et une main d'œuvre peu qualifiée, tandis que les inconvénients sont principalement: l'augmentation considérable des sections donc du poids de la structure ; la mise hors service l'ouvrage pendant la durée des travaux en plus d'une mise en œuvre souvent difficile.

La technique de chemisage peut se faire aussi par collage ou vissage des plaques d'acier contre le béton. Du point de vue transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage [3].

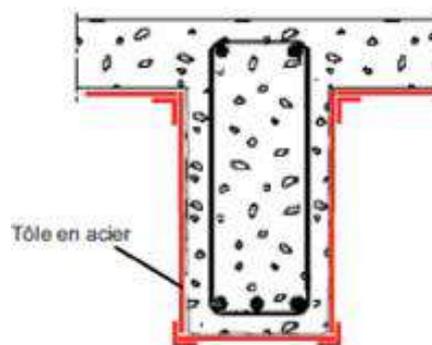


Figure 1.2. Chemisage en acier pour poutre en béton armé [1].

Parmi les avantages de cette technique, on cite [4]: la durée de réalisation courte par rapport au chemisage en béton ; bonne performances des éléments renforcés (bonne ductilité) ; faible augmentation de la section. Les inconvénients sont principalement : Le cout relativement élevé ; nécessité d'une main d'œuvre qualifiée ; nécessité d'un entretien régulier (corrosion).

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé [5]. La technique consiste à : malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, ...) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage ; projeter le matériau sur le support à revêtir grâce à un jet d'air comprimé. La technique de projection du béton a d'abord été utilisée pour réparer des structures endommagées. Il existe deux techniques de projection : Par voie sèche et par voie mouillée.

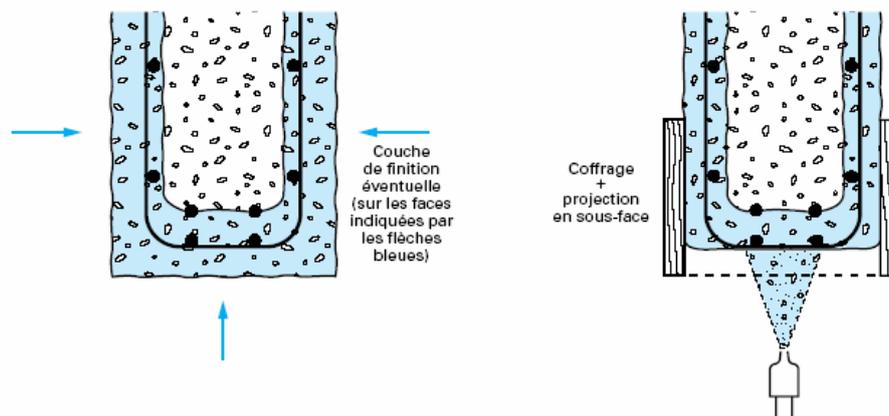


Figure 1.3. Réparation de poutre par béton projeté [6].

1.2.2. Adjonction de platines en acier dans les poutres, dalles, murs, piliers

Le principe de cette technique est de relier la plaque d'acier à la surface du béton pour transférer les efforts et augmenter la résistance et la rigidité de la structure. Cette technique est très économique et ne change pas forme et les dimensions de la structure [5].



Figure 1.4. Renforcement d'un viaduc par tôles collées [2].

Cette technique présente plus d'inconvénients que d'avantages [4]. On cite : sensibilité de l'acier à l'oxydation ; nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur

des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif) ; nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage.

1.2.3. Adjonction de lamelles ou bandes de matériaux composites

Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites (augmentation considérable des sections donc du poids de la structure, oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, difficulté de chemisage ...etc). Ces dernières années, la technique de renforcement par matériaux composites pour les éléments structuraux porteurs est utilisée de plus en plus. Cette technique efficace pour l'accroissement de la résistance des structures et aussi les plaques composites présentent de meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques que les tôles d'acier [7].

Le système de renforcement par matériaux composites peut se résumer par : Examiner et réparer les surfaces effritées et les fissures de l'élément à renforcer ; appliquer une couche de mastic de vitrier après la préparation de la surface de l'élément en éliminant les saillies ; mettre en place les tissus de fibres sur la surface après une application d'une première couche d'agent d'imprégnation ; répéter l'étape précédente jusqu'à ce que les couches demandées de fibres soient installées.

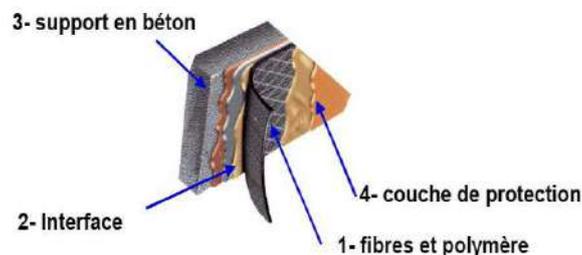


Figure 1.5. Détails sur les différentes couches d'un béton réparé [8].

Parmi les méthodes de renforcement disponibles, on retrouve la technique de renforcement externe (*EBR : Externally bonded reinforced*), qui consiste au collage de feuilles ou de plaques

de polymères renforcés en fibres (PRF) sur la surface extérieure de l'élément structural avec une résine époxydique appropriée.

Tableaux 1.1. Avantages et inconvénients des matériaux composites [9].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - sa faible densité ; - ses propriétés mécaniques longitudinales ; - l'absence de corrosion ; - sa très bonne tenue à la fatigue ; - sa facilité de manipulation. 	<ul style="list-style-type: none"> - une anisotropie très marquée ; - un comportement à la rupture de type fragile des composites ; - un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

1.3. Matériaux composite Polymère Renforcé de Fibres (PRF)

Un polymère renforcé de fibres (PRF) est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continus ou discontinus. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [5].

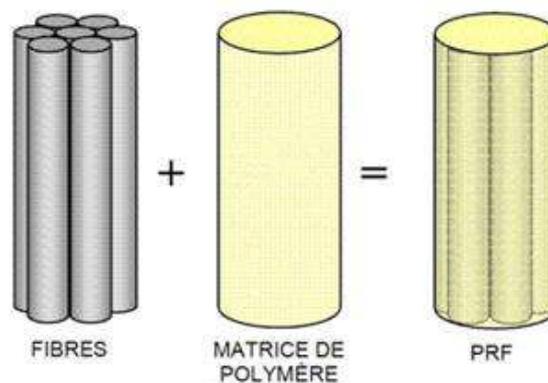


Figure 1.6. Définition d'un matériau composite ou PRF [5].

1. 3.1. Fibres

La fibre est l'élément porteur de charge principal d'un composite. Par conséquent, la fibre influe fortement sur les caractéristiques mécaniques du composite.

Il existe principalement trois types de fibres qui sont utilisés pour le renforcement des structures en génie civil qui sont les fibres de verre , d'aramide et de carbone pour améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites [4].

1.3.1.1. Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres : Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000-1500 °C et fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800-2000 °C. En effet, les fibres de carbone se brisent aisément si elles sont comprimées dans le sens de leur longueur, alors que, à masse égale, elles sont cinq fois plus raides et dix fois plus résistantes à la traction que l'acier [7].

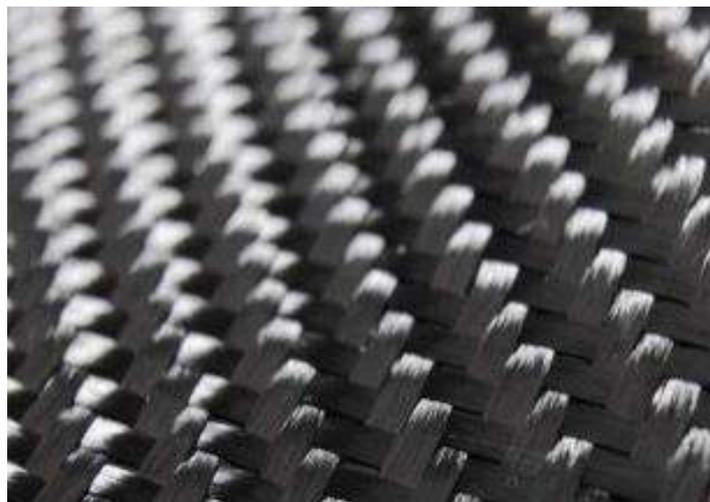


Figure 1.7. Fibres Carbone [10].

1.3.1.2. Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques) [7].



Figure 1.8 .Fibres de verre [10].

1.3.1.3. Fibre d'aramide

Souvent appelée Kevlar, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles;

La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances .Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède d'exceptionnelles des qualités de résistance à la traction et à l'allongement [7].



Figure 1.9. Fibres d'aramide [10].

Tableaux 1.2. Propriétés des fibres [2].

Filament	Diamètre (µm)	Densité	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température de fusion (°C)
Verre E	3 à 30	2,54	3 400	73 000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2 500	55 000	4,5	–
Verre R	3 à 30	2,48	4 400	86 000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3500	200 000	1	2 500
Carbone HM	8	1,8	2200	400 000	0,5	2 500
Aramide HR	12	1,45	3100	70 000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3100	130 000	2	480

HR: haute résistance; HM : haut module.

Tableaux 1.3. Comparaison qualitative entre Verre-E, Carbone-H.T et fibres Aramide [11].

Critères	Tissus de composites en:		
	Fibres de Verre-E	Fibres de Carbone	Fibres d'Aramide
Force de traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Force de compression	Bonne	Très bonne	Inadéquate
Module de Young	Adéquat	Très bon	Bon
Comportement à long terme	Adéquat	Très bon	Bon
Comportement à la fatigue	Adéquat	Excellent	Bon
Densité apparente	Adéquate	Bonne	Excellent
Résistance à l'alcaline	Inadéquate	Très bonne	Bonne

1. 3.2.Matrice

La matrice dans un composite est la phase continue. Elle fournit le mécanisme nécessaire au transfert de la charge de part et d'autre des fibres [12]. Il existe deux types principaux de matrices :

- Résine thermodurcissable (TD): polymère transformée en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur). La transformation est irréversible.
- Résine thermoplastique (TP): polymère pouvant être alternativement ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité. La transformation est réversible.

Les différentes familles de matrice sont résumées sur la figure 1.10 :

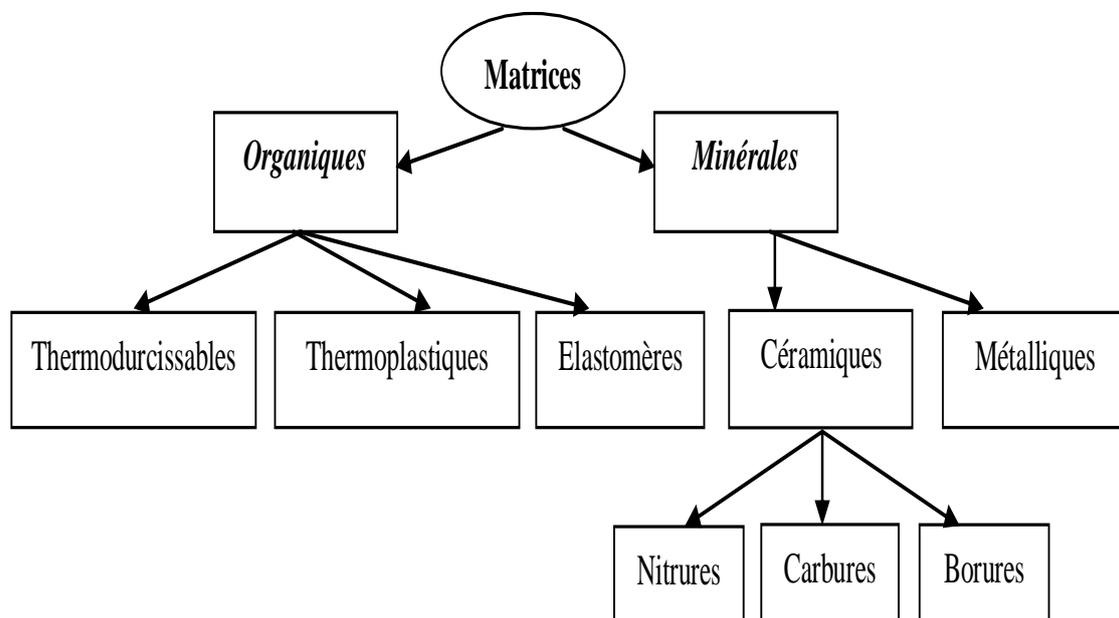


Figure 1.10. Organigramme illustrant les différentes familles de matrice [12].

1. 3.3. Composites «PRF»

La fabrication des composites peut être faite par plusieurs méthodes différentes : La stratification directe ou au contact, la pultrusion, et l'enroulement filamentaire.

En fonction des fibres utilisées, les composites «PRF» sont classés en trois groupes :

- polymère renforcé de fibres de verre (*glass-fibre-reinforced polymer*) : PRFV
- polymère renforcé de fibres de carbone (*carbon-fibre-reinforced polymer*) : PRFC
- polymère renforcé de fibres d'aramide (*aramid-fibre-reinforced polymer*) : PRFA

La fibre est l'élément porteur de charge principale d'un composite. Par conséquent, elle influe fortement sur les caractéristiques mécaniques du composite. Le tableau 1.9 résume les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil [4].

Tableaux 1.4. Propriétés mécaniques typiques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA» [13].

Matériaux composites Unidirectionnel	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (kg / m ³)	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Carbone / époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramide / époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

1.4. Synthèse des travaux portant sur les applications des ‘ PRF ‘ en génie civil

Depuis l'introduction des PRF dans les métiers du génie civil, d'innombrables études ont été effectuées pour étudier l'utilisation de ces matériaux dans la réhabilitation des structures en béton armé. Cette partie présente une revue de littérature des résultats de quelques travaux expérimentaux antérieurs reliés à la réhabilitation et au renforcement des poutres en béton armé par matériaux composites.

1.4.1. Renforcement des poutres en béton armé par PRF

Ce type de renforcement est appliqué aux structures supportant une sollicitation due au moment fléchissant. Les fissures ou bien l'endommagement apparaissent dans la zone de traction des poutres (Figure 1.11) [10].

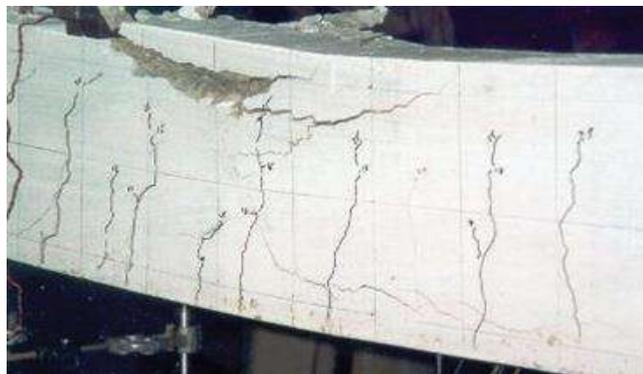


Figure 1.11. Rupture en flexion de la poutre [10].

Dans la plupart des cas, on colle le renforcement à l'élément de sorte que les fibres soient orientées de la même manière que les efforts. Les renforts utilisés sont généralement des bandes de tissu unidirectionnel pour le cas de poutre (Figure 1.12) [6].



Figure 1.12. Renforcement vis-à-vis de la flexion par collage de plaque composite [6].

Plusieurs études ont été effectuées sur le renforcement des poutres en béton armé par matériaux composites soumises à la flexion. Cette section nous permet d'avoir une compréhension générale de l'apport du renforcement en flexion par collage externe de PRF. Il existe de nombreuses études expérimentales sur le comportement en flexion des poutres renforcées avec des couches en PRFC, [14,15].

Meier (1992)[16] a montré que l'utilisation des plaques en fibres de carbone pour le post-renforcement de structures en béton armé a pour résultat d'augmenter la résistance en flexion. Pour cela, il a testé des poutres de 2 m de longueur, renforcées avec des lamelles de 0,3 mm d'épaisseur et des poutres de 7 m de longueur, renforcées avec des lamelles de 1 mm d'épaisseur. Enfin, des poutres de 2m de longueur sans renforcement ont servi pour comparer les résultats. Les poutres de 2 m avec renforcement ont montré un gain de 100 % de résistance en flexion contre 22% pour celles de 7 m.

Riyad et al. (2001)[17] ont testé sept poutres en béton armé renforcées par PRFC. Les poutres avaient différentes quantités des barres d'acier et aussi la quantité (taille et type) des matériaux composite de PRFC. Ils ont conclu que les poutres renforcées avec une quantité inférieure des barres d'acier existantes ont une ductilité plus faible. De plus, la fourniture d'ancrages dans le système de renforcement par PRFC qui augmentait la résistance et la ductilité des poutres renforcées.

Aboutaha et al. (2003)[18] ont étudié la ductilité à la flexion des poutres renforcées de PRFC. Les auteurs ont conclu que les poutres renforcées avec une quantité inférieure des

barres d'acier existantes ont une ductilité plus faible. De plus, la fourniture d'ancrages dans le système de renforcement empêchait le délaminage des feuilles de PRFC qui augmentait la ductilité en flexion des poutres renforcées.

Ashour et al. (2004)[19] ont testé seize poutres continues en béton armé. Les poutres avaient différentes barres d'acier et des stratifiés de polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Ils ont conclu que toutes les poutres renforcées présentaient des capacités plus élevées comparativement aux poutres de contrôle non renforcées.

Esfahani et al. (2007)[20] ont testé des poutres avec différents nombres de couches de PRFC ayant différentes dimensions. Ils ont conclu que la résistance à la flexion et la rigidité des poutres renforcées étaient plus élevées que celles des poutres non renforcées. De plus, les auteurs ont constaté que lorsque de faibles rapports de renforcement étaient utilisés, la résistance à la flexion des poutres était surestimée.

Soudki et al. (2007)[21] ont étudié le comportement des poutres en béton armé renforcées de PRFC dans un environnement corrosif. Ils ont conclu que les poutres renforcées produisaient le double de la résistance des poutres non renforcées même lorsqu'elles étaient soumises à un environnement difficile.

Ahmad et al. (2011)[22] ont constaté, quant à eux, une augmentation dans la rigidité de flexion et de la charge finale des poutres testées avec différents schémas de renforcement.

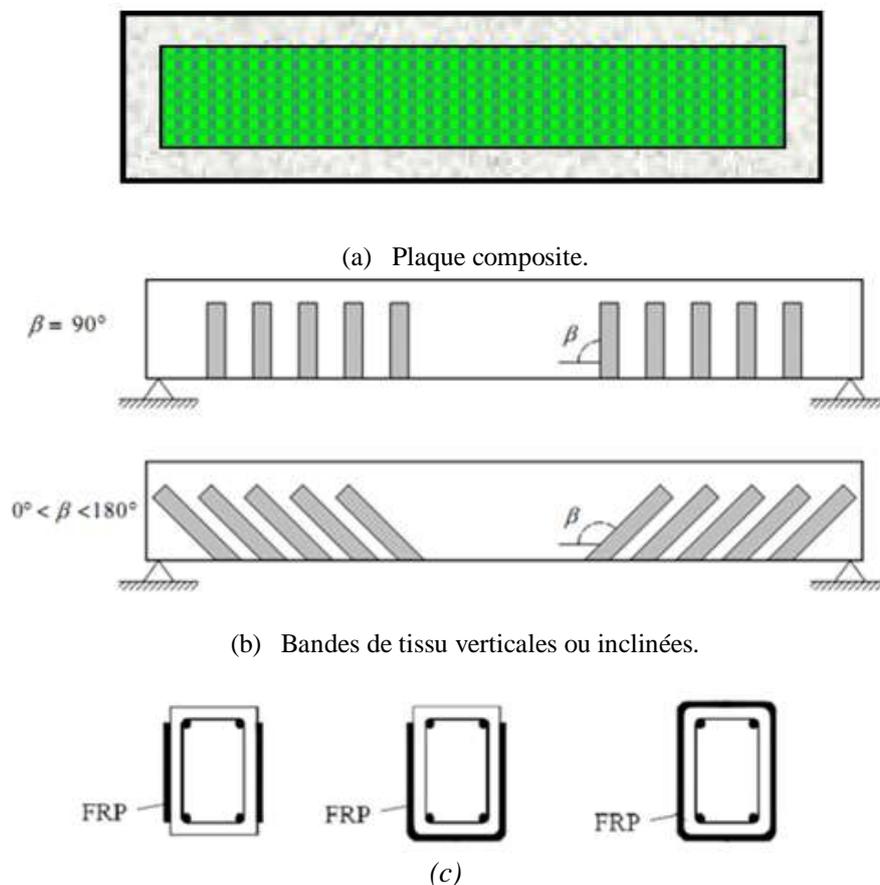
L'étude de Anju Antony et al.(2019) [23] a porté sur l'évaluation du comportement des poutres renforcées selon la technique EBR . Les spécimens d'EBR ont présentés une augmentation de la résistance à la flexion de 16,67% pour une seule couche 26,67% pour deux couches et 27,78 pour trois couches de feuilles de PRFC.

Asad ur Rehman Khan et Shamsoon Fareed (2014)[24] ont étudié le comportement des poutres en béton armé renforcées avec des enveloppes PRFC en zone tendue avec et sans ancrages, avec différents rapports (travée de cisaillement et la hauteur efficace de la section de

poutre) a/d. Soumises à une flexion à quatre points. Ils ont conclu que la résistance à la flexion et la rigidité et aussi la ductilité des poutres renforcées étaient plus élevées que celles des poutres non renforcées ainsi que l'augmentation des capacités de charge des poutres renforcées avec ancrages.

1.4.2. Renforcement des poutres en béton armé par PRF à la zone de cisaillement

La rupture en cisaillement apparaît sur les zones où l'effort tranchant est élevé. Différentes configurations du renforcement vis-à-vis de l'effort tranchant ont été testées.



(c) Bandes du tissu collées verticalement, bandes de tissu en forme de U, des bandes du tissu entourant des poutres sur toutes leurs périphéries

Figure 1.13. Différents configurations du renforcement vis-à-vis de l'effort tranchant [6].

Les configurations de renforcement en cisaillement par la méthode de collage externe (Externally - bonded) EB sont classées comme suit [10] :

➤ Le FRP est collé complètement sur les surfaces de la section transversale de la poutre (Applicable seulement sur les sections rectangulaires),

➤ Le FRP est collé sur les deux faces latérales (side-bonding),

➤ Le FRP est collé sur les deux faces latérales et la face de traction de la poutre (U-jacketing),

Plusieurs recherches traitant du comportement des poutres renforcées en cisaillement à l'aide des matériaux composites ont été entreprises.

Berset (1992)[25] ont étudié le renforcement au cisaillement des poutres par PRF. Les tests ont été réalisés sur une série de six poutres rectangulaires. Cette expérimentation a pris en considération deux paramètres : l'épaisseur du renfort de PRF et l'implication des étriers. Le renfort de PRF a été collé en surface sur les côtés des spécimens à un angle de 45°. Les gains en résistance en cisaillement obtenus se sont établis entre 33% et 66% en fonction de l'épaisseur du renfort. Cette étude a permis de démontrer, que l'utilisation de PRF pouvait accroître la résistance en cisaillement.

Chajes et al. (1995)[26] ont testé des poutres en T ayant un rapport de travée de cisaillement et la hauteur efficace de la section de poutre $a/d = 2.7$. Les spécimens ne comportaient aucune armature transversale. Cette analyse visait à identifier le gain de résistance de poutres renforcées à l'aide de trois différents types de renforts, soit fibre de verre, d'aramide et de carbone. Tous les spécimens étaient enveloppés en U sur toute la longueur avec les fibres orientées différemment (0° et 90°) et à des angles de 45° et 135° pour ceux utilisant la fibre de carbone. Les gains de résistance en cisaillement obtenus ont atteint 60% à 150%.

Sato et al. (1996)[27] ont effectué des essais sur des poutres renforcées par des bandes en U uniformément espacées, ce qui a aussi permis d'identifier divers modes de rupture lors du développement des fissures de cisaillement.

Taljsten (1997)[28] a expérimenté différentes techniques de collage sous pression, ainsi que l'effet de l'angle de collage des bandes de renforcement.

Umezu et al.(1997)[29] ont étudié le renforcement en utilisant des bandes d'aramide.

Triantafillou (1998)[30] a proposé un modèle pour déterminer la contribution des PRF à la résistance au cisaillement des poutres en (BA). Ses résultats sont obtenus à partir d'une série de tests sur des poutres ayant une section rectangulaire, aucun acier transversal et un renforcement en cisaillement par bandes PRFC. Deux paramètres ont été étudiés : l'épaisseur de PRF et l'angle d'orientation du PRF par rapport l'axe longitudinal de la poutre. Les résultats de test montrent que le PRF augmente la résistance au cisaillement de l'ordre de 65% à 95 % par rapport à une poutre non renforcée. De plus, Le mode de rupture de toutes les poutres est fragile par développement de fissures diagonales dans la travée de cisaillement. Pour les poutres renforcées, la fissure diagonale est suivie par le décollement du PRF, et la défaillance se produit pour une charge plus grande que celle pour une poutre non renforcée.

Khalifa et Nanni (2000)[31] ont réalisé des tests sur une série de six poutres avec une section en T sans aciers transversaux, renforcées par différentes configurations de PRF. Les paramètres étudiés sont : configuration de PRF (renforcement continu vs bandes discrètes) ; surface de collage (deux faces vs forme-U); combinaisons des directions de fibre (90° - 0° en combinaison de direction de fibre vs 90° direction); effet d'ancrage (forme-U avec ancrage vs forme-U sans ancrage). Les résultats montrent que toutes les poutres atteignent la rupture par décollement du PRF. Grâce à la contribution du FRP, la résistance au cisaillement des poutres est augmentée de l'ordre de 35% à 135% par rapport au cas de poutres non renforcées. Pour les poutres avec le renforcement PRF en forme-U et l'ancrage, l'ancrage a démontré son avantage sur la résistance au cisaillement de la poutre, le mode de rupture a évolué d'une défaillance en cisaillement à une défaillance en flexion.

Deniaud et Cheng (2001)[32] ont testé des poutres en Té. L'objectif visé était d'évaluer l'influence de certains paramètres, tels que : l'espacement des étriers ; le type de fibre utilisé (fibre de verre ou fibre de carbone) et l'orientation de la fibre : 90° , $45^\circ/90^\circ$, et triaxiale $0^\circ/60^\circ/-60^\circ$. Ils ont constaté que la résistance ultime ainsi que la ductilité des spécimens étaient clairement influencées par la quantité d'armatures transversales et l'application de renforts en PRF.

Chaallal et al. (2002)[33] ont présenté les résultats d'une série de vingt-huit tests sur quatorze poutres avec section en Té, sous charge statique. Deux paramètres sont considérés dans cette étude l'espacement des aciers transversaux ; le nombre de couches de PRFC. Le renfort PRFC est collé sous forme de U sur la surface de la poutre. Le ratio de cisaillement le rapport entre travée de cisaillement et hauteur efficace de la section est $a/d=2$, donc nous pouvons la considérer comme une poutre profonde. Ils ont conclu la résistance au cisaillement est augmentée avec l'augmentation de nombre de FRP.

Täljsten (2003)[34] ont étudié sept poutres rectangulaires ayant et un rapport a/d (le rapport entre travée de cisaillement et hauteur efficace de la section) de 2.7. L'objectif de cette étude visait à évaluer l'influence de certains paramètres, tels que : (i) l'orientation des fibres (45° , 0° , 90°) et (ii) l'épaisseur du renfort de PRFC. Tous les spécimens à l'étude, à l'exception du spécimen de contrôle, étaient renforcés à l'aide de tissu collé en U. De plus, les poutres ne disposaient d'aucune armature transversale dans la zone de cisaillement pour mieux évaluer la contribution du béton. Les résultats ont montré qu'un gain de résistance dû au PRFC variant entre 100% et 170%.

d'Adhikary et al. (2004)[35] ont étudié les poutres (BA) renforcée par PRFC le renfort PRFC est collé sous forme de U sur la surface de la poutre, plus efficace par rapport à d'autres schémas des renforcements. Ils ont conclu que la poutre en (BA) renforcée par PRFC sous forme de U augmente la capacité de cisaillement de 119% par rapport à la poutre témoin.

Bousselham (2005)[36] a réalisé Trente-quatre tests répartis en deux séries dont la première constituée de vingt-deux poutres en T de 152 mm x 406 mm x 4520 mm et une deuxième série de douze poutres en T de 95 mm x 220 mm x 3000 mm. Toutes les poutres ont été renforcées à l'aide de tissu de fibres de carbone bidirectionnelles collé en U sur toute la longueur de l'âme des poutres. L'objectif visé lors de ces essais était d'évaluer le comportement des poutres renforcées en cisaillement en observant certains paramètres ; tels que : (i) le taux de PRFC, (ii) le taux d'acier transversal, (iii) le type de poutre (élancée ou profonde), et (iv) la taille des spécimens. Ces essais ont montré que l'augmentation du taux de PRF n'était pas proportionnelle à sa contribution en termes de gain en résistance et que cette contribution était influencée par le taux d'acier transversal. Il a été observé que plus le taux d'acier augmente, moins la contribution du PRF est importante.

Bousselham et Chaallal (2006)[37] ont présenté les résultats d'une série de tests sur vingt-deux poutres, section en Té. Les paramètres étudiés sont : le ratio de PRF (nombre de couche de PRF) ; le ratio d'aciers transversaux (espacement) ; le ratio de la longueur de travée de cisaillement sur la hauteur effective de la poutre. Les résultats ont montré que la contribution du PRF est influencée par le ratio du rapport entre travée de cisaillement et hauteur efficace de la section est a/d et la présence d'aciers transversaux.

Bencardino et al. (2007)[38] ont étudié le comportement des poutres renforcées en cisaillement par PRF soumises à une flexion à quatre points. Ils ont conclu que l'ancrage améliore la résistance et la rigidité des poutres renforcées par plaques de PRFC.

Monti et Liotta (2007) [39] ont étudié l'effet de l'orientation des fibres PRFC à différents angles (30, 45, 60 et 90°). L'augmentation de la capacité de cisaillement, allant de 86 % par rapport à celles non renforcées. La méthode de renforcement des bandes avec différents angles et espacements a augmenté la capacité de cisaillement des poutres jusqu'à 37 %.

D'après les travaux de Teng et al. (2009)[40] neuf poutres sont testées soumises à une flexion à trois points. Parmi les neuf poutres, il y a trois poutres non renforcées et six poutres renforcées (UBF et BDF). Il n'y a qu'une différence entre les deux séries, PRFC dans série UBF n'est pas connecté avec le béton sur les deux faces latérales de la poutre. Le but de ces tests est de déterminer l'interaction entre FRP, béton, et aciers transversaux d'une poutre renforcée par FRP avec chargement en cisaillement. Les résultats montrent que la poutre de série UBF (FRP non collé sur la surface latérale) donne une résistance plus grande que la poutre avec le FRP collé sur la surface latérale de la poutre (BDF).

Sundarraja et Rajamohan (2009)[41] ont étudié l'effet PRFV pour améliorer la capacité de cisaillement des poutres en béton armé. La précision du code ACI pour la prédiction de la capacité de cisaillement des poutres renforcées avec PRFV (polymère renforcé de fibres de verre), Les auteurs ont conclu que la capacité de cisaillement, des poutres renforcées, augmente à 50% par rapport à la poutre témoin. De plus, les poutres renforcées sous forme de U sont plus efficaces par rapport aux poutres renforcées de deux faces par PRFV. Les résultats par le code ACI montrent un bon accord avec les données expérimentales.

Bukhaari et al. (2010)[42] ont étudié l'effet de l'orientation de la fibre PRFC (0/90 et 45/135). Ils ont conclu que l'orientation de la fibre PRFC 45° présente des capacités plus élevées comparativement aux autres poutres, car ils sont approximativement perpendiculaires aux fissures de cisaillement.

Godat et al. (2010)[43] ont réalisé des essais sur sept poutres rectangulaires de dimensions différentes afin d'être en mesure d'obtenir une compréhension plus juste de l'influence de l'effet d'échelle sur la contribution du renfort en PRF des poutres renforcées en cisaillement à l'aide de PRF. Les dimensions des trois séries de spécimens étaient respectivement de 100 mm x 200 mm x 900 mm pour la première série, de 200 mm x 400 mm x 1800 mm pour la deuxième série et de 300 mm x 600 mm x 2700 mm pour la troisième série. Les spécimens

ont été renforcés à l'aide de bande en U et de bande enveloppant entièrement le spécimen, espacé de façon variable selon la dimension du spécimen. Enfin, ces essais ont démontré que la contribution du PRF était plus grande sur les spécimens de petite taille comparativement à ceux ayant des dimensions qui s'approchent de la réalité. En comparant les résultats expérimentaux aux différentes normes, les auteurs mentionnent que la norme ACI est celle qui, en termes de résistance offerte par le PRF, s'approche le plus des résultats obtenus.

El-Maaddawy et Chekfeh (2012)[44] ont étudié huit poutres en Té renforcées à l'aide de différentes épaisseurs de tissus collés en U sur toute la longueur. Le programme expérimental a été mené sous deux groupes : (A) trois poutres chargées jusqu'à rupture n'ayant pas été pré fissurées avant l'application du renfort et (B) cinq poutres ayant été chargées jusqu'à la charge maximale avant d'être renforcées et chargées à nouveau jusqu'à la rupture. Les résultats ont montré qu'il était possible de restaurer une poutre ayant subi des dommages sévères en recouvrant 91% de sa résistance originale lorsqu'aucun système d'ancrage n'est mis en place, 117% pour les poutres renforcées avec un système de fixation d'une tige enfoncée et entre 130% et 145% de gain de résistance pour une tige filetée introduite à travers la partie supérieure de l'âme. De plus, les auteurs mentionnent que le nombre de couches n'aurait pas une grande influence sur le gain de résistance pour les spécimens munis d'ancrage.

Panda et al. (2013)[45] ont fait des essais expérimentaux sur deux séries de poutre en Té. Le rapport entre la travée de cisaillement et la hauteur efficace de la section de poutre (a/d) est de 3,26. La première série se compose de neuf poutres non renforcées par le composite, tandis que les neuf poutres de la deuxième série sont renforcées par PRFG avec différentes configurations. Les paramètres suivants sont étudiés : le taux d'aciers transversaux (sans acier transversal et avec l'espacement des aciers transversaux de 200 mm ou 300 mm) ; différentes configurations de PRFG (Coté-collé, forme en U, et forme en U avec ancrage). Les résultats

ont montré que le gain de capacité en cisaillement est significatif sur toutes les poutres renforcées par PRFG. La configuration forme en U avec ancrage présente plus d'efficacité que la configuration forme en U et coté-collé (Bandes du tissu collées verticalement).

El-Saikaly et al. (2014)[46] ont réalisé douze essais sur des spécimens. Le programme expérimental comportait des poutres sans étriers et des poutres avec étriers avec différents espacements. Ces essais comptaient : (i) un spécimen de contrôle, (ii) un spécimen renforcé à l'aide de tissu en U collé sur toute la longueur, (iii) un spécimen renforcé de bande en L et (iv) un spécimen renforcé de bande en L avec ancrages par cordage introduit à travers la semelle de la poutre en Té. L'objectif visé par ces essais était de valider l'efficacité d'un nouveau système d'ancrages composé de cordes de PFRC introduites à travers la semelle, visant à reproduire les effets du tissu collé enveloppant entièrement le spécimen. Les résultats ont montré que ce système pouvait amener jusqu'à 96% en gain de résistance pour le spécimen qui ne contient pas d'armature transversale. Ceci indique qu'une meilleure performance est obtenue lorsque le décollement prématuré du renfort est contrôlé. De plus, les résultats ont montré que la contribution du PRF doublait en présence d'ancrages. Ainsi, ce système mène à l'utilisation de la pleine capacité des matériaux et se traduit par une rupture par éclatement du béton.

Musa Hakan Arslan et al. (2022)[47] ont étudié le renforcement au cisaillement des poutres en Té avec et sans ancrage dans différentes configurations de PRFC. Ils ont conclu que le renforcement par PRFC empêche la formation des fissures de cisaillement et que l'amélioration de la capacité portante, de la rigidité et de la ductilité dépend du type de renforcement.

A partir des études expérimentales, réalisées par de nombreux chercheurs, portant sur des poutres en béton armé renforcées par les matériaux composites, il a été remarqué que le renforcement externe augmente la capacité portante et la rigidité des poutres.

Deuxième partie : Analyse analytique du renforcement

1.5. Code de calcul pour la prédiction de la résistance en cisaillement des Poutres en béton armé renforcées par PRF

Dans cette section, il sera question de présenter quelques instructions de conception principales pour le renforcement en cisaillement par PRF tels que : ACI 440.2R (2008) [48], FIB bulletin 14 (2001) [49], EUROCODE 2 [50], CNR-DT200(2004) [51].

1.5.1. ACI 440.2R (2008)

Le guide américain pour la conception et la construction de systèmes de PRF à liaison externe, pour le renforcement des structures en béton ACI 440.2R-08 [48], considère que la contribution du PRF à la résistance au cisaillement peut être déterminée par le calcul de la force résultant de la contrainte de traction dans le PRF. Dans le code ACI, la contribution du PRF est calculée de la manière suivante :

$$\phi(V_n) = \phi(V_c + V_s + \Psi_f V_f) \quad (1.1)$$

ϕ : facteur de réduction de la résistance.

Ψ_f : Facteur de réduction de la résistance au FRP.

$$\text{Avec } \Psi_f = \begin{cases} 0.95 \text{ enveloppe totale} \\ 0.85 \text{ renfort collé sur les cotés} \end{cases}$$

Les contributions du béton et de l'acier transversal s'expriment ainsi :

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (1.2)$$

f'_c : Résistance en compression du béton obtenu à partir d'un test standard.

b_w : Largeur de l'âme de la poutre.

d : Profondeur de la poutre (Hauteur utile).

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (1.3)$$

A_v : Aire de l'armature transversale.

f_y : Limite élastique de l'acier d'armature (contrainte).

S : Espacement des étriers.

La contribution du PRF s'exprime différemment aussi :

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f} \quad (1.4)$$

A_{fv} : Aire du renfort.

f_{fe} : Contrainte effective du renfort .

α : Angle d'inclinaison du renfort par rapport à l'axe de la poutre.

d_{fv} : l'épaisseur du joint de colle

S_f : Espacement entre axes de deux lamelles successives du renfort

Avec :

$$A_{fv} = 2nt_f w_f$$

n : Nombre de couches de PRF.

t_f : Épaisseur du renfort.

w_f : Largeur des lamelles de renfort .

Avec la formulation des coefficients K_1 , K_2 et L_e :

$$K_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}}$$

K_1 : Facteur de modification de résistance du béton .

$$L_e = \frac{23300}{(nt_f E_f)^{0.58}}$$

L_e : Longueur effective du renfort.

E_f : Module élastique du renfort.

$$K_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{PRF collé en U} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & \text{PRF collé sur les cotes} \end{cases}$$

K_2 : Facteur de modification du modèle d'enveloppe.

d_{fv} : l'épaisseur du joint de colle

K_v : Étant un facteur de réduction d'adhérence calculé ainsi

$$K_v = \frac{K_1 K_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \quad (1.5)$$

ε_{fu} : Déformation ultime du renfort.

$$Et \varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \text{ pour une enveloppe totale} \\ k_v \varepsilon_{fu} \text{ pour un renfort collé sur les cotés ou en U} \end{cases} \quad (1.6)$$

ε_{fe} : Déformation effective du renfort .

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f$$

1.5.2. FIB 14 [49]

D'après la méthode de la FIB (*Fédération internationale du Béton*)(*fib bulletin 14, 2001*), le calcul de la résistance à l'effort tranchant d'un élément renforcé au PRF, s'exprime ainsi :

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} \quad (1.7)$$

Les contributions du béton s'expriment par :

$$V_{Rd,c} = V_{cd} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_w \cdot 0.9 \cdot d \quad (1.8)$$

k_v : Coefficient qui tient compte de la longueur d'adhérence effective du renfort (L_e)

f_{ck} : Résistance en compression du béton obtenu à partir d'un test standard

γ_c : coefficient partiel pour le béton

b_w : Largeur de l'âme de la poutre

d : Profondeur de la poutre (Hauteur utile).

$$k_v = \frac{200}{1000+1.3 \cdot 0.9 \cdot d} \leq 0.15 \quad (1.9)$$

La contribution du PRF s'exprime différemment aussi :

$$V_{fd} = 0.9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$\varepsilon_{fd,e}$: la déformation effective

E_{fu} : Module élastique du renfort

θ = angle de fissure diagonale par rapport à l'axe de poutre

α = angle entre l'orientation de fibre et l'axe longitudinale de poutre

ρ_f : Taux de renforcement du PRF

$$\rho_f = \left(\frac{2t_f}{b_w}\right) \left(\frac{b_f}{S_f}\right) \text{ pour le cas du PFR noncontinue sous la forme de bande ou plaque.}$$

t_f : Épaisseur du renfort.

b_f : Largeur des lamelles de renfort

S_f : Espacement entre axes de deux lamelles successives du renfort

b_w : Largeur de l'âme de la poutre

$$\rho_f = \frac{2t_f \sin \alpha}{b_w} \text{ pour le cas du PFR continu} \quad (1.10)$$

La déformation effective est calculée par les équations ci-après :

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f}\right)^{0.3} \varepsilon_{fu}$$

f_{cm} : résistance de calcul du béton à la compression

E_{fu} : Module élastique du renfort à l'ultime

ε_{fu} : Déformation ultime du renfort

$$\varepsilon_{fk,e} = K\varepsilon_{f,e} \quad (1.11)$$

K : Coefficient

$\varepsilon_{f,e}$: déformation effective du composite

$\varepsilon_{fd,e}$: déformation de conception du renforcement FRP

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f}$$

γ_f : coefficient partiel pour le renforcement du PRF .

1.5.3. EUROCODE 2[50]

Dans la norme européenne, la résistance en cisaillement de la section d'une poutre renforcée par la méthode de collage externe (EB) de PRF est calculée par :

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f} ; V_{Rd,max}\} \quad (1.12)$$

Où :

V_{Rd} : effort tranchant résistant

$V_{Rd,max}$: effort tranchant minimum pouvant être repris par la section avant écrasement des bielles de compression.

Contribution d'armature :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z \frac{f_{yw}}{\gamma_s} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (1.13)$$

A_{sw} : cross – sectional area of stirrup

S: centreline spacing of stirrups

z : length of section internal lever arm

f_{yw} : yield strength of transverse reinforcement

γ_s : facteur de sécurité partiel pour les propriétés matérielles de l'acier d'armature

Contribution du composite :

$$V_f = \frac{A_f}{s} z_f \sigma_f (\cot \theta + \cot \alpha_f) \sin \alpha_f \quad (1.14)$$

A_f : Aire du renfort

z_f : Distance entre la fibre extrême en compression et le centroïde du renfort en tension

σ_f : contrainte de traction .

α_f : Angle d'inclinaison du renfort par rapport à l'axe de la poutre

1.5. 4. CNR-DT200 (2004) [51]

Pour le code Italien CNR-DT200 (2004), la résistance au cisaillement de la section d'une poutre renforcée est calculée par :

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f} ; V_{Rd,max}\} \quad (1.15)$$

Les contributions du béton s'expriment ainsi :

$$V_{Rd,ct} = 0.6 f_{ctd} b d \delta \quad (1.16)$$

f_{ctd} : résistance de calcul à la traction du béton

b : largeur de la section transversale

d : profondeur effective de la section

δ : Déplacement vertical de la poutre (flèche)

La contribution du PRF s'exprime différemment aussi :

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} 0.9 d f_{fed} 2 t_f (\cot \theta + \cot \beta) \frac{W_f}{P_f} \quad (1.17)$$

f_{fed} : valeur de calcul de la résistance effective

γ_{Rd} : Facteur partiel de résistance

t_f : Épaisseur du renfort

W_f, P_f : largeur et espacement du PRF, respectivement

Avec :

$$f_{fed} = f_{fdd} \left[1 - \frac{1}{6} \frac{l_e \sin \beta}{\min\{0.9 d h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\emptyset_R f_{fd} - f_{fdd}) \left[1 - \frac{l_e \sin \beta}{\min\{0.9 d h_w\}} \right] \quad (1.18)$$

f_{fed} : valeur de calcul de la résistance effective

l_e : longueur optimale de collage

f_{fd} : Contrainte ultime de conception du PRF

f_{fdd} : Contrainte de conception du décollement du PRF

\emptyset_R : Facteur de réduction dû aux contraintes locales de coin

Ici, f_{fed} est calculé séparément selon le type de configuration de renforcement du PRF. Pour le cas où le PRF est collé complètement (le contact parfait) sur la section de la poutre :

$$\emptyset_R = 0.2 + 1.6 \frac{r_c}{b_w} \quad (1.19)$$

r_c : rayon de coin de la section

$$0 \leq \frac{r_c}{b_w} \leq 0.5$$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2 E_f \Gamma_{FK}}{n_f t_{f,1}}} \quad (1.20)$$

$\gamma_{f,d}$: Facteur partiel de sécurité sur la qualité de l'application du PRF

E_f : module élastique

Γ_{FK} : énergie de rupture spécifique

γ_c : coefficient partiel pour le béton

n_f : Nombre de couches de PRF

$t_{f,1}$: épaisseur du PRF

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} \quad (1.21)$$

f_{ctm} : résistance en traction du béton

$$f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3}$$

f_{ck} : résistance en compression du béton

$$l_e = 80.44$$

$$\Gamma_{FK} = 0.03 K_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (1.22)$$

K_b : coefficient de géométrie

$$K_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (1.23)$$

$$f_{idd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{FK}}{n_f \cdot t_{r,1}}} \quad (1.24)$$

Troisième partie : Modélisation numérique des poutres renforcée

1.6. Synthèse des modélisations numériques des poutres renforcées

Avoir un modèle d'éléments finis fiable et validé est avantageux par rapport aux données mesurées expérimentalement dans de nombreux cas. Les résultats expérimentaux sont généralement limités à ceux enregistrés par les jauges de contrainte et LVDT fixés à quelques points dans la poutre à un moment ou à une charge spécifiés. Pour cela, la modélisation par éléments finis présente un avantage par rapport aux essais expérimentaux. Elle permet également d'étudier différents cas qui ne peuvent être mesurés expérimentalement, y compris les valeurs de déformation à différents endroits le long des poutres. Cette partie présente une revue de littérature des résultats des analyses numériques des poutres en béton armée renforcées avec PRF (flexion ou cisaillement).

1.6.1. Analyse par éléments finis des poutres en béton armée renforcées avec le PRF en flexion

Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'analyse des poutres en béton armée renforcées avec le PRF. Amer et al. (2009)[52] ont utilisé le programme ANSYS pour simuler le comportement non-linéaire des poutres renforcées par les polymères renforcés de fibres de carbone. Les résultats des courbes de charge-déformation montrent un bon accord avec les données expérimentales disponibles dans la littérature. Les modes des ruptures, également, correspondent bien avec ceux observés dans l'expérimentation.

Amer et al. (2009)[53] ont aussi modélisé des poutres renforcées extérieurement par des couches de PRF. Le modèle d'éléments finis était développé par l'approche de fissuration répartie pour le béton. Les courbes charge-déformation de l'analyse par éléments finis concordaient bien avec les résultats expérimentaux dans la gamme linéaire. Cependant, elles sont légèrement plus rigides que celles des résultats expérimentaux.

Ramezianpour et al. (2009)[54] ont montré l'efficacité du modèle numérique sous ANSYS pour étudier le renforcement des poutres par des plaques en PRF, collées extérieurement. Leur modèle par éléments finis a permis l'optimisation du mode de rupture dans ces poutres.

Abbas et al. (2010)[55] ont utilisé le programme ANSYS pour analyser la réponse des poutres renforcées par des plaques d'acier et de PRFC en termes de charge appliquée. Les courbes charge-déformation à mi-portée ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux et d'autres résultats numériques disponibles.

Fathelbab et al. (2011)[56] ont analysé l'effet de la flexion, cisaillement et leur combinaison dans les poutres renforcées par différents schémas de feuilles de PRF. La comparaison des résultats a montré que les poutres renforcées ont plus de capacité et une amélioration notable de ductilité par rapport à la poutre de contrôle.

Jayajothi et al. (2013)[57] ont réalisé des modèles d'éléments finis non linéaires des poutres renforcées en flexion et en cisaillement par des couches de polymère (PRF) et ont constaté que la capacité de charge limite de toutes les poutres renforcées était supérieure à celle des poutres de poutre témoin et que le comportement des poutres était similaire entre les modèles d'éléments finis et les résultats expérimentaux à toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine.

Mostefa Hamrat et al. (2020)[58] ont travaillé sur des modèles d'éléments finis non linéaires en trois dimensions. Les poutres ont été renforcées extérieurement par des fibres de carbone renforcé de polymères (PRFC et PRFV). Les résultats obtenus par ANSYS sont satisfaisants et en bon accord avec les résultats expérimentaux avec le coefficient de corrélation supérieur à 0.9. Ils ont également montré que les contraintes interfaciales de cisaillement augmentent avec le nombre des couches PRF pour les poutres réparées.

1.6.2. Analyse par éléments finis des poutres en béton armé renforcées avec le PRF au cisaillement

L'analyse numérique à l'aide du programme ANSYS a également été utilisée pour déterminer le comportement global des poutres en béton armé renforcées avec le PRF au cisaillement. Dans ce contexte, Elyasian et al. (2006)[59] ont étudié le comportement des poutres renforcées au cisaillement par couches de PRF à l'aide du logiciel ANSYS. Après l'analyse, ils ont observé une bonne corrélation et un haut niveau de précision avec les résultats expérimentaux. Ceci démontre la validité des modèles développés pour la prédiction du comportement des poutres renforcées au cisaillement par les couches de PRF.

Obaidat et al. (2010)[60] ont utilisé le programme ANSYS pour étudier le comportement des poutres renforcées en flexion et en cisaillement par couches de polymère et comparer les résultats des courbes de charge-déformation. Les modes de rupture et les modèles de fissures obtenus à partir des analyses par éléments finis ont été comparés avec l'expérimental.

Hawileh et al. (2013)[61] ont développé un modèle 3D d'éléments finis à l'aide du programme ANSYS pour analyser la réponse et les performances des poutres en béton armé renforcées par des plaques de PRFC. Les résultats de la simulation numérique étaient en bon accord avec ceux de l'expérimentation.

Harihar et al. (2016)[62] ont utilisé l'analyse par les éléments finis non-linéaires pour évaluer les comportements des poutres renforcées par des couches de polymère (PRFC) sous charge statique. Les résultats obtenus ont été en bon accord avec les résultats expérimentaux et d'autres résultats numériques disponibles.

Prajapati et al. (2017)[63] ont développé un modèle 3D d'éléments finis à l'aide du programme ANSYS pour l'analyse de la réponse et des performances des poutres renforcées par différents types de composite (PRFC, PRFB, PRFV) à l'aide d'enveloppe de forme U. Les résultats de la simulation numérique étaient en bon accord avec ceux des expérimentations.

Banjara et Ramanjaneyulu (2017)[64] ont étudié à l'aide du programme ANSYS les comportements des poutres renforcées avec des (PRFV). Après l'analyse, ils ont observé une bonne corrélation et un haut niveau de précision avec les résultats expérimentaux.

Habib et al. (2018)[65] ont utilisé ANSYS pour analyser la réponse des poutres renforcées par des plaques d'acier et de PRFC. Les courbes charge-déformation à mi-portée ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux et d'autres résultats numériques disponibles.

Choobbor et al. (2019)[66] ont aussi modélisé des poutres renforcées extérieurement par (PRFC Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) / PRFB Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP)), Ils ont conclu que les poutres renforcées produisaient le double de la résistance des poutres non renforcées et une amélioration notable de ductilité par rapport à la poutre témoin.

1.7. Conclusion

Les différentes techniques des renforcements des ouvrages en béton armé ont été présentées. Les techniques traditionnelles de renforcement présentent plusieurs inconvénients tels que la nécessité, souvent, de grands moyens humains et matériels pour une capacité assez limitée. Cependant les techniques de renforcement par matériaux composites offrent des meilleures performances avec moins de moyen et une facilité de mise en œuvre. Les recherches menées sur l'apport des matériaux composites PRF sur les poutres en béton armé, ont conclu que le renforcement à l'aide de ces matériaux augmente la résistance ultime, la ductilité, et aussi la rigidité des poutres en diminuant les flèches maximales.

Ces dernières années, avec le développement d'ordinateurs et de modèles de matériaux constitutifs non linéaires, plus sophistiqués, l'accent a été mis davantage sur l'analyse numérique des structures renforcées, en utilisant des logiciels basés sur les éléments finis et des simulations numériques, moins coûteuses en temps et en argent comparativement aux essais expérimentaux.

CHAPITRE 02

MODELISATION PAR LA METHODE DES

ELEMENTS FINIS

2 .1. Introduction

Des problèmes dans un passé récent ont été considérés comme insolubles par les méthodes analytiques classiques, sont maintenant aisément résolus par les méthodes numériques dont la plus utilisée est la méthode des éléments finis (MEF). La méthode des éléments finis est l'une des techniques numériques les plus puissantes et un outil d'analyse dans le cas des structures, tels que poutres, poteaux, dalles et aussi poutres profondes, structures en béton armé renforcées par matériau composite de polymère renforcé de fibre . . . etc. L'un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme permettant de résoudre, avec peu de modifications, plusieurs types de problèmes. En particulier, toute forme complexe d'un domaine géométrique où un problème est bien posé avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traitée par la méthode des éléments finis [67].

2 .2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode générale d'analyse structurale dans laquelle la solution d'un problème dans la mécanique continue est rapprochée par l'analyse d'un assemblage des éléments finis qui sont reliés ensemble à un nombre de points nodaux et représentent le domaine de la solution du problème [68]. Les domaines d'application de la méthode des éléments finis sont très larges et très variés tels que la mécanique des milieux continus solides, la mécanique des milieux continus fluides,ect . [69]

La méthode des éléments finis est extrêmement puissante, puisqu'elle permet d'étudier des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges appliquées.

2.2.1. Avantages de la méthode des éléments finis

La MEF étant versatile, elle présente des avantages par rapport aux autres méthodes numériques [70]. Elle permet de :

- Représenter un grand nombre de formes de structures à l'aide du modèle numérique général commun;
- La faculté de définir des maillages très irréguliers. Elle n'impose aucune restriction géométrique, le corps ou le domaine à modéliser peut avoir une forme quelconque ;
- Accepter des lois complexes de propriétés intrinsèques des matériaux si on compare aux possibilités des méthodes classiques de résolution, et offre plus vastes perspectives en analyse non linéaire. Elle n'impose aucune restriction sur les propriétés du matériau. Ces propriétés ne sont donc pas réduites à l'isotropie, et peuvent changer d'un élément à un autre ;
- Elle est applicable à tout type de problème dit de champs, d'analyses de contraintes, de transfert thermique, etc ;
- Elle n'impose aucune restriction sur les conditions aux limites et le type de chargement,
- Les éléments possédant différents comportements (modèles mathématiques) peuvent être combinés (ex : voile-portique dans une structure 3D), donc un seul modèle d'élément fini (EF) peut contenir des barres, des poutres, des plaques, etc ;
- La structure modélisée par des éléments finis représente le plus possible la structure réelle ou au domaine à analyser. L'approximation peut être améliorée en raffinant davantage le maillage.

2.3. Procédures de base de la méthode des éléments finis

Les étapes d'application de la méthode des éléments finis, nécessaires à la construction d'un modèle éléments finis peuvent être résumées comme suit [71] :

- ✓ Discrétisation du milieu continu en sous domaines, avec numérotation des nœuds et des éléments ;
- ✓ Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- ✓ Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- ✓ Assemblage des matrices élémentaires en une matrice globale ;
- ✓ Introduction des conditions aux limites ;
- ✓ Formation du vecteur des charges et sollicitations ;
- ✓ Résolution du système d'équations.
- ✓ Calcul des efforts dans les éléments.

2.3.1. Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites

La majorité des problèmes d'ingénierie sont décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour.

L'application de la MEF exige une réécriture de ces équations sous forme intégrale [71].

2.3.2. Discrétisation géométrique

Cette opération consiste à procéder à un découpage de la structure en petits éléments géométriques (maillage) tout en numérotant chaque nœud et chaque élément. Il est très recommandé de représenter au mieux la géométrie réelle, souvent complexe du domaine étudié.

2.3.3. Approximation sur un élément

Dans chaque élément la variable tel que le déplacement, la pression, est approximée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autre. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de nœuds de l'élément et ses degrés de liberté. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires [71].

2.3.4. Assemblage et application des conditions aux limites

Toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité,...etc) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape de discrétisation géométrique pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires [71].

2.3.5. Résolution du système global

Le système global peut être linéaire ou non linéaire. Il peut définir soit un problème d'équilibre, de valeurs critiques ou de propagation. Le problème d'équilibre concerne les cas statiques et les cas stationnaires. Dans un problème de valeurs critiques, on s'intéresse aux fréquences et aux modes propres de vibrations du système physique étudié. Les problèmes de propagations, concernent les cas transitoires dans les quels sont déterminées les variations dans le temps des variables physiques. Les méthodes d'intégration pas à pas conviennent mieux pour ce type de problème. Les plus utilisées sont : la méthode des différences finies centrales, la méthode de Newmark, la méthode de Wilson. A ces méthodes doivent être associées des techniques d'itération pour traiter le cas non linéaire. La plus fréquente est la méthode de Newton Raphson [69].

2.4. Utilisation des logiciels des éléments finis

La possibilité d'une application presque généralisée de la MEF, lui a permis d'être un outil puissant et versatile pour résoudre une large variété de problèmes. De ce fait, un grand nombre de logiciels professionnels ont été développés pour résoudre un grand nombre de problèmes d'ingénieur et de génie civil en particulier [72].

Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, ... etc.

Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

– Analyse linéaire ou non linéaire ; Analyse statique ou dynamique; Prise en compte de lois de comportement complexes; Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement) pouvant être couplés; Problèmes d'optimisation, ...etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale. Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis selon les étapes suivantes :

2.4. 1. Analyse du problème (Choix du modèle)

La modélisation par éléments finis est basée sur une approche géométrique, une fois cette géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème. Cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine. Elle est basée sur l'idée de discrétiser la forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de formes géométriques simples interconnectés en des points appelés nœuds [71].

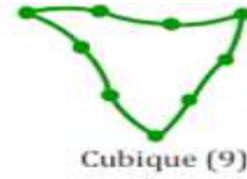
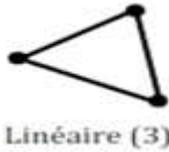
2.4. 2. Choix du type d'éléments

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible. On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles. On distingue trois familles d'éléments correspondants à des domaines à une, deux et trois dimensions. Chaque élément est identifié par sa forme, le type de courbe ou de surface qui forme sa frontière, ainsi que le nombre de nœuds nécessaires pour le définir. Il faut que le nombre de nœuds géométriques sur chaque frontière soit compatible avec la forme de la courbe qui constitue la dite frontière [73].

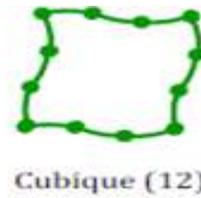
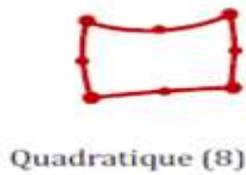
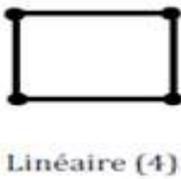
- **Eléments à une dimension**



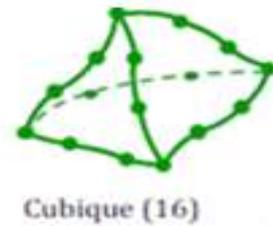
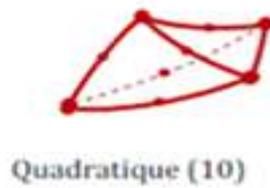
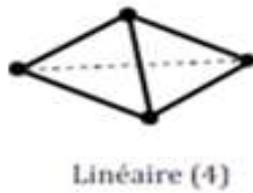
- **Eléments à deux dimensions triangulaires**



- **Eléments à deux dimensions quadrangulaires**



- **Eléments à trois dimensions tétraédriques**



- **Eléments à trois dimensions hexaédriques (briques)**

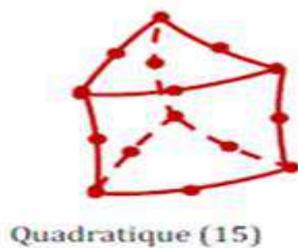
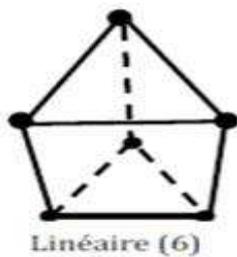
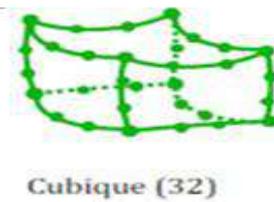
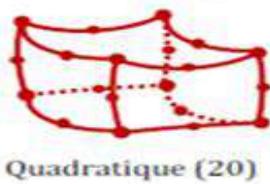
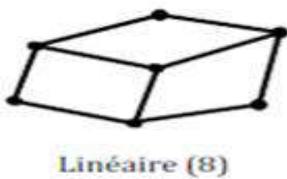


Figure 2.1. Formes classique des éléments [73].

2.4. 3. Création et vérification des données

Cette étape dépend du logiciel utilisé. La syntaxe utilisée pour définir le jeu de données est définie dans le mode d'emploi du bloc fonctionnel correspondant. En sortie, un fichier est créé, qui contient toutes les informations nécessaires à l'exécution des calculs.

Les vérifications relatives au jeu de données se font généralement graphiquement, grâce à un module informatique appelé *pré-processeur* [71].

Différents contrôles peuvent être utilisés pour valider le jeu de données :

- Vérification de la géométrie de la pièce et du maillage ;
- Vérification de la prise en compte des sollicitations et des conditions cinématiques (liaisons) imposées à la structure ;
- Vérification des propriétés mécaniques utilisées.

Pour des problèmes spécifiques, d'autres contrôles seront envisagés.

L'objectif est d'éviter de faire tourner un calcul inutilement. Ceci d'autant plus que la recherche d'une solution acceptable pour un problème donné est rarement le résultat d'un seul calcul.

2.4. 4. Exécution du calcul

Ce bloc, le plus coûteux en temps machine est souvent exécuté en tâche de fond. Un fichier de résultats permet de vérifier que les différentes phases de calcul se sont correctement déroulées [71] :

- Interprétation des données, vérification des paramètres manquants ;
- Construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes ;
- Singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments ;
- Convergence, nombre d'itérations,...etc.

Ce fichier peut contenir aussi les résultats du calcul (déplacements, résidus, contraintes...) ce qui lui confère dans ce cas un volume généralement très important. Il peut arriver que le calcul échoue. Les principales sources d'erreurs généralement observées à ce niveau sont listées.

2.4. 5. Exploitation des résultats

Les calculs demandés ont le plus souvent pour objectif de valider ou de vérifier le dimensionnement d'une structure. Les résultats obtenus et les conclusions relatives aux phénomènes à étudier devront être présentés de façon synthétique : tableaux, courbes, visualisation. Cela justifie largement l'utilisation d'un post-processeur, qui propose des outils pour sélectionner les informations que l'on veut étudier.

Différentes vérifications doivent être effectuées pour valider les résultats. Elles poussent, dans la plupart des cas, à remettre en cause le modèle pour en créer un nouveau, dont on espère qu'il améliorera la solution précédente.

Ayant les informations sur la qualité de la solution, différents contrôles peuvent être envisagés pour valider le modèle [71]:

- Ordre de grandeur des résultats obtenus ;
- Vérification des hypothèses du modèle ;
- Justification des choix de départ.

La comparaison des résultats des différents modèles permet d'améliorer puis dévaliser un modèle final. Une fois la fiabilité du modèle assurée, on peut conclure sur l'adéquation entre la structure et le cahier des charges. La synthèse de ces calculs préliminaires est indispensable car elle permet de justifier et de définir les limites des modèles retenus.

2.5. Organigramme d'un logiciel éléments finis

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristiques sous blocs fonctionnels décrits sur la figure 2.2 [74].

LOGICIEL

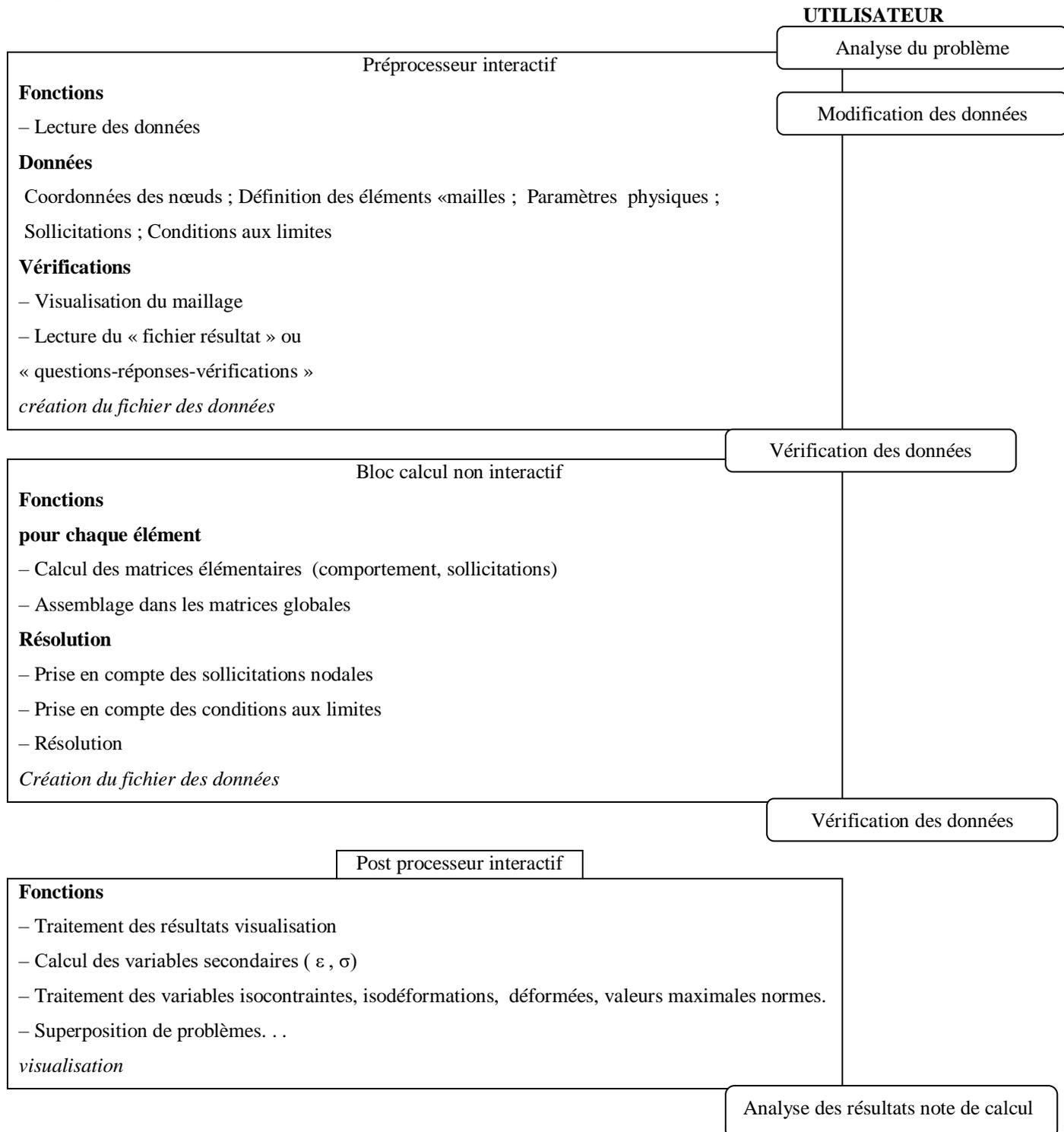


Figure 2.2. Organigramme d'un logiciel éléments finis [74].

2.6. Conclusion

La méthode des éléments finis a prouvé sa fiabilité pour le calcul des structures. Les codes basés sur les éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés pour la conception et l'analyse des structures. La finesse de la modélisation à retenir dépend des moyens que l'on est capable, mais aussi disposé, à mettre en œuvre.

Les chercheurs se sont intéressés de très près à l'utilisation des codes industriels pour résoudre les problèmes posés. L'approche numérique exige de mettre sur pied une méthodologie spécifique dont la préparation et le choix des éléments.

CHAPITRE 03

ANALYSE NON-LINEAIRE

3.1. Introduction

De nombreux outils numériques ont été développés lors des quarante dernières années, toujours plus robustes et précises. Il existe actuellement plusieurs logiciels Abaqus, Ansys,... etc, logiciel d'éléments finis idéal avait été défini comme un logiciel qui permettrait une modélisation rapide et facile d'un problème, allant du simple au complexe (structure multi-matériaux avec un comportement du matériau non linéaire et une interface complexe). Dans ce chapitre, une description sommaire de la procédure de la modélisation numérique par le logiciel ANSYS pour trouver des solutions approximatives pour les poutres en BA renforcée par PRF et système de chargement statique. Le but de cette étude est une explication des étapes de l'analyse d'un modèle éléments finis par ANSYS possède une bibliothèque d'éléments finis très étendue. Le choix de l'élément à utiliser va dépendre de la problématique mise en œuvre. Ensuite, nous appliquons les étapes de l'analyse à l'aide d'un programme jusqu'à trouver une solution.

3.2. Définition du programme ANSYS

Logiciel ANSYS a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. qui a son siège à Houston, PA, USA. ANSYS [75]. Est un logiciel de modélisation par élément finis performant et convenable pour la résolution d'une grande variété de problèmes mécaniques : statiques, dynamiques et structuraux (à la fois linéaire et non –linéaire) [76].

L'avantage de cette programme c'est un couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation (traitement de géométrie, maillage, résolution, traitement de résultats et optimisation) [77].

3 .2. 1. Interface utilisateur

Pour ANSYS, L'interface utilisateur est basée sur l'environnement X Windows conjointement à OSF/Motif. La partie graphique est interactive et permet la visualisation 3D, incluant les gradients, les isosurfaces, les flux de particules et les coupes de volumes. Il est possible de générer des images en postscript, HPGL ou TIFF [75].

3.3. Présentation globale du logiciel ANSYS

ANSYS est basé sur trois phases ordonnées : la phase pre-processing, la phase solution et enfin la phase post-processing. Lors de l'analyse et de la résolution d'un problème avec la méthode des éléments finis l'organigramme du logiciel ANSYS est représenté sur la figure 3.1

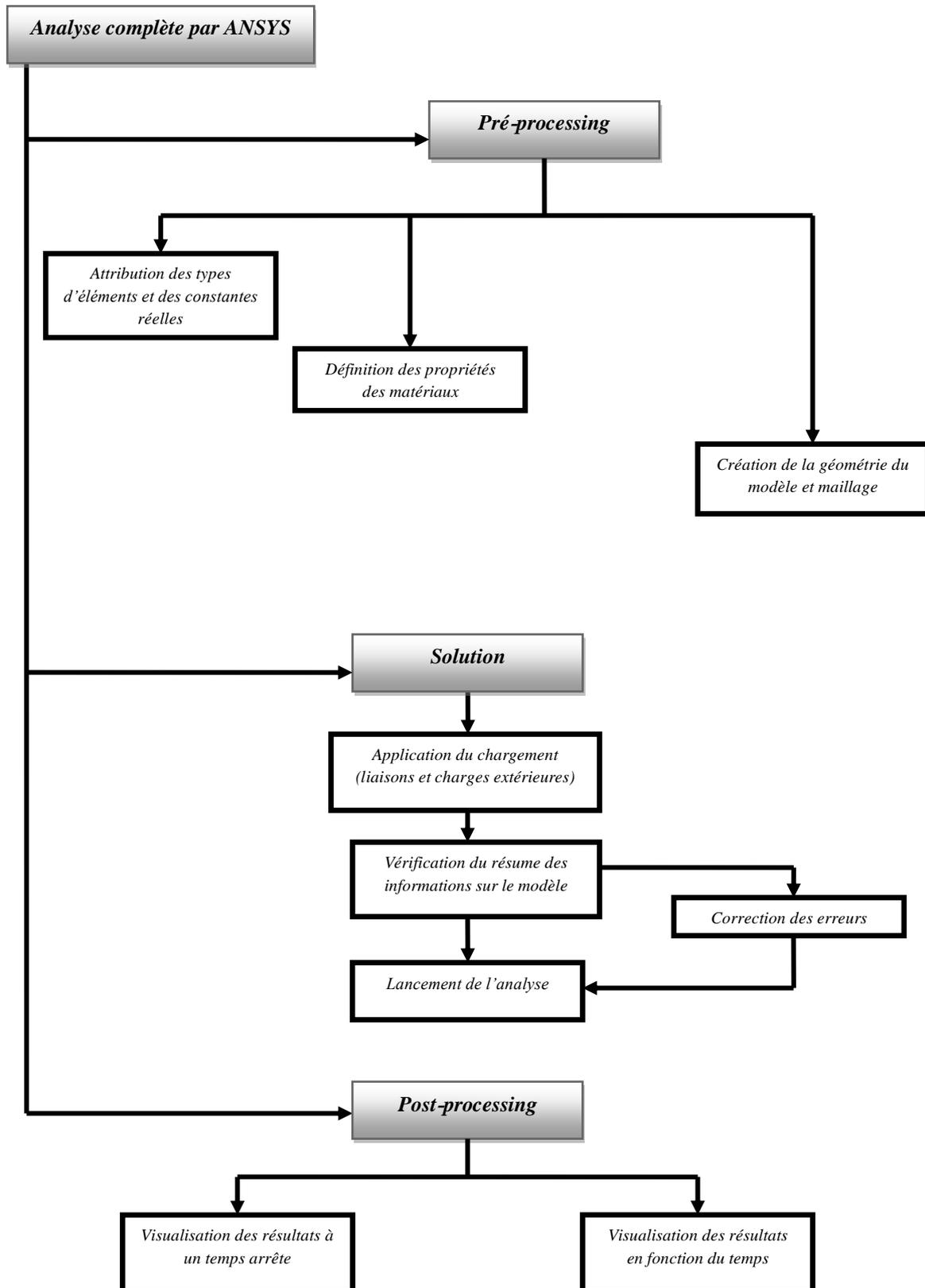


Figure 3.1. Organigramme du logiciel ANSYS [76].

3.3.1. Description de la phase pre-processing

La phase de préprocesseur est utilisé pour choisir les types d'élément, définir les constantes réelles, les propriétés mécaniques des matériaux et la géométrie du modèle .enfin, les différents charges appliquées sont introduites [76].

3.3.1.1. Définition des types d'éléments et des constantes réelles

La bibliothèque d'éléments d'ANSYS contient plus de cent différents types d'éléments. Chaque type d'éléments possède un numéro unique et un préfixe qui identifie sa catégorie .les constantes réelles des éléments sont des propriétés qui dépendent du type d'élément, telles que les propriétés de la section transversale d'un élément poutre .comme pour les types d'élément, chaque ensemble de constantes réels a un numéro de référence .les types d'éléments n'ont pas tous besoin de constantes réelles [76].

3.3.1.2. Définition des propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux doivent être définies pour la plupart des types d'éléments. Selon l'application, ces propriétés peuvent être linéaires, bilinéaires ou non-linéaires, isotrope, orthotrope ou anisotrope. Comme avec les types d'éléments et les constantes réelles, chaque ensemble de propriétés des matériaux a un numéro de référence du matériau [76].

3.3.1.3. Création de la géométrie du modèle

Une fois les propriétés des matériaux définies, un modèle constitué d'éléments finis est généré. Ce dernier décrit adéquatement la géométrie de l'élément structural analysé. Il existe deux méthodes pour créer le modèle par éléments finis : la modélisation solide et la génération directe. Avec la modélisation solide, la géométrie de la forme du modèle est décrite puis le programme ANSYS maille automatiquement la géométrie avec des nœuds et des éléments. La taille et la forme des éléments créés par le programme peuvent être contrôlées. Avec la génération directe, l'emplacement de chaque nœud et la connectivité de

chaque élément sont définis manuellement. Plusieurs opérations de commodité, telles que la copie des modèles de nœuds et d'éléments existants, le reflet de symétrie,... etc., sont disponibles [76].

3.3.1.4. Application de Charges

Il est nécessaire de définir les options et le type d'analyse, d'appliquer les charges, de spécifier les options de l'étape du chargement et d'initier la solution d'éléments finis. Le type d'analyse à utiliser dépend des conditions de chargement ainsi que des réponses que l'utilisateur souhaite recueillir. Le programme ANSYS offre les types d'analyse suivants : statique (ou l'état d'équilibre), transitoire, harmonique, modal, spectral, du flambement et sous-structuration. Tous les types d'analyse ne sont pas valables pour toutes les disciplines [76].

3.3.2. Description de la phase Solution

Lorsque cette commande est émise, le programme ANSYS prend les informations sur le modèle et le chargement de la base de données et calcule les résultats. Ces derniers sont écrits dans le fichier de résultats ainsi que dans la base de données. L'unique différence est que seul un ensemble (groupe, série) de résultats peut résider dans la base de données en une seule fois (un seul temps), tandis qu'un certain nombre d'ensembles de résultats peuvent être écrits dans le fichier de résultats. Une fois que la solution a été calculée, les post-processeurs d'ANSYS peuvent être utilisés pour examiner les résultats [76].

3.3.3. Description de la phase Post-processing

C'est la dernière étape d'une analyse par éléments finis. Où l'utilisateur peut manipuler les résultats de la phase précédente et les visualiser interactivement ou faire des sauvegardes pour impression et/ou vidéo. Il existe de nombreuses façons de présenter le logiciel ANSYS des

Une simple solution d'itérations est décrite graphiquement sur la figure (3.2) c'est une solution de Newton-Raphson pour une itération.

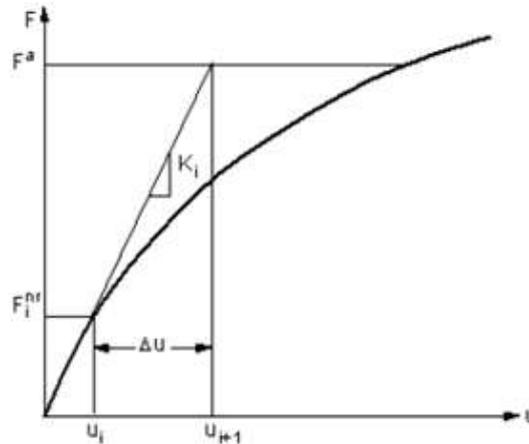


Figure 3.2. Solution de Newton –Raphson après une itération [1].

Ainsi, à chaque début de solution, la méthode évalue le vecteur d'équilibre des forces entre les forces appliquées et les forces de restauration (dû à la contrainte dans les éléments). Le programme applique une solution linéaire en utilisant le vecteur d'équilibre et si le critère de convergence n'est pas vérifié, le vecteur d'équilibre est réévalué. Ce processus itératif est répété jusqu'à la convergence [78].

Pour cela, il peut le logiciel ANSYS est capable de résoudre des problèmes non linéaires et munie d'une interface graphique qui facilite la tâche à l'utilisateur, et elle est dotée d'une bibliographie d'éléments assez riche capable à satisfaire pratiquement tous les problèmes de modélisation, et nous permet d'introduire les différents modèles des matériaux employés dans la modélisation des poutres en béton armé renforcées par composites.

3.5. Les paramètres de solution non linéaires par ANSYS

3.5. 1. L'option pour l'incrémentation des charges dans ANSYS

Le réglage des paramètres de la solution numérique consiste à définir les options de type d'analyse, un ensemble de contrôles de solutions numériques devront être identifiés pour

mener à bien une analyse non linéaire appropriée. Principalement, le type d'analyse a été réglé sur "Small déplacement statique". Cela signifie qu'une analyse linéaire et non linéaire sera transportée pour résoudre les modèles, dans lesquels les grands effets de déformation sont ignorés. La méthodologie dans ANSYS est fonction du temps (TIME) où la charge est considérée comme une fraction d'un temps sous étapes « substeps ».

Il pourrait être défini en spécifiant le nombre d'étapes ou en définissant une valeur additionnelle de temps. La seconde approche était considérée, avec valeur d'heure à la fin de charge-étape égale à 1 seconde (load-step), un minimum et une durée maximale étape étaient respectivement de 0,005 et 0,01 et un pas de temps par défaut égale à 0,01. Différentes valeurs de pas de temps minimum et maximum permettrait d'automatiser la valeur de la charge selon la convergence. Automatisé le temps en plaçant une limite supérieure sur la taille de palier de temps surtout pour des modèles compliqués renforcerait le processus de convergence [79].

The screenshot displays the ANSYS software interface, specifically the 'Nonlinear' tab. The 'Analysis Options' section shows 'Small Displacement Static' selected in a dropdown menu, with an unchecked checkbox for 'Calculate prestress effects'. The 'Time Control' section includes a text input for 'Time at end of loadstep' set to '1', a dropdown for 'Automatic time stepping' set to 'On', and radio buttons for 'Number of substeps' (unchecked) and 'Time increment' (checked). Below these are text inputs for 'Time step size' (0.01), 'Minimum time step' (0.005), and 'Maximum time step' (0.01). The 'Write Items to Results File' section has radio buttons for 'All solution items' (checked), 'Basic quantities', and 'User selected'. A list box shows 'Nodal DOF Solution', 'Nodal Reaction Loads', 'Element Solution', 'Element Nodal Loads', and 'Element Nodal Stresses'. Below this is a 'Frequency:' section with a dropdown for 'Write every substep' and a text input for 'where N =' set to '1'.

Figure 3.3. Control de solution- de base – [79].

3.5. 2.Nombre d'itération de l'équilibre

Cette option indique le nombre maximal d'itération d'équilibre permis par sous incrément (Supstep), Le nombre maximum d'itération de l'équilibre a été mis à 100 itérations pour l'analyse structurale.

The image shows the 'Nonlinear Options' dialog box in ANSYS. It is divided into several sections:

- Nonlinear Options:**
 - Line search: On
 - DOF solution predictor: Prog Chosen
- Equilibrium Iterations:**
 - Maximum number of iterations: 100
- Creep Option:**
 - Include strain rate effect:
- Cutback Control:**
 - Limits on physical values to perform bisection:
 - Equiv. Plastic strain: 0.15
 - Explicit Creep ratio: 0.1
 - Implicit Creep ratio: 0
 - Incremental displacement: 10000000
 - Points per cycle: 13
 - Options:
 - Cutback according to predicted number of iterations
 - Always iterate to 25 equilibrium iterations

At the bottom, there is a button labeled 'Set convergence criteria ...'.

Figure 3.4. Contrôle de solution - non linéaire-[79].

3.5.3. Choix de solutionner (Solve)

Pour résoudre les modèles, ANSYS a différents solveurs d'équations, à savoir SPARSE, PRE-CONDITION CG et algébriques M-GRID. le "Solver Direct Sparse" a été utilisé. Le solveur direct clairsemé est basé sur une élimination directe des équations. Une élimination directe nécessite la factorisation très clairsemée d'un système d'équations linéaires initial dans une matrice triangulaire inférieure suivie par l'avant et la substitution vers l'arrière en utilisant ce système triangulaire. L'espace requis pour les facteurs de matrice triangulaire inférieure est généralement beaucoup plus que la matrice creuse assemblée initiale, donc le grand disque ou en-core mémoire exigences pour les méthodes directes [79].

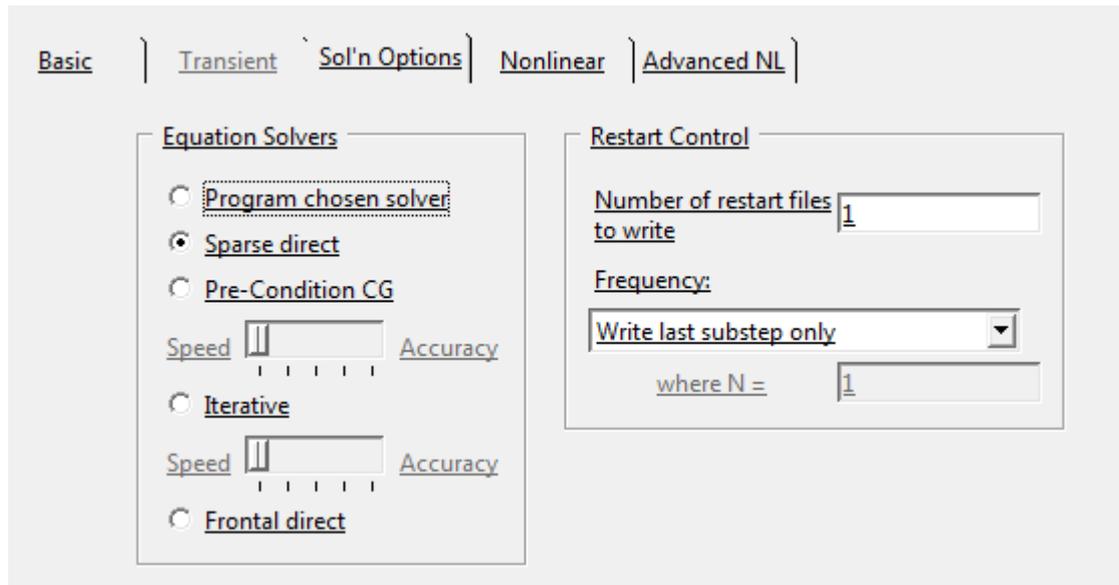


Figure 3.5. Control de solution - option de solution –[79].

3.5.4. Convergence

Pendant le processus de résolution de problèmes, le programme continuera de faire des itérations d'équilibre jusqu'à ce que le nombre maximal des équations d'équilibre soient atteints. Le contrôle automatique de la solution sur ANSYS utilise L2-norme de tolérance (force et du déplacement) la plupart des cas un cadre convient égale à 0.5 %-0.2 [79]. Dans cette étude L2-norme de tolérance (force et du déplacement) égale à 0.5 % comme ceci la valeur est adéquate dans la plupart des cas (analyses des poutres sous charges statiques).

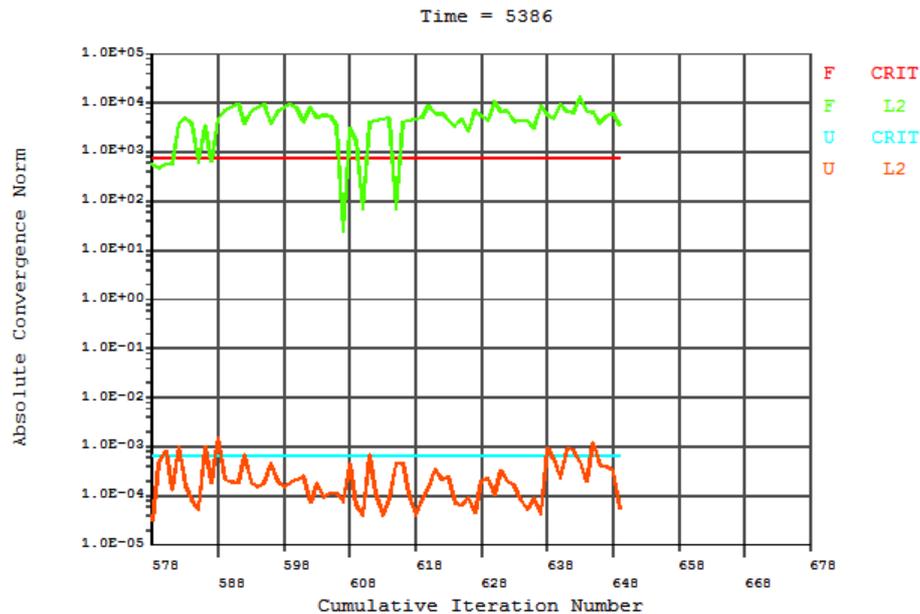


Figure 3.6. Critère de convergence L2 (force et le déplacement) [79].

3.6. Types d'éléments

La bibliothèque d'éléments ANSYS contient plus de 177 types d'éléments différents. Chaque type d'élément possède un numéro unique et un préfixe qui identifie l'élément catégorie [77]. Dans cette partie explique les types d'éléments utilisée pour les poutres en béton armé renforcée par PRF (béton, acier et PRF, plaques d'acier (appuyer).

3.6.1. Description des éléments béton

Un élément solide, SOLID 65, est utilisé pour modéliser le béton dans ANSYS. SOLID65 est utilisé pour la modélisation 3-D de solides avec ou sans fibre. L'élément solide a huit nœuds avec trois degrés de liberté transitoires à chaque nœud dans les directions x, y et z. De plus, l'élément est capable de simuler une déformation plastique, une fissuration dans trois directions orthogonales et un écrasement [80]. La géométrie et les nœuds de cet élément sont représentés dans la figure 3.7.

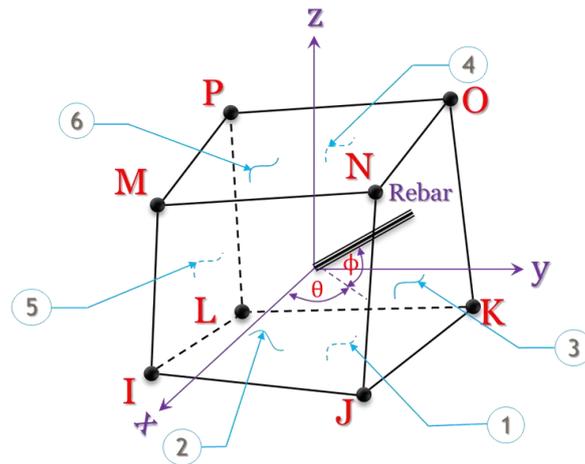
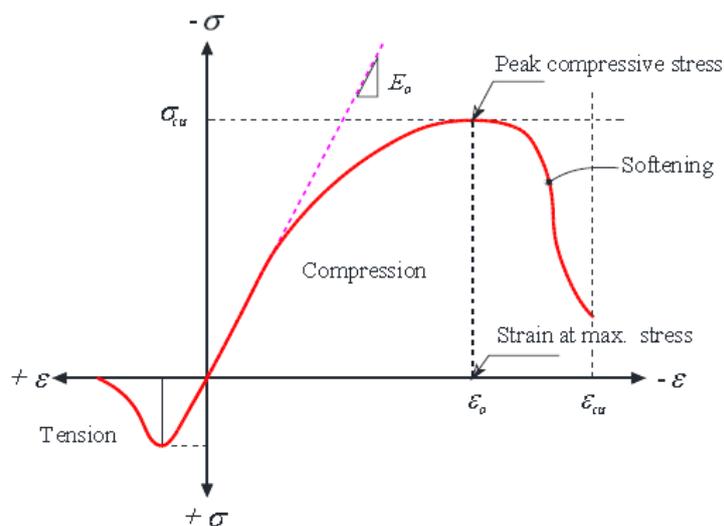


Figure 3.7. Géométrie de l'élément SOLID 65[80].

3.6.1.1. Propriétés des bétons

Le béton est un matériau quasi fragile qui a un comportement différent en compression et en traction [1]. La figure (3.8) montre une courbe contrainte-déformation typique pour un béton ordinaire.



Figurer 3. 8. Courbe contrainte-déformation typique du béton [81].

En compression, la courbe contrainte-déformation du béton est linéairement élastique jusqu'à environ 30% de la contrainte maximale .Au-dessus de ce point, la contrainte augmente graduellement jusqu'à la contrainte maximale à la compression σ_{cu} . Après avoir atteint la

résistance à la compression maximale σ_{cu} , la courbe descend. Et se produit l'écrasement et la rupture à une déformation ultime ϵ_{cu} [79].

En traction, la courbe contrainte-déformation pour le béton est approximativement linéaire élastique jusqu'à la contrainte maximale à la traction. Après ce point, la résistance du béton diminue graduellement à zéro [72].

Les résistances ultimes du béton à la compression et à la traction ont été calculées par les équations (3.2) , et (3.3),respectivement [72] :

$$f'_c = (E_c/4730)^2 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$f'_t = \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (3.3)$$

Le programme ANSYS exige la relation contrainte-déformation pour le béton dans la compression uniaxiale. Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer la courbe multilinéaire isotopique de contrainte- déformation pour le béton [72].

$$f = \frac{E_c \epsilon}{1 + (\epsilon/\epsilon_0)^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$E_c = \frac{f}{\epsilon} \dots\dots\dots (3.6)$$

Avec :

f : Contrainte à n'importequelle déformation ϵ , en MPa.

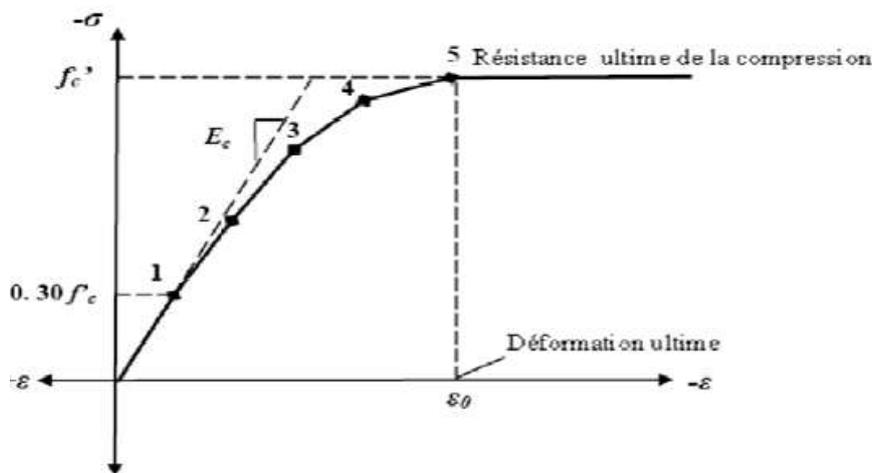
ϵ : Déformation à la contrainte f .

ϵ_0 : Déformation à la résistance ultime de compression f'_c

La courbe contrainte – déformation est constituée par six points connectés par des lignes droites, la figure (3.9) montre la courbe contrainte – déformation simplifiée de béton en compression uniaxiale qui a été employé dans cette étude [72].

- Calcul les points 1 à 5 :

- **Point 1** : défini comme $0.30 f'_c$. Est calculé par la relation contrainte (déformation du béton dans la partie linéaire (équation(3.6)).
- **Les points 2,3,et 4** : sont obtenus à partir de l'équation (3.4) , ou ε_0 est calculé à partir de l'équation (3.5).
- **Le point 5** : est défini par f'_c et ε_0 .



Figurer 3. 9 .Diagramme contrainte -déformation simplifié du béton en compression uniaxiale [81].

Pour le béton, ANSYS exige des données d'entrée pour les propriétés des matériaux comme suit :

- Module d'élasticité (E_c).
- Résistance à la compression uniaxiale ultime (f'_c).
- Coefficient de transmission de l'effort tranchant (B_t).
- Le coefficient de Poisson pour le béton est supposé égal à 0,2.
- Coefficients de transfert de cisaillement pour la fissure fermée (B_c).

Il faut introduire deux transmission de l'effort tranchant pour une fissure ouverte B_t et pour une fissure fermée B_c . La valeur du B_t , s'étend de 0.0 à 1.0 avec 0.0 représentant une fissure ouverte (perte complète de transfert de cisaillement) et 1.0 représentant une fissure fermée (aucune perte de transfert de cisaillement) [81].

3.6.2. Description des éléments acier

Un élément LINK180 a été utilisé pour modéliser le renfort en acier. Deux nœuds sont nécessaires pour cet élément. Chaque nœud possède trois degrés de liberté. L'élément est également capable d'avoir des déformations plastiques [80]. La géométrie, emplacement des nœuds, et le système de coordonnées de l'élément sont présentés dans la figure (3.10).

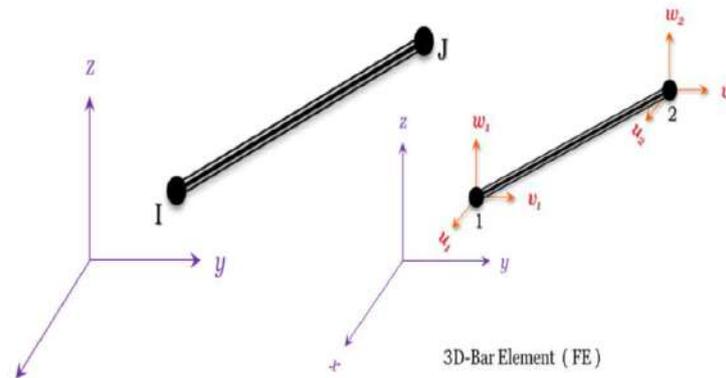


Figure 3.10. Géométrie des éléments LINK 180 [80].

L'acier pour les modèles d'éléments finis a été supposé être un matériau élastique parfaitement plastique et identique en traction et en compression. Le coefficient de Poisson de 0.3 et module d'élasticité (E) 200000 MPa a été utilisé pour l'armature en acier. La figure (3.11) montre la relation contrainte-déformation.

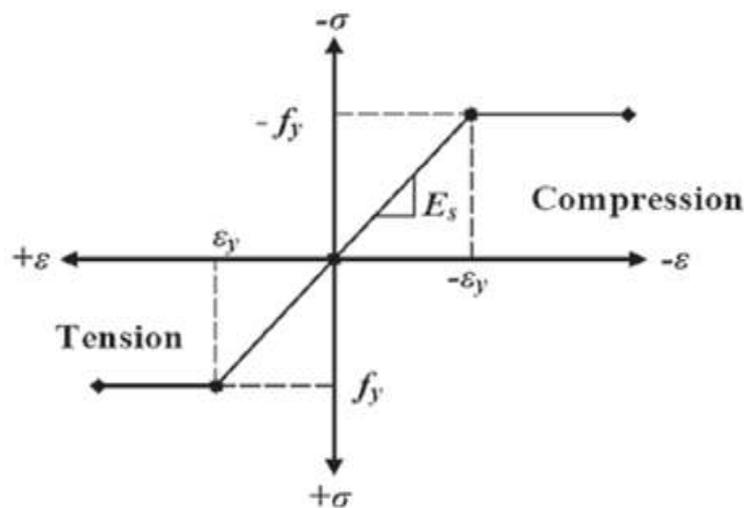


Figure 3.11. Relation contrainte-déformation pour l'acier [81].

3.6.3. Polymère renforcé de fibre de (PRF)

L'élément SHELL181 est utilisé pour la modélisation de polymères renforcés de fibres de (PRF). C'est un élément à quatre nœuds à six degrés de liberté par nœud [80]. Pour les modèles en éléments finis les données d'entrée requises pour les composites de PRF comme suit: module d'élasticité de PRF ; nombre de couches et épaisseur de chaque couche. La géométrie, emplacement des nœuds, et le système de coordonnées de l'élément sont présentés dans la figure (3.12).

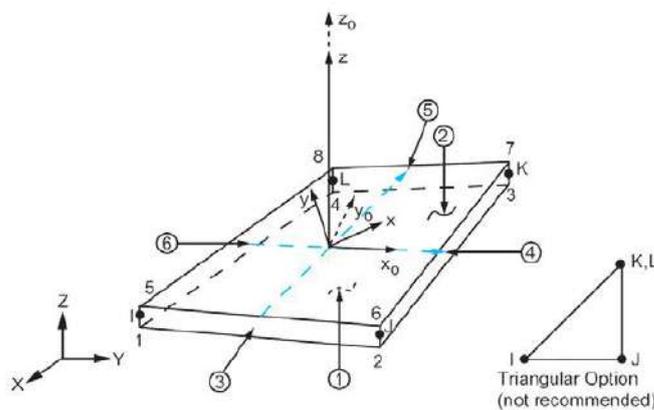


Figure 3. 12. Élément SHELL 181 [80].

3.6.4. Supports des appuis

L'élément SOLID185 est utilisé pour la modélisation des supports en plaques d'acier défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté par nœud. Cet élément est capable d'avoir des déformations plastiques et de fluage [80]. La géométrie, emplacement des nœuds, et le système de coordonnées de l'élément sont présentés dans la figure (3.13).

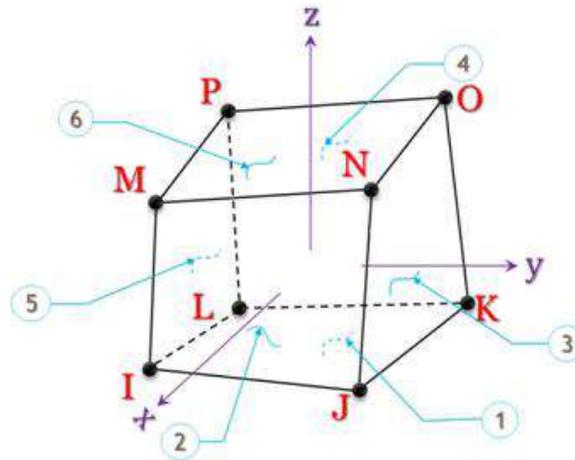


Figure 3. 13. Géométrie des éléments SOLID185 [80].

Pour les modèles en éléments finis les données d'entrée requises pour les supports des appuis comme suit: le coefficient de poisson de 0.3 et module d'élasticité(E) 200 GPa.

3.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir un aperçu sur le logiciel ANSYS. On explique les procédures générales de logiciel et les principaux produits. Et toutes les étapes nécessaires pour créer les modèles. Et aussi, la méthode des éléments finis a prouvé sa fiabilité pour le calcul des structures. L'analyse par la méthode des éléments finis à l'aide du programme ANSYS a également été utilisée pour déterminer le comportement global de la des poutres béton armée renforcé avec PRF.

CHAPITRE 04

RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente la modélisation des poutres en béton armé renforcées à l'extérieur par les matériaux composite (PRF). Plusieurs modélisations ont été proposées et comparées successivement aux résultats expérimentaux des : Akram et al. (2014)[82], El-sayed (2014) [83], Sherif (2013)[84] et aussi Keskin et al. (2017) [85].

Les poutres en béton renforcées par PRF, ont été modélisées à l'aide du programme ANSYS12. Plusieurs types d'éléments finis ont été utilisés. L'élément SOILD65, pour modéliser le béton. L'élément LINK 180, pour modéliser le renfort en acier. L'élément SHELL181, pour modéliser les polymères renforcés de fibres (PRF) et l'élément SOLID185, pour la modélisation de support des plaques d'acier.

4.2. Elaboration et validation des modèles

4.2.1. Premier modèle

4.2. 1.1. Géométrie et caractéristiques des matériaux utilisés

Pour le premier modèle, des poutres en béton armé renforcées avec différents composites (PRFC et PRFV) soumises à la flexion trois points ont été modélisées en utilisant les paramètres et données de l'expérimentation menée par Akram et al. (2014) [82]. Cinq poutres de différentes configurations ont été testées. Les poutres mesuraient 1350 mm de long, 75mm de large et 150 mm de hauteur. Elles ont été divisées en fonction de la quantité du PRF et du module d'élasticité des différents composites de fibres (PRFC et PRFV). Le tableau 4.1 et la figure 4.1 montrent les détails de ces poutres et les tableaux 4.2, 4.3 montrent les caractéristiques des matériaux (bétons, acier et PRF).

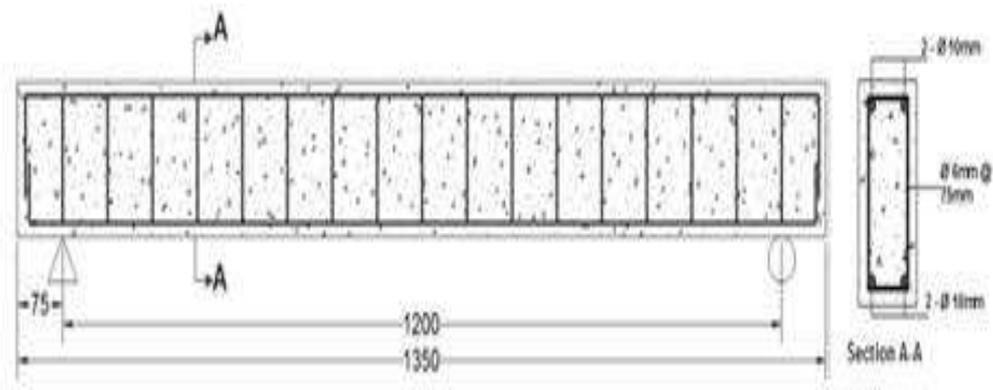


Figure 4.1. Armatures et dimensions des poutres (en mm) adoptées par Akram et al [82].

Tableau 4.1. Détails du programme expérimental selon Akram et al [82].

Série	Poutres
Renforcement de la poutre à l'aide du (PRFC). Configuration 1	
Renforcement de la poutre à l'aide du (PRFC). Configuration 2	
Renforcement de la poutre à l'aide du (PRFC). Configuration 3	
Renforcement de la poutre à l'aide du (PRFV). Configuration 4	

Tableau 4.2. Caractéristiques des bétons et acier selon Akram et al[82].

Propriété des matériaux		Valeurs
Béton	Résistance à la compression du béton à 28 jours	20 MPa
	coefficient de Poisson	0.2
Acier	Module d'élasticité	200 GPa
	coefficient de Poisson	0.2
	Rendement limite	278MPa

Tableau 4.3. Propriétés des matériaux de PRF selon Akram et al[82].

Matériau	PRFC	PRFV
Épaisseur (mm)	0.12 mm	3 mm
Module d'élasticité	231 GPa	35 GPa
Résistance ultime à la traction	4,100MPa	415 MPa

4.2. 1.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

L'analyse non linéaire par éléments finis a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS pour un chargement incrémentiel statique. La liaison entre le béton et l'acier d'armature et le béton et la couche PRF est supposée parfaite.

4.2. 1.3. Modélisation des poutres

Le modèle été construit en utilisant un maillage rectangulaire de dimensions de 25× 25 mm, pour se conformer aux données de l'étude de Akram et al. (2014) [82] la figure 4.2 présente la géométrie et le maillage du modèle par EF.

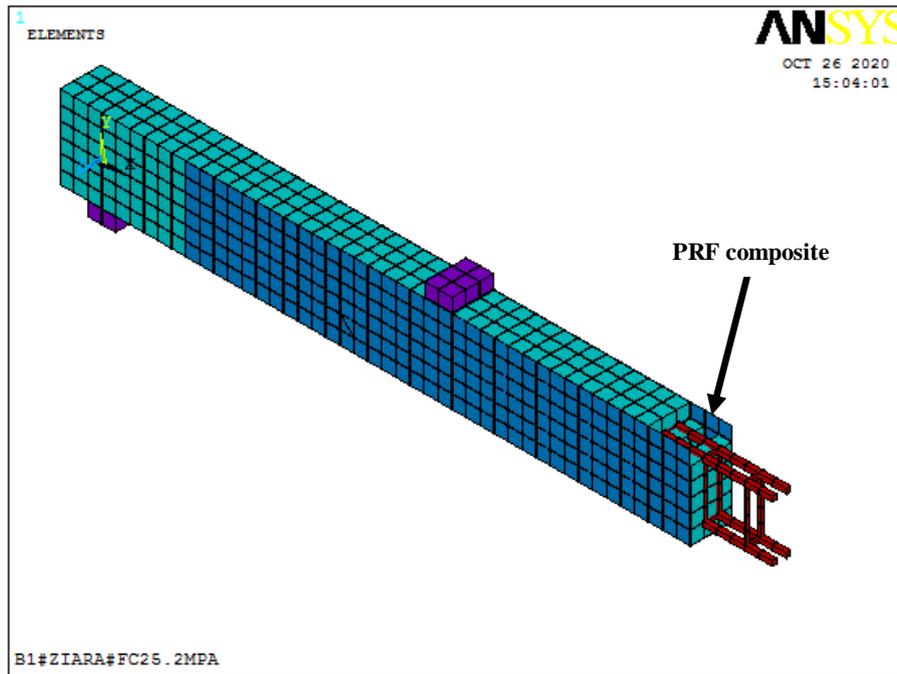
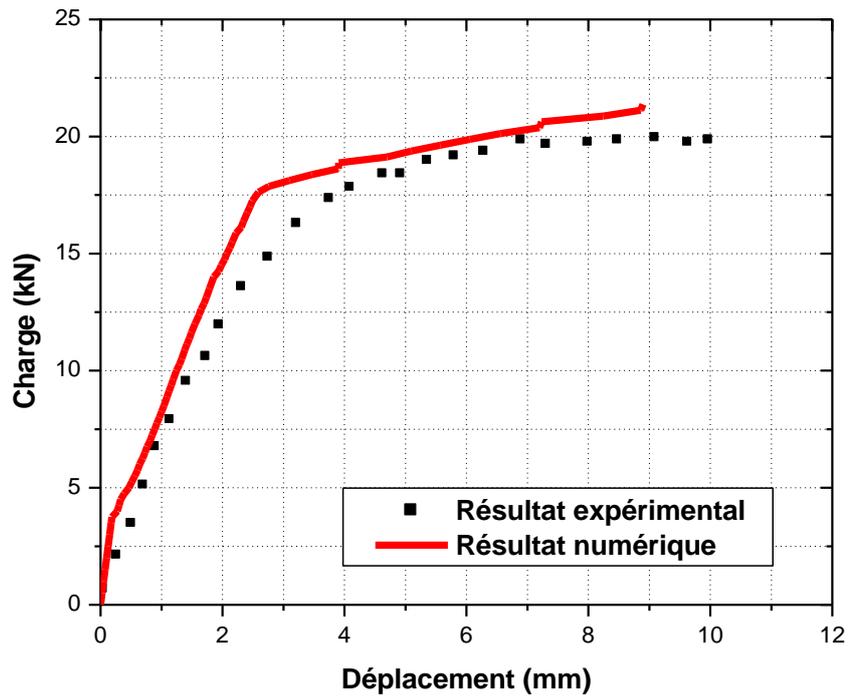


Figure 4.2. Géométrie et maillage du modèle par EF [82].

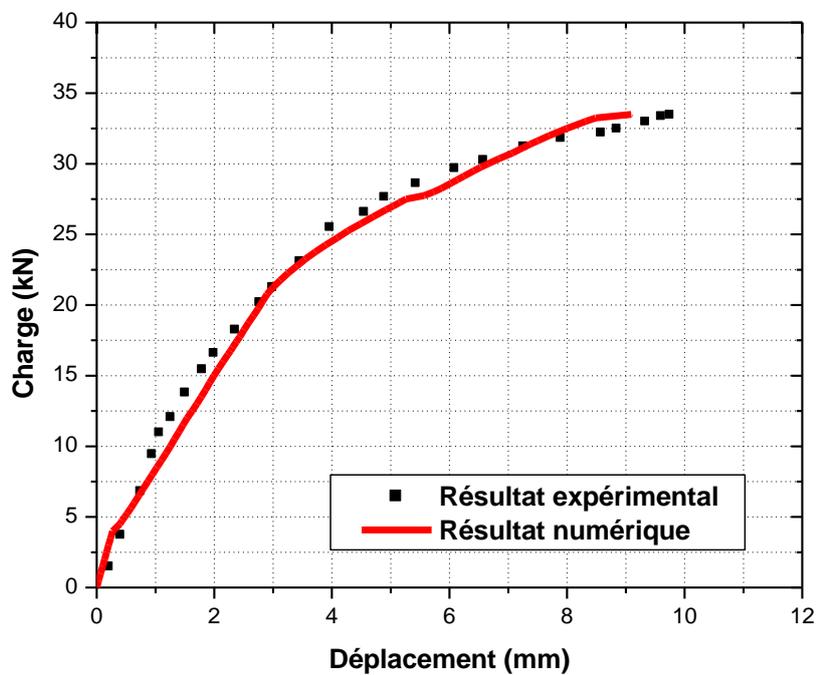
4.2. 1.4. Résultats et discussions

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'Akram et al. [82]. Les figures (4.3a - 4.3e) montrent les courbes charge/déplacement (expérimentales et numériques) pour différents types de poutres. On observe une bonne concordance des résultats obtenus avec les résultats expérimentaux, surtout pour des valeurs relativement moyennes du déplacement imposé. De plus, le tableau 4.4 résume, respectivement, les valeurs des capacités des charges et déplacement pour l'étude expérimentale et les résultats numériques correspondants. Les différences ultimes entre les résultats expérimentaux et numériques sont 7.67 % pour la capacité de charge et 25.38 % pour déplacement.

Les figures (4.3a-4.3e) et le tableau 4.4 montrent clairement un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux à toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine des poutres avec les coefficients de corrélation R^2 variant entre 0.927 et 0.955. Toutes les poutres renforcées ont montré un comportement plus rigide par rapport à la poutre non renforcée (poutre témoin).

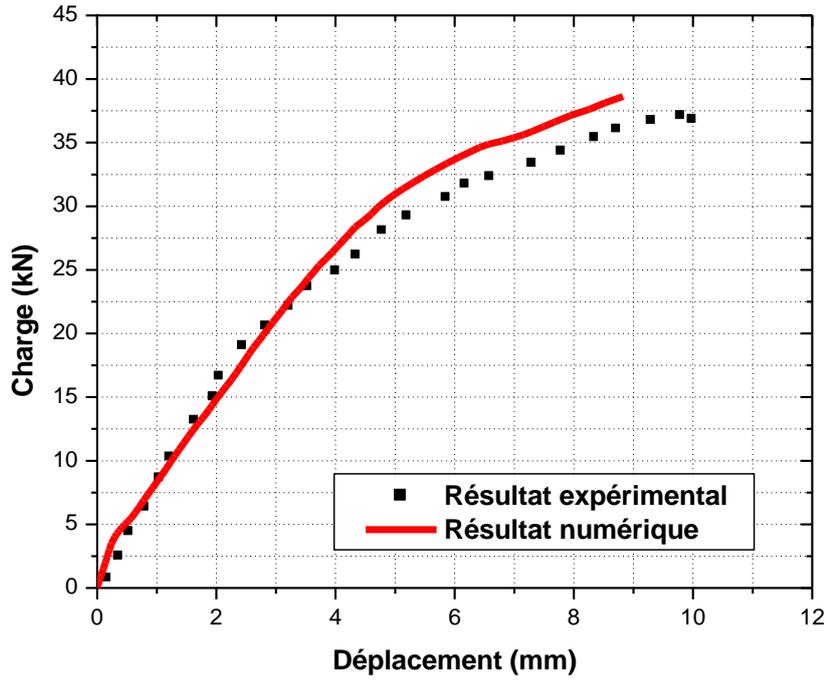


(a) Poutre témoin

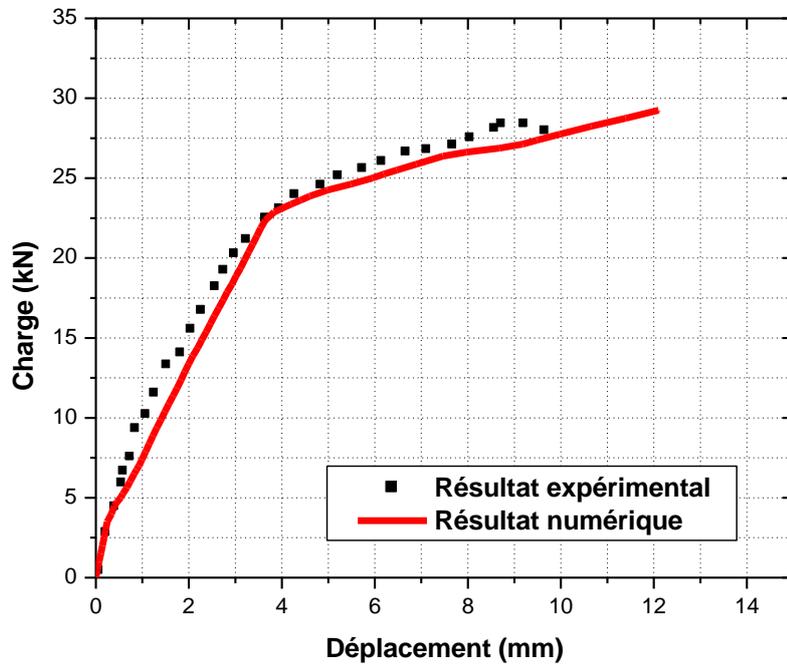


(b) Configuration 1

Figure 4.3(a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

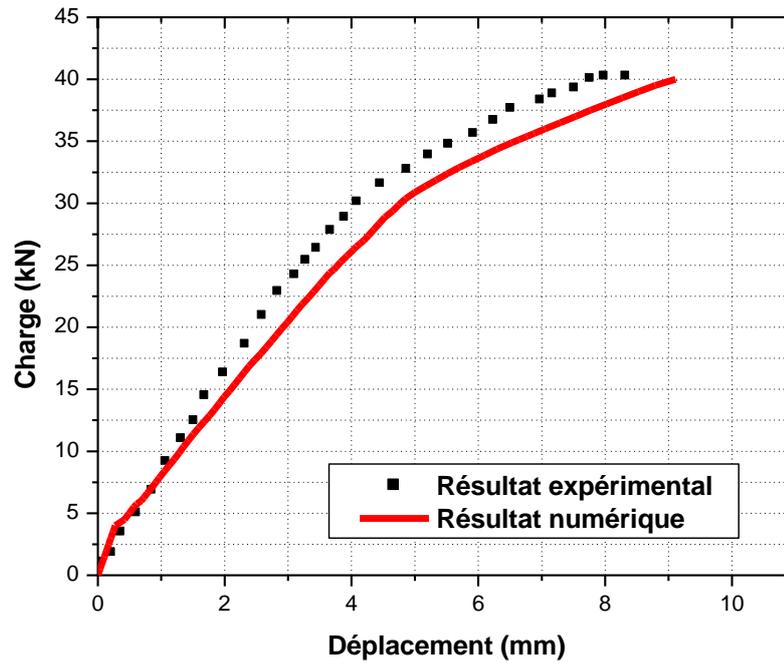


(c) Configuration 2



(d) Configuration 3

Figure 4.3(c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c-d).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.



(e) Configuration 4

Figure 4.3(e). Courbes charge-déplacement pour la configuration (e).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

Tableau 4.4. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.

Poutres	Charge ultime (kN)		Différence % (Exp-Num) × 100/Exp	déplacement (mm)		Différence % (Exp-Num) × 100/Exp
	Exp.	Num.		Exp.	Num.	
Témoin	19.84	21.37	7.67	9.97	8.89	10.83
Configuration 1	33.43	33.5	0.20	9.75	9.09	6.76
Configuration 2	36.82	38.62	4.88	9.99	8.82	11.71
Configuration 3	27.95	29.25	4.65	9.65	12.1	25.38
Configuration 4	40.25	40	0.621	8.33	9.11	9.363

4.2. 1.5. Calcul selon le code ACI 318-19

Dans cette section, on utilise le code ACI 318-19[86] pour évaluer la charge ultime de la poutre et la comparer avec la modélisation.

La section des armatures d'acier : $A_s = 157 \text{ mm}^2$

Le moment ultime de la section est défini par: $M_{ns} = 0.85 f'_c ab \left(d - \frac{a}{2} \right) - A_s f_s (d - d')$

Le tableau 4.5 montre la différence entre l'analyse numérique et la charge mesurée par le code ACI 318-19 [86]. Elle est inférieure à 6 %. C'est une bonne approximation entre les deux approches.

Tableau 4.5. Comparaison entre la charge ultime numérique et celle obtenu par le code ACI 318-19.

Poutre	Charge ultime (kN) Numérique	Charge ultime (kN) Selon le code ACI 318-19	Différence (%)
Témoin (control)	21.37	22.71	5.90

Les différentes comparaisons effectuées, valident le modèle proposé d'éléments finis. C'est un modèle fiable, capable simuler l'expérimentation et prédire la capacité de charge et le comportement des poutres testées.

4.2. 1.6. Effet d'épaisseur de PRFC

La poutre renforcée suivant la configuration 1 a été testée avec plusieurs couches de PRFC de différentes épaisseurs : 0.12 mm (épaisseur initiale), puis 0.18 mm et 0.24 mm. La figure 4.4 montre l'effet de différentes épaisseurs de PRFC sur la charge ultime de la poutre. Lorsque l'épaisseur de la couche augmente, la charge ultime augmente également. Cette différence est estimée à environ 53.84% entre la poutre témoin (control). Plus l'épaisseur de la couche augmente, plus la rigidité de la poutre augmente. La poutre ayant 0.24 mm de PRFC a

montré une augmentation de la capacité de charge jusqu'à 43 kN et a, aussi, enregistré la plus grande rigidité.

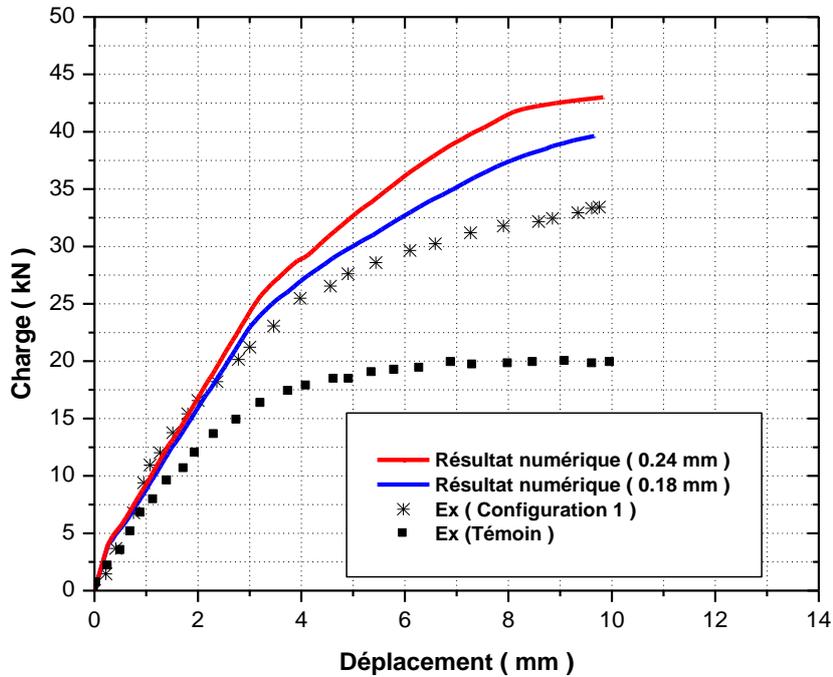


Figure 4.4. Courbes charges - déplacements pour différentes épaisseurs de PRFC.

4.2.2. Deuxième modèle

4.2.2.1. Caractéristiques des matériaux utilisés

Pour le deuxième modèle, des poutres en béton armé renforcées par (PRFC) soumises à la flexion trois points ont été modélisées en utilisant les paramètres et données de l'expérimentation menée par El-sayed (2014) [83]. Sept poutres avec différentes configurations ont été testées jusqu'à la rupture. Les poutres mesuraient 1800 mm de long, 150 mm de large et 300 mm de hauteur. Elles ont été divisées en fonction de la quantité et module d'élasticité des PRFC. Les différentes configurations sont montrées sur la figure 4.5.

Cinq poutres renforcées avec deux barres d'acier de 16 mm de diamètre dans la zone tendue (taux de renforcement (ρ_s) est de 1,0%) , dont quatre sont renforcées avec différentes couches de PRFC collées sur leurs faces tendues. Deux autres poutres avec des barres d'acier 16 mm (taux de renforcement (ρ_s) est de 1,5%), dont une renforcée avec une couche de PRFC collée sur sa face tendue. La figure 4.5 et les tableaux 4.6 et 4.7, donnent les détails de ces poutres.

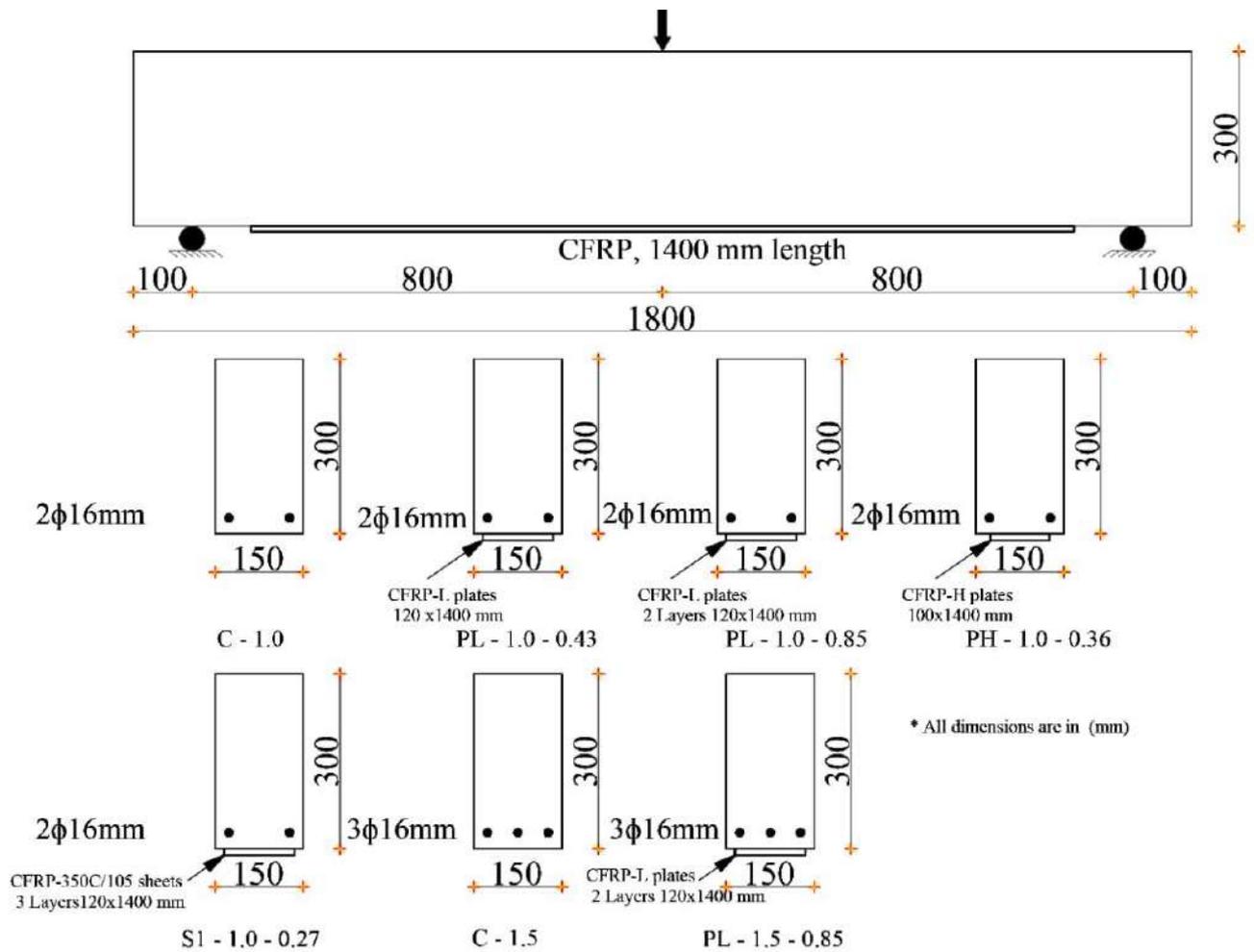


Figure 4.5. Détails du programme expérimental selon El-sayed [83]

Tableau 4.6. Détails des poutres testées selon El-sayed [83].

Poutres	Renforcement externe du PRFC			
	E_f (GPa)	Épaisseur (mm)	Nombre de couches	Largeur de la couche (mm)
Series I	C-1.0	-	-	-
	PL-1.0-0.43	165	1.4	1
	PL-1.0-0.85	165	1.4	2
	PH-1.0-0.36	300	1.4	1
	S-1.0-0.27	240	0.3	3
Series II	C-1.5	-	-	-
	PL-1.5-0.85	165	1.4	2

Tableau 4.7. Caractéristiques des bétons et des aciers selon El-sayed [83].

	Propriété des matériaux	Valeurs
Béton	Pour les poutres de série I - Résistance à la compression du béton à 28 jours	42.7 MPa
	Pour les poutres de série II- Résistance à la compression du béton à 28 jours	33.5 MPa
	Coefficient de Poisson	0.2
Acier	Module d'élasticité	205 GPa
	Coefficient de Poisson	0.3
	Rendement limite	562 MPa

4.2.2.2. Modélisation des poutres

Le modèle été construit en utilisant un maillage rectangulaire. Tous les matériaux ont été modélisés. La figure 4.6 présente la géométrie et maillage du modèle par EF.

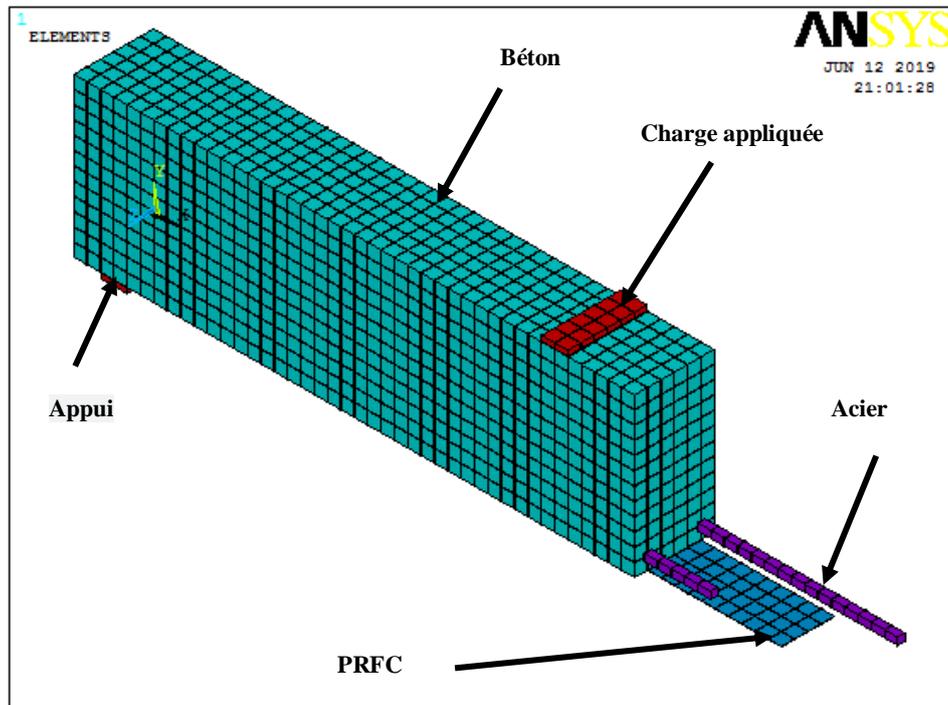
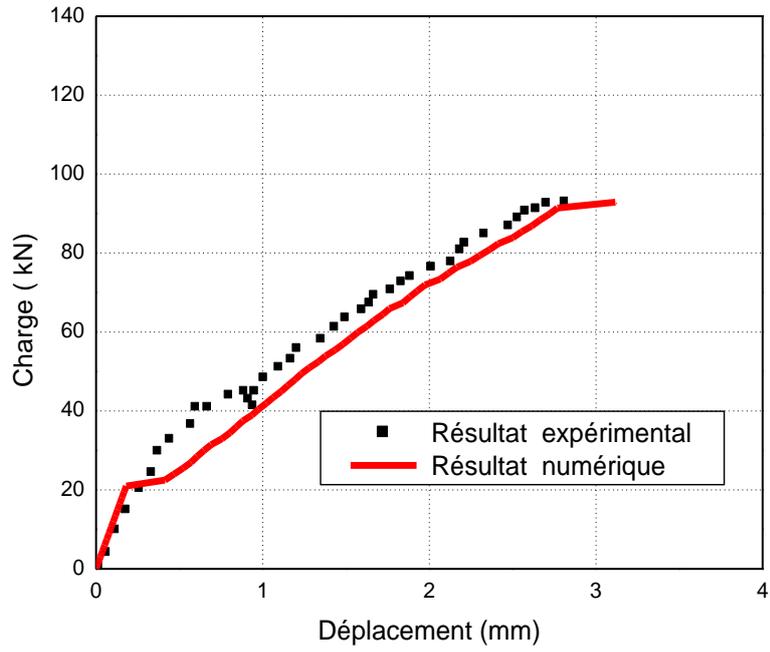


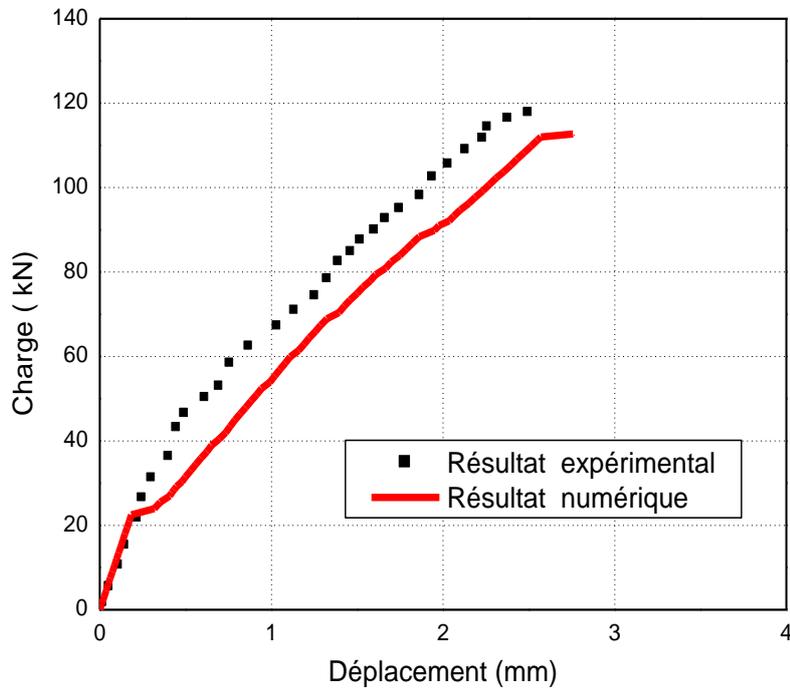
Figure 4. 6. Géométrie et maillage du modèle par EF [83].

4.2.2.3. Résultats et discussion

Les déplacements des poutres sont mesurés à mi- portée. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux présentés par El-sayed (2014) [83] suivant son étude expérimentale. Les figures (4 .7a- 4.7g) montrent les courbes (charges– déplacements) à mi porté des différentes poutres. Il est clair que les analyses par éléments finis sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux avec les coefficients de corrélation R^2 variant entre 0.972et 0.995. Il est remarquable aussi que les poutres renforcées par le PRFC sont plus résistantes.

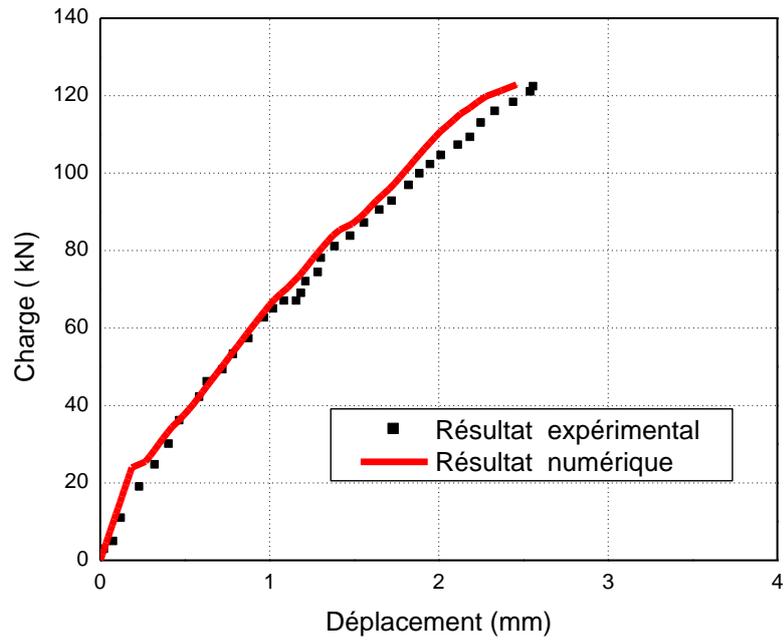


(a) C-1.0

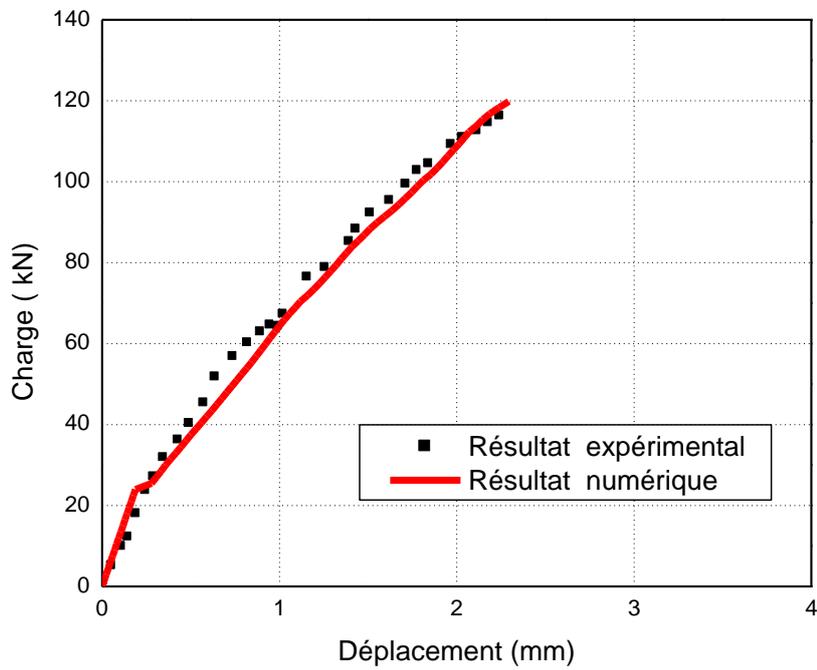


(b) PL-1.0-0.43

Figure 4.7(a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

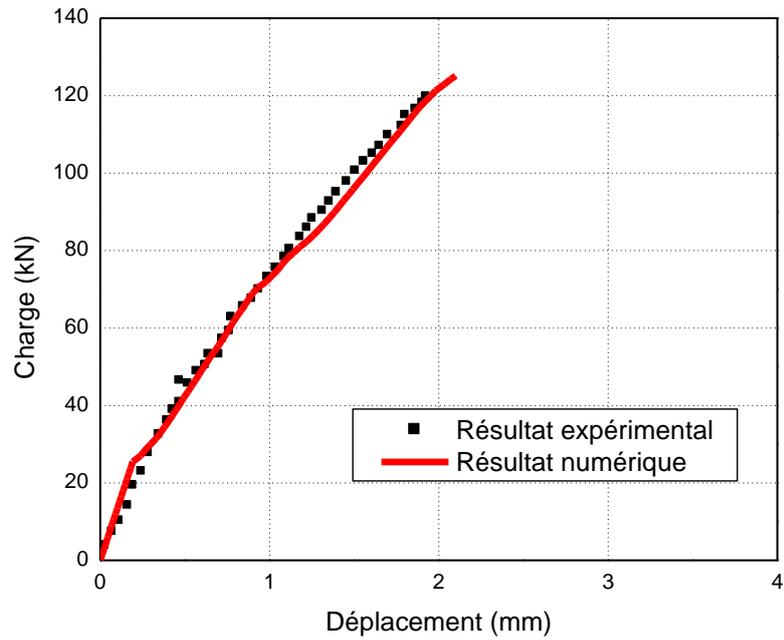


(c) PL-1.0-0.85

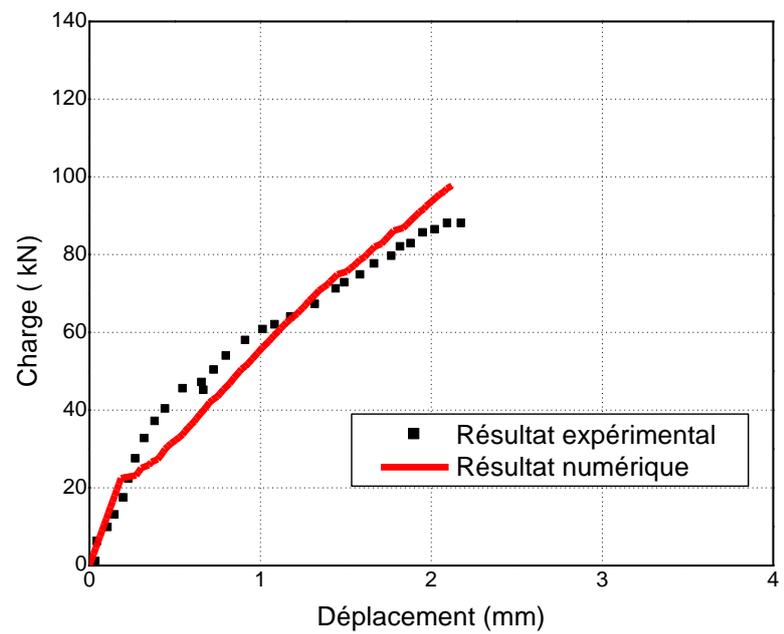


(d) PH-1.0-0.36

Figure 4.7(c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c-d).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

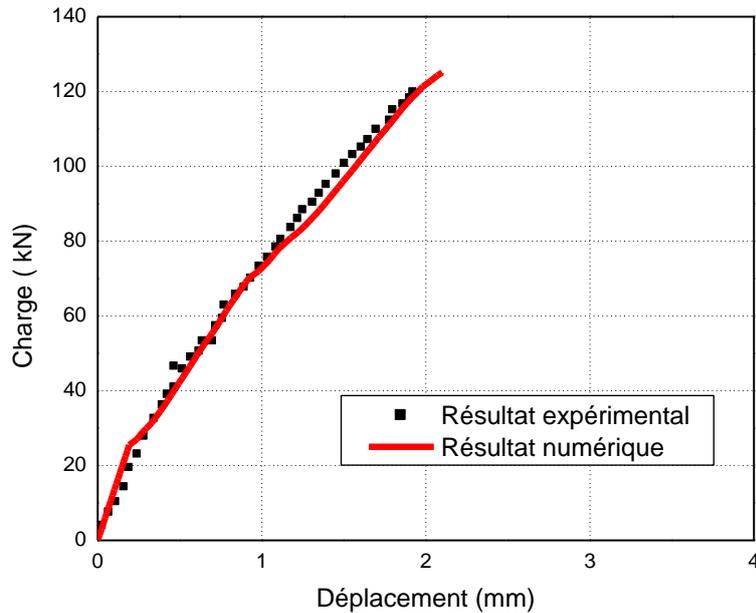


(e) S-1.0-0.27



(f) C-1.5

Figure 4.7(e-f). Courbes charge-déplacement pour les configurations (e-f).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.



(g) PL-1.5-0.85

Figure 4.7(g). Courbes charge-déplacement pour la configuration (g).

Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

Le tableau 4.8 résume les résultats des tests expérimentaux et de l'analyse numérique pour les différentes poutres testées. Les différences entre les valeurs numériques et expérimentales, des déplacements sont inférieures à 10%, de même pour les différences entre les charges ultimes qui sont aussi inférieure à 12 %.

Toutes les poutres renforcées ont montré un comportement plus rigide par rapport à la poutre non renforcée, Les tableaux 4.9 et 4.10 montrent les variations (charges /déplacements) ultimes (expérimentales et numériques).

Tableau 4.8. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.

Poutres	Charge ultime (kN)		Différence % (Exp-Num) × 100/Exp	déplacements (mm)		Différence % (Exp-Num) × 100/Exp
	Exp.	Num.		Exp.	Num.	
C-1.0	92.905	92.876	+ 0.03	2.814	3.116	- 4.48
PL-1.0-0.43	117.760	112.724	+ 4.27	2.497	2.757	+ 2.08
PL-1.0-0.85	122.148	122.836	- 0.56	2.564	2.459	+ 6.57
PH-1.0-0.36	116.216	119.840	- 3.11	2.243	2.2933	- 7.25
S-1.0-0.27	100.226	111.601	-11.34	2.659	2.7000	- 0.241
C-1.5	87.834	97.744	-11.28	2.180	2.121	+ 2.70
PL-1.5-0.85	119.722	125.083	- 4.47	1.925	2.099	- 9.02

Tableau 4.9. Variations des charges ultimes (expérimentales et numériques).

Poutres	Charge experimental (%)	Charge numérique (%)
C-1.0	-	-
PL-1.0-0.43	21.10	17.60
PL-1.0-0.85	31.47	24.39
PH-1.0-0.36	20.05	29.03
C-1.5	-	-
PL-1.5-0.85	26.63	21.85

Tableau 4.10. Variations des déplacements ultimes (expérimentales et numériques).

Poutres	Déplacements expérimentale (%)	déplacements numérique (%)
C-1.0	-	-
PL-1.0-0.43	-12.69	-13.02
PL-1.0-0.85	-9.75	-26.71
PH-1.0-0.36	-25.45	-35.87
C-1.5	-	-
PL-1.5-0.85	-13.24	-1.04

Les figures 4.8 et 4.9 montrent la comparaison entre les déplacements et charges ultimes obtenues par l'expérimentation [83] et celles obtenus numériquement par la présente étude. Ces valeurs ont été mesurées à mi-portée des poutres. La comparaison montre une bonne similitude entre les résultats de même type.

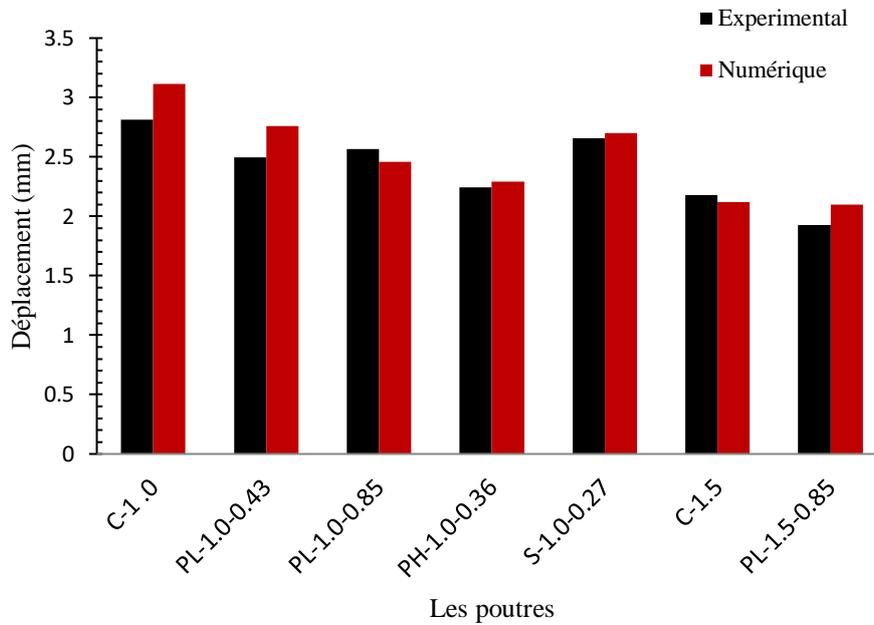


Figure 4.8. Comparaison entre les déplacements (expérimentaux et numériques).

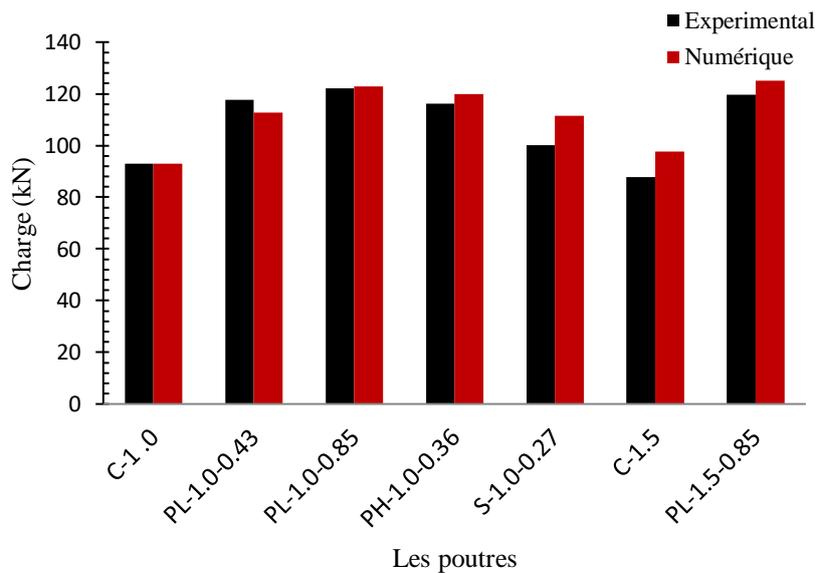


Figure 4.9. Comparaison entre les charges (expérimentale et numérique).

4.2.2.4. Evolution des fissures

Le logiciel ANSYS enregistre les fissures à chaque étape de chargement appliqué. La figure 4.10 montre la charge correspondante à la fissuration initiale.

Il peut être remarqué que la résistance ultime de fissuration initiale pour les poutres renforcées augmente avec la quantité de renforcement composite

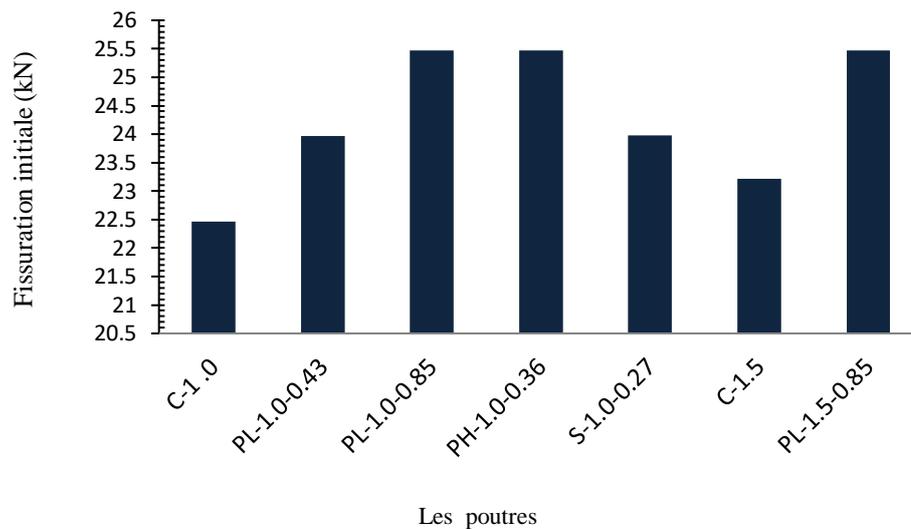


Figure 4. 10. Les charges correspondantes aux fissurations initiales pour différentes poutres.

La figure 4.11 montre les modes d'endommagement enregistrés par ANSYS. (a) fissures de flexion; (b) fissures de compression; (c) fissures diagonales. Les figures (4.12) à (4.18) montrent l'évolution des fissures développées pour chaque poutre à différentes étapes de chargement. Il peut être remarqué que la formation de fissures s'initie, pour toutes les poutres, à proximité de la mi-portée où la contrainte de flexion est la plus élevée. Avec la croissance de la charge, les fissures de flexion supplémentaires s'ouvrent à l'intérieur de la portée et se généralisent à travers toute la poutre. Cependant, en raison de la prédominance des contraintes de cisaillement, les fissures sont devenues progressivement plus inclinées et propagées vers le point de charge menant finalement à une rupture de tension en diagonale.

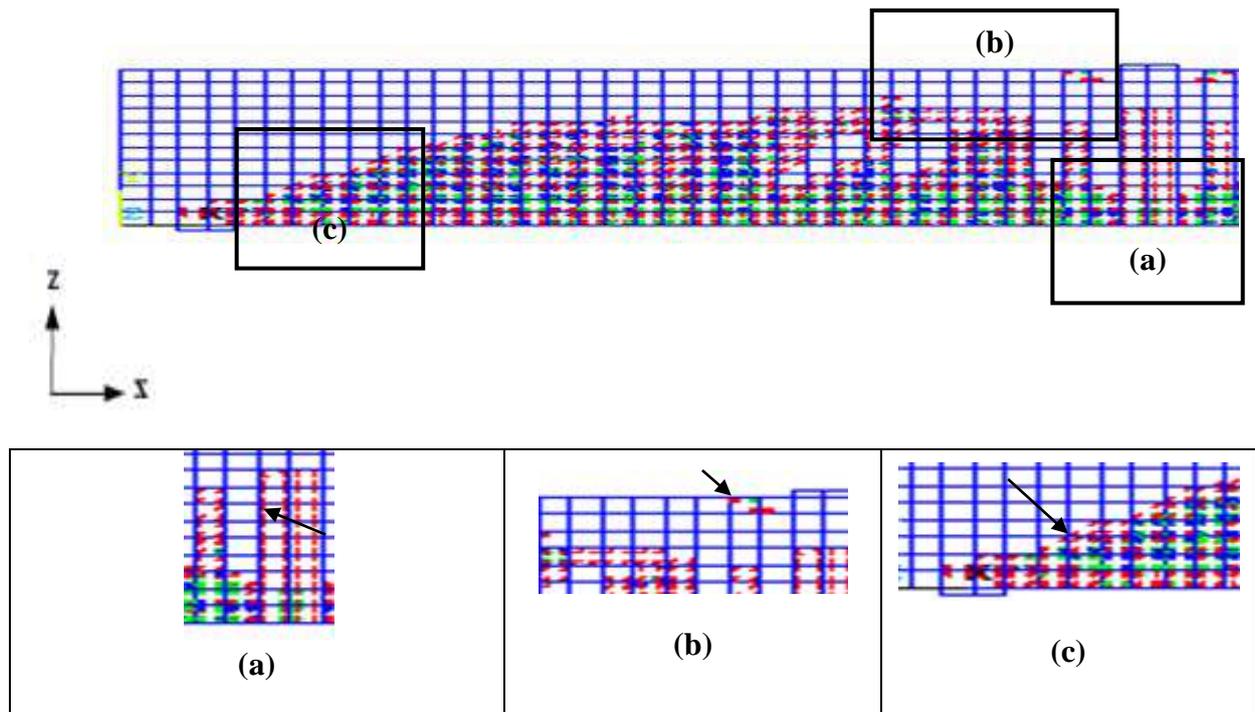


Figure 4. 11. les modes d'endommagement : (a) fissures de flexion; (b) fissures de compression; (c) fissures diagonales.

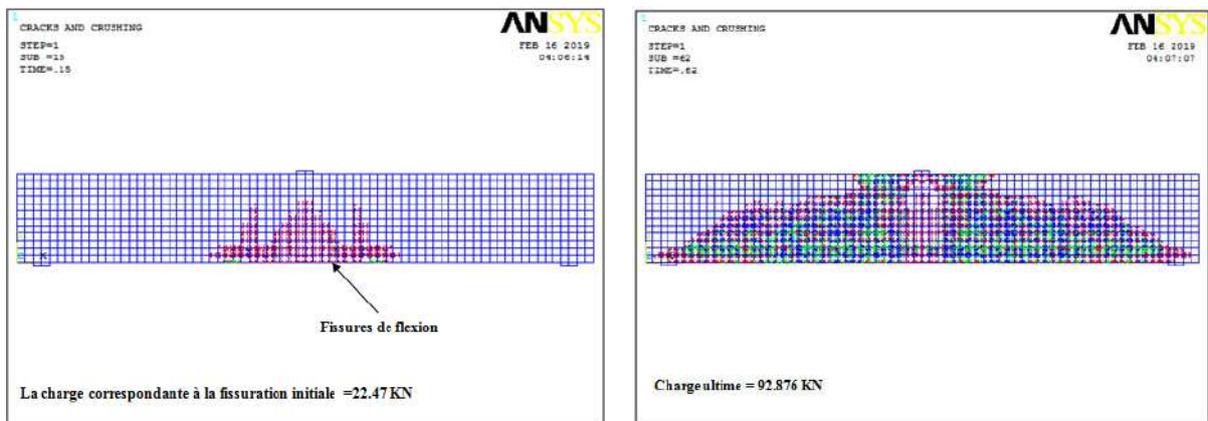


Figure 4. 12. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre C-1.0.

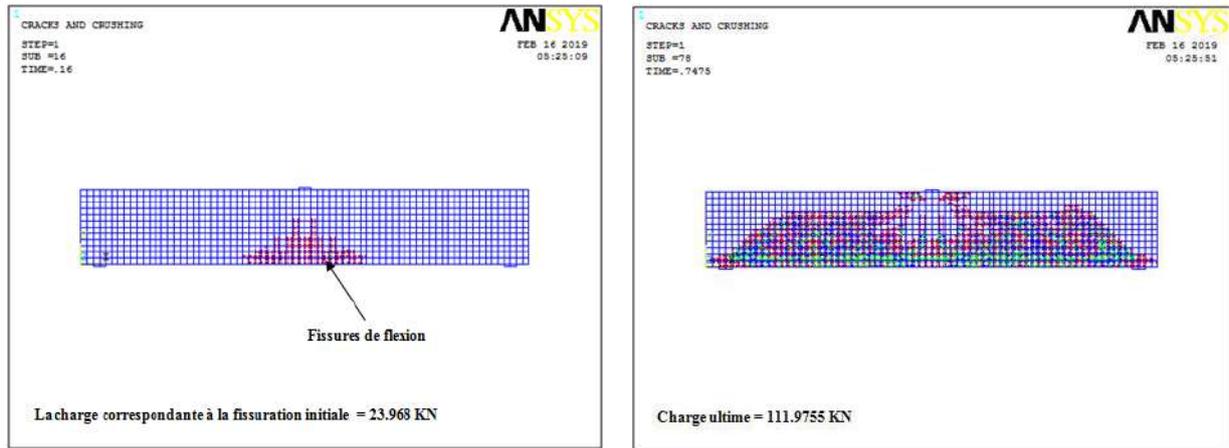


Figure 4. 13. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PL-1.0-0.43.

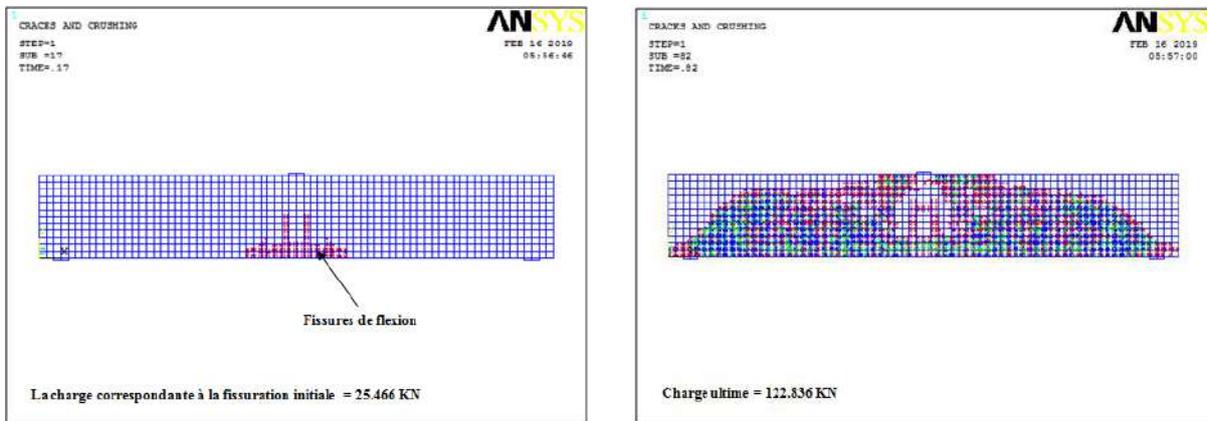


Figure 4. 14. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PL-1.0-0.85.

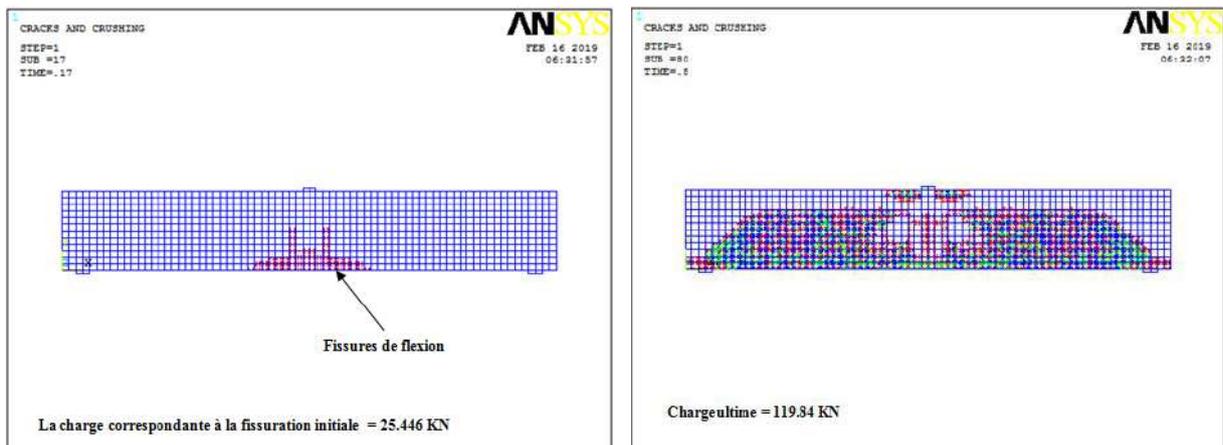


Figure 4. 15. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PH-1.0-0.36.

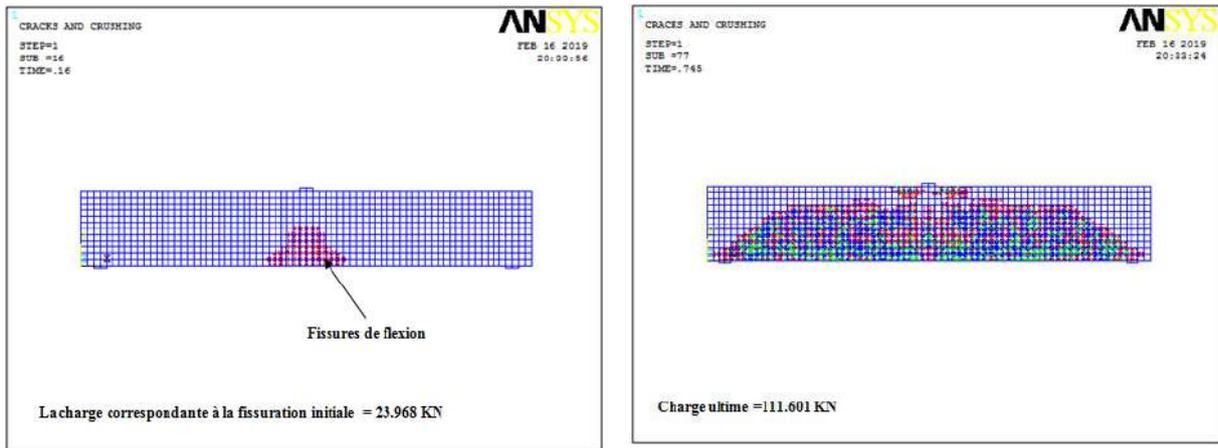


Figure 4. 16. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre S-1.0-0.27.

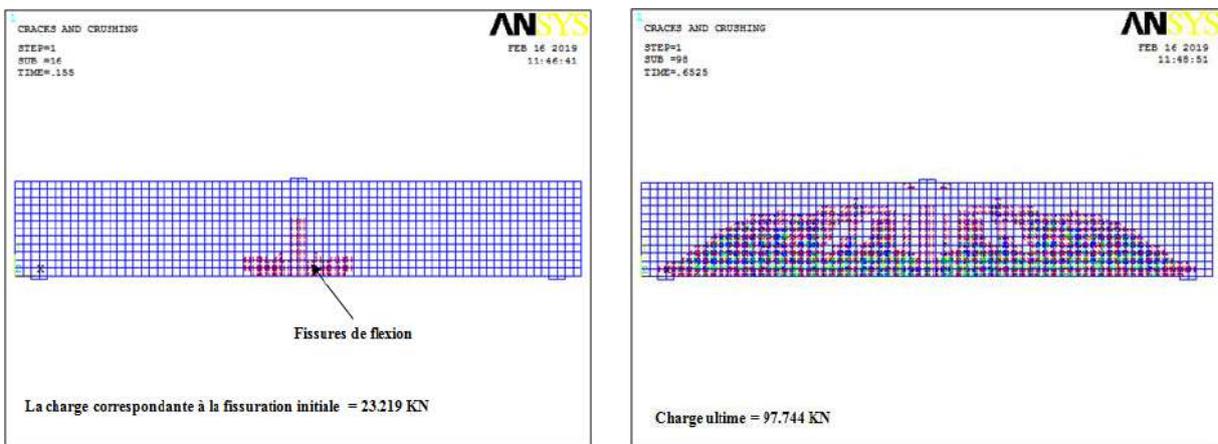


Figure 4. 17. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre C-1.5.

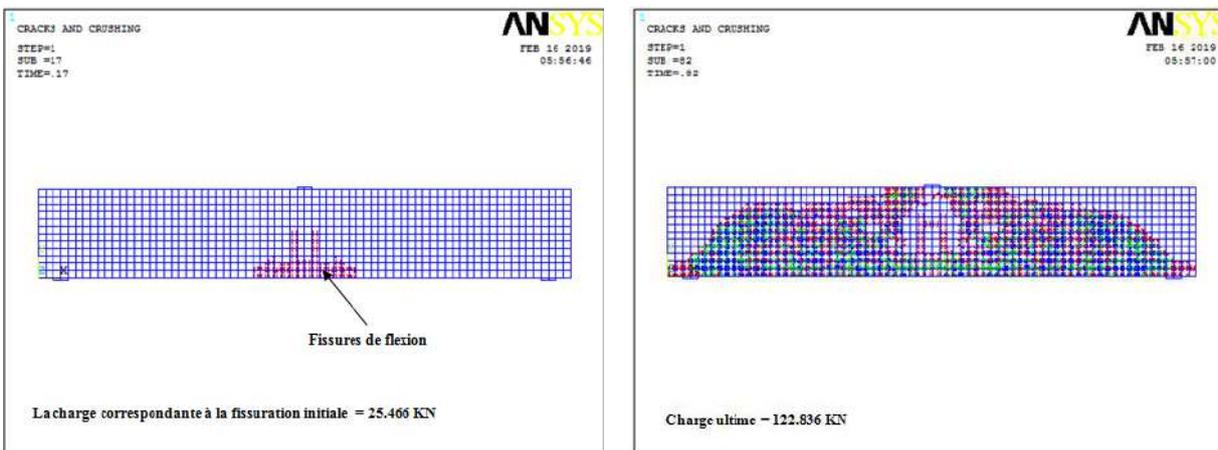


Figure 4. 18. Propagation de fissures à différentes étapes de charge par ANSYS – poutre PL-1.5-0.85.

4.2.2.5. Effet de longueur du PRFC

Afin d'étudier l'efficacité des longueurs PRFC sur le comportement des poutres en béton armé renforcée, on utilise trois schémas de renforcement différents qu'on modélise, et qui sont :

- 1- Configuration (PL-1.0-0.43): une couche de PRFC de 1400 mm de longueur,
- 2- Configuration A: une couche de PRFC de 1125 mm de longueur,
- 3- Configuration B: une couche de PRFC de 1050 mm de longueur.

Tableau 4.11. Différentes configurations du renforcement de la poutre. $E_f = 165 \text{ GPa}$, épaisseur de la couche = 1.4 mm.

Poutres	Longueur du PRFC (mm)
C1 .0	-
PL-1.0-0.43	1400
Configuration A	1125
Configuration B	1050

La figure 4.19 montre le modèle des éléments finis des poutres renforcées extérieurement par le PRFC.

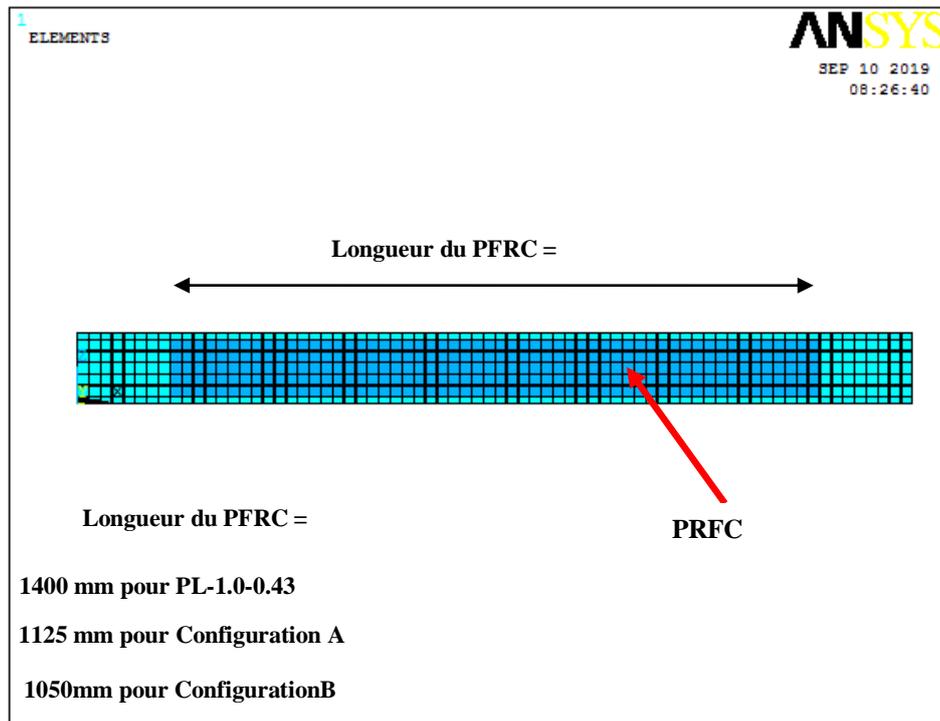


Figure 4.19. Modèle de poutres renforcées extérieurement en PRFC.

La figure 4.20 montre les courbes charges-déplacements pour les trois configurations de renforcement.

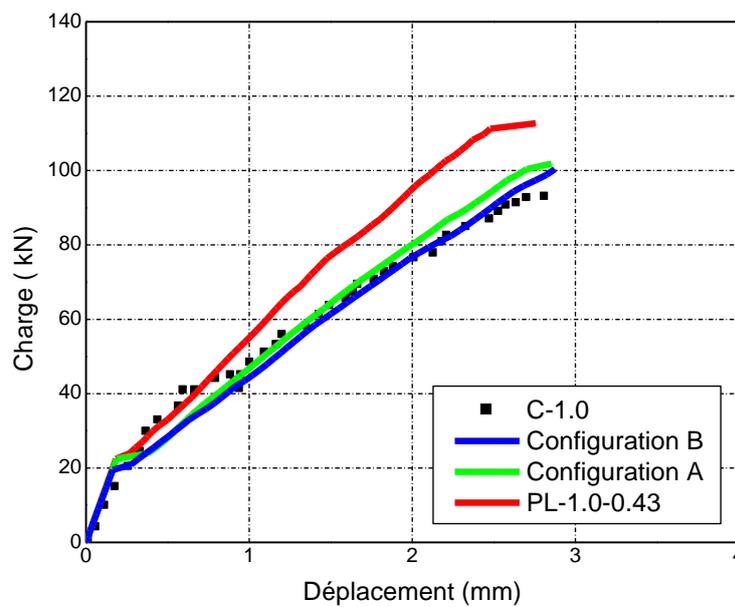


Figure 4. 20. Courbes charges - déplacements pour différentes longueurs des PRFC.

D'autre part, le tableau 4.12 montre la charge ultime pour chaque configuration de renforcement.

Tableau 4.12. Valeurs des charges ultimes (numériques) pour les de différentes configurations.

Poutres	Charge ultime (kN)	Augmentation de la Charge (%)
C-1.0	92.9054	-
Configuration B	98.868	7.063
Configuration A	101.864	9.642
PL-1.0-0.43	112.7245	21.332

À partir de la figure 4.20 (charge - déplacement), on observe que la charge ultime (capacité de charge ultime) de la poutre appelée (PL-1.0-0.43) est égale à 112.7245 kN. Elle est supérieure de 21.33 % par rapport à la charge ultime de la poutre témoin (C-1.0). De même pour les configurations A et B où la charge ultime est augmentée de, respectivement, de 9.64% et 7.06 % par rapport à la charge ultime de la poutre témoin (C-1.0).

On peut déduire que la capacité portante de la poutre augmente avec la longueur de la couche de renforcement en PRFC.

La figure 4.21 montre l'évolution des déplacements à mi-portée des poutres testées (C-1.0, PL-1.0-0.43, configuration A et configuration B).

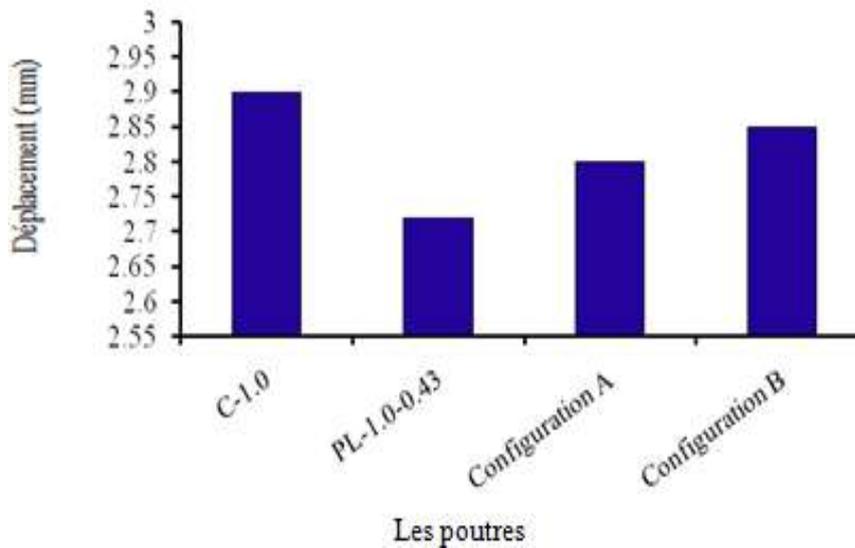


Figure 4. 21. Développement des déplacements mi-portés des poutres.

La diminution des déplacements de la poutre appelée (PL-1.0-0.43), configuration A et configuration B se révèle être de 6%, 3% et 2%, respectivement par rapport à celle de la poutre témoin (C-1.0). En fait, dans les formulations d'analyse EF non linéaires, la matrice de rigidité des éléments est proportionnelle à la matrice des propriétés du matériau. La matrice des propriétés des matériaux est composée de la contribution des propriétés des matériaux du béton, de l'acier, de l'adhésif époxy et du PRFC. Par conséquent, l'augmentation de la longueur du PRFC améliore ces propriétés matérielles ; par conséquent, la matrice de rigidité des éléments d'une poutre BA réaménagée de l'extérieur est la plus robuste avec la plus grande longueur de couche de PRFC, ce qui limite la croissance des fissures, améliorant ainsi la résistance de la poutre BA et réduisant le déplacement à mi-portée. D'autre part, l'augmentation de la longueur de la couche de CFRP sert à rigidifier les poutres BA, ce qui réduit la contrainte de cisaillement interfaciale et limite la propagation des fissures, augmentant ainsi la capacité de charge et diminuant le déplacement à mi-portée. En général, les résultats numériques de l'analyse EF non linéaire sont en bon accord avec les résultats expérimentaux enregistrés dans le programme expérimental Obaidat (2011)[87].

4.2.2.6. Calcul selon le code ACI 440.2R-08

Dans cette section, on utilise le code ACI 440.2R (2008) [48] pour évaluer la charge ultime de la poutre renforcée extérieurement en PRFC et la comparer avec celle donnée par la modélisation. Le tableau 4.13 présente les propriétés mécaniques du béton, des aciers d'armatures et des matériaux PRFC.

Tableau 4. 13. Propriétés mécaniques des matériaux.

La résistance caractéristique du béton en compression f'_c	42.7 MPa
Module d'élasticité de l'acier (E_s)	$2.05 \cdot 10^5$ MPa
La limite d'élasticité de l'acier des armatures transversales f_y	562 MPa
La déformation maximale du béton ϵ_{cu}	0.003
Module d'élasticité de PRFC E_f	165000 MPa
La contrainte ultime du composite f_{fu}^*	2800 MPa
ϵ_{fu}^*	0.017
L'épaisseur du composite PRFC t_f	1.4 mm

L'algorithme pas à pas est utilisé pour calculer les charges ultimes des poutres en béton armé renforcées par le PRFC à l'aide du code ACI 440.2R (2008) [48] pour la poutre appelée (PL-1.0-0.43) la valeur de la charge ultime calculée par ce code est égale à 125.866 kN (détail de calcul, voir Annexe 1). Le tableau 4.14 montre la comparaison des charges ultimes numérique avec celles calculées selon le code ACI 440.2R-08. On observe que la charge ultime calculée selon le code ACI 440.2R-08 augmente avec l'augmentation du taux d'armatures et les nombres des couches de PRFC. Les différences entre les charges ultimes numérique et charges ultimes calculées selon le code ACI 440.2R-08, sont inférieures à 17%. En général un bon accord entre les deux approches.

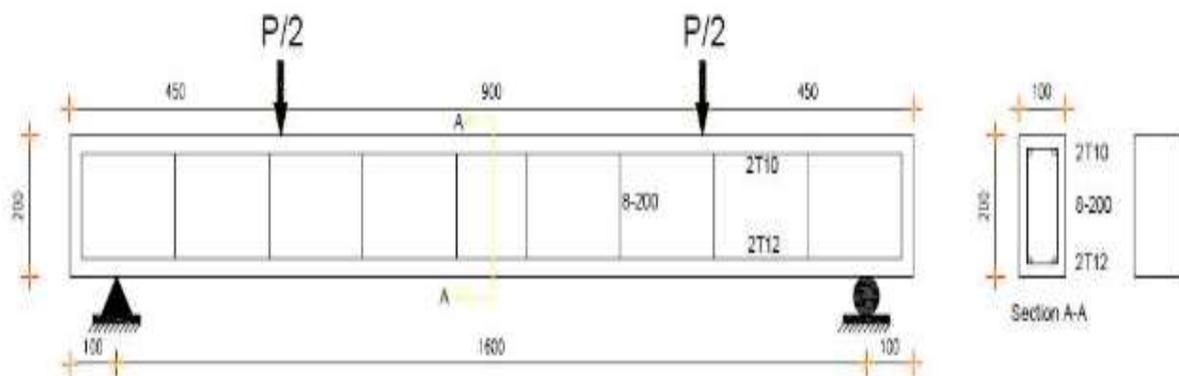
Tableau 4.14. Comparaison entre la charge ultime numérique et celle obtenu par le code ACI 440.2R-08 pour différentes poutres.

Poutres	Charge ultime (kN) Numérique	Charge ultime (kN) selon le code ACI 440.2R-08	Différence (%)
PL-1.0-0.43	112.7245	125.866	10.440
PL-1.0-0.85	122.836	126.551	2.935
PH-1.0-0.36	119.84	126.302	5.116
S-1.0-0.27	111.601	112.334	0.652
PL-1.5-0.85	125.083	149.168	16.146

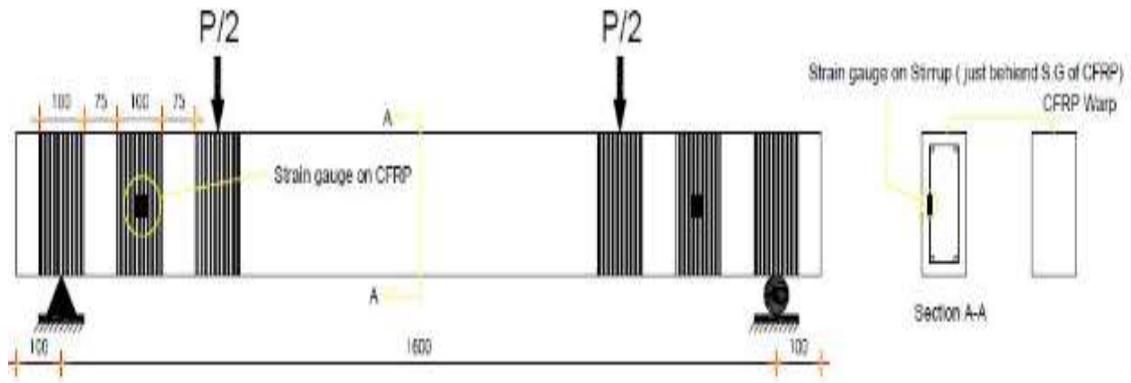
4.2.3. Troisième modèle

4.2.3.1. Caractéristiques des matériaux utilisés

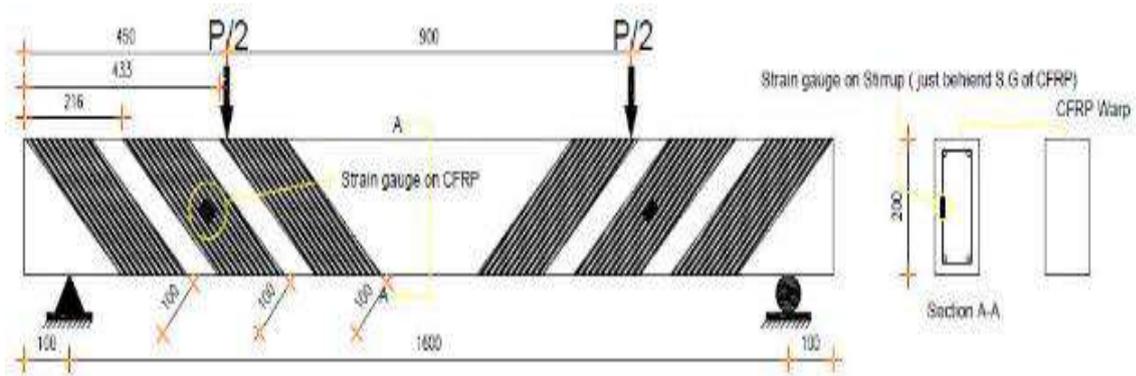
Pour le troisième modèle, des poutres en béton armé renforcées vis-à-vis du cisaillement avec différents configuration en (PRFC) ont été modélisées en utilisant les paramètres et données de l'expérimentation menée par Sherif (2013) [84]. Au total six poutres de sections rectangulaires de 100×200 mm et de longueur totale de 1800 mm, avec armatures longitudinales et transversales ont été étudiées. Le tableau 4.15 et la figure 4.22 donnent les détails de ces poutres.



a: Détails de la poutre témoin.



b: Détails des poutres renforcées (B3V1L-21) et (B4V2L-21).



c: Détails des poutres renforcées (B5Incl.1L-21) et (B7Incl.1L-35)

Figure 4.22. Détails du programme expérimental de Sherif [84].

Tableau 4.15. Détails des poutres testées par Sherif [84].

poutres	f_c (MPa)	Acier longitudinal			Détails du PRFC	
		A_s	A_s'	angle PRFC	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)
B1- control -21	21	2T12	2T10	-	-	-
B2- control -35	35	2T12	2T10	-	-	-
B3V ^a 1L ^b -21 ^c	21	2T12	2T10	90°	100	0.13
B4V2L-21	21	2T12	2T10	90°	100	0.26
B5Incl.1L-21	21	2T12	2T10	45°	100	0.13
B7Incl.1L-35	35	2T12	2T10	45°	100	0.13

4.2. 3.2. Modélisation des poutres

Le modèle été construit en utilisant un maillage rectangulaire. Tous les matériaux ont été modélisés. Les figures 4.23 et 4.24 présentent la géométrie et maillage du modèle par EF.

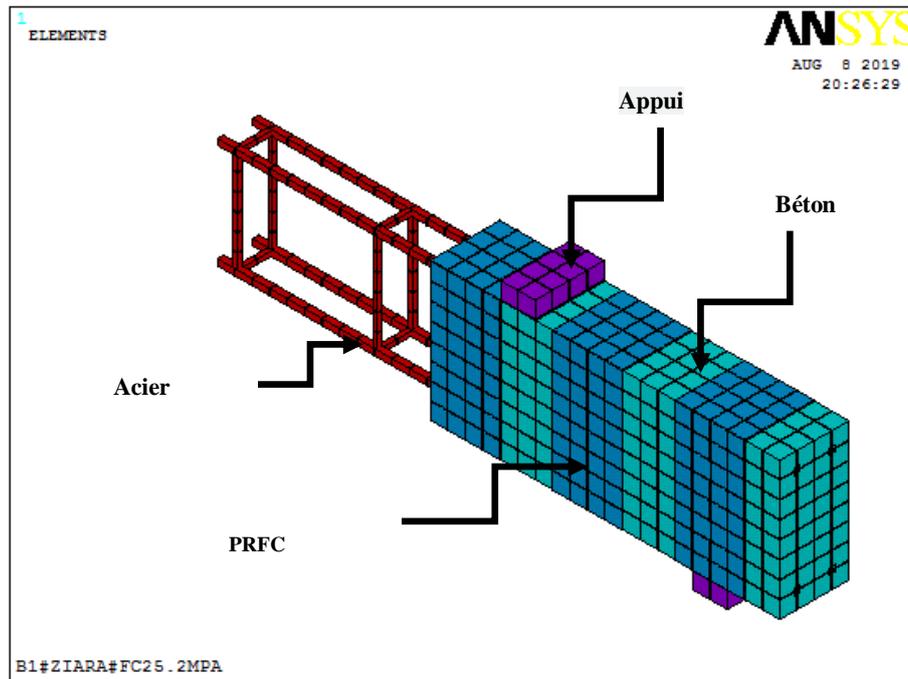


Figure 4.23. Modélisation par éléments finis de la poutre (Bandes de PRFC verticales).

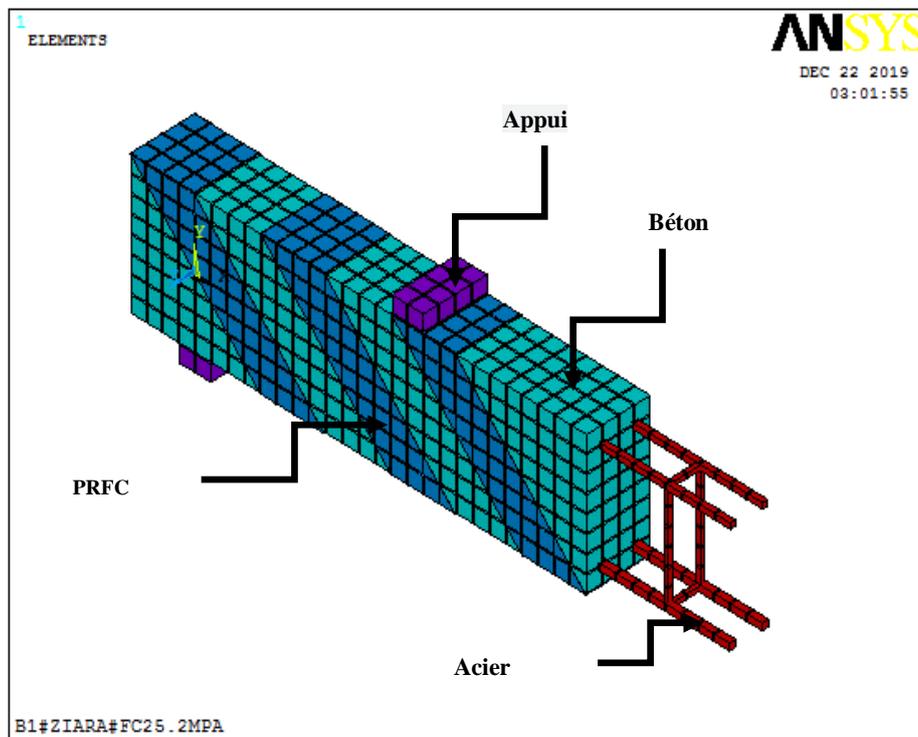


Figure 4.24. Modélisation par éléments finis de la poutre (Bandes de PRFC inclinées).

4.2. 3.3. Résultats et discussions

L'analyse non linéaire par éléments finis a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS pour un chargement incrémentiel statique. Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux rapportés par Sherif (2013)[84]. Les figures 4.25a- 4.27f montrent la comparaison entre les courbes (charge –déplacement) à tous les stades du chargement jusqu'à la ruine. On constate à partir de ce tableau (4-16) que la variation de la charge ultime numérique par rapport à celle de l'expérimentation est de 0.5 % environ, dépendamment du type de la poutre. Tandis que, cette variation est de beaucoup plus variée pour le cas de déplacement. Les figures 4.25 (a- f)et le tableau 4 .16 montrent clairement un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux à toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine des poutres avec les coefficients de corrélation R^2 variant entre 0.536 et 0.993. De plus, il est remarquable que les résultats numériques sont relativement plus importantes que les résultats expérimentaux. Donc, les poutres du modèle EF sont plus rigides que la poutre testé au laboratoire, à cause des considérations de la parfaite adhérence (pas de glissement)entre le béton et l'acier d'armature et la couche PRFC. Ainsi, les modèles d'éléments finis représentés par cette recherche sont capables de prédire la capacité de charge et le comportement des poutres testées.

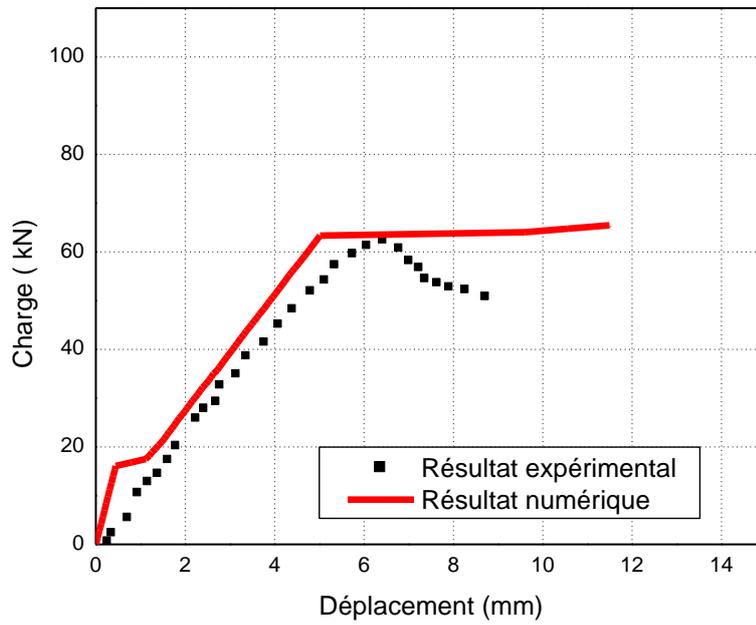
Les figures 4.26 et 4.27 montrent la comparaison entre les déplacements et charges ultimes obtenues par l'expérimentation [84] et celles obtenus numériquement par la présente étude. Ces valeurs ont été mesurées à mi-portée des poutres. La comparaison montre une bonne similitude entre les résultats de même type. L'analyse numérique par ANSYS ont prouvé leur crédibilité avec les résultats expérimentaux rapportés par Sherif (2013) [84].

La figure 4.28 montre les courbes charges - déplacements pour une poutre de type (B1-Contrôle-21)avec les Trois valeurs de la résistance à la compression du béton (f_c) ont été

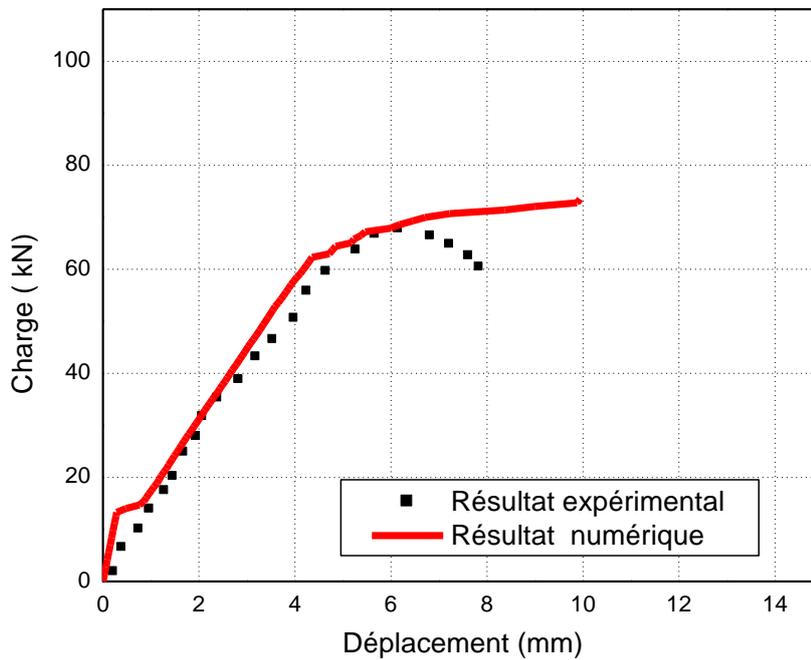
prises en considération, à savoir : 21 MPA, 35 MPA et 49 MPA. On peut voir sur la figure que la résistance du béton augmente la charge ultime du béton. L'augmentation est évaluée à environ 23 %.

Tableau 4.16. Comparaison entre les données expérimentales et les résultats numériques

Les Pouters	Charge ultime (kN)		Différence %	Déplacement (mm)		Différence %
	Exp.	Num.	$(\text{Exp}-\text{Num}) \times 100/\text{Exp}$	Exp.	Num.	$(\text{Exp}-\text{Num}) \times 100/\text{Exp}$
<i>B1-control-21</i>	62.34	63.50	-1.86	6.43	6.44	- 0.15
<i>B2-control-35</i>	67.76	68.14	- 0.56	6.15	6.16	- 0.16
<i>B3V^aIL^b-21^c</i>	98.01	102.9	- 4.98	9.78	10.19	- 4.19
<i>B4V2L-21</i>	97.59	99.05	- 1.49	8.60	9.13	- 6.16
<i>B5Incl. 1L-21</i>	93.11	95.04	- 2.07	11.08	11.07	+ 0.09
<i>B7Incl. 1L-35</i>	106.54	109.22	- 2.51	10.60	10.63	- 0.28

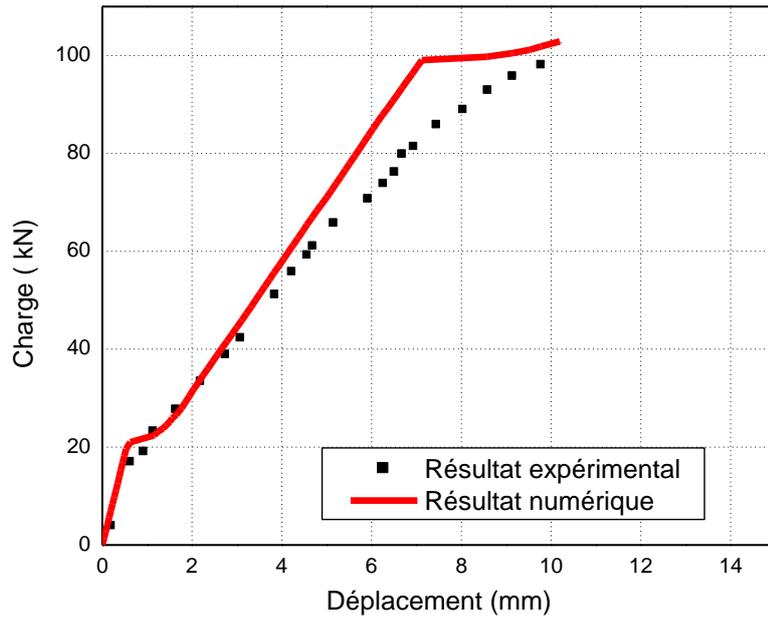


(a) B1-Control-21

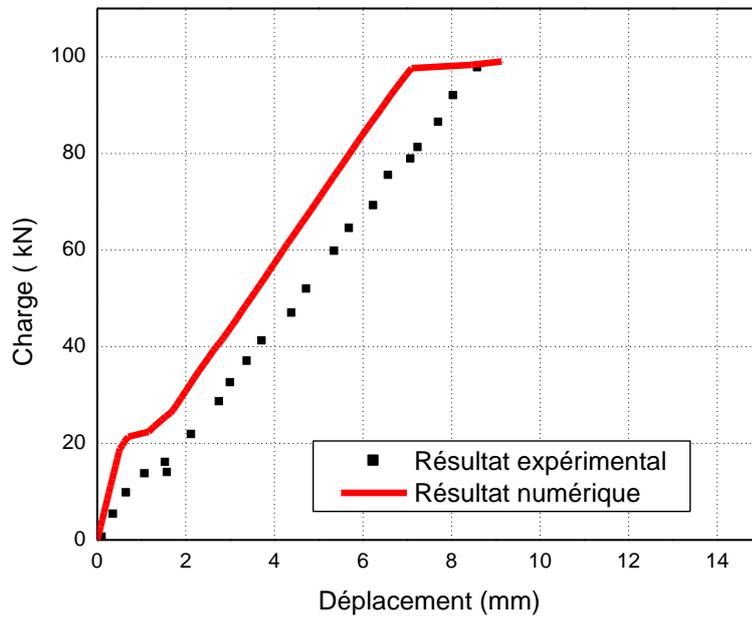


(b) B2-Control-35

Figure 4.25(a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

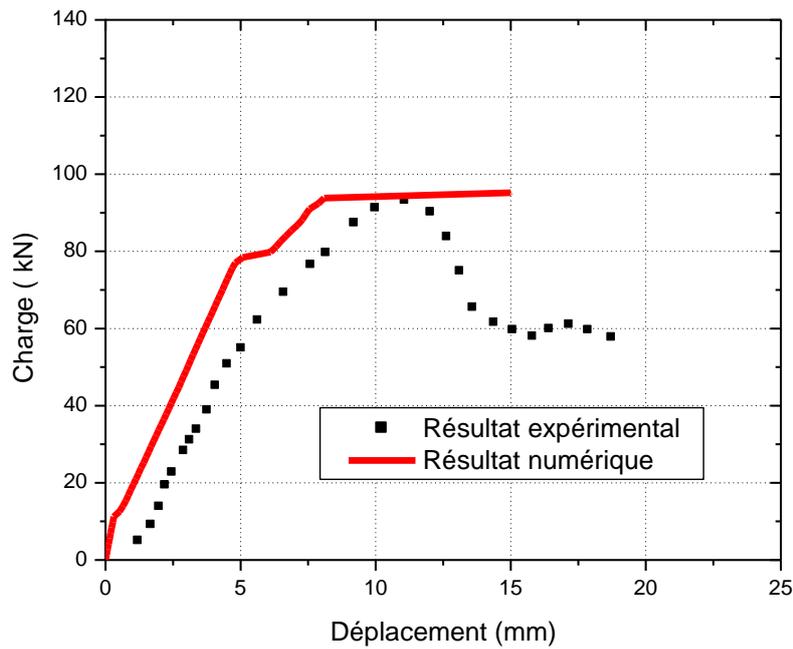


(c) B3V1L-21

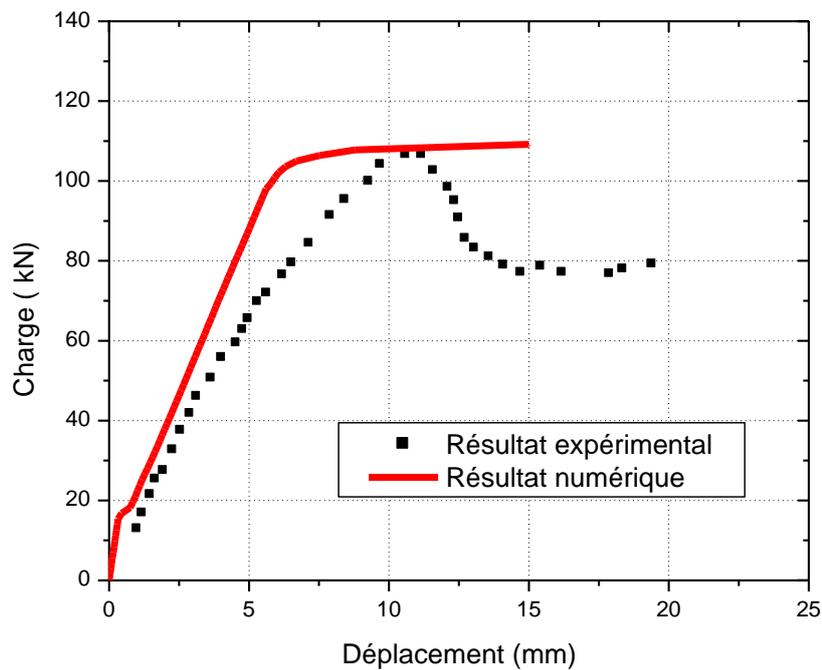


(d) B4V2L-21

Figure 4.25(c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c- d).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.



(e) B5Incl.1L-21



(f) B7Incl.1L-35

Figure 4.25(e-f). Courbes charge-déplacement pour les configurations (e-f).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

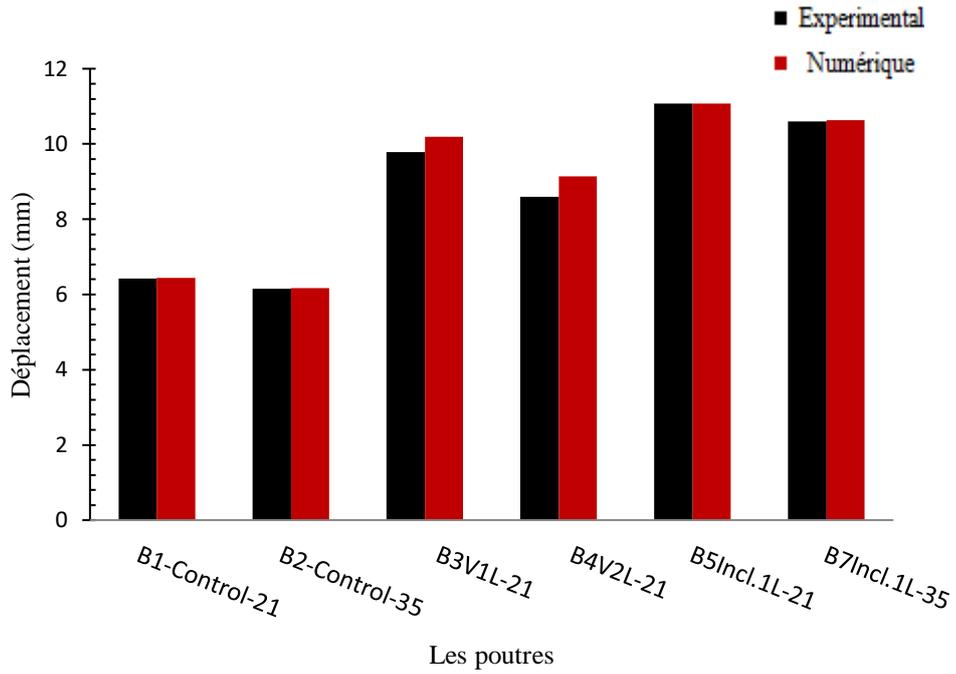


Figure 4.26 . Comparaison entre les déplacements (expérimentales et numériques).

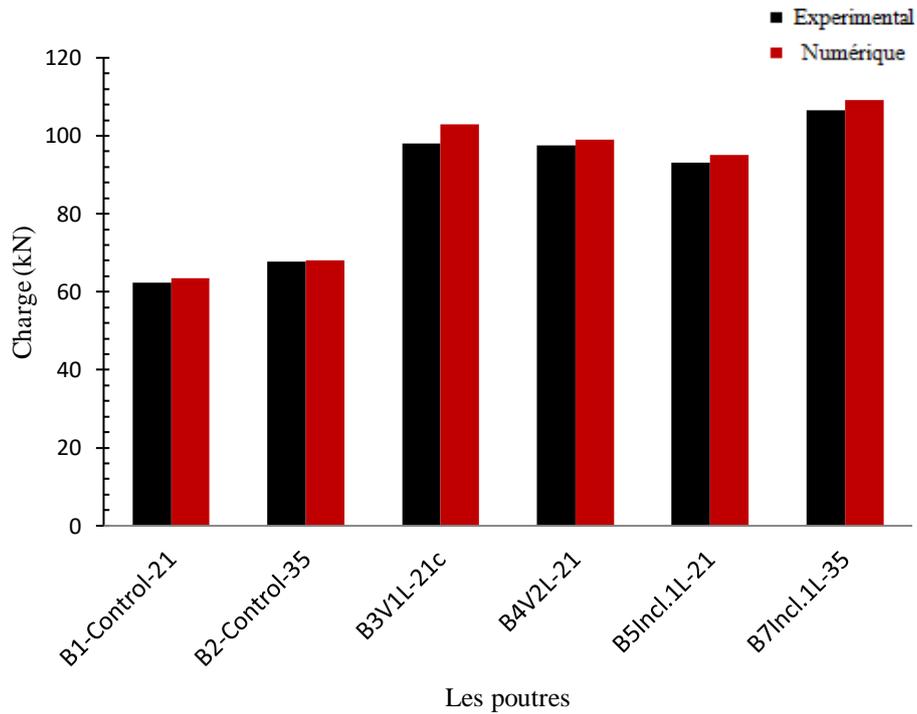


Figure4.27. Comparaison entre les charges (expérimentale et numérique).

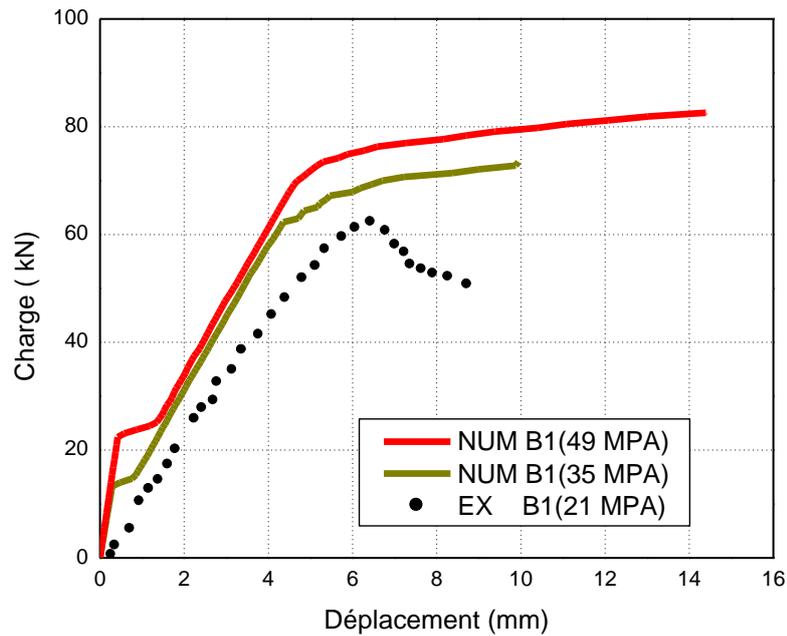


Figure 4.28. Courbes charges - déplacements pour l'effet de résistance à la compression du béton.

4.2. 3.4. Codes de calcul de la résistance au cisaillement des poutres renforcées par le PRFC

Dans cette section, on calculera la charge ultime des poutres en béton armé renforcées en cisaillement par le PRFC, à l'aide des codes ACI 440.2R (2008) [48] et FIB14 (2001) [49], qu'on comparera avec la charge ultime numérique. Le tableau 4.17 montre les propriétés mécaniques des matériaux composant la poutre testée.

Tableau 4.17. Propriétés mécaniques du béton et PRFC (B3Va1Lb-21c).

La résistance caractéristique du béton en compression f'_c	21 MPa
Module d'élasticité du PRFC E_f	200 GPa
Epaisseur du PRF t_f	0.13mm

Les charges ultimes des poutres testées sont calculées à l'aide des codes ACI 440.2R (2008) [48] et FIB14 (2001) [49] sont donnés en annexe 2.

Le tableau 4.18 représente les valeurs des charges ultimes numériques et celles obtenues par les codes ACI 440.2R et FIB14. On observe les charges ultimes calculées selon les codes ACI 440.2R et FIB14 augmente avec l'augmentation des nombres des couches PRFC. On constate à partir de ce tableau que la variation de la charge ultime numérique par rapport à celle obtenues par le code ACI 440.2R est de 4.44% à 24.49% et pour le code FIB14 est de 2.69% à 26.03%. Les valeurs numériques sont, en général, plus petites que celles données par les codes.

Tableau 4.18. Comparaison entre les charges ultimes numériques et ceux calculées selon les 440.2R et FIB14.

Poutres	Charge ultime (kN) numérique	ACI 440.2R	Différence (%)	FIB 14	Différence (%)
B3V ^a 1L ^b -21 ^c	102.9	107.682	+ 4.44	105.75	+ 2.69
B4V2L-21	99.05	125.732	+ 21.22	133.91	+ 26.03
B5Incl.1L-21	95.04	121.058	+ 21.49	125.42	+ 24.22
B7Incl.1L-35	109.22	144.68	+ 24.50	137.93	+ 20.81

4.2.4. Quatrième modèle

4.2.4.1. Caractéristiques des matériaux utilisés

Dans ce même contexte, on modélisera des poutres en béton armé et avec SFRC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*), sans étriers, renforcées en cisaillement par le matériau composite (PRFC). On utilisera les mêmes paramètres du programme expérimental rapportés par Keskin et al. (2017) [85]. Au total quatre types de poutres ont été considérés. Les poutres mesuraient 1400 mm de long, 150 mm de large et 230 mm de hauteur. Quatre poutres renforcées avec deux barres d'acier 16 mm de diamètre comme armature principale de

traction, donnant un taux de renforcement (ρ_s) de 1.34%. La figure 4.29 et le tableau 4.19 donnent les détails de ces poutres.

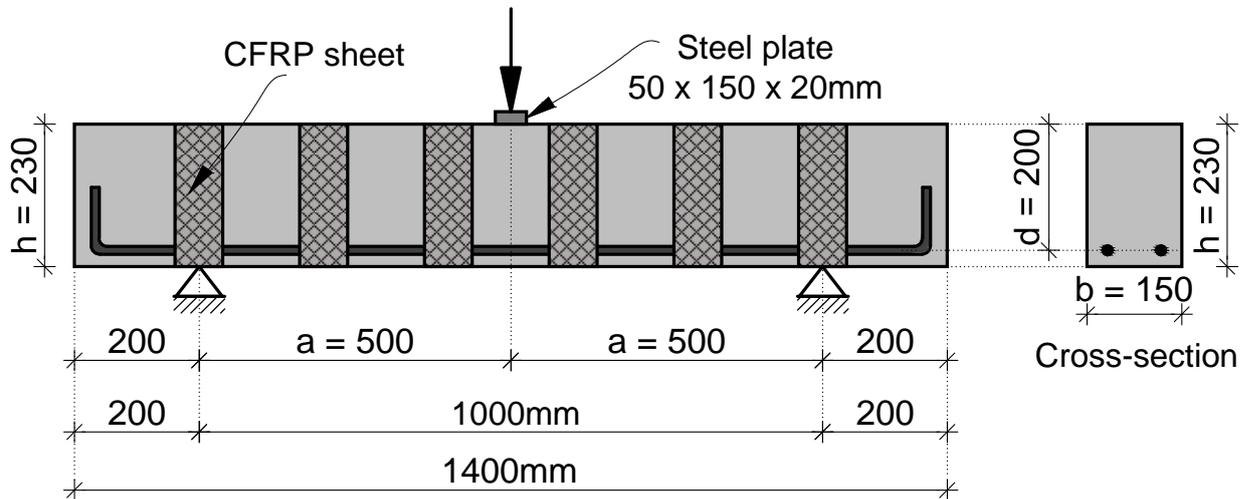


Figure 4.29. Détails du programme expérimental selon Keskin et al. [85].

Table 4.19. Caractéristiques des poutres selon Keskin et al [85].

Poutres	Caractéristiques des matériaux					
	f_c (MPa)	ρ_s (%)	V_f (%)	S_f (mm)	Largeur de la couche du PRFC (mm)	Épaisseur du PRFC (mm)
A2.5R	39	1.34	-	-	-	-
A2.5RC10/10	39	1.34	-	100	100	0.166
A2.5F2.0	21.43	1.34	2	-	-	-
A2.5F2.0C10/10	21.43	1.34	2	100	100	0.166

f_c : résistance à la compression du béton;

ρ_s : taux de renforcement;

V_f : à la fraction volumique de fibres d'acier;

S_f : Espacement entre les plaques PRFC.

4.2.4.2. Modélisation des poutres

La figure 4.30 représente le modèle par éléments finis des poutres testées. Pour le béton renforcé de fibres en acier en utilisant le modèle « SOLID65 ». Les propriétés du matériau linéaire et non linéaire ont été intégrées dans le code éléments finis EF. Modélisation des fibres en acier peut être faite soit par voie:

1. Modèle imprégné (Smeared) : en supposant des propriétés matérielles homogènes du béton de fibre. Dans ce cas, l'effet de la fibre en acier sera imprégné des propriétés du matériau.
2. Modèle discret: les fibres en acier seront modélisées de manière discrète à l'aide des propriétés du matériau sous-jacent pour chacun des éléments du béton de fibre. L'orientation des fibres en acier sera arbitraire pour refléter la situation réelle [79].

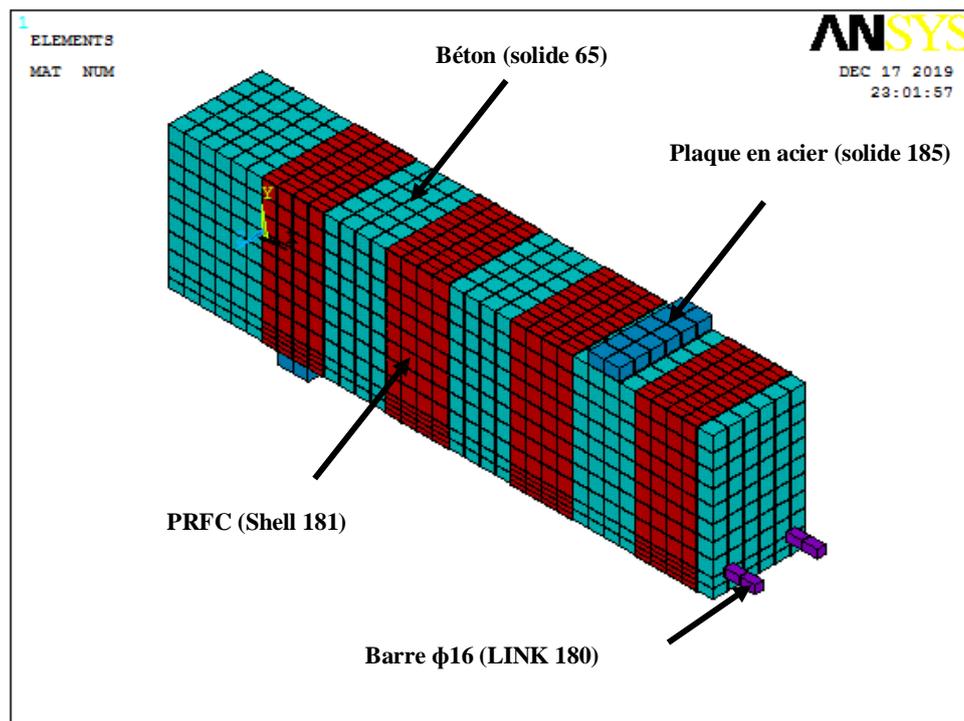


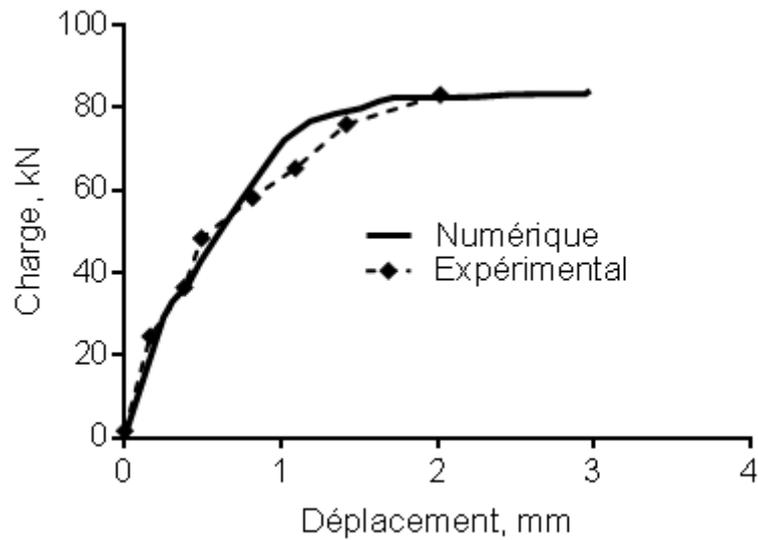
Figure 4.30. Modélisation des poutres.

4.2.4.3. Résultats et discussions

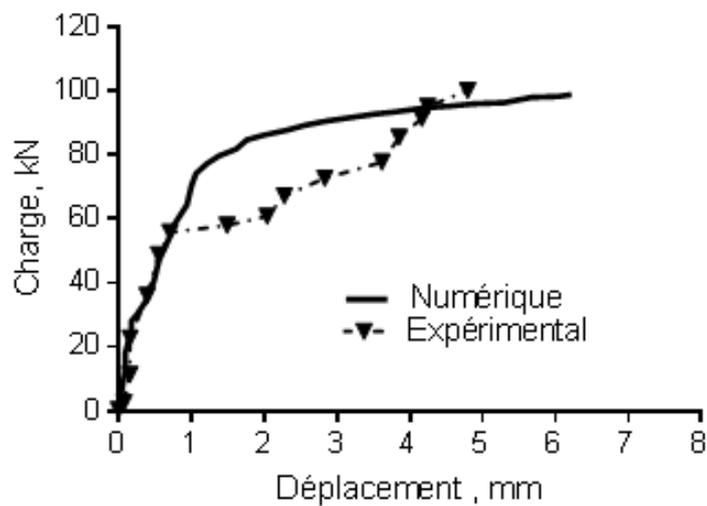
Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux rapportés par Keskin et al. (2017) [85]. Les figures 4. 31 (a-d) montrent une comparaison entre les courbes (charge – déplacement) pour les poutres en béton armé et avec SFRC renforcées à l'extérieur par des fibres de carbone (PRFC) à tous les stades du chargement jusqu'à la ruine. Les courbes montrent une bonne concordance dans l'analyse par éléments finis avec les résultats expérimentaux avec les coefficients de corrélation R^2 variant entre 0.848 et 0.996. De plus, Il est clair que l'ajout des fibres d'acier dans la poutre (A2.5F2.0) augmente sa résistance au cisaillement par rapport à celle de la poutre témoin (A2.5R). En outre, la charge ultime dans les poutres BA renforcées par PRFC (A2.5RC10/10) augmente par rapport la poutre en béton armé et avec SFRC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*), sans étriers, renforcées en cisaillement par matériau composite (PRFC)(A2.5F 2.0C10/10).

Les courbes (charge- déplacement) montrent que toutes les poutres du modèle éléments finis est plus rigide que celles de l'expérimentation, par ce que l'adhérence entre les matériaux (acier-béton-composites) est supposé parfaite (pas de fuite) dans les modèles d'éléments finis, mais cette hypothèse n'est pas vérifiée pour les poutres expérimentales ou un glissement peut se produire et l'action composée entre les matériaux est perdue. Le tableau (4 .20) résume, respectivement, les valeurs des capacités des charges expérimentales et prédites et les déplacements correspondants des poutres testées. On constate à partir de ce tableau que la variation de la charge ultime numérique (prévue par le modèle d'éléments finis) par rapport à celle de l'expérimentation est de 0.43% à 15.47 %, dépendamment du type de la poutre. Tandis que, cette variation est de 0.049% à 9.90 % pour déplacement. Les résultats numériques obtenus montrent globalement une concordance raisonnablement bonne avec les résultats d'essais expérimentaux, et confirment clairement l'effet bénéfique du renforcement sur le comportement des poutres, qui se traduit notamment par l'augmentation des charges

ultime. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques a démontré que les prédictions obtenues avec le logiciel ANSYS étaient réalistes et fiables en ce qui concerne le comportement des poutres en béton armé et avec SFRC, sans étriers, renforcées en cisaillement par matériaux composites de fibre de carbone.

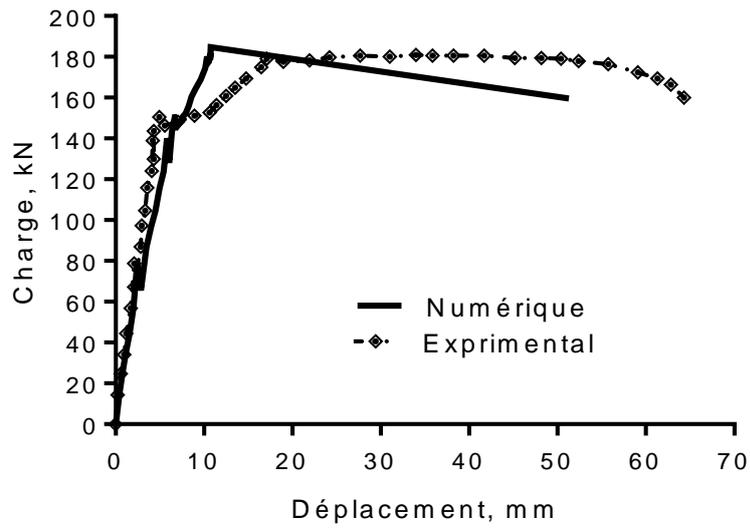


(a) A2.5R.

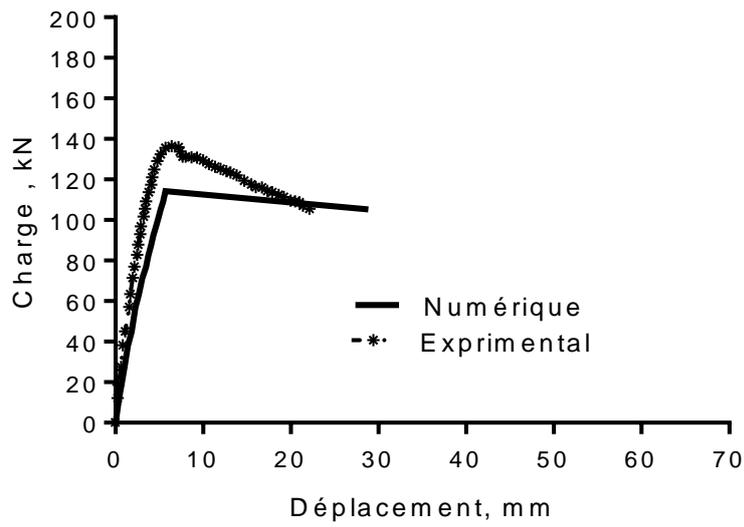


(b) A2.5F2.0.

Figure 4.31(a-b). Courbes charge-déplacement pour les configurations (a-b).
Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.



(c) A2.5RC10/10.



(d) A2.5F 2.0C10/10.

Figure 4.31(c-d). Courbes charge-déplacement pour les configurations (c-d).
 Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques.

Table 4.20. Comparaison entre les résultats (numériques et expérimentaux)

Les pouters	Charge ultime (kN)		Difference (%)	Déplacement (mm)		Difference (%)
	Exp.	Num.	(Exp-Num) /Exp	Exp.	Num.	(Exp-Num) /Exp
A2.5R	82.64	82.28	+ 0.43	2.011	2.010	+ 0.049
A2.5F2.0	100.37	96.04	+ 4.31	5.017	5	+ 0.29
A2.5RC10/10	178.51	181.28	-1.55	17.09	16.73	+ 2.10
A2.5F2.0C10/10	135.77	114.75	+15.47	6.24	5.62	+ 9.90

Les figures 4.32 et 4.33 montrent la comparaison entre les charges ultimes et déplacement obtenus expérimentalement et numériquement pour toutes les poutres testées. Il est clair un bon accord entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.

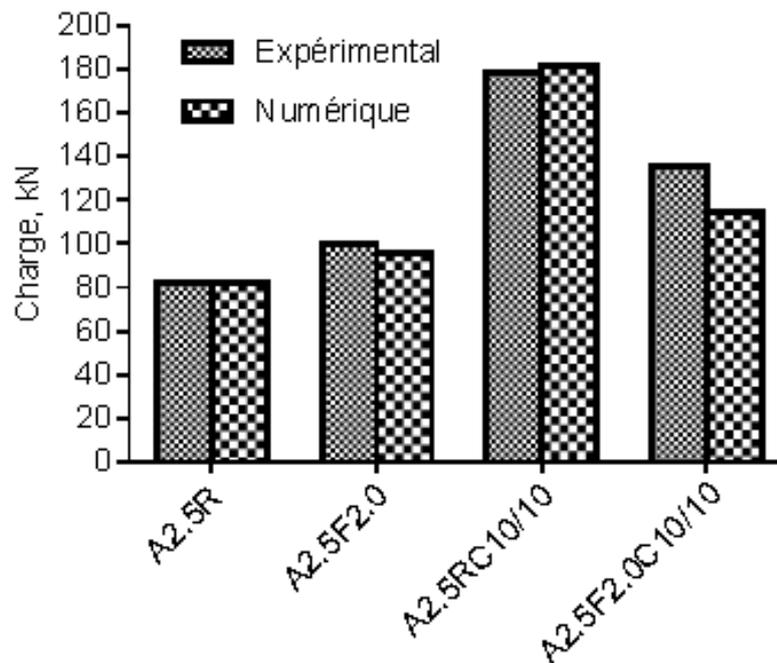


Figure 4.32. Comparaison entre la charge (expérimental et numérique) à mi-portée pour toutes les poutres testées.

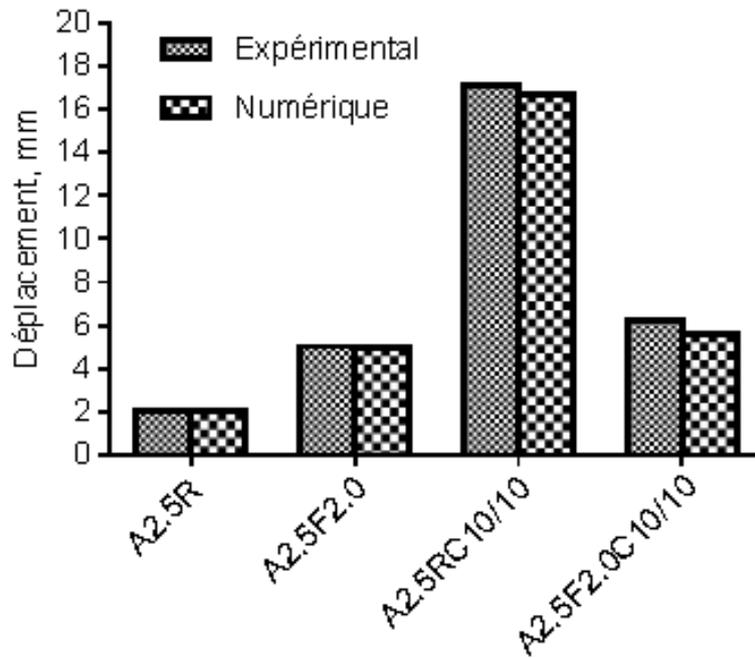
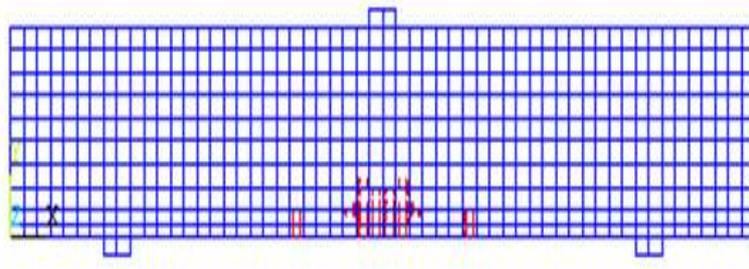


Figure 4.33. Comparaison entre déplacement (expérimental et numérique) à mi-portée pour toutes les poutres testées.

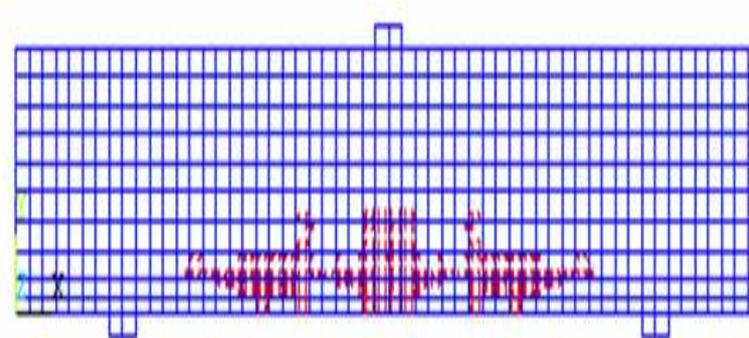
4.2.4.4. Évolution des fissures

Le logiciel ANSYS enregistre les fissures à chaque étape de chargement appliqué. La fissure apparaît lorsque le béton atteint sa résistance ultime à la traction. Il peut être remarqué que la formation de fissures s'initie, pour toutes les poutres, à proximité de la de mi-portée où la contrainte de flexion est la plus élevée. Comme le montre la figure 4.34 (a). Avec la croissance de la charge, les fissures de flexion supplémentaires s'ouvrent à l'intérieur de la portée. Cependant, en raison de la prédominance des contraintes de cisaillement, les fissures sont devenues progressivement plus inclinées et propagées vers le point de charge menant finalement à une rupture de tension en diagonale comme le montrent les figures 4.34 (b) et (c). D'autre part les figures (4.35) à (4.38) montrent l'évolution des fissures développées par l'étude expérimentale et par le model éléments finis dans les poutres (A2.5RC10 /10) et (A2.5F2.0C10/10) pour différents chargements jusqu'à la rupture. Les différents types de fissures sont représentés par des petits cercles aux points de dans les éléments en béton avec

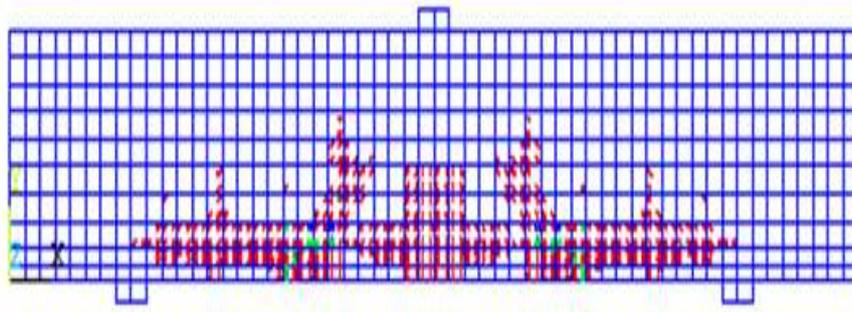
des couleurs et formes distinctives. La première fissure au point d'intégration est représentée avec un contour de cercle rouge, la deuxième fissure avec un contour vert et la troisième fissure avec un contour bleu. D'une manière générale, le mode de rupture et l'évolution des fissures observées à partir de l'analyse EF sont en bon accord avec celui des poutres testées au laboratoire.



(a) Fissuration pour une charge de 24.81 kN



(b) Fissuration pour une charge de 34.07 kN



(c) Fissuration pour une charge de 44.44 kN

Figure 4.34. Propagation de fissures à différentes charges (poutre A2.5RC10/10).



Figure 4.35. Fissures sur la poutre A2.5RC10/10.(expérimentation).

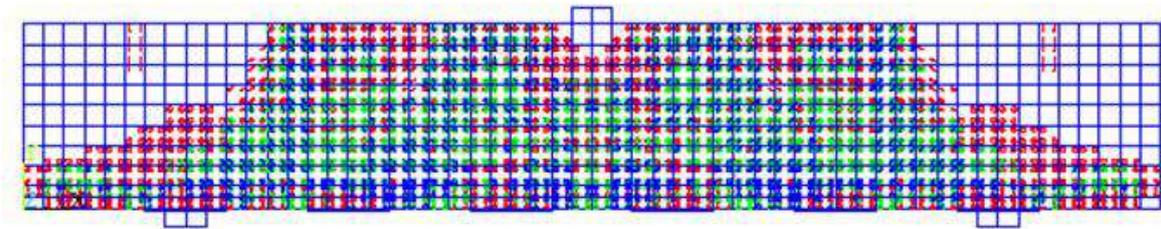


Figure 4.36. Fissures sur la poutre A2.5RC10/10(numérique).



Figure 4.37. Fissures sur la poutre A2.5F2.0C10/10(expérimentation).

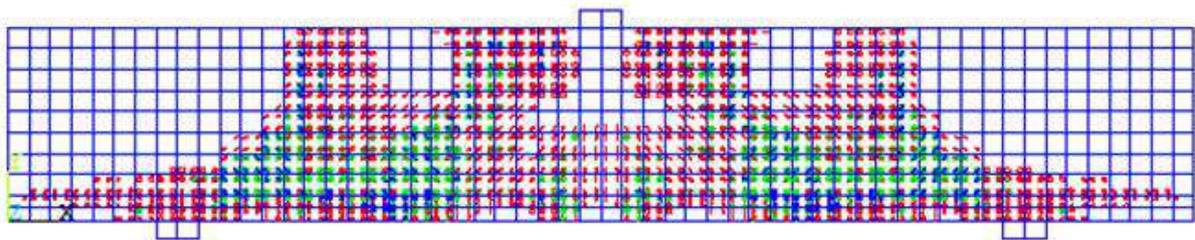
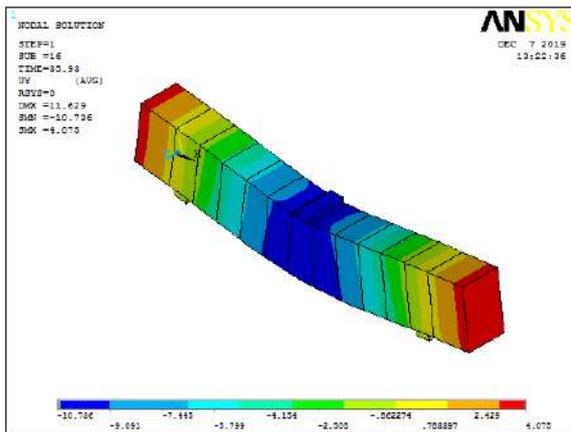
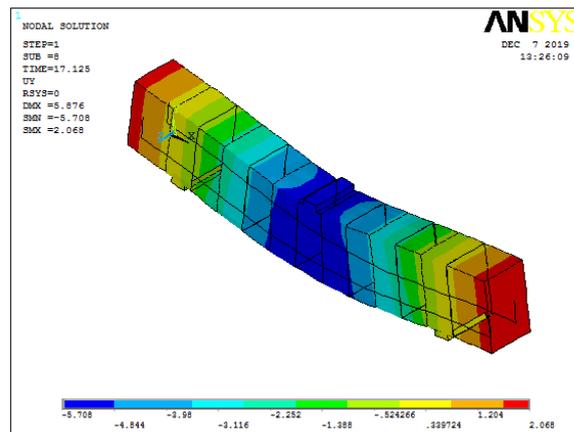


Figure 4.38. Fissures sur la poutre A2.5F2.0C10/10 (numérique).

La figure 4.39 montre les valeurs des déplacements pour les poutres A2.5RC10/10 et A2.5F2.0C10/10. La figure 4.40 montre les évolutions des déplacements pour différents chargements pour les poutres A2.5RC10/10 et A2.5F2.0C10/10, respectivement.



(a) A2.5RC10/10.



(b) A2.5F2.0C10/10.

Figure 4.39. Déplacement du modèle EF à travers les poutres.

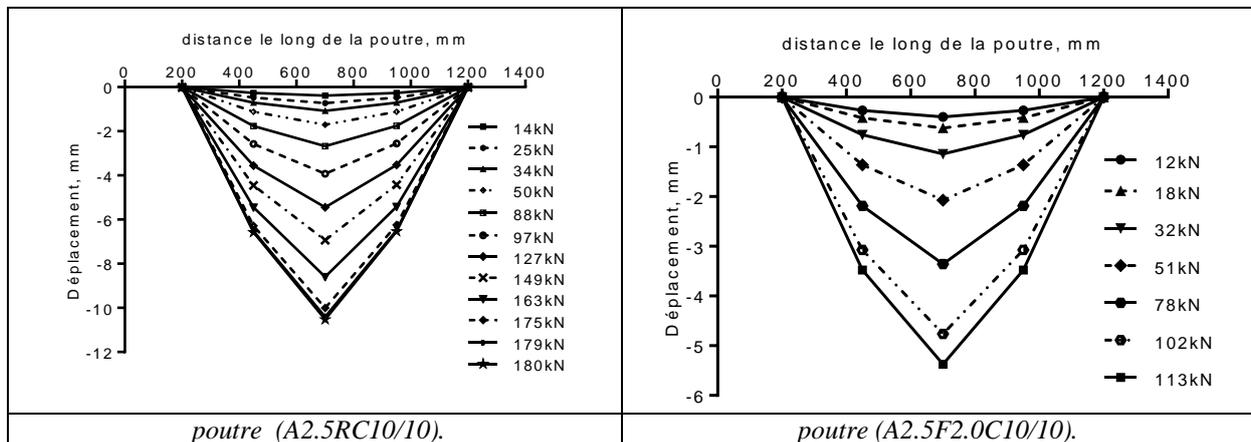


Figure 4.40. Evolution des déplacements en fonction du chargement.

D'autre part, la figure 4.41 montre la contrainte de cisaillement dans la direction XY à travers la poutre A2.5RC10/10. La valeur de la contrainte de cisaillement maximale dans la direction XY dans la section des couches de PRFC. En conséquence, le FEM démontre l'efficacité des composites PRFC dans l'amélioration de la résistance au cisaillement des poutres BA.

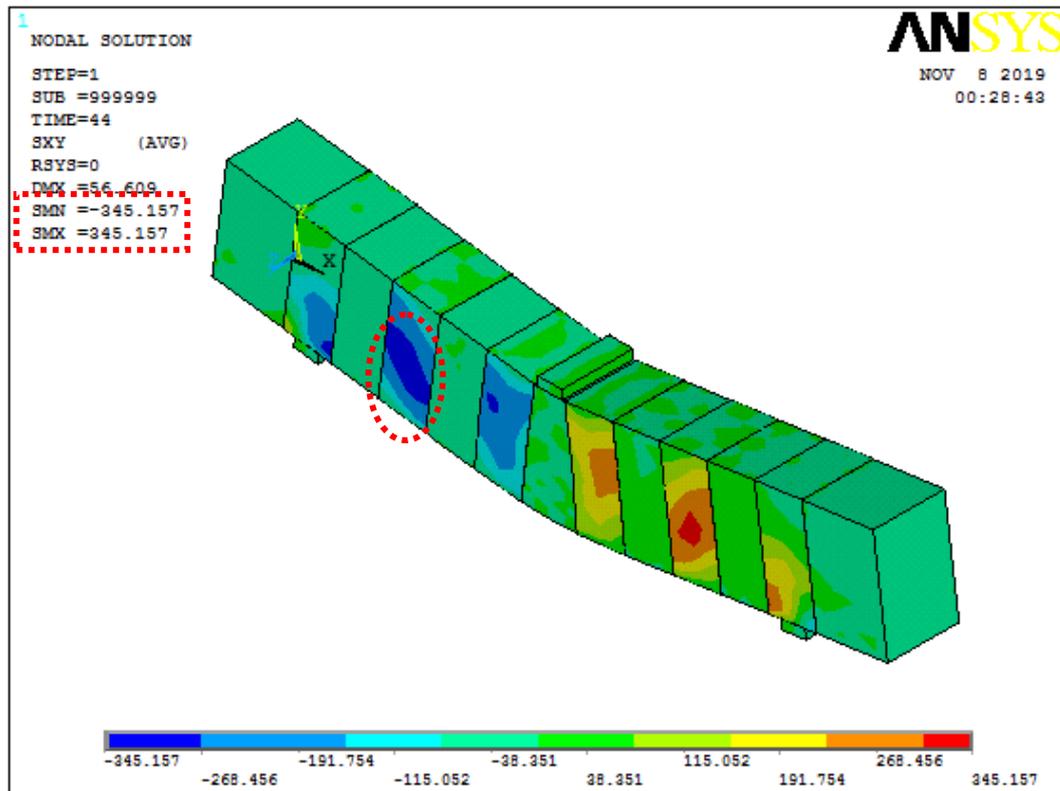


Figure 4.41. Contrainte de cisaillement maximale dans la direction XY pour la poutre A2.5F2.0C10/10.

4.2.4.5. Calcul de la charge ultime à l'aide du code ACI 318-19

Dans cette section, on calculera la charge ultime de la poutre A2.5Selon le code ACI 318-19 [86], qu'on comparera avec la charge ultime numérique. Le tableau 4.21 présente les propriétés mécaniques du béton et des armatures d'acier.

Tableau 4. 21. Propriétés mécaniques du béton et des armatures d'acier.

La résistance caractéristique du béton en compression f'_c	39 MPa
Module d'élasticité de l'acier (E_s)	200 GPa
La déformation maximale du béton ϵ_{cu}	0.003

L'algorithme pas à pas suivant est utilisé pour prédire le comportement des poutres à l'aide du code ACI 318-19[86] pour la poutre A2.5R:

Section des armatures d'acier: $A_s = 401.92 \text{ mm}^2$

La profondeur de l'axe neutre : $a = \frac{A_s f_s}{0.85 f_c' b}$; $a = 33.94 \text{ mm}$

Le moment ultime de la section est défini par: $M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right)$. $M_{ns} = 30.89 \text{ kN.m}$

Le tableau 4.22 montre la charge ultime numérique et celle calculée par le code ACI 318-19.

La différence entre ces valeurs n'excède pas 30 %. Les valeurs numériques sont, en général, plus petites que celles données par les codes.

Tableau 4.22. Comparaison entre la charge numérique et celle calculée par le code ACI 318-19.

Poutre	Charge ultime (kN) numérique	Charge ultime (kN) Selon ACI 318-19	Différence (%)
A2.5R	82.28	111	25.87

4.2.4.6. Calcul de la charge ultime à l'aide du code ACI 544.1R-96

Dans cette section, on calculera la charge ultime de la poutre avec SFRC renforcées au cisaillement par PRFC (A2.5F2.0C10/10) selon le code ACI 544.1R-96 [88], qu'on comparera avec la charge ultime numérique. Le tableau 4.21 présente les propriétés mécaniques du béton et des armatures d'acier. Le tableau 4.23 montre les propriétés mécaniques des matériaux en béton et PRFC.

Tableau 4.23. Propriétés mécaniques du béton et des PRFC.

Propriétés mécaniques	
La résistance caractéristique du béton en compression f'_c	21.43 MPa
module d'élasticité du PRFC E_f	230 GPa

L'algorithme suivant est utilisé pour le calcul de la charge ultime de la poutre (A2.5F2.0C10/10) selon le code ACI 544.1R-96 [88]; pour la poutre appelée (A2.5F2.0C10/10) la valeur de la charge ultime calculée par ce code est égale à 118.96 kN (détail de calcul, voir Annexe 3).

Le tableau 4.24 montre la comparaison entre la charge ultime à partir d'approches analytique et numérique de la poutre A2.5F2.0C10/10. La différence entre la valeur numérique et théorique est inférieure à 4%. En général, les résultats du modèle par éléments finis sont en bon accord avec les résultats du modèle analytique.

Tableau 4. 24. Comparaison entre la charge ultime numérique et celle calculée par ACI 544.1R-96 poutre A2.5F2.0C10 / 10.

Poutre	Charge Ultime(kN) numérique	Charge Ultime (kN) (ACI 544.1R-96)	Difference (%)
A2.5F2.0C10/10	114.75	118.96	3.53

4.3. Conclusion

Cette étude a présenté le développement numérique d'un modèle pour simuler la réponse des poutres en béton armé renforcées extérieurement par des feuilles de PRFC soumises à un chargement statique. Les observations et conclusions suivantes ont été tirées:

- Les modèles numériques peuvent prédire la charge ultime correspondant au déplacement maximal avec un niveau de précision raisonnable.
- Les courbes charges -déplacements montrent que toutes les poutres du modèle éléments finis est plus rigide que celles de l'expérimentation, L'adhérence entre les matériaux (acier-béton-composites) est supposé parfaite dans les modèles d'éléments finis, mais cette hypothèse n'est pas vérifiée pour les poutres expérimentales ou un glissement peut se produit et l'action composée entre les matériaux est perdue.
- Les résultats des modèles numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux en termes de mécanisme de défaillance et de distribution structurelle des fissures.
- Après avoir établi la validité des modèles développés, on procède à une différente étude paramétrique (Effet d'épaisseur et longueur du PRFC, l'effet de résistance à la compression du béton), puis une comparaison avec les codes de calcul des structures ce qui prouve aussi la validité l'analyse numérique par ANSYS.
- La modélisation par éléments finis présente un avantage par rapport aux essais expérimentaux. Elle permet également d'étudier différents cas qui ne peuvent être mesurés expérimentalement.
- Ainsi, les modèles d'éléments finis représentés par cette recherche sont capables de prédire la capacité de charge et le comportement des poutres testées.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le but de cette recherche est l'étude du comportement des poutres, en béton armé renforcées par les matériaux composites, soumises à un chargement statique (flexion trois points). Les observations et conclusions suivantes ont été tirées:

- Les résultats de la modélisation numérique obtenus par le logiciel ANSYS ont été validés par les résultats expérimentaux.
- Les modèles développés fournissent une description précise de l'évolution du comportement en flexion ou cisaillement des poutres BA renforcées par différents matériaux composites soumises à un chargement statique; Les modèles numériques peuvent prédire la charge ultime correspondant à la déformation ultime avec un niveau de précision raisonnable.
- Les résultats en termes de charges/déplacements du modèle EF des poutres testées sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement pour toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine. Il était aussi remarquable que toutes les poutres renforcées ont montré un comportement plus rigide par rapport à la poutre non renforcée.
- La liaison entre le béton et l'acier et la couche PRF est supposée parfaite pour le modèle EF, ce qui contribue à la rigidité plus élevée des modèles éléments finis.
- Les résultats des modèles numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux en termes de mécanisme de défaillance et de distribution structurelle des fissures.
- Après avoir établi la validité des modèles développés, il a été procédé à une étude paramétrique, puis une comparaison avec les codes de calcul des structures. Cette comparaison a mis encore en évidence la validité l'analyse numérique par ANSYS.
- D'après les résultats obtenus par la modélisation statique des poutres BA renforcées par PRF, il a été conclu que l'analyse numérique par ANSYS peut aisément remplacer ou

diminuer le recours à l'expérimentation qui demeure un processus très coûteux et qui nécessite beaucoup de temps.

Ce travail doit être bien évidemment enrichi et complété en introduisant d'autres paramètres mécaniques et géométriques. Il serait intéressant d'étudier le cas des portiques (à un étage ou plusieurs étages) renforcés avec des PRF sous l'action dynamique pour généraliser l'étude au cas de bâtiments renforcés sous l'action sismique. Le but, serait d'aboutir à un modèle général capable de simuler le comportement d'un bâtiment renforcé par PRF dans une zone sismique. Un autre axe intéressant à développer, serait l'étude du comportement d'un pont rénové et renforcé par les PRF sous l'action des charges mobiles.

ANNEXE

**ANNEXE 1 : La charge ultime de la poutre sont calculées à l'aide du code ACI
440.2R (2008)**

Dans cette annexe est présenté le charges ultimes pour la poutre PL-1.0-0.43 sont calculées à l'aide du code ACI 440.2R (2008) Ces résultats sont employés dans le chapitre 04 du texte.

Étape 1- Propriétés des matériaux de conception du système FRP :

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 2660 \text{ MPa}; \quad \varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0.01615$$

Étape 2- Calculs préliminaires :

Propriétés du béton: $E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 30712.26 \text{ MPa}$

La section d'armatures: $A_s = 401.92 \text{ mm}^2$

Aire (PFRC) : $A_f = 168 \text{ mm}^2$

Étape 3- État de déformation existant sur la sous-face :

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DI} (d_f - kd)}{I_{cr} E_c} = 0.0124$$

Étape 4- Déformation de conception du système PRFC :

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n t_f E_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu}; \quad \varepsilon_{fd} = 0,00557 \leq 0.0145$$

Étape 5- Estimation de la profondeur de l'axe neutre:

Une première estimation de la profondeur de l'axe neutre "c" est 0.2 d. Cependant, la valeur de "c" est considérée comme 0.339 d.

Étape 6- Niveau de contrainte efficace dans les composites de matériaux PRFC:

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

D'où,

$$\varepsilon_{fe} = 0.000241$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right); \quad \varepsilon_c = 0.003$$

Étape 7- Contrainte dans l'armature en acier existante:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right); \quad \varepsilon_s = 0.0106$$

Étape 8- Niveau de contrainte dans les armatures en acier et les plaques en PRFC:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad ; \quad f_s = 2173 \text{ MPa} > 562 \text{ MPa}$$

$$\text{D'où,} \quad f_s = 562 \text{ MPa}$$

Étape 9-

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 d}$$

Où,

$$d = 262 \text{ mm} \quad ; \quad \alpha_1 \text{ et } \beta_1 \text{ sont des facteurs de blocs de stress:}$$

$$\text{Où,} \quad \alpha_1 = 0.84; \quad \beta_1 = 0.7484 \quad \text{donc}$$

$$c = 57.080 \text{ mm}$$

Étape 10- le moment ultime de la section d'acier est défini par:

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad ; \quad M_{ns} = 54.35 \text{ kN.m}$$

La contribution du PRFC à la flexion peut être donnée par:

$$M_{nf} = \Psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad ; \quad M_{nf} = 1.585 \text{ kN.m}$$

Étape 11- le moment ultime de la section est défini par:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

Où,

$$\Psi_f = 0.85 \quad ; \quad M_n = 55.935 \text{ kN.m} \quad ; \quad \emptyset M_n \geq M_u$$

Où,

$$\emptyset = 0.9 \quad ; \quad \emptyset M_n = 50.341 \text{ kN.m} \geq 47.104 \text{ kN.m}$$

La valeur de la charge ultime calculée par ce code est égale à 125.866 kN.

ANNEXE 2 : Les charges ultimes des poutres testées sont calculées à l'aide des codes

ACI 440.2R (2008) et FIB14 (2001)

Dans cette annexe, on calculera la charge ultime pour la poutre B3Va1Lb-21c, à l'aide des codes ACI 440.2R (2008) et FIB14 (2001). Ces résultats sont employés dans le chapitre 04 du texte.

A) La charge ultime selon ACI 440.2R-08

Selon ce code, on procède au calcul de la charge ultime comme suit :

Les facteurs de réduction supplémentaires recommandés pour FRP $\psi_f = 0.95$ pour le renforcement continu.

$$V_n = V_c + V_s + \Psi_f V_f \quad ; \quad V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f}$$

$$A_{fv} = 2n t_f w_f = 26 \text{ mm}^2 \quad ; \quad K_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{\frac{2}{3}} = 0.845$$

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} = 64.072 \text{ mm} \quad ; \quad K_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} = 0.662$$

$$K_v = \frac{K_1 K_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} = 0.177 \quad \varepsilon_{fu} = 0.017 \quad ; \quad \varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} = 0.003009$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f = 601.8 \text{ Mpa} \quad ; \quad V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f} = 16.98 \text{ kN}$$

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d = 14.801 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} = 22.909 \text{ kN}$$

$$V_n = V_c + V_s + \Psi_f V_f = 53.841 \text{ kN}$$

$$P_n = 2 V_n = 107.682 \text{ kN}$$

B) La charge ultime selon FIB 14

Selon FIB14 on calculera la charge ultime pour une poutre en béton armé renforcée en cisaillement avec PRFC de la manière suivante :

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{wd} + V_{fd};$$

La contribution du béton à la résistance au cisaillement est écrite comme suit :

$$V_{Rd,c} = V_{cd} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_w \cdot 0.9 \cdot d$$

$$k_v = \frac{200}{1000 + 1.3 \cdot 0.9 \cdot d} \leq 0.15$$

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_w \cdot 0.9 \cdot d$$

La contribution du PRFC à la résistance au cisaillement est écrite comme suit :

$$V_{fd} = 0.9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

θ = angle de fissure diagonale par rapport à l'axe de la poutre

α = angle entre l'orientation de fibre et l'axe longitudinale de la poutre

ρ_f : Taux de renforcement du PRF :

$$\rho_f = \left(\frac{2t_f}{b_w} \right) \left(\frac{b_f}{S_f} \right) \text{ pour le cas du PFR non – continue sous la forme de bande ou plaque}$$

$$\rho_f = 0.00148$$

Valeur de calcul de la déformation effective

$$\varepsilon_{fd,e} = \varepsilon_{fk,e} / \gamma_f$$

Pour le cas où le PRF est collé complètement sur toute la section transversale :

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{f,e} = 0.00765$$

$$\varepsilon_{fk,e} = K \varepsilon_{f,e} = 0.00612$$

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} = 0.0047$$

$$V_{fd} = 0.9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha).$$

$$V_{fd} = 23.80 \text{ kN}$$

$$P_n = 105.75 \text{ kN}$$

ANNEXE 3 : La charge ultime de la poutre avec SFRC renforcées au cisaillement par PRFC selon le code ACI 544.1R-96

Dans cette annexe, on calculera la charge ultime de la poutre avec SFRC renforcées au cisaillement par PRFC (A2.5F2.0C10 /10) selon le code ACI 544.1R-96. Ces résultats sont employés dans le chapitre 04 du texte.

$$V_c = k f_{ct} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.25} b_w d = 38.72 \text{ kN} \quad ; \quad A_{fv} = 2n t_f w_f = 33.2 \text{ mm}^2$$

$$K_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.856 \quad ; \quad L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} = 51.27 \text{ mm}$$

$$K_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} = 0.743 \quad ; \quad K_v = \frac{K_1 K_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} = 0.128$$

$$\varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} = 0.00272 \quad ; \quad f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f = 625.6 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f} = 20.76 \text{ kN}$$

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad ; \quad V_n = 59.48 \text{ kN}$$

$$P_n = 2 V_n = 118.96 \text{ kN}$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] BENNEGADI Mohammed El Larbi. (2014). Modèle numérique pour l'étude du comportement d'interface des structures renforcées par plaque en composite . Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran.
- [2] Rochdi, E. H. (2004). Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon 1, France).
- [3] Abou Chakra, F. (2016). Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone: comparaison des codes.
- [4] Benzaid, R., Mesbah, H. A., & Chikh, N. E. (2010). Contribution a l'etude des materiaux composites dans le renforcement et la reparation des elements structuraux lineaires en beton.
- [5] SADKI, N. (2011). Etude du renforcement des structures par des barres en matériaux composites (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran).
- [6] Tarek, K. (2011). Réparation et renforcement des structures en béton armé à ossatures poteaux-poutres avec référence particulière à l'utilisation des composés en polymères renforcés par la fibre de carbone ou de verre (Doctoral dissertation, Alger).
- [7] Confrere, A. (2015). Développement d'une méthode d'analyse structurelle de bâtiments en béton armé: application aux poutres renforcées par des armatures PRF (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon).
- [8] AYAD TAYEB. (2019).comportement thermique et mecanique d'un tablier d'un pont après renforcement par des fibres de carbone. Thèse de doctorat. Universite Abdelhamid ibn badis mostaganem faculte des sciences et de la technologie departement de genie civil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [9] ABADOU Yacine. (2008). Évaluation Numérique Du Renforcement Des Nœuds Des Structures A Portique Par Les Matériaux Composites. MEMOIRE DE MAGISTER. UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Civil.
- [10] Ngo, M. D. (2016). Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites naturels (fibre de lin) (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- [11] Meier, U., & Winistörfer, A. (1995). Retrofitting of structures through external bonding of CFRP sheets. In RILEM PROCEEDINGS (pp. 465-465). CHAPMAN & HALL.
- [12] Bendifallah, M. (2012). Travail de recherche sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle Prothèse Totale de Hanche (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [13] "Fiber Reinforced Polymers - Characteristics and Behaviors," Build-on-Prince.com. [Online]. Available: <http://www.build-on-prince.com/fiber-reinforced-polymers.html>. [Accessed: 05-Dec-2016].
- [14] Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. W., & Conelly, G. M. (1991). External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. *Structural Journal*, 88(4), 490-500.
- [15] Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., Baluch, M. H., & Ghaleb, B. N. (1994). Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates. *Structural Journal*, 91(2), 160-168.
- [16] Meier, U. (1992). Carbon fiber-reinforced polymers: modern materials in bridge engineering. *Structural engineering international*, 2(1), 7-12.
- [17] Aboutaha, R. S. (2002). Ductility of CFRP Strengthened Concrete Flexural Members. In *Rehabilitating and Repairing the Buildings and Bridges of Americas: Hemispheric Workshop on Future Directions* (pp. 1-8).
- [18] Aboutaha, R. S., Wattanadechachan, P., & Kim, S. H. (2003). Flexural ductility of CFRP strengthened concrete beams-experimental investigation. *Special Publication*, 213, 207-220.
- [19] Ashour, A. F., El-Refaie, S. A., & Garrity, S. W. (2004). Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates. *Cement and concrete composites*, 26(7), 765-775.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [20] Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., & Tajari, A. R. (2007). Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Engineering structures*, 29(10), 2428-2444.
- [21] Soudki, K., El-Salakawy, E., & Craig, B. (2007). Behavior of CFRP strengthened reinforced concrete beams in corrosive environment. *Journal of composites for construction*, 11(3), 291-298.
- [22] Ahmed, E., Sobuz, H. R., & Sutan, N. M. (2011). Flexural performance of CFRP strengthened RC beams with different degrees of strengthening schemes. *International Journal of Physical Sciences*, 6(9), 2229-2238.
- [23] 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)*
- [24] Fareed, S. (2014). Behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP wraps with and without end anchorages. *Procedia Engineering*, 77, 123-130.
- [25] Berset, J. D. (1992). Strengthening of reinforced concrete beams for shear using FRP composites (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [26] Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., & Finch, W. W. (1995). Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics. *Structural Journal*, 92(3), 295-303.
- [27] Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y., & Tanaka, T. (1996). Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beams. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-II, Montreal 1996*.
- [28] Täljsten, B. (1997). Strengthening of concrete structures for shear with bonded CFRP fabrics. *Recent Advances in Bridge Engineering*, 67-74.
- [29] Umezu, K. (1997). Shear behavior of RC beams with aramid fiber sheet, Japan Concrete Institute, non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures. In *Proceeding of the third international symposium (Vol. 1, pp. 491-498)*.
- [30] Triantafillou, T. C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. *ACI structural journal*, 95, 107-115.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [31] Khalifa, A., & Nanni, A. (2000). Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(3), 165-174.
- [32] Deniaud, C. and Cheng, J.J.R. 2001. Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheet. *ACI Struct. J.* 98(3), p. 386-394.
- [33] O. Chaallal, M. Shahawy, and M. Hassan, "Performance of reinforced concrete T-girders strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer fabric," *ACI Struct. J.*, vol. 99, no. 3, 2002.
- [34] Täljsten, B. 2003. Strengthening of concrete beam for shear with bonded CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 17, p. 15-26.
- [35] Adhikary, B.B., Asce, M. and Musuyoshi, H. (2004), "Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8 No. 3, pp. 258-264.
- [36] Bousselham, A. 2005. Comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés. Thèse Ph.D. École de technologie supérieure, Montréal, Canada. 404 p.
- [37] A. Bousselham and O. Chaallal, "Behavior of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer— An Experimental Study," *Struct. J.*, vol. 103, no. 3, pp. 339–347, May 2006.
- [38] Bencardino, F., Spadea, G. and Swamy, R.N. (2007), "The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates", *Construction and Building Materials*, Vol. 21 No. 11, pp. 1997-2006.
- [39] Monti, G. and Liotta, M.A. (2007), "Tests and design equations for FRP-strengthening in shear", *Construction and Building Materials*, Vol. 21 No. 4, pp. 799-809.
- [40] J. Teng, G. Chen, J. Chen, O. Rosenboom, and L. Lam, "Behavior of RC Beams Shear Strengthened with Bonded or Unbonded FRP Wraps," *J. Compos. Constr.*, vol. 13, no. 5, pp. 394–404, Sep. 2009.
- [41] Sundararaja, M.C. and Rajamohan, S. (2009), "Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips—an experimental study", *Construction and Building Materials*, Vol. 23 No. 2, pp. 856-864.
- [42] Bukhari, A.I., Vollum, L.R., Ahmad, S. and Sagaseta, J. (2010), "Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62 No. 1, pp. 65-77.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [43] Godat, A., Qu, Z. , Lu, X. Z. , Labossière, P. , Ye, L. P. , Neale, K. W. 2010. Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips. *J.compos. constr.* may/june. 2010, p. 260-271.
- [44] El-Maaddawy, T. and Chekfeh, Y. 2012. « Retrofitting of Severely Shear-Damaged Concrete T-Beams Using Externally Bonded Composites and Mechanical End Anchorage ». *J. Compos. Constr.*, 16(6), p. 693–704.
- [45] K. C. Panda, S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai, “Effect of transverse steel on the performance of RC T-beams strengthened in shear zone with GFRP sheet,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 79–90, Apr. 2013.
- [46] El-Saikaly, G., Godat, A., and Chaallal, O. 2014. « New Anchorage Technique for FRP Shear-Strengthened RC T-Beams Using CFRP Rope ». *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000530 , 04014064
- [47] Arslan, M. H., Yazman, Ş., Hamad, A. A., Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2022, May). Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored CFRP fabrics. In *Structures* (Vol. 39, pp. 527-542). Elsevier.
- [48] ACI Committee 440 and American Concrete Institute, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2008.
- [49] Fédération internationale du béton, fib-TG 9.3 (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures: technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures*. Lausanne, Switzerland : International Federation for Structural Concrete, 2001.
- [50] Eurocode 2-Calcul des structures en béton. 2015. Eurocode 2-Calcul des structures en béton. 2015.
- [51] CNR-DT200/2004 and Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systemes for Strengthening Existing Structures*. Rome, 2004.
- [52] Amer M.Ibrahim , Wissam D.Salman , "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam Strengthened with CFRP in Flexure", *Diyala Journal of Engineering Sciences*, Vol.2, No.2, pp.88-104. December 2009.
- [53] Amer. I, Mohammed .M,"Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates", *European Journal of Scientific Research*, Vol.30, No.4, pp.526-541. (2009).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [54] Ramezaniapour A.A., Gharachorlou A. "Fracture optimization of RC beams strengthened with CFRP laminates with finite element and experimental methods", concrete repair, rehabilitation and retrofitting II-Alexander et al, Taylor and Francis Group, London, (2009), ISBN 978-0-415-46850-3.
- [55] Abbas, A., , "Non-linear Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel and CFRP Plates", Diyala Journal of Engineering Sciences, pp. 249-256. (2010).
- [56] F.A. Fathelbab, M.S. Ramadan, A. Al-Tantawy, " Finite Element Modeling of Strengthened Simple Beams using FRP Techniques: A parametric Study", Concrete Research (LETTERS), Vol.2 (2), pp.228-240. June 2011
- [57] P. Jayajothi, R. Kumutha and K. Vijai, "Finite Element Analysis of FRP Strengthened RC Beams Using ANSYS", Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), Vol.14, No.4, pp.631-642.(2013).
- [58] Hamrat, M., Bouziadi, F., Boulekbache, B., Daouadji, T. H., Chergui, S., Labed, A., & Amziane, S. (2020). Experimental and numerical investigation on the deflection behavior of pre-cracked and repaired reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, 249, 118745.
- [59] Elyasian, I., Abdoli, N. and Rounagh, H.R. (2006), "Evaluation of parameters effective in FRP shear strengthening of RC beams using FE method", *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 7 No. 3, pp. 249-257.
- [60] Obaidat, Y.T., Heyden, S. and Dahlblom, O. (2010), "The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM", *Composite Structures*, Vol. 92 No. 6, pp. 1391-1398.
- [61] Hawileh, R.A., Naser, M.Z. and Abdalla, J.A. (2013), "Finite element simulation of reinforced concrete beams externally strengthened with short-length CFRP plates", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45 No. 1, pp. 1722-1730.
- [62] Harihar, A.S. and Kulkarni, D.K. (2016), "Finite element analysis of reinforced concrete beam strengthened with CFRP sheets", *Bonfring International Journal of Man Machine Interface*, Vol. 4.
- [63] PRAJAPATI, G., PANDEY, A. A., & REDDY, T. (2017). Finite element simulation of shear Strengthened RC beams externally reinforced with FRP.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [64] Banjara, N. K., & Ramanjaneyulu, K. (2017). Experimental and numerical investigations on the performance evaluation of shear deficient and GFRP strengthened reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 137, 520-534.
- [65] Habib, M., Zhijun, C., Zipei, Z. and Mahdi, A. (2018), "Non-linear finite element analysis of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets for flexure and shear using ANSYS", *Asian Journal of Mathematics and Computer Research*, pp. 75-95.
- [66] Choobbor, S.S., Hawileh, R.A., Abu-Obeidah, A. and Abdalla, J.A. (2019), "Performance of hybrid carbon and basalt FRP sheets in strengthening concrete beams in flexure", *Composite Structures*, Vol. 227, p. 111337.
- [67] Youcef LAIB et Hemza SALEM. Analyse de quelques structures de Génie Civil par M.E.F en utilisant le logiciel ROBOT. 2017. MEMOIRE DE MASTER. Université de M'sila.
- [68] Nacéra, K. A. C. I. M. I. (2013). Analyse numérique d'une structure auto stable et d'une structure mixte (portiques+ voiles). Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [69] SAMIR, DEGHBODJ. METHODE DES ELEMENTS FINIS.
- [70] Abdelhak, K. A. D. A. "DES ELEMENTS FINIS." (2017).
- [71] Oudin, H. (2008). Méthode des éléments finis (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)).
- [72] TOUHARI, Mahfoud. Influence du renforcement par matériaux composites de fibres de carbone sur le comportement d'un pont à poutres en béton. 2010. Thèse de doctorat. Alger, Ecole Nationale Polytechnique.
- [73] SI SALEM, A. (2016). Développement d'une poutre en béton-composite: analyse expérimentale et modélisation (Doctoral dissertation, Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri).
- [74] Codes de calcul, Zhi-Qiang FENG, IUP Université d'Evry - Val d'Essonne, DESS/CS41.
- [75] KAOUANE, Malika. Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. 2011. mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri.
- [76] KILARDJ Madina. Analyse numérique du flambement linéaire et non-linéaire des plaques minces partiellement tendue. 2017. Thèse de doctorat. université des sciences et de la technologie houari boumediene.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [77] P. Kohnke. Theory reference for the mechanical APDL and mechanical applications. Ansys Inc, release, 12, 2009.
- [78] VIENS, François. Implantation d'une loi de matériau des alliages à mémoire de forme dans un logiciel d'éléments finis commercial. 2004. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- [79] BOUZOUAID, SAMIA. Contribution à la modélisation numérique des bétons de fibre en flexion. 2018. Thèse de doctorat. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [80] ANSYS (2007), ANSYS, Release Version 12, a Finite Element Computer Software and User Manual for Nonlinear Structural Analysis, ANSYS, Canonsburg, PA.
- [81] KACHLAKEV, Damian I., MILLER, Thomas H., POTISUK, Tanarat, et al. Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates. Oregon. Dept. of Transportation. Research Group, 2001.
- [82] Akram, A., Hameed, R., Siddiqi, Z. A., Riaz, M. R., & Ilyas, M. (2014). Finite element modeling of RC beams strengthened in flexure using FRP material. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(12), 8573-8584.
- [83] Ahmed K. El-Sayed, "Effect of longitudinal CFRP strengthening on the shear resistance of reinforced concrete beams" *J.Composites : Part B* 58 (2014) 422–429.
- [84] Al-Tersawy, S.H. (2013), "Effect of fiber parameters and concrete strength on shear behavior of strengthened RC beams", *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 15-24.
- [85] Keskin, R. S. O., Arslan, G., & Sengun, K. (2017). Influence of CFRP on the shear strength of RC and SFRC beams. *Construction and Building Materials*, 153, 16-24.
- [86] Aci (American Concrete Institute), ACI 318–19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019.
- [87] Obaidat, Y.T. (2011), "Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer", PhD Thesis, Department of Construction Sciences, Structural Mechanics.
- [88] ACI (American Concrete Institute), ACI 544.1R-96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996.