

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Travaux publics

Spécialité: Voies et Ouvrages d'Art

SADOUN Zahira

Thème:

Contribution à l'étude du comportement des poutres-ponts renforcées par des matériaux composites : approche analytique et simulation numérique.

Nom et prénom	Grade	Université	Qualité
BRANCI Taieb	Professeur	UHB Chlef	Président
LAZREG Hadji	Professeur	UIK Tiaret	Examinateur
BERRADIA Mohammed	MCA	UHB Chlef	Examinateur
MELLAL Fatma	MCA	UDB Khemis Miliana	Examinatrice
BENNAI Riadh	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
ELNEMR Amr	Professeur	UAC Egypte	Co-Rapporteur
DJAFAR HENNI Ahmed	Retraité	UHB Chlef	Invité

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse **M. Riadh BENNAI**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant de diriger mes travaux de recherche. Je tiens également à le remercier pour ses encouragements et de la confiance qu'il m'a témoignée.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon co-directeur de thèse **M. Amr M. ELNEMR**, Professeur à l'université allemande du Caire, Égypte, pour avoir partagé toutes les informations sur le sujet. Je le remercie aussi pour l'encouragement, sa grande disponibilité et son humilité.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au **M. Taieb BRANCI**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **M. Lazreg HADJI**, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour l'honneur qu'il m'a fait en prenant part à mon jury de thèse en tant qu'examineur, et pour le temps qu'il a généreusement consacré à la lecture de ce travail.

Je tiens à remercier **M. Mohammed BERRADIA**, Maître de Conférences à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour l'honneur qu'il m'a accordé en participant à mon jury de thèse en tant qu'examineur, ainsi que pour le temps qu'il a consacré à la lecture de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **M^{me}. Fatma MELLAL**, Maître de Conférences à l'Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, pour l'honneur qu'elle m'a fait en participant à mon jury de thèse en tant qu'examinatrice, ainsi que pour le temps précieux qu'elle a consacré à l'évaluation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier **M. Hassen AIT ATMANE**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef et **M. Mokhtar NEBAB**, MCB à l'Université M'hamed Bougara de Boumerdes, pour leurs disponibilités.

Je tiens également à remercier **M. Ahmed DJAFAR HENNI**, Professeur retraité de l'Université de Hassiba Benbouali de Chlef et président du Comité de la Formation Doctorale (CFD) pour son soutien et pour avoir assuré notre formation doctorale.

Enfin, j'adresse mes remerciements à **mes parents, mon frère Mohammed, mes sœurs**, ainsi qu'à ma collègue **M^{elle} O. Yessad**, qui m'ont constamment soutenue et encouragée, me permettant ainsi d'atteindre mes objectifs.

Résumé

Le renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites est devenu une solution efficace pour améliorer leurs performances. Dans une première partie de ce travail, un développement analytique basé sur l'approche de compatibilité de déformation, où les contraintes de cisaillement et normales sont supposées invariantes à travers l'épaisseur de la couche adhésive, a été présenté pour calculer les contraintes à l'interface composite (FGM poreux) – béton sous différents types de chargements mécaniques. Les résultats obtenus ont été comparés aux contraintes d'interface rapportées dans la littérature, et une étude paramétrique a été réalisée afin de mettre en évidence l'impact de différents paramètres sur la distribution des contraintes d'interface. Dans la deuxième partie, un modèle d'éléments finis utilisant le logiciel d'éléments finis « ANSYS » a été présenté pour simuler le comportement en effort tranchant des poutres en béton armé renforcée avec du polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP), ou sans renforcement externe. En se basant sur des données expérimentales existantes dans la littérature. Le modèle d'éléments finis a été validé et utilisé pour étudier l'impact des différents paramètres tels que l'orientation des fibres de carbone, de l'inclinaison du CFRP et du nombre de plis sur la réponse au cisaillement des poutres en béton armé renforcées extérieurement avec CFRP à enveloppe complète avec l'espacement. Les résultats prédits montrent que la capacité de chargement de toutes les poutres renforcées est supérieure à celle de la poutre témoin.

Mots clés : renforcement, matériaux composites, FGM poreux, contraintes d'interface, éléments finis, polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP).

Abstract

Reinforced concrete beams with composite materials have become an effective solution to improve their performance. In the first part of this work, an analytical development based on the deformation compatibility approach, where the shear and normal stresses are assumed to be invariant across the thickness of the adhesive layer, was presented to calculate the stresses at the interface between the composite (porous FGM) and concrete under different types of mechanical loading. The results obtained were compared with interface stresses reported in the literature, and a parametric study was conducted to highlight the impact of various parameters on the interface stresses. In the second part, a finite element model using the general-purpose finite element software 'ANSYS' was presented to simulate the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP), or without external reinforcement. Based on existing experimental data in the literature, the finite element model was validated and used to study the impact of various parameters such as CFRP fiber orientation, CFRP inclination, and the number of plies on the shear response of reinforced concrete beams externally strengthened with fully wrapped CFRP with spacing. The predicted results show that the load-carrying capacity of all reinforced beams is higher than that of the control beam.

Key words: reinforcement, composite materials, porous FGM, interface stresses, finite element, carbon fiber-reinforced polymer (CFRP).

ملخص

أصبح تعزيز العوارض الخرسانية المسلحة بالمواد المركبة حلاً فعالاً لتحسين أدائها . في الجزء الأول من هذا العمل، تم تقديم تطوير تحليلي يعتمد على نهج توافق التشوه، حيث يُفترض أن تكون الإجهادات القصية والطولية غير متغيرة عبر سمك طبقة اللصق، وذلك لحساب الإجهادات عند الواجهة بين المواد المركبة (المسامية) والخرسانة تحت أنواع مختلفة من التحميل الميكانيكي. تم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع الإجهادات على الواجهة المذكورة في الأدبيات، وأجريت دراسة برامترية لتسليط الضوء على تأثير العوامل المختلفة على الإجهادات.

في الجزء الثاني، تم تقديم نموذج للعناصر المحدودة باستخدام برنامج محاكاة سلوك القص ANSYS تم عرضه للكمرات الخرسانية المعززة بألياف الكربون المقواة بالبلاستيك أو بدون تدعيم خارجي استناداً إلى البيانات التجريبية الموجودة في الأدبيات. تم التحقق من صحة نموذج العناصر المحدودة واستخدامه لدراسة تأثير مختلف المتغيرات، مثل اتجاه ألياف البلاستيك المقوى بألياف الكربون زاوية الميل وعدد الطبقات على استجابة القص للعوارض الخرسانية المسلحة المقواة خارجياً بألياف الكربون المقوى بألياف الكربون . تُظهر النتائج المتوقعة أن قدرة تحمل جميع العوارض المقواة أكبر من قدرة تحمل العارضة المرجعية.

الكلمات المفتاحية: التعزيز، المواد المركبة، المسامية، إجهادات الواجهة، العناصر المحدودة، البوليمر

الكربون المُعزّز بألياف (CFRP)

Sommaire

Remerciement.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص	v
Sommaire.....	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des abréviations et des notations.....	xiv
Introduction générale.....	2
Chapitre I : Généralité sur les problèmes structuraux dans les ponts et les techniques de renforcement	
I.1.Introduction.....	6
I.2. Présentation générale des ponts	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Composants du pont	6
I.2.2.1.Superstructure	6
I.2.2.2. Appuis	7
I.2.2.3. Structure de base.	7
I.3. Pathologies du béton.	8
I.3.1. Mécanisme de carbonatation	8
I.3.1.1 Paramètres affectant la carbonatation	8
I.3.2. Attaque des Sulfates	8
I.3.3. Corrosion induite par les chlorures	9
I.3.4. Gel dégel.....	9
I.3.5. Fissuration	9
I.3.5.1.Cause de fissuration.	10
I.3.5.2. Réparation de fissures	10
I.4. Objectifs de la réparation/renforcement du pont.....	10
I.5.Techniques de réparation et de renforcement.....	12
I.5.1.Élargissement de la section	13
I.5.2.Post-tension	13
I.5.3.Techniques de collage externe.....	13
I.5.4.Système monté près de la surface.....	14

I.5.5. Renfort intégré.....	16
I.6. Procédure générale de réparation.....	17
I.6.1. Inspection et contrôle.....	17
I.6.2. Choix d'un matériau de réparation.....	17
I.6.3. Choix de la méthode de réparation.....	18
I.6.4. Préparation de la surface.....	18
I.6.5. Conception de la réparation.....	18
I.6.6. Application du matériau de réparation.....	19
I.6.7. Précontrainte du matériau de réparation (facultatif).....	19
I.6.8. Système d'ancrage.....	19
I.7. Conclusion	21
Chapitre II: Bibliographique sur les matériaux composites	
II.1. Introduction	23
II.2. Polymère renforcé de fibres (FRP)	24
II.2.1. Constituants des FRP.....	25
II.2.1.1. Matrice.....	25
II.2.1.2. Types de FRP.....	25
II.2.1.2.1. CFRP.....	26
II.2.1.2.2. BFRP	27
II.2.1.2.3. GFRP	28
II.2.2. Propriétés mécaniques des composites FRP.....	28
II.2.3. Limites des composites FRP.....	29
II.3. Matériaux à gradient de propriétés (FGM).....	30
II.3.1. Avantage des FGM	33
II.3.2. Inconvénients des FGM.	33
II.3.3. Domaines d'application des FGM.....	35
II.4. Comparaison des matériaux FGM et les matériaux traditionnels.....	36
II.5. Matériaux impropres (poreux).....	36
II.5.1. Définition de la porosité.....	36
II.5.2. Différents types de porosité	37
II.6. Propriétés matérielles effectives des matériaux à gradient de propriétés	38
II.6.1. Propriétés matérielles d'une plaque P-FGM.....	39
II.6.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM.....	40
II.6.3. Propriétés matérielles de la poutre E-FGM.....	41

II.7. Lois régissant la variation des propriétés des matériaux FGM poreux.....	42
II.7.1. Modèle de porosité symétrique.....	43
II.7.2. Modèle de porosité non-symétrique.....	43
II.7.3. Modèle de porosité non uniforme	44
II.7.4. Modèle de porosité logarithmiques-non uniformes.....	44
II.7.5. Model de porosité de Kim et al.	45
II.7.6. Model de porosité de Coskun et al.	45
II.7.7. Model de porosité de Li et Zheng.....	45
II.8. Conclusion.....	46
Chapitre III : Analyse mathématique des contraintes d’interface dans les poutres renforcées par des plaques en matériaux composites : cas flexion.	
III.1. Introduction	48
III.2. Approche analytique	48
III.2.1. Hypothèses de base	48
III.2.2. Propriétés des matériaux constitutifs des FGMs	49
III.2.3. Distribution des contraintes de cisaillement le long de la plaque d’interface FGM-béton.....	51
III.2.3.1. Contrainte de cisaillement d’interface pour une charge uniformément répartie..	54
III.2.3.2. Contrainte de cisaillement d’interface pour une charge ponctuelle.....	54
III.2.3.3. Contrainte de cisaillement d’interface pour une charge en deux points.....	54
III.2.4. Distribution des contraintes normale le long de la plaque d’interface FGM-béton.....	55
III.3. Résultats et discussions.....	56
III.3.1. Propriétés géométriques et matérielles	56
III.3.2. Comparaisons numériques.....	57
III.3.3. Etude paramétrique	59
III.3.3.1. Effet de la porosité	59
III.3.3.2. Effet du degré d’homogénéité	62
III.3.3.3. Effet de l’épaisseur de la couche adhésive.....	64
III.3.3.4. Effet du module d’Young de l’adhésif	66
III.3.3.5. Effet de la longueur de la zone non renforcée	69
III.3.3.6. Effet de l’épaisseur de la plaque.....	71
III. 3. Conclusion.....	73

Chapitre IV : Modélisation numérique via MEF des poutres renforcées par CFRP

: Cas cisaillement

IV.1. Introduction.....	75
IV.2. Méthode des éléments finis	75
IV.3. Principe de la méthode des éléments finis.....	76
IV.4. Classification des traitements	77
IV.5. Besoin d'étude MEF.....	77
IV.6. Procédure générale pour l'analyse par éléments finis	77
IV.6.1. Prétraitement.....	78
IV.6.2. Solution	78
IV.6.3. Post-traitement.....	78
IV.7. Application de la méthode des éléments finis.....	79
IV.8. Avantages de la méthode des éléments finis	79
IV.9. Logiciel de simulation ANSYS	80
IV.10. Description du programme expérimental.....	80
IV.11. Simulation par éléments finis.....	82
IV.12. Résultats numériques.....	84
IV.12.1. Validation des modèles.....	84
IV.12.2. Comportement des modèles	87
IV.12.3. Modèles de fissures.....	95
IV.13. Étude paramétrique.....	99
IV.13.1. Impact de l'orientation des fibres du composite CFRP.....	100
IV.13.1.1. Réponse charge-flèche.....	100
IV.13.1.2. Mode de rupture.....	101
IV.13.2. Impact du nombre de plis dans le composite CFRP.....	104
IV.13.3. Discussion des résultats du post-traitement de l'EF.....	107
IV.13.3.1. Modèle de fissures.....	107
IV.13.3.2. Répartition des contraintes dans le béton et l'armature en acier	111
IV.14. Conclusion.....	117
Conclusions générales et perspectives	120
Références bibliographiques	124

Listes des figures

Figure I.1 :	Présentation d'un pont [3].	7
Figure I.2 :	Le réseau routier est équivalent aux veines du sang [13].	12
Figure I.3 :	Poutres réparées à l'aide d'un enrobage continu en CFRP (Photo : Toenjes, 2005) [18].	14
Figure I.4 :	Poutres renforcées à l'aide de feuilles de CFRP tissées par intermittence [18].	14
Figure I.5 :	Exemples de réparation de dommages accidentels à l'aide de la technologie FRP [17].	14
Figure I.6 :	Schéma des barres EB et NSM et des bandes NSM pour le renforcement des membres en béton armé (RC) [15].	16
Figure I.7 :	Schéma de la technique d'enrobage de l'armature profonde pour les poutres en T Schéma de la technique d'enrobage de l'armature profonde pour les poutres en T [15].	15
Figure I.8 :	Schéma des méthodes d'ancrage courantes [15,30] .	20
Figure I.9 :	Système d'ancrage d'extrémité à l'aide de bandes de CFRP ou de verre FRP (GFRP) [15,19, 28].	20
Figure I.10 :	Chevilles d'ancrage en CFRP insérées dans des trous à l'intérieur de la surface du béton [15,19].	20
Figure II.1 :	Types de FGM (a) Gradient de matière (b) Gradient de porosité (c)Gradient microstructurel de Al-SiC Graphite FGM [70,71].	23
Figure II.2 :	Courbes de contrainte-déformation pour divers matériaux [80-81].	24
Figure II.3 :	Composites FRP : a) Feuille en CFRP, b) Feuille en BFRP, c) Feuille en GFRP, d) Feuille AFRP, e) Stratifié en CFRP, f) Feuille en CFRP,G) Barres d'armature BFRP, h) Barres d'armature en GFRP i) Barres d'armature en CFRP, j) Géométrie typique du FRP [81,84].	26
Figure II.4 :	Combinaisons préférées de matrices et de particules utilisées dans les FGM [113].	31
Figure II.5 :	Quelques exemples naturels de FGM contenant des structures aux propriétés graduelles [117,120].	32
Figure II.6 :	Quelques exemples réels de MGF nécessitant des structures aux propriétés graduelles [117,121].	32
Figure II.7 :	Échelle d'évolution des matériaux à gradation fonctionnelle et ses étapes [113].	33
Figure II.8 :	Distribution des composantes des matériaux.	36
Figure II.9 :	(a) Micrographie MEB des porosités étudiées, (b) Schématisation des	37

Listes des figures

	différents types de pores (c) et (d) Nomenclatures relatives à la taille des pores [128].	
Figure II.10 :	Diverses formes de répartition de la porosité [125,129].	38
Figure II.11:	Géométrie d'une plaque en FGM.	39
Figure II.12 :	Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.	40
Figure II.13 :	Distribution de la fraction volumique en fonction de l'épaisseur d'un matériau S-FGM.	41
Figure II.14 :	Module de Young à travers l'épaisseur d'une plaque E-FGM.	42
Figure II.15 :	Répartition de porosité sur l'épaisseur, (a) porosité symétriques (b) porosité non symétriques [131].	43
Figure II.16 :	Illustration de différentes configurations de porosité [131].	44
Figure III.1 :	Poutre simplement appuyée renforcée par une plaque FGM collée.	49
Figure III.2 :	Cas de charge.	54
Figure III.3 :	Comparaison de la contrainte d'interface dans une poutre en béton armé renforcée par P-FGM avec les résultats analytiques.	58
Figure III.4 :	Effet de la porosité sur les contraintes d'interface de la poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse de FGM sous une charge uniforme répartie.	61
Figure III.5 :	Effet du degré d'homogénéité sur les contraintes interfaciales d'une plaque FGM poreuse sous charge répartie uniforme.	63
Figure III.6 :	Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes des bords dans une poutre RC poreuse renforcée au P-FGM sous charge répartie uniforme.	65
Figure III.7 :	Contraintes d'interface de la poutre BA renforcée avec une plaque P-FGM pour différentes valeurs E_a sous charge répartie uniforme.	68
Figure III.8 :	Influence de la longueur de la région non renforcée sur les contraintes de bord pour une poutre en BA avec une plaque de P-FGM collée sous une charge répartie uniforme.	70
Figure III.9 :	Effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes interfaciales de la poutre en BA renforcée avec une plaque poreuse P-FGM sous charge répartie uniforme.	72
Figure IV.1 :	Planification d'une analyse [45].	76
Figure IV.2 :	Détails de renforcement, (a) dimensions de la section transversale de la poutre (b) bandes horizontales ; (c) feuille enveloppée en U [51].	82
Figure IV.3 :	Modèles d'éléments finis, (a) configuration des éléments, (b) conditions limites, (c) et (d) poutres renforcées.	83

Listes des figures

Figure IV.4 :	Résultats de la charge par rapport à la flèche à mi-portée.	85
Figure IV.5 :	Comparaison entre la charge ultime expérimentale et la charge ultime numérique à mi-portée pour toutes les poutres.	87
Figure IV.6 :	Comparaison entre la déflexion ultime expérimentale et la déflexion ultime numérique à mi-portée pour toutes les poutres.	87
Figure IV.7 :	Déplacement nodal dans la direction Y (U_y) en mm.	88
Figure IV.8 :	Répartition des contraintes du CB en (MPa) .	90
Figure IV.9 :	Répartition des contraintes du SBTH EN en (MPa).	92
Figure IV.10 :	Répartition des contraintes du SBUW en (MPa).	95
Figure IV.11 :	Propagation des fissures dans la poutre CB avec différents incréments de charge.	96
Figure IV.12 :	Propagation des fissures dans la poutre SBTH avec différents incréments de charge.	97
Figure IV.13 :	Propagation des fissures dans la poutre SBUW avec différents incréments de charge.	98
Figure IV.14 :	Impact de l'orientation des fibres sur la performance des poutres	101
Figure IV.15 :	Modes de rupture de la demi-poutre de contrôle CB-60	102
Figure IV.16 :	Modes de rupture de la demi-poutre renforcée.	104
Figure IV.17 :	Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP vertical à 90°) sur la performance des poutres.	106
Figure IV.18 :	Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP incliné à 45°) sur la performance des poutres.	106
Figure IV.19 :	Profils de fissures dans les poutres au moment de la fissuration et plastification des modèles : a,b pour le modèle EF CB-90, c,d pour modèle EF CC-90-3/049, et e,f pour le modèle EF CC-45-3/049 .	108
Figure IV.20 :	Illustration des modèles de fissuration ultime des poutres : a pour le modèle EF CB-90, b pour le modèle FE CC-90-3/049 et c pour le modèle EF CC-45-3/049.	109
Figure IV.21 :	Résultats du post-traitement EF du modèle CB-60 en MPa.	113
Figure IV.22 :	Résultats du post-traitement EF du modèle CC-90-3/049 en MPa.	114
Figure IV.23 :	Résultats du post-traitement EF du modèle CC-45-3/049 en MPa.	116

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1 :	Propriétés des résines thermodurcissables de la matrice FRP [80, 83].	25
Tableau II.2 :	Propriétés typiques du CFRP [92], du BFRP [92], du GFRP [93] et d'AFRP [93].	27
Tableau II.3 :	Propriétés mécaniques des FRP [79].	29
Tableau III.1 :	La fonction de distribution de la porosité non uniforme Ω .	50
Tableau III.2 :	Propriétés géométriques et matérielles.	57
Tableau III.3 :	Comparaison des contraintes d'interface (MPa).	60
Tableau III.4 :	Effet de la porosité sur les contraintes interfaciales de la poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse de FGM sous une charge distribuée uniforme.	60
Tableau III.5 :	Effet du degré d'homogénéité sur les contraintes d'interface d'une plaque de FGM poreuse sous une charge uniforme distribuée.	62
Tableau III.6 :	Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes des bords dans une poutre RC poreuse renforcée au P-FGM sous charge répartie uniforme.	64
Tableau III.7 :	Contraintes interfaciales de la poutre BA renforcée avec une plaque P-FGM pour différentes valeurs E_a sous charge répartie uniforme.	67
Tableau III.8 :	Influence de la longueur de la zone non renforcée sur les contraintes de bord pour une poutre en béton armé avec une plaque d'appui P-FGM collée sous une charge uniforme répartie.	69
Tableau III.9 :	Effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes interfaciales de la poutre en BA renforcée par une plaque poreuse en P-FGM sous une charge uniforme répartie.	71
Tableau IV.1 :	Description des poutres en béton armé sélectionnées pour l'analyse.	81
Tableau IV.2 :	Vérification des résultats entre les modèles expérimentaux et les modèles développés par la méthode des éléments finis.	85
Tableau IV.3 :	Désignation des modèles.	99
Tableau IV.4 :	Effet de l'orientation des fibres sur la performance des poutres.	100
Tableau IV.5 :	Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP vertical à 90°).	105
Tableau IV.6 :	Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP incliné à 45°).	105
Tableau IV.7 :	Analyse numérique des contraintes du béton et des armatures en acier aux poin	111

Liste des abréviations

RS	: Réaction sulfatique.
RSI	: Réaction sulfatique interne.
RSE	: Réaction sulfatique externe.
FRP	: Polymères renforcés de fibres.
CFRP	: Polymères renforcés par les fibres de Carbone.
GFRP	: Polymères renforcés par les fibres de Verre.
BFRP	: Polymères renforcés par les fibres de basalte.
AFRP	: Polymères renforcés par les fibres d'aramide.
NSM	: Monté près de la surface.
EB	: Techniques de collage externe.
FGM	: Matériau fonctionnellement graduée.

Liste des notations

α_0	: Porosité.
V_{pores}	: Volume des pores.
V_{total}	: Volume total du matériu.
E_c	: Module de Young de la surface supérieure.
E_m	: Module de Young de la surface inférieure.
Ω	: Type de la porosité.
N	: Indice de loi de puissance.
ζ_1	: Coefficient de porosité.
Q_{ij}	: Constantes élastiques.
A_{ij} et D_{ij}	: Rigidité de la plaque.
$[A_{ij}]$: Matrice de membrane.
$[A'_{ij}]$: Matrice inverse.
K_s	: Rigidité au cisaillement de l'adhésif.
G_a	: Module de cisaillement de l'adhésif.
t_a	: Epaisseur de l'adhésif.
b_2	: Largeur de la plaque de composite
t_1, t_2	: Hauteurs respectives des adhérentes 1 et 2
y_1	: Distance à partir du bas de l'adhérent 1 à son centre de gravité

y_2	: Distance à partir du haut de l'adhérent 2 à son centre de gravité
I_1	: Moment d'inertie
N_1, N_2	: Forces longitudinales résultantes pour les adhérents 1 et 2, respectivement
$M(x)$: Moment de flexion
$u_1(x)$ et $u_2(x)$: Déplacements longitudinaux à la base de la surface à adhérer 1 et au sommet de la surface à adhérer 2.
$\varepsilon_1(x)$: Déformation de la poutre en BA
$\varepsilon_2(x)$: Déformation du composite.
$\tau(x)$: Contrainte de cisaillement.
$\sigma(x)$: Contraintes normales

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, la durabilité et la résistance des structures en béton armé sont des préoccupations majeures. Face aux défis posés par les charges excessives associées au changement d'utilisation de la structure, des erreurs de conception ou de construction, d'une maintenance inadéquate et de l'exposition à des conditions environnementales sévères, le renforcement des ouvrages en béton armé tels que les ponts devient indispensable pour garantir leur performance à long terme.

Les éléments structuraux en béton armé, tels que les dalles et les poutres, peuvent se rompre en flexion ou en cisaillement. Cependant, la rupture en cisaillement est soudaine, fragile, et plus catastrophique que les ruptures en flexion. Parmi les diverses méthodes de renforcement disponibles, l'utilisation de matériaux composites émerge comme une solution prometteuse et innovante. L'utilisation de matériaux composites dans le renforcement des poutres de ponts offre une solution efficace et durable pour prolonger la vie des infrastructures existantes et augmenter leur capacité sans les inconvénients associés aux matériaux traditionnels. Ces technologies continuent d'évoluer, offrant des possibilités toujours plus innovantes pour le secteur de la construction et de l'ingénierie civile.

Le renforcement en flexion des poutres en béton armé consiste à coller des plaques en matériaux composites sur les faces en tension à l'aide d'adhésifs époxy. Dans plusieurs cas pratiques, cette méthode s'est révélée très efficace. Cependant, les essais au laboratoire ont montré que les caractéristiques de l'interface béton-plaque influencent directement le développement de la pleine capacité de renforcement de ces plaques. Ainsi, le décollement prématuré de la plaque peut limiter considérablement cette capacité. Donc, il est nécessaire de bien comprendre le mécanisme des contraintes d'interface entre le béton et le composite. En fait, le comportement de l'interface entre le composite et le béton est d'une importance cruciale pour déterminer le moment où la défaillance se produit et l'efficacité avec laquelle le composite est utilisé dans les applications de génie civil. La plupart des travaux de recherche précédents se sont concentrés sur le renforcement des poutres en béton armé (BA) avec des tissus/lamelles en FRP liées à l'extérieur [30, 31, 137-154], tandis que les contraintes d'interface dans les poutres en BA renforcées par des plaques en FGM poreuse liées à l'extérieur a été peu exploré.

De plus, le renforcement en cisaillement des poutres en béton armé a été commencé depuis des années 1990. Les chercheurs ont alors commencé à réaliser des tests sur la résistance au cisaillement des poutres en béton et sur les moyens d'augmenter leur capacité de cisaillement à l'aide de matériaux FRP collés extérieurement. Parmi les différents types de

matériaux FRP, le CFRP se distingue par sa résistance à la traction relativement plus élevée et ses propriétés de fatigue supérieures sous charge cyclique, en plus de sa grande rigidité par rapport aux plaques d'acier. En outre, il offre une résistance exceptionnelle à la corrosion et est facile à fabriquer directement, sans nécessiter de main-d'œuvre ou d'équipement spécialisé.

De nombreux chercheurs ont publié des modèles analytiques et des équations de conception de cisaillement afin de prédire l'augmentation de la capacité de cisaillement due à l'utilisation de matériaux FRP collés extérieurement [136, 157, 176-181]. Ces études ont clairement établi que ces poutres renforcées échouent en cisaillement principalement selon l'un des deux modes suivants : la rupture en traction du FRP ou le décollement du FRP des côtés de la poutre en béton armé, en fonction de la manière dont la poutre est renforcée.

Les méthodes courantes de renforcement comprennent le collage latéral, l'enveloppe en U, enveloppé en U avec ancrage et complètement enveloppé. Des bandes de FRP ainsi que des feuilles continues ont été utilisées. Les fibres dans le FRP peuvent également être orientées selon différents angles. Les données expérimentales disponibles indiquent que presque toutes les poutres renforcées par enveloppement ont échoué en raison de la rupture du FRP. Certaines poutres renforcées par enveloppe en U ont également échoué selon ce mode. En revanche, presque toutes les poutres renforcées uniquement par collage latéral, et la plupart de celles renforcées par enveloppe en U, ont échoué en raison du décollement du FRP. **La figure 1** montre les zones de décollement possibles pour les enveloppes en U et les plaques latérales. Une fois que le FRP commence à se détacher, la poutre peut se rompre très rapidement. La ductilité des poutres qui se rompent dans ce mode est généralement très limitée [136].

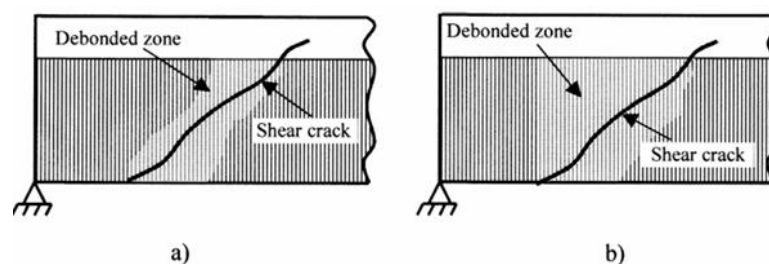


Fig.1 Rupture par cisaillement due au décollement du FRP : (a) FRP collé latéralement ; et (b) enveloppe en U du FRP [136].

La plupart des publications disponibles sur le renforcement en cisaillement à l'aide de FRP sont basées sur des expériences [50, 155-176]. La modélisation numérique des poutres en béton armé renforcées en cisaillement par FRP à l'aide de méthodes d'éléments finis (EF) a reçu peu d'attention dans la recherche. Les lacunes de recherche dans la modélisation numérique par éléments finis pourraient être dues à la complexité de la modélisation du

mécanisme de fissuration en cisaillement dans le béton. La simulation du décollement entre les laminés en FRP et les surfaces en béton représente la majorité des défis de modélisation par éléments finis.

Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants :

1. Développement d'un modèle analytique amélioré afin de prédire les répartitions des contraintes d'interfaces dans une poutre renforcée par des matériaux composites avancés collés lié à l'extérieur , en prenant en compte l'effet de la porosité qui peut se produire à l'intérieur des matériaux FGM lors de leur fabrication. Par la suite, nous examinerons l'impact des différents paramètres sur ces contraintes.
2. Développement d'un modèle numérique (EF) pour simuler le comportement des poutres en béton armé renforcées par le composite CFRP vis-à-vis des efforts de cisaillement . Le modèle élément finis permettra de capturer le comportement et de prédire la réponse de certains spécimens testés. Ensuite, une étude paramétrique a été menée pour examiner l'effet de certains paramètres sur la réponse structurelle des poutres en BA renforcées par le composite CFRP.

Afin d'atteindre les objectifs visés dans cette étude, nous avons divisé notre travail en quatre chapitres, une introduction générale et une conclusion.

Le premier chapitre se concentre exclusivement sur la présentation des diverses pathologies du béton et de leurs origines, ainsi que sur les différentes techniques utilisées pour le renforcement et la réparation des poutres-ponts.

Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature sur les divers matériaux composites.

Dans **le troisième chapitre**, un développement mathématique est proposé pour calculer les contraintes d'interface dans une poutre en béton armé renforcée par le collage de plaques de matériaux composites avancés.

Enfin, **le chapitre quatre** présentera les résultats de la modélisation numérique en utilisant un logiciel d'éléments finis (ANSYS). Nous commencerons par le processus de validation du modèle d'éléments finis en le comparant aux résultats expérimentaux ; puis, nous présenterons les différents résultats trouvés pour analyser le comportement des poutres en béton armé renforcées par le composite CFRP.

En conclusion générale, une synthèse des résultats obtenus est présentée, soulignant les principaux acquis et ouvrant la voie à de futures perspectives de recherche dans ce domaine.

Chapitre I

Généralité sur les problèmes structuraux dans les ponts
et les techniques de renforcement.

I.1. Introduction

Afin de répondre aux exigences actuelles et futures, les besoins d'amélioration et de réparation des structures lourdes en béton, telles que les ponts, augmentent sans cesse. Certaines de ces demandes futures à satisfaire sont par exemple : l'extension de la durée de vie d'une structure ainsi que la résistance à l'augmentation des charges de trafic et de la capacité de charge. En trouvant une méthode pour maintenir ou améliorer une structure, sa durée de vie augmentera et l'extraction des ressources naturelles sera minimisée, à condition que la sécurité et la fonction requise de la structure puissent être assurées par la technique de renforcement choisie. En outre, plusieurs arguments expliquent pourquoi les structures en béton existantes devraient être améliorées et renforcées plutôt que démolies et remplacées par de nouvelles structures. Les deux arguments les plus forts concernent les aspects économiques et environnementaux. En outre, la nécessité de renforcer une structure existante peut être causée par des phénomènes tels que la dégradation et la détérioration des matériaux qui peuvent affecter la capacité portante d'une structure [1].

Ce chapitre vise à exposer les différentes méthodes utilisées pour renforcer ou réparer les éléments d'un ouvrage d'art en béton armé, en mettant l'accent sur les poutres-ponts. Tout d'abord, nous présentons une vision générale des ponts. Par la suite, on expose un aperçu des pathologies qui affectent les constructions en béton. Les techniques de renforcement et les procédures générales de réparation sont abordées dans la dernière partie du chapitre.

I.2. Présentation générale des ponts

I.2.1. Définition

Les ponts sont des structures essentielles du système de transport routier utilisé pour surmonter les obstacles tels que les rivières, les canaux et les routes [2]. En d'autres termes, un pont est une structure destinée à transporter le trafic routier ou d'autres charges mobiles au-dessus d'une dépression ou d'un obstacle tel qu'un canal, une route ou une voie ferrée [3].

I.2.2. Composants du pont

Le pont se compose d'une dalle de tablier, d'une superstructure, d'un appui et d'une sous-structure (pilier, culée et fondation), comme le montrent **la figure I.1** [4].

I.2.2.1. Superstructure

Il s'agit d'une dalle, d'une poutre, d'une poutrelle, etc. Elle supporte la charge qui passe sur elle et transmet les forces qui en découlent aux sous-structures [3].

I.2.2.2. Appuis

Les appuis transmettent la charge reçue du tablier à la sous-structure et sont prévus pour répartir la charge uniformément sur le matériau de la sous-structure qui peut ne pas avoir une force portante suffisante pour supporter directement la charge de la superstructure [3].

I.2.2.3. Structure de base

Ceci comprend les piles et culées, les murs en retours et leurs fondations [3].

- Piliers et culées : Il s'agit de structures verticales supportant un tablier destiné à transmettre la charge jusqu'au sol par l'intermédiaire des fondations.
- Murs de retour : Elles sont prévues dans le prolongement des culées pour retenir la terre de la pente d'approche qui, autrement, a un angle de repos naturel.
- Fondation : Il s'agit de transmettre la charge des piliers ou des culées et des murs de retour aux éléments et de répartir uniformément la charge sur le terrain.

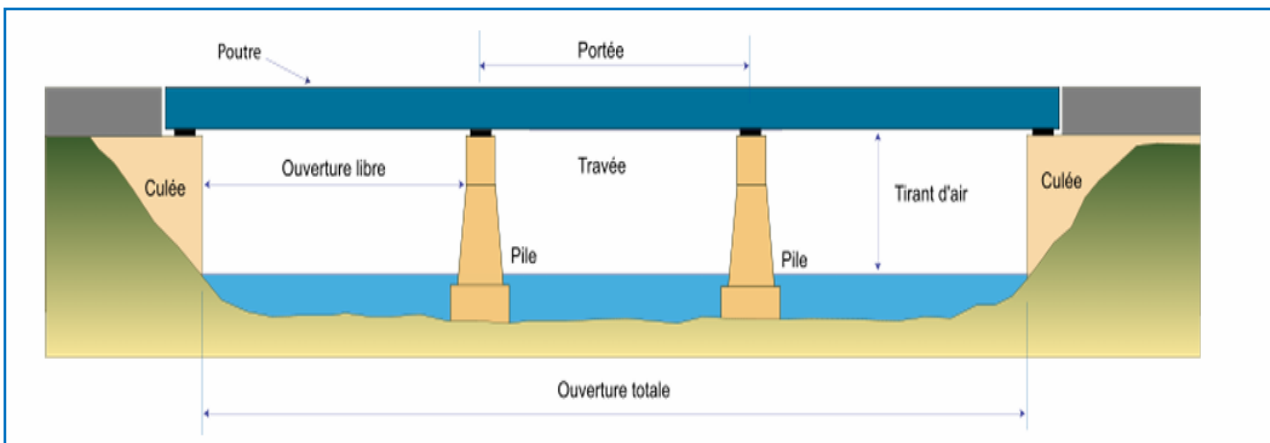


Figure I.1 : Présentation d'un pont [62].

Les raisons qui conduisent à la détérioration et à l'endommagement des ponts existants sont pratiquement les mêmes partout dans le monde. Les plus importantes sont énumérées ci-dessous :

- Augmentation des trafics et du poids des véhicules, en particulier de leur charge par essieu, par rapport à la période de conception et de construction du pont.
- Influence négative de la pollution environnementale, en particulier atmosphérique et des masses d'eau, sur les performances des matériaux de construction.
- Des matériaux structurels de mauvaise qualité, ainsi que des équipements de pont tels que des joints de dilatation, des supports, des couches d'étanchéité, etc.
- Programme d'entretien limité et niveau d'entretien insuffisant. Un état de négligence envers les signes de désordre ou l'ignorance des signes préliminaires de désordre.

Dans tous ces cas, le pont peut être structurellement insuffisant ou fonctionnellement obsolète, voire les deux à la fois. Des mesures correctives peuvent donc être prises en fonction de chaque cas. Il peut s'agir d'une réparation, d'un remplacement, d'une réhabilitation, d'un renforcement ou d'une modernisation [5].

I.3. Pathologie des bétons

I.3.1. Mécanisme de carbonatation

La carbonatation est un phénomène nuisible qui attaque directement les armatures en acier et affecte par conséquent la ductilité des structures en béton armé. Ce phénomène modifie dans un premier temps la microstructure du béton et provoque ensuite la corrosion des armatures, ces modifications réduisent la ductilité et entraînent une réduction de la capacité sismique des structures en béton armé. Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air à l'état gazeux pénètre dans le béton par sa porosité ou par ses fissures. En présence d'eau (qui existe au moins dans les plus petits pores), il provoque une réaction chimique appelée carbonatation avec le ciment en pâte hydraté). Cette réaction transforme les hydrates, en particulier l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en carbonate de calcium CaCO_3 .

L'un des résultats de cette réaction est la composition de nouvelles particules d'eau, qui permettent de poursuivre le processus d'hydratation du ciment pas encore hydraté, en obtenant de nouveaux hydrates et en augmentant la composite du béton. Cette carbonatation est alors une réaction chimique bénéfique au béton car elle comble les vides, empêchant ainsi ou du moins réduisant la pénétration d'agents extérieurs agressifs [6].

I.3.1.1. Paramètres affectant la carbonatation

Un certain nombre de facteurs ont un impact sur la carbonatation du béton, ce qui entraîne une accélération de sa cinétique. Ces paramètres sont les suivants [7] :

- La porosité.
- La quantité de minéraux capables de réagir avec le CO_2 .
- La quantité de CO_2 .
- L'humidité relative.
- La température.
- L'alternance de cycles d'humidification – séchage.

I.3.2. Attaque des Sulfates

La réaction sulfatique (RS), qu'elle que soit interne ou externe, est l'une des maladies les plus graves associées au béton. La réaction sulfatique interne (RSI) est entraînée par la forte chaleur d'hydratation du ciment dans les pièces massives (semelle, raidisseur de pile, chevêtre, etc.), entraînée par un bétonnage par temps chaud (température supérieur à 35°). Les sulfates

dans la réaction sulfatique externe (RSE) proviennent de sources extérieures au béton, comme les eaux de mer et les eaux séléniteuses (Eau qui contient du sélénite : sulfate de calcium CaSO_4), ils réagissent chimiquement avec les autres éléments du béton pour produire de l'anhydrite produit qui s'hydrate en gypse secondaire et réagit avec les aluminates de calcium pour produire l'ettringite (Une substance expansive pathogène qui se forme plusieurs années après la prise du béton et provoque sa fissuration), dont la cristallisation crée des pressions importantes qui peuvent causer la ruine du béton [8].

I.3.3. Corrosion induite par les chlorures

L'attaque par les chlorures est l'une des principales causes de la corrosion de l'acier dans le béton armé. La principale source d'ions chlorure (Cl^-) sont les sels de déglçage ou l'eau de mer. Le ciment, l'eau, les agrégats et parfois les adjuvants peuvent également favoriser la présence de chlorure dans le béton. Les chlorures pénètrent dans le béton par le réseau de pores et les microfissures, formant un film d'oxyde sur l'acier d'armature et accélérant ainsi la réaction de corrosion et la détérioration du béton. La passivité de l'acier est cassée lorsqu'une quantité suffisante de chlorures est présente dans la structure des pores. Le mécanisme de corrosion des armatures dans le béton dû à l'attaque des chlorures est essentiellement un processus électrochimique par lequel la couche de passivation de l'acier est perdue par la formation de microcellules à la surface de l'acier par les ions de chlorure [9].

I.3.4. Gel dégel

Le cycle de gel-dégel est une cause majeure de dommage au matériau de construction tel que le béton. Les dommages causés par le gel et le dégel se produisent lorsque l'eau remplit les vides d'un matériau rigide et poreux, puis gèle et se dilate. Le volume d'eau gelée est 9 % supérieur à celui de l'eau liquide. Ainsi, lorsque l'eau gèle, une pression est exercée sur le matériau environnant et lorsque la pression dépasse la résistance à la traction du matériau, des fissures se produisent. Au cours de ce processus, les vides s'agrandissent, permettant l'accumulation d'eau supplémentaire lors du prochain dégel ; cela entraîne des fissures supplémentaires lors du prochain gel [10].

I.3.5. Fissuration

La fissuration est l'un des problèmes les plus graves affectant les structures en béton. Une fissure est définie comme une séparation de pièces. Les fissures sont identifiées en fonction de leur largeur comme suit [11] :

- Fissure capillaires – moins de 0,1 mm
- Etroite – ≥ 0.1 mm et < 0.3 mm.
- Moyen – ≥ 0.3 mm et < 1.0 mm

- Large – ≥ 1.0 mm

I.3.5.1. Causes de la fissuration

Dès que la déformation en traction ou en cisaillement imposée dépassera la limite de déformation en traction ou en cisaillement du béton, des fissures seront observées. Il existe plusieurs mécanismes qui peuvent entraîner de telles déformations, tels que [12] :

- Les vibrations produites à l'intérieur du béton lors du retrait. L'expansion ou la contraction se produit lorsque la température varie ou que le plastique se détache.
- La croissance d'un matériau immergé dans le béton. Comme pour la corrosion de l'armature en acier ou le gonflement du béton causé par la réaction entre les alcalis et les granulats.
- Les contraintes sont causées par des conditions externes telles que les charges ou les déformations.

I.3.5.2. Réparation de fissures

Toutes les fissures doivent être réparées. Les fissures $\geq 0,2$ mm doivent être injectées sur toute la profondeur avec une résine époxy approuvée. Les fissures de retrait sur le pourtour des patchs seront injectées. Les fissures doivent être temporairement calfeutrées pour empêcher la pénétration de tout contaminant lorsqu'il n'est pas prévu que des réparations soient effectuées dans les 90 jours suivant les dommages. Les fissures peuvent nécessiter un rinçage s'il existe des signes de contamination.

Les ports d'injection doivent être amovibles et de type insert. La capacité de pression des ports d'injection doit être au moins égale à la pression de fonctionnement maximale de la pompe. Tous les ports d'injection doivent être équipés de bouchons ou d'autres moyens mécaniques de fermeture sous pression. L'espacement entre les ports sur toute la longueur de la fissure ne doit pas dépasser 150 mm. Les ports doivent être alternés d'un côté à l'autre de la fissure pour les fissures sur toute la profondeur. Un liant de mortier époxy doit être appliqué entre les ports d'injection pour sceller temporairement la surface de la fissure. Le scellant temporaire doit être capable de contenir le système de résine injectée. Le gel doit durcir avant de procéder au jointoiment.

Les fissures inférieures à 0,2 mm doivent être colmatées deux fois en appliquant sur 150 mm de large un scellant pénétrant approuvé. Cependant, pour les poutres extérieures, les exigences en matière de scellant pénétrant doivent être omises lorsque les surfaces doivent être recouvertes d'un scellant pigmenté [11].

I.4. Objectif de la réparation / renforcement du pont

En utilisant une métaphore, le réseau routier qui sert aux activités socio-économiques nationales telles que la logistique, les voyages et les communications, est comparé au réseau vasculaire d'un corps humain (**Figure I.2**). Pour maintenir un corps humain en bonne santé, les gens peuvent vérifier leur condition physique quotidiennement, recevoir des conseils de leur médecin périodiquement et maintenir leur condition physique en bonne santé, et parfois recevoir un traitement médical ou subir une intervention chirurgicale.

Il en va de même pour l'infrastructure routière dans le domaine de la logistique. Par conséquent, l'infrastructure routière est essentielle pour l'économie de ce pays.

Les ponts sont des éléments importants de l'infrastructure routière. Les ponts qui traversent les rivières sont des éléments essentiels du réseau routier qui contribuent grandement au développement national et à la vie quotidienne des gens. Les dommages ou les effondrements de ponts peuvent mettre en danger la vie des usagers de la route et avoir de graves influences sur l'ensemble du pays. En outre, la reconstruction des ponts nécessite beaucoup d'argent et de temps.

La durée de vie d'une structure est une période pendant laquelle elle conserve le niveau de performance requis. La durée de vie dépend en grande partie de la conception, de la qualité de la construction, avec ou sans la mise en œuvre de mesures de réparation et de renforcement.

La santé de la structure est réduite par l'âge, mais sa durée de vie peut être prolongée par un entretien approprié. La maintenance a donc un effet significatif sur le niveau de performance et la durée de vie de la structure.

Il est important, pour prolonger la durée de vie, de procéder à une inspection systématique en fonction du type de structure, de la fonction prévue et du niveau de performance requis, ainsi que de détecter les dommages à un stade précoce, d'en diagnostiquer la cause, d'estimer l'évolution future des dommages et de les réparer de manière préventive. Il est également important d'accumuler les données recueillies au cours des activités de maintenance [\[13\]](#).

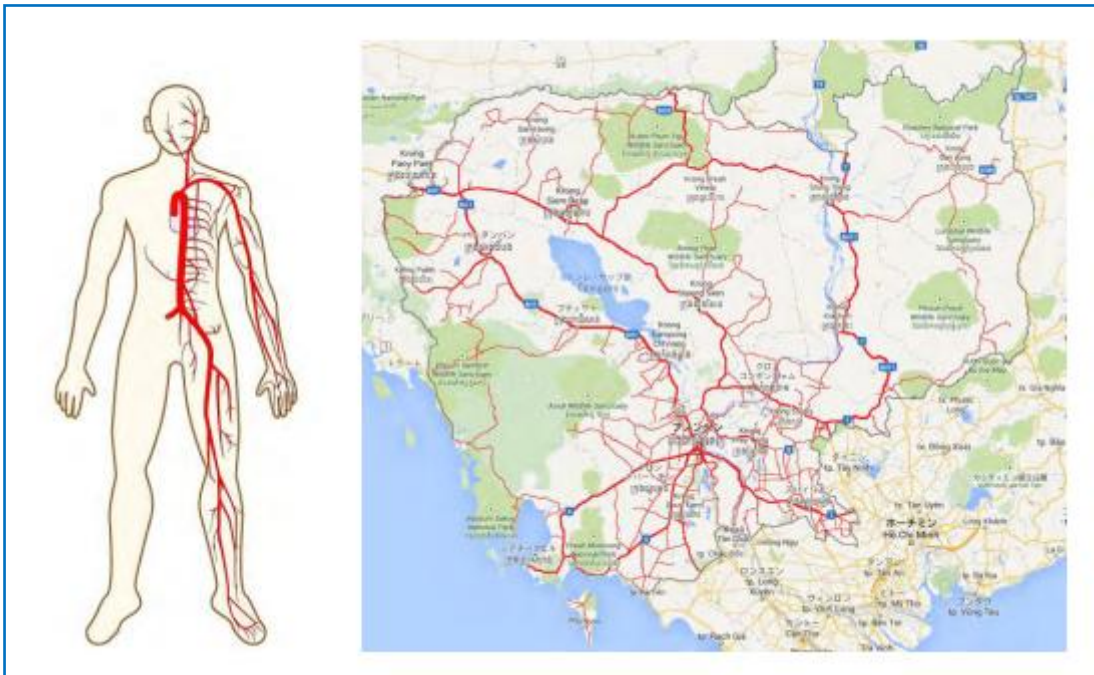


Figure I.2 : Le réseau routier est équivalent aux veines du sang [13].

I.5. Techniques de réparation et de renforcement

Les termes renforcement et réparation sont parfois utilisés de manière interchangeable pour décrire une action, mais ils ne sont pas identiques. Le renforcement est l'ajout d'une capacité de charge supérieure à celle prévue dans la conception d'origine. La réparation est le rétablissement de la capacité de charge au niveau de la conception d'origine.

Le renforcement d'un pont est nécessaire lorsque le facteur de charge critique d'un pont est inférieur à 1,0 ou lorsque le rapport d'inspection du pont indique des problèmes de qualité.

Les projets de réparation de ponts sont généralement limités à des parties isolées du pont et répondent à des besoins spécifiques tels que des problèmes de sous-structure et des dommages dus à des chocs. Voici quelques exemples [14] :

- Semelles ou poteaux.
- Pile.
- Dommages aux poutres.

Dans de rares cas, des circonstances atténuantes peuvent justifier l'absence de critères de conception ou des critères de conception réduits. Dans ce cas, une dérogation approuvée à la conception est nécessaire.

Les méthodes suivantes sont recommandées pour renforcer les poutres de pont en béton armé en flexion et en cisaillement proposés dans les études de recherche, c'est-à-dire c'est-à-dire les méthodes établies de l'état de l'art et de la pratique [14].

I.5.1. Élargissement de la section

L'ajout de profondeur et de largeur aux poutres peut augmenter la capacité de flexion et de cisaillement. Les détails de l'armature de cisaillement d'interface sont importants pour assurer un comportement composite de la section entre le nouveau et l'ancien béton. Des goujons en acier peuvent être utilisés pour réaliser la section composite en perçant des trous dans le support en béton existant, en installant des barres d'armature ou des boulons et en ancrant les goujons en acier avec de la résine époxy. Pour les éléments de pont qui nécessitent un élargissement de la section avec une couverture de béton de moins de 101.6 mm d'épaisseur et qui sont situés dans une zone maritime, envisager d'utiliser des ancrages pour cloisons sèches en plastique ou des ancrages à vis en acier inoxydable pour obtenir une section composite [14].

I.5.2. Post-tension

La post-tension est un moyen actif de restaurer ou d'augmenter la capacité de flexion, de cisaillement et d'ancrage des éléments structurels du pont. Veiller à ce que la force due à la post-tension ne soit pas excessive afin d'éviter des fissures imprévues.

Lorsque la précontrainte longitudinale est utilisée dans le cadre d'un système de renforcement, il faut comprendre que la relaxation à long terme du système de précontrainte peut réduire l'efficacité du renforcement. Tenir compte de tout relâchement à long terme, à moins qu'une disposition prévoyant un resserrement ultérieur ne soit incluse. Lorsque les éléments structuraux renforcés sont situés dans un environnement corrosif, il convient d'envisager l'utilisation de barres, de torons et d'assemblages d'ancrage à haute résistance à la corrosion. L'utilisation de conduits résistants à la corrosion remplis de coulis pour enrober les torons est également une option [14].

I.5.3. Techniques de collage externe

Il s'agit de la méthode la plus répandue pour le renforcement des poutres en béton armé. Dans cette méthode, le matériau de renforcement est fixé à la surface externe de la poutre à l'aide d'un matériau adhésif approprié ou d'une attache mécanique. L'un des avantages de cette méthode par rapport à d'autres techniques est qu'il n'est pas nécessaire d'enlever des parties en béton ou de percer la section, ce qui facilite l'application et réduit le risque d'exposer ou d'endommager l'armature existante [15,16]. Un autre avantage est qu'il protège le béton de la pièce et l'acier d'armature contre la pénétration de l'eau et des sels, et donc contre la corrosion et la détérioration. Cependant, la performance de l'élément renforcé dépend fortement de la liaison entre le béton et le matériau de renforcement [15].

Les composites à base de polymères renforcés de fibres (FRP) se présentent sous la forme de stratifiés précurés ou de feuilles de fibres à poser à la main. L'application de ces dernières offre

plusieurs avantages tels que la facilité de collage sur des surfaces courbes ou irréguliers, la légèreté et le fait que les fibres peuvent être orientées dans n'importe quelle direction [17]. Plusieurs exemples de réparations de ponts sont décrits par le Comité ACI 440 (2008). L'utilisation d'un emballage continu en CFRP est illustrée dans la figure I.3. L'utilisation de feuilles intermittentes de CFRP tissées pour augmenter la capacité de cisaillement des poutres réparées et pour protéger les poutres est illustrée aux figures I.3, I.4 [18].



Figure I.3 : Poutres réparées à l'aide d'un enrobage continu en CFRP (Photo : Toenjes, 2005) [18].



Figure I.4 : Poutres renforcées à l'aide de feuilles de CFRP tissées par intermittence [18].



Figure I.5 : Exemples de réparation de dommages accidentels à l'aide de la technologie FRP [17].

I.5.4. Système monté près de la surface

Cette méthode a été présentée pour la première fois en 1940. Il s'agit d'une technique de construction qui incorpore des barres de FRP dans la surface du béton afin d'améliorer les performances de la structure en béton armé. Bien qu'initialement des câbles en acier aient été utilisés dans le cadre du processus de renforcement, ils ont été remplacés par la suite par des

matériaux FRP en raison de la corrosion de l'acier. Le matériau FRP est généralement utilisé sous forme de barres à section rectangulaire (bandes) ou circulaire (barres), fabriquées par le procédé de pultrusion. Les barres peuvent être déformées, mais des études ont indiqué que les barres déformées ont une meilleure performance d'adhérence [15].

Le système de montage près de la surface consiste à découper des rainures peu profondes dans le substrat en béton existant et à encastrer l'armature entourée de résine époxy à l'intérieur de la rainure. Le NSM est moins sujet à la délamination, à la dégradation environnementale et permet une inspection efficace des surfaces en béton par rapport au système de mise en place par voie humide des CFRP. Il convient de considérer les matériaux de renforcement suivants pour les applications de montage près de la surface [14] :

- Barre à haute résistance.
- Barre en CFRP.
- Barre en acier inoxydable.

Le système NSM peut être utilisé pour renforcer la flexion, le cisaillement et l'ancrage des éléments structurels du pont. On peut envisager d'utiliser le système NSM pour les éléments de pont suivants [14]:

- Poutre de couronnement.
- Poutres.
- Tablier de pont.
- Pieds.

Le CFRP est un matériau à haute conductibilité qui peut développer une corrosion galvanique lorsqu'il est installé dans des éléments en béton renforcés par des barres d'armature en acier. Les détails de l'isolation électrique sont requis. Le CFRP a des propriétés linéaires jusqu'à la rupture. Pour éviter une rupture fragile, la déformation ultime de conception est limitée bien en dessous de la déformation de rupture, donc la force d'adhérence entre les barres de CFRP, la résine époxy et le béton est nécessaire pour développer la capacité de traction. D'autre part, les armatures métalliques ont une limite d'élasticité avec une déformation importante avant rupture et peuvent être pliées pour l'ancrage mécanique dans le substrat en béton [14].

La figure I.6 illustre la technique NSM par rapport à la technique EB. Les deux principaux avantages de cette méthode sont les suivants

(1) une plus grande force d'adhérence peut être obtenue par rapport à la méthode EB puisque le matériau de réparation est complètement enfermé dans l'époxy, ce qui signifie qu'une plus grande surface est collée.

(2) l'utilisation de moins de matériaux est nécessaire en raison du comportement amélioré de l'adhérence [15].

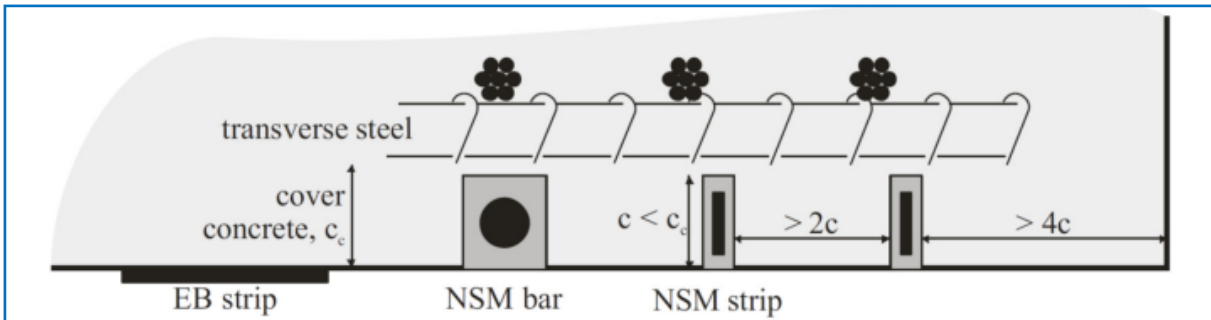


Figure I.6 : Schéma des barres EB et NSM et des bandes NSM pour le renforcement des membres en béton armé (RC) [15].

I.5.5. Renfort intégré

En outre, des études ont indiqué que dans la méthode NSM, un détachement du béton d'enrobage dans lequel l'armature NSM est utilisée peut se produire, ce qui empêche l'approche de réparation de fonctionner à pleine capacité. Ce phénomène est plus susceptible de se produire dans les poutres dont la section transversale est en forme de T ou de I. Par conséquent, il peut ne pas être possible d'utiliser pleinement la résistance à la traction du matériau de réparation à l'aide des méthodes NSM ou EB, à moins qu'un ancrage adéquat ne soit assuré. Cela a motivé une autre méthode qui consiste à encastrer les matériaux de renforcement à l'intérieur de la poutre, à savoir dans le noyau de béton, au-delà des rainures de recouvrement ou de surface, afin d'augmenter l'adhérence comme montré la figure I.7 [15].

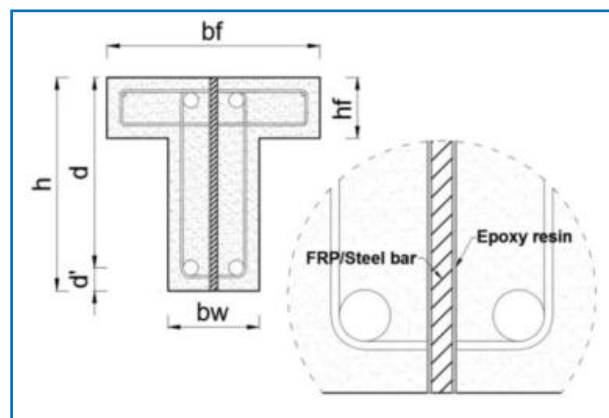


Figure I.7 : Schéma de la technique d'enrobage de l'armature profonde pour les poutres en T [15].

I.5.6. Autres systèmes de renforcement

Ne pas utiliser de plaques d'acier collées ou boulonnées fixées sur les côtés des poutres en béton pour les renforcer en cisaillement [7].

I.6. Procédure générale de réparation

Les principales étapes d'une procédure de réparation typique peuvent être résumées en huit étapes [15,19]:

- L'inspection et le contrôle.
- Prendre la première décision sur le choix d'un matériau de réparation
- Prendre la deuxième décision sur le choix de la méthode de réparation
- Préparation de la surface
- Conception des réparations
- Application de la réparation matériau.
- La précontrainte du matériau de réparation.
- Système de fixation

Un résumé de l'état de l'art et de la pratique pour chacune des huit étapes est présenté ci-dessous.

I.6.1. Inspection et contrôle

Ce contrôle peut être effectué périodiquement ou à l'usage, ou motivé par des rapports de dommages ou de charges extrêmes, afin de déterminer la gravité des dommages, leur cause et le diagnostic [15,20, 21]. La capacité de charge existante de la structure doit être déterminée. Toute faiblesse structurelle et ses causes doivent être identifiées. L'état du béton doit également être pris en compte. D'autres paramètres doivent également être spécifiés : les dimensions existantes des éléments de structure ; la taille et les causes des fissures et des éclats ; l'emplacement et l'étendue de toute corrosion de l'acier d'armature ; la présence de toute corrosion active ; la qualité et l'emplacement de l'acier d'armature existant ; la résistance à la compression sur place du béton. Ensuite, une décision est prise quant au type d'action nécessaire pour le pont, qui peut être : réparer, démolir, ou laisser en l'état et continuer à surveiller [15 ,22]. Pour prendre cette décision, les autorités responsables tiendront compte du coût et de la durabilité de la réparation par rapport à la démolition ou au remplacement.

I.6.2. Choix d'un matériau de réparation

Si une réparation est nécessaire, l'étape suivante consiste à choisir un matériau de réparation approprié. La disponibilité et la durabilité du matériau, la facilité de manipulation sur le chantier, la faisabilité financière, le type et l'état de l'élément structurel, et l'amélioration visée de la structure sont des facteurs à prendre en compte pour prendre cette décision [19,23].

I.6.3. Choix de la méthode de réparation

Une fois le matériau de réparation choisi, la décision suivante consiste à choisir la manière appropriée d'appliquer le matériau sur la poutre endommagée. Plusieurs facteurs influencent cette décision, notamment :

(1) Si la technique de réparation est disponible dans le commerce.

(2) La forme de la section transversale de la poutre est importante pour le choix de la technique de réparation.

(3) Par exemple, pour les poutres rectangulaires, la méthode de réparation la plus courante consiste à envelopper complètement l'élément. Pour les poutres en T, cependant, cette solution n'est pas pratique en raison de la présence de la table ou lourdis.

(4) La gravité des dommages qu'il peut réparer.

(5) Durée de la réparation typique.

(6) L'impact environnemental du processus de réparation.

Les méthodes d'application du matériau de réparation sur la poutre endommagée comprennent : les techniques de collage externe (EB), les techniques de montage près de la surface (NSM), et le renforcement enrobé [19, 23,24].

I.6.4. Préparation de la surface

La préparation de la surface, c'est-à-dire le nettoyage et la préparation de la surface des composites, est une étape critique du processus de réparation qui peut améliorer la résistance de l'adhérence. Une surface mal préparée peut entraîner un décollement ou une délamination du substrat en béton [19,25].

I.6.5. Conception de la réparation

La conception de la réparation est une étape importante pour s'assurer que le matériau de réparation choisi est appliqué dans une configuration qui peut fournir une résistance et une durabilité suffisantes. Différentes approches de conception peuvent être nécessaires en fonction du type de dommage, de son étendue, de la durabilité attendue de la réparation, de la disponibilité des ressources pour l'application de la réparation, etc. Dans le cas de l'utilisation de matériaux à base de FRP pour la réparation, les codes suivants peuvent être consultés ou adoptés pour fournir des recommandations sur la conception de la réparation [15] :

- Spécifications du guide AASHTO pour la conception de systèmes FRP collés pour la réparation et le renforcement des éléments de pont en béton (la dernière version est 2013).
- ACI 440.3R Guide Méthodes d'essai pour les polymères renforcés de fibres (PRF) pour le renforcement des structures en béton (la dernière version est 2012).

- Rapport ACI 440R sur le renforcement en polymère renforcé de fibres (PRF) pour les structures en béton (la dernière version est 2017).
- ISIS Design Manual No. 4, FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, publié par le Réseau canadien de centres d'excellence sur les systèmes de détection intelligents pour les structures innovantes (la dernière version date de 2008).

I.6.6. Application du matériau de réparation

L'étape suivante après la préparation de la surface est l'application du matériau de réparation. En fonction de l'approche de réparation utilisée, c'est-à-dire la technique EB, la méthode NSM ou le renforcement intégré, le matériau de réparation doit être appliqué de différentes manières et configurations [15,19].

I.6.7. Précontrainte du matériau de réparation (facultatif)

Pour augmenter l'efficacité de la réparation, le matériau des méthodes EB et NSM peut être précontraint. La précontrainte a été utilisée pour la première fois dans les années 1950 pour renforcer les ponts. Il permet à l'élément de supporter des charges plus élevées et de couvrir une plus grande longueur de portée grâce au moment négatif généré dans l'élément. C'est relativement rapide et cela peut se faire sans impact sur le trafic [15, 19, 27].

I.6.8. Système d'ancrage

Pour le cas de contrainte de cisaillement élevés, un système d'ancrage peut être utilisé afin de retarder le décollement du système de renforcement tel que les matériaux FRP. Un système d'ancrage approprié peut permettre l'utilisation d'un plan de renforcement qui, autrement, ne répondrait pas aux dispositions du code de conception, permettant au matériau de réparation de continuer à supporter la charge même après le décollement et augmentant ainsi sa contribution. Différents systèmes d'ancrage ont été introduits jusqu'à présent en fonction de l'approche de renforcement avec laquelle ils sont utilisés. Quelques exemples incluent : des bandes horizontales supplémentaires du matériau de réparation, l'intégration du matériau de réparation dans la table de la poutre à travers des rainures prédécoupées avec collage, divers systèmes d'ancrage mécanique impliquant des boulons et des plaques, et des ancrages textiles en forme d'éventail. **Figure I.8** présente un schéma des trois premiers systèmes, tandis que la figure I.9 montre une application réelle des bandes horizontales, qui constituent l'approche la plus courante. **Figure I.8 (a, b)** illustre un ancrage textile typique en forme d'éventail, tandis que la Figure I.10 montre une application réelle des ancrages à l'interface entre l'âme et la table inférieure d'une poutre en béton armé [15,19].

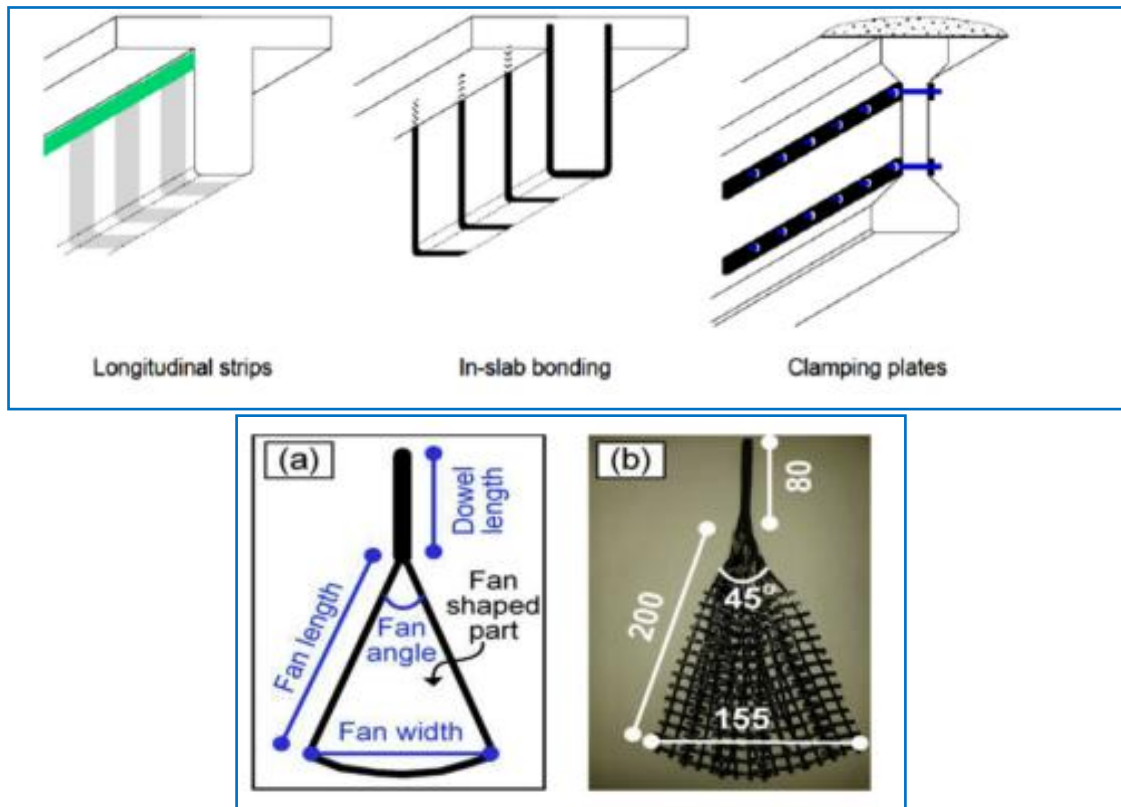


Figure I.8 : Schéma des méthodes d'ancrage courantes [15,30].



Figure I.9 : Système d'ancrage d'extrémité à l'aide de bandes de CFRP ou de verre FRP (GFRP) [15,19, 28]



Figure I.10 : Chevilles d'ancrage en CFRP insérées dans des trous à l'intérieur de la surface du béton [15,19].

I.7. Conclusion

Les méthodes traditionnelles pour le renforcement des poutres en béton armé sont limitées en raison de nombreux désavantages. Néanmoins, l'utilisation de techniques de renforcement par matériaux composites permet d'obtenir des performances améliorées avec moins de ressources et une mise en œuvre simplifiée. Le Japon est le pays qui emploie le plus ce procédé actuellement, afin de préserver les bâtiments et les ouvrages d'art du risque de destruction lors d'un séisme.

En Algérie, l'introduction des fibres de carbone a été lancée en 1998 et peu d'applications ont été mises en place. Cependant, il est nécessaire de renforcer les infrastructures pour faire face aux modifications du trafic (risque de choc, augmentation des charges et de leurs fréquences) [29].

Chapitre II

Bibliographique sur les matériaux composites

II.1. Introduction

Dans le génie civil, les matériaux composites jouent un rôle crucial dans l'amélioration de l'intégrité structurelle, de la durabilité et de la fonctionnalité de divers projets d'infrastructure. Ces composites combinent généralement deux ou plusieurs matériaux dotés de propriétés distinctes pour créer un effet synergique qui dépasse les capacités des composants individuels à eux seuls. Par exemple, les polymères renforcés de fibres (FRP) sont couramment utilisés dans le renforcement des structures en béton, offrant une résistance élevée à la traction et à la corrosion. De même, les composites en fibre de carbone sont utilisés dans la construction de ponts pour leur rapport résistance/poids exceptionnel, contribuant ainsi à des structures plus légères mais robustes. De plus, les matériaux composites peuvent être adaptés à des conditions environnementales spécifiques, telles que la résilience sismique ou la résistance aux intempéries, ce qui les rend indispensables à la modernisation et à la durabilité des projets de génie civil dans le monde entier.

Les matériaux avancés ont périodiquement attiré l'attention et ont fait l'objet de recherches approfondies pour remplacer les métaux et leurs alliages, offrant ainsi des propriétés mécaniques supérieures en plus d'être légers.

Depuis les années 1960, la littérature fait état de tentatives de recherche sans succès sur les matériaux gradués, en raison d'une méthode de fabrication et d'une technologie peu sophistiquées [69].

Les idées sur le développement des FGM prévues dans la conception de composants structurels fonctionnant à des températures élevées ont fait l'objet d'une demande importante de la part de divers secteurs. En fonction des applications, les FGM sont classées en gradient de matériau ou gradient chimique, en gradient de porosité et en gradient microstructural, comme le montre la figure II.1 [70].

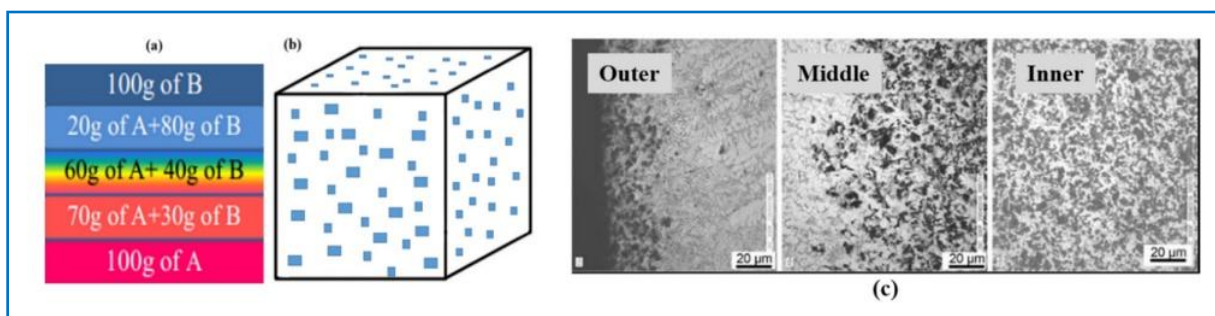


Figure II.1 : Types de FGM (a) Gradient de matière (b) Gradient de porosité (c)Gradient microstructural de Al-SiC Graphite FGM [70,71]

II.2. Polymère renforcé de fibres (FRP) :

Les matériaux composites peuvent être définis comme des matériaux résultant de la contribution de deux ou plusieurs composants ou constituants. Les FRP sont utilisés depuis des décennies dans l'aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile et d'autres domaines [72]. L'utilisation initiale des polymères renforcés de fibres (FRP) a été connue comme barres de renforcement en 1975, en particulier en Russie [73]. Les composites FRP ont été développés comme renforts internes, par exemple des barres d'armature pour renforcer les structures en béton précontraint et non précontraint aux États-Unis depuis le début des années 1960, ainsi qu'en Europe et au Japon [74]. Les renforts en FRP ont fait l'objet d'une attention particulière au Japon dans les années 1990 grâce à la recherche sur les structures de support des trains à sustentation magnétique [75]. Depuis lors, de nombreux chercheurs ont étudié les composites FRP comme solution alternative de renforcement, de réhabilitation et de modernisation [76]. Les FRP sont principalement des renforts extérieurs (EB) ou intérieurs, par exemple des barres d'armature. Ces deux techniques sont utilisées pour renforcer plusieurs types de structures à l'aide de différentes méthodes [77]. La résistance à la traction des FRP est environ 10 fois supérieure à celle de l'acier et leur poids représente environ 25 % de celui de l'acier [74, 78-81], voir la figure II.2.

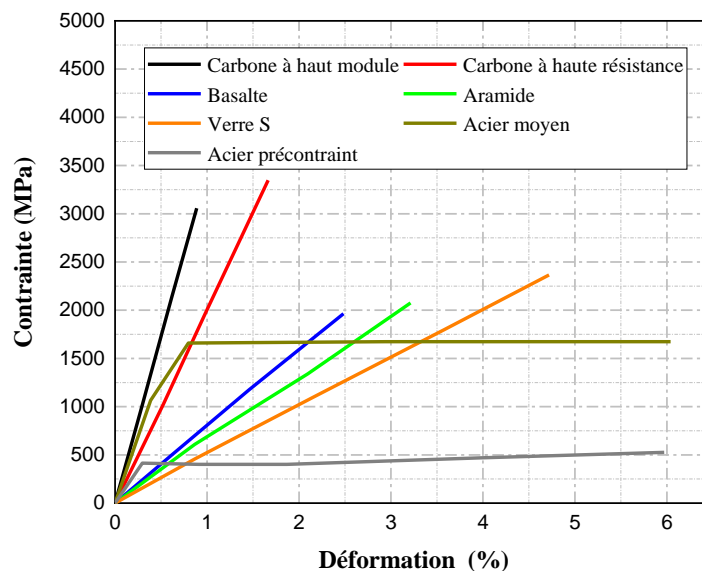


Figure II.2 : Courbes de contrainte-déformation pour divers matériaux [80-81].

II.2.1. Constituants des FRP

Les produits FRP sont des matériaux composites constitués de fibres continues imprégnées de résines polymères. En clair, des fibres continues à haute résistance et à haute rigidité sont intégrées dans une matrice polymère à faible module. Les fibres de renforcement représentent l'ossature du matériau qui détermine la résistance et la rigidité dans le sens des fibres. La matrice joue donc un rôle de protection physique et environnementale [72, 82].

II.2.1.1. Matrice

La résine sert d'agent d'interface dans les composites FRP et est connue sous le nom de matrice ou époxy. Les polymères thermodurcissables et thermoplastiques sont les résines les plus populaires [81, 83]. Le choix des types de résines au cours du processus de production est essentiel car il affecte les propriétés mécaniques des composites. Pour le génie civil, on préfère les thermodurcissables aux thermoplastiques, car ces derniers ont une faible résistance au fluage et à la chaleur. Les résines thermodurcissables, par exemple les époxydes, les esters vinyliques et les polyesters, présentent une constance thermique et une résistance aux produits chimiques adéquats et supportent un faible fluage et une réduction des contraintes, comme l'illustre le manuel de conception ISIS 2007 [72, 84] (voir **Tableau II.1**). En outre, les FRP comportent des fibres et une matrice, voir la **figure II.3 j**. Les fibres ont pour fonction de supporter les charges appliquées, tandis que la matrice a pour fonction d'assurer la cohérence des fibres, la transition préalable des charges appliquées aux fibres et la protection des fibres contre un environnement difficile [81, 85].

Tableau II.1 : Propriétés des résines thermodurcissables de la matrice FRP [80, 83].

	Densité spécifique	Résistance à la traction MPa	Module de traction GPa	Retrait de polymérisation %
Epoxy	1.2–1.3	55–130	2.75–4.1	1–5
Ester vinylique	73–81	1.12–1.32	3–3.35	5.4–10.3
Polyster	1.1–1.4	34.5–103.5	2.1–3.45	5–12

II.2.1.2. Types de FRP

La matrice est généralement renforcée par des fibres de carbone, de verre ou d'aramide, et le polymère est généralement une résine imprégnée, un polyester époxy ou un vinylester. De plus, les matériaux FRP ont quatre types principaux : le polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP), le polymère renforcé de fibres de verre (GFRP), le polymère renforcé de

fibres de basalte (BFRP) et le FRP le moins utilisé qui est le polymère renforcé de fibres d'aramide (AFRP), voir la figure II.3 [81,86,87].

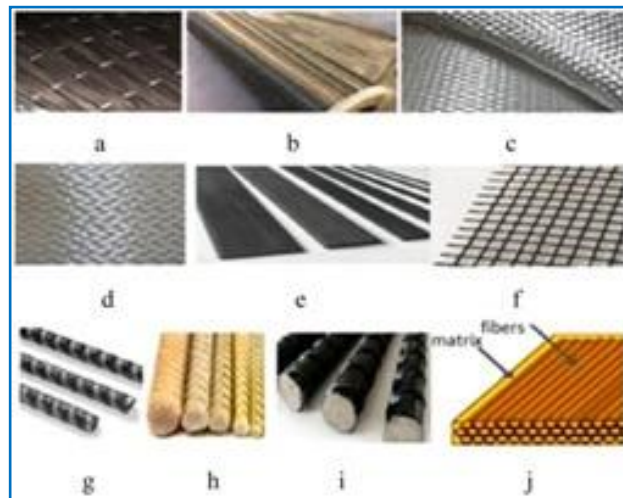


Figure II. 3 : Composites FRP : a) Feuille en CFRP, b) Feuille en BFRP, c) Feuille en GFRP, d) Feuille AFRP, e) Stratifié en CFRP, f) Feuille en CFRP, G) Barres d'armature BFRP, h) Barres d'armature en GFRP i) Barres d'armature en CFRP, j) Géométrie typique du FRP [81,84].

II.2.1.2.1. CFRP

La fibre de carbone a un diamètre de 5 à 10 μm . Les fibres sont principalement composées d'atomes de carbone qui s'assemblent en cristaux plus ou moins alignés le long de l'axe long de la fibre, car la disposition des cristaux offre un rapport résistance-volume élevé [80,88]. Le CFRP présente une résistance à la traction et un rapport résistance/poids très élevés et est extrêmement léger et résistant (**voir tableau II.2**). Le CFRP possède également un module ultra-élastique semblable à celui de l'acier, ce qui lui confère une place de choix dans les secteurs de l'aérospatiale et de l'infrastructure. La fibre de carbone assure la résistance des composites en CFRP, tandis que la matrice est généralement une résine polymère, telle que l'époxy, qui maintient les barres ensemble [80, 81, 89]. Les CFRP sont utilisés pour renforcer les éléments structurels soumis à des charges cycliques, car ils augmentent la charge ultime et réduisent la déflexion [81,87]. La principale raison du développement des CFRP est la modernisation et le renforcement des structures afin d'éviter le remplacement ou la démolition des structures déficientes [81,90]. Les principaux avantages de l'utilisation du CFRP pour le renforcement des structures en béton armé sont le rapport résistance/poids élevé, le module de traction élevé qui se traduit par un comportement ductile de la structure, et le fait qu'il soit largement disponible sous différentes formes telles que les feuilles, les laminés, les barres d'armature et les bandes. Le

principal inconvénient est que le CFRP est très coûteux par rapport aux autres types de FRP [91].

Tableau II.2 : Propriétés typiques du CFRP [92], du BFRP [92], du GFRP [93] et d'AFRP [93].

Nom commercial	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime en traction	Elongation (%)
CFRP				
Barre en V	1596	120	0.013	
Aslan	2068	124	0.017	
Ligne de front	2250	147	0.015	
Nefmac	1200	100	0.012	
BFRP				
Barre de Rock	1000	50		2.24
BCR	1100	70		2.2
GFRP				
Barre en V	710	46.4	0.015	
Aslan	690	40.8	0.017	
Nefmac	600	30	0.02	
AFRP				
Kevlar	43-70	2.3-3.4		1.4-4
Technora	70	3.3		4.3
Twaron	79	3		3.3
Heracron	123	2.8		2

II.2.1.2.2. BFRP

Les fibres de basalte sont des matériaux constitués de fines fibres d'un diamètre d'environ 10-20 μm . Ces substances sont composées de minéraux tels que le plagioclase, le pyroxène et l'olivine [81,92,94, 95]. Le BFRP est une alternative économique au CFRP [81, 96]. Grâce à sa matrice polymère, le BFRP présente une meilleure rigidité, une meilleure conductivité thermique, une meilleure solidité, une meilleure résistance à la chaleur et à la corrosion [97]. Le BFRP est également connu pour sa grande résistance à la traction, à l'allongement à la rupture et aux alcalis (voir le tableau II.2). Le module d'élasticité du BFRP dépend principalement de la capacité chimique et de la conformation de chaque fibre BFRP [95,98, 99]. Le BFRP peut être utilisé pour renforcer les éléments soumis à des charges cycliques, mais il peut provoquer une rupture fragile après avoir atteint un niveau de

résistance élevée [100]. L'avantage commun du BFRP est qu'il présente une résistance élevée et un coût relativement faible par rapport au CFRP. Le principal inconvénient est que le BFRP a un module de traction relativement faible, ce qui conduit à un élément structurel non ductile, ce qui constitue l'un des plus gros problèmes de FRP lorsqu'il s'agit d'éléments structurels à l'exception du CFRP [98,101, 103].

II.2.1.2.3. GFRP

Le plastique renforcé de fibres de verre est constitué de fibres de verre, qui sont normalement ajoutées au composite à raison de 0,5 à 2,0 % en poids. Le GFRP est considéré comme un composé plastique qui utilise la fibre de verre principalement pour améliorer la résistance et la rigidité du plastique (voir le tableau II.2) [104]. En raison de la disponibilité du GFRP et de sa rentabilité, il est utilisé dans l'industrie civile depuis les années 1930 [106]. La qualité des GFRP dépend des types de matrice polymère, de la teneur en fibres, des fibres de renforcement, de l'orientation des fibres et de la liaison entre la matrice et les fibres [107].

Le GFRP est considéré comme un excellent isolant et un matériau de renforcement peu coûteux [108]. La résistance du GFRP peut augmenter de 40 à 100 % lorsque l'épaisseur des plaques est supérieure à 6,35 mm en utilisant un système d'ancrage aux deux extrémités de la plaque [109]. La durée de vie en fatigue des poutres en béton armé soumises à des charges cycliques augmente de manière significative si les plaques composites en GFRP sont collées à l'extérieur [87]. Le GFRP est principalement utilisé comme matériau de renforcement pour les structures secondaires, notamment les ponts, les bâtiments, les structures de bâtiments ou les éléments non structurels tels que les murs en maçonnerie. Le principal avantage du GFRP est son faible coût par rapport aux autres types de FRP. En revanche, le principal inconvénient est que son module de traction est très faible et qu'il n'est pas recommandé de l'utiliser comme renforcement principal pour les éléments structurels [110].

II.2.2. Propriétés mécaniques des composites FRP

Les composites FRP sont utilisés dans un large éventail d'applications. Leurs propriétés mécaniques confèrent des avantages distincts au produit dans lequel ils sont formés. Ces matériaux possèdent des propriétés mécaniques exceptionnelles telles que la résistance aux chocs, la solidité, la rigidité, la flexibilité et la capacité à supporter des charges. Par conséquent, un produit composite est fabriqué avec des propriétés mécaniques supérieures, notamment la rigidité au cisaillement, la traction, le module de flexibilité, une résistance élevée aux chocs et une résistance élevée à la fatigue [80,111]. Les propriétés des FRP pour les types les plus couramment utilisés sont énumérées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques des FRP [79].

Classes	Limite d'élasticité (MPa)	Densité (g/cm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Densité spécifique	Module élastique (GPa)	Déformation à la rupture %
Acier	500	7.70-8.10	350-450	7.8	200	0.2
AFRP	1700-2500	1.28-2.60	1720-2540	1.38-1.39	41-125	1.9-4.4
GFRP	600-1400	2.11-2.70	480-1600	1.5-2.5	35-51	1.2-3.1
BFRP	1000-1600	2.15-2.70	1035-1650	2.7-2.89	45-59	1.6-3
CFRP	1755-3600	1.55-1.76	1720-3690	1-1.1	120-580	0.5-1.9

II.2.3. Limites des composites FRP

Le renforcement en flexion et en cisaillement à l'aide de composites FRP se développe progressivement dans l'industrie des structures. Cependant, le renforcement par FRP présente certaines limites qui sont énumérées ci-dessous [80] :

- La principale propriété caractéristique des FRP est leur résistance élevée à la traction, qui peut être plus de dix fois supérieure à celle de l'acier normal. Cependant, le décollement des FRP est un problème qui conduit à une déformation plus faible des FRP sous charge. Ce problème réduit la capacité du composite FRP. Le décollement peut se produire au niveau de la plaque d'extrémité ou à mi-portée et pour l'éviter, une limite de conception doit être appliquée à la contrainte de cisaillement de l'adhérence ou à la déformation de traction du FRP ($\varepsilon_{fe} < 0,004$).
- Le coût de la technique FRP est relativement élevé par rapport aux approches traditionnelles.
- La technique des FRP présente des inconvénients liés à l'importance du travail et à la complexité des détails. Tout défaut dans les étapes d'application des FRP entraîne une réduction de la capacité du composite FRP à renforcer les poutres en béton armé. Par exemple, la préparation de la surface du béton est un facteur clé pour une application réussie des FRP.
- L'application de FRP à haute température peut entraîner des pertes de résistance et une augmentation de la déflexion, car l'adhésif qui lie le FRP à la surface du béton est affecté par la température élevée. À une température supérieure à la transition vitreuse (T_g), l'adhésif commence à se ramollir et perd une partie de sa résistance à la traction.

- Le fluage est également l'une des limites des FRP. Il est négligeable dans le cas d'un renforcement sans précontrainte, mais dans le cas d'une application avec précontrainte, il est considéré comme une faiblesse.
- Les limites sont notamment l'absence de normes restreintes pour la conception des FRP.
- Comparée à la résistance sur toute la longueur des fibres, la résistance des FRP dans une direction perpendiculaire aux fibres est extrêmement faible (jusqu'à 5 %).

II.3. Matériaux à gradient de propriétés (FGM)

Le FGM est une catégorie spéciale de matériaux composites qui a été développée pour la première fois au Japon vers 1984 pour le système de transmission et la cellule des avions spatiaux [112-115]. Le défi consistait à créer une barrière thermique capable de résister à une température de 1000 °C sur une section transversale de 10 mm. Dans un matériau composite traditionnel, une interface tranchante entre la matrice et le renfort provoquerait des fissures à haute température. Les fissures se produisent en raison de la génération de contraintes interfaciales induites par le décalage de la dilatation thermique entre deux matériaux différents. Le FGM introduit une transition graduelle et progressive à l'interface de deux matériaux différents, évitant ainsi les interfaces tranchantes. Ils se caractérisent par une variation spatiale de la composition ou des microstructures dans le volume d'un matériau, contribuant ainsi aux changements correspondants dans les propriétés du matériau en fonction de ses performances fonctionnelles. Par exemple, un FGM renforcé de métal-céramique peut résister à des environnements à haute température en combinant les meilleures propriétés des deux matériaux. La contrainte thermique aux endroits critiques peut être contrôlée [112].

Les FGM sont apparues comme un moyen d'améliorer les performances et la durabilité des matériaux composites par rapport aux composites renforcés de manière homogène, principalement en raison de la convergence efficace évitant les zones tranchantes du composite. Un gradient continu est obtenu dans les deux cas, sur la base de la densité de distribution des constituants/phases qui varie continuellement dans la matrice. D'autres classifications des FGM sont apparues au cours du temps en raison de la croissance de diverses applications et technologies permettant de produire des FGM à différentes échelles. Les FGM fabriquées par les concepteurs sont généralement classées en fonction de la combinaison des constituants : céramique/métal, céramique/céramique, métal/métal et céramique/polymère, la céramique/métal étant la combinaison de matériaux la plus couramment utilisée (**figure II.4**) [113].

Les FGM céramique/métal, qui contiennent des alliages métalliques (matrice) et des phases secondaires (céramiques), sont classés en fonction de leur composition, d'une phase céramique à une phase métallique. Ces FGM ont acquis une grande importance en raison de leur capacité à tirer parti de propriétés mécaniques améliorées telles que la dureté, la résistance, la facilité de fabrication, la dureté et l'amélioration des résistances thermique, à l'usure et à la corrosion. Les FGM réduisent également les contraintes thermiques développées et présentent une meilleure liaison entre les phases, ce qui permet d'améliorer la résistance à la rupture et la dureté le long du volume gradué [113,116].

L'intérêt pour les FGM a augmenté de façon exponentielle en raison de leur potentiel diversifié de fabrication de produits personnalisés qui sont des candidats idéaux pour des variantes uniques d'applications de haute technologie, telles que les industries aérospatiale, automobile, bio-ingénierie et nucléaire.

Les exemples naturels les plus importants de structures fonctionnellement graduées sont les parties du corps humain, telles que les os, les dents et la peau, car ces parties ont des propriétés de dureté et de ductilité graduées, en plus des tissus biologiques des animaux et des arbres [117,118]. Les figures II.5 et II.6 montrent certains exemples naturels et certaines applications techniques exigeant des FGM des propriétés lisses. Un excellent exemple de l'utilisation des FGM est la dent et plus particulièrement les couronnes dentaires. Elle a besoin d'une ductilité élevée sur la surface interne pour éviter la fatigue et la fragilité, tandis qu'elle a besoin d'une dureté élevée sur la surface externe pour éviter l'usure [117,119].

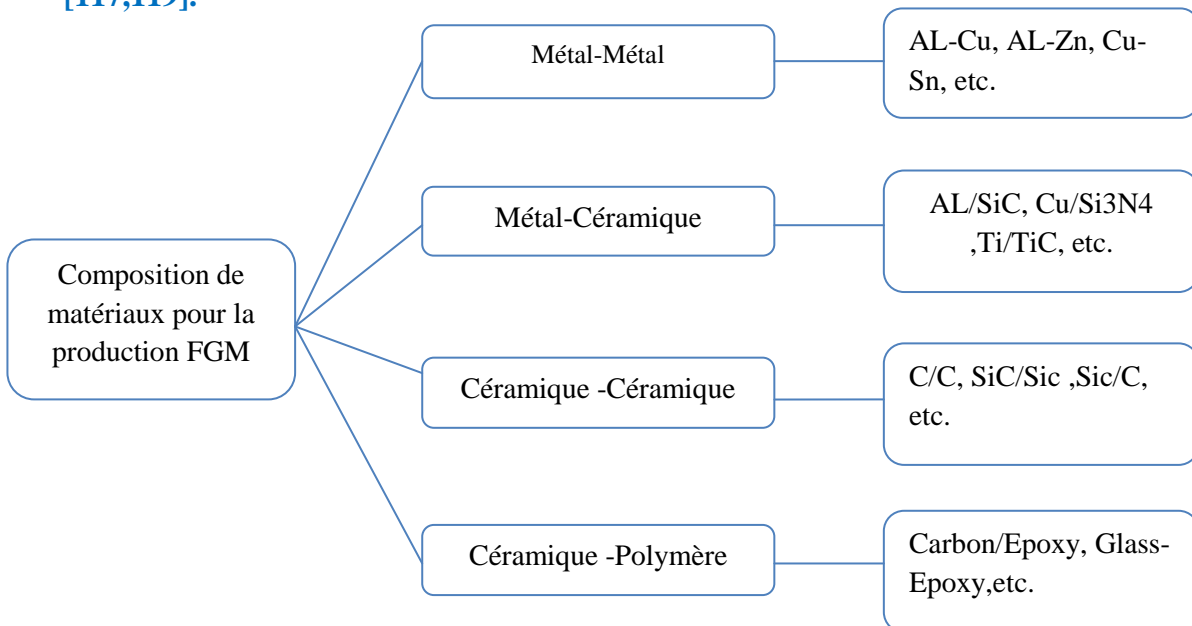


Figure II. 4 : Combinaisons préférées de matrices et de particules utilisées dans les FGM [113].

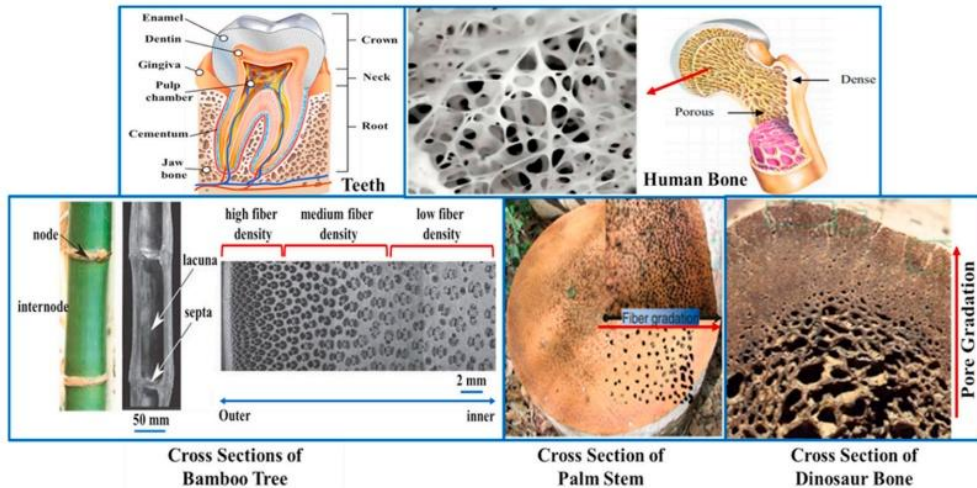


Figure II. 5 : Quelques exemples naturels de FGM contenant des structures aux propriétés graduelles [117,120].

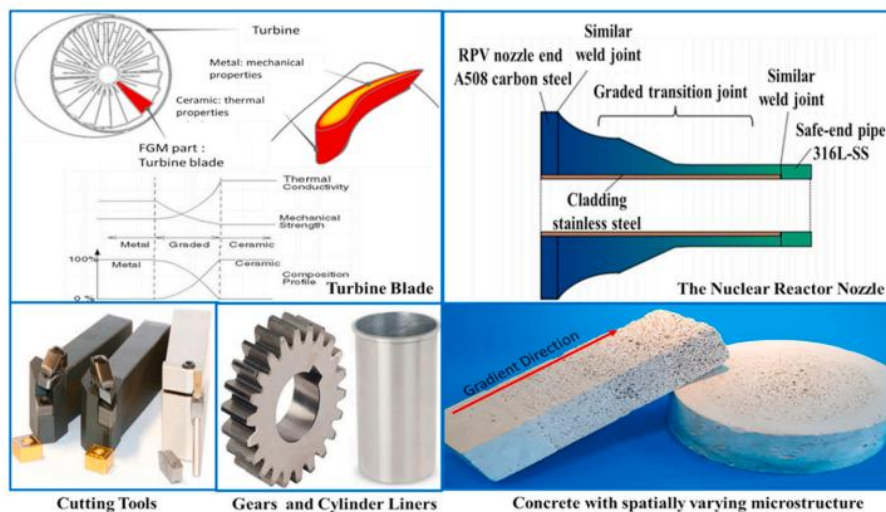


Figure II.6 : Quelques exemples réels de FGM nécessitant des structures aux propriétés graduelles [117,121].

Les propriétés des FGM peuvent être modifiées en fonction de diverses applications. Par exemple, pour les applications biomédicales, la surface externe des dents est un matériau résistant à l'usure, tandis que la structure interne des dents est ductile, ce qui permet d'absorber les chocs et d'améliorer la durée de vie des dents. De même, un os humain dont la structure présente des propriétés variables a été conçu pour répondre aux exigences du service. Le principal avantage structurel des FGM par rapport aux composites traditionnels est leur résistance aux ruptures dues à des interfaces tranchantes, puisqu'elles ont été éliminées par l'inclusion progressive de matériaux secondaires dans les matériaux existants [122].

En conséquence, le nombre de publications dans ce domaine d'étude a augmenté de façon exponentielle au cours des 20 dernières années. **La figure II.7** montre les étapes et la chronologie de l'évolution périodique des MGF [113].

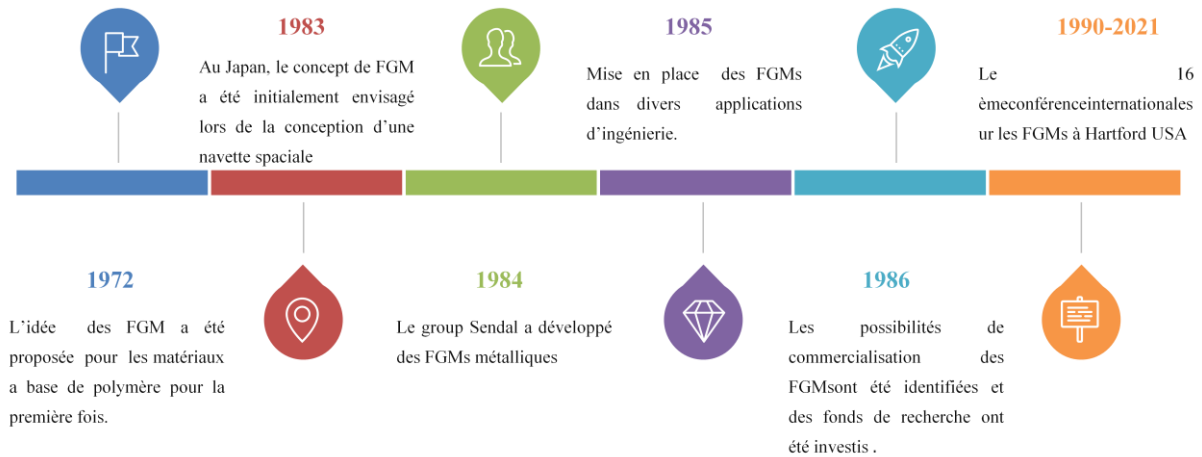


Figure II.7 : Échelle d'évolution des matériaux à gradation fonctionnelle et ses étapes [113].

II.3.1. Avantage des FGM

Les principaux avantages de l'utilisation des FGM sont :

- Réduction des contraintes thermiques.
- Réduction des contraintes thermiques aux endroits critiques.
- Diminution des transitions de contrainte brusques à l'interface.
- Réduction du facteur d'intensité de contrainte (force motrice pour la propagation de fissure).
- Augmentation de la force de liaison interfaciale.

II.3.2. Inconvénients des FGM

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants :

• **Coût** : Les matériaux composites hauts performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en échange de matériaux plus performants. Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût.

• **Conception et analyse** : Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux conventionnels. Elles nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures. L'hétérogénéité impose l'analyse selon au moins deux points de vue. La micro mécanique examine l'interaction des constituants à l'échelle microscopique. La macro mécanique suppose que le composite est homogène et s'intéresse aux propriétés apparentes du matériau. Les matériaux anisotropes nécessitent plus de propriétés mécaniques que les matériaux isotropes pour établir les relations contrainte-déformation (les lois de comportement). Ces propriétés sont déterminées selon les directions principales du pli élémentaire (directions parallèle et perpendiculaire à l'orientation des fibres).

• **Assemblage** : Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, la redistribution des contraintes autour des sites de concentration telle que le trou est moins efficace. La résistance et la rigidité d'un stratifié ne peuvent pas toujours être entièrement transférés par un joint. Le trou est donc souvent renforcé par des inserts métalliques ou par l'augmentation de l'épaisseur du stratifié dans la partie trouée [123]. De tels renforcements entraînent du poids supplémentaire pour la structure. Le problème d'assemblage est donc critique pour le succès de l'emploi des matériaux composites.

• **Tolérance aux dommages** Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable. En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer l'impact car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent, les structures métalliques ont tendance de se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure. Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont le programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages [124].

II.3.3. Domaines d'application des FGM

Les matériaux fonctionnellement gradués (FGM) sont des matériaux innovants qui présentent des variations contrôlées de leurs propriétés physiques ou chimiques à travers leur structure, généralement sur une échelle microscopique. Cette gradation des propriétés peut être conçue pour répondre à des exigences spécifiques dans différentes parties d'une pièce ou d'un composant [125].

L'utilisation des matériaux FGM est très diversifiée et peut être trouvée dans divers domaines, notamment :

- **Ingénierie des matériaux** : Les FGM sont utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques, thermiques ou électriques des matériaux. Par exemple, dans les matériaux composites où la composition chimique varie graduellement pour améliorer la résistance ou la conductivité.
- **Aérospatiale** : Les FGM sont utilisés dans la fabrication de composants aérospatiaux pour réduire le poids tout en maintenant la résistance et la durabilité. Par exemple, dans les pales de turbines où la gradation des matériaux peut améliorer la résistance à la fatigue.
- **Biomatériaux** : Dans le domaine biomédical, les matériaux FGM sont utilisés pour fabriquer des implants qui s'adaptent mieux aux propriétés mécaniques des tissus biologiques environnants. Cela peut réduire les risques de rejet ou de complications postopératoires.
- **Électronique** : Les FGM sont utilisés dans la fabrication de dispositifs électroniques avancés, tels que les microprocesseurs et les semi-conducteurs, pour améliorer les performances thermiques et électriques.
- **Génie civil** : Dans la construction, les matériaux FGM peuvent être utilisés pour améliorer la résistance des structures aux contraintes environnementales, telles que les changements de température ou les charges mécaniques variables.
- **Défense** : Dans la demande de défense, tels que des plaques de blindage et des gilets pare-balles, la pénétration des matériaux résistants est nécessaire. Une des caractéristiques les plus importantes du matériau à gradient fonctionnel est la capacité à inhiber la propagation des fissures, ce qui rend les matériaux à gradient fonctionnel appropriés pour les applications de défense.

En résumé, les matériaux fonctionnellement gradués offrent des avantages significatifs dans de nombreux domaines en permettant une optimisation précise des propriétés matérielles pour répondre aux exigences spécifiques des applications.

II.4. Comparaison des matériaux FGM et les matériaux traditionnels

Le modèle le plus simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient de propriétés (FGM) et les matériaux plus conventionnels sont représentées dans la Figure II.8. Le matériau plan composé à une caractéristique plane, et le matériau relié a une frontière sur l'interface de deux matériaux. Les FGM ont d'excellentes caractéristiques qui diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FG attirent l'attention, notamment par leur application dans les domaines industriels puis qu'ils sont une double propriété des deux matières premières qui sont mélangées ensemble, et la distribution composante est graduée sans interruption. Par exemple, l'indice qui se compose du métal et de la céramique a la caractéristique de la conductivité thermique et de la force métallique dans le cotée métal et la résistivité aux hautes températures dans le cotée céramique.

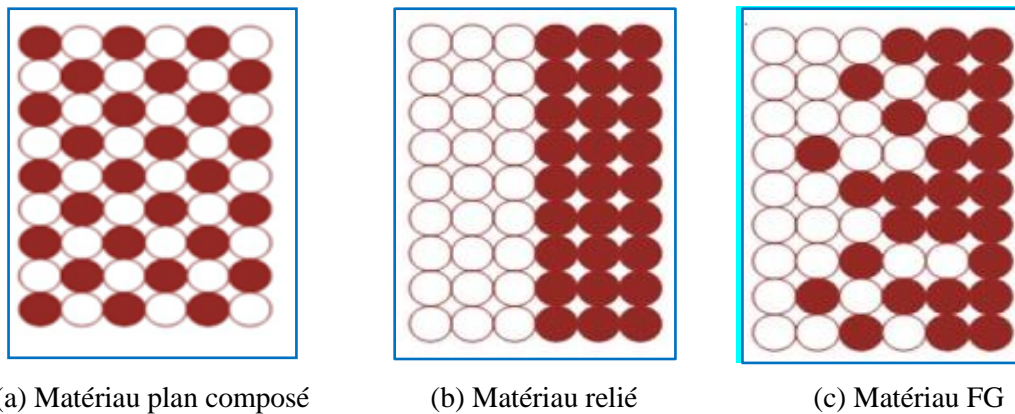


Figure II.8 : Distribution des composantes des matériaux.

II.5. Matériaux impropres (poreux)

II.5.1. Définition de la porosité

D'après le glossaire international d'hydrologie, la porosité se réfère à la capacité la capacité d'un milieu, d'un sol ou d'une roche à avoir des pores, En d'autres termes, des espaces vides interconnectés ou non. On peut la définir comme la totalité des cavités (pores) d'un matériau solide, qui sont remplies par des fluides (liquides ou gaz). La porosité peut également être définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux [126-128].

$$\alpha_0 = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (II.1)$$

Avec : α_0 est la porosité, V_{pores} le volume des pores et V_{total} le volume total du matériau, c'est-à-dire la somme du volume de solide et du volume des pores.

Ainsi, on peut définir la porosité à la fois comme un élément particulier d'un milieu poreux et comme un indicateur qui l'exprime de manière quantitative (rapport de volumes, sans dimension).

Selon cette définition, on peut voir l'imperfection de porosité dans un matériau composite comme de très petites cavités qui semblent emprisonner de la matière gazeuse (tâches noires sur la figure II.9 (a)).

Schoeller [127] fait une distinction entre deux catégories de pores illustrées dans la figure II.9(b) :

- Les porosités ouvertes sont constituées de vides interconnectés reliés à l'extérieur du matériau.
- Les porosités sont fermées et isolées à l'intérieur du matériau, ce qui restreint leur perméabilité.

Les pores pénétrants se caractérisent par leur capacité à relier au moins deux faces du matériau poreux.

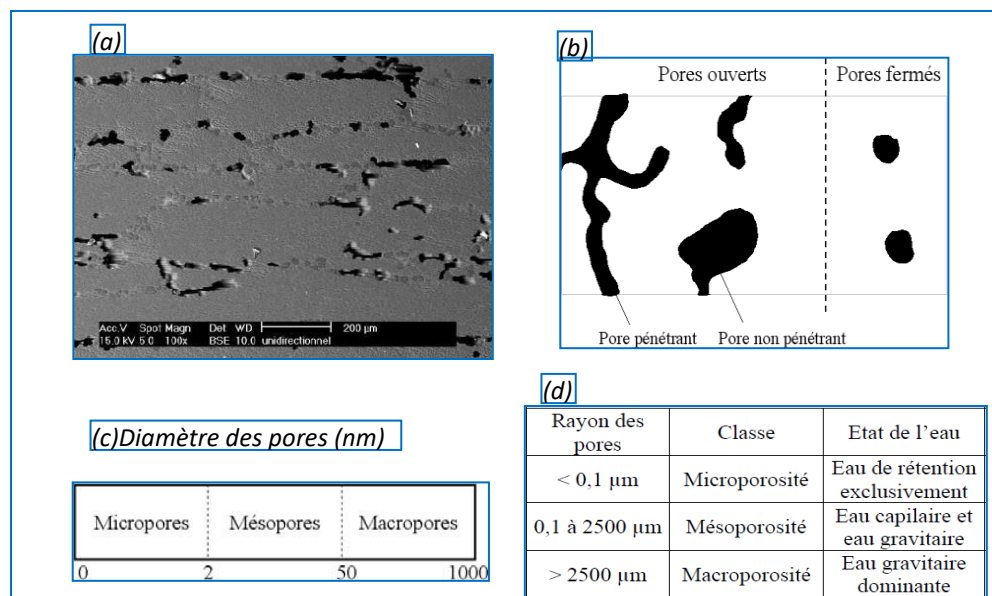


Figure II.9: (a) Micrographie MEB des porosités étudiées, (b) Schématisation des différents types de pores (c) et (d) Nomenclatures relatives à la taille des pores [128].

II.5.2. Différents types de porosité

La porosité du matériau est altérée lorsque sa position spatiale change dans le matériau en vrac. On peut obtenir une diminution de la taille de la porosité en ajustant les particules de poudre utilisées à divers endroits dans le matériau en vrac pendant le processus de

gradation [128]. La figure II.10 illustre les diverses catégories de porosité en fonction de leur forme géométrique.

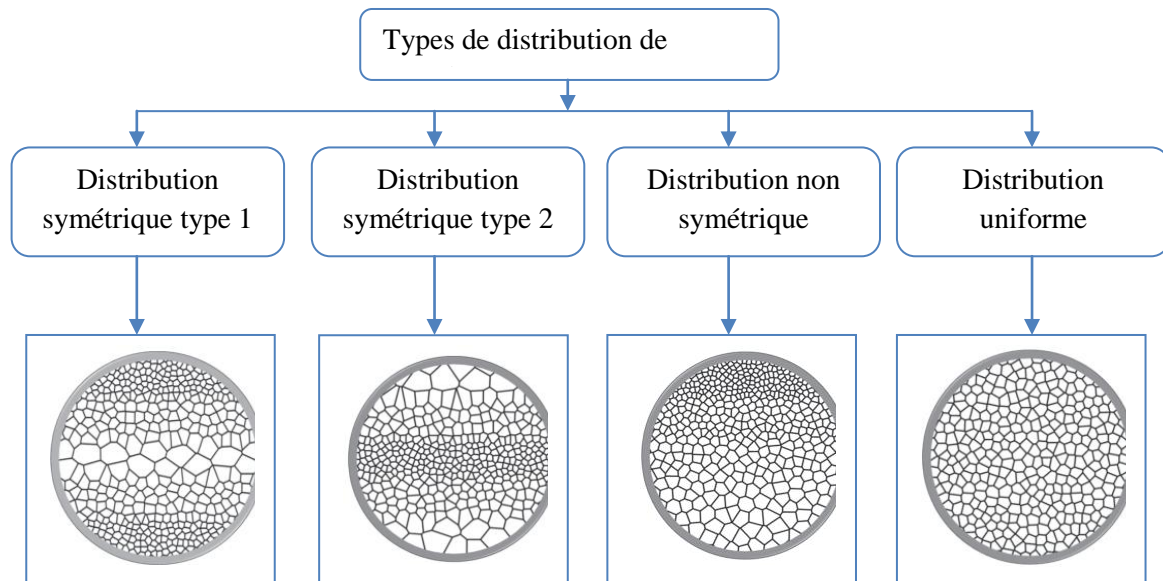


Figure II.10 : Diverses formes de répartition de la porosité [125,129].

On considère généralement que pour les FGM, le processus de fabrication utilisé du frittage est responsable de la création de micro-vides ou de porosités dans ces matériaux, ce qui rend essentiel l'intégration d'effets de porosité lors de la conception des structures [130].

II.6 Propriétés matérielles effectives des matériaux à gradient de propriétés

Les matériaux à gradient de propriétés « FGM » consistent en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent. Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace. Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance ou polynômiale (P-FGM), la fonction exponentielle (E-FGM), ou la fonction sigmoïde (S-FGM) pour décrire les fractions de volume.

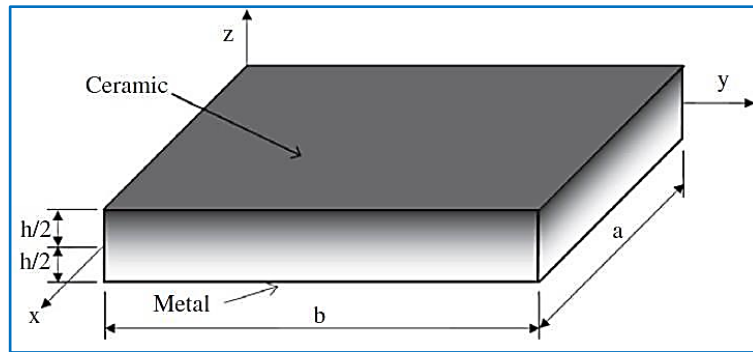


Figure II.11 : Géométrie d'une plaque en FGM.

La coordonnée x et y définissent la longueur et la largeur de la plaque, tandis que l'axe z est perpendiculaire à l'axe neutre de la poutre et dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les besoins. Toutefois le module de Young et le coefficient de Poisson varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur de la plaque. Dans la pratique, la plupart des structures FGM sont généralement à deux constituants : de la céramique et du métal inoxydable. Dans ce cas, la loi des mélanges (loi de Voigt) se réduit par les relations suivantes :

$$P = P_c V_c + P_m V_m \quad (\text{II.2})$$

$$V_c + V_m = 1 \quad (\text{II.3})$$

Où P désigne une propriété typique du matériau, à savoir, le module d'élasticité de Young E , le module de cisaillement transversal G , le coefficient de Poisson ν , la densité de matériau ρ , ...etc.

II.6.1. Propriétés matérielles d'une plaque P-FGM

La fraction volumique de la propriété du matériau P-FGM en fonction de l'épaisseur obéit à une fonction en loi de puissance comme suit :

$$V(z) = (0.5 + z/h)^k \quad (\text{II.4})$$

Où k est un paramètre matériel et h est l'épaisseur de la plaque.

Une fois la fraction volumique $V(z)$ a été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges :

$$E(z) = (E_c - E_m)V(z) + E_m \quad (\text{II.5})$$

Où E_c et E_m sont respectivement les modules de Young de la surface supérieure $z=h/2$ et de la

surface inférieure $z = -h/2$ de la plaque FGM.

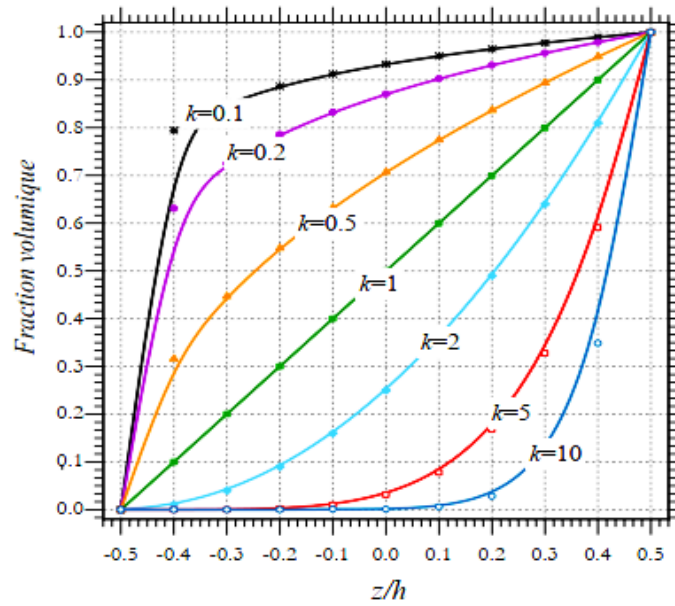


Figure II.12 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.

La variation de $V(z)$ dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur **la figure (II.12)**. Il apparaît clairement que ce dernier change rapidement près de surface Inférieure pour $p < 1$, et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour $p > 1$.

II.6.2 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM

Chung et Chi (Chung and Chi 2001) ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces [43]. Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par :

$$\text{Pour } h/2 \leq z \leq 0 \quad v_{c1}(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{z+h/2}{h/2} \right)^k \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad v_{c2}(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{z+h/2}{h/2} \right)^k \quad (\text{II.7})$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé par :

$$\text{Pour } h/2 \leq z \leq 0 \quad E(z) = v_{c1}(z)E_c + [1 - v_{c1}(z)]E_m \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad E(z) = v_{c2}(z)E_c + [1 - v_{c2}(z)]E_m \quad (\text{II.9})$$

La **figure II.13** montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations (II.6 et II.7) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (plaque S-FGM).

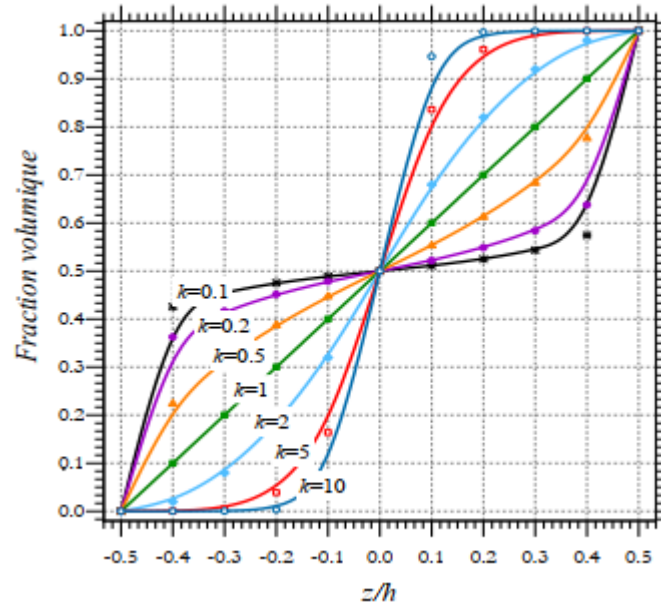


Figure II.13. Distribution de la fraction volumique en fonction de l'épaisseur d'un matériau S-FGM.

I.7.3. Propriétés matérielles de la poutre E-FGM

Plusieurs chercheurs ont adopté la fonction exponentielle pour prédire le comportement statique et dynamique des structures en FGM. Pour une structure en FGM d'épaisseur uniforme h , les propriétés typiques du matériau en tout point situé à une distance z de la surface de référence sont données sous la forme :

$$E(z) = E_m \exp(B(z + h/2)) \quad (\text{II.10})$$

$$B = (1/h) \ln(E_c/E_m) \quad (\text{II.11})$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la **figure II.14**.

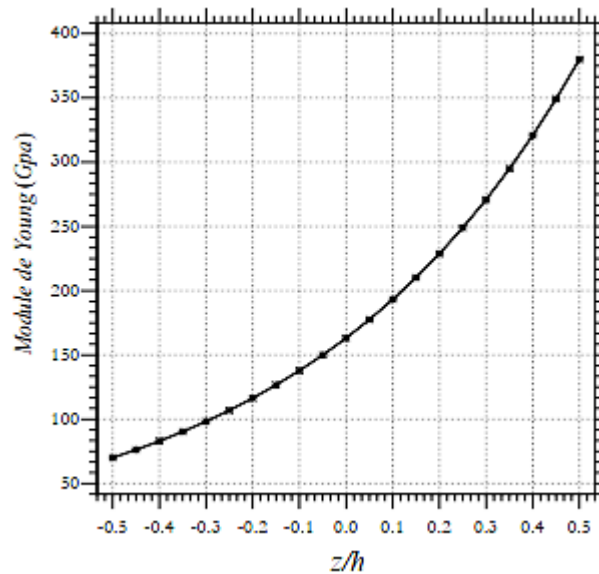


Figure II.14. Module de Young à travers l'épaisseur d'une plaque E-FGM.

II.7. Lois régissant la variation des propriétés des matériaux FGM poreux

Effectivement, la porosité a un impact significatif sur les caractéristiques mécaniques des FGM, et des recherches ont été réalisées afin de comprendre le comportement mécanique des éléments structurels poreux. Afin de reproduire le comportement des matériaux à gradient de porosité, des modèles de formulation ont été élaborés pour représenter la répartition des micro-vides dans les structures fonctionnellement graduées. On utilise fréquemment la règle de mélange de Voigt modifiée pour représenter les caractéristiques des FGM poreuses. Les propriétés des matériaux constitutifs et leur fraction volumique sont prises en considération dans cette règle de mélange afin de prédire les caractéristiques des FGM poreuses. Cette règle de mélange a permis de créer différents modèles de porosités, tels que les porosités symétriques, non symétriques, uniformes, non uniformes et logarithmiques-non uniformes.

- Les porosités symétriques se caractérisent par la présence de micro-vides répartis de manière uniforme dans la structure.
- Les porosités non symétriques désignent les vides micro-microscopiques qui ne sont pas répartis de manière uniforme dans la structure.
- Les porosités uniformes se réfèrent à des micro-vides qui se répartissent de manière uniforme dans la structure.
- Les porosités non uniformes désignent des micro-vides qui présentent une répartition inégale dans la structure.

Selon la répartition de la porosité, la résistance mécanique et les caractéristiques thermiques des FGM poreuses peuvent être altérées de manière significative. Ainsi, il est essentiel de comprendre les caractéristiques des FGM poreuses afin de les exploiter de manière optimale dans les domaines du génie civil et des travaux publics.

II.7.1. Modèle de porosité symétrique

Selon We et al. [133], dans ce modèle, la répartition de la porosité est symétrique par rapport au plan médian de la structure en FGM. Cette symétrie est illustrée dans la Figure II.15. Les caractéristiques réelles des matériaux utilisés sont fournies par :

$$P(z) = P_1 [1 - \xi_1 \cos(\pi.z)] \quad (\text{II.12})$$

P est la propriété qui change en fonction de l'épaisseur de la structure. Le module de Young peut être utilisé, tandis que la masse volumique, ξ_1 correspond au coefficient de porosité.

II.7.2. Modèle de porosité non-symétrique

Dans cette situation, la répartition de la porosité n'est pas symétrique par rapport au plan médian de la structure. Les modules d'élasticité et de masse volumique sont maximaux sur la surface supérieure, puis diminuent jusqu'à atteindre leurs valeurs minimales sur la surface inférieure (We et al. [133]) comme le montre la figure II.15(b). Les caractéristiques réelles des matériaux sont exprimées par :

$$P(z) = P_1 \left[1 - \xi_1 \cos\left(\frac{\pi}{2}z + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{II.13})$$

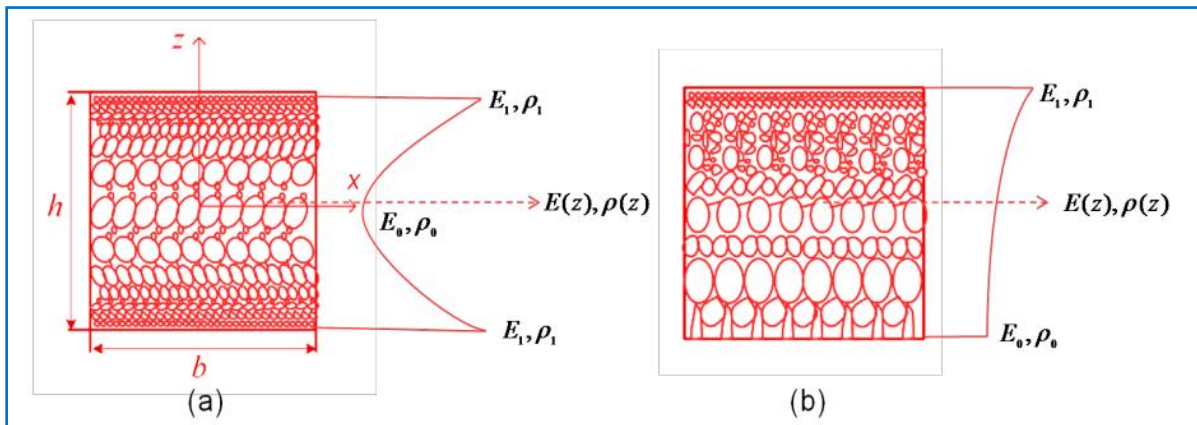


Figure II.15 : Répartition de porosité sur l'épaisseur, (a) porosité symétriques (b) porosité non symétriques [131].

II.7.3. Modèle de porosité non uniforme

Selon Zahedinejad et al. [134], il est supposé que les porosités soient réparties de manière inégale et principalement concentrées dans la zone médiane de la section transversale. De plus, la quantité de porosités diminue progressivement jusqu'à zéro sur les surfaces supérieures et inférieures. L'illustration schématique de la répartition inégale des porosités est présentée dans la figure II.16. Les caractéristiques matérielles réelles sont calculées en utilisant l'équation suivante :

$$P(z) = (P_c - P_m)V_c(z) + P_m - \frac{\xi}{2}(P_c + P_m)\left(1 - \frac{2|z|}{h}\right) \quad (\text{II.14})$$

II.7.4. Modèle de porosité logarithmiques-non uniformes

Pour décrire la distribution des porosités, le modèle (Gupta et al. [41]) utilise une fonction logarithmique. Comme illustré dans la figure II.16 (c), on peut observer une présence de porosités dans le plan médian de la coupe transversale. L'équation suivante permet de calculer les propriétés effectives des matériaux en se basant sur la distribution logarithmique inégale de la porosité.

$$P(z) = (P_c - P_m)V_c(z) + P_m - \log\left(1 + \frac{\xi}{2}\right)(P_c + P_m)\left(1 - \frac{2|z|}{h}\right) \quad (\text{II.15})$$

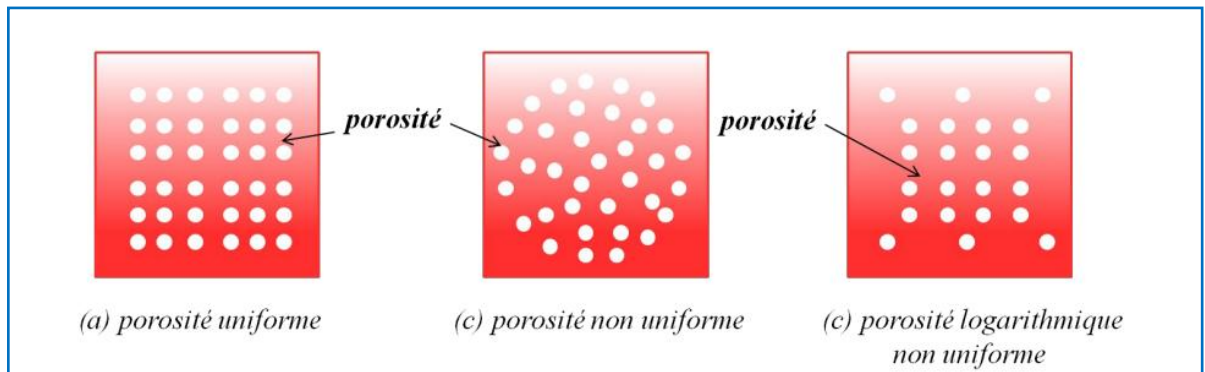


Figure II.16 : Illustration de différentes configurations de porosité [131].

II.7.5. Model de porosité de Kim et al. [132]

Selon Kim et al. [132], il est pris en compte, entre autres, une répartition de la porosité à travers l'épaisseur donnée par :

$$\xi_1(z) = \xi_1 \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

D'où z est la coordonnée d'épaisseur, ξ_1 est la valeur de porosité maximale et h est l'épaisseur de la plaque.

De ce fait, cette distribution a un impact sur la règle des mélanges et on peut estimer le module d'Young effectif (E) et le coefficient de Poisson (ν) de la manière suivante :

$$E(z) = \left[(E_t - E_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) + E_b \right] (1 - \xi_1(z)) \quad (\text{II.17})$$

$$\nu(z) = \left[(\nu_t - \nu_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) + \nu_b \right] (1 - \xi_1(z)) \quad (\text{II.18})$$

Les surfaces supérieure et inférieure sont respectivement indiquées par les indices t et b dans les deux équations (II.17) et (II.18).

II.7.6. Model de porosité de Coskun et al. [135]

Dans cette approche, les caractéristiques matérielles appelées module de Young et coefficient de poisson sont calculées en utilisant les deux équations (II.19, II.20).

$$E(z) = \left[(E_t - E_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^N + E_b \right] (1 - \xi_1 \beta) \quad (\text{II.19})$$

$$V(z) = \left[(V_t - V_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^N + V_b \right] (1 - \xi_1 \beta) \quad (\text{II.20})$$

II.7.7. Model de porosité de Li et Zheng [136]

Ce modèle apporte une variation de porosité à travers l'épaisseur, avec les propriétés réelles des matériaux étant fournies par

$$E(z) = \left[(E_t - E_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^N + E_b \right] \left[(1 - \xi_1 \beta) \cos^2 \left(2\pi \frac{z}{h} \right) \right] \quad (\text{II.21})$$

$$V(z) = \left[(V_t - V_b) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^N + V_b \right] \left[(1 - \xi_1 \beta) \cos^2 \left(2\pi \frac{z}{h} \right) \right] \quad (\text{II.22})$$

II.8. Conclusion

Les matériaux composites représentent une avancée significative dans le domaine des matériaux de construction et de fabrication. Leur capacité à combiner les meilleures propriétés de deux ou plusieurs constituants en fait des choix idéaux pour une variété d'applications, allant de l'aéronautique à l'automobile, en passant par les sports et les biens de consommation. Les composites offrent une combinaison unique de légèreté, de résistance, de durabilité et de flexibilité, surpassant souvent les matériaux traditionnels.

Le développement continu et l'innovation dans ce domaine promettent des matériaux encore plus performants, respectueux de l'environnement et rentables. L'intégration des nouvelles technologies, telles que la fabrication additive et les nano composites, ouvre des perspectives inédites pour les matériaux composites. De plus, les efforts croissants en matière de recyclage et de développement durable augmentent l'attrait des composites dans un monde de plus en plus soucieux de l'environnement.

En conclusion, les matériaux composites représentent non seulement une solution aux limitations des matériaux conventionnels, mais également une voie vers des applications plus efficaces et durables. Leur évolution continue assure une place centrale dans les technologies futures, façonnant un monde où la performance et la durabilité vont de pair.

Chapitre III

Analyse mathématique des contraintes d'interface dans
les poutres renforcées par des plaques en matériaux
composites: cas flexion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons une étude des contraintes d'interface d'une poutre en BA renforcée avec des plaques en composites sous différents types de chargement mécanique. La présente étude s'avère bénéfique pour améliorer le comportement mécanique de l'interface.

Il a été constaté que les matériaux composites sont de nouveaux matériaux novateurs pour la réparation et/ou le renforcement des ouvrages en BA. De cette manière, leur emploi constitue une solution efficace pour accroître la capacité globale des constructions [34,35]. Pendant plusieurs années, ces matériaux ont été employés avec succès pour la réparation des structures aéronautiques [36]. Au sein du secteur du génie civil, les plaques composites ont principalement été employées pour la rénovation des ouvrages en béton, ce qui suscite un vif intérêt de la part des chercheurs ces dernières années. L'évaluation des interactions à l'interface entre le béton et le composite est un sujet crucial qui se pose lors de l'étude des poutres en béton collées aux plaques. En réalité, ces interactions favorisent le transfert des contraintes de la poutre vers la plaque ; si ces contraintes dépassent une limite, il est possible que la poutre renforcée se rupture prématurément [37].

Plusieurs recherches analytiques sont menées dans les études scientifiques afin de prédire les contraintes d'interface [33,38, 39]. Ces différentes solutions sont applicables aux matériaux élastiques linéaires et reposent sur la même hypothèse, à savoir que la couche d'adhésif est soumise à des contraintes normales et à des cisaillements constants à travers son épaisseur. Et, c'est cette supposition qui donne lieu à des solutions plutôt simples [37].

III.2. Approche analytique

III.2.1. Hypothèses de base

La démarche analytique repose sur les hypothèses suivantes [30] :

- ✓ Les matériaux béton, adhésifs et FGM se comportent de manière élastique et linéaire.
- ✓ Aucun glissement n'est autorisé à l'interface de la liaison (c'est-à-dire que l'interface colle-béton et l'interface colle-plaque FGM ont une liaison parfaite).
- ✓ L'adhésif est supposé avoir pour seule fonction de transférer les contraintes du béton au renfort de plaque composite.
- ✓ Les contraintes sont constantes dans toute l'épaisseur de la couche adhésive.

Puisque les matériaux fonctionnellement gradués sont des matériaux orthotropes. Dans l'étude analytique, la théorie classique des plaques est utilisée pour déterminer les comportements de contrainte et de déformation de la plaque composite liée extérieurement

afin de prédire l'ensemble des performances mécaniques de la structure composite renforcée [30].

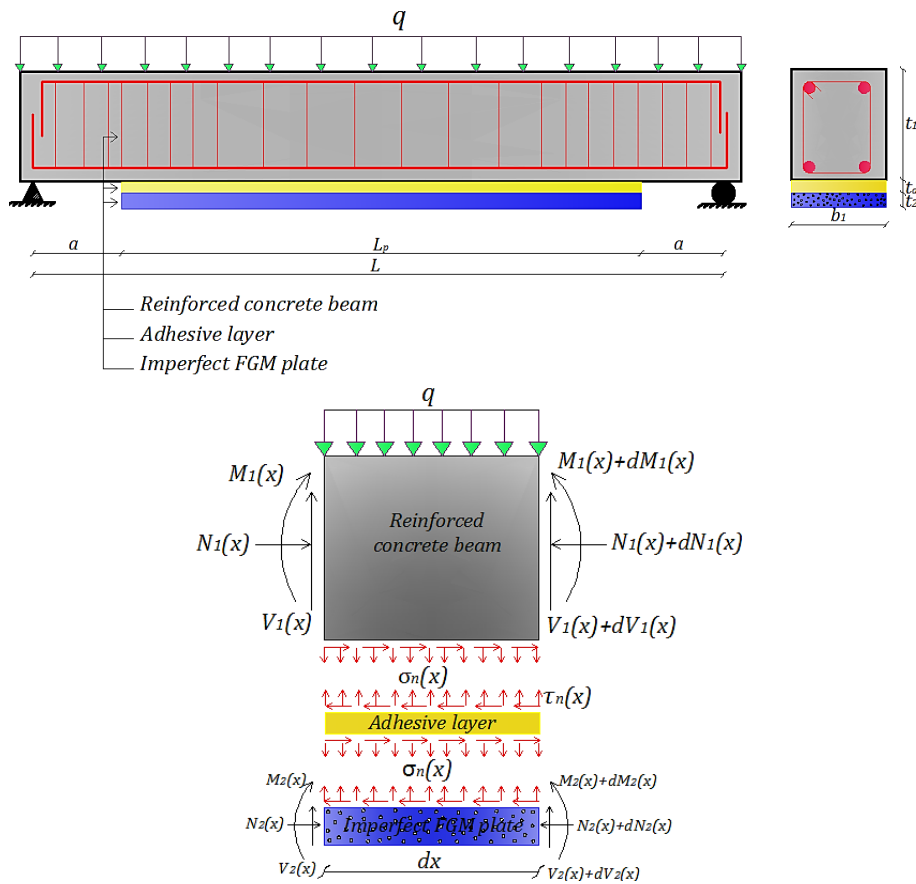


Figure III.1 : Poutre simplement appuyée renforcée par une plaque FGM collée [141].

III.2.2. Propriétés des matériaux constitutifs des FGMs.

Afin de créer les FGM, deux matériaux sont combinés dont les propriétés varient continuellement dans le sens de l'épaisseur conformément à certaines fonctions mathématiques par rapport à un indice de fraction volumique particulier. La plupart des chercheurs décrivent les fractions volumiques en utilisant une fonction de loi de puissance ou une fonction exponentielle. En revanche, très peu d'études ont utilisé la fonction sigmoïde pour caractériser les fractions volumiques.

Dans cette recherche, nous prenons en compte une plaque FGM (poreuse) imparfaite avec une fraction volumique de porosité et un type différent de répartition des métaux et des céramiques.

- i. Porosités non uniforme réparties en section transversale pour P-FGM:

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m) \cdot \left(0.5 + \frac{z}{h}\right)^N - (E_c - E_m) \cdot \Omega \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot |z|}{h}\right) \quad (\text{III.1})$$

$$\rho(z) = \rho_m + (\rho_c - \rho_m) \cdot \left(0.5 + \frac{z}{h}\right)^N - (\rho_c - \rho_m) \cdot \Omega \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot |z|}{h}\right) \quad (\text{III.2})$$

Les caractéristiques mécaniques de la plaque poreuse sont supposées varier selon une loi bien définie en fonction de la répartition de la porosité. Dans ce qui suit, quatre distributions de porosité dans le sens de l'épaisseur sont considérées (linéaire, logarithmique, exponentielle et sinusale), comme le montre le **tableau III.1**.

Tableau III. 1 : La fonction de distribution de la porosité non uniforme Ω .

Sources	Type de distribution	Ω
(Wattanasakulpong and Ungbhakorn 2014) [40]	Linéaire	$\frac{\zeta_1}{2}$
(Gupta and Talha 2017)[41]	Logarithmique	$\log\left(1 + \frac{\zeta_1}{2}\right)$
(Ayache, Bennai et al. 2018)[42]	Exponentielle	$1 - e^{-\frac{\zeta_1}{2}}$
(Ait atmane et al., 2022)[43]	Sinus	$0.325 \cdot \sin\left(\frac{3 \cdot \zeta_1}{2}\right)$

ii. Porosités non uniforme réparties en section transversale pour E-FGM:

$$E(z) = E_m \cdot \exp\left(\ln\left(\frac{E_c}{E_m}\right) \cdot \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^N - \frac{2 \cdot \zeta_1}{1 - \zeta_1}\right) \quad (\text{III.3})$$

$$\rho(z) = \rho_m \cdot \exp\left(\ln\left(\frac{\rho_c}{\rho_m}\right) \cdot \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^N - \frac{2 \cdot \zeta_1}{1 - \zeta_1}\right) \quad (\text{III.4})$$

Dans lesquels les indices c et m représentent respectivement la céramique et le métal. En outre, N est un indice de loi de puissance qui définit la caractérisation de la variation du matériau à travers la hauteur de la plaque. Le coefficient de Poisson est considéré comme constant. ζ_1 est le coefficient de porosité ($\zeta_1 \ll 1$). $\zeta_1 = 0$ indique une plaque non poreuse à gradient fonctionnel.

Les relations constitutives linéaires d'une plaque FG peuvent être écrites comme suit

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Où $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy})$ et $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy})$ sont les composantes de contrainte et de déformation respectivement.

Le calcul des constantes élastiques Q_{ij} dans les contraintes planes, les constants élastiques réduits définies comme suit

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E(z)}{1-\nu^2}; \quad Q_{12} = \frac{\nu E(z)}{1-\nu^2} \quad (\text{III.6})$$

Où A_{ij} et D_{ij} sont la rigidité de la plaque, définie par

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij} dz \quad D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij} z^2 dz \quad (\text{III.7})$$

Où A'_{ij} et D'_{ij} sont définies comme suit

$$A'_{11} = \frac{A_{22}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \quad D'_{11} = \frac{D_{22}}{D_{11}D_{22} - D_{12}^2} \quad (\text{III.8})$$

A'_{11} : est le premier terme de la matrice inverse $[A'_{ij}]$ de la matrice de membrane $[A_{ij}]$

D'_{11} : est le premier terme de la matrice inverse $[D'_{ij}]$ de la matrice de flexion $[D_{ij}]$

III.2.3. Distribution des contraintes de cisaillement le long de la plaque d'interface FGM-béton

Selon leurs expressions respectives, les déformations dans la poutre RC à proximité de l'interface adhésive et du renfort externe FGM sont les suivantes [30]

$$\varepsilon_1(x) = \frac{du_1(x)}{dx} = \frac{y_1}{E_1 I_1} M_1(x) + \frac{N_1(x)}{E_1 A_1} + \frac{t_1}{4G_1} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (\text{III.9})$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{du_2(x)}{dx} = \frac{-y_2}{E_2 I_2} M_2(x) + \frac{N_2(x)}{E_2 A_2} - \frac{5t_2}{12G_2} \frac{d\tau_a}{dx} \quad (\text{III.10})$$

Ce qui suit est une expression de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif

$$\tau_a = \tau(x) = K_s [u_2(x) - u_1(x)] \quad (\text{III.11})$$

Où

$K_s = G_a / t_a$ est la rigidité au cisaillement de l'adhésif, G_a et t_a sont respectivement le module de cisaillement et l'épaisseur de l'adhésif, $u_1(x)$ et $u_2(x)$ sont les déplacements longitudinaux à la base de la surface à adhérer 1 et au sommet de la surface à adhérer 2.

En différenciant les équations (9) de l'expression ci-dessus, nous obtenons :

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = K_s \left[\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \quad (\text{III.12})$$

L'équilibre de la poutre RC et de la plaque FGM conduit aux relations suivantes [30], La considération de l'équilibre horizontal donne :

$$\frac{dN_1(x)}{dx} = -b_2\tau(x) \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{dN_2(x)}{dx} = b_2\tau(x) \quad (\text{III.14})$$

Où, b_2 est la largeur de la plaque FGM. En supposant une courbure égale dans la poutre et dans la plaque FGM, la relation entre les moments dans les deux parties adhérentes peut être exprimée comme suit :

$$M_1(x) = RM_2(x) \quad (\text{III.15})$$

Avec:

$$R = \frac{EI_1 D_{11}'}{b_2} \quad (\text{III.16})$$

Le moment d'équilibre du segment différentiel de la poutre plaquée sur la figure III.1 donne :

$$M_T(x) = M_1(x) + M_2(x) + N(x) \left(y_1 + t_a + \frac{t_2}{2} \right) \quad (\text{III.17})$$

Où $M_T(x)$ est le moment total appliqué

$$M_1(x) = \frac{R}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x) \left(y_1 + t_a + \frac{t_2}{2} \right) dx \right] \quad (\text{III.18})$$

$$M_2(x) = \frac{1}{R+1} \left[M_T(x) - b_2 \int_0^x \tau(x) \left(y_1 + t_a + \frac{t_2}{2} \right) dx \right] \quad (\text{III.19})$$

La dérivée première du moment fléchissant dans chaque adhérent donne :

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = \frac{R}{R+1} \left[V_T(x) - b_2\tau(x) \left(y_1 + t_a + \frac{t_2}{2} \right) \right] \quad (\text{III.20})$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = \frac{1}{R+1} \left[V_T(x) - b_2\tau(x) \left(y_1 + t_a + \frac{t_2}{2} \right) \right] \quad (\text{III.21})$$

En remplaçant les équations Eq. (III.9) et Eq. (III.10) dans l'équation Eq. (III.12) et en différenciant l'équation résultante, nous obtenons :

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = K_s \left(\frac{A_{11}'}{b_2} \frac{dN_2(x)}{dx} - D_{11}' \frac{t_2}{2b_2} \frac{dM_2(x)}{dx} - \frac{y_1}{E_1 I_1} \frac{dM_1(x)}{dx} + \frac{1}{E_1 A_1} \frac{dN_1(x)}{dx} - \frac{t_1}{4G_1} \frac{d^2\tau_a}{dx^2} \right) \quad (\text{III.22})$$

La substitution des équations (III.20), (III.21) et des équations (III.13), (III.14) dans l'équation (III.22) donne l'équation différentielle suivante pour la contrainte d'interface de cisaillement,

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - K_1 \left(A_{11}' + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1 + t_2/2)(y_1 + t_a + t_2/2)}{E_1 I_1 D_{11}' + b_2} b_2 D_{11}' \right) \tau(x) + K_1 \left(\frac{(y_1 + t_2/2)}{E_1 I_1 D_{11}' + b_2} D_{11}' \right) V_T(x) = 0 \quad (III.23)$$

$$\text{Ou : } K_1 = \frac{1}{\left(\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_1}{4G_1} \right)} \quad (III.24)$$

Dans le but de simplifier les choses, les solutions générales fournies ci-dessous ne s'appliquent qu'à des charges concentrées ou uniformément réparties sur une partie de la portée totale de la poutre, ou les deux à la fois.

Pour ce type de chargement $d^2V_T(x)/dx^2 = \mathbf{0}$ et la solution générale de l'équation (III.23) présentée par

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x) \quad (III.25)$$

Où

$$\lambda^2 = K_1 \left(A_{11}' + \frac{b_2}{E_1 A_1} + \frac{(y_1 + t_2/2)(y_1 + t_a + t_2/2)}{E_1 I_1 D_{11}' + b_2} b_2 D_{11}' \right) \quad (III.26)$$

$$m_1 = \frac{K_1}{\lambda^2} \left(\frac{(y_1 + t_2/2)}{E_1 I_1 D_{11}' + b_2} D_{11}' \right) \quad (III.27)$$

Et B_1 and B_2 sont les coefficients constants déterminés à partir des conditions aux limites.

Dans cette étude, une poutre simplement appuyée a été examinée, soumise à une charge uniformément répartie, à une charge concentrée et à deux charges ponctuelles symétriques comme illustrée dans **la figure III.2.**

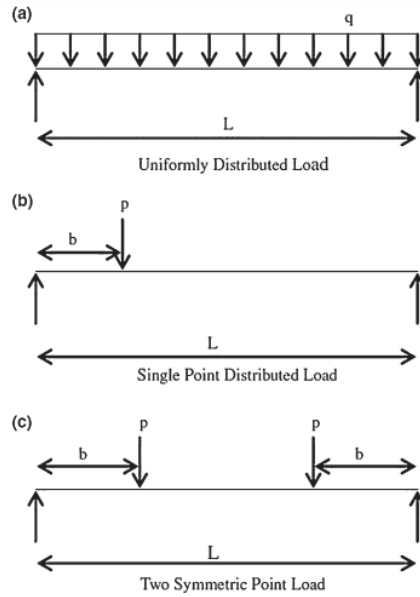


Figure III.2: Cas de charge

III.2.3.1. Contrainte de cisaillement d'interface pour une charge uniformément répartie

La solution générale pour la contrainte de cisaillement d'interface pour ce cas de charge est la suivante :

$$\tau(x) = \left[\frac{m_2 a}{2} (L - a) - m_1 \right] \frac{q e^{-\lambda x}}{\lambda} + m_1 q \left(\frac{L}{2} - a - x \right) \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{III.28})$$

Où q est la charge uniformément répartie et x ; a ; L and L_p sont définis dans la figure 1.

III.2.3.2. Contrainte de cisaillement d'interface pour une charge ponctuelle

La solution générale pour la contrainte de cisaillement d'interface pour ce cas de charge est la suivante

$$a < b: \quad \tau(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} P a \left(1 - \frac{b}{L} \right) e^{-\lambda x} + m_1 P \left(1 - \frac{b}{L} \right) - m_1 P \cosh(\lambda x) e^{-k} & 0 \leq x \leq (b - a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P a \left(1 - \frac{b}{L} \right) e^{-\lambda x} - m_1 \frac{P b}{L} + m_1 P \sinh(k) e^{-\lambda x} & (b - a) \leq x \leq L_p \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

$$a > b: \quad \tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} P b \left(1 - \frac{a}{L} \right) e^{-\lambda x} - m_1 \frac{P b}{L} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{III.30})$$

III.2.3.3. Contrainte de cisaillement d'interface pour des charges en deux points

La solution générale pour la contrainte de cisaillement d'interface pour ce cas de charge est la suivante

$$a < b: \quad \tau(x) = \begin{cases} \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P - m_1 P \cosh(\lambda x) e^{-k} & 0 \leq x \leq (b-a) \\ \frac{m_2}{\lambda} P a e^{-\lambda x} + m_1 P \sinh(k) e^{-\lambda x} & (b-a) \leq x \leq \frac{L_p}{2} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

$$a > b: \quad \tau(x) = \frac{m_2}{\lambda} P b e^{-\lambda x} \quad 0 \leq x \leq L_p \quad (\text{III.32})$$

III. 2. 4. Distribution de la contrainte normale le long de la plaque d'interface FGM-béton

L'expression de la contrainte normale d'interface dans l'adhésif est la suivante :

$$\sigma_n(x) = K_n \Delta w(x) = K_n [w_2(x) - w_1(x)] \quad (\text{III.33})$$

Où K_n est la rigidité normale de l'adhésif par unité de longueur et peut s'écrire comme suit :

$$K_n = \frac{E_a}{t_a} \quad (\text{III.34})$$

$w_1(x)$ et $w_2(x)$ sont les déplacements normaux des adhérents 1 et 2, respectivement.

En différenciant deux fois l'équation Eq. (III.31), on obtient :

$$\frac{d^2 \sigma_n(x)}{dx^2} = K_n \left[\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - \frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} \right] \quad (\text{III.35})$$

En considérant les relations moment-courbure pour la poutre et le renfort extérieur, respectivement, on obtient

$$\frac{d^2 w_1(x)}{dx^2} = -\frac{M_1(x)}{E_1 I_1} \quad \text{and} \quad \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{D_{11} M_1(x)}{E_2 I_2} \quad (\text{III.36})$$

L'équilibre des adhérences 1 et 2 conduit aux relations suivantes :

$$\text{Adherend 1:} \quad \frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b_2 y_1 \tau(x) \quad \text{and} \quad \frac{dV_1(x)}{dx} = -b_2 \sigma_n(x) - q \quad (\text{III.37})$$

$$\text{Adherend 2:} \quad \frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2 \frac{t_2}{2} \tau(x) \quad \text{and} \quad \frac{dV_2(x)}{dx} = -b_2 \sigma_n(x) \quad (\text{III.38})$$

Sur la base des équations d'équilibre ci-dessus, les équations différentielles régissant le déplacement des adhérences 1 et 2, exprimées en termes de cisaillement d'interface et de contraintes normales, sont les suivantes :

$$\text{Adherend 1:} \quad \frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 I_1} b_2 \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 I_1} b_2 \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 I_1} \quad (\text{III.39})$$

$$\text{Adherend 2: } \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -D_{11}' \sigma_n(x) + D_{11}' \frac{t_2}{2} \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (\text{III.40})$$

En substituant les deux équations (III.39) et (III.40) à la quatrième dérivation de la contrainte normale obtenue à partir de l'équation (III.33), on obtient l'équation différentielle suivante pour la contrainte normale :

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + K_n \left(D_{11}' + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right) \sigma_n(x) - K_n \left(D_{11}' \frac{t_2}{2} - \frac{y_1 b_2}{E_1 I_1} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q K_n}{E_1 I_1} = 0 \quad (\text{III.41})$$

L'équation différentielle du quatrième ordre (41) a la solution générale suivante

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] + e^{\beta x} [C_3 \cos(\beta x) + C_4 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{III.42})$$

Pour de grandes valeurs de x on suppose que la contrainte normale s'approche de zéro et $C_3 = C_4 = 0$, par conséquent, la solution générale devient :

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q \quad (\text{III.43})$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_n}{4} \left(D_{11}' + \frac{b_2}{E_1 I_1} \right)} \quad (\text{III.44})$$

$$n_1 = \left(\frac{y_1 b_2 - D_{11}' E_1 I_1 t_2 / 2}{D_{11}' E_1 I_1 + b_2} \right) \quad n_2 = \left(\frac{1}{D_{11}' E_1 I_1 + b_2} \right) \quad (\text{III.45})$$

Les constantes C_1 and C_2 de l'Eq.(III.43) sont déterminées à l'aide des conditions aux limites et sont écrites comme suit, comme indiqué par [31].

$$C_1 = \frac{K_n}{2\beta^3 E_1 I_1} [V_r(0) + \beta M_r(0)] - \frac{n_3}{2\beta^3} \tau(0) + \frac{n_1}{2\beta^3} \left(\frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \quad (\text{III.46})$$

$$C_2 = -\frac{K_n}{2\beta^2 E_1 I_1} M_r(0) - \frac{n_1}{2\beta^2} \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \quad (\text{III.47})$$

$$n_3 = b_2 K_n \left(\frac{y_1}{E_1 I_1} - \frac{D_{11}' t_2}{2b_2} \right) \quad (\text{III.48})$$

III.3. Résultats et discussions

Dans cette section, deux cas sont étudiés. Dans la première, une comparaison entre les résultats du présent modèle et ceux de la littérature est présentée, où les effets de porosité sont pris en compte. Dans la section suivante, une analyse paramétrique est réalisée pour mieux comprendre les effets des différents paramètres sur la répartition des contraintes de l'interface.

III.3.1. Propriétés géométriques et matérielles

Le matériau utilisé pour la présente étude est une poutre en BA liée à une plaque FGM imparfaite, à un plastique renforcé de fibres de verre ou de carbone (GFRP ou CFRP) ou à

une plaque d'acier. La poutre est simplement appuyée et soumise à un type de chargement différent (une charge uniformément répartie, charge concentré et une charge en deux points symétriques). Un résumé des propriétés géométriques et matérielles est donné dans **le tableau III. 2**. La portée de la poutre BA est de $L = 3000\text{ mm}$, la distance entre le support et l'extrémité de la plaque est de $a = 300\text{ mm}$, une force concentrée à mi travée est de 150 kN et la charge est uniformément répartie est de $50\text{ kN} / m$.

Tableau III.2 : Propriétés géométriques et matérielles.

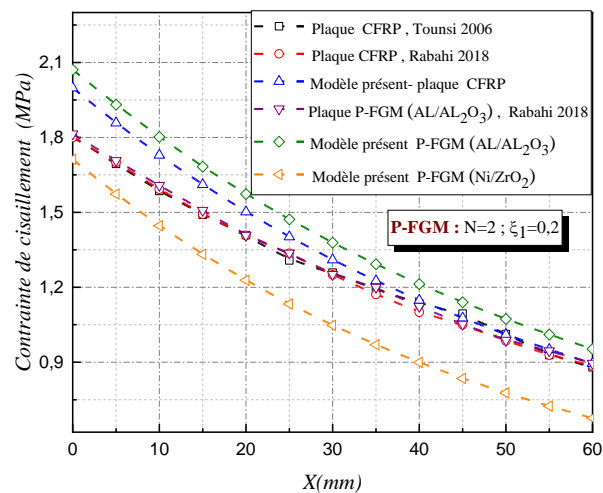
Composantes	Largeur(mm)	Epaisseur (mm)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Module de cisaillement (MPa)
Poutre RC	$b_1=200$	$t_1=300$	$E_1=30000$	0.18	-
Couche d'adhésif	$b_a=200$	$t_a=2$	$E_a=3000$	0.35	-
GFRP	$b_2=200$	$t_2=4$	$E_2=50000$	0.28	$G_{12}=5000$
CFRP	$b_2=200$	$t_2=4$	$E_2=140000$	0.28	$G_{12}=5000$
Plaque d'acier	$b_2=200$	$t_2=4$	$E_2=200000$	0.3	
FGM(AL_2O_3)	$b_2=200$	$t_2=4$	$E_c=380000$ $E_m=70000$	0.3	$G_{12}=5000$
FGM($Zr O_2$)	$b_2=200$	$t_2=4$	$E_c=200000$ $E_m=70000$		$G_{12}=5000$

III.3.2. Comparaisons numériques

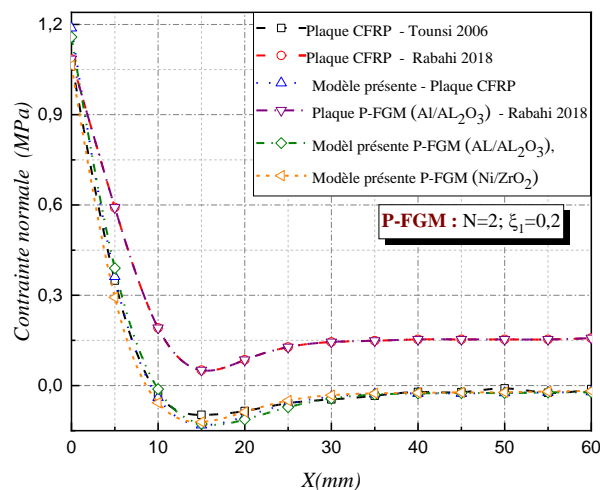
Dans cette section, les contraintes normales et de cisaillements d'interface des différentes solutions de forme fermée existantes et de la solution actuelle sont comparées. Pour la poutre en béton armé renforcée par collage de CFRP, GFRP, plaque d'acier, P-FGM ou E-FGM, les résultats des contraintes maximales de l'interface sont présentés dans **le tableau III.3**. **La figure III.3** montre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale près de l'extrémité de la plaque pour l'exemple de la poutre en béton armé collée avec différents types de matériaux composites dans le cas d'une charge uniformément répartie.

Contrainte de cisaillement : **La figure III.3 (a)** présente l'évolution de la contrainte de cisaillement (en MPa) en fonction de la distance près de l'extrémité de la plaque pour différents types de matériaux composites : les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) et des matériaux fonctionnels gradués (P-FGM) à base de AL/ AL_2O_3 et Ni/ ZrO_2 . Les résultats de la présente théorie sont comparés à des modèles théoriques. On observe une diminution générale de la contrainte de cisaillement avec l'augmentation de la distance près de l'extrémité de la plaque pour tous les matériaux, ce qui est en accord avec les prévisions

théoriques. Les contraintes de cisaillement pour le matériau CFRP du présent modèle présentent des valeurs supérieures à celles présentées par Tounsi et al. [31] Rabahi et al. [32], tandis que les P-FGM montrent des écarts plus importants. Les différents types de P-FGM présentent des comportements distincts, avec le P-FGM à base d'alumine affichant la plus haute contrainte de cisaillement tandis que le P-FGM (Ni/ZrO₂) présente la plus faible contrainte de cisaillement. Cette étude souligne l'influence de la nature du matériau composite sur les contraintes de cisaillement.



(a)



(b)

Figure III.3 : Comparaison de la contrainte d'interface dans une poutre en béton armé renforcée par des matériaux composites.

(a) Contrainte de cisaillement, (b) Contrainte normale.

Contrainte normale : La figure III.3 (b) présente la variation de la contrainte normale (en MPa) en fonction de la distance X (en mm) pour plusieurs modèles de matériaux composites, notamment les plaques en CFRP et les matériaux FGM (matériaux fonctionnellement gradué) à base de différentes compositions. Les courbes comparatives incluent des résultats de recherches antérieures, telles que celles de Toussi (2006) [31] et Rabahi (2018) [32], ainsi que des modèles présents. On observe une forte diminution de la contrainte normale près de l'origine pour la majorité des matériaux, suivie d'une stabilisation progressive à des valeurs proches de zéro. Les plaques en CFRP montrent une décroissance rapide de la contrainte, tandis que les FGM, en particulier ceux à base de Ni/ZrO₂ et Al/Al₂O₃, présentent un comportement plus stable après une chute initiale. Les paramètres $N=2$ et $\xi_1=0,2$, indiqués pour le modèle FGM, semblent influencer cette répartition de la contrainte, suggérant une meilleure répartition des contraintes dans les matériaux FGM par rapport aux plaques en CFRP.

III.3.3. Étude paramétrique

Dans cette section, une étude paramétrique est réalisée pour mieux comprendre les effets de plusieurs paramètres sur les distributions des contraintes d'interface dans une poutre en béton armé collée à une plaque FGM imparfaite (poreuse). Les poutres sont simplement appuyées et soumises à une charge uniformément répartie. Un résumé des propriétés géométriques et matérielles est donné dans le **tableau III. 2**. La portée de la poutre en béton armé est de $3000mm$, la distance entre le support et l'extrémité de la plaque est de $300mm$ et la charge uniformément répartie est de $50KN/m$.

III.3.3.1. Effet de la porosité

L'étude de l'effet de la porosité sur les contraintes de cisaillement et les contraintes normales de la poutre BA renforcée avec une plaque poreuse P-FGM sous charge uniformément répartie (UDL) est présenté dans le **tableau III.4 et figure III.4**, où le degré d'homogénéité de le P-FGM est de $N=10$. La fraction volumique de porosité est considérée égale à (0, 0,1,0,2 et 0,3) et les fonctions de répartition de la porosité dans la plaque P-FGM sont également testées (Fonction Linéaire, fonction logarithmique, fonction exponentielle et fonction Sinus).

Tableau III.3 : Comparaison des contraintes d'interface (MPa).

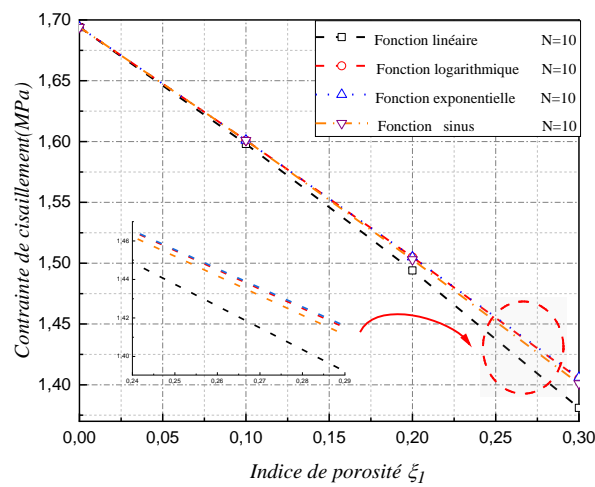
Poutre RC	Modèle	Charge uniformément répartie		Charge concentrée		Charge en deux points	
		τ (MPa)	σ (MPa)	τ (MPa)	σ (MPa)	τ (MPa)	σ (MPa)
CFRP	Tounsi et al., 2006	1.791	1.078	2.051	1.234	-	-
	Rabahi et al., 2018	1.812	1.089	2.074	1.246	2.718	1.590
	Modèle présent	1.998	1.188	2.278	1.347	4.556	2.962
GFRP	Tounsi et al., 2006	1.085	0.826	1.228	0.935	-	-
	Rabahi et al., 2018	1.093	0.832	1.236	0.942	1.733	1.290
	Modèle présent	1.217	0.914	1.374	1.030	2.748	2.218
Acier	Tounsi et al., 2006	2.120	1.175	2.438	1.350	-	-
	Rabahi et al., 2018	2.126	1.176	2.445	1.352	3.126	1.680
	Modèle présent	2.355	1.280	2.674	1.454	5.348	3.232
P-FGM	Rabahi et al., 2018 (AL ₂ O ₃)	1.826	1.060	2.090	1.213	2.737	1.543
	Modèle présent(AL ₂ O ₃)	2.071	1.158	2.364	1.311	4.728	2.932
	Modèle présent (ZrO ₂)	1.712	1.063	1.945	1.201	3.890	2.646
E-FGM	Modèle présent (AL ₂ O ₃)	1.587	1.009	1.800	1.139	3.600	2.508
	Modèle présent (ZrO ₂)	0.952	1.370	1.550	1.073	3.101	2.335

Tableau III.4 : Effet de la porosité sur les contraintes d'interface de la poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse de FGM sous une charge distribuée uniforme.

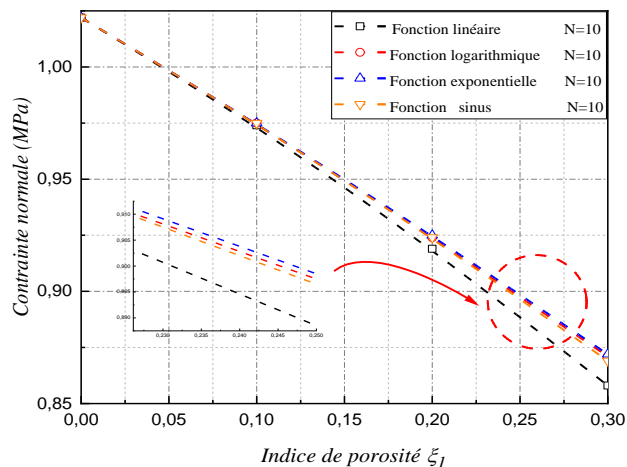
Contrainte de cisaillement, P-FGM, N=10				
Porosité	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
ζ_1	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
0	1.694	1.694	1.694	1.694
0.1	1.598	1.601	1.601	1.601
0.2	1.494	1.505	1.505	1.503
0.3	1.381	1.405	1.406	1.401
Contrainte normale, P-FGM, N=10				
Porosité	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
ζ_1	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
0	1.022	1.022	1.022	1.022
0.1	0.974	0.975	0.975	0.975
0.2	0.919	0.924	0.925	0.924
0.3	0.858	0.871	0.872	0.869

Les résultats du tableau III.4 et des figures III.4a et III.4b montrent de manière cohérente l'effet de la porosité (indiquée par ζ_1) sur les contraintes d'interface de cisaillement et normales dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en FGM sous une charge uniforme répartie. Le tableau montre que, pour toutes les fonctions de distribution de porosité (linéaire, logarithmique, exponentielle et sinus), une augmentation de l'indice de porosité ζ_1 entraîne une réduction des contraintes de cisaillement et normales, indiquant une diminution de la résistance mécanique avec l'augmentation de la porosité. Les courbes des figures confirment cette tendance avec une décroissance progressive des contraintes lorsque ζ_1 augmente. Il est notable que la variation des contraintes en fonction de la porosité est similaire

pour les différentes fonctions de distribution de porosité, avec des écarts relativement faibles entre elles. Toutefois, les fonctions sinus et logarithmique montrent un léger écart aux grandes valeurs de porosité, suggérant que le choix de la distribution de porosité peut influencer, mais de façon marginale, le comportement d'interface. L'indice de puissance $N=10$, fixé dans ces analyses, indique la complexité des gradients dans le matériau FGM, influençant les réponses mécaniques d'interface de la structure. En somme, l'étude met en évidence une réduction significative des performances mécaniques de l'interface avec l'augmentation de la porosité, ce qui peut être critique dans la conception des structures renforcées par des FGM poreux.



(a)



(b)

Figure III.4 : Effet de la porosité sur les contraintes d'interface de la poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse de FGM sous une charge uniformément répartie.

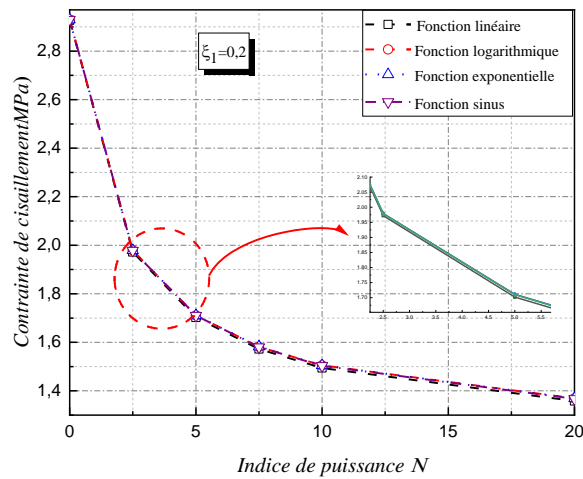
(a) Contraite de cisaillement, (b) Contraite normale.

III.3.3.2. Effet du degré d'homogénéité

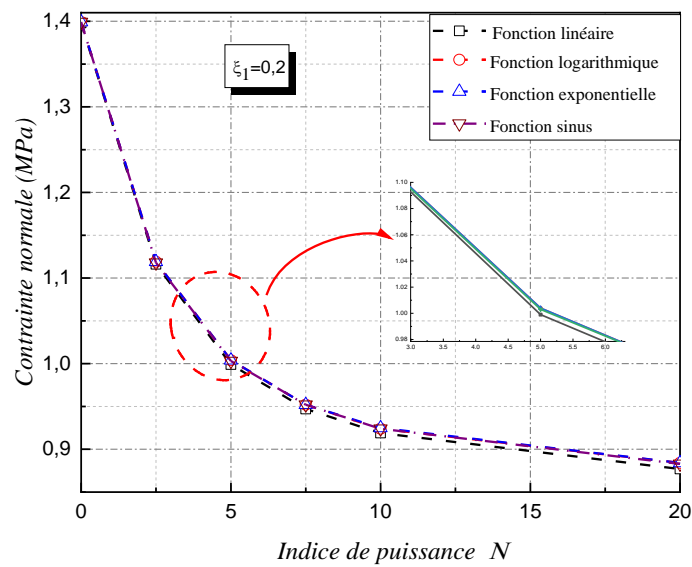
Le **tableau III.5** et les **figures III.5a et III.5b** illustrent l'effet de l'indice de puissance N sur les contraintes d'interface de cisaillement et normales dans une plaque poreuse de matériau à fonctionnellement gradué (FGM) sous une charge uniformément répartie. À partir des résultats présentés dans le tableau, on observe que, pour différentes formes de distribution de porosité, une augmentation du degré d'homogénéité (N) entraîne une réduction des contraintes d'interfaces. Cette diminution des contraintes est particulièrement prononcée lorsque l'indice N passe de 0 à 5, au-delà duquel les variations deviennent plus graduelles. Les figures renforcent cette interprétation en montrant une décroissance rapide des contraintes pour de faibles valeurs de N , avec une convergence des différentes fonctions pour des valeurs de l'indice de puissance supérieures à 5. Ceci suggère que l'indice N , qui reflète le degré d'homogénéité dans la distribution des propriétés du FGM, a un effet déterminant sur la réduction des contraintes d'interfaces, particulièrement dans les premières phases de l'augmentation de cet indice. Cela indique que la rigidité d'interfaces s'améliore avec l'augmentation de l'homogénéité du matériau, avec des performances stabilisées pour N supérieur à 10, quel que soit le type de distribution de porosité. Ces résultats ont des implications importantes pour la conception de structures renforcées par des FGM, où le choix de l'indice de puissance N peut être optimisé pour minimiser les contraintes tout en maximisant l'efficacité structurelle.

Tableau III. 5 : Effet du degré d'homogénéité sur les contraintes d'interface d'une plaque de FGM poreuse sous une charge uniforme répartie.

Contrainte de cisaillement, P-FGM, $\zeta_1=0.2$				
Indice de puissance	Fonctions de distribution de porosité non uniforme.			
N	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
0	2.927	2.930	2.930	2.930
2.5	1.972	1.979	1.979	1.978
5	1.702	1.711	1.711	1.710
7.5	1.572	1.581	1.582	1.580
10	1.494	1.505	1.505	1.503
20	1.358	1.369	1.369	1.367
Contrainte normale, P-FGM, $\zeta_1=0.2$				
Indice de puissance	Fonctions de distribution de porosité non uniforme.			
N	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
0	1.398	1.399	1.399	1.399
2.5	1.116	1.119	1.119	1.118
5	0.999	1.004	1.004	1.003
7.5	0.947	0.952	0.952	0.952
10	0.919	0.924	0.925	0.924
20	0.877	0.884	0.884	0.883



(a)



(b)

Figure III. 5 : Effet du degré d'homogénéité sur les contraintes d'interface d'une plaque FGM poreuse sous charge uniformément répartie.

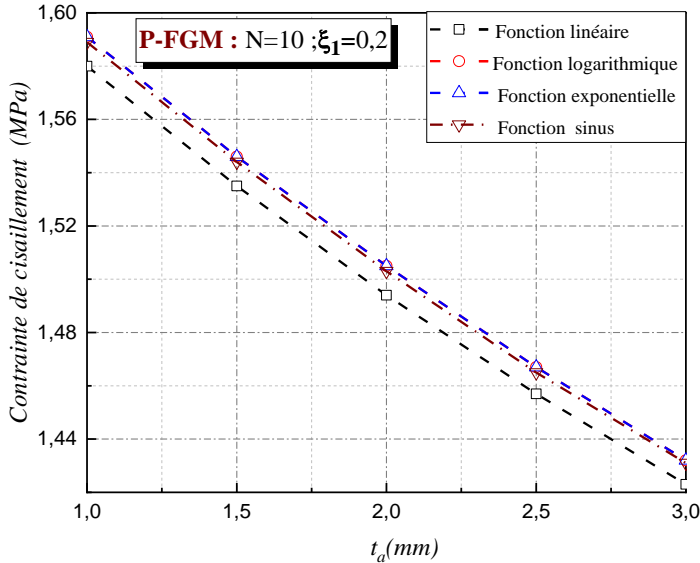
(a) Contrainte de cisaillement, (b) Contrainte normale.

III.3.3.3. Effet de l'épaisseur de la couche adhésive

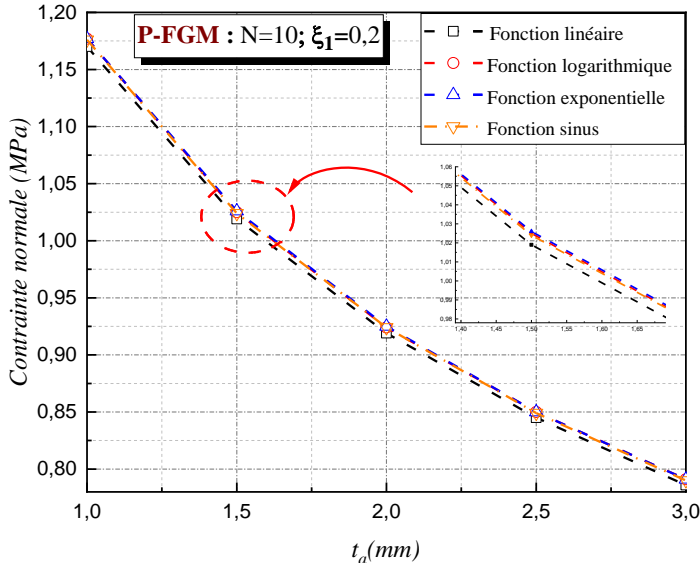
L'effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif (t_a) sur la variation des contraintes d'interfaces de cisaillement et normales dans une poutre RC renforcée par une plaque P-FGM poreuse sous une charge uniformément répartie a été présenté dans le **tableau III.6** et les **figures III.6a et III.6b**. Le tableau révèle que, pour toutes les formes de distribution de porosité non uniforme (linéaire, logarithmique, exponentielle et sinus), une augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif (t_a) entraîne une réduction significative des contraintes de cisaillement et normales. Cette diminution des contraintes est plus marquée lorsque t_a passe de 1 mm à 2 mm, après quoi la réduction devient plus modérée jusqu'à 3 mm. Les figures confirment cette tendance avec une décroissance quasi-linéaire des contraintes en fonction de t_a , montrant une convergence des différentes fonctions de porosité pour les valeurs les plus élevées de t_a . Cela suggère que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif contribue à une meilleure dissipation des contraintes aux interfaces, améliorant ainsi la performance mécanique globale de la poutre renforcée.

Tableau III. 6 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes des bords dans une poutre en béton armée poreuse renforcée au P-FGM sous charge répartie uniforme.

Contrainte de cisaillement, P-FGM, $\zeta_1=0.2$				
Épaisseur de la couche adhésive	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
t_a	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
1	1.580	1.591	1.591	1.589
1.5	1.535	1.546	1.546	1.544
2	1.494	1.505	1.505	1.503
2.5	1.457	1.467	1.467	1.465
3	1.423	1.432	1.432	1.431
Contrainte normale, P-FGM, $\zeta_1=0.2$				
Épaisseur de la couche adhésive	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
t_a	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
1	1.170	1.177	1.177	1.176
1.5	1.019	1.025	1.026	1.024
2	0.919	0.924	0.925	0.924
2.5	0.845	0.850	0.850	0.849
3	0.786	0.791	0.791	0.790



(a)



(b)

Figure III.6 : Effet de l'épaisseur de la couche d'adhésif sur les contraintes des bords dans une poutre RC poreuse renforcée au P-FGM sous charge répartie uniforme.

(a) Contrainte de cisaillement, (b) Contrainte normale.

III.3.3.4. Effet du module d'Young de l'adhésif (E_a)

L'effet du module d'Young de l'adhésif sur les contraintes d'interfaces d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en P-FGM est illustré dans le **tableau III.7** et les **deux figure III.7 a et b**, où l'indice de porosité est pris égal à 0.2 et le degré d'homogénéité du P-FGM est fixé à $N = 10$.

Influence du module d'Young (E_a) sur la contrainte de cisaillement :

Dans le **tableau III.7**, la première section montre les contraintes de cisaillement pour différentes valeurs de E_a (3 000 MPa à 6 000 MPa) sous différentes fonctions de distribution de porosité non uniforme (linéaire, logarithmique, exponentielle, et sinus). Les valeurs augmentent avec E_a , ce qui indique que le renforcement de la poutre à l'aide d'un adhésif avec un module d'Young plus élevé contribue à une augmentation de la contrainte de cisaillement.

Les courbes dans la **figure III.7(a)** illustrent cette tendance, où la contrainte de cisaillement augmente régulièrement avec E_a pour toutes les distributions de porosité. Cependant, les différentes fonctions de distribution de porosité influencent la pente de cette augmentation. La fonction linéaire semble produire les plus faibles contraintes de cisaillement, tandis que les autres (logarithmique, exponentielle, et sinus) montrent des performances très proches avec des valeurs légèrement supérieures.

Comportement de la contrainte normale :

Le **tableau III.7(b)** montre également les contraintes normales sous les mêmes conditions. Comme pour les contraintes de cisaillement, les contraintes normales augmentent avec E_a . La croissance est régulière, mais les valeurs sont globalement plus faibles comparées aux contraintes de cisaillement.

La **figure III.7(b)** met en évidence cette augmentation des contraintes normales avec E_a . Encore une fois, on observe que les différentes fonctions de distribution de porosité produisent des résultats similaires, avec une légère différence en faveur des fonctions exponentielle et sinus qui offrent des contraintes normales légèrement supérieures.

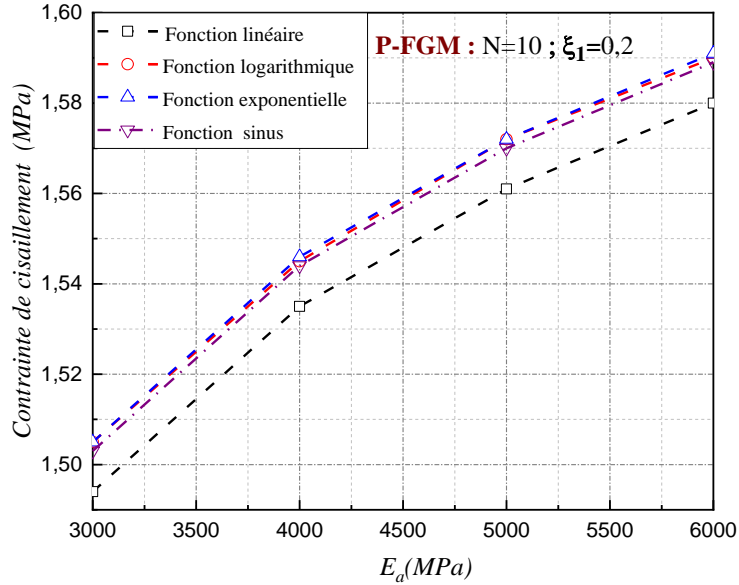
En plus, le **tableau** et les **deux figures** montrent clairement que le choix de la fonction de distribution de porosité a un effet mesuré sur les contraintes d'interfaces (cisaillement et normale). La fonction linéaire tend à produire des valeurs de contrainte plus faibles, ce qui pourrait être interprété comme une distribution de porosité moins favorable à la transmission de contraintes dans ce contexte. En revanche, les autres fonctions (logarithmique, exponentielle et sinus) montrent des performances proches et légèrement supérieures, ce qui

pourrait indiquer une répartition plus équilibrée des efforts dans la structure.

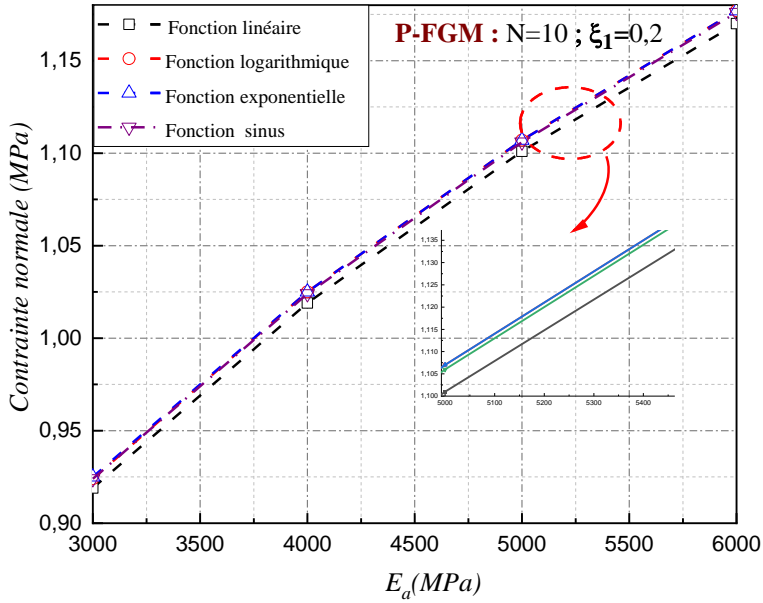
En résumé, l'analyse des données du tableau et des figures montre que l'augmentation du module d'Young de l'adhésif entraîne une augmentation notable des contraintes d'interfaces dans la poutre, tant en cisaillement qu'en normale. Cette augmentation est également influencée par la fonction de distribution de la porosité, où les fonctions non linéaires semblent offrir une meilleure répartition des efforts. Cela suggère que pour optimiser la performance des poutres poreuses renforcées, il est essentiel de choisir à la fois un module d'Young élevé et une distribution de porosité adéquate.

Tableau III.7 : Contraintes d'interface de la poutre BA renforcée avec une plaque P-FGM pour différentes valeurs E_a sous charge répartie uniforme

Contrainte de cisaillement, P-FGM, $\zeta_1=0.2$, N=10				
Module d'Young (MPa)	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
E_a	Linéaire	Logarithmique	exponentielle	Sinus
3000	1.494	1.505	1.505	1.503
4000	1.535	1.545	1.546	1.544
5000	1.561	1.572	1.572	1.570
6000	1.580	1.590	1.591	1.589
Contrainte normale, P-FGM, $\zeta_1=0.2$, N=10				
Module d'Young (MPa)	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
E_a	Linéaire	Logarithmique	exponentielle	Sinus
3000	0.919	0.924	0.925	0.924
4000	1.019	1.025	1.025	1.024
5000	1.101	1.107	1.107	1.106
6000	1.170	1.177	1.177	1.176



(a)



(b)

Figure III.7 : Contraintes d'interface de la poutre BA renforcée avec une plaque P-FGM pour différentes valeurs E_a sous charge uniformément répartie.
 (a) Contrainte de cisaillement, (b) Contrainte normale.

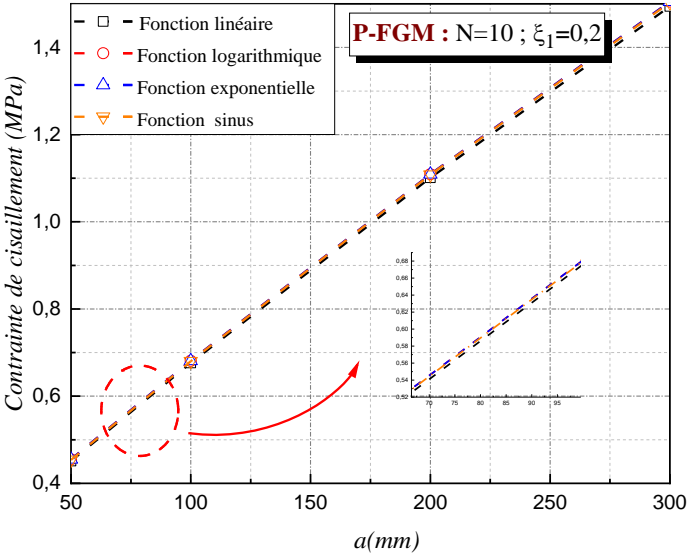
III.3.3.5. Effet de la longueur de la zone non renforcée "a "

Le **Tableau III.8** et la **Figure III.8** présentent l'influence de la longueur de la zone non renforcée a sur les contraintes d'interfaces dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque en matériau fonctionnel graduée (P-FGM) poreuse, sous une charge uniformément répartie. Les contraintes de cisaillement et normales sont analysées en fonction de différentes distributions de porosité non uniforme (linéaire, logarithmique, exponentielle, sinus). Il est clairement observable que, à mesure que la longueur de la zone non renforcée augmente, les contraintes d'interfaces augmentent proportionnellement. Par exemple, pour la contrainte de cisaillement, lorsque « a » augmente de 50 mm à 300 mm, la contrainte passe de 0.451 MPa à 1.505 MPa. De même, la contrainte normale passe de 0.279 MPa à 0.925 MPa pour la même variation de longueur.

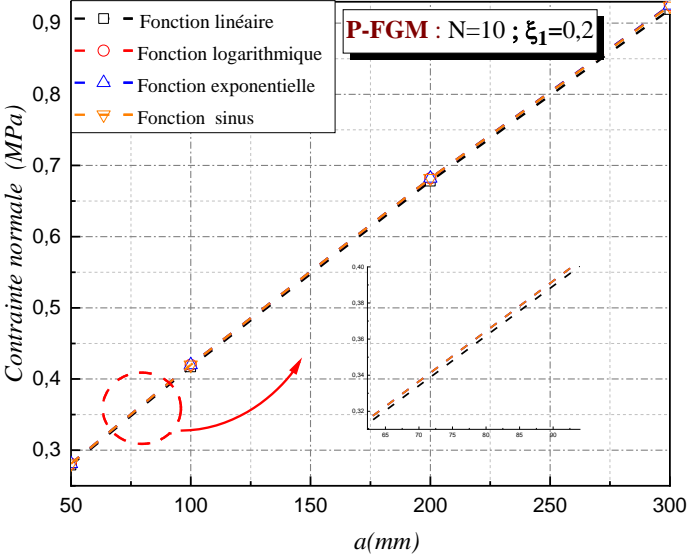
Les **figures (a) et (b)** illustrent ces résultats graphiquement, avec des courbes montrant une tendance linéaire croissante. Chaque distribution de porosité suit un comportement similaire, indiquant que l'effet de la longueur a est significatif, indépendamment du type de distribution de porosité choisi. Cela souligne que l'augmentation de la longueur non renforcée entraîne une concentration accrue des contraintes, suggérant une réduction de l'efficacité du renforcement pour des longueurs plus importantes. Ces résultats sont importants pour la conception des structures renforcées en P-FGM, car ils montrent qu'un contrôle précis de la longueur de la zone non renforcée est essentiel pour minimiser les contraintes d'interface et améliorer la performance structurelle

Tableau III. 8 : Influence de la longueur de la zone non renforcée sur les contraintes de bord pour une poutre en BA renforcée par P-FGM sous une charge uniforme répartie.

Contrainte de cisaillement, P-FGM, $\zeta_1=0.2$, N=10				
la longueur de la zone non renforcée)	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
a	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
50	0.451	0.455	0.455	0.454
100	0.676	0.681	0.681	0.680
200	1.101	1.109	1.109	1.108
300	1.494	1.505	1.505	1.503
Contrainte normale, P-FGM, N=10				
la longueur de la zone non renforcée)	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
a	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
50	0.279	0.281	0.281	0.281
100	0.417	0.420	0.420	0.420
200	0.678	0.682	0.682	0.682
300	0.919	0.924	0.925	0.924



(a)



(b)

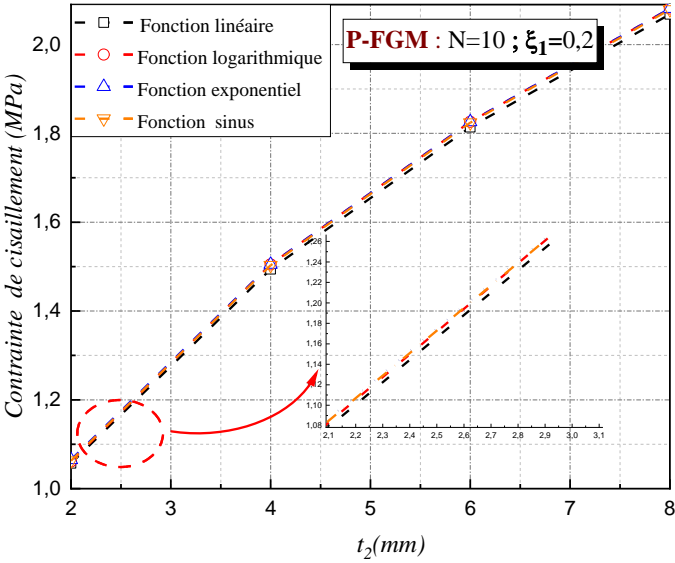
Figure III.8 : Influence de la longueur de la région non renforcée sur les contraintes de bord pour une poutre BA avec une plaque de P-FGM collée sous une charge répartie uniforme.
 (a) Contrainte de cisaillement, (b) Contrainte normale.

III.3.6. Effet de l'épaisseur de la plaque (t_2)

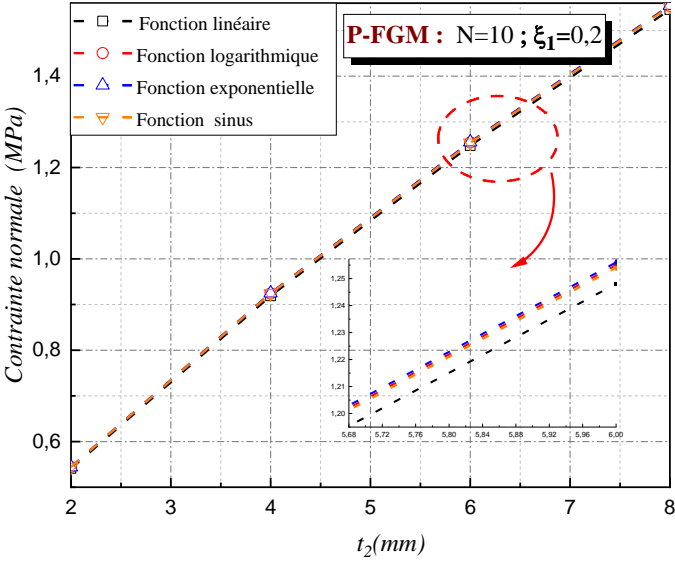
Le **Tableau III.9** et la **Figure III.9** illustrent l'effet de l'épaisseur de la plaque (t_2) et des formes de distribution de la porosité (linéaire, logarithmique, exponentielle, sinus) sur les contraintes d'interfaces dans une poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en P-FGM, sous une charge uniformément répartie. Les résultats montrent que, à mesure que l'épaisseur de la plaque augmente, les contraintes de cisaillement et normales augmentent également de manière significative, ce qui reflète une amélioration de la rigidité et de la résistance de l'interface renforcée. Plus précisément, la contrainte de cisaillement varie de 1.057 MPa à 2.081 MPa pour une augmentation de t_2 de 2 mm à 8 mm, tandis que la contrainte normale passe de 0.541 MPa à 1.555 MPa dans le même intervalle. Ces résultats suggèrent que l'épaisseur joue un rôle clé dans la redistribution des contraintes d'interfaces. Par ailleurs, les différentes formes de distribution de porosité ont un impact relativement limité sur les valeurs maximales des contraintes, bien que de légères variations soient observées selon le type de distribution, avec la distribution sinus et exponentielle tendant à légèrement amplifier les contraintes. **La Figure III.9 (a) et (b)** confirme graphiquement ces observations en montrant des courbes linéaires presque parallèles pour chaque type de distribution, illustrant que l'effet de l'épaisseur sur les contraintes de cisaillement et normales suit une tendance similaire, quelle que soit la distribution de porosité. En résumé, l'augmentation de l'épaisseur de la plaque en P-FGM conduit à une meilleure performance mécanique en termes de réduction des déformations d'interface, avec un effet modéré des distributions de porosité.

Tableau III.9 : Effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes d'interface de la poutre en béton armé renforcée par une plaque poreuse en P-FGM sous une charge uniformément répartie.

Contrainte de cisaillement, P-FGM, $\zeta_1=0.2$, N=10				
Épaisseur (mm)	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
t_2	Linéaire	Logarithmique	Exponentielle	Sinus
2	1.057	1.064	1.065	1.063
4	1.494	1.505	1.505	1.503
6	1.814	1.826	1.826	1.824
8	2.068	2.081	2.081	2.079
Contrainte normale, P-FGM, $\zeta_1=0.2$, N=10				
Épaisseur (mm)	Fonctions de distribution de porosité non uniforme			
t_2	Linéaire	Logarithmique	exponentielle	Sinus
2	0.541	0.544	0.544	0.544
4	0.919	0.924	0.925	0.924
6	1.248	1.255	1.256	1.254
8	1.546	1.554	1.555	1.553



(a)



(b)

Figure III.9 : Effet de l'épaisseur de la plaque sur les contraintes interfaciales de la poutre BA renforcée avec une plaque poreuse P-FGM sous charge répartie uniforme.
 (a) Contrainte de cisaillement, (b) Contrainte normale.

III.3. Conclusion

Dans cette étude, nous avons proposé un nouveau modèle analytique permettant de prédire les contraintes d'interface d'une poutre en béton armé renforcée par une plaque en matériaux fonctionnellement gradué (FGM). Il est également démontré l'impact de la porosité qui peut se produire à l'intérieur des matériaux FGM au cours de leur fabrication. De nouvelles règles de mélange ont été utilisées en tenant compte des différents taux de distribution de la porosité dans les plaques FG. Pour évaluer ce modèle, nous avons comparé les résultats du modèle proposé avec ceux de la littérature. Les résultats obtenus ont montré un excellent accord. De plus, des études paramétriques approfondies ont été présentées en utilisant la solution proposée pour les poutres BA renforcées avec différents rapports de paramètres de conception. L'étude des contraintes d'interface et des facteurs qui les influencent permet de comprendre la rupture par délaminage de ces poutres et de développer des règles de conception appropriées. Les résultats indiquent une concentration considérable des contraintes de décollement et de cisaillement aux extrémités de la plaque FGM par rapport aux solutions existantes. Les résultats montrent que les contraintes normales et de cisaillement à l'interface sont influencés par les paramètres de matériau et de géométrie de la poutre renforcée, et que l'inhomogénéité de la plaque de renfort joue un rôle important dans la répartition des contraintes maximales.

Chapitre IV

Modélisation numérique via MEF des poutres
renforcées par CFRP : Cas cisaillement.

IV.1. Introduction

La méthode d'analyse par éléments finis (MEF), introduite à l'origine par Turner et al. (1956), est une technique de calcul puissante pour les solutions approximatives à une variété de problèmes d'ingénierie du "monde réel" ayant des domaines complexes soumis à des conditions limites générales. L'analyse par éléments finis est devenue une étape essentielle de la conception ou de la modélisation d'un phénomène physique dans diverses disciplines d'ingénierie [50].

Les besoins des industries de pointe et les progrès des ordinateurs ont conduit à un développement considérable des techniques de calcul des structures au cours des vingt dernières années. De ce fait, la méthode des éléments finis est largement utilisée pour analyser les structures dans de nombreux domaines tels que l'aérospatiale, le nucléaire, le génie civil, la construction navale, la mécanique, etc. [47].

Ce chapitre a pour objet, en premier lieu, de mettre en lumière le principe de la méthode des éléments finis et l'importance de l'analyse par MEF. Le deuxième et le principal objectif de ce chapitre consiste à présenter une analyse numérique basée sur le logiciel ANSYS APDL afin d'analyser la réponse et de prédire le comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites.

IV.2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique mathématique permettant d'établir et de résoudre des systèmes d'équations aux dérivées partielles (ou intégrales). En ingénierie, la méthode des éléments finis est utilisée pour diviser un système dont le comportement ne peut être prédit à l'aide d'équations de forme fermée en petits éléments dont la solution est connue ou peut être approximée. La méthode des éléments finis exige que la géométrie du système soit définie par un certain nombre de points dans l'espace appelés nœuds. Chaque nœud possède un ensemble de degrés de liberté (température, déplacements, etc.) qui peuvent varier en fonction des entrées du système. Ces nœuds sont reliés par des éléments qui définissent les interactions mathématiques des degrés de liberté (DOF) [44].

La figure ci-dessous montre le déroulement de la solution d'un problème d'analyse de structure par la méthode des éléments finis.

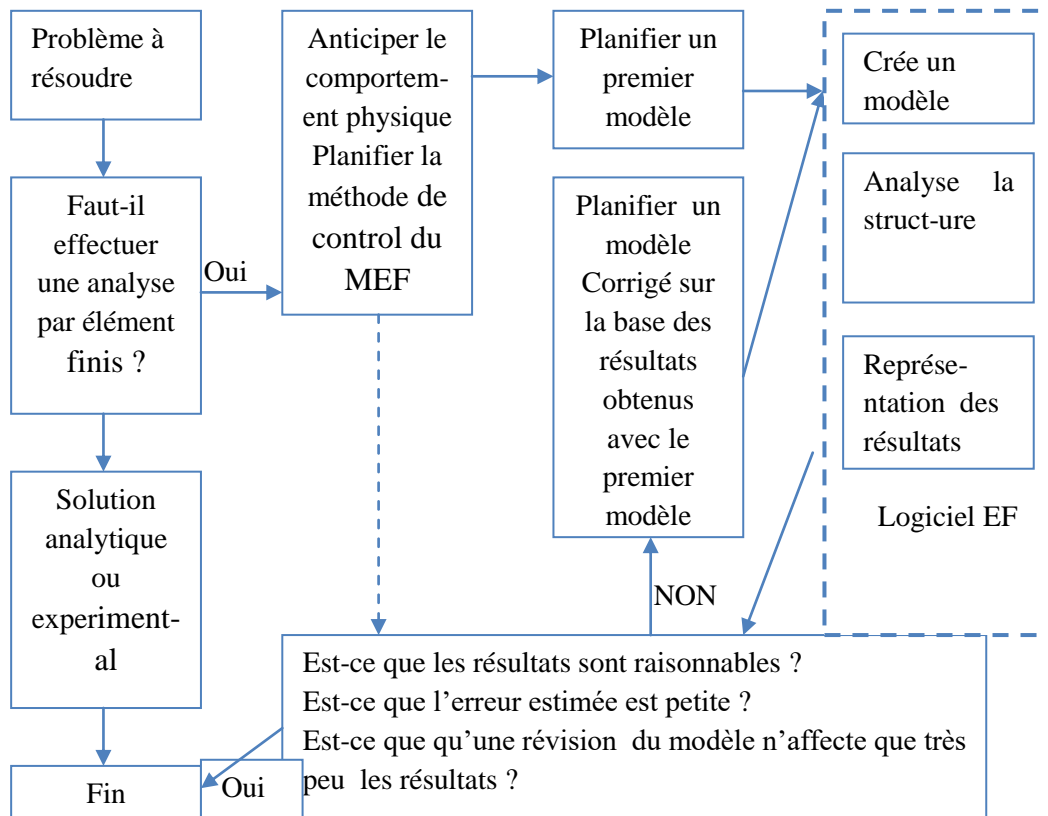


Figure IV.1 : Planification d'une analyse [45].

Après avoir opté pour la résolution du problème en utilisant la méthode des éléments finis, il est important de garder à l'esprit les remarques suivantes : De plus en plus accessibles et faciles d'utilisation, les programmes d'analyse par éléments finis offrent la possibilité de concevoir des graphiques extrêmement attrayants. Même un utilisateur incapable peut produire des résultats, et pour certains, il est assez difficile de les rejeter en raison des efforts déployés pour les obtenir. Pour préparer un modèle adéquat, un utilisateur responsable doit avoir une compréhension approfondie de la nature physique du problème traité et du comportement des éléments finis. Les résultats ne sont pas sous la responsabilité de l'utilisateur, mais plutôt du fournisseur du logiciel. En outre, des erreurs de programmation peuvent altérer la qualité des résultats [45].

IV.3. Principe de la méthode des éléments finis en statique

La méthode des éléments finis, ou analyse par éléments finis, est une technique de calcul utilisée pour obtenir des solutions approximatives à des problèmes de valeurs limites en ingénierie.

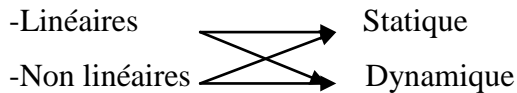
Les problèmes de valeurs limites sont également appelés problèmes de champ. Le champ est le domaine d'intérêt et représente le plus souvent une structure physique.

Les variables de champ sont les variables dépendantes d'intérêt régies par l'équation différentielle.

Les conditions aux limites sont les valeurs spécifiées des variables de champ (ou des variables associées telles que les dérivées) sur les limites du champ [46].

IV.4. Classification des traitements

Les principales catégories de problèmes de calcul des structures et les différents types de traitement numérique qui en résultent sont [47] :



IV.5. Besoin d'étude MEF

Aujourd'hui, de nombreux logiciels adaptés aux besoins des utilisateurs sont disponibles sur le marché. On peut donc se poser la question suivante : "pourquoi étudier l'analyse par éléments finis ?

L'argument ci-dessus n'est pas valable. La connaissance des éléments finis permet à un bon ingénieur d'être meilleur, tandis qu'un simple utilisateur sans connaissance des éléments finis peut produire des résultats plus dangereux. Pour utiliser correctement les logiciels d'analyse d'éléments finis, l'utilisateur doit connaître clairement les points suivants :

1. Quels sont les éléments à utiliser pour résoudre le problème en question ?
2. Comment discrétiser pour obtenir de bons résultats ?
3. Comment introduire correctement les conditions aux limites ?
4. Comment les propriétés des éléments sont développées et quelles sont leurs limites ?
5. Comment les affichages sont développés en pré et post processeur afin de comprendre leurs limites ?
6. Comprendre les difficultés liées au développement des programmes d'analyse par éléments finis et, par conséquent, la nécessité de vérifier les logiciels disponibles dans le commerce à l'aide des résultats de cas standard ?

Si l'utilisateur n'a pas de connaissances en matière d'analyse des éléments finis, il risque d'obtenir de mauvais résultats et de faire preuve d'un excès de confiance. Il est donc nécessaire que les utilisateurs du logiciel EF aient une bonne connaissance de l'analyse des éléments finis [48].

IV.6. Procédure générale pour l'analyse par éléments finis

Certaines étapes de la formulation d'une analyse par éléments finis d'un problème physique sont communes à toutes ces analyses, qu'il s'agisse d'un problème structurel, de transfert de chaleur, d'écoulement de fluide ou d'un autre problème. Ces étapes sont intégrées

dans des logiciels commerciaux d'éléments finis. Certaines d'entre elles sont mentionnées dans les paragraphes suivants [49].

IV.6.1. Prétraitement

L'étape de prétraitement est généralement décrite comme la définition du modèle et comprend les éléments suivants [49]

- Définir le domaine géométrique du problème.
- Définir le(s) type(s) d'élément(s) à utiliser.
- Définir les propriétés matérielles des éléments.
- Définir les propriétés géométriques des éléments (longueur, surface, etc.).
- Définir les connectivités des éléments (maillage du modèle).
- Définir les contraintes physiques (conditions limites).
- Définir les charges.

L'étape de prétraitement (définition du modèle) est critique. Une solution éléments finis parfaitement calculée n'a absolument aucune valeur si elle correspond au mauvais problème.

IV.6.2. Solution

Au cours de la phase de résolution, le logiciel d'éléments finis rassemble les équations algébriques sous forme de matrice et calcule les valeurs inconnues de la (des) variable(s) primaire(s) du champ. Les valeurs calculées sont ensuite utilisées par substitution inverse pour calculer des variables dérivées supplémentaires, telles que les forces de réaction, les contraintes des éléments et le flux de chaleur [49].

IV.6.3. Post-traitement

L'analyse et l'évaluation des résultats de la solution sont appelées post-traitement. Le logiciel de post-traitement contient des routines sophistiquées utilisées pour trier, imprimer et tracer des résultats sélectionnés à partir d'une solution par éléments finis. Voici quelques exemples d'opérations qui peuvent être effectuées [49].

- Classer les contraintes des éléments par ordre de grandeur.
- Vérifier l'équilibre.
- Calculer les facteurs de sécurité.
- Tracer la forme structurelle déformée.
- Animer le comportement dynamique du modèle.
- Produire des diagrammes de température codés en couleur.

Bien que les données de la solution puissent être manipulées de nombreuses façons lors du post-traitement, l'objectif le plus important est de faire preuve d'un bon jugement d'ingénieur pour déterminer si les résultats de la solution sont physiquement raisonnables.

IV.7. Application de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être utilisée pour analyser des problèmes structurels et non structurels. Les domaines structurels typiques sont les suivants :

- Analyse des contraintes, y compris l'analyse des treillis et des cadres, et les problèmes de concentration des contraintes généralement associés aux trous, aux joints ou à d'autres changements de géométrie dans un corps.
- Flambage.
- Analyse vibratoire.

Les problèmes non structurels comprennent

- Transfert de chaleur.
- Débit de fluide, y compris infiltration à travers des milieux poreux.
- Distribution de potentiel électrique ou magnétique.

Enfin, certains problèmes d'ingénierie biomécanique (qui peuvent inclure une analyse des contraintes) incluent généralement des analyses de la colonne vertébrale humaine, du crâne, des articulations de la hanche, des implants dentaires de la mâchoire/des gencives, du cœur et des yeux [46].

IV.8. Avantages de la méthode des éléments finis

Comme indiqué précédemment, la méthode des éléments finis a été appliquée à de nombreux problèmes, tant structurels que non structurels. Cette méthode présente de nombreux avantages qui la rendent très populaire. Ils incluent la capacité [46] :

- Modélisez assez facilement des corps de forme irrégulière.
- Gérer les conditions générales de charge sans difficulté.
- Corps de modèle composés de plusieurs matériaux différents, car les équations des éléments sont évaluées individuellement.
- Gérer un nombre illimité et des types de conditions aux limites
- Varier la taille des éléments pour permettre l'utilisation de petits éléments si nécessaire.
- Modifier le modèle d'éléments finis relativement facilement et à moindre coût.
- Gérer le comportement non linéaire existant avec de grandes déformations et des matériaux non linéaires

La méthode d'analyse structurelle par éléments finis permet au concepteur de détecter les contraintes, les vibrations et les problèmes thermiques au cours du processus de conception et d'évaluer les modifications apportées à la conception avant la construction d'un éventuel modèle [3].

IV.9. Logiciel de simulation ANSYS

En 1970, John Swanson a développé un programme commercial d'éléments finis à usage général qu'il a appelé ANSYS. La version originale d'ANSYS contenait 40 éléments de différents types (ressorts, amortisseurs, poutres, briques, etc.) dont plusieurs éléments avec des degrés de liberté thermique. Aujourd'hui, les produits ANSYS sont utilisés dans tous les grands domaines de l'ingénierie, notamment l'aérospatiale, l'automobile, le traitement chimique, la construction, l'électronique, l'énergie, les soins de santé, la marine et les matériaux.

ANSYS est un logiciel polyvalent de modélisation par éléments finis destiné à résoudre numériquement une grande variété de problèmes mécaniques. Ces problèmes comprennent l'analyse statique/dynamique, l'analyse structurelle (linéaire et non linéaire), le transfert de chaleur et les problèmes de fluides, ainsi que les problèmes acoustiques et électromagnétiques [49].

IV.10. Description du programme expérimental

L'objectif du développement du modèle EF est d'explorer le comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées par deux types de polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) liés extérieurement, tel qu'évalué dans le programme expérimental d'Al-Shamayleh et al [50]. Cette section fournit un résumé du programme expérimental.

Le béton avec des granulats ordinaires et une résistance à la compression de 42,62 MPa a été utilisé pour couler trois poutres en béton armé. Ces poutres ont une section transversale de 300 × 200 mm et une longueur totale de 2000 mm. L'armature en acier utilisée pour renforcer ces poutres consistait en deux barres de 10 mm de diamètre dans la zone de compression et trois barres de 25 mm de diamètre dans la zone de traction de la section transversale de la poutre. En outre, des étriers de 8 mm ont été ajoutés à ces poutres, espacés de 280 mm et de 40 mm avant et après chaque support. Chaque barre comprend un enrobage de 40 mm. Dans ce travail, deux poutres renforcées avec des laminés ou des feuilles de CFRP sont utilisées en plus d'un spécimen de contrôle non renforcé de poutres en béton armé. **Le tableau IV.1** contient les détails complets et l'identification du spécimen étudié. **Le tableau IV.1** indique également la désignation de ces spécimens pour la modélisation par éléments finis.

Les vues d'ensemble de l'élévation des spécimens de poutre en béton armé de contrôle et améliorés et les détails des sections transversales correspondantes sont présentées dans la **figure IV.2**. Sous flexion en trois points et rapport de charge constant de 10 kN/min, la charge a été appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique d'une capacité de 700 kN.

Tableau IV.1 : Description des poutres en béton armé sélectionnées pour l'analyse.

Poutre	Désignation comme dans les tests [50]	Désignation des modèles développés	Type de FRP	Largeur du FRP (mm)
Poutre de contrôle (non renforcée)	CS1	CB	N/A	N/A
Poutre renforcée par trois bandes de lamelles horizontales.	CS2	SBTH	Laminé CFRP	100
Renforcement d'une poutre avec des feuilles de CFRP par le biais d'une enveloppe en U.	CS4	SBUW	Feuille CFRP	500

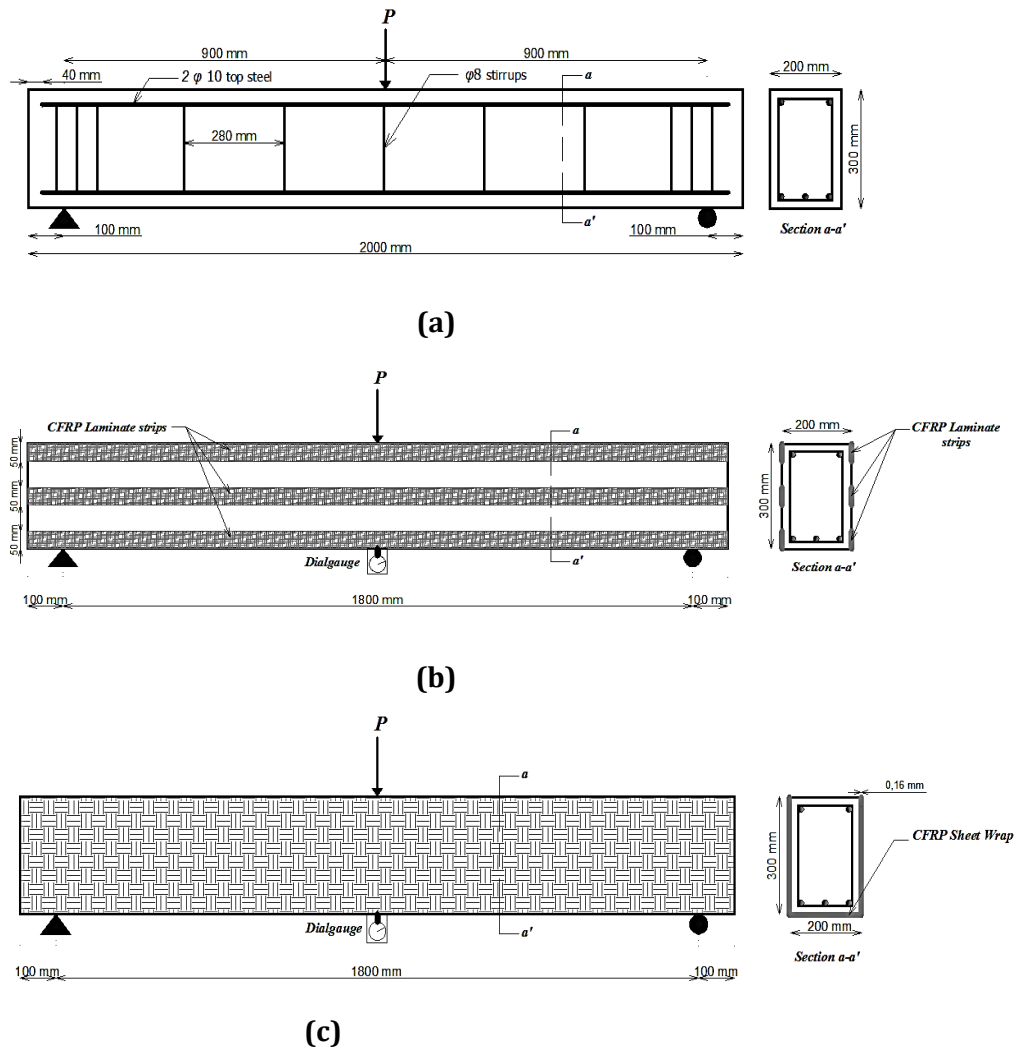


Figure IV.2 : Détails de renforcement, (a) dimensions de la section transversale de la poutre (b) bandes horizontales ; (c) feuille enveloppée en U [50].

IV.11. Simulation par éléments finis

Ce travail examine le comportement en cisaillement des poutres en béton armé collées extérieurement avec des composites en CFRP en utilisant trois modèles de poutres EF, et les résultats numériques sont validés avec des données expérimentales.

Dans ANSYS [51], seule une moitié de la poutre est construite et analysée à l'aide d'un plan symétrique unique s'étendant le long et en travers de chaque poutre afin d'utiliser les qualités symétriques des poutrelles testées en ce qui concerne la géométrie, le chargement et les conditions aux limites. Quatre types d'éléments sont utilisés dans le programme ANSYS, à savoir SOLID65 pour le béton [55], SOLID45 pour les plaques et les supports en acier [55], LINK180-3D pour l'armature en acier [55] et SHELL181 pour le composite CFRP [55]. Les modèles EF réalisés pour trois spécimens sont illustrés dans la figure IV.3. Le premier modèle est une poutre de contrôle, tandis que les autres modèles sont des spécimens renforcés. La

modélisation d'un demi-modèle de la poutre minimise le nombre total d'éléments et donc le temps de traitement.

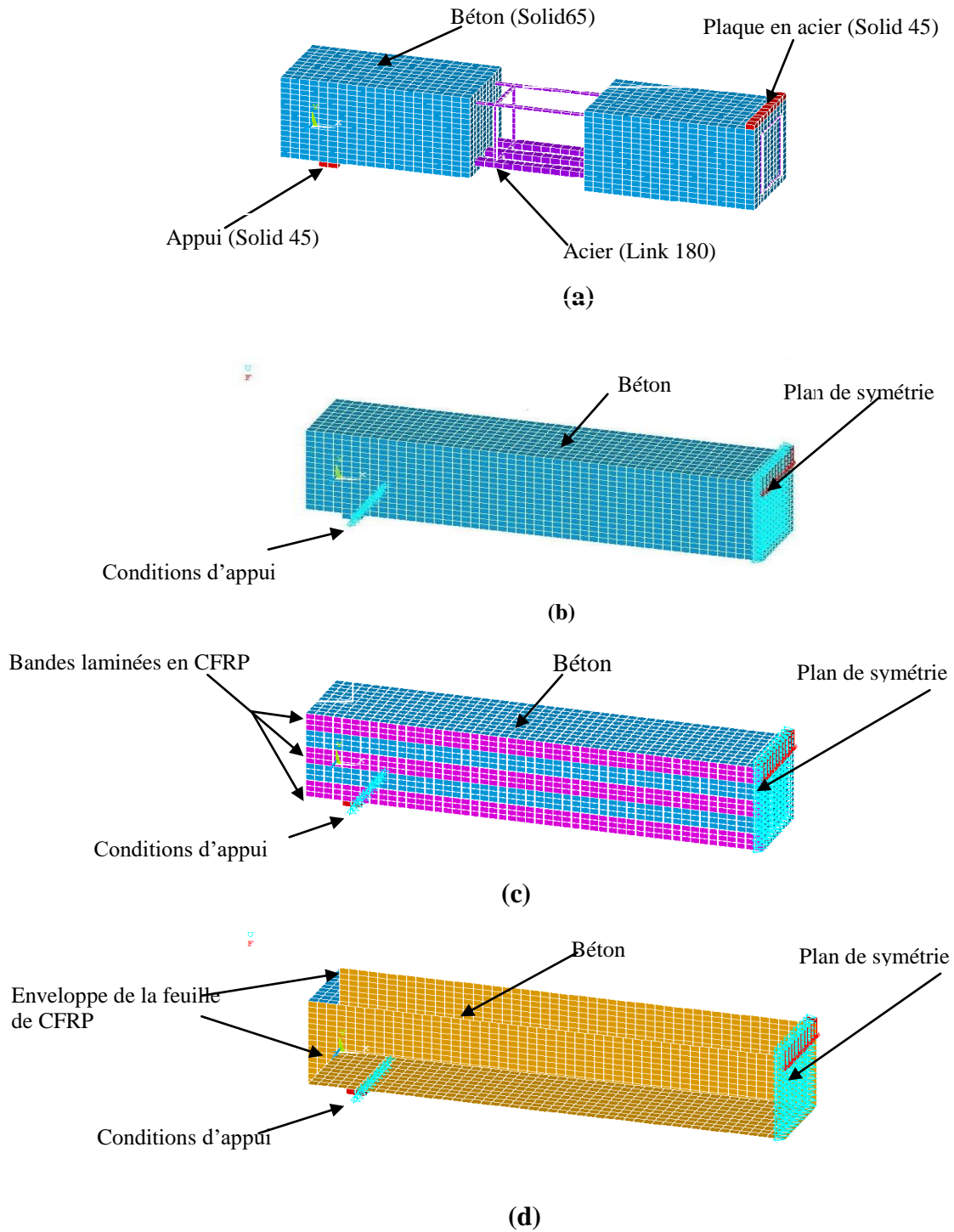


Figure IV.3 : Modèles d'éléments finis, (a) configuration des éléments, (b) conditions limites, (c) et (d) poutres renforcées.

IV.12. Résultats numériques

IV.12.1. Validation des modèles

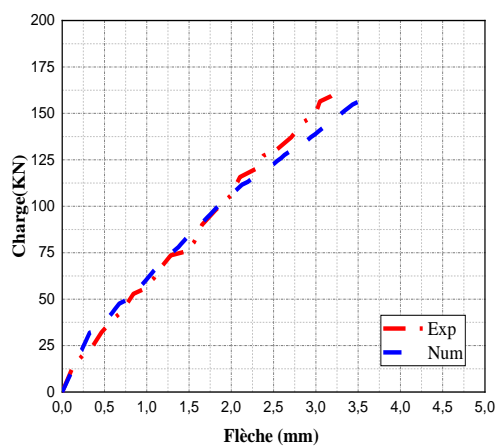
Pour confirmer et valider la précision des modèles numériques, les trois spécimens de test décrits dans la partie précédente ont été modélisés et examinés. Pour un spécimen de poutre de contrôle non renforcé, ainsi que pour deux spécimens renforcés avec trois bandes de laminée en CFRP horizontales et avec une feuille CFRP en U, les résultats prédits et les résultats expérimentaux obtenus sont comparés.

La figure IV.4 présente les courbes expérimentales et prédites de la charge en fonction de la flèche à mi-portée pour trois des spécimens testés. En outre, **le tableau IV.2** présente une comparaison de la charge ultime mesurée expérimentalement (P_u) et de la déflexion à mi-portée (δ_u) qui l'accompagne, avec les valeurs prévues. **La figure IV.4 et le tableau IV.2** montrent clairement que les résultats de la charge et de la déflexion prévus par l'EF sont en accord remarquable avec les données expérimentales mesurées à tous les stades de la charge. En outre, **le tableau IV.2** indique que le pourcentage de différence entre les charges de rupture prédites et les données expérimentales obtenues varie de -6,82% à 1,31% avec une erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) de prédiction de la charge de rupture pour les trois spécimens de 3,98%. En outre, la différence en pourcentage entre la flèche prédite et les résultats expérimentaux allait de -7,36% à 3,34%, respectivement, avec une erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE) du déplacement maximal à mi-portée pour les trois spécimens de 6,61% ; il pourrait être un outil utile pour évaluer la résistance au cisaillement d'une poutre en béton armé collée extérieurement avec des composites en CFRP.

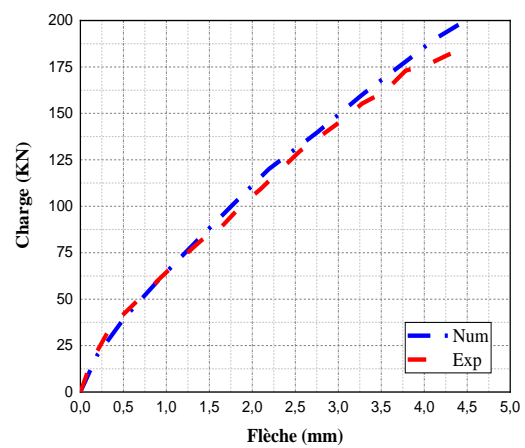
La charge ultime expérimentale et la charge ultime numérique à mi-portée sont comparées dans **la figure IV.5**, tandis que la déflexion ultime expérimentale et la déflexion ultime numérique à mi-portée pour toutes les poutres sont comparées dans **la figure IV.6**. Il apparaît clairement dans les deux figures qu'il y a un grand degré de concordance entre les résultats expérimentaux et numériques pour les charges et les flèches maximales.

Tableau IV.2 : Vérification des résultats entre les modèles expérimentaux et les modèles développés par la méthode des éléments finis.

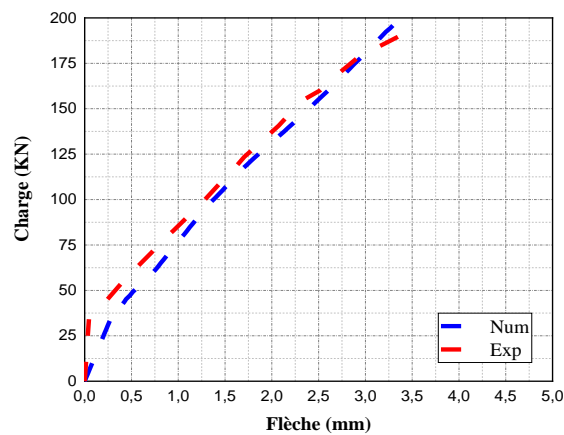
Poutre	P_u (kN)		Différence (%) (EXP- EF)/ EXP	δ_u (mm)		Différence (%) (EXP- EF)/ EXP
	EXP	EF		EXP	EF	
CB	162.14	160	+1.31	3.26	3.50	-7.36
SBTH	187.23	200	-6.82	4.5	4.48	+0.44
SBUW	196,42	203	-3.34	3,59	3.47	+3.34



(a)CB



(b) SBTH



(a) SBUW

Figure IV.4 : Résultats de la charge par rapport à la flèche à mi-portée.

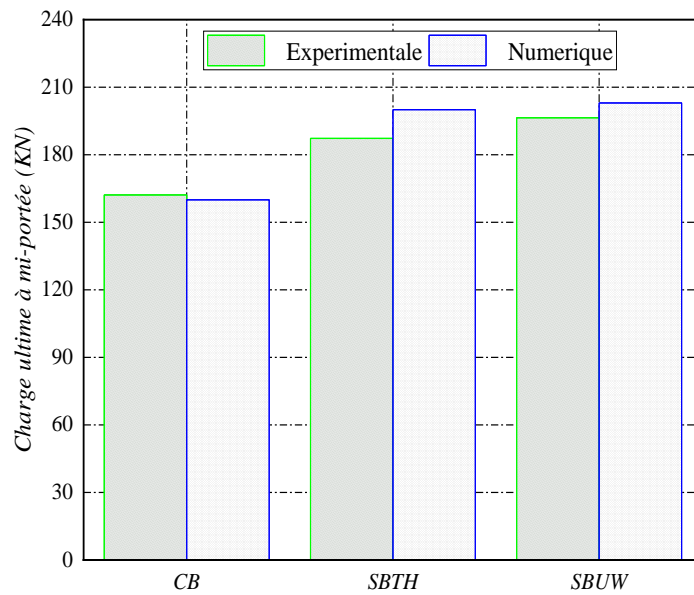


Figure IV.5 : Comparaison entre la charge ultime expérimentale et la charge ultime numérique à mi-portée pour toutes les poutres.

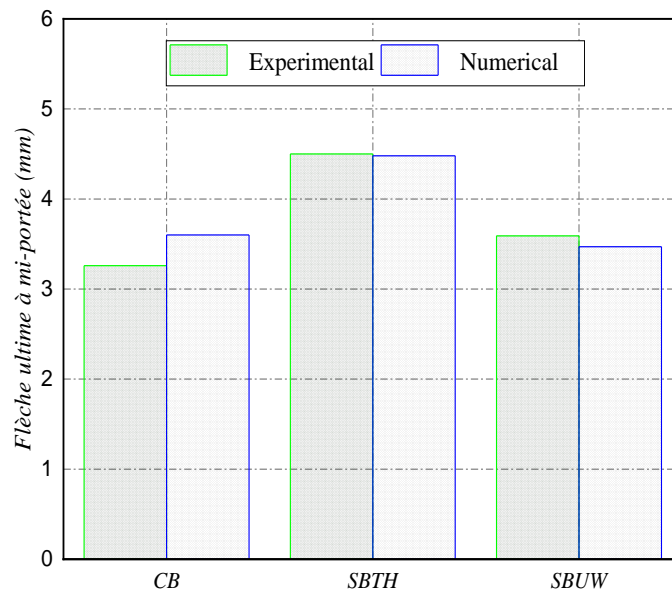
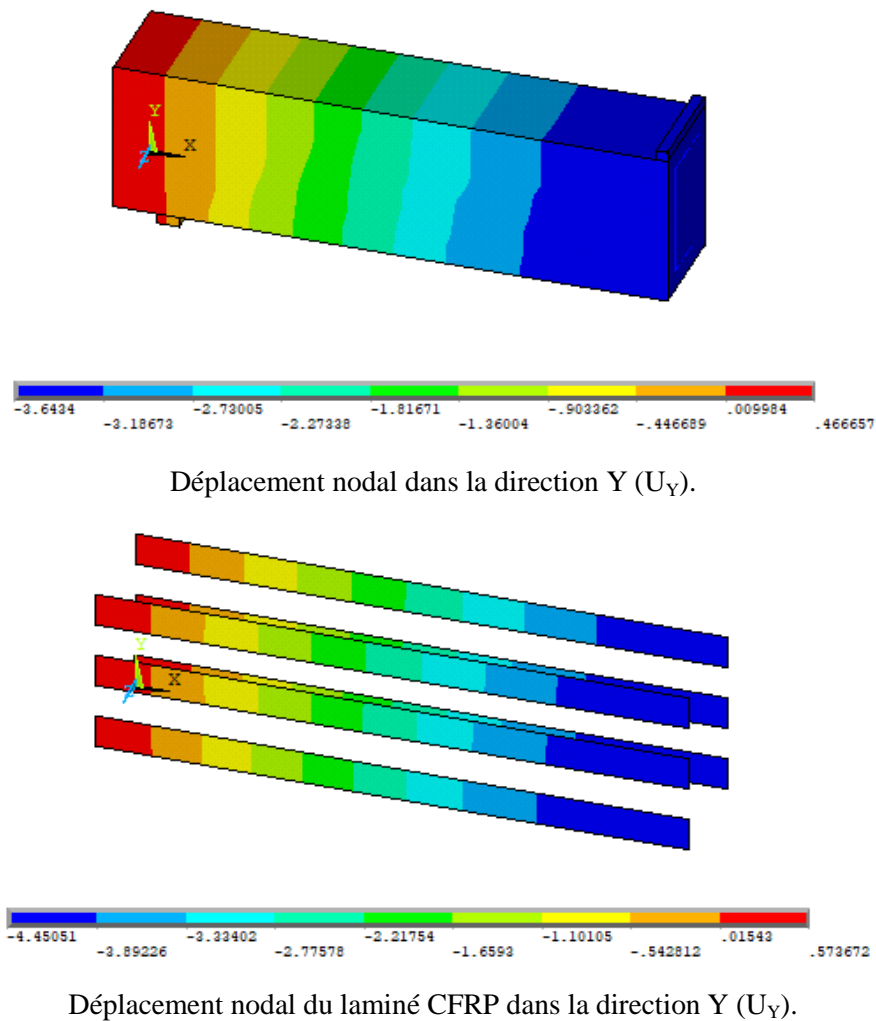


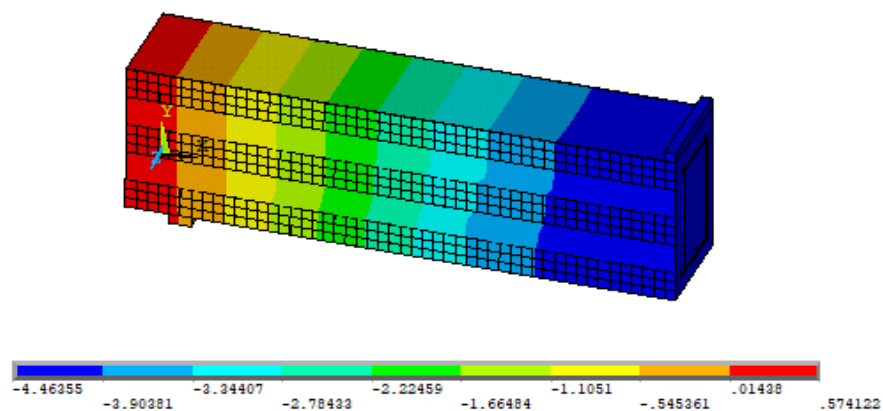
Figure IV.6 : Comparaison entre la déflexion ultime expérimentale et la déflexion ultime numérique à mi-portée pour toutes les poutres.

IV.12.2. Comportement des modèles

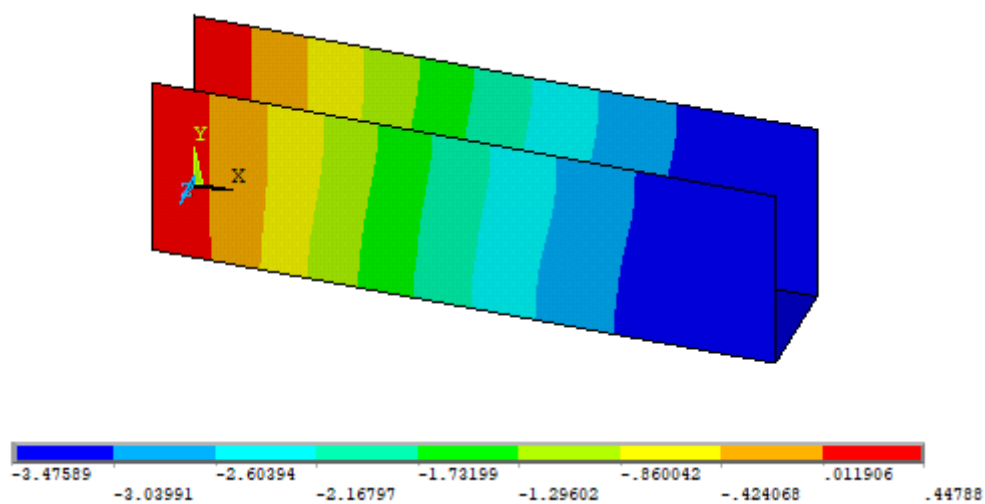
Disposer d'un modèle d'éléments finis aussi fiable et validé est avantageux à bien des égards par rapport aux données mesurées expérimentalement. Les résultats des tests expérimentaux sont généralement limités à ceux enregistrés par un nombre discret de jauges de contrainte et de LVDT en quelques points de la poutre à un moment ou à une charge spécifiés, tandis que le modèle par éléments finis fournit des résultats complets prédits de déformation et de contrainte dans toute la poutre pour l'historique de chargement complet [52].

Dans la **figure IV.7**, on peut observer la valeur de déplacement nodal dans la direction verticale (y) pour chaque type de poutre lors de la rupture. Comme prévu, le déplacement maximal a été atteint au milieu de la poutre.

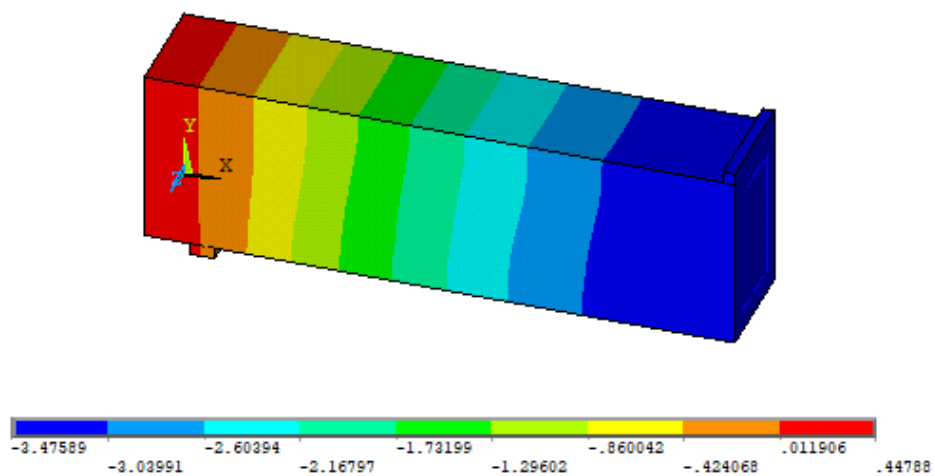




Déplacement nodal de la poutre renforcée dans la direction Y (U_Y).



Déplacement nodal du CFRP dans la direction Y (U_Y).

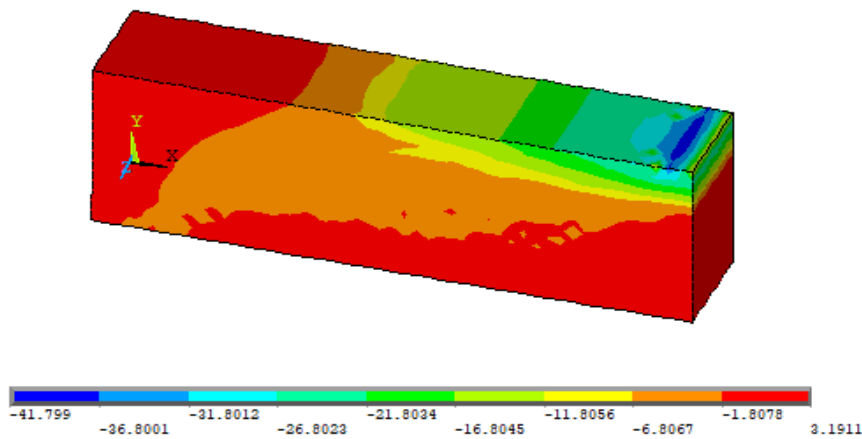


Déplacement nodal de la poutre renforcée dans la direction Y (U_Y).

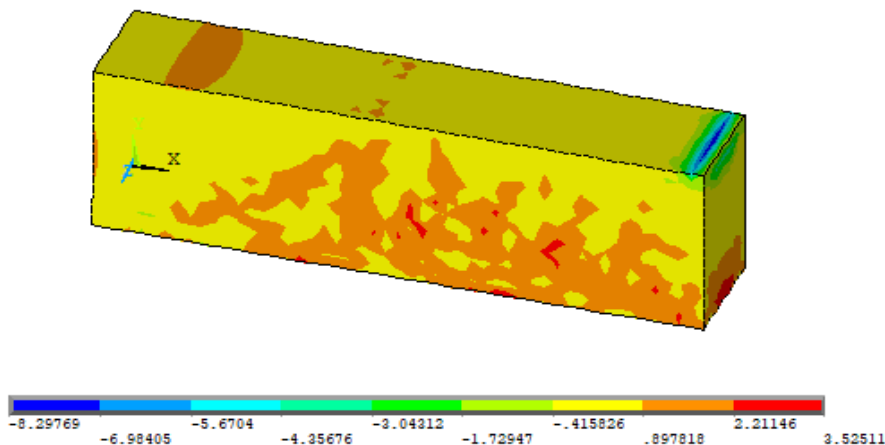
Figure IV. 7: Déplacement nodal dans la direction Y (U_Y) en mm.

La **figure IV.8** présente la contrainte axiale dans la direction longitudinale de la poutre (S_x) ainsi que les contraintes principales (σ_1 et σ_3) pour la poutre non renforcée (CB). La première contrainte principale (σ_1) et la troisième contrainte principale (σ_3) sont respectivement les contraintes maximales de traction et de compression.

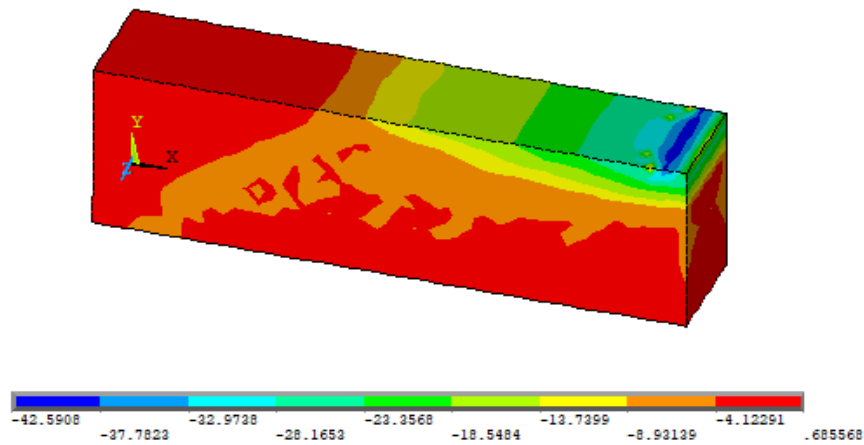
La contrainte principale de compression maximale (σ_3), définie comme la contrainte la plus négative (compression), comme l'indique la **figure IV.8 c**, se concentre autour de la zone du point de chargement. De plus, la première contrainte principale (σ_1) présente des contraintes de traction maximales sur la face inférieure du modèle EF, comme illustré dans la **figure IV.8 b**.



(a) Contrainte axiale (S_x) du béton en (MPa).



(b) Première contrainte principale du béton.



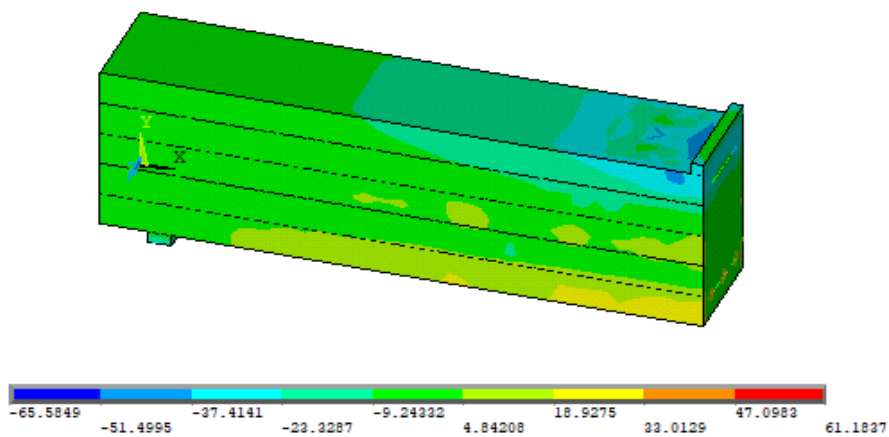
(c) Troisième contrainte principale (σ_3) du béton.

Figure IV.8 : Répartition des contraintes du CB en MPa.

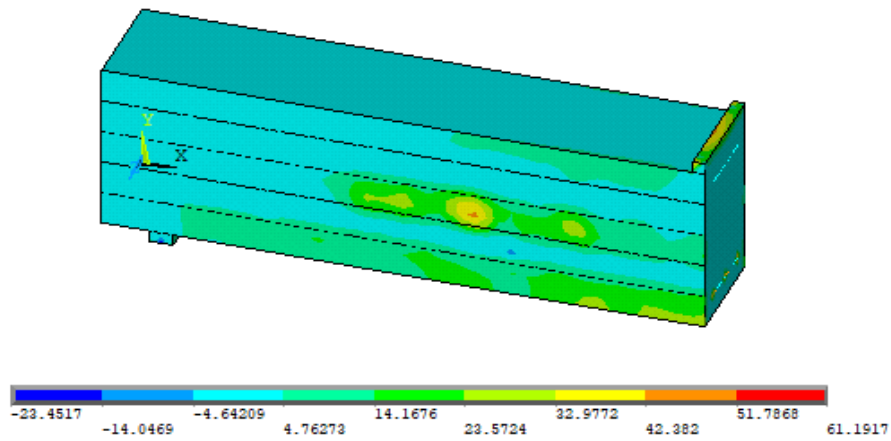
La **figure IV.9** montre les cas de distribution des contraintes pour l'échantillon SBTH à la rupture. Comme le montre la **figure IV.9 (a)**, la contrainte axiale dans la poutre est maximisée autour du coin droit qui simule le milieu de la poutre.

Les contraintes principales de compression maximale (σ_3) pour la poutre SBTH avec et sans CFRP sont indiquées sur la **figure IV.9 (d, e)** et, comme indiqué, elles sont concentrées autour de la zone du point de chargement.

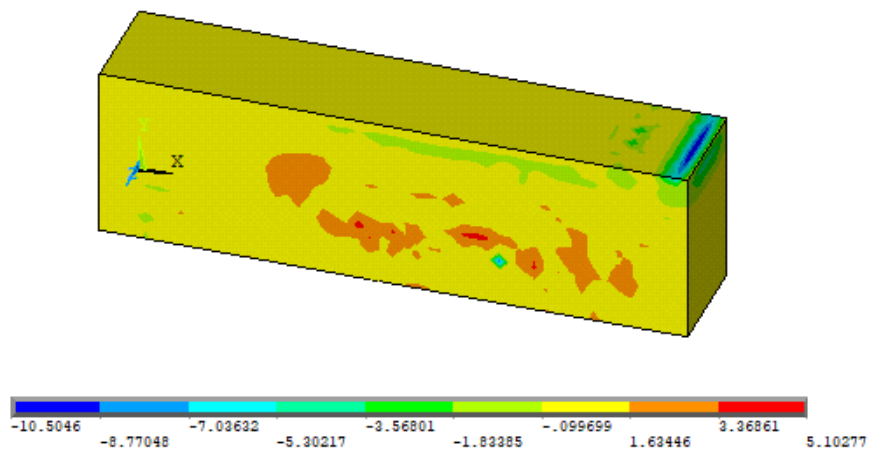
La contrainte de cisaillement dans la direction XY, allant du point de chargement au point d'appui, est illustrée dans la **figure IV.9 (f, g)**.



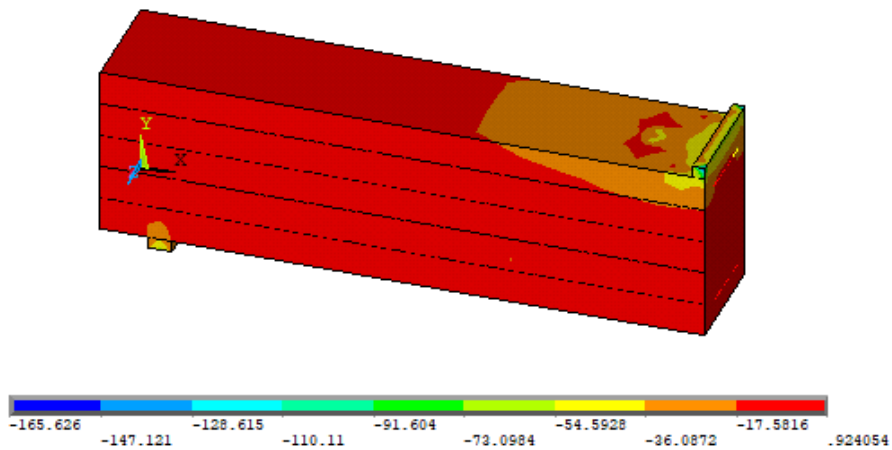
(a) Contrainte axiale de la poutre renforcée.



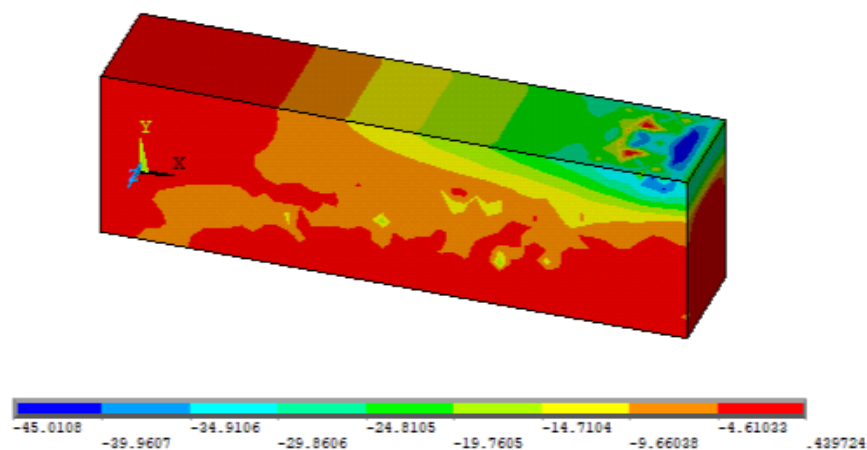
(b) Première contrainte principale (σ_1) de la poutre renforcée.



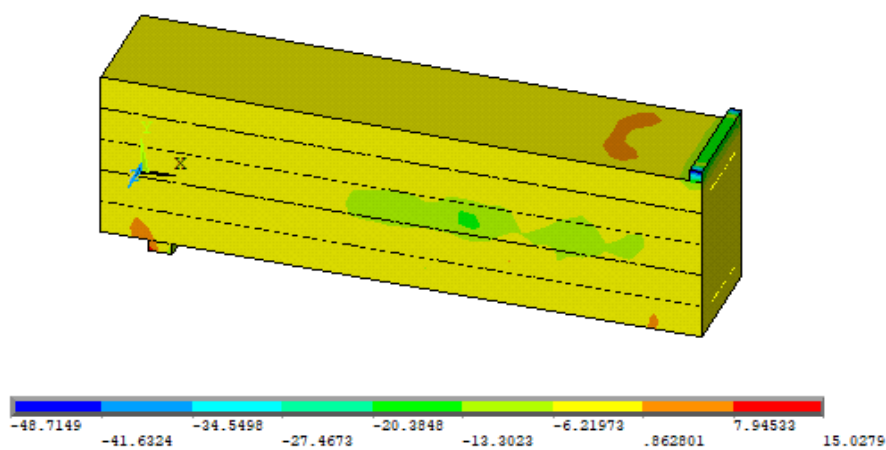
(c) Première contrainte principale (σ_1) du béton.



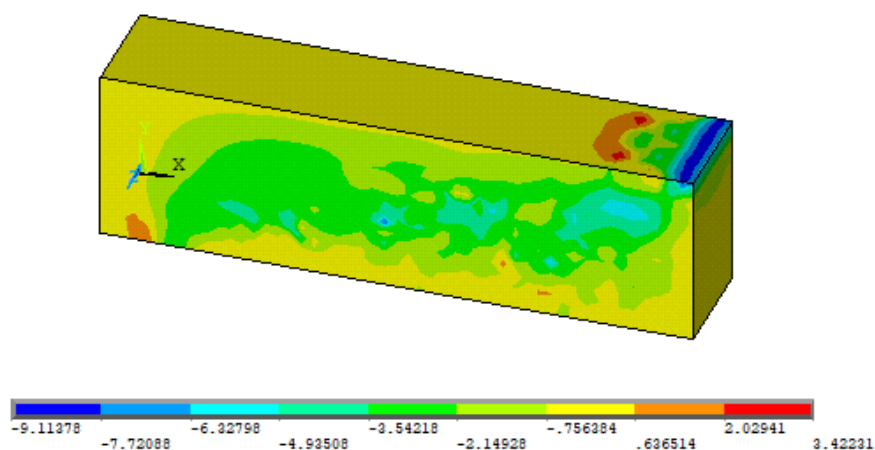
(d) Troisième contrainte principale (σ_3) de la poutre renforcée.



(e) Troisième contrainte principale (σ_3) du béton.



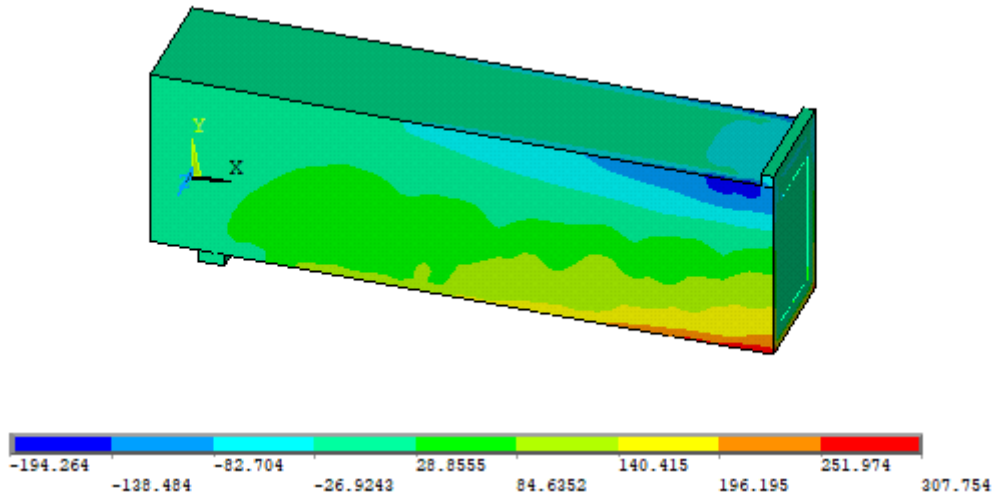
(f) Contrainte de cisaillement dans la direction (XY) de la poutre renforcée.



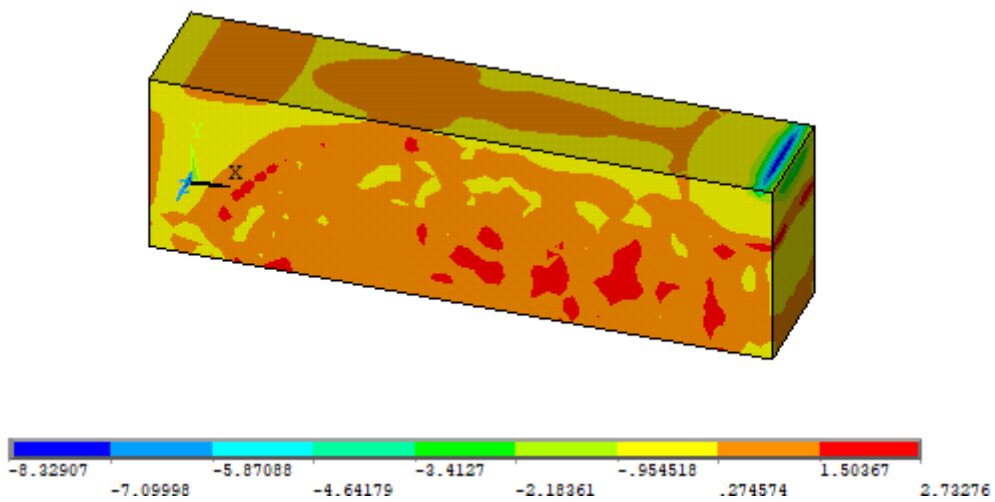
(g) Contrainte de cisaillement dans la direction (XY) du béton.

Figure IV.9 : Répartition des contraintes du SBTH en MPa.

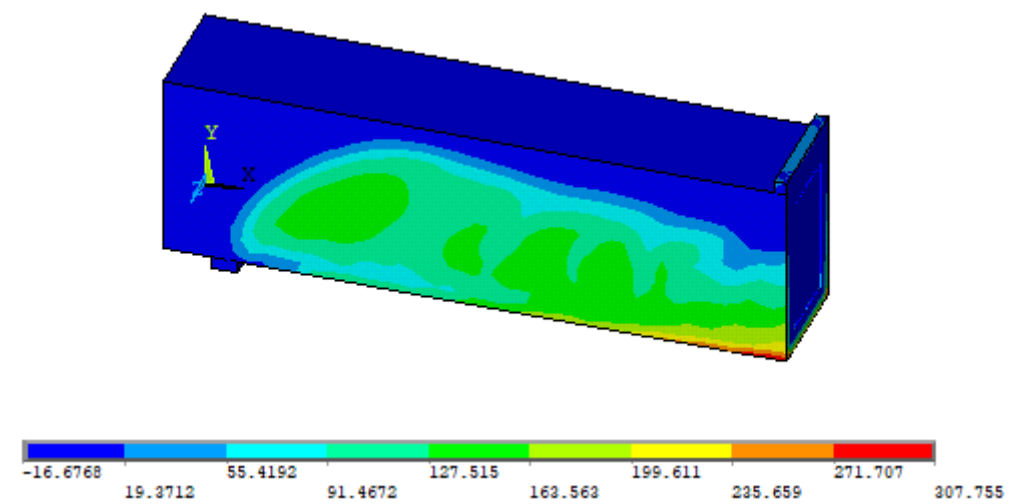
Selon la **figure IV.10**, la poutre SBUW est présentée avec et sans composite CFRP afin de mettre en évidence le comportement du béton et la répartition des contraintes dans les deux situations.



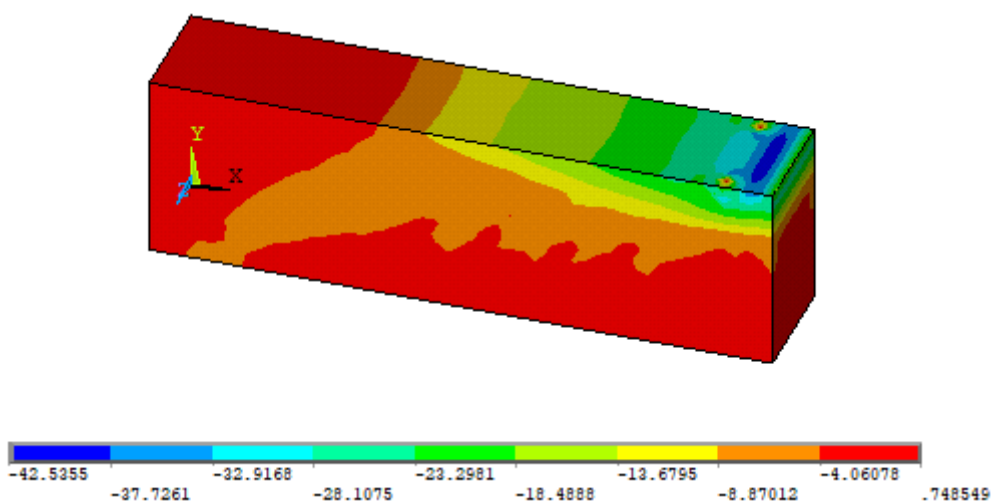
(a) Contrainte axiale de la poutre renforcée.



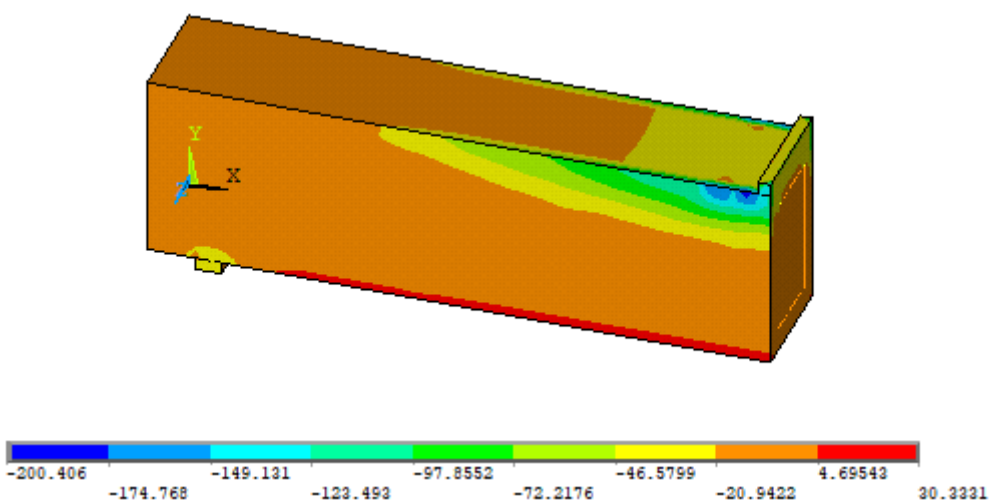
(b) Première contrainte principale du béton.



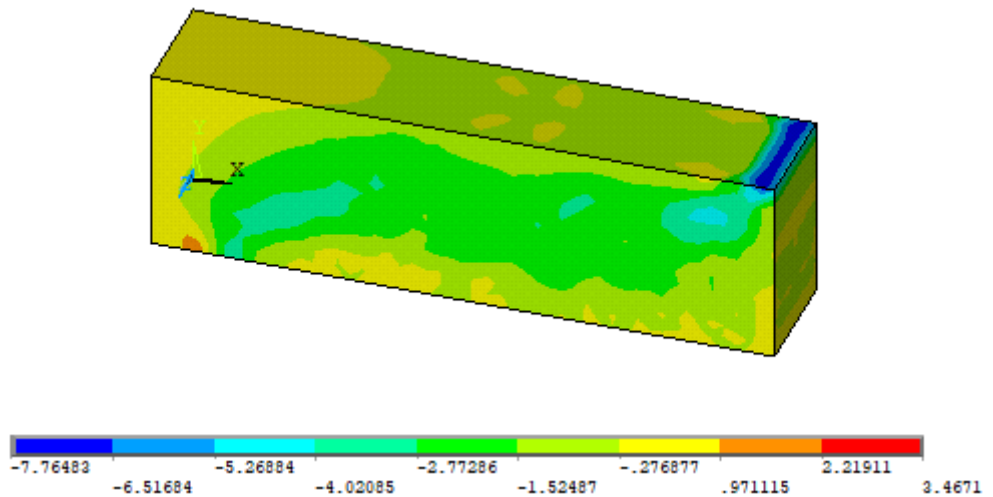
(c) Première contrainte principale (σ_1) de la poutre renforcée.



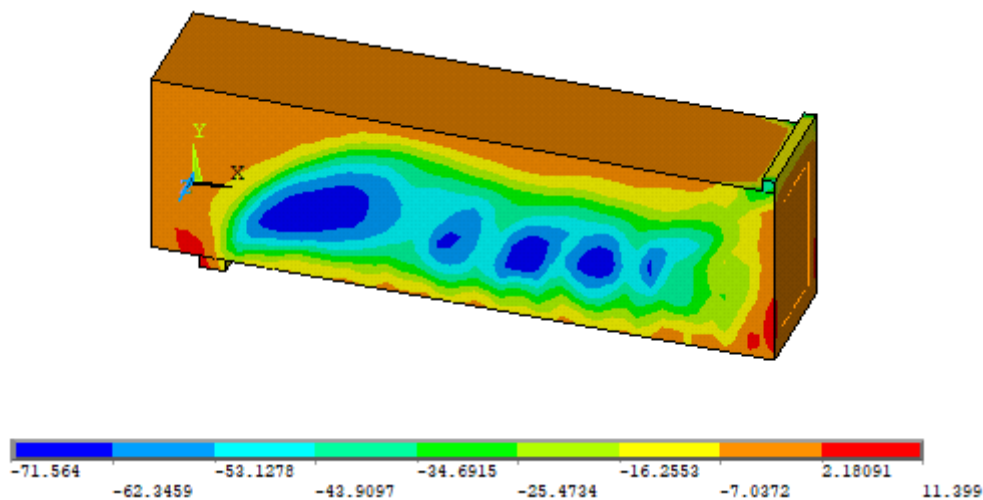
(d) Troisième contrainte principale (σ_3) du béton.



(e) Troisième contrainte principale (σ_3) de la poutre renforcée.



(f) Contrainte de cisaillement du béton dans la direction (XY).



(g) Contrainte de cisaillement de la poutre renforcée dans la direction (XY).

Figure IV.10 : Répartition des contraintes du SBUW en (MPa).

IV.12.3. Modèles de fissures

Le programme d'éléments finis ANSYS peut capturer la configuration des fissures du béton à chaque étape du chargement jusqu'à la rupture des spécimens. **Les figures IV.11 à IV.13** illustrent l'évolution estimée des fissures pour chaque modèle de poutre à différents stades de chargement.

Les figures IV.11 à IV.13 montrent clairement que les fissures commencent à mi-portée de la poutre (bord droit des images présentées) et s'étendent jusqu'à produire une fissure de cisaillement significative du point de chargement jusqu'à l'extrémité d'appui.

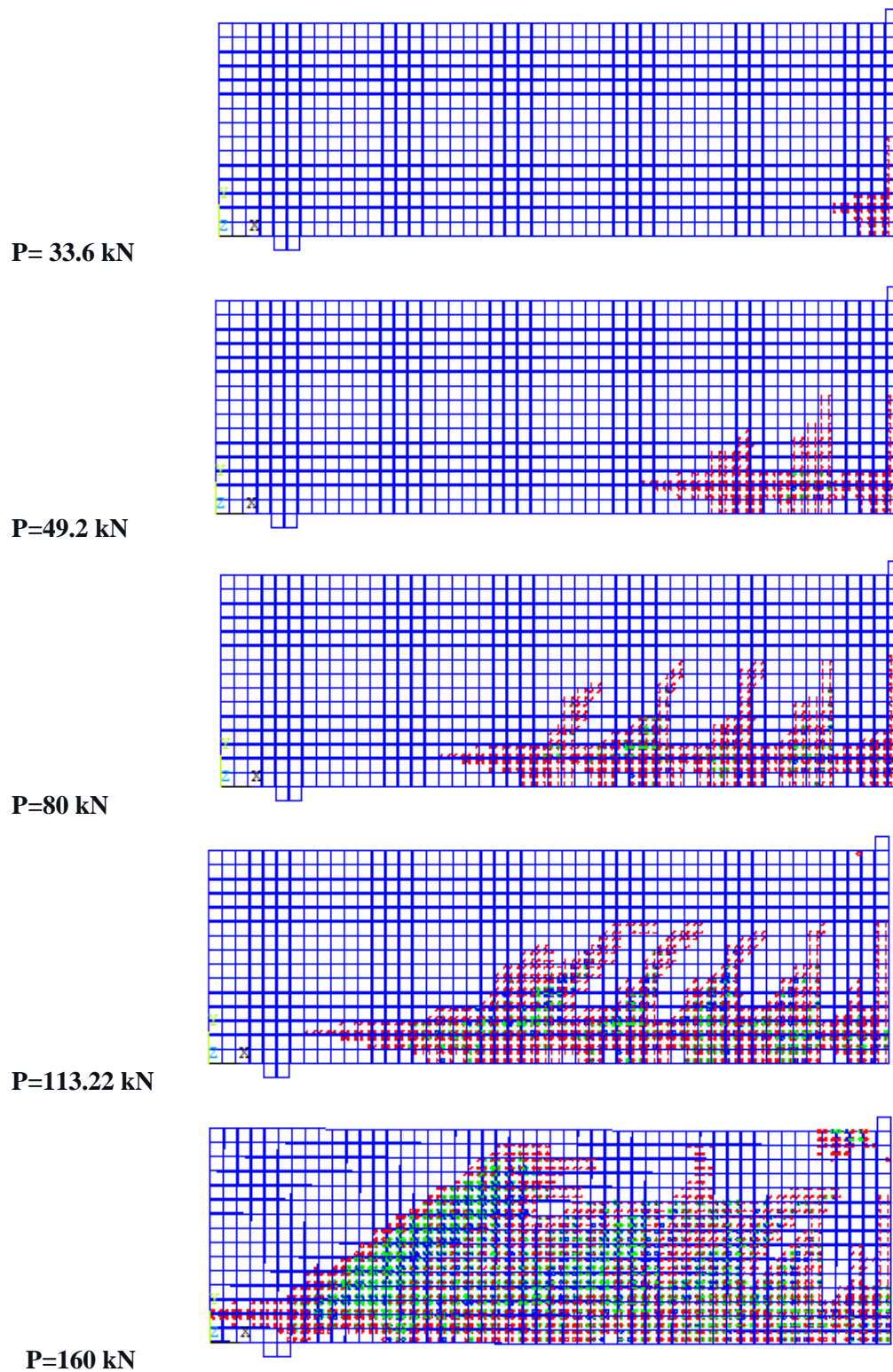


Figure IV.11 : Propagation des fissures dans la poutre CB avec différents incréments de charge.

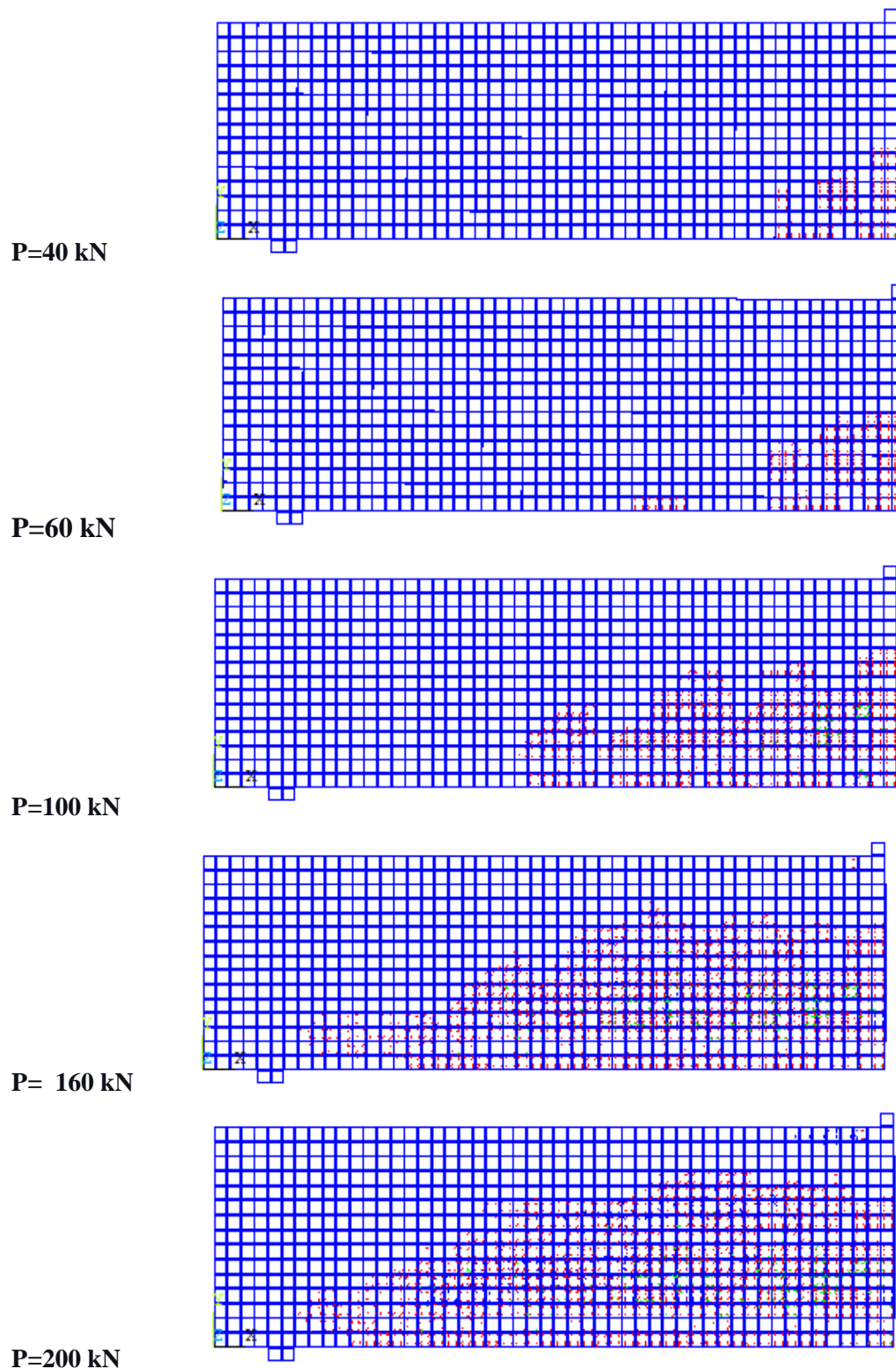


Figure IV.12 : Propagation des fissures dans la poutre SBTH avec différents incréments de charge.

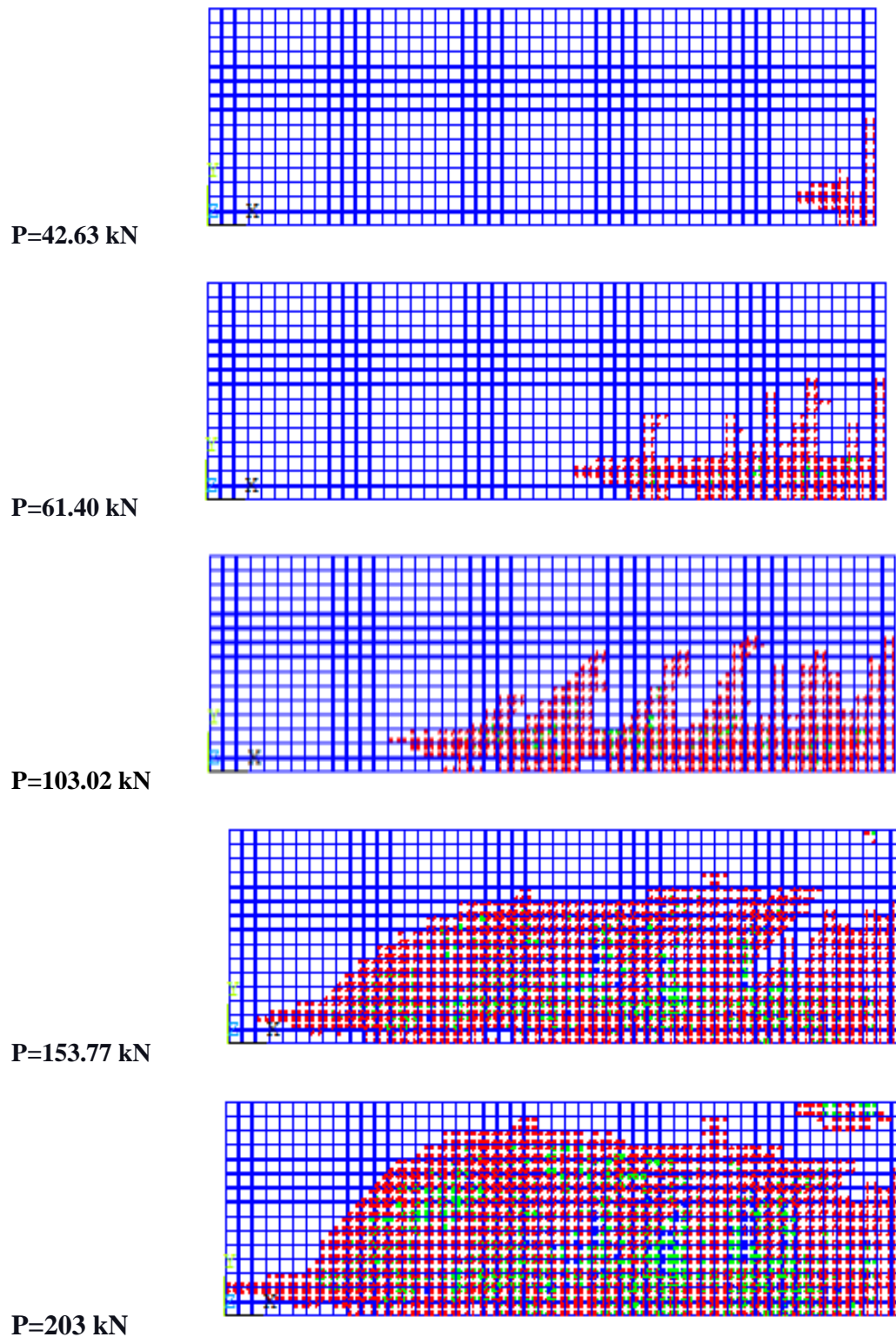


Figure IV.13 : Propagation des fissures dans la poutre SBUW avec différents incréments de charge.

IV.13. Étude paramétrique

Dans cette section, une étude paramétrique orientée vers la conception est réalisée en développant et en analysant dix modèles EF supplémentaires pour étudier l'effet de l'orientation des fibres de carbone, de l'inclinaison du CFRP et du nombre de plis sur la réponse au cisaillement des poutres en béton armé renforcées extérieurement avec CFRP à enveloppe complète avec l'espacement, comme illustré dans le **tableau IV.3**.

Tableau IV. 3: Désignation des modèles.

Paramètre	Désignation poutre	Résistance à la compression (MPa)	Type de FRP	Espacement(mm)	Orientation (°)	Épaisseur (mm)	Nombre de couches	Orientations des fibres (°)
Orientations des fibres.	CB 60	60	N/A*	-	-	-	-	-
	CC-90- 1/0		CFRP	100	90	1.02	1	0°/45°/90°
Inclinaison du FRP + nombre de plis.	CC-90-1/0		CFRP	100	90	1.02	1	0°
	CC-90-1/04		CFRP	100			2	0°/45°
	CC-90-1/049		CFRP	100			3	0°/45°/90°
	CC-45-1/0		CFRP	100	45		1	0°
	CC-45-1/04		CFRP	100			2	0°/45°
	CC-45-1/049		CFRP	100			3	0°/45°/90°

* Non applicable.

Définition de l'ID

CB 60: Poutre non renforcée– Résistance à la compression.

CC-90-1/0: Ccarbone (CC) – angle d'orientation (90 /45) – Nombre de couches (1/2/3) / Orientations des fibres.

IV.13.1. Impact de l'orientation des fibres du composite CFRP

1.1. Réponse charge-flèche

Afin d'étudier l'effet de l'orientation des fibres de carbone sur le comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées extérieurement par le composite CFRP, quatre modèles EF ont été développés et analysés. Le premier modèle n'a pas été renforcé et les trois autres spécimens ont été renforcés. Les modèles analysés avaient une résistance à la compression du béton de 60 MPa. Le composite CFRP a une épaisseur et une largeur de 1,02 mm et 100 mm, respectivement. En outre, le composite CFRP a une résistance à la traction, un module d'élasticité et une déformation à la rupture de 1240 MPa, 73.77 GPa et 1.7 %, [53, 62] respectivement.

Les courbes de réponse de la charge prédite en fonction du déplacement à mi-portée pour les modèles développés sont présentées à la **figure IV.14**. En outre, la charge ultime prédite (P_u) ainsi que la flèche à mi-portée correspondante (Δ_u) et le mode de rupture sont résumés et comparés dans le **tableau IV.4** ci-dessous.

Le **tableau IV.4** et la **figure I.14** montrent que le renforcement de la poutre de contrôle par une couche de CFRP avec l'orientation des fibres 0° , 45° et 90° augmente la charge ultime de la poutre de 25.48%, 24.13% et 16.58%, respectivement, par rapport à la poutre de contrôle, ce qui correspond à des charges ultimes de 123.60, 122.27 et 114.84 kN, respectivement.

Tableau IV.4 : Effet de l'orientation des fibres sur la performance des poutres.

	Poutre non renforcée	Poutre renforcée		
		Orientation des fibres		
		0°	45°	90°
Force P_u (KN)	98.50	123.60	122.27	114.84
Flèche Δ_u (mm)	5.21	9.20	9.10	7.12
Augmentation par rapport à la poutre de contrôle P_u (%)	-	25.48	24.13	16.58
Augmentation par rapport à la poutre de contrôle Δ_u (%)	-	76.58	74.66	36.66
Mode de rupture	Plastification des armatures et écrasement du béton.	Rupture du CFRP, plastification des armatures et écrasement du béton.		

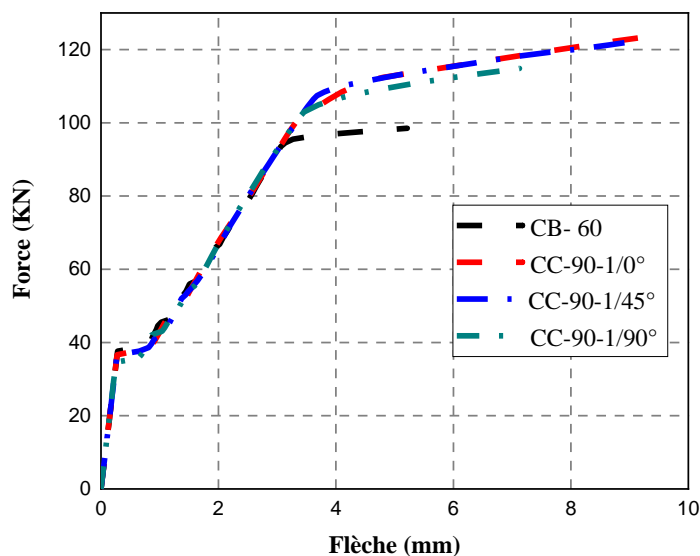


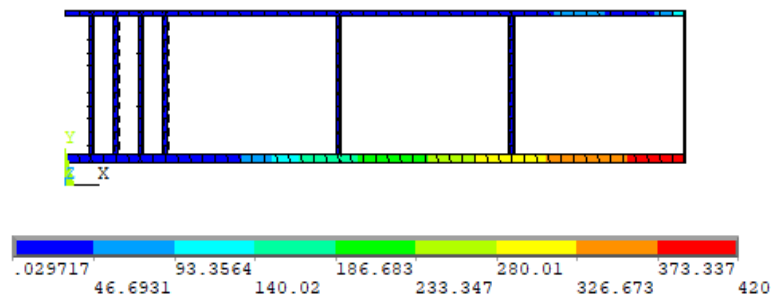
Figure IV.14 : Influence de l'orientation des fibres de carbone sur la performance des poutres.

IV.13.1.2. Mode de rupture

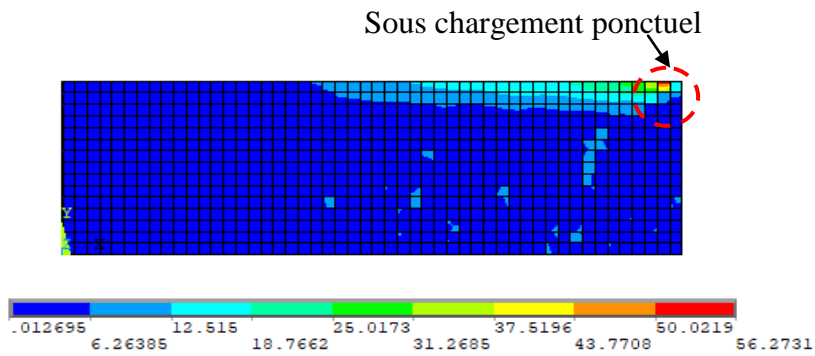
La figure IV.15 illustre le processus de rupture de la poutre de contrôle CB-60 en utilisant le code ANSYS.

Les résultats des simulations montrent que les premières fractures, appelées fissures de flexion et indiquées par un cercle rouge, se manifestent au début de la portée médiane de la poutre lorsque la contrainte de Von Mises dans la zone de traction de la poutre dépasse la résistance à la traction du béton (4.80 MPa). Le début de la déformation de l'armature en acier de traction et la formation des secondes fissures, indiquées par le cercle vert dans la figure IV.15, sont causés par une augmentation de la charge appliquée, qui entraîne également une augmentation de la contrainte de Von Mises dans le béton et la propagation horizontale des fissures de flexion de la travée centrale à la poutre.

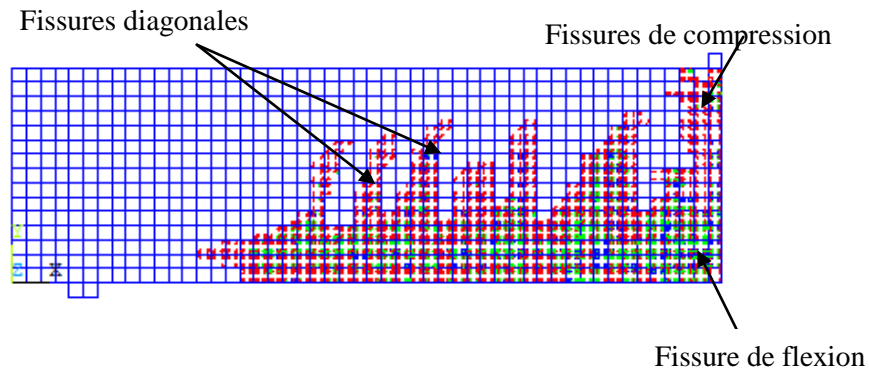
De nombreuses fissures de flexion commencent à se former et à s'étendre jusqu'à ce que la contrainte de Von Mises dans l'armature en acier atteigne la limite d'élasticité de l'armature en acier de traction (420 MPa). Ces fissures de flexion se transforment finalement en fissures d'écrasement, représentées par un contour octaédrique bleu. Ainsi que des fissures de cisaillement diagonal, qui se forment et se propagent vers le lieu de chargement.



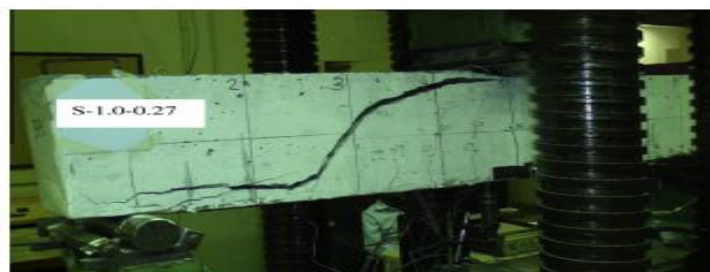
Valeurs de la contrainte de Von Mises dans les barres d'armature en acier (MPa).



Niveaux de contrainte de Von Mises dans le béton (MPa).



Modèles de fissuration numérique.

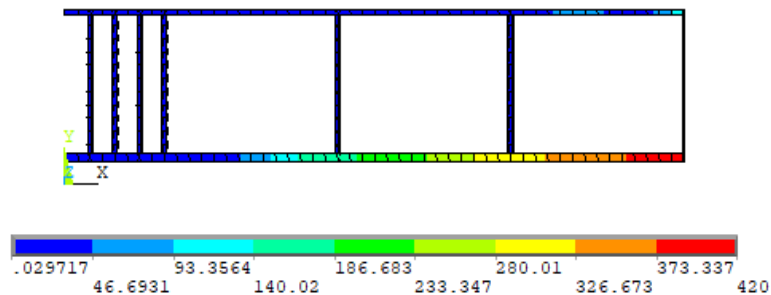


Mode de rupture typique [64].

Figure IV.15 : Modes de rupture de la demi-poutre de contrôle CB-60.

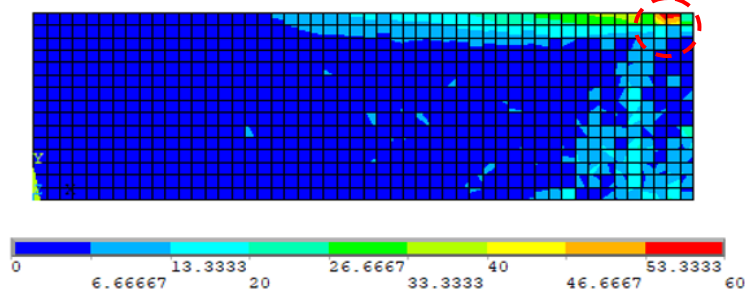
La **figure IV.16** montre le mode de rupture de la poutre renforcée CC-90- 1/0°. La rupture commence par la rupture du composite CFRP lorsque la déformation de Von Mises (0.02) dépasse la déformation ultime (0,004) [64] avec l'hypothèse d'une liaison parfaite entre le béton et le CFRP, suivie par la plastification de l'armature en acier de traction lorsque la contrainte de Von Mises dans l'armature en acier atteint la limite d'élasticité.

La propagation des fissures pour CC-90- 1/0° est illustrée dans **la figure IV.16**. Les fissures de flexion apparaissent à mi-portée. Lorsque les charges appliquées augmentent, les fissures verticales de flexion se propagent horizontalement de la mi-portée à l'appui. À une charge appliquée plus élevée, des fissures de traction diagonales apparaissent. L'augmentation des charges appliquées induit des fissures diagonales et de flexion supplémentaires. Enfin, des fissures de compression apparaissent pratiquement aux dernières étapes de la charge appliquée. L'apparition des fissures définit le mode de ruine de la poutre.

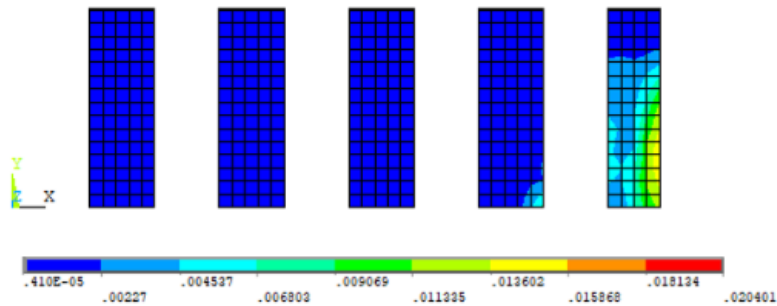


Valeurs de la contrainte de Von Mises dans les barres d'armature en acier (MPa)

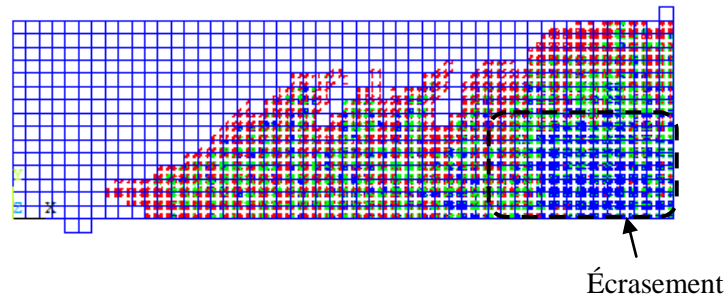
Sous chargement ponctuel



Niveaux de contrainte de Von Mises dans le béton (MPa).



Niveaux de déformation de Von Mises dans le CFRP.



Modèle de fissuration numérique.



Rupture du composite CFRP [65].

Figure IV.16 : Modes de rupture de la demi-poutre renforcée.

IV.13.2. Impact du nombre de plis dans le composite CFRP

Afin d'étudier l'impact du nombre de plis du composite CFRP sur la performance des poutres en béton armé renforcées extérieurement par des composites en CFRP de 100 mm de large, deux angles d'orientation différents des CFRP (45° et 90°) ont été examinés. Au total, sept modèles ont été développés et analysés. Le premier modèle n'était pas renforcé. Trois modèles du groupe 1 avec une inclinaison de 90° du composite CFRP et trois modèles du groupe 2 avec une inclinaison de 45° du composite CFRP.

Les figures IV.17 et IV.18 présentent les courbes de réponse de la charge prédite en fonction du déplacement à mi-portée pour les modèles développés. De plus, les tableaux IV.5 et IV.6 ci-dessous résumet et comparent la charge ultime prédite (P_u), la flèche à mi-portée correspondante (Δ_u) et le mode de rupture.

La figure IV.17 et le tableau IV.4 montrent que la charge ultime de la poutre en béton armé renforcée augmente légèrement avec l'augmentation du nombre de couches de 1 à 3 pour le premier groupe. Tandis que dans le deuxième groupe, comme illustré dans la figure IV.18 et tableau IV.6, la capacité de cisaillement de la poutre augmente de 39.70%, 52.28% et 65.34%, respectivement, par rapport à la poutre de contrôle, ce qui correspond à des charges ultimes de 137.61, 150 et 162.86 kN, respectivement. Ce constat est en accord avec [66].

Tableau IV.5 : Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP vertical à 90°).

	Poutre non renforcée	Poutre renforcée		
		Nombre des couches		
		1	2	3
Force P_u (KN)	98.50	123.60	124.25	126.23
Flèche Δ_u (mm)	5.21	9.20	8.99	7.80
Augmentation par rapport à la poutre de contrôle P_u (%)	-	25.48	26.14	28.15
Augmentation par rapport à la poutre de contrôle Δ_u (%)	-	76.58	72.55	49.71
Mode de rupture	Plastification des armatures et écrasement du béton.	Rupture du CFRP, plastification des armatures et écrasement du béton		

Tableau IV.6 : Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP incliné à 45°).

	Poutre non renforcée	Poutre renforcée		
		Nombre des couches		
		1	2	3
Force P_u (KN)	98.50	137.61	150	162.86
Flèche Δ_u (mm)	5.21	7.84	7.71	8.15
Augmentation par rapport à la poutre de contrôle P_u (%)	-	39.70	52.28	65.34
Augmentation par rapport à la poutre de contrôle Δ_u (%)	-	50.47	47.98	56.42
Mode de rupture	Plastification des armatures et écrasement du béton.	Rupture du CFRP, plastification des armatures et écrasement du béton		

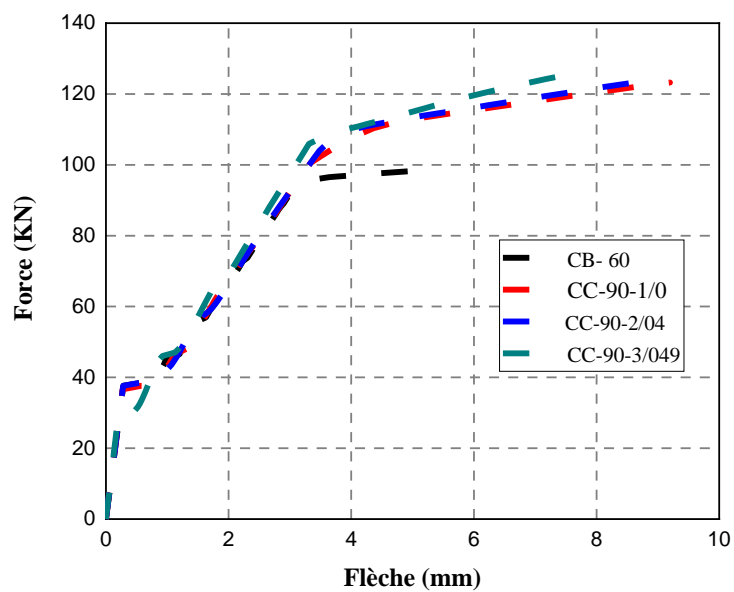


Figure IV.17 : Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP vertical à 90°) sur la performance des poutres.

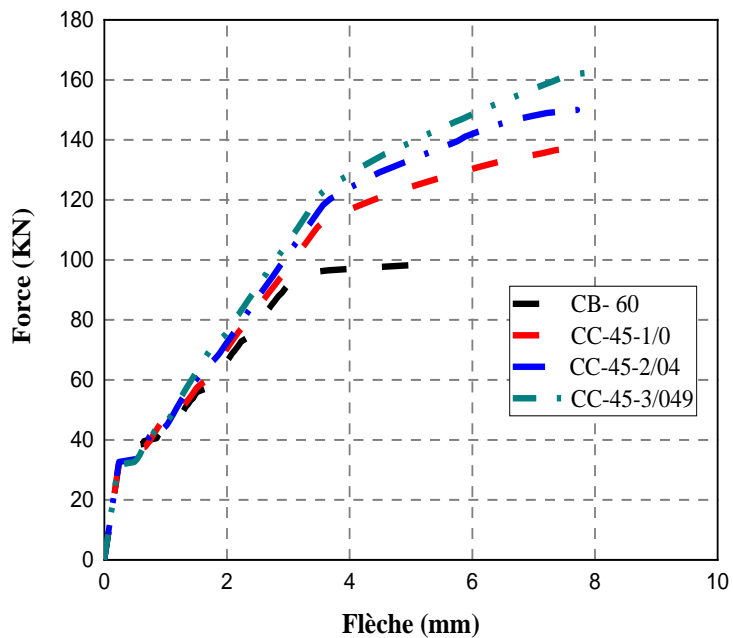


Figure IV.18 : Impact du nombre de plis du CFRP (CFRP incliné à 45°) sur la performance des poutres.

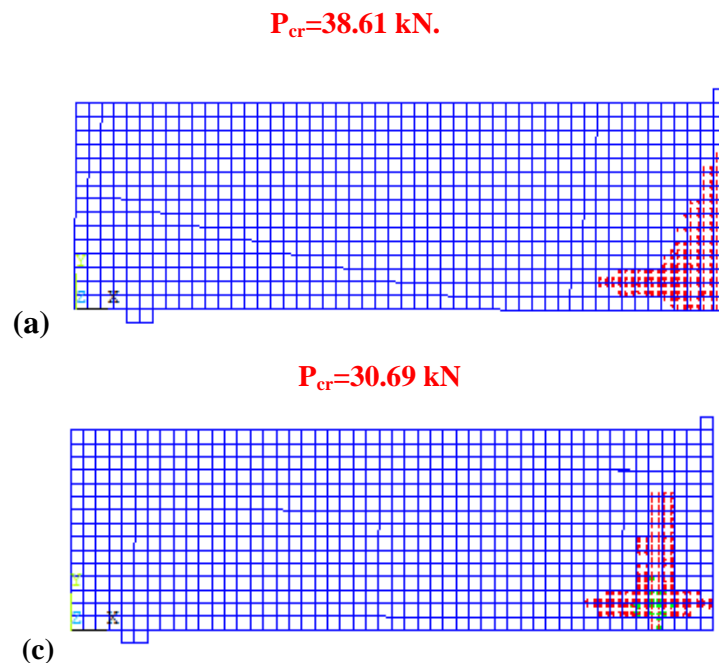
IV.13.3. Discussion des résultats du post-traitement de l'EF

IV.13.3.1. Modèle de fissures

L'élément SOLID65 suppose des fissures de type étalées pour modéliser la fissuration dans la région de tension avec un algorithme de plasticité pour simuler l'écrasement du béton dans la région de compression [56,57]. Le programme ANSYS peut enregistrer les motifs de fissuration à chaque incrément de charge.

Dans les modèles d'éléments finis ANSYS, la fissuration et l'écrasement dans les éléments en béton sont représentés par un contour circulaire à chaque point d'intégration avec trois directions perpendiculaires. Le contour du cercle de couleur rouge, vert et bleu indique les première, deuxième et troisième fissures respectivement [58,59]. Lorsque les contraintes principales (traction ou compression) aux points intégrés de l'élément SOLID65 dépassent la résistance à la compression ou à la traction du matériau en béton, un écrasement ou une fissuration du béton se produit [59].

Les figures IV.19 a, c, e et b, d, f, et la figure IV.20 a-c représentent respectivement la première fissuration, la fissuration à la limite d'élasticité et la fissuration ultime des modèles d'éléments finis CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049.



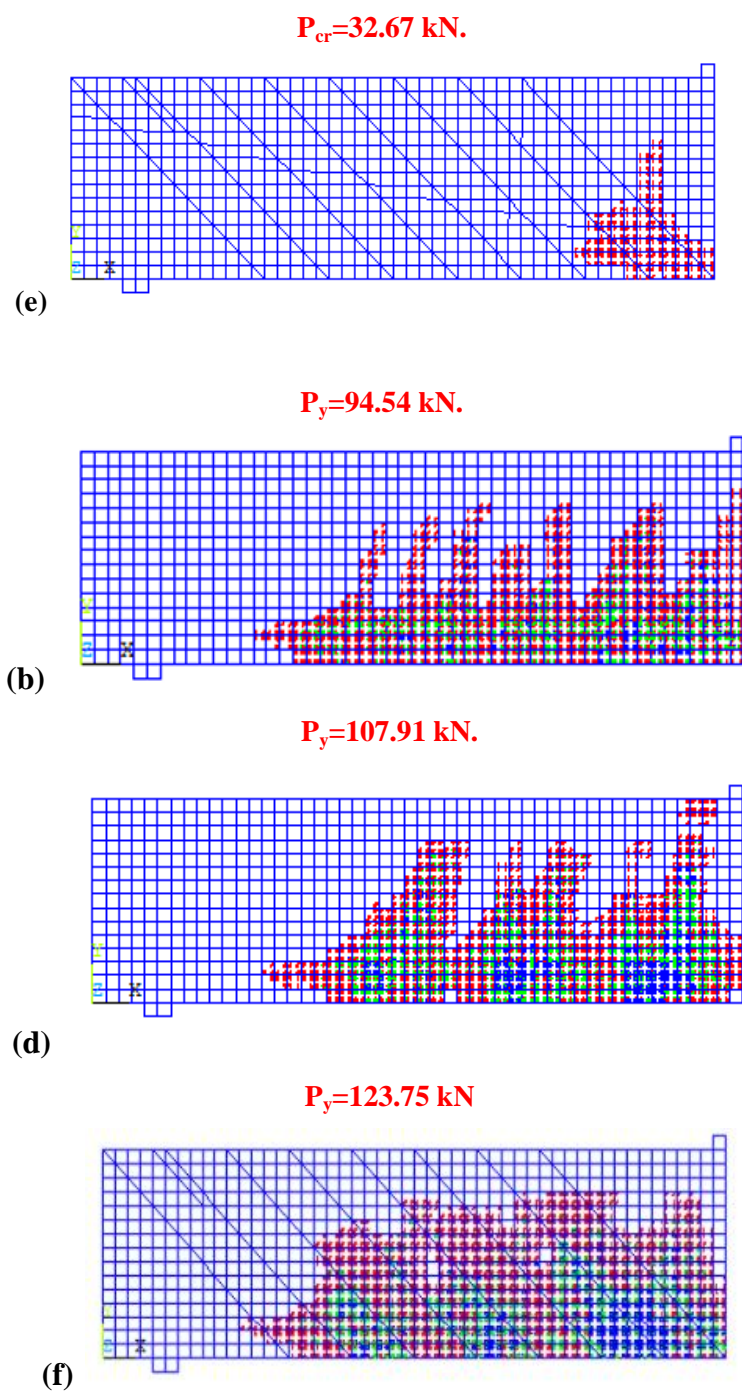
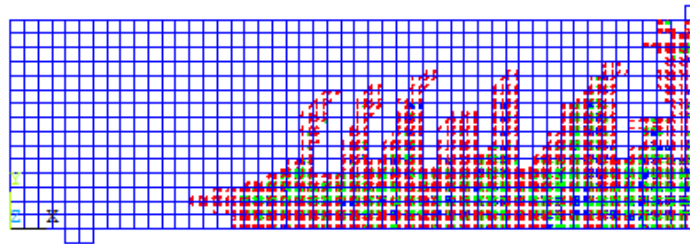


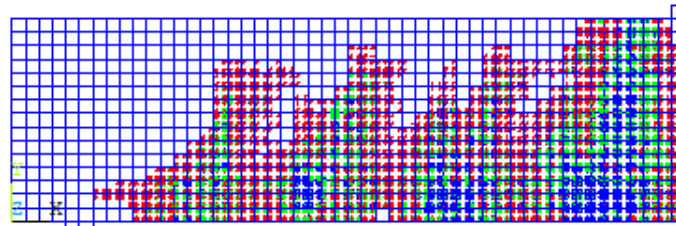
Figure IV.19 : Profils de fissures dans les poutres au moment de la fissuration et plastification des modèles : **a,b** pour le modèle EF CB-60, **c,d** pour modèle EF CC-90-3/049, et **e,f** pour le modèle EF CC-45-3/049.

$P_u=98.5 \text{ kN}$.



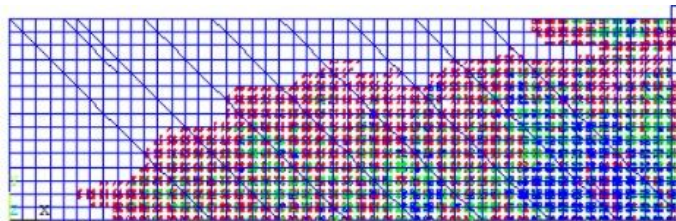
(a)

$P_u=126.23 \text{ kN}$.



(b)

$P_u=162.85 \text{ kN}$



(c)



Rupture du composite CFRP [68].

Figure IV.20: Illustration des modèles de fissuration ultime des poutres : **a** pour le modèle EF CB-60, **b** pour le modèle FE CC-90-3/049 et **c** pour le modèle EF CC-45-3/049.

Les fissures de flexion (première fissure de traction) se développent dans la zone de moment maximal au niveau de la poutre inférieure lorsque les contraintes de traction principales dans la direction x dépassent la résistance maximale à la traction du matériau en béton [59]. Par conséquent, le signe de fissure apparaît comme des lignes verticales (droites)

formées aux points intégrés des éléments de béton (SOLID65), comme le montrent **les figures IV.19 a, c et e**.

À la travée de cisaillement, entre la charge et le support, des contraintes normales (σ) et des contraintes de cisaillement (τ) se développent dans les éléments en béton. Ainsi, la direction de la contrainte de traction principale (σ_1) devient inclinée par rapport à l'horizontale. Au point d'intégration des éléments en béton, une fois que les contraintes principales de traction dépassent la résistance maximale à la traction du béton (f_t), des cercles inclinés apparaissent comme des lignes droites perpendiculaires à la direction des contraintes principales.

Ces fissures sont appelées fissures de traction diagonales, [60,61] comme le montrent **les figures IV.19 et IV.20**. Comme la charge du modèle EF est appliquée dans la direction de la largeur (axe z), elle développe une contrainte de traction dans la direction y. Par conséquent, aux points intégrés des éléments en béton près du lieu de chargement (zone de compression supérieure), le contour du cercle apparaît perpendiculairement aux contraintes principales de traction dans la direction y. On dit qu'il s'agit de fissures de compression, comme le montre **la figure IV.19**.

D'après l'analyse numérique, la première fissure de traction se forme à 38.61, 30.69 et 32.67 kN pour les modèles d'éléments finis CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049, respectivement, et se concentre sur la partie inférieure de la poutre dans la zone de moment maximal, comme indiqué **aux figures IV.19 a, c et e**. Avec un accroissement supplémentaire de la charge appliquée, de nombreuses fissures de traction et diagonales sont développées et propagées vers les points de chargement. Avec des charges plus élevées, la plastification des modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049 se produit à 94.54, 107.91 et 123.75 kN respectivement, et les schémas de fissuration respectifs sont décrits à **la figure IV.19 b, d, et f**.

Lorsque les poutres atteignent son stade ultime, de grandes fissures diagonales apparaissent ainsi que plusieurs fissures de compression qui se forment à la surface supérieure près de la zone de chargement, et finalement les poutres sont considérées comme ruinées, comme le montre **la figure IV.20 a-c**. La rupture des modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049 se produit respectivement à 98,5, 126.23 et 162.85 kN et le schéma de fissuration correspondant est illustré à **la figure IV.20**.

IV.13.3.2. Répartition des contraintes dans le béton et l'armature en acier

Les contraintes prévues par l'EF dans le béton et les armatures en acier sont illustrées dans le **tableau IV.7**. Aux charges de plastification, les contraintes de compression longitudinales (axiales) (à la fibre supérieure) dans le béton à mi-portée de la poutre sont de 41.86, 36.95, et 43.68 MPa pour les modèles CB-60, CC-90-3/049, et CC-45-3/049, respectivement, comme indiqué dans le tableau IV.7. En revanche, les contraintes de traction (fibre inférieure) dans le béton à mi-portée à la charge de rupture sont de 6.45, 7.27, 11.80 MPa pour les modèles CB-60, CC-90-3/049, et CC-45-3/049 respectivement, comme indiqué dans le **tableau IV.7**.

Tableau IV.7: Analyse numérique des contraintes du béton et des armatures en acier aux points critiques.

Modèle EF	Contrainte axiale dans le béton (MPa)						Contraintes axiales des armatures (MPa)	
	Fissuration		Plastification		Ultime		Plastification	
	$f_{c,top}$	$f_{c,bottom}$	$f_{c,top}$	$f_{c,bottom}$	$f_{c,top}$	$f_{c,bottom}$	σ_{st}	σ_{sc}
CB-60	19.83	4.72	41.86	6.45	63.15	5.98	420	52.95
CC-90-3/049	10.55	4.13	36.95	7.27	67.48	10.32	420	48.01
CC-45-3/049	12.58	4.72	43.68	11,80	66.53	26.11	420	67.79

Aux charges ultimes, les contraintes de compression longitudinales (axiales) (à la fibre supérieure) dans le béton à mi-portée de la poutre sont de 63,15, 67,48 et 66,53 MPa pour les modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049 respectivement, comme le montre le **tableau IV.7**. En revanche, les contraintes de traction (fibre inférieure) dans le béton à mi-portée à la charge ultime sont de 5,98, 10,32, 26,11 MPa pour les modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049 respectivement, comme le montre le **tableau IV.7**.

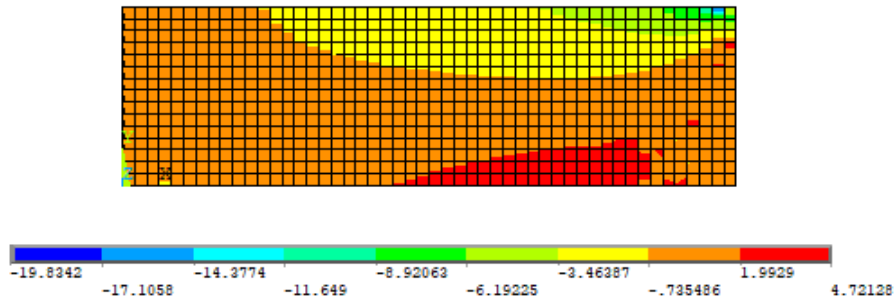
De même, le **tableau IV.7** présente les contraintes axiales dans les armatures d'acier de compression à la charge de plastification de 52,95, 48,01 et 67,79 MPa pour les modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049.

Les **figures IV.21a, 22a et 23a** illustrent le contour axial de la contrainte lors de la première fissure du béton, ce qui démontre que la contrainte de traction se détend lors de la formation d'une fissure de flexion au niveau de la zone de moment maximal.

Les **figures 21b, 22b et 23b** montrent les diagrammes de contour des contraintes axiales

à la charge limite, qui révèlent que les contraintes de compression sont maximales près du point de chargement.

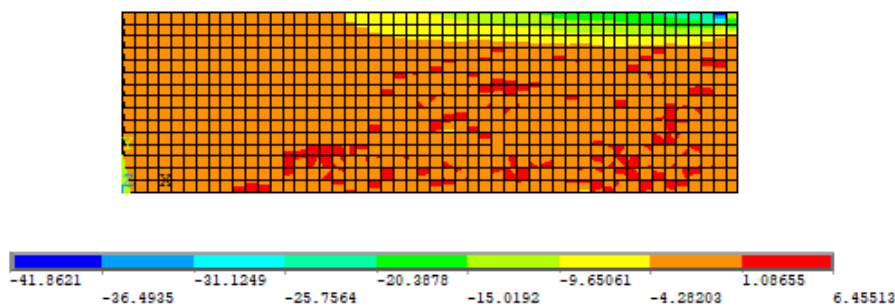
$P_{cr}=38.61$ kN.



Contraintes axiales (S_x) dans le béton à la première fissure.

(a)

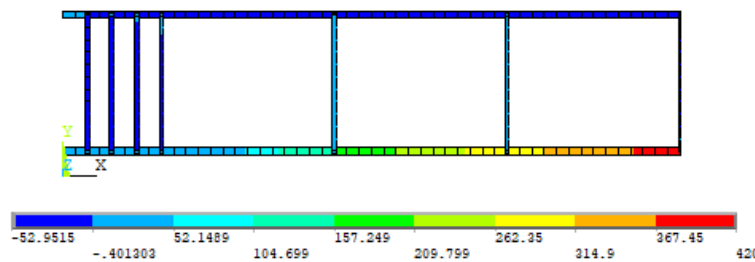
$P_y=94.54$ kN.



Contraintes axiales (S_x) dans le béton à la limite d'élasticité.

(b)

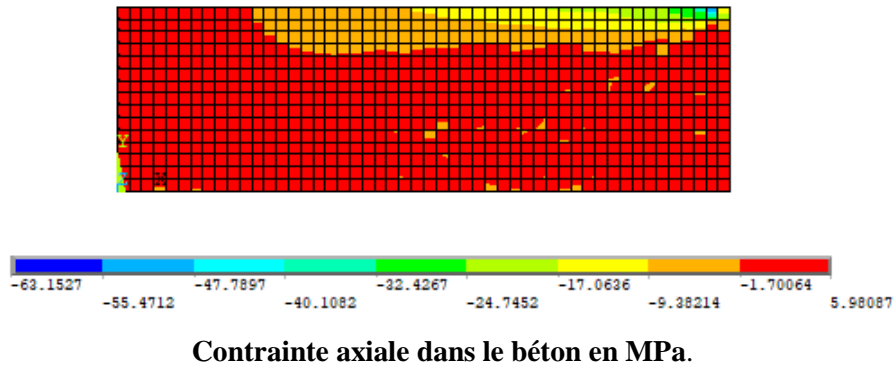
$P_y=94.54$ kN.



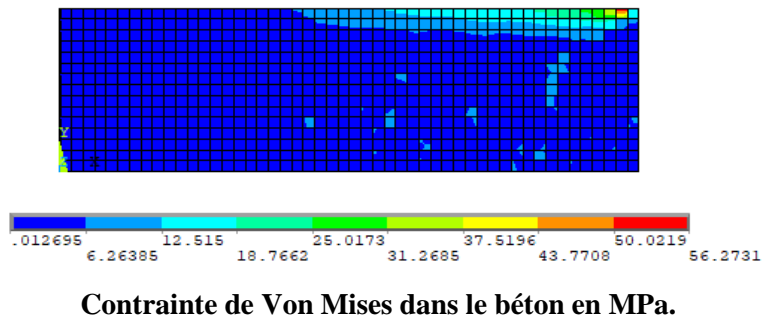
Contraintes axiales (σ_x) dans les armatures à la limite d'élasticité

(c)

$P_u=98.50$ kN.



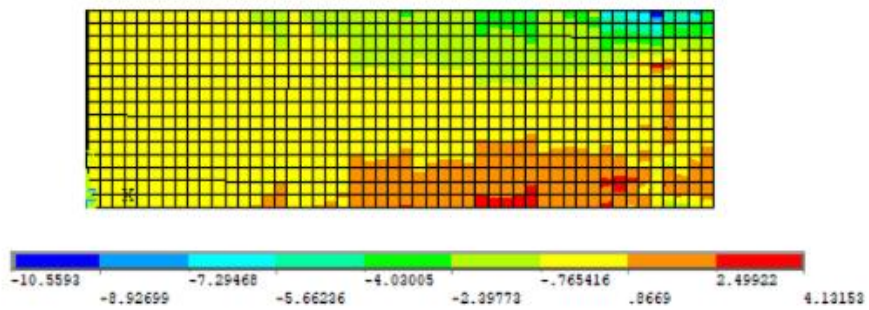
(d)



(e)

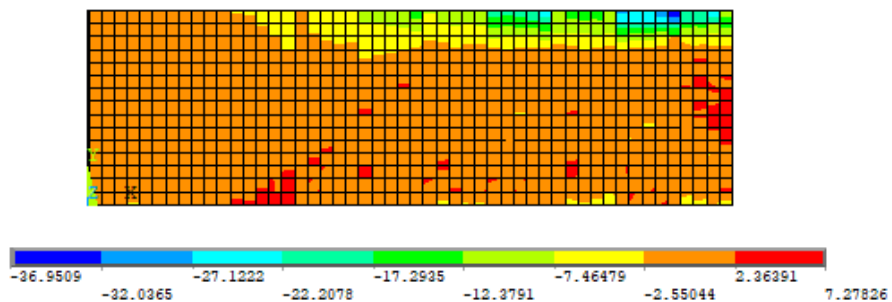
Figure IV.21 : Résultats du post-traitement EF du modèle CB-60 en MPa.

$P_{cr} = 30.69 \text{ kN}$.



(a)

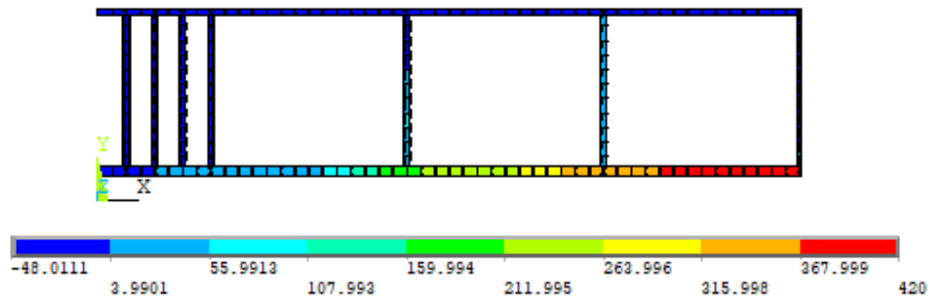
$P_y = 107.91 \text{ kN}$



Contraintes axiales (S_x) dans le béton à la limite d'élasticité.

(b)

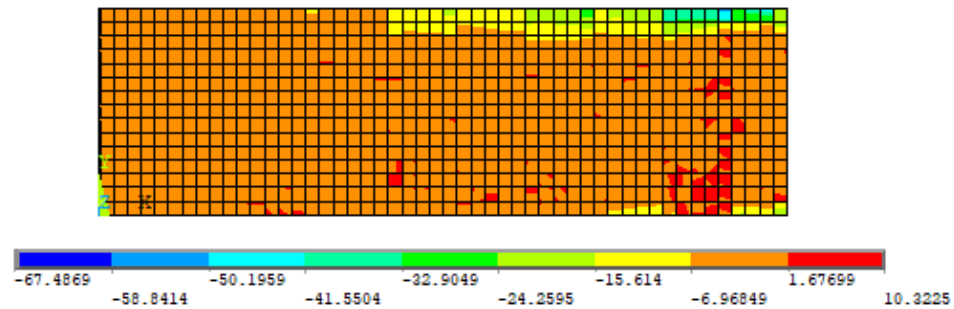
$P_y=107.91$ kN



Contraintes axiales (σ_x) dans les armatures à la limite d'élasticité

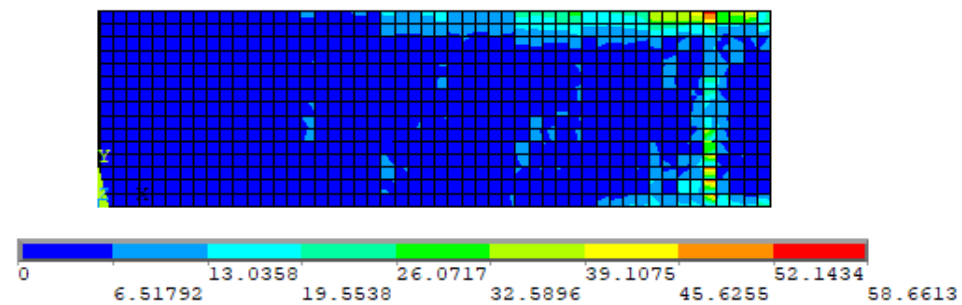
(c)

$P_u=126.3$ kN.



Contrainte axiale dans le béton à l'ultime.

(d)

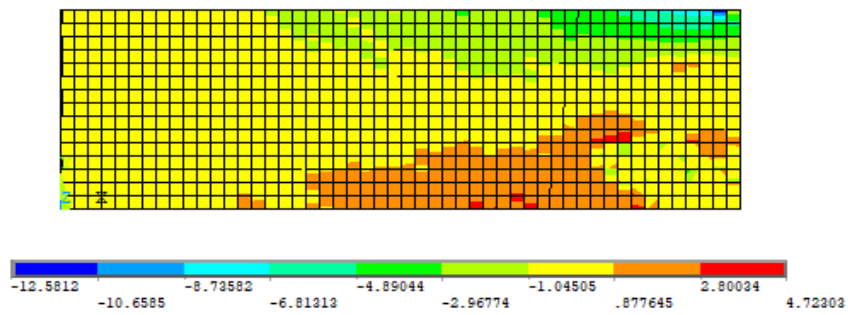


Contrainte de Von Mises dans le béton à l'ultime.

(e)

Figure IV.22: Résultats du post-traitement EF du modèle CC-90-3/049 en MPa.

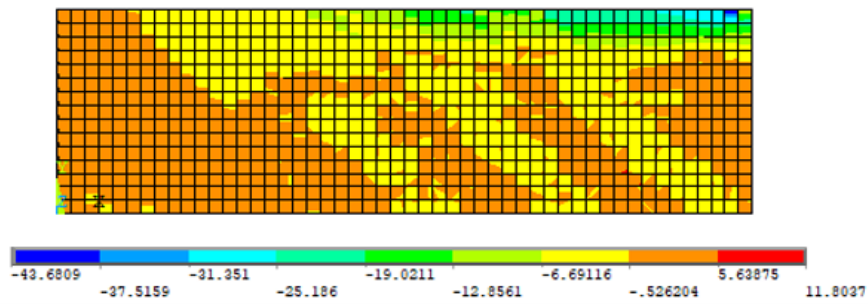
$P_{cr} = 32.67 \text{ kN}$



Contraintes axiales (S_x) dans le béton à la première fissure.

(a)

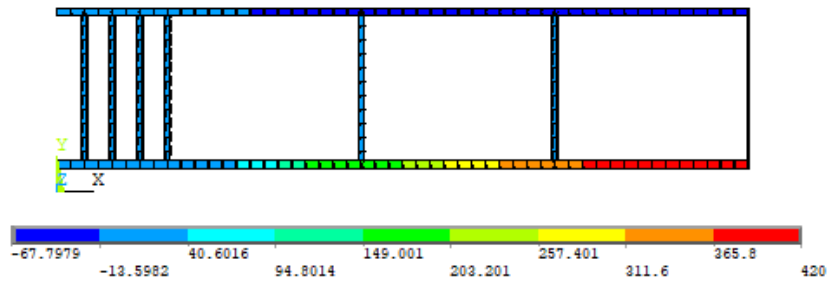
$P_y = 123.75 \text{ kN}$



Contraintes axiales (S_x) dans le béton à la limite d'élasticité

(b)

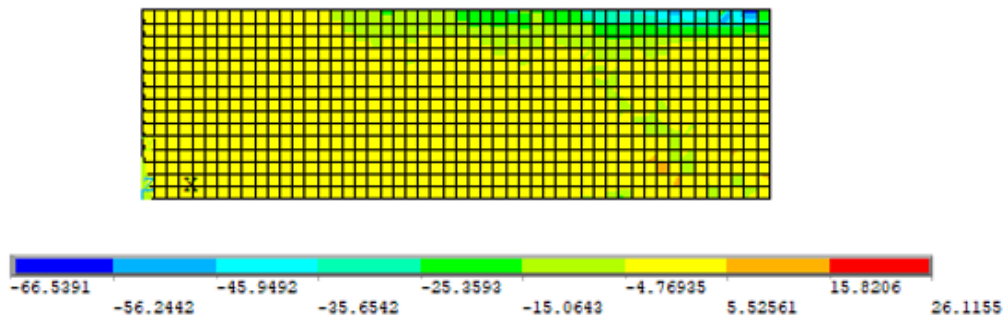
$P_y = 123.75 \text{ kN}$



Contraintes axiales (σ_x) dans les armatures à la limite d'élasticité

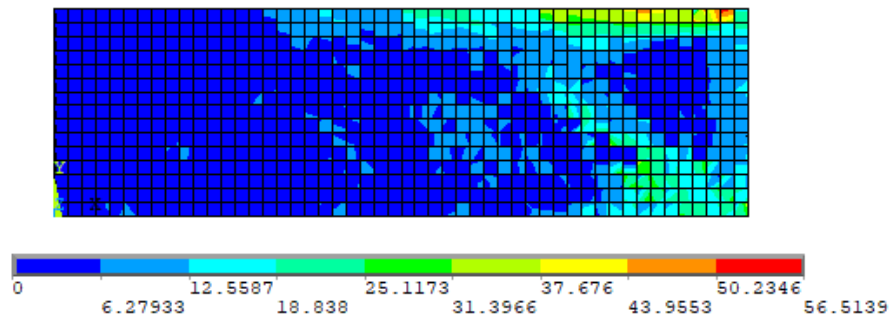
(c)

$P_u=162.85 \text{ kN}$.



(d)

Contrainte axiale dans le béton à la rupture.



(d)

Contrainte de Von Mises dans le béton à la rupture.

Figure IV. 23: Résultats du post-traitement EF du modèle CC-45-3/049 en MPa.

Les tracés de contour de limite d'élasticité pour les renforts en acier sont représentés à travers **les figures. 21c, 22c et 23c** pour les modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049. Les modèles EF capturent avec précision la limite d'élasticité ($f_y=420 \text{ MPa}$) des armatures en acier pour tous les cas.

Les figures 21d, 22d et 23d montrent les diagrammes de contour des contraintes axiales à la charge ultime du béton, qui révèlent que les contraintes de compression sont maximales près du point de chargement.

Les figures 21e, 22e et 23e montrent les diagrammes de contour des contraintes de Von Mises à la charge ultime du béton. Les contraintes de Von Mises sont de 56,21, 58,66 et 56,51 MPa pour les modèles CB-60, CC-90-3/049 et CC-45-3/049, respectivement.

IV.14. Conclusion

Cette étude présente les résultats des modèles d'éléments finis développés pour étudier numériquement le comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées extérieurement par des matériaux composites. Les modèles ont été vérifiés en comparant le comportement et la réponse de trois spécimens de poutre avec leurs correspondants obtenus à partir d'essais expérimentaux dans d'Al-Shamayleh et al. [50]. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux à tous les stades de la charge.

Les modèles développés et validés ont ensuite été utilisés dans une étude paramétrique orientée vers la conception pour étudier l'impact de l'orientation des fibres de carbone, de l'inclinaison et du nombre de plis du CFRP sur la performance en cisaillement des poutres en béton armé renforcées extérieurement par des matériaux composites. Les observations et conclusions suivantes ont pu être extrapolées à partir de cette étude :

- Un bon accord entre les données expérimentales mesurées et les modèles EF prédits est observé à tous les stades de la charge dû à une estimation précise du paramètre d'entrée.
- Les écarts entre les résultats expérimentaux et les résultats de l'analyse par éléments finis pour la capacité de charge et les valeurs de flèche à mi-portée associées étaient inférieurs à 10 %.
- Les modèles EF développés peuvent être utilisés pour estimer la charge ultime, la flèche à mi-portée, le mode de rupture, les contraintes et les déformations des poutres en BA renforcées en cisaillement avec des matériaux composites.
- Les modèles EF développés et validés présentés dans cette étude pourraient servir de plateforme numérique pour étudier le comportement et prédire la performance des poutres en BA renforcées en cisaillement avec des matériaux composites.

Les défis associés à la modélisation EF sont principalement liés à la simulation du décollement entre le composite et les surfaces en béton. Cela est dû au manque de données sur le coefficient de frottement et de valeurs appropriées pour la rigidité de contact.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le renforcement des poutres en béton armé avec des matériaux composites révèle être une technique intéressante. En effet, grâce à leur grande rigidité, les matériaux composites améliorent le comportement des structures face à des surcharges élevées. De plus, leur légèreté facilite l'exécution des travaux de renforcement, comparativement aux méthodes traditionnelles.

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un modèle analytique qui détermine les valeurs des contraintes d'interface composite-béton d'une poutre en béton armé renforcée par des plaques FGM poreuses sous chargement de flexion, en tenant compte de l'impact de la porosité pouvant se produire à l'intérieur des matériaux FGM au cours de leur fabrication. Puis, nous avons abordé le développement d'un modèle d'éléments finis (EF) non linéaire visant à évaluer et prédire la réponse des poutres en béton armé renforcées par des composites en FRP vis-à-vis de l'effort tranchant. Trois modèles d'éléments finis ont été élaborés et leurs résultats ont été validés en comparant la réponse charge-flèche prédite aux les données expérimentales mesurées. De plus, une étude paramétrique a été menée pour examiner l'impact de certains paramètres sur la réponse structurelle.

Cette étude permet de tirer les conclusions suivantes :

- La comparaison montre une bonne concordance entre les résultats de cette étude et ceux rapportés dans la littérature.
- On observe une concentration de contraintes au niveau des bords de la plaque de renforcement, provoquant ainsi son décollement prématuré.
- Les contraintes d'interface sont influencées par les paramètres géométriques tels que l'épaisseur de la couche d'adhésif où nous avons remarqué que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif mène à une réduction significative des contraintes d'interface maximales.
- Prolonger le plus possible la longueur de la plaque de renforcement aux appuis, réduit les contraintes aux bords pour éviter le problème de décollement.
- La contribution en cisaillement des plaques FGM devient plus faible à mesure que la plaque de renforcement devient plus riche en métal.
- Le changement du taux de distribution de porosité a une influence considérable sur la contribution de la plaque FGM.

- Une fraction volumique de porosité élevée dans la plaque FGM peut réduire sa rigidité et augmenter la déformabilité. Cela pourrait entraîner des contraintes plus importantes à l'interface.
- Un adhésif avec une rigidité adéquate est essentiel pour le transfert efficace de la charge. Un adhésif trop rigide peut provoquer des concentrations de contraintes locales, tandis qu'un adhésif trop souple peut ne pas transférer efficacement les charges.
- La compatibilité des propriétés mécaniques de l'adhésif avec celles du béton et de la plaque FGM est cruciale pour éviter des délaminages et assurer une performance durable.
- La zone de transition entre la section renforcée et non renforcée devient critique, avec des concentrations de contraintes potentielles à cette interface.
- L'analyse numérique réalisée avec le logiciel ANSYS démontre un accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux obtenus pour la réponse charge-flèche des poutres en béton armé renforcées avec des composites CFRP, avec une erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE) de 3,98 % pour la charge et de 6,61 % pour la flèche.
- Toutes les courbes de réponse charge-flèche des poutres modélisées, aux premiers stades, présentaient une réponse de flèche presque similaire, en raison de la charge appliquée qui se situe dans la région élastique linéaire. Par la suite, les courbes de flèche augmentent progressivement avec l'augmentation de la capacité de charge ultime, étant donné que les poutres renforcées avec CFRP améliorent leur rigidité et leur comportement de ductilité.
- La poutre renforcée en cisaillement avec le composite en forme de U semble être le meilleur schéma de renforcement, avec une augmentation de la capacité de charge de 21.14 % par rapport à la poutre témoin. En revanche, dans les bandes fixées horizontalement, l'amélioration de la capacité de cisaillement était de 15.47%.
- Les profils de fissuration et les modes de rupture des poutres simulées sont reproduits avec précision par le modèle numérique.
- L'ajout d'une couche de composite CFRP à une poutre en béton armé avec des fibres orientées à 0° , 45° et 90° permet d'augmenter la charge maximale de la poutre de 25,48%, 24,13% et 16,58%, respectivement, par rapport à la poutre de contrôle. Les augmentations représentent respectivement des charges ultimes de 123,60, 122,27 et 114,84 kN.

- La capacité de cisaillement de la poutre en béton armé augmente légèrement avec l'augmentation du nombre de couches de 1 à 3 pour le premier groupe.
- La capacité de cisaillement de la poutre augmente de 39.70%, 52.28% et 65.34%, respectivement, avec l'augmentation du nombre de couches de 1 à 3 par rapport à la poutre de contrôle, ce qui correspond à des charges ultimes de 137.61, 150 et 162.86 kN, respectivement.

Perspectives

Au terme de ce travail, les perspectives suivantes sont à prendre en compte lors des travaux de recherches ultérieures afin de permettre une compréhension plus approfondie du comportement des poutres en BA renforcées par les matériaux composites.

- Conduire des expériences sur des poutres ayant des rapports portée/hauteur plus élevés fournirait des données plus directement applicables aux ponts déjà construits.
- En examinant les poutres de section en T, on pourrait obtenir une représentation plus exacte des conditions réelles, en prenant en compte la contribution de la dalle située au-dessus de la poutre.
- Cette étude a employé le logiciel commercial d'analyse par éléments finis (ANSYS) pour le processus d'analyse. Il serait possible de réaliser des études comparatives avec d'autres logiciels d'éléments finis disponibles afin de déterminer lequel pourrait fournir des résultats plus précis que les études expérimentales.
- Dans cette étude, l'utilisation du composite CFRP pour renforcer les poutres en béton armé a été examinée. Il serait envisageable d'étudier le renforcement avec d'autres matériaux polymères renforcés de fibres (FRP) disponibles, comme le polymère renforcé de fibres de verre (GFRP), afin d'évaluer l'efficacité de cette technique de renforcement en exploitant des matériaux aux propriétés variées.
- Dans cette étude, la liaison entre le béton et le composite CFRP a été considérée comme parfaite. Bien que cette hypothèse n'ait pas engendré d'erreur significative dans les résultats par rapport aux études expérimentales, il serait bénéfique d'examiner analytiquement le comportement de cette liaison ainsi que les problèmes de décollement, afin d'obtenir des résultats plus précis

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]Shukla, A. K., Goswami, P., Maiti, P. R., & Rai, G. (2021). Damage Analysis of Simple RC Bridge Girder and its Strengthening Measures. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(4), 1374-1386.
- [2]Vasani, P. C., & Bhumika, B. M. Different types of bridges and its suitability. Applied Mechanics Department, LD College of Engineering, Ahmadabad
- [3]Repair bridge manual, (February 2018), General Directorate of Techniques Road Infrastructure Department, Ministry Of Public Works And Transport
- [4]Rehabilitation and Strengthening of Bridges by using FRP composites Dr. Gopal Rai, CEO, R & M International.
- [5]Merah, A., & Krobba, B. (2017). Effect of the carbonation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 874-886.
- [6]La carbonation des bétons, Club Ouvrages d'Art Journées 8 et 9 juillet 2008.
- [7]Zohra Boutaraa, « Polycopié de Pathologies et réhabilitation des ponts », université de Chlef, Algerie, (2019).
- [8]Quraishi, M. A., Nayak, D. K., Kumar, R., & Kumar, V. (2017). Corrosion of reinforced steel in concrete and its control: An overview. *Journal of Steel Structures & Construction*, 3(1), 1-6.
- [9]Office of Research Facilities (January 2019), The Freeze-Thaw Cycle in Concrete and Brick Assemblies, Technical news, issue 84.
- [10]Repair manual for concrete bridge elements (2005), Bridge Engineering Section Technical Standards Branch Alberta Infrastructure and Transportation.
- [11]Richard Lapointe, « Contribution à l'étude des méthodes d'injection des fissures dans le béton », Département de génie civil et mécanique appliquée, Université McGill Montréal, Canada. Mai 1997.
- [12]Repair bridge manual February 2018, General Directorate of Techniques Road Infrastructure Department, Ministry Of Public Works And Transport
- [13]Oregon Department of Transportation : Design & Drafting Manuals : Bridge : State of Oregon. (n.d.-b). Design & Drafting Manuals : Oregon Department of Transportation.
- [14]Ghaffary, A., & Moustafa, M. A. (2020). Synthesis of repair materials and methods for reinforced concrete and prestressed bridge girders. *Materials*, 13(18), 4079.

Références Bibliographiques

- [15] Abdalla, J. A., Abu-Obeidah, A. S., Hawileh, R. A., & Rasheed, H. A. (2016). Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally-bonded aluminum alloy plates: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 128, 24-37.
- [16] Schiebel, S., Parretti, R., Nanni, A., & America, C. F. (2001). Repair and Strengthening of Impacted PC Girders on Bridge A4845 Jackson County, Missouri (No. RDT01-017). Missouri. Dept. of Transportation. Research, Development and Technology Division.
- [17] Bridge design manual third edition, second release, august 2014.
- [18] Mohamed A. Moustafa, «Repair of reinforced and prestressed concrete bridge girders», University of Nevada Reno, États-Unis, 2020.
- [19] Abedin, M., & Mehrabi, A. B. (2019). Novel approaches for fracture detection in steel girder bridges. *Infrastructures*, 4(3), 42.
- [20] Abedin, M., Farhangdoust, S., & Mehrabi, A. (2019). Fracture detection in steel girder bridges using self-powered wireless sensors. In *Risk-based Bridge Engineering* (pp. 216-228). CRC Press.
- [21] Graeff, M.K. «The Repair of Laterally Damaged Concrete Bridge Girders Using Carbon Fiber Reinforcing Polymers (CFRP) ». Master's Thesis, University of North Florida, College of Computing, Engineering, & Construction, Jacksonville, FL, USA, 2012.
- [22] Qeshta, I. M., Shafigh, P., & Jumaat, M. Z. (2016). Research progress on the flexural behaviour of externally bonded RC beams. *Archives of Civil and mechanical Engineering*, 16, 982-1003.
- [23] Belarbi, A., Bae, S. W., & Brancaccio, A. (2012). Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 32, 27-40.
- [24] C. D. Eamon, H.-C. Wu, A. A. Makkawy, and S. Siavashi, «Design and construction guidelines for strengthening bridges using fiber reinforced polymers (FRP) », Michigan. Dept. of Transportation. Office of Research Administration (2014).
- [25] Aslam, M., Shafigh, P., Jumaat, M. Z., & Shah, S. N. R. (2015). Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers—A review. *Construction and Building Materials*, 82, 235-256.
- [26] Tsai, C.; Alaywan, W. I-10 Girder Repair Using Post-Tensioned Steel Rods and Carbon Fiber Composite Cables (CFCC); Final report; Louisiana Department of Transportation and Development 1201 Capitol Access Road: Baton Rouge, LA, USA, (2018).
- [27] Andrawes, B., Shaw, I. D., & Zhao, H. (2018). Repair & strengthening of distressed/damaged ends of prestressed beams with FRP composites (No. FWHA-ICT-18-

Références Bibliographiques

001; ICT-18-001; UILU-ENG-2018-2001). Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

[28] M. ABDESSEMED, « Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissu et lamelle de fibre de carbone », Mémoire de magister, Université de Blida, **2003**.

[29] Tetta, Z. C., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (**2016**). Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors. *Composites Part B: Engineering*, 95, 225-239.

[30] Daouadji, T.H., Rabahi, A., Abbes, B., & Adim, B (**2016**). Theoretical and finite element studies of interfacial stresses in reinforced concrete beams strengthened by externally FRP laminates plate. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(12), 1253-1280.

[31] Abdelouahed, T. (**2006**). Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate. *International Journal of Solids and Structures*, 43(14-15), 4154-4174.

[32] Abderezak, R., Rabia, B., Daouadji, T. H., Abbes, B., Belkacem, A., & Abbes, F. (**2018**). Elastic analysis of interfacial stresses in prestressed PFGM-RC hybrid beams. *Advances in Materials Research*, 7(2), 83.

[33] Chen, C., Cheng, L. (**2017**). Predicting Flexural Fatigue Performance of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP due to FRP Debonding, *Journal of Bridge Engineering*, 22(11), 04017082.

[34] Parvin, A., Brighton, D. (**2014**). FRP composites strengthening of concrete columns under various loading conditions, *Polymers*, 6(4), 1040-1056.

[35] Sam, M., Jojith, R., & Radhika, N. (**2021**). Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment—A critical review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1339-1377.

[36] Selma Chergui, « Comportement des poutres en béton armé renforcées par des plaques composites », Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, 2020.

[37] Abderezak, R., Daouadji, T. H., & Rabia, B. (**2021**). Modeling and analysis of the imperfect FGM-damaged RC hybrid beams. *Advances in Computational Design*, 6(2), 117-133.

[38] Chedad, A., Daouadji, T. H., Abderezak, R., Belkacem, A., Abbes, B., Rabia, B., & Abbes, F. (**2017**). A high-order closed-form solution for interfacial stresses in externally sandwich FGM plated RC beams. *Advances in Materials Research*, 6(4), 317.

Références Bibliographiques

- [39] Wattanasakulpong, N. and Ungbhakorn, V. (2014), Linear and nonlinear vibration analysis of elastically restrained ends FGM beams with porosities, *Aerospace Science and Technology*. 32(1), 111-120
- [40] Gupta, A. and Talha, M. (2017), Influence of porosity on the flexural and vibration response of gradient plate using nonpolynomial higher-order shear and normal deformation theory, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 14(2), 277-296.
- [41] Aslam, M., Shafiqh, P., Jumaat, M.Z. and Shah, S. (2015), " Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers—A review, *Construction and Building Materials*. 82 35-256.
- [42] Ait Atmane, R., Mahmoudi, N. and Bennai, R. (2021), Investigation on the dynamic response of porous FGM beams resting on variable foundation using a new higher order shear deformation theory, *Steel and Composite Structures, An International Journal*. 39(1), 95-107.
- [43] Daryl L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Fifth Edition,
- [44] *Analyse structures par éléments finis, avec I--DEAS Master Series 7*, JACQUES P. BERSIER (Pages 2 et 10)
- [45] Logan, D. L. (2011). *A first course in the finite element method* (Vol. 4). Thomson. Pages (15,19).
- [46] *Analyse structures par éléments finis – 3^E édition*, Auteur J.-Francois Imbert (Page 23) (Pages 31-33).
- [47] *Finite element analysis*, SS BHAVIKATTI. Pages (4.5.6,7).
- [48] *Fundamentals of finite element analysis* DAVID V HUTTON Pages (10.11).
- [49] Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*. Springer.
- [50] Al-Shamayleh, R., Al-Saoud, H., & Alqam, M. (2022). Shear and flexural strengthening of reinforced concrete beams with variable compressive strength values using externally bonded carbon fiber plates. *Results in Engineering* , 14, 10042.
- [51] ANSYS. *A Finite element computer software and user manual for nonlinear structural analysis*. Canonsburg, PA.: ANSYS 2007; Inc; 2007.
- [52] Abu-Obeidah, A., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2015). Finite element analysis of strengthened RC beams in shear with aluminum plates. *Computers & Structures*, 147, 36-46).
- [53] Salama, A. S. D., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2019). Performance of externally strengthened RC beams with side-bonded CFRP sheets. *Composite Structures*, 212, 281-290.

Références Bibliographiques

- [54]Kadhim, A. M., Numan, H. A., & Özakça, M. (2019). Flexural strengthening and rehabilitation of reinforced concrete beam using BFRP composites: finite element approach. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [55]Pathak, P., & Zhang, Y. X. (2019). Numerical study of structural behavior of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams with bond-slip effect under cyclic loading. *Structural Concrete*, 20(1), 97-107.
- [56]Dahmani L, Khennane A, Kaci S (2010). Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software. *Strength Mater* 42:232–240.
- [57]Yousaf, M., Siddiqi, Z. A., Sharif, M. B., & Qazi, A. U. (2017). Force-and displacement-controlled non-linear FE analyses of RC beam with partial steel bonded length. *International Journal of Civil Engineering*, 15, 499-513.
- [58]ANSYS (2007) ANSYS release version 12, a finite element computer software and user manual for nonlinear structural analysis. ANSYS, Canonsburg.
- [59]Godínez-Domínguez, E. A., Tena-Colunga, A., & Juárez-Luna, G. (2015). Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete haunched beams designed to develop a shear failure. *Engineering Structures*, 105, 99-122.
- [60]Özcan DM, Bayraktar A, Şahin A, Haktanir T, Türker T (2009). Experimental and finite element analysis on the steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior. *Construction and building Material*, 23:1064–1077.
- [61]Zakaria Bouraoui, « Dimensionnement des ponts II ». Master 1 VOA, Université de Biskra, 2020.
- [62]Hawileh, R. A., Musto, H. A., Abdalla, J. A., & Naser, M. Z. (2019). Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106952.
- [63]El-Sayed, A. K. (2014). Effect of longitudinal CFRP strengthening on the shear resistance of reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 58, 422-429.
- [64]ACI Committee 440, ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, 2017.
- [65]Kadhim, M. M., Jawdhari, A. R., Altaee, M. J., & Adheem, A. H. (2020). Finite element modelling and parametric analysis of FRP strengthened RC beams under impact load. *Journal of Building Engineering*, 32, 101526.
- [66]Alhassan, M. A., Al-Rousan, R. Z., Alomari, I. S., & Amaireh, L. (2022). Shear response of RC beams encompassing hybrid CFRP strips and steel stirrups: Beam depth effect. *Structures*, 38, 781-796.

Références Bibliographiques

- [67] Saribiyik, A., Abodan, B., & Balci, M. T. (2021). Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 192-204.
- [68] Sam, M., Jolith, R., & Radhika, N. (2021). Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment—A critical review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1339-1377.
- [69] Boggarapu, V., Gujjala, R., Ojha, S., Acharya, S., Chowdary, S., & kumar Gara, D. (2021). State of the art in functionally graded materials. *Composite Structures*, 262, 113596.
- [70] Rajan, T. P. D., & Pai, B. C. (2014). Developments in processing of functionally gradient metals and metal–ceramic composites: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27, 825-838.
- [71] ISIS Manual No.4 (2008). Design Manual No. 4: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- [72] Garden, H. N., & Hollaway, L. C. (1998). An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Composite structures*, 42(2), 175-188.
- [73] Abbood, I. S., aldeen Odaa, S., Hasan, K. F., & Jasim, M. A. (2021). Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures—A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1003-1008.
- [74] Sharba, A. A. K., Hussain, H. D., & Abdulhussain, M. (2021). Retrofitting of RC beams using FRP techniques: a review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1090, 012054).
- [75] Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., & Guadagnini, M. (2012). Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2125-2134.
- [76] Rodopoulos, C. A., Pilakoutas, K., & Gdoutos, E. E. (2000). *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*.
- [77] A.C. 440, J.P. Busel, Specification for Carbon and Glass Fiber-reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement, American Concrete Institute, 2008.
- [78] Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., & Guadagnini, M. (2012). Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2125-2134.

Références Bibliographiques

- [79] Askar, M. K., Hassan, A. F., & Al-Kamaki, Y. S. (2022). Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01189.
- [80] Gay, D., *Maté composites*, Paris, 1989.
- [81]Hollaway, L. C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and building materials*, 24(12), 2419-2445.
- [82]Rousakis, T. (2013). Retrofitting and strengthening of contemporary structures: materials used. *Encyclopedia of Earthquake Engineering: Chapter*; Beer, M., Patelli, E., Kougoumtzoglou, I., Au, I., Eds.
- [83]Shokrieh, M. M., & Omid, M. J. (2009). Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under different strain rates. *Composite structures*, 88(4), 595-601.
- [84]Siddika, A., Al Mamun, M. A., Alyousef, R., & Amran, Y. M. (2019). Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 25, 100798.
- [85]Chen, W., Pham, T. M., Sichebe, H., Chen, L., & Hao, H. (2018). Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet. *Composites Part B: Engineering*, 134, 114-126.
- [86]Breña, S. F., Bramblett, R. M., Benouaich, M. A., Wood, S. L., & Kreger, M. E. (2001). Use of carbon fiber reinforced polymer composites to increase the flexural capacity of reinforced concrete beams (No. Research Report 1776-1). University of Texas at Austin.
- [87]Adhikari, S. (2009). Mechanical properties and flexural applications of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars, Master's thesis, University of Akron.
- [88]Powers, W., *Advanced Materials and Processes*, 2000, May.
- [89]Chen, D., Sun, G., Meng, M., Jin, X., & Li, Q. (2019). Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates. *Thin-Walled Structures*, 142, 516-531.
- [90]Sakurada, R., Shimomura, T., Maruyama, K., & Matsubara, S. (2000). Bending behavior of rc beam reinforced with braided aramid FRP bar. In *Proc. of the 31st Conference on Our World in Concrete & Structures* (pp. 16-17).
- [91]Landesmann, A., Seruti, C. A., & Batista, E. D. M. (2015). Mechanical properties of glass fiber reinforced polymers members for structural applications. *Materials Research*, 18, 1372-1383.

Références Bibliographiques

- [92] Meier, U. (2012). Carbon fiber reinforced polymer cables: Why? Why not? What if? *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37, 399-411.
- [93] Balea, L., Dusserre, G., & Bernhart, G. (2014). Mechanical behaviour of plain-knit reinforced injected composites: Effect of inlay yarns and fibre type. *Composites Part B: Engineering*, 56, 20-29.
- [94] Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S. J., & Hui, D. (2015). A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180.
- [95] Sarasini, F., Tirillò, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., ... & Sorrentino, L. J. C. P. B. E. (2014). Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 59, 204-220.
- [96] Deák, T., & Czigány, T. (2009). Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: a comparison. *Textile Research Journal*, 79(7), 645-651.
- [97] Hassan, M., Benmokrane, B., ElSafty, A., & Fam, A. (2016). Bond durability of basalt-fiber-reinforced-polymer (BFRP) bars embedded in concrete in aggressive environments. *Composites Part B: Engineering*, 106, 262-272.
- [98] Nacer, R. (2008). Évaluation des propriétés physiques et mécaniques de laminés de matériaux composites fabriqués par enroulement filamentaire. *Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa*.
- [99] Zaki, M., Tobaa, A., Shehata, A., Mohamed, F., Khalef, R., Hagra, Y. & Abou-Zeid, M. (2021). Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 107-122.
- [100] Ibrahim, A. M., Wu, Z., Fahmy, M. F., & Kamal, D. (2016). Experimental study on cyclic response of concrete bridge columns reinforced by steel and basalt FRP reinforcements. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), 04015062.
- [101] Hassan, M., Benmokrane, B., ElSafty, A., & Fam, A. (2016). Bond durability of basalt-fiber-reinforced-polymer (BFRP) bars embedded in concrete in aggressive environments. *Composites Part B: Engineering*, 106, 262-272.
- [102] Lubin, G. (1969), *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites*.
- [103] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering (Vol. 5)*. NY: John Wiley & sons, 72-82.
- [104] Seruti, C. A. (2013). Mechanical characterization and structural development of the pultruded elements. *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*.

Références Bibliographiques

- [105] Cabral-Fonseca, S. (2005). Polymeric composite material reinforced with fibers used in civil engineering—features and application. LNEC, Lisbon, Portuguese: Scientific and technical information.
- [106] Landesmann, A., Seruti, C. A., & Batista, E. D. M. (2015). Mechanical properties of glass fiber reinforced polymers members for structural applications. *Materials Research*, 18, 1372-1383.
- [107] Saadatmanesh, H., & Ehsani, M. R. (1991). RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study. *Journal of structural engineering*, 117(11), 3417-3433.
- [108] Correia, J. P. R. (2004). Pultruded glass fiber (GFRP). Application in GFRP composite beams GFRP-concrete in construction (Doctoral dissertation, Master thesis, Instituto Superior Técnico (in Portuguese)).
- [109] Al-Kamaki, Y., Al-Mahaidi, R., & Bennetts, I. (2014). The use of Image Correlation Photogrammetry in investigating the performance of fire-damaged circular RC columns strengthened with CFRP. In *Proceedings of 23rd Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23)*.
- [110] Qureshi, J. (2022). A review of fibre reinforced polymer structures. *Fibers*, 10(3), 27.
- [111] Springer Tracts in Additive Manufacturing, Henrique de Amorim Almeida, Polytechnic Institute of Leiria, Leiria, Portugal.
- [112] Sam, M., Jojith, R., & Radhika, N. (2021). Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment—A critical review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1339-1377.
- [113] Nejad, M. Z., Alamzadeh, N., & Hadi, A. (2018). Thermoelastoplastic analysis of FGM rotating thick cylindrical pressure vessels in linear elastic-fully plastic condition. *Composites Part B: Engineering*, 154, 410-422.
- [114] Nikbakht, S., Kamarian, S., & Shakeri, M. (2019). A review on optimization of composite structures Part II: Functionally graded materials. *Composite Structures*, 214, 83-102.
- [115] Sam, M., & Radhika, N. (2022). Influence of carbide ceramic reinforcements in improving tribological properties of A333 graded hybrid composites. *Defence Technology*, 18(7), 1107-1123.
- [116] Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L. & Ma, A. (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108376.

Références Bibliographiques

- [117] Sola, A., Bellucci, D., & Cannillo, V. (2016). Functionally graded materials for orthopedic applications—an update on design and manufacturing. *Biotechnology advances*, 34(5), 504-531.
- [118] Lin, D., Li, Q., Li, W., Zhou, S., & Swain, M. V. (2009). Design optimization of functionally graded dental implant for bone remodeling. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 668-675.
- [119] Ramírez-Gil, F. J., Murillo-Cardoso, J. E., Silva, E. C. N., & Montealegre-Rubio, W. (2016). Optimization of functionally graded materials considering dynamical analysis. *Computational Modeling, Optimization and Manufacturing Simulation of Advanced Engineering Materials*, 205-237.
- [120] Reichardt A. « Additive manufacturing of metal-based functionally graded materials », dissertation, Berkeley University of California; 2017.
- [121] Boggarapu, V., Gujjala, R., Ojha, S., Acharya, S., Chowdary, S., & kumar Gara, D. (2021). State of the art in functionally graded materials. *Composite Structures*, 262, 113596.
- [122] Jones, R.M. (1975), *Mechanics of composite materials*, Washington D.C., USA: Scripta Book Company..
- [123] Horton, R.E. and Mccarty, J.E. (1993), *Damage tolerance of composites*. Engineered materials handbook - Volume 1: Composites. Ohio, USA: ASM International, p. 259- 267.
- [124] Fatma Mellal, « Etude de la vibration et de la propagation des ondes dans les structures composites », Thèse de Doctorat, Université de Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, Algérie, 2021.
- [125] Redhwane Ait atmane , « Étude de l'effet de la porosité sur le comportement mécanique des structures », Thèse de Doctorat, Université Ahmed Zabanna de Relizane, Algérie, 2022.
- [126] H. Schoeller, ' Hydrogéologie ' Ecole National Supérieur du Pétrole, Technip, Paris, 2 vol, 443 p, 1955
- [127] Ledru.Y, « Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques », Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [128] Gao, K., Li, R., & Yang, J. (2019). Dynamic characteristics of functionally graded porous beams with interval material properties. *Engineering Structures*, 197, 109441.
- [129] Mota, A. F., Loja, M. A. R., Barbosa, J. I., & Rodrigues, J. A. (2020). Porous functionally graded plates: an assessment of the influence of shear correction factor on static behavior. *Mathematical and Computational Applications*, 25(2), 25.
- [130] Abdelhak Mesbah, « Modélisation du Flambement et de La Vibration des Poutres FGM par les éléments finis », Thèse de Doctorat, Université Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib, Algérie, 2023.

Références Bibliographiques

- [131] Kim, J., Żur, K. K., & Reddy, J. N. (2019). Bending, free vibration, and buckling of modified couples stress-based functionally graded porous micro-plates. *Composite Structures*, 209, 879-888.
- [132] Wu, H., Yang, J., & Kitipornchai, S. (2020). Mechanical analysis of functionally graded porous structures: A review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(13), 2041015.
- [133] Zahedinejad, P., Zhang, C., Zhang, H., & Ju, S. (2020). A comprehensive review on vibration analysis of functionally graded beams. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(04), 2030002.
- [134] Coskun, S., Kim, J., & Toutanji, H. (2019). Bending, free vibration, and buckling analysis of functionally graded porous micro-plates using a general third-order plate theory. *Journal of Composites Science*, 3(1), 15.
- [135] Li, Z., & Zheng, J. (2019). Analytical consideration and numerical verification of the confined functionally graded porous ring with graphene platelet reinforcement. *International Journal of Mechanical Sciences*, 161, 105079.
- [136] Chen, J. F., & Teng, J. G. (2003). Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 17(1), 27-41.
- [137] Bouchikhi, A., Megueni, A., Gouasmi, S. and Boukoulou, F. (2013), “Effect of mixed adhesive joints and tapered plate on stresses in retrofitted beams bonded with a fiber-reinforced polymer plate”, *Mater. Design*, 50, 893-904.
- [138] Fahsi, B., Benrahou, K.H., Krour, B., Tounsi, A., Benyoucef, S. and Adda Bedia, E.A. (2011), “Analytical analysis of interfacial stresses in FRP-RC hybrid beams with time-dependent deformations of RC beam”, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 24(6), 519-526.
- [139] Guenaneche, B. and Tounsi, A. (2014), “Effect of shear deformation on interfacial stress analysis in plated beams under arbitrary loading”, *Int. J. Adhesion Adhesives*, 48, 1-13.
- [140] Krour, B., Bernard, F. and Tounsi, A. (2013), “Fibers orientation optimization for concrete beam strengthened with a CFRP bonded plate: A coupled analytical–numerical investigation”, *Eng. Struct.*, 56, 218-227.
- [141] Smith, S. T., & Teng, J. G. (2001). Interfacial stresses in plated beams. *Engineering structures*, 23(7), 857-871.
- [142] Teng, J. G., Zhang, J. W., & Smith, S. T. (2002). Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: a finite element study. *Construction and Building materials*, 16(1), 1-14.

Références Bibliographiques

- [143] Tounsi, A. and Benyoucef, S. (2007), "Interfacial stresses in externally FRP-plated concrete beams", *Int. J. Adhesion Adhesives*, 27(3), 207-215.
- [144] Van Pham, P. (2021). Solutions of the interfacial shear and normal stresses in plate flexural-strengthened beams based on different complementary strain energy assumptions. *Engineering Structures*, 229, 111567.
- [145] Zhang, L. and Teng, J. (2010), "Finite element prediction of interfacial stresses in structural members bonded with a thin plate", *Engineering structures*. 32(2), 459-471.
- [146] Tounsi, A., Daouadji, T.H. and Benyoucef, S. (2009), "Interfacial stresses in FRP-plated RC beams: Effect of adherend shear deformations", *International journal of adhesion and adhesives*. 29(4), 343-351.
- [147] Sha, X. and Davidson, J.S. (2020), "Analysis of interfacial stresses in concrete beams strengthened by externally bonded FRP laminates using composite beam theory", *Composite Structures*. 243 112235.
- [148] Rabia, B., Daouadji, T.H. and Abderezak, R. (2020), "Predictions of the maximum plate end stresses of imperfect FRP strengthened RC beams: study and analysis", *Advances in materials Research*. 9(4), 265.
- [149] He, X. J., Zhou, C. Y., & Wang, Y. (2020). Interfacial stresses in reinforced concrete cantilever members strengthened with fibre-reinforced polymer laminates. *Advances in Structural Engineering*, 23(2), 277-288.
- [150] Baky, H. A., Ebead, U. A., & Neale, K. W. (2007). Flexural and interfacial behavior of FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 11(6), 629-639.
- [151] Hadji, L., Daouadji, T. H., Meziane, M., & Bedia, E. A. (2016). Analyze of the interfacial stress in reinforced concrete beams strengthened with externally bonded CFRP plate. *Int. J. Steel and Composite Structures*, 20(2), 413-429.
- [152] Sayin, B., & Manisali, E. (2010). An investigation of interfacial stresses in reinforced concrete beams using FRP laminates. *The Journal of Adhesion*, 86(11), 1132-1157.
- [153] Maalej, M., & Bian, Y. (2001). Interfacial shear stress concentration in FRP-strengthened beams. *Composite Structures*, 54(4), 417-426.
- [154] Yang, J., Chen, J. F., & Teng, J. G. (2009). Interfacial stress analysis of plated beams under symmetric mechanical and thermal loading. *Construction and Building Materials*, 23(9), 2973-2987.

Références Bibliographiques

- [155] Akkaya, H. C., Aydemir, C., & Arslan, G. (2022). Investigation on shear behavior of reinforced concrete deep beams without shear reinforcement strengthened with fiber reinforced polymers. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01392.
- [156] Akkaya, H. C., Aydemir, C., & Arslan, G. (2022). An experimental research on reinforced concrete deep beams fully wrapped with fiber reinforced polymers against shear. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01198.
- [157] Akkaya, H. C., Aydemir, C., & Arslan, G. (2024). Evaluation of shear behavior of short-span reinforced concrete deep beams strengthened with fiber reinforced polymer strips. *Engineering Structures*, 299, 117145.
- [158] Li, W., & Leung, C. K. (2016). Shear span–depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), 04015067.
- [159] Moradi, E., Naderpour, H., & Kheyroddin, A. (2020). An experimental approach for shear strengthening of RC beams using a proposed technique by embedded through-section FRP sheets. *Composite Structures*, 238, 111988.
- [160] Sengun, K., & Arslan, G. (2022, June). Parameters affecting the behaviour of RC beams strengthened in shear and flexure with various FRP systems. *Structures* 40, 202-212).
- [161] Sengun, K., & Arslan, G. (2022). Investigation of the parameters affecting the behavior of RC beams strengthened with FRP. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(6), 729-743.
- [162] Belarbi, A., Bae, S. W., & Brancaccio, A. (2012). Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 32, 27-40.
- [163] Mofidi, A., & Chaallal, O. (2014). Tests and design provisions for reinforced-concrete beams strengthened in shear using FRP sheets and strips. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8, 117-128.
- [164] Zhouhong ZYC, Xueyang H (2013). Experimental study on shear behavior of 1052 RC&PPC beams strengthened with CFRP plates. *Eng Mech* 6:236–246 62.
- [165] Chen, G. M., Zhang, Z., Li, Y. L., Li, X. Q., & Zhou, C. Y. (2016). T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips. *Composite Structures*, 144, 57-79.
- [166] Kim, Y., Quinn, K., Ghannoum, W. M., & Jirsa, J. O. (2014). Strengthening of reinforced concrete T-beams using anchored CFRP materials. *ACI Structural Journal*, 111(5), 1027.

Références Bibliographiques

- [167] Bourget, S., El-Saikaly, G., & Chaallal, O. (2017). Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear using closed carbon fiber-reinforced polymer stirrups made of laminates and ropes. *ACI Structural Journal*, 114(5), 1087.
- [168] El-Saikaly, G., Chaallal, O., & Benmokrane, B. (2017, July). Comparison of anchorage systems for RC T-beams strengthened in shear with EB-CFRP. In *Proc., 6th Asia-Pacific Conf. on FRP in Structures* (pp. 1-5).
- [169] Frederick, F. F., Sharma, U. K., & Gupta, V. K. (2017). Influence of end anchorage on shear strengthening of reinforced concrete beams using CFRP composites. *Current Science* (00113891), 112(5).
- [170] Li W, Leung CKY (2017). Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips. *Composite Structure* 177:141–157.
- [171] Panigrahi SK, Deb A, Bhattacharyya SK (2016). Modes of failure in shear deficient RC T-beams strengthened with FRP. *J Composite Constructio* 20(1):4015029.
- [172] Peng, W. (2016). Coupling Effect of Shear Failure Mode And Steel Stirrup Ratio on Shear Behavior of RC Beams Externally Bonded with CFRP Strips. *Shenzhen University*, 78–80. (in Chinese).
- [173] 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.
- [174] Sengun, K., & Arslan, G. (2024). Performance of RC beams strengthened in flexure and shear with CFRP and GFRP. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(1), 117-130.
- [175] Cakir F, Aydin MR, Acar V, Aksar B, Akkaya HC (2023). An experimental study on RC beams shear-strengthened with intraply hybrid U-jackets composites monitored by digital image correlation (DIC). *Composite Structure* 323:117503.
- [176] Mofidi, A., & Chaallal, O. (2011). Shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites: Effect of strip-width-to-strip-spacing ratio. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 732-742.
- [177] Berset J-D (1992). Strengthening of reinforced concrete beams for shear using 1316 FRP composites. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridg.*
- [178] Triantafillou, T. C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. *ACI structural journal*, 95, 107-115.

Références Bibliographiques

- [179] Zhang, Z., & Hsu, C. T. T. (2005). Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates. *Journal of composites for construction*, 9(2), 158-169.
- [180] Bukhari, I. A., Vollum, R., Ahmad, S., & Sagaseta, J. (2013). Shear strengthening of short span reinforced concrete beams with CFRP sheets. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 523-536.
- [181] Chen, J. F., & Teng, J. G. (2003). Shear capacity of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams: Fiber reinforced polymer rupture. *Journal of Structural Engineering*, 129(5), 615-625.