

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle L.M.D

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures et matériaux

Présentée par :

Abdelmadjid SI SALEM

Thème

**Développement d'une poutre en béton-composite : analyse
expérimentale et modélisation**

Devant le jury composé de :

BALI Abderrahim	Professeur	E.N.P Alger	Président
AIT TAHAR Kamal	Professeur	U.M.M T.O	Rapporteur
MELBOUCI Bachir	Professeur	U.M.M T.O	Examineur
KADRI Mohamed	Professeur	U.M.B Boumerdés	Examineur
HAMIZI Mohand	Professeur	U.M.M T.O	Invité

Soutenu le : 10/03/2016

À

la mémoire de ma belle sœur
Belmoukhtar Lila et
Dr. Drizi Said

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné la patience, ainsi que la volonté et le courage de réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma parfaite considération à mon directeur de thèse le Professeur **AIT TAHAR Kamal** pour avoir accepté de me proposer ce thème et diriger cette thèse, son enthousiasme, sa ténacité et surtout son sens du bon travail ont énormément contribué à l'aboutissement de mes travaux. Je tiens également à le remercier pour sa confiance et sa sympathie, témoignées au cours de ces années de préparation de la thèse.

Je remercie Monsieur **Bali Abderrahim** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres de jury **M^r Kadri M** Professeur à l'université UMBB de Boumerdes, **M^r Melbouci B** et **M^r Hamizi M** Professeurs à l'université Mouloud Mammeri, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire de thèse et lui apporter ainsi l'accréditation de la communauté scientifique.

J'adresse affectueusement mes sincères et profondes reconnaissances à **Souad Ait Taleb** pour sa participation et sa collaboration à résoudre tous les problèmes techniques et morales que j'ai rencontrés au cours de la réalisation de ce travail du début jusqu'à la fin.

Je tiens également à remercier **M^r Seddik Merakeb**, **M^r Said Boukais** maitres de conférences à l'université Mouloud Mammeri, **M^{lle} Chafika Ali Ahmed** et **Mme Fatma Taouche-Kheloui** pour leurs conseils et leur gentillesse durant toutes les périodes difficiles de la réalisation de ce travail.

Je voudrais manifester mes remerciements à l'ensemble du personnel du Laboratoire en particuliers **M^r R. Bouhraoua** et **M^r Mamou** pour les efforts qu'ils ont fournis au cours des investigations expérimentales et pour leur disponibilité durant les essais mécaniques.

Enfin, je tiens à adresser mes sincères remerciements ainsi que ma gratitude la plus dévouée à mes parents, pour leur dévouement et surtout pour leur amour et le sacrifice qu'ils m'ont accordés, ainsi que mes frères et sœurs, et sans oublier mon très cher ami **Ounnadi Salah**.

RESUME

Une nouvelle technique de conception des poutres en béton composite, qui présentent à la fois des performances mécaniques intéressantes et un poids propre réduit, est proposée dans cette étude. Cette nouvelle conception consiste à intégrer un élément tubulaire en polymère dans la zone tendue de la poutre, mécaniquement inefficace, enveloppé par un tissu composite, prolongé le long de la hauteur de la section droite de la poutre et disposé perpendiculairement à l'axe neutre de la section, pour améliorer d'une part sa rigidité flexionnelle, de s'opposer au développement des déformations latérales et d'autre part de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion et de cisaillement, en mobilisant la pression latérale de confinement, due à la différence des rigidités entre les deux matériaux à savoir : le béton et le tissu composite en GFRP.

Une campagne expérimentale sur des poutres en béton composite chargées en flexion quatre points jusqu'à la rupture, pour mettre en exergue les performances mécaniques de telles poutres comparativement aux poutres de conception traditionnelle en béton armé, est réalisée. Pour mieux comprendre le comportement de la nouvelle poutre composite, une simulation numérique à base des éléments finis et une modélisation analytique couplée à une approche fiabiliste (la méthode FORM) sont également réalisées. Ces analyses mettent en évidence l'influence de la variabilité des différents paramètres liés à la géométrie, aux propriétés mécaniques et aux conditions de chargement, pour la détermination des états limites de défaillance, ainsi que leurs influences directes sur les modes de rupture des spécimens considérés.

Mots clés : Conception, poutre composite, essais, modélisation analytique, simulation numérique, approche fiabiliste.

ABSTRACT

The main objective of this study is to design a new concrete composite beam; structural elements with low cost and high mechanical performances to weight ratio are developed. The proposed technology consists to integrate in the flexural tensile zone of the concrete beam a cylindrical polymer tube wrapped by a GFRP fabric in order to improve its flexural stiffness, which allows to avoid problems due to interface between concrete and composite materials. In order to oppose to the development of lateral deformations of the polymer tube, the GFRP fabric was extended along the height of the cross section of the composite beam. The mobilization of the confinement pressure due to the difference stiffness of all these compatible materials namely: Concrete, Polymer tube and GFRP fabric allows reducing the cracks initiation and the cracks propagation, which makes the structure significantly efficient.

Experimental investigation completed by non linear finite element analyses are carried out on concrete-composite beam under typical four point bending loads until failure, to highlight the enhancement in terms of mechanical performances of the new beam compared to conventional reinforced concrete ones. In order to draw complete conclusions about the interest of the proposed technology, a coupled approach between theoretical modeling and the classical reliability analysis was performed to assess the influence of the variability of the parameters related to the geometrical characteristics, the mechanical properties, and the loading path for the determination of the failure limit states. The reliability index which reflects the risk exposure of cracks initiation was assessed by the FORM method.

Keywords: Design, Composite beam, Experiments, theoretical modeling, numerical investigation, Reliability approach.

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Abstract	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Principales notations	vi
Liste des travaux	vii
Introduction générale	1
Chapitre I: Synthèse bibliographique	
Partie I : Aspects matériaux et leurs pathologies	4
I.1. Introduction	5
I.2. Généralités et Aspect matériaux	5
I.2.1 Le béton	5
I.2.1.1 Aperçu historique sur le béton	6
I.2.1.2 Constituant et formulation	6
I.2.1.3 Comportement mécanique du béton	6
I.2.2 Du béton ordinaire aux bétons-composites	7
I.2.2.1 Le béton armé	7
I.2.2.2 Le béton précontraint	8
I.2.2.3 Les bétons de fibres	8
I.2.2.4 Les bétons composites légers	10
I.2.2.5 Les TRC (Textile Reinforced Concrete)	11
I.2.3 Les matériaux composites	12
I.2.3.1 Définitions et Propriétés	12
I.2.3.2 Les fibres	13
I.2.3.3 Les matrices et adhésifs	14
I.2.3.4 Comportement mécanique	15
I.2.4 Les polymères	16
I.2.4.1 Procédés de mise en œuvre et classification	16
I.2.4.2 Propriétés et Structures chimique	17

I.2.4.3	Propriétés physiques et mécaniques	18
I.3.	Application des composites en génie civil	18
I.3.1	Réparation des fissures	19
I.3.2	Renforcement des poutres par collage de plaque	19
I.3.3	Renforcement des dalles	20
I.3.4	Confinement des colonnes	20
I.3.5	Confortement des ponts et des ouvrages d'art	22
I.4.	Conclusion	23
 Partie II : Analyse statistique et fiabilité des structures composites		24
I.5.	Introduction	24
I.6.	Notions de Statistique	24
I.6.1	Définition et démarche	24
I.6.2	Statistique descriptive	25
I.6.2.1.	Variable aléatoire	25
I.6.2.2.	Paramètres statistiques	25
I.6.3	Statistique inférentielle	26
I.6.3.1	Estimation et intervalle de confiance	26
I.6.3.2	Tests statistiques	27
I.7.	Notion de probabilité	28
I.7.1	Loi de probabilité	28
I.7.1.1.	La loi normale de Laplace-Gauss	28
I.7.1.2.	Loi de Weibull	29
I.8.	Analyse fiabiliste	30
I.8.1	Problématique	30
I.8.2	Description des incertitudes	31
I.8.3	Description des variabilités	31
I.8.4	Fonction de performance	32
I.8.5	Transformations isoprobabilistes	33
I.8.5.1.	Transformation de Rosenblatt	33
I.8.5.2.	Transformation de Nataf	33
I.8.6	Principales méthodes en fiabilité	34
I.8.6.1.	Méthode analytique	35

I.8.6.2.	Méthodes par gradient	35
I.8.6.3.	Méthodes par simulation	37
I.9.	Application de la fiabilité dans le génie civil	37
I.9.1	Evaluation de la qualité du béton	38
I.9.2	Analyse stochastique des paramètres du béton	38
I.9.3	Analyse fiabiliste des poutres renforcées par CFRP	38
I.9.4	Analyse probabiliste de la performance des ponts	39
I.10.	Conclusion	40

Chapitre II Programme et caractérisation expérimentale

II.1	Introduction	42
II.2	Synthèse permettant de définir la campagne d'essai	42
II.3	Programme expérimentale	43
II.3.1	Corps d'épreuves	43
II.3.2	Caractérisation des matériaux	44
II.3.2.1	Le béton	45
II.3.2.2	Les éléments tubulaires	47
II.3.3.3	Matériaux composites	49
II.3.3	Préparations des spécimens Poutres	52
II.3.3.1	Mise en place du tissu sur les éléments tubulaires	52
II.3.3.2	Coffrage et bétonnage	53
II.3.3.3	Chargement et acquisition	54
II.4	Résultats et Confrontation	54
II.4.1	Essai préliminaire (flexion 03 points)	55
II.4.1.1	Confrontation des courbes forces-déplacement	55
II.4.1.2	Mode de rupture	56
II.4.1.3	Quantification des apports	57
II.4.2	Grandes poutres (flexion 04 points)	58
II.4.2.1	Comportement global de la poutre composite	58
II.4.2.2	Effet du confinement	59
II.5	Conclusion	60

Chapitre III Simulation numérique

III.1.	Introduction	62
III.2.	Calcul et Aspect numérique	63
III.2.1	Modélisation classique	63

III.2.2	Modélisation par éléments finis	63
III.2.3	Rappel du principe des puissances virtuelles	64
III.3.	Modélisation numérique du comportement des matériaux	65
III.3.1	Un modèle élastoplastique endommageable pour le béton	65
III.3.1.1	Cadre théorique pour la modélisation du béton	66
III.3.1.2	Théorie d'endommagement	66
III.3.1.3	Le modèle Concrete Damaged Plasticity	68
III.3.2	Un modèle élastique-Orthotrope pour les composites	72
III.3.2.1	Notion d'élasticité	73
III.3.2.2	Matrice de rigidité et de souplesse.....	73
III.3.2.3	Mécanisme et critère de rupture	74
III.4.	Simulation avec Abaqus	75
III.4.1	Présentation des modèles	75
III.4.2	Géométrie et conditions aux limites	76
III.4.3	Maillage et éléments finis	77
III.4.4	Modélisation du contact Béton/Composites	77
III.5.	Résultats et Interprétation	78
III.5.1	Evolution des contraintes	78
III.5.2	Evolution des dommages	80
III.5.3	Evolutions des déplacements globaux	84
III.5.4	Confrontation et validation du modèle élément fini	85
III.6	Conclusion	86

Chapitre IV Modélisation et proposition d'un modèle de confinement

IV.2.	Introduction	88
IV.3.	Description de l'approche de confinement	88
IV.4.	Synthèse des modèles de confinement	89
IV.4.1	Modèle de résistance	90
IV.4.2	Modèle de déformation	90
IV.5.	Modèle proposé	91
IV.5.1	Modélisation géométrique de la section	91
IV.5.2	Equilibre de la section	92
IV.5.3	Modélisation géométrique du tissu FRP	93
IV.5.4	Evaluation de la contrainte latérale de confinement	94

IV.5.5	Relation entre les forces	95
IV.5.6	Paramètre non linéaire du modèle	97
IV.6.	Validation du modèle	97
IV.6.1	Validation expérimentale et numérique	98
IV.6.2	Ajustement statistique	98
IV.7.	Conclusion	101

Chapitre V Approches probabiliste et fiabiliste

V.1.	Introduction	103
V.2.	Approche déterministe	104
V.2.1	Fonction de résistance	104
V.2.2	Fonction de chargement	105
V.3.	Couplage mécano-fiabiliste	105
V.3.1	Principe de modélisation	105
V.3.2	Fonction de performance	106
V.4.	Analyse de sensibilité	106
V.4.1	Variables aléatoires	106
V.4.2	Sensibilité statistique de β	108
V.5.	Application de la méthode FORM	109
V.5.1	Test de normalité	109
V.5.2	Densité de probabilité	111
V.5.3	Transformation de Rosenblatt	112
V.5.4	Indicateurs de fiabilité	112
V.6.	Résultats et discussion	113
V.6.1	Evolution de l'indice de fiabilité	113
V.6.2	Evolution de la probabilité de défaillance	115
V.7.	Conclusion	115
	Conclusion générale	117
	Références bibliographiques	121

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Les différents constituants du béton destiné à la construction	6
Figure I.2. Courbe contrainte-déformation : Compression/Traction	7
Figure I.3. Principe de la precontrainte sur des poutres soumises à la flexion	8
Figure I.4. Béton de fibre à l'état frais et à l'état durci	9
Figure I.5. Eprouvettes et huban de pont confectionnés à base d'un béton composite	11
Figure I.6. Différentes techniques de mise en œuvre des TRC	11
Figure I.7. Différents constituants d'un matériau composite	12
Figure I.8. Différentes formes des matériaux composites	13
Figure I.9. Confrontation du comportement des composites et de l'acier	16
Figure I.10. Tubes en Polymère sous forme cylindriques	16
Figure I.11. Différentes techniques de renforcement des poutres en béton armé	19
Figure I.12. Renforcement des dalles en béton par des bandes en CFRP	20
Figure I.13. Confinement des colonnes (cylindrique et carré) par des composites	21
Figure I.14. Différentes techniques de renforcement des éléments en béton	22
Figure I.15. Renforcement des poutres et des culées de pont	22
Figure I.16. Distribution normale pour les variables (x) et (Z)	29
Figure I.17. Fonction de répartition de Weibull pour différentes valeurs de λ	29
Figure I.18. Disciplines en collaboration dans une étude fiabiliste	31
Figure I.19. Représentation de la densité de probabilité normale centrée réduite bi-variée ...	32
Figure I.20. Transformation de l'espace d'entrée des variables	33
Figure I.21. Arbre des méthodes d'analyses de la fiabilité mécanique	34
Figure I.22. Approximation géométrique de la méthode FORM/SORM	36
Figure I.23. Réponse ultime pour différents paramètres statistiques	38
Figure I.24. Probabilité de défaillance et COV en fonction de la force appliquée	39
Figure I.25. Fréquences expérimentales et probabilités simulées des joncs	39
Figure II.1. Poutre en béton composite développée sous chargement de flexion	44
Figure II.2. Comportement expérimental du béton sous compression axiale	45

Figure II.3. Comportement du béton sous chargement de flexion	46
Figure II.4. Elément tubulaire sous chargement de flexion répartie	47
Figure II.5. Comportement expérimental de l'élément tubulaire	48
Figure II.6. Tissu composite en fibre de verre : avant et après ensimage	49
Figure II.7. Loi de comportement mécanique des composites utilisés	51
Figure II.8. Préparation de l'élément tubulaire et les coffrages	52
Figure II.9. Bétonnage et conservation des spécimens avant murissement	53
Figure II.10. Machine de flexion IBERTEST	54
Figure II.11. Confrontation des courbes force-déplacement	55
Figure II.12. Poutre en béton composite soumise à la flexion quatre points	56
Figure II.13. Histogramme des résistances et des rigidités flexionnelles	57
Figure II.14. Confrontation des courbes force-déplacements	58
Figure II.15. Dispositif du chargement des spécimens et modes de rupture	59
Figure III.1. Eléments finis utilisés pour discrétiser une forme complexe des structures	64
Figure III.2. Définition de la contrainte effective d'après Murakami	67
Figure III.3. Réponse du modèle à la compression simple	69
Figure III.4. Réponse du modèle à la traction (post-élastique).....	69
Figure III.5. Récupération de rigidité sous chargement monotone uniaxial	71
Figure III.6. Pli d'un matériau composite orthotrope	73
Figure III.7. Modélisation tridimensionnelle (3D) d'une poutre en béton-composite	75
Figure III.8. Modélisation géométrique de l'enveloppe en composite	76
Figure III.9. Poutre en béton composite sous chargement de flexion	76
Figure III.10. Maillages adoptés lors des simulations des poutres composites	77
Figure III.11. Evolution des contraintes de Von-Mises dans le tissu composite FRP	78
Figure III.12. Evolution des contraintes de Hill-Tsai dans le tissu composite FRP	79
Figure III.13. Confrontation des courbes contrainte-déformations	80
Figure III.14. Représentation de l'évolution des dommages dus à la traction	81
Figure III.15. Représentation de l'évolution des dommages dus à la compression	82
Figure III.16. Confrontation des courbes forces-dommages en compression	83
Figure III.17. Confrontation des courbes forces-dommages en traction	83
Figure III.18. Représentation de l'évolution des déplacements globaux	84

Figure III.19. Représentation de l'effet de confinement	85
Figure III.20. Confrontation des courbes F-U : Numérique et expérimentale	86
Figure IV.1. Courbes contrainte-déformation pour différents taux de confinement	89
Figure IV.2. Modélisation géométrique des sections	92
Figure IV.3 Equilibre de la section de la poutre composite : Contraintes & Forces	92
Figure IV.4. Caractéristiques géométriques du tissu composite	93
Figure IV.5. Contrainte de confinement mobilisée par la Jacket GFRP	94
Figure IV.6. Poutre en béton-composite sous flexion 04 points	95
Figure IV.7. Confrontation des résultats expérimentaux, numériques et théoriques	98
Figure IV.8. Confrontation de la capacité portante : Expérimentale vs. Modèle	99
Figure IV.9. Confrontation de la capacité portante : Numérique vs. Modèle	99
Figure IV.10. Confrontation du coefficient de confinement : Essai vs. Modèle	100
Figure IV.11. Confrontation du coefficient de confinement: Numérique vs. Modèle	100
Figure V.1. Importance de chaque variable aléatoire dans l'analyse de sensibilité	109
Figure V.2. Graphe de la probabilité de la fonction résistance	110
Figure V.3 Graphe de la probabilité de la fonction sollicitation	110
Figure V.4. Densité de probabilité de la fonction résistance	111
Figure V.5. Densité de la probabilité de la fonction sollicitation	111
Figure V.6. Densité des probabilités dans l'espace normé centré réduit	112
Figure V.7. Evolution de l'indice de fiabilité en fonction du chargement	113
Figure V.8 Evolution de l'indice de fiabilité en fonction du rapport R/S	114
Figure V.9 Illustration graphique de l'indice de Fiabilité de la méthode FORM	114
Figure V.10 Evolution de la probabilité de défaillance	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Caractéristiques typiques des fibres utilisées pour les BAF	9
Tableau I.2. Propriétés mécaniques et physiques des fils multi-filamentaires	11
Tableau I.3. Propriétés mécaniques et physiques des composites à base de fibres	14
Tableau I.4. Caractéristiques des résines thermodurcissables	15
Tableau I.5. Caractéristiques chimiques des polymères	17
Tableau I.6. Caractéristiques physiques et mécaniques des polymères	18
Tableau I.7. Tableau de mesure des paramètres statistiques principaux	26
Tableau II.1. Formulation du béton utilisé	45
Tableau II.2. Caractéristiques mécaniques du béton	46
Tableau II.3. Résultats des essais de traction par flexion	46
Tableau II.4. Propriétés mécaniques du tube en polymère	48
Tableau II.5. Résultats des essais de flexion sur les éléments tubulaires	48
Tableau II.6. Caractéristiques géométriques du tissu composite	50
Tableau II.7. Caractéristiques de la résine fournies par le fabricant	50
Tableau II.8. Caractéristiques élastiques du tissu composite	51
Tableau II.9. Caractéristiques à la rupture du tissu composite	52
Tableau II.10. Caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres testées	54
Tableau II.11. Résultats des essais préliminaires	57
Tableau II.12 Résultats des essais de la flexion, quatre points	60
Tableau III.1. Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton	72
Tableau IV.1. Synthèse des modèles du béton confiné avec intégration de GFRP	91
Tableau IV.2. Confrontation des résultats expérimentaux, numériques et théoriques	98
Tableau V.1. Variables aléatoire liées à la géométrie de la poutre	107
Tableau V.2. Variables aléatoires lies aux propriétés mécaniques	107
Tableau V.3. Variables aléatoires liées aux chargements	107
Tableau V.4. Sensibilité de l'indice de fiabilité	108
Tableau V.5. Modélisation statistique des variables de la fonction de résistance	110
Tableau V.6. Résultats de l'analyse fiabiliste	113

PRINCIPALES NOTATIONS

NEW-CCB	New concrete composite beam (Poutre en béton composite)
REF-CTB	Reference Concrete with Tube Beam (Poutre de référence avec tube polymère)
REF-RCB	Reference Reinforced Concrete Beam (Poutre en béton armé).
REF-CB	Reference Concrete Beam (Poutre en béton).
FRP	Fibber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres).
CFRP	Carbon Fibber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de carbone).
GFRP	Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre)..
FORM	First Order Reliability Method (Méthode de fiabilité du premier ordre).
SORM	Second Order Reliability Method (Méthode de fiabilité du deuxième ordre).
X_i	Vecteur des variables aléatoires
$F(x)$	Fonction de répartition.
$f(x)$	Fonction de densité de probabilité.
I_c	Intervalle de confiance.
$G_X(x)$	Fonction d'état limite (fonction de performance)
$f_{x_i}(x_i)$	Densité de probabilité conjointe
β	Indice de fiabilité
P_f	Probabilité de défaillance
$\phi(\cdot)$	Fonction de distribution de probabilité de la loi normale centrée réduite.
N_t	Nombre des événements de tirage de la méthode de Monté Carlo.
E	Module de Young instantané du béton.
ψ	Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
a_f	Rapport entre contrainte bi-axiale/uniaxiale du béton.
a_c	Paramètre pilotant la courbe de compression de béton avant le pic
b_c	Paramètre pilotant la courbe de compression après le pic.
a_t	Paramètre pilotant la courbe de traction avant le pic
b_t	Paramètre pilotant la courbe de traction après le pic

d_t	Variables d'endommagement de traction.
d_c	Variables d'endommagement en compression.
f_b	Force de compression du béton
f_l	Force latérale de confinement.
f_t	Force de traction développée par le tissu à travers la génératrice du tube
S_f	Espacement entre deux chaînes et deux trames successives.
b_f	Section transversale d'un filament en (mm ²).
h_f	Hauteur totale de la Jacket composite
l_f	Hauteur de la Jacket FRP dans la zone tenue (zone de confinement).
P_T	Résultante des efforts extérieurs appliqués à la poutre composite.
L	Longueur fictive de la poutre composite (Longueur entre appuis)
b	Largeur de la poutre composite.
a	Distance entre l'appui et la charge.
h	Hauteur de la poutre composite
ρ_f	Fraction volumique du GFRP.
A_f	Section du composite à travers la génératrice du tube.
σ_l	Contrainte latérale du composite.
f_r	Résistante à la rupture en traction.
f_f	Resistance ultime à la traction du composite.
σ_c	Contrainte latérale de confinement mobilisée par le tissu composite (GFRP).
M_{c0}	Moment résistant de la section de la poutre de référence en béton armé.
M_{cc}	Moment résistant de la section de la poutre en béton composite.
f_{c0}	Capacité portante de la poutre de référence en béton armé.
f_{cc}	Force maximale de la poutre en béton composite.
z	Position de l'axe neutre de la poutre en béton composite.
γ_i	Facteurs d'omissions.
α_i	Cosinus directeurs qui renseignent sur la sensibilité des variables aléatoires.
U	Variables aléatoires dans l'espace normé centré réduit.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de thèse a été réalisé au sein de l'équipe « Matériaux et Structures Composites » dirigée par mon directeur de thèse le Professeur **AIT TAHAR Kamal**, du laboratoire de modélisation expérimentale et numérique des matériaux et structures de Génie civil (*LaMoMS*) ; de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

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

Publications internationales

1. **Abdelmadjid SI SALEM**, Souad AIT TALEB and Kamal AIT TAHAR: « *Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP* » ; *Frontiers of Structural and Civil Engineering*,. 9(2): 154-162 (2015) doi: 10.1007/s11709-015-0296-8, ISSN 2095-2449 ; <http://www.springer.com>
2. **Si Salem A**, Ait Taleb S & Ait tahar K « *Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components* » *Procedia Engineering*, Volume 114(C): 173-180, (2015), ISSN 1877-7058 ed. Elsevier www.science-direct.com
3. **Si Salem. A**, Ait Taleb. S and Ait tahar. K. « *A finite element approach for predicting the flexural response of light weight FRP-Concrete beams under cyclic loading* » Article retenu dans *Lecture Note in Mechanical Engineering* ; Springer book; ISSN 2195-4364

Publications nationales

1. **Si Salem A**, Ait Taleb S & Ait tahar K « *Mechanical behaviour of a new composite beam: Nonlinear Modeling analysis* » Article retenu dans le *Journal of Materials, Processes and Environment (JMPE)* de Boumerdes.

Conférences nationales et maghrébines

1. Ait tahar K, **Si Salem A** « *Development and analysis of a new design concrete composite beam* » ; 5th International Symposium on Aircraft Materials: ACMA – Marrakech, Morocco, April 23-26, 2014 <http://acma2014.ma>
2. **Si Salem. A**, Ait Taleb. S, Ait tahar. K « *Analyse fiabiliste de la capacité portante d'une poutre composite* », 5ème SNMPE'2014, 12 et 13 Mai, 2014- Boumerdès, Algérie. www.snmpe.dz
3. **Si Salem A**, Ait Taleb S, Ait tahar K, « *Analyse fiabiliste des performances mécaniques des poutres composites chargées en flexion* » Colloque International Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures - CMMS14, 12 - 13 novembre 2014 Tizi-Ouzou Algérie. www.cmms14.dz

4. **Si Salem. A**, Ait Taleb. S, Ait tahar. K, « *Performances d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et fiabiliste* » 3ème Séminaire International Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction, Alger, 17 et 18 Nov. 2014 <http://www.usthb.dz/invaco/article813>
5. **Si Salem A**, Ait Taleb S, Ait tahar K, « *Mechanical behaviour of a new composite beam: Nonlinear Modeling analysis*» 3rd International Conference on Composite Materials and Structures CIMSC'14 December 02-03, 2014 - Oran – Algérie ; cimsc.ustomb.dz
6. **Si Salem. A**, Ait Taleb. S, Ait tahar. K, « *Comportement d'une poutre en béton-composite sous un chargement cyclique : Modélisation numérique* » 5th Algerian Congress of Mechanics, CAM 2015, October 25 – 29, El-Oued, Algeria <http://www.cam-dz.org/>

Introduction Générale

Introduction générale

Les nouvelles recommandations techniques, les exigences environnementales et économiques, ont conduit les constructeurs à disposer des éléments de structure capables de dissiper de l'énergie. Le comportement mécanique de ces structures sous chargement est conditionné par leurs éléments de contreventement (éléments porteurs), aussi bien en fonction de leurs caractéristiques statiques et dynamiques et les résistances des matériaux constitutifs. Ceci contribue de plus en plus au développement de nouvelles techniques de conception, en utilisant les matériaux composites, qui permettent grâce à la conjugaison des performances mécaniques, d'améliorer le comportement à la flexion et au cisaillement des éléments de structure en béton.

L'originalité de ce travail est soulignée par la proposition d'un nouveau procédé de réalisation de poutre entièrement en béton-composite, capable de mieux reprendre les sollicitations mécaniques, comparativement aux poutres en béton armé de conception traditionnelle. Ce nouveau procédé consiste à faire travailler trois matériaux compatibles pour la reprise des sollicitations de flexion et de cisaillement à savoir : le béton, les composites et les éléments tubulaires en polymère. La conception proposée consiste à intégrer dans la zone tendue de la poutre en béton, mécaniquement inefficace, un élément tubulaire enveloppé par un tissu composite pour améliorer sa rigidité, s'opposer au développement des déformations latérales et diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion et de cisaillement. La conséquence directe de cette conception est une réduction significative de la quantité de béton, conduisant à un double bénéfice: réduction de la masse de la structure et amélioration de ces performances mécaniques, notamment la capacité portante et la reprise des efforts de flexion et de cisaillement.

Les principaux objectifs de ce travail sont résumés comme suit :

- Développement d'un procédé innovant, de réalisation de poutre en béton – composite, basé sur une approche d'actualité, qui permet à la fois d'obtenir un seuil de résistance acceptable et de réduire le poids de la poutre, tout en préservant son aspect architectural.
- Evaluation des performances mécaniques, les modes de rupture des poutres composites et estimation des paramètres conceptuels à travers une analyse expérimentale.
- Apporter des informations indispensables à la compréhension du comportement non linéaire de la poutre développée par une simulation à base des éléments finis, à travers une confrontation des résultats obtenus au niveau local et global.
- Proposer un modèle de confinement, permettant de prédire la réponse complète de la poutre dans le domaine post-élastique, sous chargement de flexion. Cette modélisation tient compte de tous les paramètres conceptuels de la poutre composite.

- Appliquer les concepts de la fiabilité mécanique pour estimer la probabilité de défaillance et l'indice de fiabilité du système mécanique considéré et identifier les effets de la variation de ces paramètres.

Le travail de recherche est structuré en cinq chapitres et est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Le **premier chapitre** de cette thèse est consacré à une synthèse bibliographique composée de deux parties. La première porte sur la présentation des matériaux et leurs pathologies. Nous avons rappelé les différentes propriétés mécaniques du béton, des matériaux composites et des matériaux polymères. Ensuite, nous avons présenté les démarches, ainsi que les différentes utilisations et applications des matériaux composites à base de fibre dans le renforcement, le confinement, la réparation et le confortement des structures de génie civil. Une revue détaillée sur les modes de comportement des éléments de structure en béton armé renforcés par des plaques composites est également présentée. L'analyse critique nous a permis de lister le mode de rupture le plus fréquent de ces structures, qui est généralement le délaminage de la plaque de renforcement de son support dû à une forte concentration des contraintes aux bords.

La deuxième partie porte sur la modélisation probabiliste et l'évaluation statistique des différents paramètres de base des structures composites ; la présentation des démarches fiabilistes pour l'étude de problèmes mécaniques (ses objectifs, ses produits et les différentes étapes de sa mise en place) est développée dans ce chapitre. Les concepts fondamentaux relatifs aux approches fiabilistes, notamment, la méthode d'approximation FORM/SORM et son application dans le domaine du génie civil sont brièvement expliquées. Les difficultés de mise en œuvre d'une approche d'analyse mécano- fiabiliste sont mises en évidence.

Dans le **deuxième chapitre**, un programme expérimental très riche est réalisé. Il porte sur la caractérisation expérimentale du comportement mécanique des poutres en béton-composite chargées en flexion quatre-points. Plus spécifiquement, l'étude au laboratoire portait sur l'évaluation des performances mécaniques des éléments poutres sous chargement ainsi que l'identification des paramètres influençant leur comportement global, comparativement aux poutres de référence (témoins) en béton armé. Tout un dispositif d'appui et d'essai est mis au point, permettant de fournir des informations indispensables à la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes de rupture des éléments étudiés. Les résultats obtenus, sur chaque série d'essais, ont permis de quantifier les différents apports de cette nouvelle conception en termes de réduction de poids propre, capacité portante, et ductilité, comparativement aux structures de référence avec des dimensions équivalentes.

Le **troisième chapitre** est totalement dédié à la présentation de l'étude numérique basée sur la méthode des éléments finis, à l'aide du logiciel Abaqus. Cette analyse est consacrée à la modélisation du comportement d'une poutre en béton-composite, dans un espace tridimensionnel, sous chargements monotones de flexion quatre points croissants jusqu'à la rupture. Les matériaux utilisés sont modélisés suivant des modèles numériques à savoir : un modèle permettant de tenir compte de la dissymétrie du comportement non linéaire du béton en compression et en traction, couplé avec l'endommagement pour représenter l'évolution des

fissures, et un modèle élastique orthotrope est utilisé pour modéliser le comportement expérimental des matériaux composites et polymères.

Dans le **quatrième chapitre**, un modèle de confinement propre à la conception proposée permettant de prendre en considération la contribution du tissu FRP à travers la génératrice du tube en polymère à reprendre les efforts de flexion, ainsi que la pression latérale de confinement mobilisée par l'enveloppe composite, est développé. La modélisation analytique de la poutre composite est menée selon deux approches : la première est basée sur l'équilibre de la section transversale, afin d'évaluer finement le champ des déformations et le champ des contraintes, ainsi que les efforts développés par les matériaux constitutifs. La deuxième est une approche globale, basée sur la théorie classique des poutres, elle permet d'évaluer la capacité portante de la poutre composite sous chargement de flexion quatre points, comparativement à la poutre de référence en béton armé.

Enfin, le **cinquième chapitre** résume l'étude probabiliste et fiabiliste réalisée sur les poutres en béton composite chargées en flexion. Cette analyse met en exergue l'influence de la variabilité des différents paramètres liés à la géométrie, aux propriétés mécaniques et au chargement, pour la détermination des états limites de défaillance ainsi que, leur influence directe sur les modes de rupture des spécimens obtenus par la campagne expérimentale et la simulation numérique. L'étude probabiliste a été divisée en trois parties : l'approche déterministe, l'analyse de sensibilité des variables et enfin l'approche fiabiliste. Dans cette approche, la probabilité de défaillance et l'indice de fiabilité du système mécanique ont été estimés par la méthode géométrique d'approximation FORM (First Order Reliability Method).

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale. Enfin, des perspectives sont proposées.

Chapitre I

Recherche bibliographique

Partie A : Aspects matériaux et leurs pathologies

**Partie B : Analyse statistique et fiabilité des structures
composites**

Partie - A - : Aspects matériaux et leurs pathologies

I.1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites dans le domaine de génie civil a connu un grand essor puisqu'ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels, tels que: la légèreté, la résistance mécanique, la liberté de forme et la durée de vie prolongée...Au début, ils étaient utilisés pour renforcer et conforter les éléments de structure endommagés [1-3]. Pour réduire le poids et assurer un comportement relativement plus ductile des structures en béton, l'utilisation des matériaux composites pourrait être une option envisageable [4, 5], puisqu'ils sont relativement plus déformables et étant de nature plus légère. Comparativement aux techniques traditionnelles de renforcement (plaques en acier, précontrainte additionnelle, chemisage en béton, ...), les composites augmentent faiblement le poids de la structure.

Cette étude bibliographique fait l'état de l'art des différents éléments nécessaires à ce travail, à travers une synthèse détaillée sur les bétons, les matériaux composites et les matériaux polymères. Ainsi, nous présentons leurs principales caractéristiques mécaniques intrinsèques et leurs lois de comportement respectives sous différents types de chargement. Ce chapitre débute par un aperçu historique et pathologique des matériaux utilisés. Ensuite, nous présentons les démarches utilisées ainsi que les différentes utilisations et applications des matériaux composites à base de fibres dans le renforcement, le confinement, la réparation et le confortement des structures de génie civil.

I.2. Généralités et Aspects matériaux

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers [6]. La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages [7]. Cette partie présente l'état de connaissance sur le comportement de tous les matériaux utilisés, leurs principaux composants, les différentes caractéristiques qui permettent d'identifier leur comportement expérimental, ainsi qu'un rappel de leurs différents processus de dégradation et pathologies.

I.2.1 Le béton

Depuis son invention, le béton a toujours été considéré comme le matériau de construction des ouvrages de génie civil par excellence, sa demande augmente jour après jour pour les besoins en terme de développement des infrastructures. Toutefois, il est connu par sa contribution à la pollution de l'environnement, en raison surtout de l'émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment portland et sa faible résistance à la traction qui constitue le majeur inconvénient de ce matériau. Les sections ci-dessous décrivent un bref historique du béton ainsi que ses principaux composants.

I.2.1.1 Aperçu historique sur le béton

Vers 2600 avant JC, les Assyriens et les Babyloniens ont employé l'argile comme un matériau liant. Cependant, les Egyptiens ont utilisé un ciment à base de chaux et de gypse. Déjà connu et utilisé par les grecs et, surtout les romains, le mortier est un matériau destiné à assurer dans les ouvrages en maçonnerie la liaison entre les éléments constitutifs. La chaux (CaO) fut, bien avant le ciment, le constituant de base des mortiers, les romains réinventent et améliorent la technique du mortier. Ce ciment romain fut utilisé jusqu'au 17ème siècle. En 1756, un ingénieur anglais, John Smeaton [8] a réalisé le premier béton moderne (ciment hydraulique) en utilisant des gravillons naturels qui ressemblent aux graviers et un mélange de briques pulvérisées comme ciment. La pratique du béton commença en début du XIXème siècle sur différents types d'ouvrages à savoir ; les canalisations et les égouts, les châteaux d'eau.

En 1824 l'anglais Josèphe Aspdin obtient un brevet pour la fabrication d'un ciment « aussi dur que la pierre de l'Ile de portland. De même, en 1849, Joseph Monier [9] a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer. Cette nouvelle invention a été brevetée en 1867. Cette armature métallique permet au béton de supporter partiellement les contraintes de traction. En 1928, Eugène Freyssinet a inventé le béton précontraint par fils adhérents.

I.2.1.2 Constituant et formulation

Le béton est le matériau utilisé par excellence dans tous les domaines de construction, ceci s'explique par les ces avantages suivants: possibilité de varier les propriétés du béton dans de larges limites, facilité des traitements mécaniques des mélanges du béton plastique, qui permet de réaliser sans dépenses sensibles de mains d'œuvre. Une formulation précise des composants du béton est fondamentale pour obtenir les caractéristiques mécaniques visées. La figure (I.1) résume tous les constituants nécessaires pour la confection d'un béton ordinaire, destiné à la construction des ouvrages de génie civil.

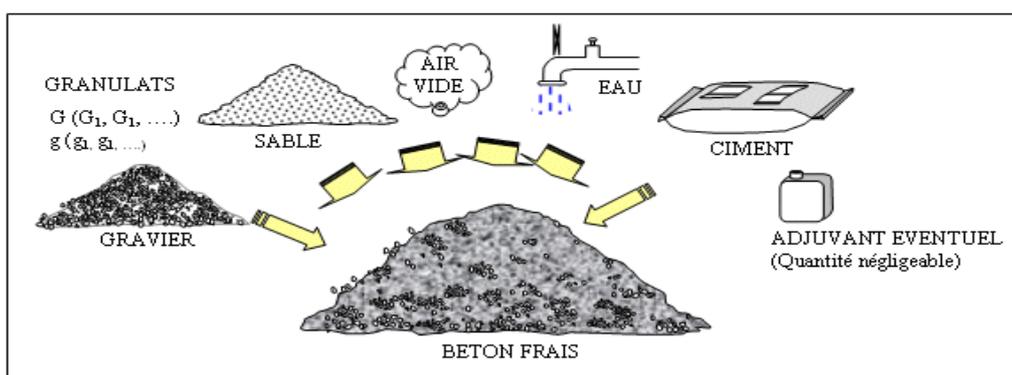


Figure I.1. Les différents constituants du béton destiné à la construction

I.2.1.3 Comportement mécanique du béton

Le béton présente une bonne résistance à la compression, qui dépend de sa composition. En général, les essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques normalisées de dimension

32 x 16 cm. À partir de la courbe contrainte-déformation d'un essai de compression (Voir Figure I.2), on peut déterminer : le module de Young instantané, la contrainte de rupture, la déformation maximale à la rupture et le coefficient de poisson.

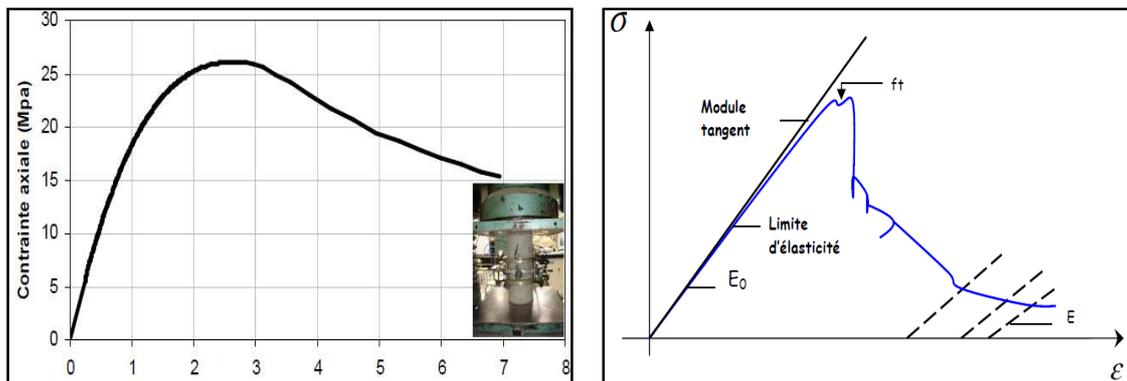


Figure I.2. Courbe contrainte-déformation : Compression/Traction [10, 11]

La courbe contrainte-déformation qui régit le comportement expérimental du béton à la compression se compose de trois phases: La phase où le comportement est analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, La déformation croît de façon linéaire jusqu'à environ 30% de la contrainte ultime. La phase de développement des microfissures, entre 30% et 100% de la contrainte ultime la courbe s'incurve et le comportement devient non-linéaire. L'atteinte du pic définit la contrainte ultime qui caractérise la résistance ultime du béton à la compression, elle correspond à une déformation de l'ordre de 2‰. La rupture se produit au-delà du pic, elle correspond à une déformation de l'ordre de 3.5‰.

Par contre, en traction, le comportement se compose des phases suivantes: Avant l'atteinte du pic, le comportement est presque linéaire, puis une non-linéarité apparaît à l'approche du pic, ceci correspond à la décohésion de quelques liaisons pâte-granulat et à la propagation des microfissures. Juste après le pic, une fissuration localisée apparaît progressivement; la résistance chute considérablement jusqu'à s'annuler pour un déplacement largement supérieur à celui correspondant à la résistance maximale.

I.2.2. Du béton ordinaire aux bétons-composites

Les progrès techniques accomplis lors de ces dernières décennies ont permis d'aboutir à une grande variété des bétons. Aujourd'hui, on dispose des bétons mieux adaptés à chaque catégorie d'ouvrage ; Les sections suivantes vont décrire d'une manière explicite l'évolution du béton depuis son invention à nos jours.

I.2.2.1 Le béton armé

Le béton est un matériau capable de supporter des efforts de compression importants (10 à 100 Mpa), alors que sa résistance aux efforts de traction est très faible (de l'ordre du dixième de sa résistance à la compression). C'est donc pour pallier à cette insuffisance qu'est née l'idée de placer, dans les zones soumises à des efforts de traction, des barres d'acier (armatures) résistantes aussi bien en compression qu'en traction. Le matériau résultant de l'association du béton et de l'acier est appelé « béton armé ».

Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont positionnés dans les parties tendues du béton pour compenser la mauvaise résistance du béton en traction. Pour une poutre en béton armé par exemple, on place les armatures principales en la partie inférieure.

I.2.2.2 Le béton précontraint

La précontrainte permet de réaliser des ouvrages de faible épaisseur, qui peuvent résister à des sollicitations importantes (ponts ou réservoirs de grande capacité). Le béton précontraint associe béton et armatures, mais il s'en différencie de façon fondamentale dans son principe. En 1935, son inventeur, Eugène Freyssinet, définit ainsi la précontrainte : « *Précontraindre une construction, c'est la soumettre avant application des charges à des forces additionnelles déterminant des contraintes telles que leur composition avec celles qui proviennent des charges donne en tout point des résultantes inférieures aux contraintes limites que la matière peut supporter indéfiniment sans altération* ». La figure (I. 3) montre une comparaison morphologique du principe de la technique.

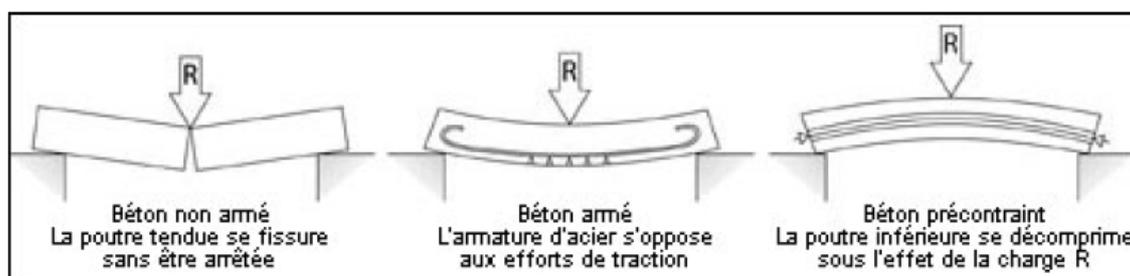


Figure I.3. Principe de la précontrainte sur des poutres soumises à la flexion [12]

La précontrainte a pour but de soumettre le béton à des contraintes préalables de compression telles qu'une fois en service, elles s'opposent aux contraintes de traction créées par les charges et maintiennent le béton en état de compression. La précontrainte peut être appliquée au béton soit par pré-tension, soit par post-tension des armatures, selon que celles-ci sont mises en tension avant le coulage du béton ou après son durcissement. Dans la pré-tension (le plus souvent utilisée), les armatures sont mises en tension avant la prise du béton. Elles sont ensuite relâchées, mettant ainsi le béton en compression, par simple effet d'adhérence.

I.2.2.3 Les bétons de fibres

Le béton de fibres est un béton dans lequel sont incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. Comme pour le béton armé, les fibres renforcent le béton. Il permet une plus grande rapidité et une plus grande facilité de mise en œuvre du fait de la suppression de la mise en place du ferrailage et une limitation de la fissuration grâce au grand nombre de fibres dispersées dans le béton. Pour réduire le coût et assurer un comportement relativement plus ductile pour des éléments en béton armé renforcé, l'addition des fibres pourrait être considérée comme solution de rechange. De façon générale, ces bétons présentent : Une meilleure résistance à la traction ; Une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure,

abrasion...); Une bonne maîtrise de la fissuration et une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, bi-ondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les caractéristiques et les propriétés spécifiques de chaque famille de fibres sont données dans le Tableau (I.1). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m³ de béton. La figure (I.4) illustre un béton de fibre à l'état frais et à l'état durcis respectivement.

Tableau I.1: Caractéristiques typiques des fibres utilisées pour les BAF [13, 14].

Nature de fibres	Masse volumique (g/cm ³)	Diamètre moyen (µm)	Résistance à la traction (Pa)	Module d'élasticité (Gpa)	All à la rupture (%)
fibres métalliques	7.85	50 – 1000	1000 – 2500	150 – 200	3 – 4
fibres de verre	2.6	9 – 15	2000 – 3000	80	2 – 3.5
fibres PP	0.9	≥ 4	500 – 750	5 – 10	10 – 20

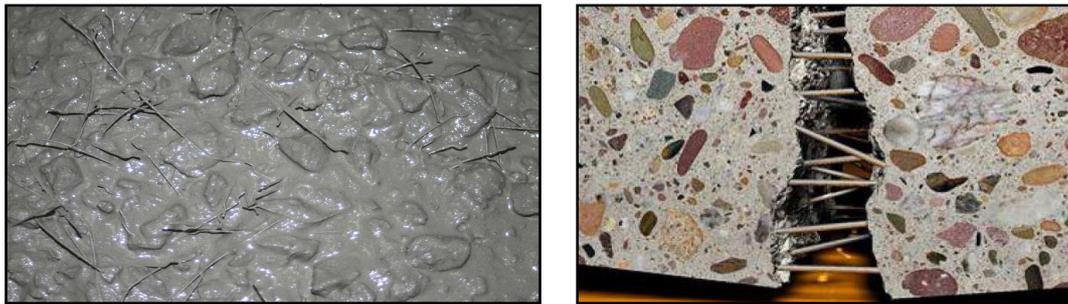


Figure I.4. Béton de fibres à l'état frais et à l'état durci [15]

On distingue trois grandes familles de fibres.

- **Les fibres de polypropylène :** Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton. Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post fissuration (contrairement aux fibres métalliques).
- **Les fibres métalliques :** Les fibres métalliques, notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton. Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton à savoir : les fibres ondulées, les crantées, les torsadées-droites ; les fils rubans et les fibres à extrémités aplaties, à crochets.

Les bétons de fibres métalliques ont une bonne résistance à la traction et à la flexion. Ils sont utilisés dans les dallages et les sols industriels (sur sol ou sur pieux), pour la fabrication de

voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement en béton).

- **Les fibres de verre** : Les fibres de verre sont des renforts très efficaces, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par, l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire).

Les bétons de fibres peuvent être utilisés pour une grande variété d'application en bâtiment et en génie civil : béton coulé en place (dalles, planchers, voiles, etc.) ; béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement) ; béton projeté (voie mouillée/voie sèche). Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

I.2.2.4 Les bétons composites légers

Les bétons légers permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage. Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique, la conductivité variant dans le même sens que la densité. Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés (des billes de schiste expansé, d'argile expansée ou de polystyrène, voire des particules de liège ou de bois remplacent les gravillons habituels). Des adjuvants comme les entraîneurs d'air peuvent aussi être ajoutés pour un allègement maximum. On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux : c'est le cas du béton cellulaire.

Les bétons légers offrent une densité très inférieure à celle d'un produit classique : de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. La résistance d'un béton léger est très inférieure à celle d'un béton traditionnel. Pour les densités les plus basses, il ne peut être question de béton "structurel" mais seulement de béton de "remplissage". Ces bétons légers possèdent un pouvoir isolant sur le plan thermique et acoustique. Les inconvénients du béton composite sont moins nombreux mais doivent être connus. Tout d'abord, la pose d'un béton composite nécessite obligatoirement l'appel à un professionnel. Ensuite, il est à noter une certaine sensibilité à l'usure, qui peut détériorer son esthétique. Aussi, une protection supplémentaire est nécessaire.

- **Les micros béton** : Le micro béton, qui est un matériau composite dont le liant est constitué entièrement d'un polymère organique synthétique, commence à prendre place dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion. Désigné sous l'appellation de béton de résine synthétique, de béton de résine plastique ou de béton de polymère, il est ainsi constitué d'une charge minérale (granulat) et d'un liant de polymère, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable [16, 17]. Lorsque la charge est du sable, le composite obtenu est appelé mortier de résine (Voir figure I.5).



Figure 1.5. Eprouvettes et Huban de pont confectionnés à base d'un béton composite [12]

I.2.2.5 Les TRC (Textile Reinforced Concrete)

Le béton textile (Textile reinforced concrete) est un micro-béton renforcé de nappes textiles constituées de fils multi-filamentaires. Ce nouveau composite permet de nouvelles applications, car il est utilisable en faible épaisseur, ce qui permet d'obtenir des éléments de poids réduit, résistant à la traction et fortement ductile (Jesse et al [18]). Les fils multi-filamentaires utilisés pour le renforcement de ces bétons sont constitués d'un assemblage de filaments micrométriques indépendants, ce qui confère à ces renforts des propriétés particulières à des renforts traditionnels. Le tableau (I.2) récapitule les propriétés mécaniques des différents filaments utilisés dans la confection des bétons renforcés par textile :

Tableau I.2: Propriétés mécaniques et physiques des fils multi-filamentaires

Filaments	Densité (g/cm ³)	Diamètre moyen (µm)	Resistance à la traction (Gpa)	Module d'élasticité (Gpa)	Allongement max e (%)
Verre AR	2.68	27	1.70	72	2.4
Carbone	1.79	7	4.00	240	1.5
Aramide	1.39	12	3.50	78.5	4.6

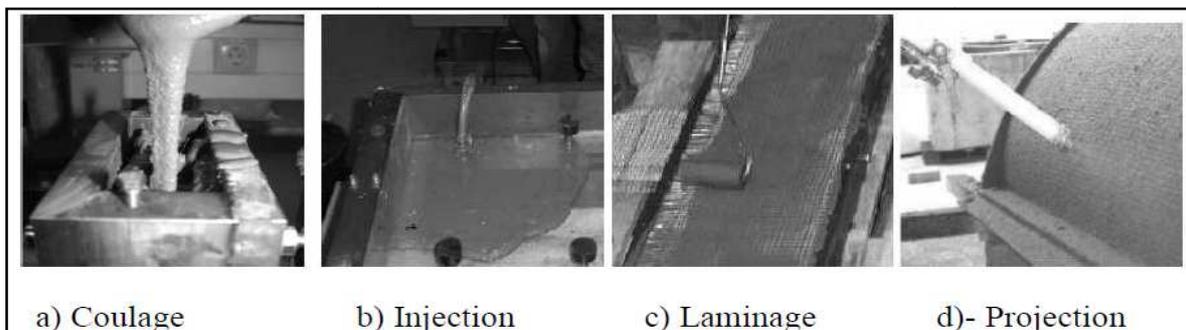


Figure 1.6. Diferentes techniques de mise en œuvre des TRC [19]

Compte tenu de la fluidité et de la finesse des granulats de la matrice cimentaire, le processus de fabrication des TRC permet d'employer une grande gamme de technique de mise en œuvre que les produits classiques en béton (Voir Figure I.6). Ainsi, en plus du coulage classique de la matrice dans le coffrage, l'injection du mélange sous pression ou la projection sous pression peuvent être efficaces. Parfois, pour faciliter la pénétration de la matrice dans le renfort et afin d'obtenir une surface extérieure lisse et très perméable, un laminage au rouleau est aussi employé.

I.2.2 Les matériaux composites

Depuis une dizaine d'année, l'utilisation des matériaux composites a connu un essor important que soit dans l'industrie mécanique, dans l'aéronautique et surtout dans la construction civile. Ces matériaux sont susceptibles de substituer l'acier, en vu de leurs avantages qu'ils présentent à savoir : la résistance, la légèreté et l'insensibilité à la corrosion. Les matériaux composites à base de fibres sont une solution très attractive pour répondre au besoin de renforcement et de réhabilitation des constructions en béton armé. De plus, malgré leurs prix élevés, ils présentent un avantage économique, car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact ou par stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement le poids propre des structures et leurs coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions de trafic. Cette section permet tout d'abord de comprendre le principe, les types et comportement typique des matériaux composites utilisés dans la construction.

I.2.3.1 Définitions et Propriétés

Un matériau composite est une combinaison de deux ou plusieurs matériaux distincts à l'échelle macroscopique, dans le but de produire un matériau possédant des propriétés meilleures que celles de ses constituants pris séparément. En effet, un matériau composite est constitué de deux phases inertes : la matrice et le renfort, lequel se présente le plus souvent sous forme de fibres. La matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, sert de milieu de transfert des efforts vers les fibres ; (Voir figure I.7)

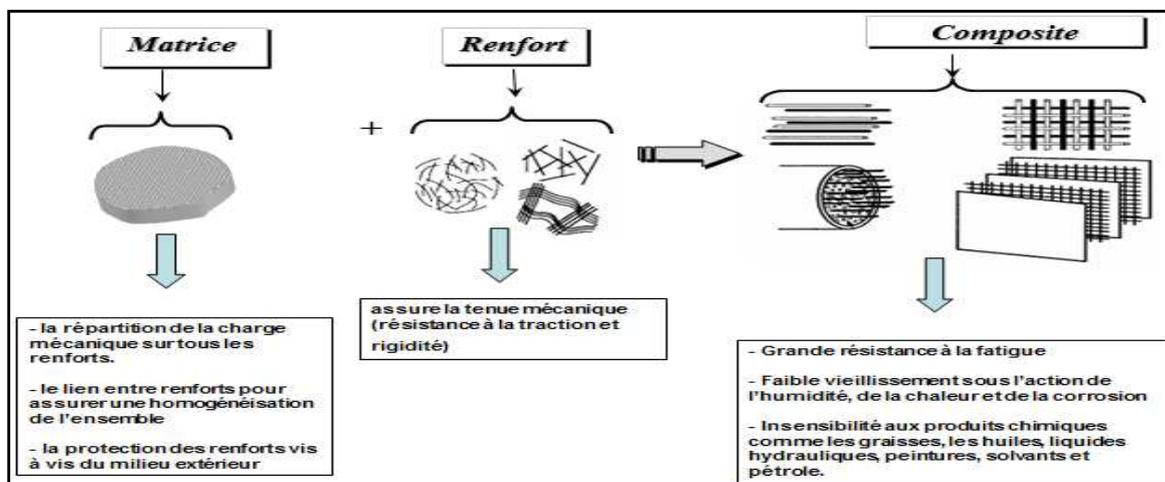


Figure I.7. Différents constituants d'un matériau composite [20]

Les matériaux composites à base de fibres (Fibre Reinforced Polymer FRP) sont composés d'un renfort noyé dans une matrice. Dans le domaine du génie civil, les composites unidirectionnels (toutes les fibres sont orientées dans la même direction) sont les plus courants. Le comportement mécanique des matériaux composites dépend de plusieurs facteurs principaux : le type de fibres, le type de matrice et leur fraction volumique respective.

I.2.3.2 Les fibres

Une fibre est un ensemble de filaments élémentaires dont le diamètre varie entre 5 et 25 μm selon la nature de la fibre. Il y a principalement trois types de fibres appliqués dans le secteur du bâtiment : les fibres Aramides, les fibres de verre et les fibres de carbone. Les fibres supportent la majorité des contraintes mécaniques et assurent la résistance et la rigidité du composite. Elles travaillent essentiellement en traction et se trouvent sous forme de mèches, de tissus ou de mats. Les fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : Linéiques (fils, mèches), Tissus surfaciques (tissus, mats), et Tissus tridimensionnels (3D) (Voir Figure I.8).

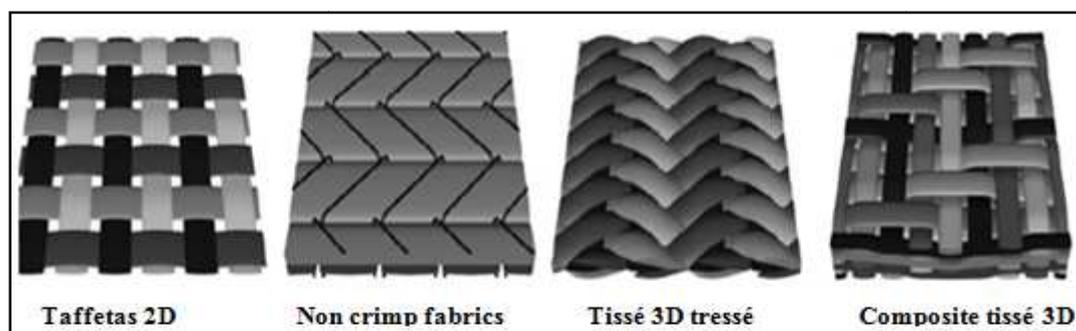


Figure I.8. Différents formes des matériaux composites [20]

- **Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)**: Les fibres de verre ont un excellent rapport performance – prix, qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Ces dernières présentent un module de traction faible, mais une résistance en traction intéressante. Elles sont constituées de silicate de diamètre de 10 μm et considérées comme des matériaux orthotropes.
- **Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)**: Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. La qualité finale des fibres de carbone dépend fortement des qualités du précurseur. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole, est utilisé pour produire des fibres de carbone.
- **Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP)**: Les fibres aramides, dont la plus connue est le kevlar, ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les fibres de carbone, mais leurs résistances à la compression sont faibles. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice. Les propriétés mécaniques et physiques respectives des différentes fibres sont rapportées dans le Tableau (I.3).

Tableau I.3: Propriétés mécaniques et physiques des composites à base de fibres [20]

Type de fibre	Densité	Diamètre (µm)	R/la traction (Gpa)	Mod D'éla (Mpa)	All max (%)	T de fusion (°C)
Verre E	2.54	3 – 30	3400	73000	4.5	850
Verre D	2.14	3 – 30	2500	55000	4.5	-
Verre R	2.48	3 – 30	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	1.78	8	3500	200 000	1	2 500
Carbone HM	1.8	8	2200	400 000	0.5	2 500
Aramide HR	1.45	12	3100	70 000	4	480
Aramide HM	1.45	12	3100	130 000	2	480

I.2.3.3 Les matrices et adhésifs

Les matrices sont des matériaux isotropes, leur utilisation dans les composites permet de coller les fibres entre elles et de leur transférer les efforts. De plus, la matrice joue un rôle très important pour résister aux efforts tranchants, aux forces transversales et aux forces de compression. Par ailleurs, la matrice protège les fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques. Les matrices les plus utilisées dans les composites sont les résines thermodurcissables : le polyester, le vinylester, l'époxy et le phénolique. Par conséquent, on distingue deux familles : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques. Généralement, la matrice utilisée dans l'élaboration d'un matériau composite est une résine polymère.

- **Matrices thermodurcissables :** Les matrices thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces dernières ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables.

- **Matrices thermoplastiques :** Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau (I.4).

- **Matrices métalliques et céramiques :** Ce sont des matrices à hautes températures, cette matrice ne peut être associée qu'à des fibres réfractaires de type SiC ou des fibres de carbone. Le coût de fabrication de ces matériaux est très onéreux. Un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface.

Tableau I.4. Caractéristiques des résines thermodurcissables [21]

Résines	T°(C)	ρ (Kg/m ³)	ε_f^R (%)	σ_f^R (Mpa)	E (Gpa)
Polyesters	60 à 100	1120	2 à 5	50 à 85	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1140	2,5	40	3 à 5
Epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	3 à 5
Polyamide	65 à 100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5	/
Polypropylène	900	1200	20 à 25	1,1 à 1,4	/

I.2.3.4 Comportement mécanique des composites

Dans les matériaux composites, les fibres reprennent principalement des efforts dans leur direction. La matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège. Selon un bulletin de la Fédération Internationale de Béton (FIB bulletin 14, 2001[21]), les propriétés mécaniques des matériaux composites sont données par les relations suivantes :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{I.1})$$

$$R_c = R_f V_f + R_m V_m \quad (\text{I.2})$$

Où E_c est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres, E_f le module d'Young des fibres, E_m le module d'Young de la matrice, V_f la fraction volumique de fibres, V_m la fraction volumique de la matrice, R_c , R_f et R_m sont la résistance en traction du matériau composite, des fibres et de la matrice respectivement.

La fraction volumique typique des fibres est de l'ordre de 0,6 – 0,65. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice. Le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique). Ils possèdent un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture. Les lois de comportement des fibres sont donc de type "élastique - fragile".

La figure (I.9) montre la réponse globale des différents composites sous chargement de traction directe comparativement à celui des aciers classiques. Plusieurs facteurs déterminent les propriétés des matériaux composites, comme la concentration du renfort, sa distribution dans le volume du composite pour une concentration donnée et la nature de l'interface matrice-renfort. Les caractéristiques élastiques d'un composite unidirectionnel peuvent être estimées à partir des caractéristiques de ses constituants [2].

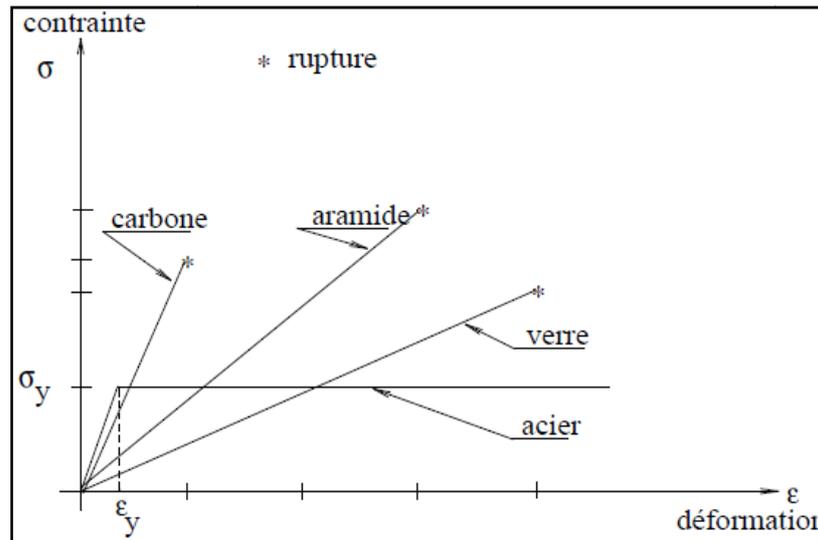


Figure 1.9. Confrontation du comportement des composites et de l'acier [22]

I.2.3 Les polymères

Les polymères sont devenus des éléments essentiels d'un nombre très important d'objets de la vie courante, dans lesquels, ils ont souvent remplacés les substances naturelles. Ils sont présents dans de nombreux domaines industriels. Ce sont des matériaux « légers », ils ont une masse volumique faible (en général inférieure à $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, soit une densité par rapport à l'eau inférieure à 1,5 ; ils sont en général souples. D'un point de vue chimique, un polymère est une substance composée de macromolécules.

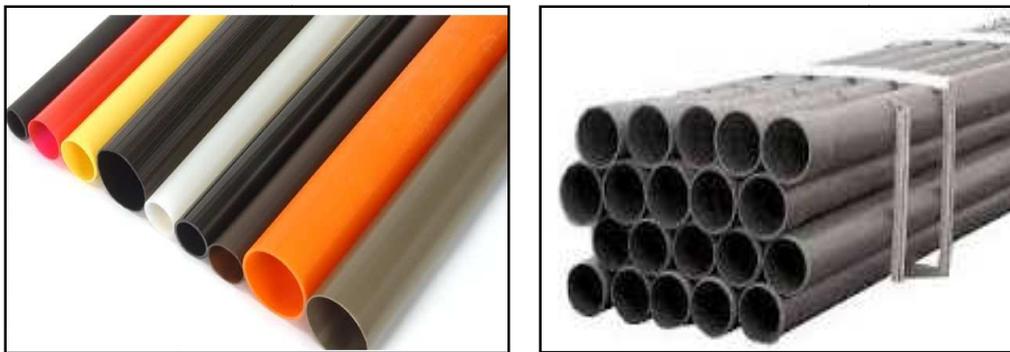


Figure 1.10. Tubes en Polymère sous forme cylindriques [23]

Les polymères sont très utilisés pour les matrices des matériaux composites. La plupart des polymères se ramollissent ou fondent à des températures comprises entre 100 °C et 250 °C ; (Voir Figure I.10).

I.2.4.1 Procédés de mise en œuvre et classification

Les polymères sont classés selon deux grandes classes en fonction de la mise en œuvre et la microstructure :

- **Les polymères thermoplastiques** : ils sont solubles dans leurs solvants respectifs. Le plus souvent, ils sont constitués par un réseau mono dimensionnel ou des chaînes faiblement ramifiées. On peut les mettre en forme par injection ou par extrusion au-delà de leur température de fusion. Ils possèdent la mémoire de cette forme après déformation plastique. Ils sont a priori recyclables.
- **Les polymères thermodurcissables** : ils sont insolubles, infusibles. Différemment des polymères thermoplastiques, ils durcissent en subissant une transformation chimique irréversible. On peut définir une température, au-delà de laquelle ils sont chimiquement dégradés. Une fois mis en œuvre, la forme moulée est définitive. Ils ne sont donc pas recyclables.
- **Les polymères amorphes** : ils sont transparents. En dessous de leur température de transition vitreuse (ramollissement) ils sont à l'état vitreux et l'on parle de verres organiques. Ils sont généralement peu résistant à la rupture. L'adjonction de particules d'élastomère permet de les rendre plus ductiles. Les chaînes macromoléculaires peuvent être orientées au cours de la mise en œuvre, ce qui leur confère des propriétés anisotropes.
- **Les polymères semi-cristallins** : ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe et en conséquence la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes.

Les polymères sont des matériaux très économique (entre 0,5 € /kg et 1,25 €/kg) et ne demande pas un entretien régulier. Ils présentent une excellente tenue dans le temps, aucun effet de pourrissement, de corrosion. Enfin, c'est des matériaux légers. En effet leurs masses volumiques sont faibles : entre 1 et 2 g/cm³.

I.2.4.2 Propriétés et structures chimiques

Généralement, les polymères sont peu affectés par les solutions salines, les acides faiblement dosés jusqu'à une température de 60°C. En revanche, ils sont pour la plupart sensibles aux solvants organiques. Compte-tenu de la diversité des polymères, il faut toujours spécifier au fabricant les conditions d'utilisation de son produit et l'associer au choix du meilleur produit ou compromis. Le tableau (I.5) résume la composition chimique des différents polymères.

Tableau I.5. Caractéristiques chimiques des polymères [23]

Structures	Nom dérivé du précurseur	Nom systématique
$-(CH_2)_n-$	Polythène/ polyéthylène	Poly (méthylène)
$-(CHCl_2 - CH_2)_n-$	Poly chlorure de vinyle	Poly (1-chloro- éthylène)
$-(CH(C_6H_5) - CH_2)_n-$	Polystyrène	Poly (1-phényléthylène)
$-(O - CH_2 - CH_2)_n-$	Poly oxyde d'éthylène	Poly (oxyéthylène)
$-(O - CH_2)_n-$	Poly formaldéhyde	Poly (oxyméthylène)
$-(CHOH - CH_2)_n-$	Poly alcool vinylique	Poly (1-hydroxyéthylène)

I.2.4.3 Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés mécaniques des polymères se situent entre celles des céramiques (matériaux les plus fragiles) et celles des métaux connus pour leurs bonnes performances mécaniques. Les polymères thermodurcissables ont un comportement mécanique semblable aux polymères thermoplastiques. Cependant, à moins de n'être que très faiblement réticulés, ils ne subissent pas de fort ramollissement lorsque la température augmente. Les propriétés mécaniques ne seront significativement affectées aux hautes températures que par la dégradation chimique du réseau macromoléculaire.

Le tableau suivant indique les valeurs courantes des propriétés physiques des polymères les plus usuels. Les valeurs données dans ce tableau ont un caractère indicatif. En effet, les propriétés peuvent être très variables pour certains polymères.

Tableau I.6. Caractéristiques physiques et mécaniques des polymères [24]

Polymères	Densité (kg/m ³)	Module d'Young (Mpa)	Allong à la rupture (%)	Coeff de dilatation therm (K ⁻¹)	Temp de transition (°C)	Temp de fusion (°C)
PVC Souple	1160 – 1350	≤ 1000	200 - 500	7. 10 ⁻⁵	(-10) – (-40)	≤ 130
PVC Rigide	1400	2000 – 3000	20 - 70	7. 10 ⁻⁵	80	≤ 150
PE-BH	920	200	500	2. 10 ⁻⁴	(-110)	115
PE-HD	950	1000	≤ 50	1 - 2. 10 ⁻⁴	(-110)	130
PP	900	1000 - 2000	≤ 20	1 - 2. 10 ⁻⁴	(-20)	165
P-isoprène	950	/	100 - 800	2. 10 ⁻⁴	(-50)	/
Silicone	1000 – 1600	Variable	/	1.7 - 3.5 10 ⁻⁴	/	≤ 150

I.3. Application des composites en génie civil

La technologie du renforcement, réparation et confinement des éléments structuraux porteurs par les polymères renforcés de fibres est l'une des techniques les plus prometteuses pour améliorer la résistance, la rigidité et la ductilité. Son application est relativement simple, très peu dérangeante pour les utilisateurs des ouvrages renforcés et peu exigeante en main-d'œuvre. Les caractéristiques non corrosives de la matrice et des fibres et leurs résistances à la plupart des substances chimiques donnent à ce système de renforcement, une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux conventionnels, tels que l'acier, c'est à dire une valeur plus économique à long terme. D'une manière générale, les matériaux composites «PRF» présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé, tels que : les poutres, les poteaux, les dalles et les ouvrages d'art. Cette partie traitera principalement les différentes applications des matériaux composites dans le génie civil.

I.3.1 Réparation des fissures

Il existe de nombreuses méthodes de réparation des fissures à l'aide de résines et des matériaux composites, en général. Certaines méthodes sont spécifiquement conçues pour réparer des fissures actives, tandis que d'autres sont mieux adaptées pour réparer des fissures stables. Certaines méthodes permettent de restaurer la capacité portante de l'élément (améliorer la résistance mécanique), alors qu'il existe aussi des méthodes qui permettent de rétablir l'étanchéité de la structure (améliorer l'apparence).

Avant de choisir la technique de réparation, il est nécessaire d'utiliser les informations recueillies pendant la visite in situ de l'ouvrage, afin de vérifier l'intégrité structurale de l'ouvrage, la présence de fuites par des fissures, le type de fissure (isolées ou en réseau) et l'activité de celles-ci (actives ou stables) [25].

I.3.2 Renforcement des poutres par collage de plaques

Les matériaux composites utilisés pour le renforcement des poutres en béton armé se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Les différentes études montrent que les résistances obtenues avec ce type de renforcement sont plus importantes que les résistances obtenues avec un renforcement par des tôles en acier. Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion et l'étanchéité.

Le renforcement vis à vis de la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «PRF» sur le support de la poutre concernée. La Figure (I-11) présente les différentes techniques de renforcement des poutres en béton armé par collage de matériaux composites.

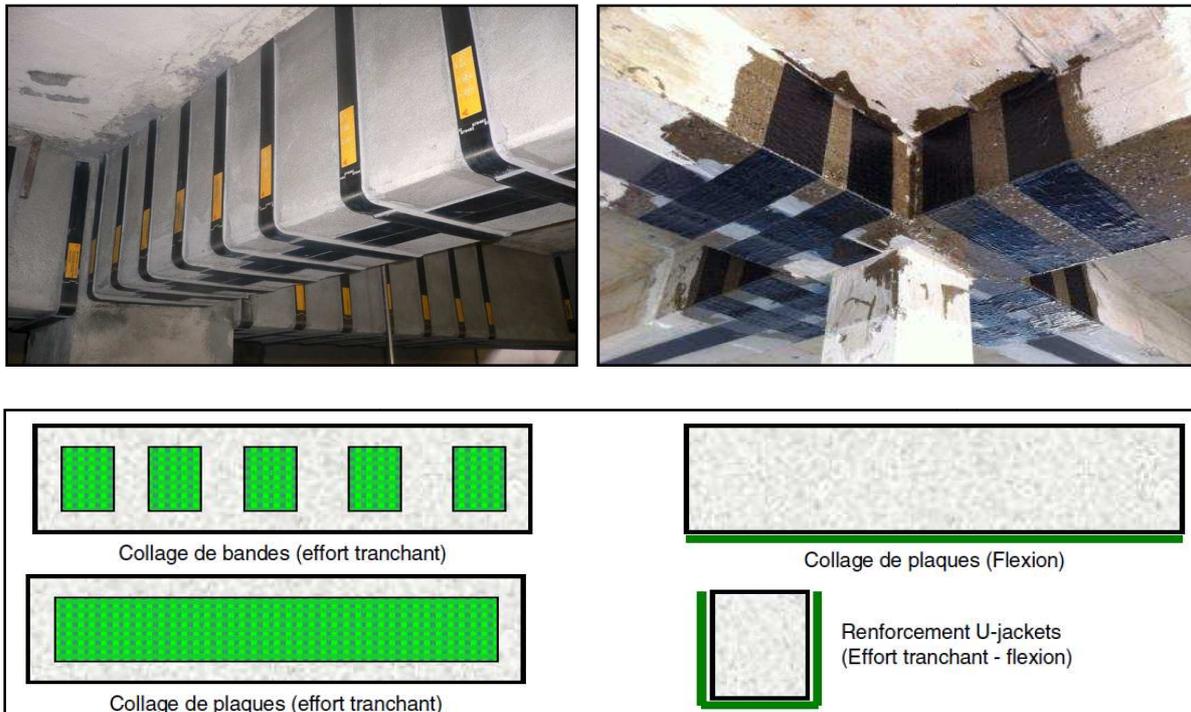


Figure I.11. Différentes techniques de renforcement des poutres en béton armé [26]

Avant l'application de la lamelle «PRF», le support doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton pour améliorer la liaison avec le «PRF» et de fournir une surface uniforme (Teng et al. 2002 [27]). Les plaques «PRF» peuvent être préfabriquées, dans ce cas, quelques préparations de la surface de liaison de cette dernière peuvent être nécessaires. D'autre part, la plaque «PRF» peut être construite sur place par un procédé de stratification direct. Plusieurs procédés existent dans la littérature : la précontrainte de la plaque, et la prévision d'ancrages tel que les bandes en U aux fins de la plaque pour réduire le risque des ruptures par décollement (Arduini et 1997 [28]) ; comme le montre la Figure (I.11).

I.3.3 Renforcement des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion des dalles en béton armé. La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «PRF» consiste à coller des bandes ou des lamelles «PRF» sur la sous- face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens, on utilise des lamelles croisées (Figure I.12), ou bien des «PRF» avec des fibres dans les deux directions. D'autre part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré dans la région centrale ou dans la région des moments maximaux, selon les besoins de renforcement, mais dans ce cas, les bandes/lamelles de «PRF» sont terminées loin des bords de la dalle.



Figure I.12. Renforcement des dalles en béton par des bandes en CFRP [29]

I.3.4 Confinement des colonnes :

Plusieurs techniques de confinement des colonnes ont été développées pour renforcer ou réhabiliter des colonnes existantes en béton en utilisant des composites «PRF». Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «PRF» avec une ou plusieurs couches. Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des bandes «PRF» sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets.

Les colonnes peuvent être renforcées vis-à-vis des efforts axiaux, en les enveloppant par des PRF collés, les fibres étant orientées selon la direction circonférentielle (Figure I-13). Sous l'effet d'un effort axial de compression, la colonne se dilate et fait travailler le composite en traction. Ce dernier développe un effet de confinement qui maintient le béton dans un état de contrainte triaxial. Le confinement augmente significativement la résistance et la ductilité de

la colonne. Il existe principalement deux méthodes pour la mise en œuvre des renforts composites et leur installation sur ouvrage :

- la première technique consiste à imprégner des tissus de fibres souples au moyen d'une résine époxy liquide et à les placer ensuite sur la structure à renforcer. Il s'agit d'une stratification au contact, dans laquelle la résine joue à la fois le rôle de matrice du composite, et celui d'adhésif assurant la liaison entre le composite et le substrat béton.
- la seconde méthode consiste à utiliser des lamelles stratifiées rigides fabriquées en usine par le procédé de pultrusion (ce sont en général des composites carbone/époxy). Ces lamelles sont collées sur la surface en béton au moyen d'un adhésif époxy de consistance pâteuse et polymérisable à température ambiante.



Figure I.13. Confinement des colonnes (cylindrique et carré) par des composites [30]

Les enveloppes de matériaux composites appliquées aux colonnes augmentent la résistance par la mobilisation de la pression latérale de confinement du béton. Jusqu'à ce jour, les expériences conduites par plusieurs chercheurs ont démontré une augmentation significative en ductilité et en résistance. Les bénéfices du confinement sont multiples à savoir :

- **L'augmentation de la ductilité** : En raison du confinement, le béton se rompt à un plus haut niveau de déformation qu'un béton non confiné; selon le degré de confinement, la déformation à la rupture du béton peut être augmentée plusieurs fois.
- **L'augmentation de la résistance** : la pression latérale exercée par l'enveloppe de composites augmente la résistance en compression du béton ; la capacité axiale et latérale de la colonne est, par conséquent, plus élevée.
- **Liberté de forme et légèreté** : la flexibilité des composites permet d'envelopper les colonnes de différentes géométries, leur faible densité simplifie la mise en œuvre.
- **L'esthétique** : l'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes.
- **La durabilité** : les fibres résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel-dégel et à l'humidité.

Enfin, la Figure I.14 présente différentes configurations de collage de matériaux composites sur les éléments de structures, chaque configuration est prévue pour un objectif particulier.

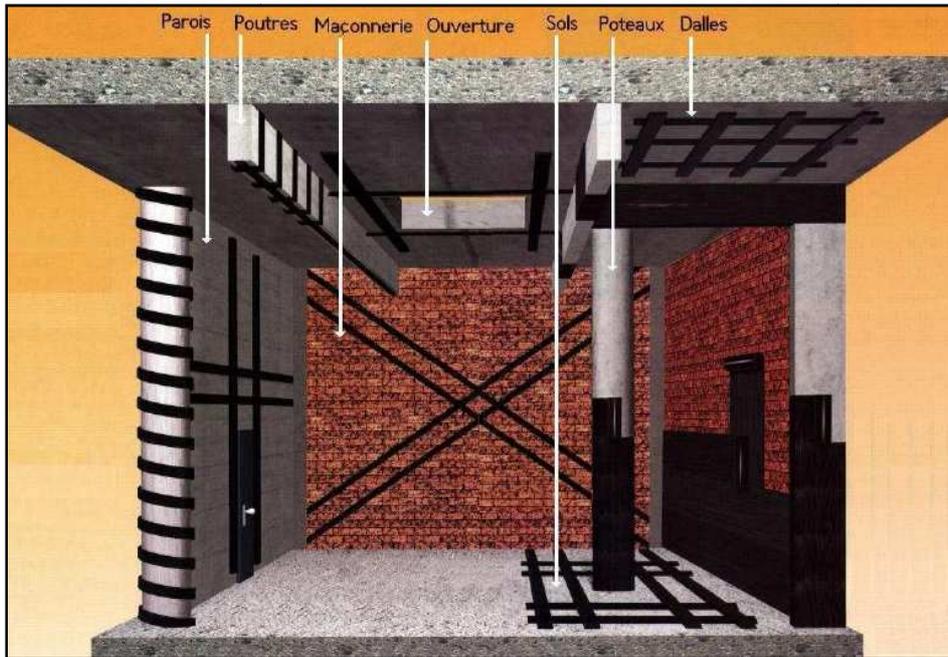


Figure I.14. Différentes techniques de renforcement des éléments en béton [30]

I.3.5 Confortement des ouvrages d'art

Certaines propriétés des matériaux composites ont conduit le secteur du bâtiment à les considérer pour le renforcement des ouvrages d'art. Il est intéressant de pouvoir remplacer le renforcement traditionnel par des matériaux composites relativement inertes à l'oxydation. Confrontés au problème du vieillissement des infrastructures et à l'augmentation du trafic routier, les ingénieurs en génie civil ont pris conscience du potentiel des matériaux composites pour les applications structurales et le renforcement des ouvrages d'art vers la fin des années 90 (Voir Figure I.15).



Figure I.15. Renforcement des poutres et culées de pont [31, 32]

Le renforcement d'un pont par collage externe de matériaux composites, a été utilisé à partir des années 2000. Les remarquables performances mécaniques, la résistance à la corrosion, la légèreté et la grande facilité de mise en œuvre sur chantier constituent les principaux atouts des composites par rapport aux matériaux traditionnels.

I.4. Conclusion

Dans cette partie de l'étude bibliographique, nous avons passé en revue les points susceptibles inhérents aux matériaux utilisés dans la présente étude, à savoir le béton, les composites et les polymères. En premier temps, nous avons présenté les principaux constituants de ces matériaux, ainsi que les procédés de leurs mises en forme. Par la suite, nous nous sommes consacrés à la présentation de leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques ainsi que leurs lois de comportements respectives sous différent type de chargement. L'analyse de cette recherche bibliographique nous a permis de lister les différentes pathologies du béton, et son processus de dégradation d'ordre mécanique et physique.

Une synthèse bibliographique sur les différentes applications des matériaux composites et polymères dans les domaines de bâtiments et des ouvrages d'art est également présentée. D'après les différentes études sur la réparation, le renforcement et le confinement des structures en béton armé sollicitées en flexion, par collage de matériau composite, les chercheurs ont constaté que la capacité portante et la rigidité de la structure renforcée augmentent sensiblement.

En conclusion, cette recherche bibliographique nous a permis d'orienter notre travail de recherche vers une proposition d'un nouveau procédé de conception de poutre entièrement en béton composite, constituée de béton et de tube en polymère enveloppé et renforcé par un tissu en fibre de verre. L'objectif est de réduire le poids propre de la structure et d'améliorer ces performances mécaniques.

L'objectif assigné dans la deuxième partie de ce chapitre est de présenter une revue détaillée des concepts fondamentaux relatifs aux approches probabilistes, notamment, la méthode de simulation de Monté Carlo, la méthode FORM et leurs applications dans le domaine du génie civil, dans le but d'optimiser notre conception et d'évaluer ses paramètres conceptuels.

Partie - B - : Analyse statistique et fiabilité des structures composites

I.5. Introduction

La prise en compte des incertitudes dans les analyses mécaniques est nécessaire pour un dimensionnement optimal et robuste des structures. C'est avec cet objectif, que des approches statistiques et probabilistes pour la mécanique des structures sont développées depuis plusieurs décennies [33-37]. Ces méthodes permettent d'étudier d'une part l'influence de la variabilité des paramètres sur le comportement du système, et d'autre part la fiabilité des composants. Les modèles mécaniques sont souvent complexes (comportement non-linéaire, dynamique, fatigue, mécanique de la rupture) nécessitant pour leurs résolutions, l'utilisation des méthodes numériques. Cette complexité qui requiert un effort supplémentaire sur les ressources informatiques est prise en compte par les méthodes de couplage mécano-fiabiliste. En effet, les méthodes de couplage nécessitent un appel au calcul déterministe du modèle mécanique pour des tirages judicieux de variables aléatoires. Ce nombre d'appels augmente généralement avec le nombre de variables aléatoires, ainsi le temps de calcul devient rapidement prohibitif par les méthodes traditionnelles.

A cet effet, nous présentons tout d'abord la modélisation et l'évaluation statistique des différents paramètres de base des structures composites, à savoir les grandeurs statistiques comme la moyenne ou la variance (estimateurs, intervalles de confiance). Ensuite, on présente la démarche fiabiliste pour l'étude de problèmes mécaniques : ses objectifs, ses produits et les différentes étapes de sa mise en place. Les concepts fondamentaux relatifs aux approches probabilistes, notamment, la méthode de simulation FORM/SORM et leurs applications dans le domaine du génie civil sont brièvement expliqués à la fin de ce chapitre, qui met en évidence les difficultés de mise en œuvre d'une approche couplant la mécanique et les statistiques.

I.6. Notions de Statistique

Aussi loin que l'on remonte dans le temps et dans l'espace. Les scientifiques ont toujours senti le besoin de disposer d'informations sur leurs sujets. Etant donné que les résultats des calculs sont toujours affectés d'incertitudes, les statisticiens ont développé un cadre d'analyse qui permet de prendre de telles décisions. Les statistiques sont restées purement descriptives jusqu'au 17^{ème} siècle [38], puis s'est développé le calcul des probabilités. Des méthodes statistiques différentielles sont apparues. Beaucoup de scientifiques de tout ordre ont apporté leur contribution au développement de cette science à savoir : Pascal, Bernoulli, Laplace, Gauss, Mendel, Pearson, Fischer... [39-43].

I.6.1 Définition et démarche

La statistique est l'ensemble des méthodes scientifiques à partir desquelles on récolte, organise, résume, présente et on analyse des données qui permettent d'en tirer les conclusions et enfin, de prendre des décisions judicieuses. En d'autre terme, la statistique c'est l'étude des

variations observables, elle consiste à réunir des données chiffrées sur des ensembles nombreux, puis à les analyser et à les interpréter. La démarche d'une étude statistique se résume en les étapes suivantes :

- **Collection des données** : soit de manière exhaustive à partir des mesures, soit par sondage ;
- **Traitement des données** : que l'on organise en tableaux et diagrammes, en fonction de la nature et le nombre de variables étudiées.
- **Interprétation des résultats** : avec une confrontation avec ceux déduits de la théorie des probabilités.

Les statistiques en général nous permettent : d'évaluer une grandeur statistique comme la moyenne ou la variance (estimateurs, intervalles de confiance), de savoir si des populations sont comparables (tests d'hypothèse) et de déterminer les relations existantes entre plusieurs grandeurs (corrélation, ajustement analytique).

I.6.2 Statistique descriptive

La statistique descriptive regroupe les nombreuses techniques utilisées pour décrire un ensemble relativement important de données (Echantillon). Elle s'intéresse également au bien-fondé des conclusions d'une analyse.

I.6.2.1 Variable aléatoire

Etant R l'univers des possibles, supposé fini et associé à une épreuve aléatoire. Toute application associée : $\Omega \times \Omega \longrightarrow \mathbb{R}$ est appelée variable aléatoire sur R . L'image de R par X , est dite image de X (R) aussi appelée univers-image.

Si A est une partie de \mathbb{R} , on appelle événement associé à A , la partie de R constituée des antécédents par X des éléments de A .

I.6.2.2 Paramètres statistiques

- **Les Paramètres de position** : Les paramètres de position (ou de tendance centrale) permettent de savoir autour de quelles valeurs se situent les valeurs d'une variable statistique. Les paramètres de position, aussi appelés valeurs centrales, servent à caractériser l'ordre de grandeur des données.
- **Les paramètres de dispersion** : Ils donnent des informations sur la répartition des valeurs autour de la valeur centrale de référence. Les différentes mesures principales des paramètres statistiques d'une variable aléatoire continue sont données dans le tableau (I.7).
- **Les Paramètres de forme** : Les logiciels de statistiques fournissent généralement les paramètres Skewness et Kurtosis [35] construits à partir des moments centrés, qui mesurent respectivement la symétrie et l'aplatissement de la distribution dont l'échantillon est issu.

Tableau I.7. Tableau de mesure des paramètres statistiques principaux.

Dénotation	Relation mathématique
Moyenne arithmétique	$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N}$
Moyenne harmonique	$\bar{X}_h = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{X_j}}$
Moyenne géométrique	$\bar{X}_g = \sqrt[N]{X_1, X_2, \dots, X_N}$
Moyenne quadratique	$\bar{X}_q = \sqrt{X^2} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N X_j^2}{N}}$
Dispersion et Variabilité : L'écart moyen	$EM = \frac{\sum_{j=1}^N X_j - \bar{X} }{N} = \overline{ X_j - \bar{X} }$
L'écart type	$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}}$
Le coefficient de variation	$CV = \sqrt{\frac{S^2}{\bar{X}}}$
Le coefficient de corrélation	$R = \frac{\text{cov}(x, y)}{s_x s_y}$

I.6.3 Statistique inférentielle

La description des incertitudes en statistique se fait à l'aide des variables qui sont des colonnes de valeurs numériques. On se pose souvent la question de comparer ces variables, de tester, si elles sont égales ou différentes, de savoir si on peut considérer qu'elles correspondent ou non à une même population, si elles correspondent à une distribution donnée, si elles sont conformes à un modèle précis. Etant donné qu'on ne peut jamais être sûr que le résultat des calculs, les statisticiens ont développé le cadre d'analyse des statistiques inférentielles qui servent à étendre à la population les résultats obtenus sur l'échantillon.

I.6.3.1 Estimation et intervalle de confiance

L'estimation statistique consiste à tirer des conclusions, à partir des données sur l'ensemble de la population, à travers les résultats obtenus sur un échantillon. Alors une hypothèse raisonnable est admise pour postuler ce qui suit: il existe une loi de probabilité sous-jacente telle que, les valeurs observables des différents éléments de la population étudiée puissent être considérées comme des variables aléatoires indépendantes ayant cette loi. Un aspect important de l'inférence statistique consiste à obtenir des estimations fiables des caractéristiques d'une population de grande taille à partir d'un échantillon extrait de cette population. C'est un problème de décision concernant des paramètres qui, le plus souvent, sont : l'espérance mathématique, la proportion et la variance.

- **Estimation ponctuelle** : Les paramètres sont à priori inconnus, car la taille réelle de la population étant très grande, il serait trop coûteux de tester tous les éléments de la population. Ainsi, comme un échantillon ne peut donner qu'une information partielle sur la population, les estimations que l'on obtiendra seront inévitablement entachées d'erreurs. Il faudra, autant que possible, évaluer et minimiser ces erreurs.

Pour l'estimation ponctuelle, on considère : un paramètre statistique inconnu (moyenne) et un ensemble de valeurs observées (x_1, x_2, \dots, x_n) :

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{I.3})$$

Les estimations ponctuelles n'apportent pas d'information sur la précision des résultats, c'est-à-dire qu'elles ne tiennent pas compte des erreurs dues aux fluctuations d'échantillonnage. Pour évaluer la confiance que l'on peut avoir en une valeur, il est nécessaire de déterminer un intervalle contenant, avec une certaine probabilité fixée au préalable, la vraie valeur du paramètre : c'est l'estimation par intervalle de confiance.

- **Intervalle de confiance** : En mathématiques, un intervalle de confiance permet de définir une marge d'erreur entre les résultats d'un sondage et un relevé exhaustif de la population totale. Plus généralement, l'intervalle de confiance permet d'évaluer la précision de l'estimation d'un paramètre statistique sur un échantillon.

L'intervalle de confiance n'estime pas directement le paramètre, mais les estimations effectuées ont 95% de chance de contenir le paramètre, si on répète les estimations, cet intervalle pour une moyenne \bar{X} est donné par la relation (I.4) :

$$I_c = \left[\bar{x} - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (\text{I.4})$$

I.6.3.2 Tests statistiques

Les tests d'hypothèse sont une démarche consistant à rejeter ou à ne pas rejeter une hypothèse statistique, appelée hypothèse nulle, en fonction d'un échantillon donné. Il s'agit de statistiques inférentielles : à partir des calculs réalisés sur des données observées, nous émettons des conclusions sur la population, en leur rattachant des risques de se tromper.

Les tests de normalité prennent une place importante en statistiques, puisqu'ils permettent de vérifier si des données réelles suivent une loi normale. En effet, de nombreux tests supposent la normalité des distributions pour être applicables, on peut citer :

- **Test de Kolmogorov-Smirnov** : Le test de Kolmogorov est non-paramétrique, il ne place aucune contrainte sur la distribution de référence, et ne demande pas qu'elle soit connue sous forme analytique ; l'objectif du test est d'établir la plausibilité de l'hypothèse, selon laquelle l'échantillon a été prélevé dans une population ayant une distribution donnée. Pour cela, il

calcule sur l'échantillon une quantité D_n , appelée "statistique de Kolmogorov", dont la distribution est connue lorsque H_0 est vraie. La statistique D_n est définie par :

$$D_n = \left[\sup |F_n(x) - F(x)| \geq \frac{c}{\sqrt{n}} \right] \quad (\text{I.5})$$

• **Test de Shapiro-Wilk** : Ce test a été publié en 1965 par Samuel Shapiro et Martin Wilk [44]. Il teste l'hypothèse nulle selon laquelle un échantillon (x_1, x_2, \dots, x_n) est issu d'une population normalement distribuée. La statistique de test W est donnée par la relation (I.6).

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{I.6})$$

I.7. Notions de probabilité

Tandis que la statistique peut être assimilée à une analyse, parfois très précise de données et est basée sur des valeurs connues, le but de la théorie des probabilités est de modéliser au mieux les issues éventuelles d'expériences futures. Contrairement à la plupart des autres branches des mathématiques, elle repose fortement sur la notion d'incertitude et est ainsi consacrée à l'étude de phénomènes aléatoires. Les probabilités permettent d'évaluer les degrés de prévision d'événements possibles, mais non certains.

I.7.1 Loi de probabilité

Il est toujours possible d'associer à une variable aléatoire une probabilité et de définir ainsi une loi de probabilité. Lorsque le nombre d'épreuves augmente indéfiniment, les fréquences observées pour le phénomène étudié tendent vers les probabilités et les distributions observées et vers les lois de probabilité. On se propose de présenter ici les lois les plus couramment utilisées dans le contexte mécanique, à savoir la loi normale, log-normale et la loi de Weibull.

I.7.1.1 La loi normale de Laplace-Gauss

Une variable aléatoire (x) obéit à une loi normale si et seulement si sa fonction de densité de probabilité est de la forme de la relation (I.7) :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (\text{I.7})$$

On note $x \rightarrow N(\mu, \sigma)$ la fonction de répartition (voir figure I.16), s'écrit quant à elle :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{S} \right)^2 \right] du \quad (\text{I.8})$$

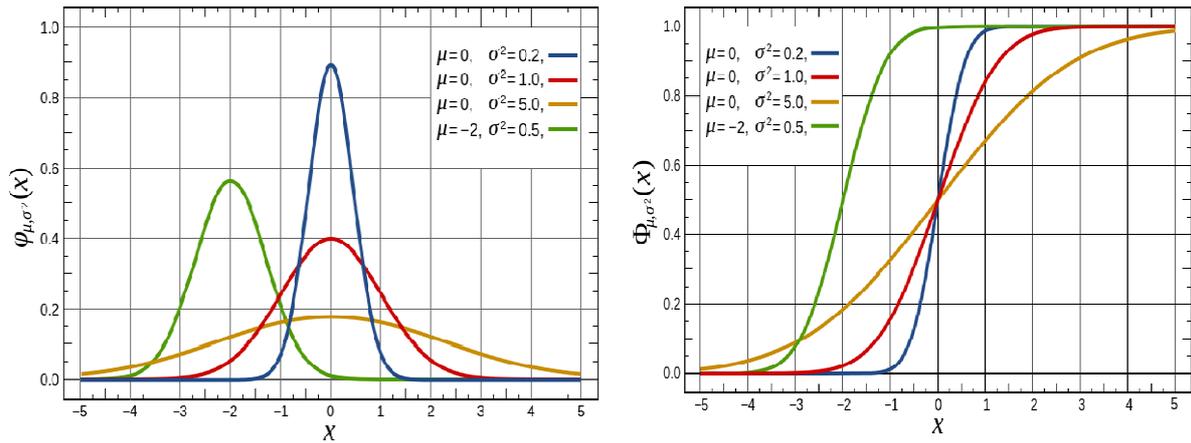


Figure I.16. La fonction de répartition et de densité normale [42]

La variable aléatoire (Z) suit alors une loi normale centrée réduite, de moyenne ($\mu_z = 0$) et d'écart-type ($\sigma_z = 1$) $Z \rightarrow N(0,1)$ (voir figure I.16b), dont les valeurs sont tabulées.

I.7.1.2 Loi de Weibull

Une variable aléatoire X obéit à une loi de Weibull si et seulement si sa fonction de densité de probabilité et la fonction de répartition s'écrivent respectivement :

$$f(x) = \frac{m(x - \lambda)^{m-1}}{\eta^m} \exp\left[-\left(\frac{x - \lambda}{\eta}\right)^m\right] \tag{I.9}$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \lambda}{\eta}\right)^m\right] \tag{I.10}$$

On note $X \rightarrow W(m, \eta, \lambda)$. Le paramètre de position γ est lié à la valeur minimale prise par la variable X puisqu'en effet $F_x(\gamma) = P(X \leq \lambda) = 0$

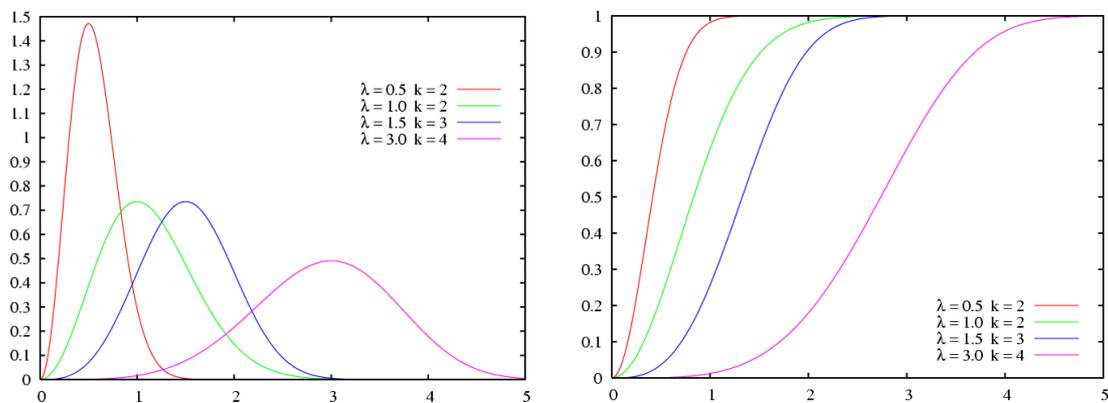


Figure I.17. Fonction de répartition de Weibull pour différentes valeurs de λ [45]

Le facteur d'échelle η est proche de la moyenne de X et le paramètre de forme m (appelé module de Weibull), il mesure la dispersion des valeurs. L'allure de la fonction de densité de la loi de Weibull (voir figure I.17) est conditionnée par les valeurs de m et η , et on note en particulier que, plus m est grand, plus la dispersion est faible, plus ce modèle tend vers la loi normale. Cette loi, développée initialement pour modéliser la dispersion expérimentale des contraintes de rupture des matériaux fragiles (Weibull [45]).

I.8. Analyse fiabiliste

La plupart des études d'évaluation de la performance des ouvrages sont dirigées vers la vérification des éléments structuraux, sous réserve de disposer d'une caractérisation probabiliste des variables et d'un état limite explicite. C'est notamment ce qui se réalise au travers des techniques classiques de la théorie de la fiabilité, comme les méthodes de niveau II auxquelles appartiennent les techniques FORM et SORM. Les sections suivantes donnent un rappel de quelques notions de la théorie de la fiabilité, et les différentes méthodes utilisées pour évaluer la probabilité de défaillance et l'indice de fiabilité des ouvrages.

I.8.1 Problématique

D'une manière générale, la théorie de la fiabilité mécanique vise à déterminer la probabilité de défaillance d'un système de structure. Dans un problème de fiabilité, les variables d'entrée, encore appelées variables physiques X_i , sont considérées comme étant des variables aléatoires. Notons que les variables d'entrée sont, en général, regroupées dans un seul et même vecteur, appelé vecteur aléatoire des variables de base.

Cette donnée permet la réalisation d'une partition de l'espace physique en deux domaines, appelés domaines de sécurité et de défaillance, pour lesquels nous avons respectivement $G_X(x) > 0$ et $G_X(x) < 0$. Il existe donc une frontière appelée état limite sur laquelle $G_X(x) = 0$. Tout le problème consiste à estimer la valeur de l'intégrale de l'équation (I.11), définissant la probabilité de défaillance P_f de la structure considérée.

$$P_f = P \left[G(\{X_i\}) \leq 0 \right] = \int_{D_f} f_{x_i}(x_i) dx_1 \dots dx_n \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Avec } f_X(x_i) = \prod_{i=1}^n f_{x_i}(x_i) = f_{x_1}(x_1) \dots f_{x_n}(x_n) \quad (\text{I.12})$$

Les méthodes d'intégration directe ne peuvent être menées, que dans des cas particuliers favorables où les fonctions de densités ont des formes simples. La valeur de la probabilité de défaillance, en principe est faible, le calcul analytique conduit à des erreurs importantes. Par conséquent, le calcul de la probabilité P_f est alors envisagé par des approches d'approximation [46, 47] ou par des méthodes de simulations [48]. Le concept fondamental d'une analyse fiabiliste est résumé sur la figure (I.18).

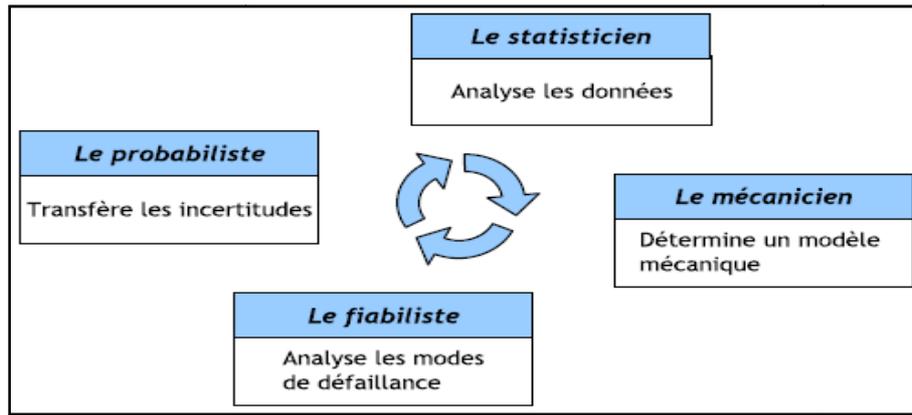


Figure I.18. Disciplines en collaboration dans une étude fiabiliste [49]

I.8.2 Description des incertitudes

L'enjeu d'une analyse fiabiliste réside dans la détermination des paramètres incertains, ayant un rôle significatif sur la fiabilité de la structure, dénommés : variables aléatoires. L'objet de la modélisation des incertitudes est de construire des modèles explicatifs et prévisionnels des phénomènes physiques et des modèles théoriques. Il existe plusieurs sources d'incertitude :

- **Les incertitudes épistémiques** : Elles viennent du passage du phénomène réel au modèle mathématique. Elles sont dues à la modélisation mathématique et numérique du comportement de la structure (utilisation d'un code élément fini, de lois de comportement). Ces incertitudes peuvent être réduites par ajout d'informations.
- **Les incertitudes aléatoires**. Elles apparaissent lors de l'estimation des paramètres du modèle. Elles sont dues à la représentation probabiliste des variables influençant le comportement de la structure, l'utilisation de variables aléatoires et de densité de probabilité caractérisant leurs lois.

I.8.3 Description des variabilités

L'enjeu est de préciser les paramètres incertains pouvant jouer un rôle significatif sur la fiabilité de la structure, appelés variables aléatoires de base, et de quantifier leur variabilité. Ces incertitudes proviennent le plus souvent de variabilités liées au processus de fabrication, aux imperfections des conditions des essais, telles que les fluctuations du chargement. Le choix des variables aléatoires est guidé par plusieurs critères, que l'on peut citer :

- **L'objectif de l'étude fiabiliste** : Par exemple, l'utilisation des propriétés mécaniques suffira à évaluer la probabilité de défaillance d'un matériau donné ; en revanche, pour la conception d'un nouveau matériau, le recours à des données supplémentaires sera plus pertinent ;
- **L'explication physique** : des aspects du comportement mécanique du matériau, notamment le mode de défaillance et les causes de sa mise en place, suivant la sollicitation envisagée ;

• **La disponibilité de résultats expérimentaux** : les modèles probabilistes associés aux variables aléatoires doivent effectivement être physiquement justifiés pour aboutir à une représentation réaliste.

La variable aléatoire gaussienne, aussi appelée normale, est la plus utilisée. Elle est entièrement caractérisée par son espérance nulle et sa variance unitaire, et sa densité de probabilité est illustrée par la figure (I.19) suivante :

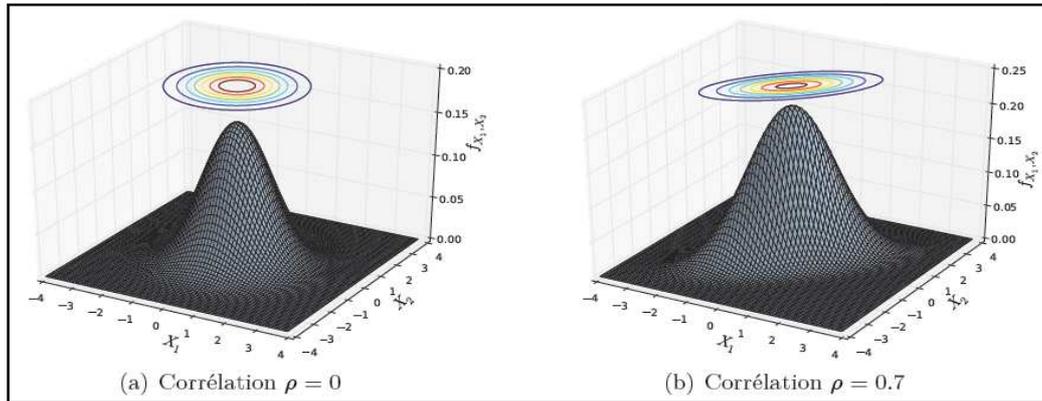


Figure I.19. Représentation de la densité normale centrée réduite bi-variée [50].

I.8.4 Fonction de performance

Pour pouvoir déterminer la probabilité de défaillance, le système mécanique étudié doit satisfaire les deux hypothèses suivantes : L'état de la structure est défini dans un espace qui est le résultat de vecteur des variables aléatoires ; La structure soit dans un des deux états possibles : état de défaillance ou état de sûreté.

La frontière entre ces deux états est connue comme la surface d'état limite. L'état de sûreté est l'état de la structure, qui est capable de satisfaire à tous les besoins pour lesquels elle a été conçue. Cette surface est écrite sous la forme :

$$z = G_X(x) \quad (\text{I.13})$$

Où z est la fonction de performance ; (x) est le vecteur des variables de conception considérées aléatoires, et $G_X(\cdot)$ est la fonction d'état limite qui comporte le modèle décrivant le scénario de défaillance. La fonction d'état limite de base, dénotée $G_X(x)$ est une fonction définie par des variables aléatoires (x_1, x_2, \dots, x_n) ; n étant le nombre de variables aléatoires, elle est définie par:

- $G_X(x) > 0$ Comme le domaine de sûreté ;
- $G_X(x) < 0$ Comme le domaine de défaillance D_f où l'état limite est atteint ou dépassé ;
- $G_X(x) = 0$ Définit la surface d'état limite.

La fonction d'état limite est habituellement définie comme une marge de sécurité. Où R et S sont respectivement les résultantes des forces de résistance et de chargement.

$$G_X(x) = R - S \quad (\text{I.14})$$

I.8.5 Transformations isoprobabilistes

Les transformations isoprobabilistes permettent de substituer la métrique de l'espace physique par une métrique euclidienne, tout en conservant la valeur de la probabilité en chacun des points de cet espace. Pour cela, les variables physiques X , sont transformées en des variables aléatoires centrées réduites et indépendantes U (Voir figure I.20).

I.8.5.1 Transformation de Rosenblatt

Cette méthode permet d'opérer une transformation marginale des variables de l'espace normé vers l'espace physique. La transformation de Rosenblatt, notée $U = T(X)$, n'est applicable que si la densité conjointe de toutes les variables aléatoires est connue. L'application Rosenblatt est donnée par :

$$U_n = \phi^{-1}(F_n(X_n, \dots, X_1)) \quad (\text{I.15})$$

Dans la pratique, la difficulté majeure dans l'application de cette transformation réside dans la détermination des probabilités conditionnelles. De plus, la densité conjointe des variables physique n'est pas toujours connue. Si les variables sont normales, on les transforme également en variables de loi centrées réduites comme suit :

$$U_i = \frac{(X_i - \mu_i)}{\sigma_i} \quad (\text{I.16})$$

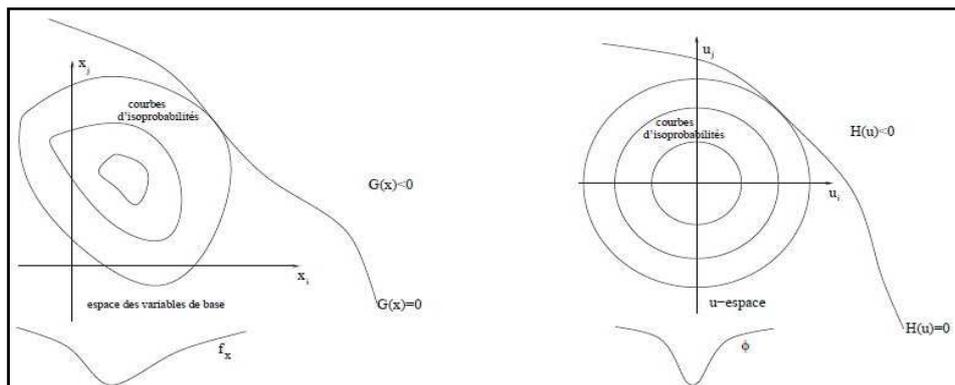


Figure. I.20. Transformation de l'espace d'entrée des variables [51]

I.8.5.2 Transformation de Nataf

La transformation de Nataf ne requiert pas la connaissance de la densité conjointe des variables physiques. En revanche, leurs densités marginales ainsi que la matrice de corrélation

sont connues. Son principe consiste à considérer une suite des variables centrées réduites issues de la transformation (I.17). z_i représente le vecteur des réalisations des variables intermédiaires :

$$z_i = \phi^{-1}(F_i(X_i)) \quad (\text{I.17})$$

Dans la pratique, des relations empiriques fournissant des estimations acceptables des corrélations des variables intermédiaires.

I.8.6 Principales méthodes en fiabilité

Les modèles de fiabilité structurale sont classés en niveaux, suivant le degré de sophistication de la représentation des incertitudes des variables de base. Au **niveau I**, nous parlerons du modèle semi-probabiliste, couramment utilisé jusqu'à présent dans les règlements. A ce niveau, la fiabilité des structures est liée à des coefficients partiels de sécurité affectés aux variables de sollicitation et de résistance. Ces coefficients tiennent compte des incertitudes réelles lorsqu'on dispose de l'information statistique nécessaire.

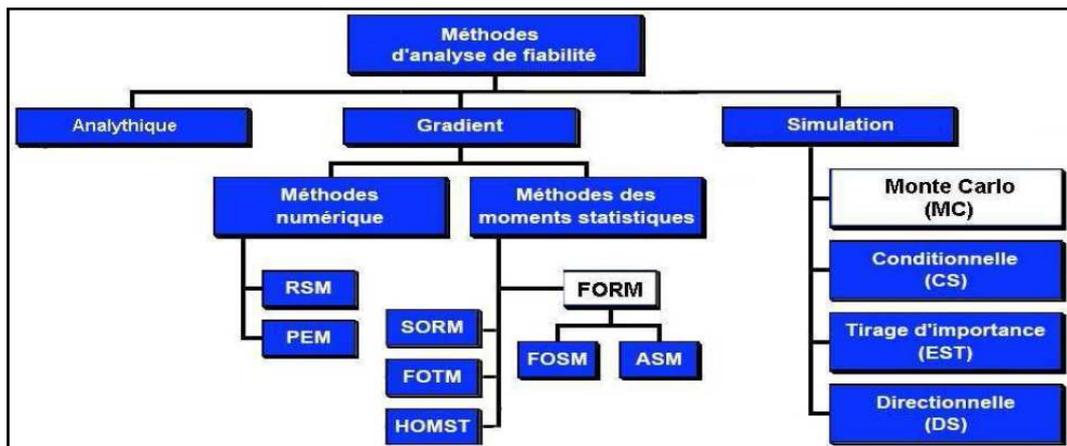


Figure I.21. Arbre des méthodes d'analyses de la fiabilité mécanique [37]

Les modèles de **Niveau II** contiennent une analyse probabiliste simplifiée. Ce niveau correspond aux analyses probabilistes pour lesquelles la fiabilité est quantifiée par un indice de fiabilité. Des hypothèses simplificatrices permettent de calculer une probabilité de défaillance approchée. Il regroupe les méthodes d'approximation FORM, SORM, RGMR (Riemannian Geometrical Method for Reliability).

Les méthodes de **Niveau III** sont purement probabilistes pour lesquelles les variables aléatoires sont caractérisées par leur loi conjointe. La probabilité de défaillance est alors déterminée par simulation. Dans la pratique, les méthodes de simulation de Monte Carlo sont utilisées pour valider les résultats obtenus par les méthodes (FORM, SORM). Les méthodes décrites dans cette partie sont largement présentées dans la littérature [52-54]. Citons entre autre Lemaire, 2005 [41] qui en a fait une présentation claire et détaillée.

I.8.6.1 Méthode analytique

Les méthodes analytiques permettent le calcul direct de la probabilité de défaillance P_f à partir de l'équation (I.11). L'évaluation de cette intégrale est souvent difficile voire impossible parce qu'elle représente généralement une quantité très petite et cela nécessite d'une part, de connaître la densité de probabilité conjointe du vecteur $\{X_i\}$ qu'il est très rare à obtenir, d'autre part, de disposer d'une expression de D_f qui ne soit pas trop complexe. Pour contourner ces difficultés, il faut faire appel aux méthodes d'approximation et de simulation.

I.8.6.2 Méthodes par gradient

Les méthodes par gradient sont purement probabilistes, principalement, elles sont composées par deux types de méthodes : les méthodes de moments statistiques et les méthodes numériques. Les plus courants sont les méthodes des moments.

➤ *Méthodes Numériques*

Dans la pratique, il est difficile de donner une description analytique du système étudié. La méthode des surfaces de réponses (RSM) proposée et développée par Wong et Bucher [55, 56] pour l'approximation de la fonction de base au point de conception par un polynôme de premier ou de second ordre des variables de base, permet d'évaluer la fonction. La méthode d'estimation de points (PEM) est une méthode approximative proposée par Rosenblueth [57] qui permet d'estimer les deux premiers moments d'une fonction d'état limite à partir des deux premiers moments des variables aléatoires de base.

➤ *Méthodes des moments statistiques*

Ces méthodes consistent à estimer les moments de la fonction d'état limite $G(\{X_i\})$ en un point approprié, c'est-à-dire, calculer l'indice de fiabilité dans l'espace normal réduit. Les approches itératives proposées dans la littérature sont nombreuses. Elles comptent ainsi principalement la méthode de fiabilité de premier ordre (FORM - *First Order Reliability Method*), la méthode (SORM – *Second Order Reliability Method*).

Les méthodes FORM/SORM sont les plus utilisées en mécanique, pour calculer les petites probabilités. Elles sont basées sur une approximation géométrique ou numérique de la fonction d'état limite. Elles consistent à approximer la surface de défaillance, soit par un hyperplan (FORM) soit par une surface quadratique (SORM). La dernière étape nous permet de calculer la probabilité de défaillance à partir de la surface d'approximation.

• *Approximation FORM*

La méthode FORM consiste à approcher la fonction d'état limite par une fonction linéaire pour calculer de manière simple la probabilité de défaillance (Voir figure I.22).

L'approximation linéaire est un développement de Taylor au premier ordre au point de l'état limite, dont la densité de probabilité est la plus élevée.

Supposons que la fonction d'état limite est une fois continûment différentiable en u^* l'équation d'un tel hyper-plan est donnée par l'équation (I.18).

$$\tilde{H}(u) = \sum_i \alpha_i u_i + \beta = 0 \quad (\text{I.18})$$

Où α_i sont les cosinus directeurs qui nous permettent de mesurer l'influence de chacun des variables de conception. De même, β est l'indice de fiabilité. La probabilité de défaillance est simplement approchée par : $P_f = \phi(-\beta)$ et $\phi(\cdot)$ est la fonction de distribution de probabilité de la loi normale centrée réduite.

- **Approximation SORM**

L'approximation au second ordre nécessite de considérer les termes de l'équation (I.19). La matrice Hessienne doit être déterminée puis diagonalisée, pour que les courbures principales puissent être calculées. Ces dernières constituent le supplément d'information contenu dans la formulation SORM par rapport à FORM.

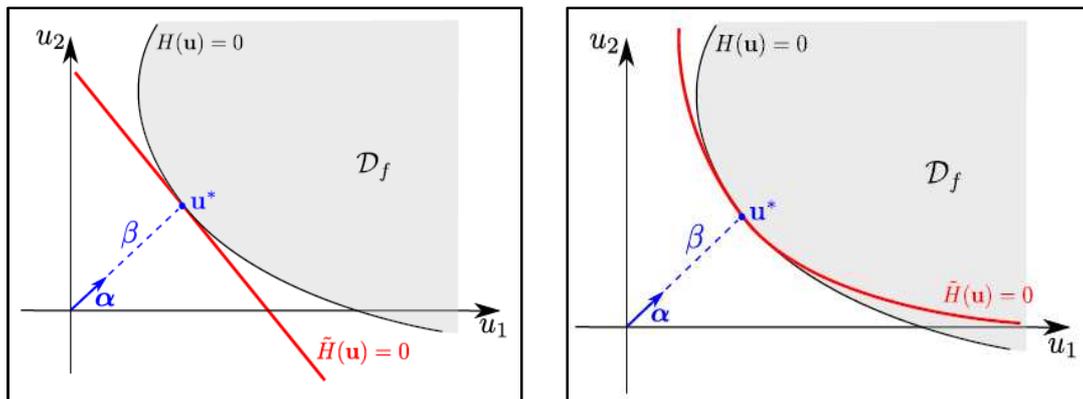


Figure I.22. Approximation géométrique de la méthode FORM/SORM [40].

L'approximation quadratique SORM est possible, si les courbures sont évaluables. La résolution du problème aux valeurs propres qui se pose est en général délicate, surtout dans le cas des zones de faibles gradients. La méthode SORM permet d'approcher la fonction d'état limite par une forme quadratique homogène ou non homogène au point de conception u^* (Voir figure (I.22b)). L'approximation SORM prend la forme d'un hyper-paraboloïde tangent au point de conception, qui a la même courbure en ce point, pouvant s'exprimer par :

$$P_f \approx \phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \beta k_i}} \right) \quad (\text{I.19})$$

Où k_i représente les courbures principales de la surface d'état limite au point de conception. La recherche du point de conception ou du point de défaillance le plus probable, relève d'un problème d'optimisation non linéaire sous contrainte (relation I.20) :

$$\beta = \|u^*\|$$

$$\beta = \min_{g\{x_i, (u_j)\} \leq 0} \sqrt{\{u\}} \quad (\text{I.20})$$

II.8.6.3 Méthodes par simulation

Le principe des méthodes de simulation repose sur la mise au point d'un ensemble synthétique de réponses, à partir duquel la probabilité de défaillance peut être estimée. La technique la plus simple est la méthode de Monte Carlo. En termes de temps de calcul, cette méthode est très coûteuse en raison du nombre de simulations nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante de P_f .

- **Méthode de Monte Carlo:**

Les simulations de Monte Carlo sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre pour calculer la probabilité de défaillance d'un système. Cette méthode consiste donc à faire des tirages aléatoires de l'état du système et à compter le nombre d'événements provoquant la défaillance. Si N est le nombre total de simulations, on admet que la fréquence des événements de défaillance tend vers la probabilité de défaillance: On en déduit la probabilité de défaillance par un traitement statistique, Où N_f est le nombre des événements :

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (\text{I.21})$$

Parmi les avantages de la méthode Monte Carlo, elle permet d'estimer la forme de la distribution de la fonction d'état limite ; une évaluation plus précise de la probabilité de défaillance ; elle est facile à mettre en œuvre et en particulier pour des fonctions d'état limite explicites. D'autre part, elle comporte les inconvénients suivants : les lois de distributions des variables aléatoires d'état limite doivent être connues ou supposées ; un très grand nombre de simulations sont alors nécessaires pour obtenir une précision suffisante.

I.9. Application de la fiabilité dans le génie civil

De nos jours, plusieurs modèles fiabilistes, statistiques et probabilistes sont développés et proposés pour parier aux problèmes liés à la dispersion des propriétés mécaniques des structures composites, notamment au niveau de leurs caractéristiques intrinsèques à la rupture. Aujourd'hui, ces analyses de fiabilité mécanique sont de plus en plus utilisées dans tous les domaines de génie civil. Il est possible de le constater au regard de quelques études disponibles dans la littérature.

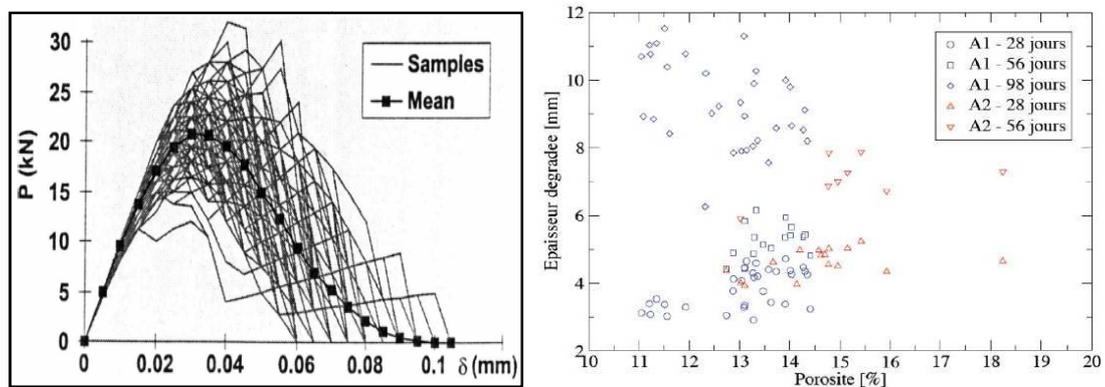
I.9.1 Evaluation de la qualité du béton

La modélisation statistique ainsi que la méthode de simulation de Monté Carlo ont été utilisées pour développer un modèle mathématique qui permet de déterminer la bonne qualité du béton (résistance à la compression, porosité, densité). Ces études ont permis de résoudre plusieurs problèmes, comme par exemple : la détermination des coefficients de variation entre les différents lots de fabrication du béton, mais aussi à l'intérieur du lot de fabrication ; la spécification des limites des efforts minimums du béton, entre autres.

I.9.2 Analyse stochastique des paramètres du béton

Des simulations purement probabilistes, basées sur la méthode de Monté Carlo, ont été récemment introduites pour simuler la fissuration et l'endommagement du béton, dans le cadre d'une analyse par éléments finis [44]. Les incertitudes des paramètres des matériaux ont été supposées spatialement variables, en suivant des distributions normales.

Ces recherches utilisent un réseau de neurones pour évaluer les paramètres de caractérisation de la distribution statistique d'une réponse donnée de la structure en suivant une procédure d'analyse inverse. Finalement, la procédure présentée est utilisée pour l'identification des paramètres fiables des éprouvettes cylindriques en béton. La figure (I.23) illustre les réponses forces-déplacements des cylindres pour différentes variantes des paramètres statistiques.



I.9.3 Analyse fiable des poutres renforcées par CFRP

Une étude fiable menée sur les poutres en béton armé renforcées par collage de plaques en fibres de carbone, chargée en flexion 3-points, est réalisée par Croston [38]. Cette étude probabiliste a été divisée en trois parties : l'approche déterministe, l'analyse de sensibilité des variables et enfin l'approche probabiliste. Les variables probabilisées, en utilisant un coefficient de variation, sont : les propriétés du béton et de l'acier, les dimensions de la section transversale de la poutre et la charge centrale appliquée. Dans l'approche probabiliste, la probabilité de défaillance du système a été estimée par la méthode Monté Carlo et FORM.

La Figure (I.24) montre la relation de la charge, probabilité de défaillance et la relation des coefficients de variation.

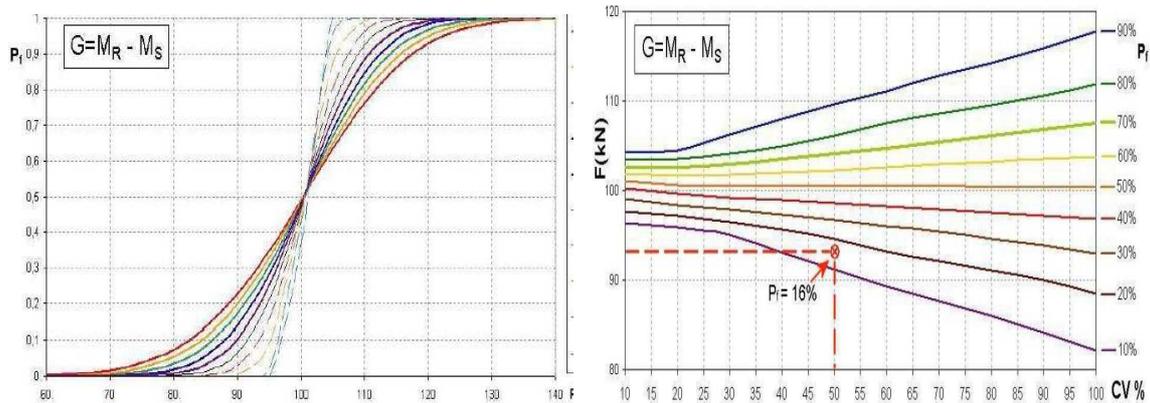


Figure. I.24. Probabilité de défaillance et COV des poutres renforcées par FRP [38]

A partir des résultats de cette approche probabiliste, des abaques ont été conçues pour mettre en rapport les paramètres de : la probabilité de défaillance, la charge appliquée et le coefficient de variation de la poutre. Cela permet une réduction du temps du calcul et une simplification de l'analyse des données.

I.9.4 Analyse probabiliste de la performance des ponts

Une approche probabiliste cohérente, pour apprécier la redistribution des efforts, appliquée aux ponts en béton armé, vis-à-vis d'exigences d'aptitude au service, a été réalisée par Mohammadkhani [36]. Dans cette approche, la redondance est définie comme la capacité d'un pont à redistribuer les efforts dus aux charges extérieures, sur l'ensemble de ses éléments constitutifs, ainsi que l'impact de dégradation de la performance des éléments et l'influence de la dégradation de la poutre sur l'indice de redondance résiduel. L'indice de redondance de performance est calculé en utilisant les méthodes de surfaces de réponses.

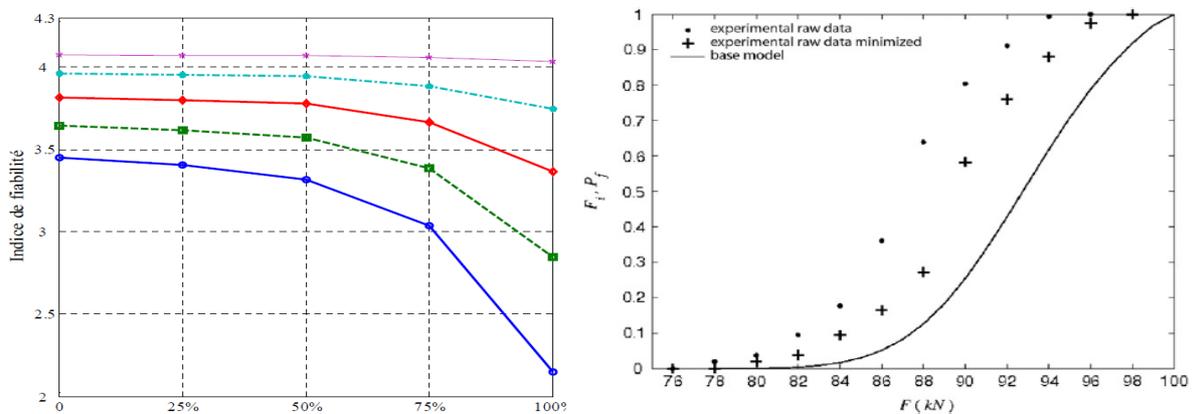


Figure. I.25. Approche fiabiliste appliquée aux ouvrages d'art [36]

Une autre étude fiabiliste qui réside en l'association des deux outils précités à savoir : la démarche fiabiliste et la modélisation micromécanique est menée par Dehmous [59-61]. Cette analyse consiste à évaluer la fiabilité de structures composites en fonction de variables aléatoires définies à l'échelle microscopique, ainsi que le passage micro-macro étant réalisé par une approche d'homogénéisation. L'intérêt est d'une part, de contribuer à la compréhension de la défaillance des matériaux composites, en déterminant l'influence des paramètres microstructuraux sur celle-ci, d'autre part, de mettre en œuvre une procédure de validation enrichie des modèles d'homogénéisation.

Le couplage fiabilité-micromécanique est mis en place sur le cas des joncs composites constituant les haubans d'une passerelle. Les variabilités de leurs propriétés microstructurales sont ainsi introduites dans des modèles stochastiques et les probabilités de défaillance résultantes sont ensuite comparées aux résultats expérimentaux ; (Voir Figure I.25).

I.10. Conclusion

Dans cette partie, les différentes étapes de la modélisation statistique ainsi que les méthodes de la fiabilité des structures ont été présentées. Les méthodes de calcul classique ont notamment été introduites à travers les méthodes de niveau II et celles de niveau III. L'approche probabiliste permet de mieux simuler l'état réel d'une structure que les approches déterministes, même si aujourd'hui ces dernières gouvernent les calculs dans les bureaux d'étude, en utilisant des coefficients partiels de sécurité (analyse semi-probabiliste) qui prennent en compte tous les facteurs aléatoires.

Malgré que, les performances mécaniques des matériaux et des structures composites offrent aujourd'hui de nouvelles perspectives pour la conception des structures, la variabilité de leur comportement constitue néanmoins un frein encore important à leur développement. Cet aspect amène en effet à l'introduction de coefficients de sécurité très sévères pour leur dimensionnement, ce qui engendre des surcoûts élevés. Dans ce contexte, les méthodes de fiabilité ont conduit à d'importantes avancées basées sur une évaluation plus rationnelle des risques encourus. Elles permettent ainsi d'évaluer quantitativement le risque de défaillance d'une structure donnée compte tenu des incertitudes mises en jeu (chargement, propriétés matériaux, géométries,...) et également d'optimiser sa conception pour un risque considéré.

Afin d'appliquer les méthodes (FORM/SORM), la connaissance de la fonction d'état limite est essentielle, ceci nous a conduit à orienter notre travail vers une modélisation analytique permettant de tenir compte d'une manière explicite les différents paramètres conceptuels de la poutre développée. On se propose de développer un modèle basé sur l'équilibre d'une section transversale considérée, afin d'évaluer finement le champ de déformation et de contrainte. La capacité portante de la poutre composite sous chargement de flexion quatre points sera évaluée par une approche globale, basée sur la théorie classique des poutres.

Chapitre II

Programme et caractérisation expérimentale

Chapitre II : Programme et caractérisation expérimentale

II.1. Introduction

La caractérisation expérimentale du comportement mécanique des poutres en béton composite chargées en flexion quatre-points, est réalisée. L'étude au laboratoire consiste à évaluer les performances mécaniques de telles poutres ainsi que l'identification des paramètres influençant leur comportement global, comparativement aux poutres en béton armé de conception traditionnelle. La technique de conception proposée consiste à intégrer dans la zone tendue, mécaniquement inefficace, un élément tubulaire de forme cylindrique enveloppé par un tissu composite pour améliorer sa rigidité et s'opposer au développement des déformations. Ce qui permettra d'une part, d'alléger l'élément, par conséquent de réduire sa masse et d'assurer la continuité de la matière (matrice béton) à travers le tissu composite. La conséquence directe de ce nouveau procédé de conception est une réduction significative de la quantité de béton, conduisant à un double bénéfice : réduction du poids propre de la structure et amélioration de ces performances mécaniques.

L'étude expérimentale est réalisée au Laboratoire de Génie Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Toutes les démarches ainsi que les étapes principales menées dans cette campagne sont largement détaillées dans cette section. La première étape est consacrée à l'identification des paramètres mécaniques intrinsèques des matériaux utilisés : à savoir le béton, les matériaux composites et les éléments tubulaires en polymère, à travers des essais de compression, traction et de flexion respectivement réalisés sur des éprouvettes de dimensions normalisées. La deuxième étape est réservée à l'analyse du comportement expérimental des poutres en béton composite soumises à des chargements de flexion. Tout un dispositif d'appui et d'essai est mis au point, permettant de fournir des informations indispensables à la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes de rupture des éléments étudiés. Les résultats obtenus, sur chaque série d'essai, ont permis de quantifier les différents apports de cette nouvelle conception en termes de réduction de poids propre, capacité portante et ductilité, comparativement aux structures de référence avec des dimensions équivalentes.

II.2. Synthèse permettant de définir la campagne d'essai

L'amélioration des performances mécaniques des éléments de constructions en béton armé par utilisation des matériaux composites a été démontrée expérimentalement par de nombreux chercheurs [62-66]. Les premières techniques utilisées sont le collage de plaques composites de différentes natures sur les faces exposées aux sollicitations extérieures [67]. La littérature fournit de nombreux articles et recherches consacrés à l'étude expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par PRF de différentes natures et dimensions [68-72]. La plupart des campagnes expérimentales ont notamment permis de constater les performances mécaniques de tels corps d'épreuve vis-à-vis des sollicitations extérieures. Par ailleurs, la littérature scientifique fournit également beaucoup de travaux, dont

on relève les problèmes d'interface entre la plaque et le support béton [73-74]. Il est légitime de s'interroger sur le comportement mécanique à long terme des interfaces collées béton/composite exposées à des sollicitations mécaniques et environnementales durant tout le cycle de vie de l'ouvrage. Ces travaux ont confirmé que le mode de rupture, ainsi que la capacité portante de ces poutres renforcées par collage de plaques composites dépendent principalement des propriétés de l'interface béton-composite. Notre travail s'inscrit dans l'optique de pallier au défaut de l'absence de l'adhérence et également faire face au problème lié au décollement des renforts dû à la concentration des contraintes au niveau de l'interface, tout en gardant l'aspect esthétique de la structure.

Le modèle expérimental classique utilisé dans l'étude de comportement mécanique d'un élément de construction soumis à la flexion quatre points est adopté. Dans le but d'étudier le comportement des poutres en béton-composite, l'essai de flexion simple a été considéré en s'inspirant des travaux d'autres auteurs [71-75]. L'essai de flexion sous chargement statique a été retenu car les structures se trouvent la plupart du temps soumises à ce type de chargement, même si, ces efforts sont souvent combinés avec des efforts de cisaillement et/ou de torsion. La flexion seule a été considérée afin de simplifier la phase expérimentale. L'idéal pour réaliser une étude sur le comportement du béton est de pouvoir utiliser des éprouvettes à l'échelle réelle. Cependant, la puissance des machines d'essais IBERTEST, qui sont au niveau du laboratoire, ne permet pas de caractériser de telles poutres.

La plupart des chercheurs utilisent des structures à l'échelle réelle, ce qui peut conduire à des portées supérieures à 2m. D'autres auteurs [37, 76, 77] proposent d'utiliser des modèles réduits, suivant des règles de similitude géométrique pour définir leurs éprouvettes. Dans notre travail, des séries d'essais préliminaires conduits sur des éléments prismatiques de dimensions de $10*10*40\text{ cm}$ soumis à des chargements de flexion trois points, sont réalisées. Ensuite, des poutres en béton composite, de dimensions normalisées possédant une section transversale de $80*160\text{ mm}$ avec une longueur de 110 mm , sont élaborées et testées, pour mettre en évidence tout l'intérêt de la technique proposée.

II.3 Programme expérimental

Cette partie expose l'ensemble des procédures de toute la phase expérimentale (calcul de la proportion des constituants du béton, coffrage, ferrailage et murissement des éprouvettes), ainsi que le mode de préparation des éprouvettes et du tissu composite. Les modes d'essais de flexion 3 et 4-points avec l'ensemble des réglages (machines, paramètres et configuration), la démarche d'acquisition et d'analyse des résultats, sont présentés.

II.3.1 Corps d'épreuves

La nouvelle conception proposée est menée sur des poutres en béton composite, de longueur de 110 cm, avec une section de 8 cm de largeur et de 16 cm de hauteur (Voir Figure II.1). L'objectif est de développer un élément poutre, qui présente à la fois un poids propre réduit et des performances mécanique élevées. L'élément tubulaire en polymère renforcé par un tissu composite en FRP permet de maintenir un certain seuil de résistance et de rigidité acceptable.

Aussi, assurer la continuité dans toute la section transversale. La combinaison des propriétés mécaniques de l'ensemble de ces matériaux permet de rendre l'élément plus performant.

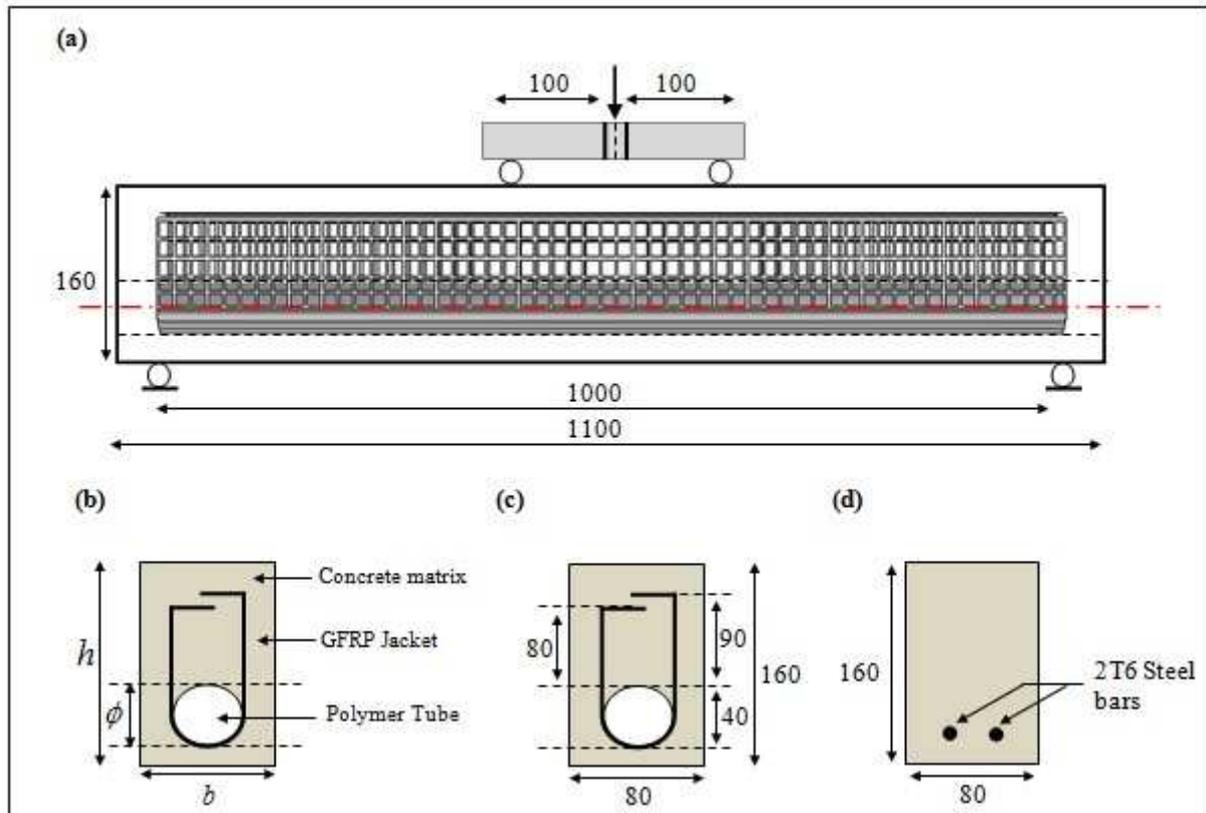


Figure. II.1. Poutre en béton composite développée sous chargement de flexion

Une pression latérale de confinement est mobilisée grâce à la différence de rigidités entre les deux matériaux compatibles, à savoir le béton et le tissu composite FRP prolongé selon la hauteur de la section droite (Voir Figure II.1.b). Ce qui permet de s'opposer aux déformations latérales et de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion. Les caractéristiques géométriques de la section considérée et du tissu FRP sont illustrées sur la figure (II.1.c).

Pour la confection des spécimens témoin en béton armé, la nuance de l'acier utilisé pour le renfort dans la zone tendue est FeE 400. Le renforcement inférieur est constitué de deux barres, haute adhérence, de 8 mm de diamètre HA8 (Voir Figure II.1.d), avec un enrobage de 20 mm selon les recommandations de l'Eurocode 2.

II.3.2 Caractérisation des matériaux

Cette partie est consacrée à la caractérisation mécanique des matériaux (béton, acier, résine et composites) qui constituent les corps d'épreuve. Cette caractérisation classique du comportement mécanique (traction axiale, compression axiale et flexion) a conduit à étudier les propriétés élastiques ainsi que la rupture de chaque matériau. Les résultats obtenus, sur chaque constituant, ont permis de fournir des informations indispensables à la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes de rupture des éléments étudiés.

II.3.2.1 Le béton

Le béton utilisé est confectionné avec un ciment de type CEM II, 32,5 de résistance réelle de 420 bars, un sable roulé (0/3), et un gravier (8/15) et (15/25) lavés et séchés à l'étuve à une température de 105°C, et un Super-plastifiant (MedaFlow-30). La formulation du béton est faite d'après la méthode de Dreux Gorisse basée sur l'analyse granulométrique du sable et des différentes fractions des graviers. Les fractions massiques du béton utilisées pour 1 m³ de volume sont données dans le tableau (II.1).

Tableau II.1: Composition du béton utilisé

Constituants	Masse en (Kg) pour 1m ³
Ciment	350
Sable	680
Gravier (8-15)	688
Gravier (15-25)	812
Eau	200
Super-plastifiant	5.4 l
Air occlus	2.3%
Slump test	7.2 cm

➤ Essai de Compression

Une série d'éprouvettes cylindriques de dimensions normalisées 160*320 mm, sont confectionnées et testées en compression uni axiale après 28 jours du murissement dans des conditions de température et d'humidité contrôlées selon la norme NF EN12390-4. Le comportement expérimental du matériau béton est illustré sur la figure (II.2), qui montre l'évolution des contraintes à 28 jours en fonction des déformations axiales et radiales des spécimens cylindriques.

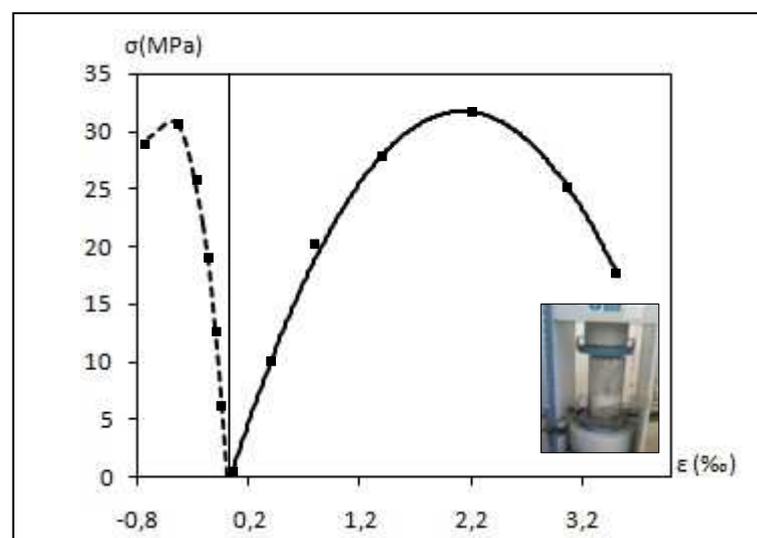


Figure. II.2. Comportement expérimental du béton sous compression axiale

L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques intrinsèques (résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de poisson ν) et la loi de comportement du béton. Les différentes caractéristiques du béton utilisé dans ce programme expérimental sont récapitulées dans le tableau (II.2) :

Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques du béton

Paramètres mécaniques	Valeur
Résistance à la compression à 28 jours (Mpa)	30.57
Déformation correspondante au pic (‰)	1.92
Déformation axiale de rupture (‰)	3.41
Module d'élasticité (Mpa)	29120
Coefficient de poisson	0.19

➤ Essai de Traction par flexion

La caractérisation du comportement du béton à la traction est réalisée suivant un essai de traction par flexion. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques, de dimensions normalisées $40 \times 10 \times 10$ cm sur une machine de flexion universelle IBERTEST avec une capacité de charge maximale de 200 kN. La vitesse de chargement est de 0,1k N/s.

La figure (II.3) montre la courbe Charge-déflexion. La résistance du béton à la traction obtenue par les essais de flexion ainsi que les autres paramètres mécaniques intrinsèques sont données dans le tableau (II.3) ci-dessous :

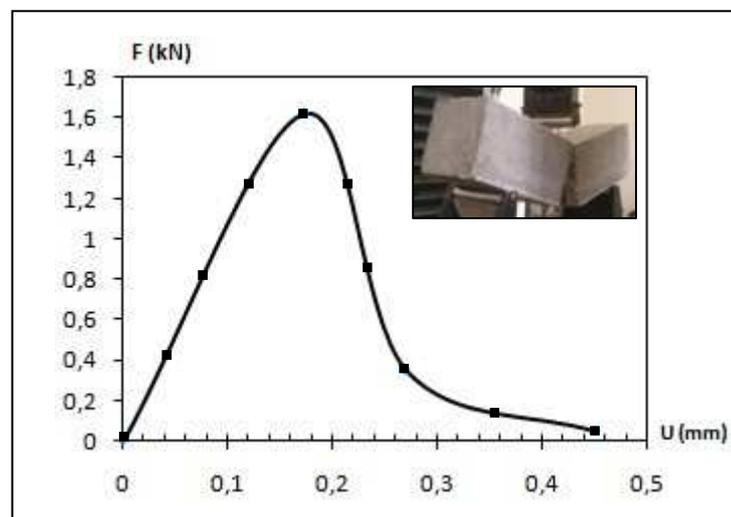


Figure. II.3. Comportement du béton sous chargement de flexion

Tableau II.3 : Résultats des essais de traction par flexion

Paramètres mécaniques	Valeur
Résistance à la traction à 28 jours (Mpa)	3.2
Flèche au pic (mm)	0.17
Flèche de rupture (mm)	0.45

A partir des courbes contrainte-déformation des éprouvettes en béton, sollicitées en compression et en traction, les constantes intervenantes dans le modèle numérique : ‘‘Concrete Damage Plasticity’’, permettant par la suite la modélisation du comportement du béton en compression/traction sont identifiées.

II.3.2.2 Les éléments tubulaires

L’étude du comportement mécanique des poutres en béton sous un chargement de flexion a montré que les zones tendues sont mécaniquement inefficaces, elles n’apportent aucune contribution en termes de résistance et de ductilité [78]. Dans cette optique, un élément tubulaire en polymère, est intégré dans la matrice continue en béton dans le but d’alléger la poutre considérée (Voir figure II.4.a). Le choix du tube est conditionné par la recherche de caractéristiques supérieures, répondant à des besoins précis et nécessitant un coût de main-d’œuvre moins élevé. Dans cette section les caractéristiques géométriques ainsi que les propriétés physiques et mécaniques des polymères utilisés sont identifiés à partir des essais.

➤ *Comportement global des tubes en polymère*

Afin d’évaluer la déformation maximale et la capacité portante des tubes en polymère à reprendre la charge du béton et le chargement extérieur qui lui sont appliqués, un dispositif d’essai est mis au point afin de solliciter l’élément tubulaire par un chargement de flexion uniformément repartis. La figure (II.4) montre l’élément tubulaire sous chargement de flexion répartie sur la machine IBERTEST, ainsi que le mode de rupture obtenu. Le tube repose sur un dispositif d’appui constitué de deux plats rigides. Le chargement mécanique est appliqué à l’aide d’une planche en bois à travers la génératrice du tube. Pour assurer une bonne reproductibilité des résultats, trois éprouvettes au moins sont réalisées.

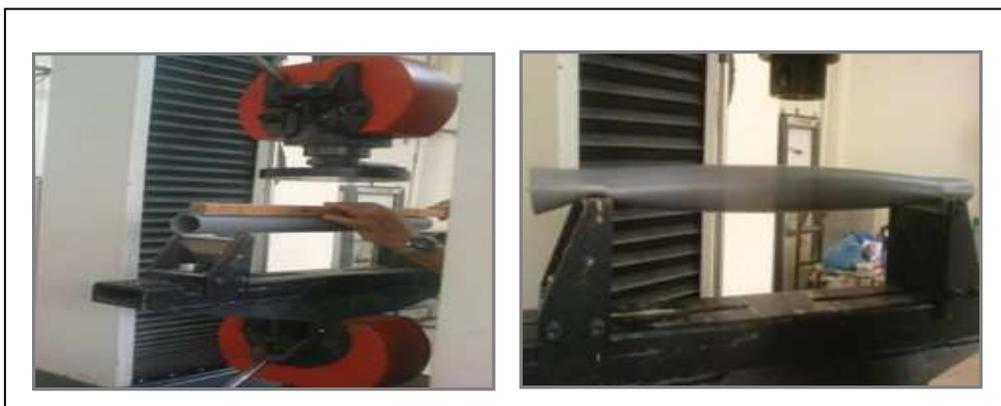


Figure. II.4. Élément tubulaire sous chargement de flexion répartie.

En conclusion l’élément tubulaire présente des déformabilités très importantes avec une concentration des efforts au niveau des appuis (Voir figure II.4.b). Il présente ainsi un seuil de résistance acceptable. Pour plus de détails, le comportement global des éléments tubulaires utilisés est illustré sur la figure II.5 ci-dessous qui montre l’évolution du chargement extérieur appliqué sur l’élément en fonction de la déflexion centrale à mi-travée.

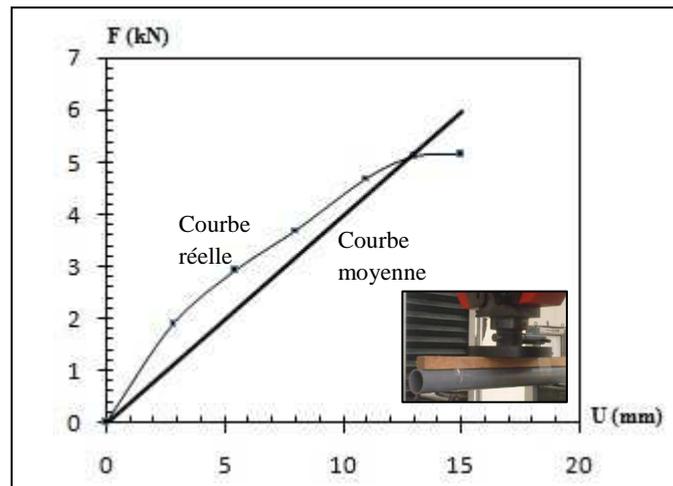


Figure II.5. Comportement expérimental de l'élément tubulaire

Les caractéristiques mécaniques intrinsèques intervenant dans le modèle numérique permettant la modélisation du comportement du tube en polymère sous chargement de flexion uniformément repartis sont identifiées à partir de ces courbes force-déplacement (Courbe réelle et courbe moyenne).

➤ Paramètres mécaniques

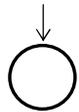
Les résultats obtenus par les essais de flexion uniformément repartis sur une série des éléments tubulaires en polymère ainsi que les caractéristiques géométriques sont récapitulés dans les tableaux (II.4 et II.5).

Ces propriétés physiques et mécaniques sont généralement calculées de la manière suivante : La contrainte axiale dans le tube est obtenue en divisant la force axiale mesurée par l'aire de la section transversale initiale du tube. Le module d'élasticité est calculé en divisant la contrainte axiale sur la déformation axiale correspondante, et la contrainte à la rupture est habituellement identifiée comme étant la contrainte maximale enregistrée durant tout l'essai.

Tableau II.4 Propriétés mécaniques du tube en polymère

Densité (g/cm ³)	Poids (gr/ml)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Contrainte de rupture (Mpa)
1.26	90	2,14 – 4,14	11,8 – 80	40,7 – 65,1

Tableau II.5 Résultats des essais de flexion sur les éléments tubulaires

Formes utilisées	Caractéristiques géométriques (cm)			N°	Force max (kN)	Déplacement (mm)
	Diamètre	Epaisseur	Longueur			
	Φ = 50	e = 3	L = 1000	1	4.77	30.54
				2	5.67	33.65
				3	5.18	32.43

II.3.2.3 Matériaux composites

Les matériaux composites confèrent aux poutres en béton leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture et dureté. Ils permettent également d'améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue à la température, résistance à l'abrasion, propriétés électriques. L'objectif des essais sur les matériaux composites est d'identifier leurs comportements mécaniques afin qu'on puisse introduire leurs lois de comportement dans les simulations numériques. Dans notre travail, un tissu composite en fibres de verre (GFRP) est utilisé, il est conçu comme un matériau anisotrope. Donc il est nécessaire de connaître les constantes élastiques dans les différentes directions du matériau. Ces constantes élastiques peuvent être identifiées par des essais expérimentaux, en variant la direction de la sollicitation par rapport à l'orientation des fibres. Ces caractéristiques physico chimiques sont fournis par le fabricant et sont vérifiées par des essais mécaniques.

➤ *Choix du tissu composite GFRP*

De nouvelles perspectives sont apparues avec l'apport des matériaux composites dans tous les domaines. Les matériaux composites doivent répondre aux exigences des contraintes mécaniques imposées, à travers le choix judicieux de renforts et de matrice. Les caractéristiques recherchées pour les renforts pour la présente étude sont : des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible (poids propre réduit), une bonne compatibilité avec les autres matériaux (matrice), une facilité de mise en œuvre, et un cout faible. A cet effet, un tissu composite GRFP utilisé (Glass Fiber Reinforced Polymer ; voir Figure II.6.a) est un ensemble de filament surfacique de fils et de mèches, il est constitué de chaînes (ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant sa longueur) et de trames (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils des chaînes).

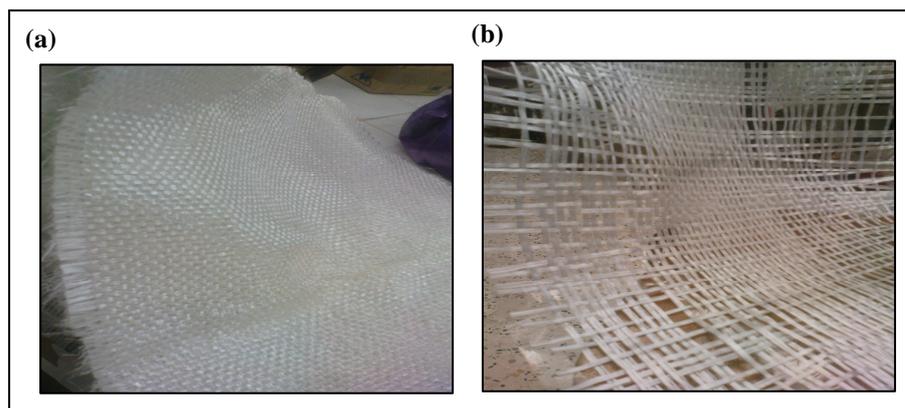


Figure. II.6. Tissu composite en fibres de verre : avant et après ensimage

➤ *Préparation et ensimage du tissu*

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sorte de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2 mm de diamètres. Le verre fondu est maintenu dans la filière, chauffé par effet joule, aux

environs 1 250 °C. A cette température, la viscosité permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir les tissus en fibres continues de diamètres différents.

Pour pallier, au default de l'absence de l'adhérence du tissu composite issu de la filière, une opération dite ensimage est réalisée, elle consiste à disposer les différents filaments constituant le tissu suivant deux directions principales espacées entre elles dans les deux sens. Le tissu de verre ensimé ainsi obtenu contient des mailles (figure II.6.b), qui permettent d'assurer la continuité de la matrice béton. Les caractéristiques géométriques du tissu composite après ensimage, sont illustrées sur le tableau (II.6) :

Tableau II.6 : Caractéristiques géométriques du tissu composite

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Maille (mm)	Masse linéique (tex)	Diamètre (mm)	Epaisseur (mm)
1 000	390	150	0.31	0.03	1

➤ Résine et adhésifs

La résine, utilisée pour la mise en forme de l'élément tubulaire renforcé par le tissu GFRP, est une résine organique à performances élevées, de type époxyde, conçue par Granitex (Algérie). Cette dernière est obtenue en mélangeant la résine (A) avec une proportion de 35% en masse de durcisseur (B). Le mélange est effectué pendant 3 minutes à l'aide d'un agitateur à hélice électrique, avec une vitesse de rotation lente (300t/min) dans le but d'éviter l'inclusion de bulles d'air. Les mélanges sont immédiatement utilisés après leur préparation, toutes les recommandations du fournisseur (la température, l'humidité) ont été respectées. Le tableau (II.7) résume les caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.

Tableau II.7 : Caractéristiques de la résine fournie par le fabricant [79]

Paramètres	Valeur
Densité (ISO 758)	1.1 ± 0.05 (kg/m ³)
Viscosité (NF T76-102)	11000 (mPaS) à 25°C
DPU : duré pratique d'utilisation (NFP18 810)	1h15mn à 20°C et 65% HR
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse : 6h ; Dur : 16h
Resistance en compression (NA427)	> 70 (Mpa)
Resistance en flexion (NA 234)	> 25 (Mpa)
Adhérence sur béton (NFP18 858)	3 (Mpa)
Durée de mise en service	10j à 20°
Rapport pondérale (A/B)	Résine : 1 Kg Durcisseur : 0.666 Kg
Résistivité à 20 °C	10 ¹⁰ à 10 ¹³ (Ω · m)

➤ *Essai de traction et identification des paramètres*

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de résistance de la résine STR et du tissu composite, des essais de traction directe ont été réalisés, en utilisant une machine de marque équipée d'une cellule de force maximale de 200 kN. Elle est munie d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une représentation des diagrammes (force /déplacement et force/temps) avec une bonne précision.

Les essais de traction sont réalisés à température ambiante après 48 heures de durcissement de l'adhésif époxyde. La machine est pilotée à une vitesse de traverse constante fixée à 10 mm/min soit 0.1 kN/s. Les éprouvettes utilisées pour les essais sont dimensionnées selon la norme NF EN ISO 178 et ASTM D790. Les résultats des essais menés sur des éprouvettes à base de résine (Epoxy Resin), et des éprouvettes à base d'un tissu composite GFRP avec une matrice époxyde (GFRP-Plate) sont illustrés sur la figure (II.7).

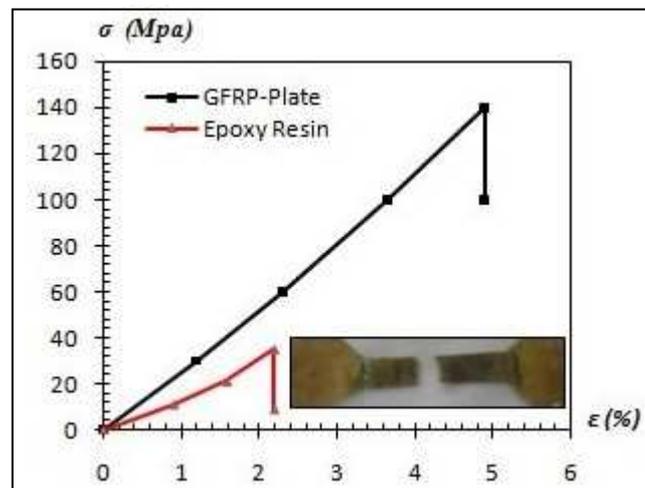


Figure II.7. Comportement mécanique des composites utilisés

La fibre de verre FRP se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope, son comportement dans l'hypothèse des contraintes planes est décrit par les constantes de rigidité dans les directions principales résumées sur le tableau (II.8) [75]. Les coefficients de poisson sont obtenus en divisant les déformations transversales par les déformations axiales.

Tableau II.8 : Caractéristiques élastiques du tissu composite [75]

Densité (Kg/m ³)	E1 (Mpa)	E2 (Mpa)	ν_{12}	ν_{13}	G ₁₂ (Mpa)
2600	72000	13600	0.31	0.33	4700

La rupture des plaques composites, intervient lorsque la contrainte de traction atteint celle des fibres. La concentration des contraintes au voisinage de la rupture, produit un mode de rupture qui dépend principalement de la capacité portante des fibres et des propriétés de l'interface de contact. Les contraintes à la rupture du tissu composite, mesurées par des essais de traction, compression, et cisaillement sont données dans le tableau (II.9).

Tableau II.9 : Caractéristiques à la rupture du tissu composite

Dénomination	Valeur
σ_L : Contrainte à la rupture en traction suivant x	1600
σ_T : Contrainte à la rupture en traction suivant y	930
σ_C : Contrainte à la rupture en compression suivant x	35
Y_C : Contrainte à la rupture en compression suivant y	110
S : contrainte à la rupture en cisaillement	70

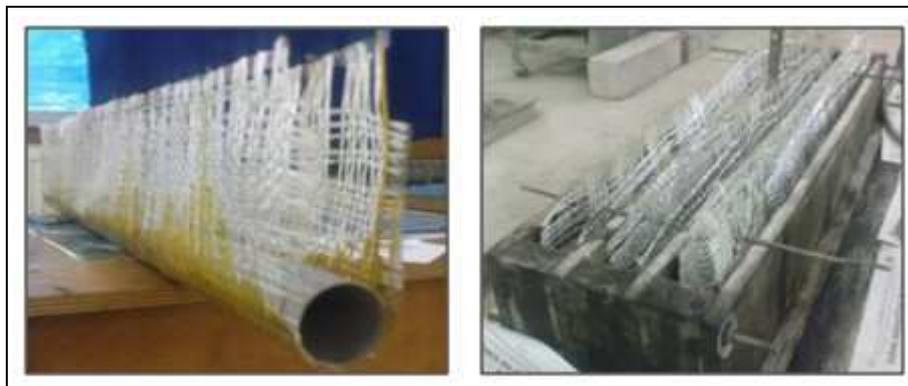
II.3.3 Préparation des spécimens Poutres

Pour étudier le comportement des poutres en béton-composite, nous avons procédé à une investigation expérimentale très riche, qui permet de mieux appréhender leur comportement mécanique ainsi que leurs mécanismes de rupture. A cet effet, des essais mécaniques statiques de flexion (3 points et 4 points) ont été réalisés. Dans cette section, le procédé de fabrication des différents spécimens est explicitement détaillé. Ce dernier se décompose en trois parties principales : Préparation des éléments tubulaires et la mise en place du tissu composite à l'aide de la résine époxyde. Confection des coffrages et bétonnage des poutres en béton - composite et enfin, présentation du mode de l'essai et acquisition des résultats.

II.3.3.1 Mise en place du tissu sur les éléments tubulaires

Pour assurer une adhérence optimale entre le tissu composite et l'élément tubulaire, après durcissement de l'adhésif, un nettoyage des deux matériaux compatibles est réalisé, afin d'enlever les poussières et les aspérités éventuelles. La surface de la génératrice du tube est préparée avec une surfaceuse électrique équipée d'un disque diamant.

Pour réaliser ce procédé, nous avons respecté la procédure composée des étapes suivantes : Etalement de la résine sur la mi-généralice du tube; Etalement de la résine sur la sous face du tissu composite ; Mise en place du tissu GFRP sur le tube en polymère ; Compression de la structure en appliquant une charge extérieure. Les conditions considérées de mise en place du tissu sur les tubes sont : L'étalement de la résine se fait à température ambiante ; La compression est maintenue 24 heures avant démoulage.

**Figure II.8.** Préparation de l'élément tubulaire et des coffrages

II.3.3.2 Coffrage et bétonnage

La préparation des matériaux, la fabrication du coffrage, la confection du béton, le malaxage et le coulage ont été réalisés dans le laboratoire. Afin de minimiser les écarts entre les caractéristiques mécaniques des poutres composites, le coulage du béton, le durcissement et la cure se sont déroulés dans les mêmes conditions climatiques et de stockage. Le coffrage utilisé est un moule démontable, constitué de planche en bois et imprégné par un agent démoulant pour faciliter l'extraction des spécimens après la prise du béton (démoulage).

Avant l'introduction du béton dans le moule, nous avons effectué un contrôle d'affaissement en utilisant un cône d'Abrams (slump test) (EN 12350-2). Pour compléter la caractérisation à l'état frais, on a procédé à des mesures de masses volumiques et d'air occlus à l'aide d'un aéromètre selon les normes [NF EN 12350-7 2001] et [NF EN 12350-6 2000] [80]. Les résultats des essais à l'état frais sont synthétisés dans le Tableau II.1. Le procédé de fabrication des différents spécimens est illustré sur la figure (II.9).



Figure. II.9. Bétonnage et conservation des spécimens avant murissement

Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs, définies par une tige de piquage et est vibré pendant 15 secondes sur une table vibrante. Tous les corps d'épreuves sont ensuite immergés dans l'eau à une température ambiante de 20° (Voir figure II.9). Les caractéristiques géométriques des poutres confectionnées et testées en flexion sont récapitulées dans le tableau (II.10).

Tableau II.10 Caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres testées

référence de la poutre	Longueur (mm)	Distance entre appuis (mm)	Diamètre du tube (mm)	Section (mm ²)	Poids propre (kg)
REF- CB	1100	1000	-	12 800	38.8
REF-CTB	1100	1000	50	10 838	29.1
REF-RCB	1100	1000	-	12 800	39.2
NEW-CCB	1100	1000	40	11 544	30.4

II.3.3.3 Chargement et acquisition

Après 28 jours de murissement et de conservation dans des conditions climatiques ambiantes, toutes les poutres confectionnées sont testées sous chargement de flexion. Le principe de l'essai de flexion est de déterminer l'aptitude à la déformation des poutres sur deux appuis avec une application d'une charge à mi-distance des appuis. Il est alors possible de mesurer en fonction de la charge appliquée les déplacements de la traverse mobile de la machine et les flèches correspondantes. Les précautions à prendre pour ce type d'essai se situent principalement au niveau des appuis. En effet, l'éprouvette doit être parfaitement perpendiculaire au plan d'application de la charge. Les appuis doivent être assez éloignés les uns des autres pour éviter le cisaillement pur de l'éprouvette.

La machine de flexion de type IBERTEST (Voir figure II.10) est utilisée. Elle est constituée d'un bâti supportant une traverse mobile, et d'un pupitre de commande relié à un ordinateur équipé d'une chaîne d'acquisition de contrôle numérique (Wintest). La machine est instrumentée en capteur de force avec une cellule de contrainte de 200 kN. La vitesse de chargement recommandée pour ce type de poutres est de 10 mm/min.



Figure. II.10. Machine de flexion IBERTEST

II.4. Résultats des essais et Confrontation

La réponse de la poutre composite chargée en flexion, d'un point de vue comportement global et mécanisme de rupture, est déterminée à l'aide des essais mécaniques. Ces derniers sont

menés suivant deux étapes principales. Des essais préliminaires (3 points) sont réalisés sur des spécimens prismatiques de dimensions standards $10*10*40\text{ cm}$, ces essais permettent d'évaluer le comportement de la poutre sans et avec l'enveloppe composite, ainsi que l'influence de l'enveloppe composite sur les modes de rupture. Les différents résultats obtenus sont ensuite validés par une autre série d'essais menés sur des poutres de grandes dimensions de $16*8*110\text{ cm}$, testées en flexion quatre points. Les différents résultats sont recueillis et discutés, en procédant à la confrontation avec les résultats obtenus sur des poutres en béton armé de mêmes dimensions avec un ferrailage ordinaire (poutres de référence).

II.4.1 Essais préliminaires (flexion 03 points)

Les essais préliminaires sont conduits sur des éléments prismatiques de dimensions normalisées de $10*10*40\text{ cm}$ soumis à des chargements de flexion trois points, jusqu'à la rupture. Les résultats obtenus sur les spécimens témoins conçus avec un béton seul (REF-CB) sont confrontés avec ceux obtenus sur les spécimens à base de béton avec élément tubulaire (REF-CTB : sans le tissu composite), cette confrontation permet de quantifier la perte de rigidité due à l'extraction du béton tendu. Le comportement de la poutre composite développée (NEW-CCB : béton+tube+composite) est ensuite comparé à celui des poutres de référence en BA avec 2T6 placées dans la zone tendue en flexion (REF-RCB).

II.4.1.1 Confrontation des courbes forces-déplacements

La confrontation des courbes forces-déplacements, qui présente l'évolution du chargement extérieur appliqué en fonction de la flèche maximale mesurée à mi-travée de la poutre est illustrée sur la figure (II.11).

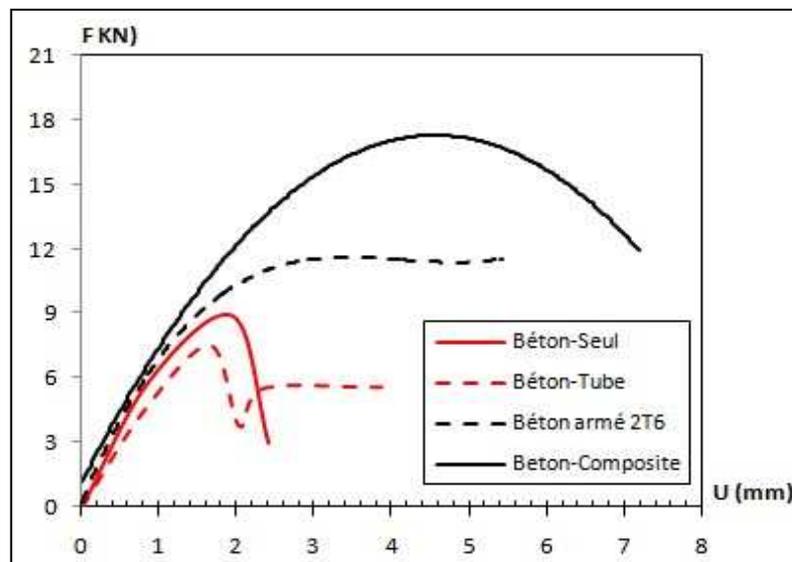


Figure II.11. Confrontation des courbes forces-déplacements

Cette confrontation met en évidence l'apport de la conception proposée en termes de rigidité flexionnelle, capacité portante, ductilité comparativement aux poutres de référence. Il est observé sur cette figure que les courbes peuvent être décomposées en trois parties. Dans la

première partie, le déplacement vertical augmente linéairement en fonction de la charge appliquée. Dans la deuxième partie, le déplacement augmente très rapidement avec l'augmentation de la charge. Dans la troisième partie, le déplacement vertical augmente également linéairement comme dans la première partie, avec une vitesse moins élevée.

La capacité portante de la poutre composite est de l'ordre de 16.78 kN, avec un déplacement vertical correspondant 4.12 mm. La poutre de référence en béton armé présente un comportement assez ductile avec une capacité portante de 11.52 kN et une flèche correspondante 2.91 mm. Les autres poutres de référence (REF-CB et REF-CTB) sont caractérisées par des résistances ultimes moins importantes de l'ordre de 8.89 kN et 7.23 kN respectivement, avec un mode de rupture fragile.

II.4.1.2 Mode de rupture

Les modes de rupture obtenus par les essais préliminaires sur les différents spécimens sont illustrés sur la figure (II.12). La rupture de la poutre témoin en béton armé est atteinte après la plastification des armatures tendues, avec un mode de rupture en flexion. Ce mécanisme de rupture se produit plus brutalement que le mécanisme de rupture de la poutre composite, qui présente un seuil de résistance acceptable. Pour les poutres composites, la rupture est provoquée par celle du tissu composite et par la séparation de l'enrobage en béton de l'élément tubulaire. Dans un même temps, pour la poutre de référence en béton avec le tube polymère, nous avons observé une reprise de la charge par le tube après la rupture du béton.



Figure. II.12. Comparaison des modes de rupture des spécimens prismatiques

II.4.1.3 Quantification des apports

Les différents résultats obtenus en terme de capacité portante, ductilité, rigidité flexionnelle au cours du chargement sont récapitulés dans le tableau (II.11). La capacité portante de la poutre est identifiée par la valeur de la charge ultime, détectée dans l'histoire du chargement ; la rigidité flexionnelle est tirée de la courbe force-déplacement. La figure (II.13) montre les histogrammes des résistances et de rigidité flexionnelle des différents spécimens étudiés.

Tableau II.11 : Résultats des essais préliminaires

Spécimens	Force de la 1 ^{ère} fissure (kN)	Force de rupture (kN)	Flèche de la 1 ^{ère} fissure (mm)	flèche maximale (mm)	Rigidité flexionnelle (N/mm)
béton seul	7.54	8.89	1.65	2.4	4569.69
béton+tube	5.32	7.23	1.34	3.87	3970.15
béton armé	9.67	11.52	1.53	5.83	6320.26
béton composite	13.32	16.78	1.81	7.21	7359.11

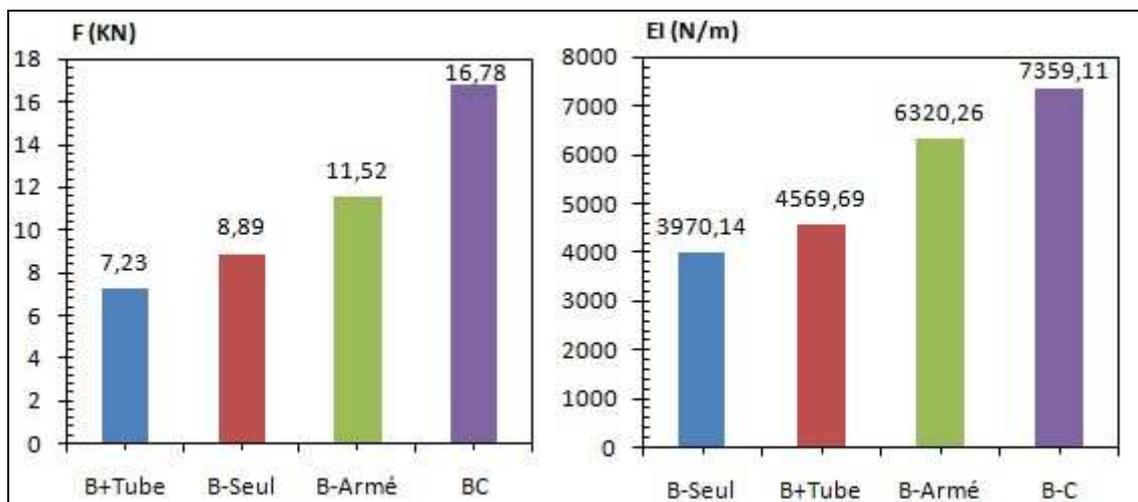


Figure. II.13. Histogramme des résistances et des rigidités flexionnelles

L'analyse des résultats nous renseigne sur l'efficacité de conception proposée, en termes d'apport positif en résistance (capacité portante), et en termes de ductilité (flèche de rupture très importante), et cela est dû à la conjugaison des performances mécaniques du tissu composite. La perte en rigidité due à l'extraction du béton par intégration de l'élément tubulaire est ré-améliorée grâce à l'effet du confinement du béton emprisonné à l'intérieur du tissu composite. Le composite permet aussi le passage d'un mode de rupture fragile à un mode de rupture ductile (énergie de rupture très importante).

Nous pouvons également observer, que la résistance mécanique à l'initiation de la fissuration dans le béton est nettement améliorée. Dans le cas de la poutre composite, la charge correspondante à l'initiation de la fissuration est de 13.22 kN. Par contre, dans le cas de la poutre de référence en béton armé l'initiation de la fissuration correspond à une charge de 9.67 kN. Cette amélioration est assujettie aux performances mécaniques du tissu composite.

II.4.2 Grandes poutres (Essai de flexion 4 -points)

Les résultats expérimentaux obtenus par les essais préliminaires montrent clairement l'apport de la technique proposée en termes de résistances mécaniques. Afin de mettre en évidence ces différents apports, et dans le but de valider les résultats des essais préliminaires, des essais de flexion 4-points, ont été réalisés sur des éléments poutres de grande portée. La nouvelle série de test est menée sur des poutres de dimensions $16*8*110\text{ cm}$, (Voir figure II.15). Les éléments tubulaires ont un diamètre de 4 cm et une portée de 1 m.

II.4.2.1 Comportement global de la poutre composite

La confrontation des courbes forces-déplacements des spécimens développés et des spécimens témoins en béton armé, de mêmes caractéristiques géométriques avec 2T8 placées dans les zones tendues en flexion est montrée sur la figure (II.14).

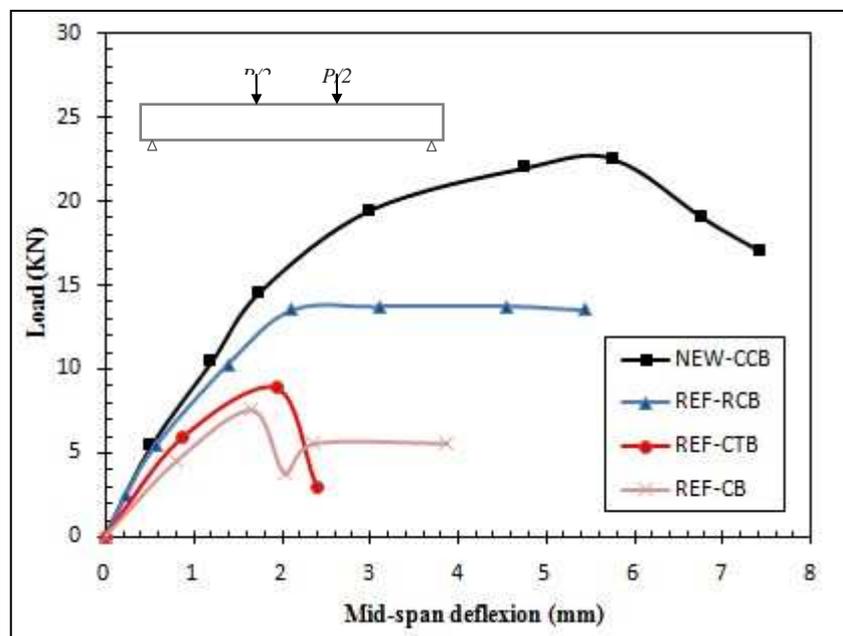


Figure II.14. Confrontation des courbes forces-déplacements

Ces courbes montrent l'évolution de la capacité portante en fonction du déplacement transversal à mi-travée de la poutre, qui régit le comportement mécanique global de la structure. Elles sont présentées en utilisant la courbe moyenne des résultats des trois éprouvettes correspondantes.

Les différents résultats obtenus par les essais préliminaires sont confirmés et validés sur des poutres à grande portée. Par conséquent, le comportement expérimental de la poutre composite peut être décrit selon trois phases :

- *Phase élastique* : cette étape est décrite par une droite linéaire, qui correspond à des charges et des déformations très réduites, l'élément poutre est dans un état non fissuré, cette phase de comportement est commune avec celle de la poutre de référence.

- *Phase de prés et post-fissuration* : cette phase correspond à l'apparition et à la propagation des fissures, les fissures se propagent dans la matrice béton, la conjugaison des performances mécaniques du tissu composite permet d'augmenter la charge engendrant l'apparition de la première fissure, ainsi que la mobilisation de la pression latérale de confinement permet de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion dans l'élément poutre
- *Phase plastique et rupture* : la matrice béton est complètement fissurée, la reprise des efforts est assurée par les armatures pour le spécimen témoin et par le tissu FRP pour la poutre composite. La rupture est atteinte pour une charge maximale de 14.12 KN et un déplacement vertical de 3.12 mm, par contre la capacité portante de la poutre développée est de 22.51 KN avec une flèche correspondante de 5.32 mm. L'apport positif en termes de capacité portante est de l'ordre de 60%, comparativement à la poutre de référence

II.4.2.2 Effet du confinement

Le mécanisme de rupture des poutres composites étudiées est illustré sur la figure (II.15) ci-dessous. Pour le cas du spécimen témoin en béton armé, la reprise des efforts est assurée par les armatures, les fissures de flexion se densifient jusqu'à la rupture. Pour la poutre composite la reprise des efforts est assurée par le tissu composite, les fissures se localisent au niveau de la zone comprimée, la rupture est atteinte par flexion. Une fissure oblique à 45° , qui traverse complètement la poutre, est observée, comme illustrée sur la figure (II.15.b).

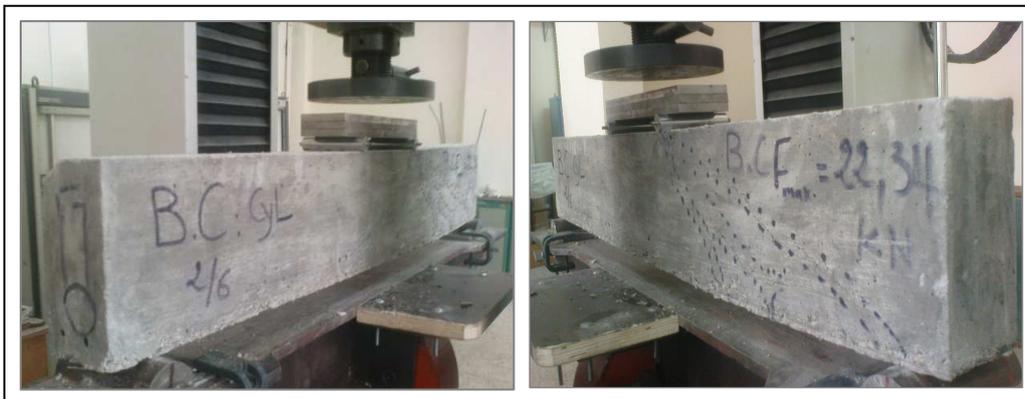


Figure. II.15. Dispositif du chargement des spécimens et modes de rupture

L'évolution du chargement extérieur appliqué entraîne une évolution significative du champ de fissuration dans les deux spécimens considérés (NEWCCB, REF-RCB). Ce champ apparaît en premier lieu dans les zones tendues en flexion pour les deux spécimens, puis il se propage avec une vitesse très importante selon des bielles inclinées dans la poutre de référence jusqu'à la rupture. Contrairement à la poutre composite, le champ des contraintes est localisé au niveau de la zone comprimée avec une vitesse de propagation réduite.

L'évolution des contraintes de cisaillement dues aux déformations radiales de l'élément tubulaire, dans le spécimen développé est empêchée, grâce à la mobilisation de la pression latérale du confinement due à la différence des rigidités entre les deux matériaux compatibles à savoir : le béton et le tissu composite. Les performances du tissu GFRP procure à la poutre

un seuil de résistance, grâce à son rôle capital dans la reprise des sollicitations. Les résultats obtenus ainsi que la quantification des différents apports sont résumés dans le tableau (II.12).

Tableau II.12 : Résultats des essais de la flexion 4-points

Spécimens / Paramètres	NEW-CCB	REF-RCB
Charge de 1 ^{ère} fissure (kN)	18.51	11.12
Charge max (kN)	22.51	13.38
Flèche de 1 ^{ère} fissure (mm)	1.81	1.53
Flèche au pic (mm)	5.32	3.12
Flèche à la rupture (mm)	7.33	5.43
Réduction du poids propre (%)	28.94	
Apport en résistance (%)	65.76	
Apport en ductilité (%)	70.51	

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé, les différentes démarches de l'investigation expérimentale, qui consistaient à étudier le comportement des poutres en béton composite, à travers une nouvelle conception, proposée, dans le but d'alléger la structure et de mieux reprendre les sollicitations dues aux chargements extérieurs. Les constituants des poutres composites utilisés dans notre travail, ainsi que leurs mises en forme et les différents essais de caractérisation réalisés sont également exposés.

Les différents résultats issus de l'analyse expérimentale montrent d'une part, l'efficacité de cette technique en termes d'apport positif en résistance et en ductilité, à travers la confrontation des courbes forces-déplacements. Le gain en résistance (capacité portante) est de l'ordre de 60%, le gain en ductilité est de l'ordre de 70% et le poids propre de la poutre est réduit de 20%, comparativement aux poutres classiques en béton armé. La réduction du poids propre peut être transformée en charges d'exploitations additionnelles. La vitesse de propagation des fissures de flexion dans la poutre considérée est largement réduite et cela est dû à la conjugaison des performances mécaniques des matériaux composites utilisés, ainsi qu'à la différence des rigidités entre les matériaux compatibles utilisés ; à savoir : le béton et le tissu composite.

Chapitre III
Simulation Numérique

Chapitre III : Simulation numérique

III.1 Introduction

Les simulations et les outils numériques sont aujourd'hui en plein essor, leur apport est très considérable en termes de performances et de productivité. Les modélisations numériques sont devenues quasi nécessaires dans le domaine de la recherche, elles couvrent des places importantes dans les différents secteurs (automobiles, aéronautiques, génie civil...) [81]. L'analyse par élément fini épargne les laboratoires de recherche des essais sur des modèles réduits, qui sont souvent trop coûteux, elle permet d'optimiser le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise, en utilisant les différentes hypothèses de la mécanique (l'endommagement, la rupture, l'élasticité, la plasticité, la dynamique...) [82-85]. Ainsi elle simule et améliore les performances des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles et hausse le niveau de la compétitivité.

Le problème des simulations numériques réside dans la difficulté de créer des modèles éléments finis, se rapprochant au maximum du comportement réel des structures étudiées. Si de nombreux progrès ont été fait dans la compréhension des mécanismes qui régissent le comportement mécanique des matériaux complexes, l'association de plusieurs matériaux compatibles au sein d'une structure, dans le cadre d'une simulation numérique du comportement global d'une poutre en béton-composite, mène à des modélisations délicates [76]. En revanche, l'étude ne sera validée qu'à partir d'essais expérimentaux.

En ce qui concerne notre travail de recherche et en appui sur la campagne expérimentale, une étude numérique est réalisée en utilisant le code Abaqus [86]. L'étude est basée sur la méthode des éléments finis, en s'inspirant des modélisations d'autres auteurs menées sur des poutres en béton renforcées par des composites FRP, disponibles dans la littérature [87-92]. La première partie de ce chapitre consiste à présenter le cadre théorique des calculs numériques des structures en béton, ainsi qu'un rappel du principe des puissances virtuelles. La seconde partie est consacrée à la modélisation du comportement des matériaux utilisés : un modèle permettant de tenir compte de la dissymétrie du comportement du béton en compression/traction, couplé avec l'endommagement, et un modèle élastique orthotrope pour les composites. La troisième partie est consacrée à la modélisation du comportement d'une poutre en béton-composite, dans un espace tridimensionnel sous chargement monotone de flexion jusqu'à la rupture.

Des confrontations avec les résultats expérimentaux sont effectuées, elles ont pour objectif de renfoncer et de valider les apports observés dans les expériences, dans l'analyse des phénomènes observés (effets de confinement, analyse des processus de fissuration et des modes de rupture). Tous les résultats obtenus, en termes de contrainte et de déformation et de dégradation de la rigidité sont discutés et présentés sous forme de graphiques force-déplacement et de cartographies d'évolution des endommagements en traction et en compression, pour mettre en valeur l'apport de la conception proposée, comparativement à des structures équivalentes en béton armé avec une conception traditionnelle.

III.2. Calcul et Aspect numérique

L'objectif d'un calcul numérique est de pouvoir vérifier ou prédire tel ou tel comportement, ce qui mène à la compréhension du fonctionnement global d'un système mécanique. La modélisation se positionne entre les aspects théoriques ou analytiques ainsi que les essais physiques pour faciliter le dimensionnement des structures. Les études concernent tous types de matériaux : les matériaux anisotropes, non homogènes comme le béton, ou orthotropes comme les composites, et peuvent s'appliquer à de nombreux phénomènes physiques intervenant dans la mise en forme des pièces ainsi que leur procédés de fabrication.

III.2.1 Modélisation classique

La modélisation d'un matériau est un moyen de transcrire son comportement et les lois qui le régissent. Il existe de nombreuses possibilités de modélisation : analytique, numérique et statistique. Comme une première approximation, la modélisation s'est limitée dans le domaine du comportement élastique linéaire des matériaux. Cette analyse reste dans le domaine de la théorie classique des poutres. En revanche, la nécessité d'introduire le calcul des réponses non linéaires des structures en béton a renouvelé l'intérêt de l'application d'approches mixtes à cette théorie des poutres. Avec l'initiation et la propagation des fissures dans le béton, les caractéristiques géométriques de la section changent et provoquent une redistribution des contraintes. Ce comportement évolutif peut être approché dans une solution non-linéaire.

Dans le cadre de notre étude numérique, les non-linéarités sont prises en considération dans le modèle élément fini. La complexité de ce modèle, en termes de la géométrie et des lois de comportement des matériaux utilisés formulées imposent l'utilisation d'une solution numérique. Etant donné l'intervention de l'outil informatique puissant et également des méthodes numériques très performantes, un code de calcul numérique à base de la méthode des éléments finis est utilisé.

III.2.2 Modélisation par éléments finis

L'analyse et la prévision de la ruine des structures en béton constituent un enjeu crucial dans le domaine du génie civil. Les modèles non linéaires actuellement utilisés ont montré leur capacité à décrire le comportement non linéaire du béton. Néanmoins la description des ouvertures de fissures et la prédiction du comportement réel de ces structures restent problématiques. Du cout, les premières applications des EF au calcul d'une structure en béton armé datent de la fin des années 1960 [92, 93] ; depuis, une énorme quantité de travaux de recherche est apparue dans la littérature.

La modélisation par éléments finis est basée sur une approche géométrique, une fois cette géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème. Cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Elle est basée sur l'idée de discrétiser la forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de formes géométriques simples (élément finis) interconnectés en des points appelés nœuds. Plusieurs choix sont alors possibles (Voir Figure III.1).

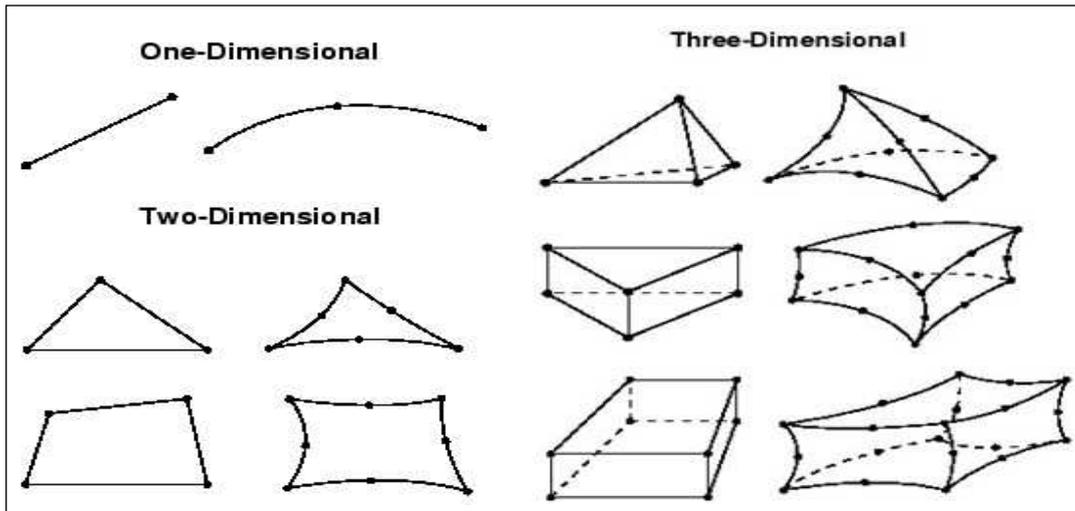


Figure III.1. Eléments finis utilisés pour discrétiser une forme complexe des structures

III.2.3 Rappel du principe des puissances virtuelles

Dans le cadre de la mécanique des milieux continus, soit un solide en équilibre de volume V de frontière Γ , soumis à des chargements extérieurs à savoir : des forces volumiques F_v , des efforts surfaciques F_s appliqués sur la partie Γ_s de sa frontière Γ et à des efforts de contact F_c exercés sur la portion Γ_c de Γ . Les conditions aux limites en déplacement, imposées au solide sur le domaine Γ_u sont représentées par le vecteur connu u^* .

Pour chaque point matériel du solide, l'équation du mouvement est donnée par :

$$\overline{\text{div}}\sigma + F_v = \rho\ddot{u} \quad (\text{III.1})$$

Avec \ddot{u} la dérivée seconde du vecteur du déplacement u . Connaissant les conditions initiales de chacun des champs, le problème consiste à déterminer les champs de contraintes $\sigma(x, t)$ et le déplacement u (de déformation $\varepsilon(x, t)$) à tout instant t et en tout point du solide.

La formulation éléments finis en déplacement est basée sur une introduction d'approximation spatiale de la solution. Pour se faire, on remplace les équations du mouvement par une forme faible équivalente en la multipliant par une fonction test. La fonction test adoptée dans le code Abaqus est un champ de vitesse virtuel arbitraire. Le développement mathématique conduit à l'écriture du Principe des Puissances Virtuelles.

$$-\int_V \delta \dot{E} dv + \int_V F_v \delta \dot{u} dv + \int_{\Gamma_s} F_s \delta \dot{u} d\Gamma + \int_{\Gamma_c} F_c \delta \dot{u} = \int_V \rho \ddot{u} \delta \dot{u} dV \quad (\text{III.2})$$

Où $\delta \dot{E}$ est l'accroissement virtuel des taux de déformations, lié à $\delta \dot{u}$ par les relations de compatibilité de l'équation (III.3) :

$$\dot{E} = \frac{1}{2} [\text{grad} \dot{u} + {}^t \text{grad} \dot{u}] \quad (\text{III.3})$$

L'équation non linéaire (III.2) doit être résolue par une méthode itérative en utilisant un développement approprié. La fonctionnelle élémentaire de l'équation (III.4) est obtenue en introduisant des approximations dans cette équation comme suit:

$$I_e = \left(M^e \ddot{u}^e + F_{\text{int}}^e - F_{\text{ext}}^e \right) \delta \dot{u}^e = 0 \quad (\text{III.4})$$

Avec M^e est la matrice masse élémentaire cohérente ou consistante dans le sens où elle est calculée avec les fonctions d'interpolations N_n de l'élément. F_{int}^e est le vecteur élémentaire des efforts internes et F_{ext}^e le vecteur des forces externes de l'élément. Ces trois grandeurs sont calculées par la relation (III.5) suivante :

$$M^e = \int_{V_e} \rho^T N_n N_n dV \quad (\text{III.5})$$

$$F_{\text{int}}^e = \int_{V_e} B_n^T \sigma dV$$

$$F_{\text{ext}}^e = \int_{V_e} N_n^T F_v dV + \int_{\Gamma_s^e} N_n^T F_s d\Gamma + \int_{\Gamma_c^e} N_n^T F_c d\Gamma$$

L'équilibre global du système mécanique est obtenu en assemblant toutes les fonctionnelles élémentaires I_e sur toute la structure, il est donné sous la forme suivante:

$$I = \left(M \ddot{u} + F_{\text{int}} - F_{\text{ext}} \right) \delta \dot{u} = 0 \quad (\text{III.6})$$

III.3. Modélisation numérique du comportement des matériaux

Un modèle numérique prédictif doit pronostiquer la réponse réelle de la structure considérée sous des sollicitations extérieures. Dans ce contexte, l'objectif consiste à trouver des modèles éléments finis disponibles dans la littérature, en se basant sur des données phénoménologiques qui décrivent le comportement des matériaux constituant notre structure composite. Le béton, les composites FRP et polymère sont considérés séparément et des lois de comportement pour chaque matériau sont formulées. Pour les matériaux, dont le comportement est non-linéaire (le béton), un opérateur qui agit sur le tenseur des rigidités est introduit, afin de mettre en évidence la dégradation des caractéristiques mécaniques sous sollicitation. Pour les matériaux, dont le comportement est linéaire orthotrope, les constantes élastiques nécessaires pour définir le tenseur de la matrice de rigidité et de souplesse sont identifiées.

III.3.1 Un modèle élastoplastique endommageable pour le béton

Le modèle numérique *Concrete Damaged Plasticity* [94-96] intégré dans le code élément finis Abaqus utilisé pour modéliser le comportement expérimental du matériau béton, permet de gérer les problèmes de plasticité couplés à l'endommagement. Il inclut les déformations irréversibles pour allier les avantages de la théorie de l'endommagement (modélisation des effets de la microfissuration sur la rigidité du matériau au niveau macroscopique) et de la théorie de la plasticité (modélisation des déformations irréversibles ou permanentes).

III.3.1.1 Cadre théorique pour la modélisation du béton

La principale difficulté de la modélisation du béton par élément finis est engendrée par la nature de la fissure. En effet, une fissure est une discontinuité géométrique, alors que la méthode des éléments finis est basée essentiellement sur la mécanique des milieux continus. Ce paradoxe entre le problème posé et l'outil de modélisation nécessite le développement de schémas spécifiques. Les travaux de modélisation de la fissuration ont introduit le concept de la fissure discrète et le concept de la fissure répartie.

- **Modèle de la fissure discrète**

Le modèle de la fissure discrète introduit une discontinuité géométrique réelle dans le maillage d'éléments finis à l'endroit de l'amorce de la fissure. Le premier modèle numérique à base des éléments finis du matériau béton-armé qui a introduit l'effet de la fissuration a été développé par *Ngo et Scordelis* [97]. Ces auteurs ont effectué une analyse linéaire des poutres en béton armé avec des modèles de fissures prédéfinies. Dans ce cadre, les fissures ont été modélisées en séparant les points nodaux du maillage. Le concept de la fissuration discrète se présente comme étant l'approche qui reflète le mieux l'état réel d'endommagement final d'une structure en béton.

- **Modèle de la fissure répartie**

La nécessité d'un modèle numérique permettant une génération automatique des fissures et une généralité complète de leur orientation, sans le besoin de redéfinir la topologie d'élément fini, a mené la majorité d'investigateurs à adopter le modèle de fissure répartie. Ce modèle représente beaucoup de fissures finement espacées perpendiculaires à la direction d'effort principal. La théorie de la plasticité assimile les microfissures du béton à des déformations irréversibles indépendantes du temps. Elle représente les phénomènes physiques microscopiques par des variables internes, en se basant sur une approche qui introduit un milieu continu homogénéisé équivalent au milieu réel.

Le modèle de fissure répartie est utilisé pour la première fois par *Rashid* [98]. Ce dernier a modélisé le béton fissuré comme étant un matériau élastique orthotrope avec une réduction du module d'élasticité dans la direction normale du plan de fissure. Avec cette approche les discontinuités locales de déplacement sont réparties sur un secteur attaché dans l'élément fini et le comportement du béton fissuré peut être représenté par les relations moyennes de contrainte-déformation.

III.3.1.2 Théorie d'endommagement

La mécanique d'endommagement sert à modéliser les effets des microfissures d'un matériau. Cette modélisation est bien adaptée à la description des non linéarités survenant dans le béton ou dans les matériaux types connus comme des matériaux fragiles. Le développement des modèles basés sur cette théorie, nécessite la définition de la règle d'endommagement qui caractérise le taux de fissuration matériel et son orientation. Le modèle proposé par *Lemaitre* [99] est considéré parmi les premiers modèles utilisant la théorie d'endommagement isotrope. Ce modèle est basé sur la définition de la contrainte

effective, supposant que la contrainte réelle qui s'applique sur le matériau sain, est supérieure à la contrainte macroscopique (Voir Figure III.2). Cette notion s'exprime souvent par le principe d'équivalence en déformation.

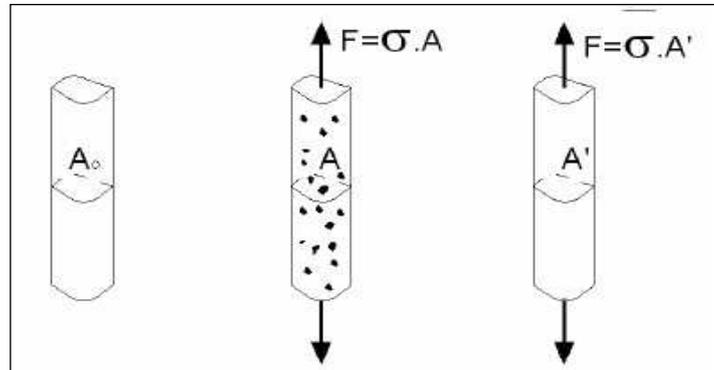


Figure III.2. Définition de la contrainte effective d'après Murakami [100]

D'après la théorie classique de l'endommagement, l'état de fissuration du béton est décrit par une variable d'état d :

- $d = 0$: correspond à un état sain du matériau.
- $d = 1$: correspond à une rupture observée dans le cadre du volume élémentaire.

En réalité, la rupture aura lieu pour une valeur de d qui est inférieure à 1. La réduction de contrainte est due principalement à la microfissuration du béton, alors la contrainte effective s'écrit comme suit:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{(1-d)} \sigma \quad (\text{III.7})$$

Avec l'évolution de la microfissuration, la surface qui résiste à la charge appliquée décroît. L'expression d'endommagement unidimensionnel est donnée par l'expression (III.8) :

$$d - 1 = \frac{E'}{E} = \frac{A'}{A} \quad (\text{III.8})$$

Où (E et E'), (A et A') sont les modules d'élasticité, et les sections du matériau sain et endommagé, respectivement. La loi d'élasticité unidimensionnelle s'écrit comme suit :

$$\sigma = E (1-d) \varepsilon \quad (\text{III.9})$$

Quelques modèles basés sur la mécanique de l'endommagement sont systématisés à la base du rang de la variable qui décrit l'endommagement. Si on considère un matériau isotrope dans l'hypothèse de l'endommagement isotrope, il est possible d'utiliser un modèle qui est décrit par une variable scalaire. En revanche, l'expérience montre que, pour un matériau initialement isotrope, les défauts sont orientés par le chargement, dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser une variable tensorielle pour décrire les endommagements dans les différentes directions.

III.3.1.3 Le modèle Concrete Damaged Plasticity

Le modèle « *Damaged plasticity for concrete and other quasi-brittle materials* » fournit une capacité générale pour la modélisation du béton et d'autres matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures. Il utilise le concept d'élasticité isotrope endommagé en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique du béton. Le modèle considère deux critères de rupture : La fissuration en traction et le broyage en compression. Ce modèle se réfère à un équivalent de déformations plastiques en traction, et en compression. Les sections suivantes décrivent les principales hypothèses concernant ce modèle de comportement mécanique du béton.

- **Loi du comportement : compression/traction :**

Pour décrire le caractère irréversible des déformations ε^p , la théorie de la plasticité est utilisée. La partition de la déformation totale est effectuée en une partie élastique et une partie plastique. Les déformations élastiques mettent en œuvre une énergie dite élastique réversible qui est donc restituée lors de toute décharge, tandis que les déformations plastiques conduisent à la dissipation d'une énergie irréversible.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (\text{V.10})$$

Dans le cadre d'une théorie de petite déformation, le tenseur de déformation ε_{ij} est obtenu à partir du premier gradient du champ de déplacement $u = (u_x, u_y, u_z)$ tel que :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (\text{III.11})$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1-d) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (\text{III.12})$$

Avec D_0^{el} est la matrice de raideur élastique, et $D^{el} = (1-d) D_0^{el}$ représente la matrice de raideur après endommagement, $\bar{\sigma}$ est le tenseur de contrainte effective (voir Figure III.2). L'utilisation du principe de la contrainte effective conduit à une relation liant la contrainte réelle à la contrainte effective donnée par l'équation (III.7).

Une nouvelle relation peut être écrite alors, en liant le tenseur de contrainte effective au tenseur de contrainte élastique :

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (\text{III.13})$$

Dans le cas de la compression uniaxiale, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique (partie 1 de la Figure III.3). Dans le domaine plastique, la réponse est généralement caractérisée par un écrouissage (Partie 2) suivi d'adoucissement (Partie 3) au delà de la contrainte de rupture.

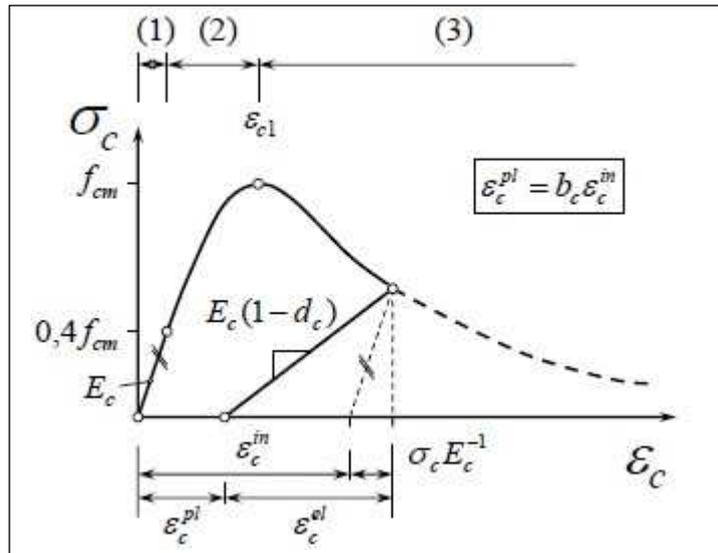


Figure III.3 : Réponse du modèle à la compression simple [101]

Dans le cas de la traction uniaxiale, la courbe contrainte-déformation suit une relation linéaire élastique jusqu'à ce que la valeur de la contrainte de rupture soit atteinte. La contrainte de rupture correspond à l'apparition de microfissures dans le béton. Au delà de cette contrainte, la formation de micro fissures est représentée macroscopiquement avec une réponse de ramollissement de contrainte-déformation, qui induit à la localisation des déformations dans le béton. La réponse post-élastique du modèle à la traction est illustrée sur la figure (III.4)

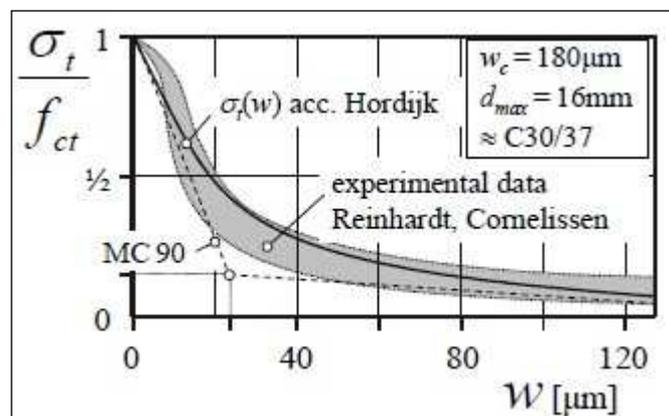


Figure III.4 Réponse du modèle à la traction (post-élastique) [101]

Comme le montrent ces figures, lorsque l'échantillon de béton est déchargé de tout point de l'adoucissement, la rigidité élastique du matériau est endommagée ou dégradée. La dégradation de la rigidité est caractérisée par deux variables d'endommagement qui sont en fonction des déformations plastiques et des variables prédéfinies ;

Finalement, les relations contrainte-déformation sous chargement de compression uniaxiale à introduire dans le code de calcul numérique sont calculées en fonction des paramètres intrinsèques du béton, identifiés par les essais mécaniques. Elles sont données

respectivement, pour les étapes de comportement illustrées par la figure (III.3), par les relations suivantes :

$$\sigma_{c(1)} = E_c \varepsilon_c \quad (\text{III.14a})$$

$$\sigma_{c(2)} = \frac{E_c \frac{\varepsilon_c}{f_c} - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^2}{1 + (E_c \frac{\varepsilon_{c1}}{f_c} - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} f_c \quad (\text{III.14b})$$

$$\sigma_{c(3)} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_c \varepsilon_{c1}}{2 f_c} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\gamma_c \varepsilon_c^2}{2 \varepsilon_{c1}} \right)^{-1} \quad (\text{III.14c})$$

Avec E_c et f_c sont le module de Young instantané et la contrainte maximale en compression. Dans le cas de la traction simple, la relation contrainte-déformation est linéaire élastique jusqu'à ce que la valeur de la contrainte de rupture soit atteinte. Au-delà, cette relation s'écrit comme suit :

$$\frac{\sigma_t(w)}{f_t} = \left[1 + (c_1 w / w_c)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (\text{III.15})$$

Les variables d'endommagement qui caractérisent l'état de fissuration du béton respectivement en compression et en traction sont données comme suit :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (\text{III.16})$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (\text{III.17})$$

Les paramètres des équations (III.14-III.17) sont dénotés et récapitulés dans le tableau (III.1)

➤ *Récupération de rigidité et paramètres du modèle*

Le modèle numérique utilisé, tient compte de la récupération de la rigidité sous comportement cyclique uniaxial (Voir Figure III.6) par le biais de la formule suivante :

$$(1 - d) = (1 - S_t d_c) (1 - S_c d_t) \quad (\text{III.18})$$

Où S_t et S_c sont des fonctions de l'état de contrainte qui sont introduites dans les effets de récupération de rigidité du modèle associées à un inversement des contraintes.

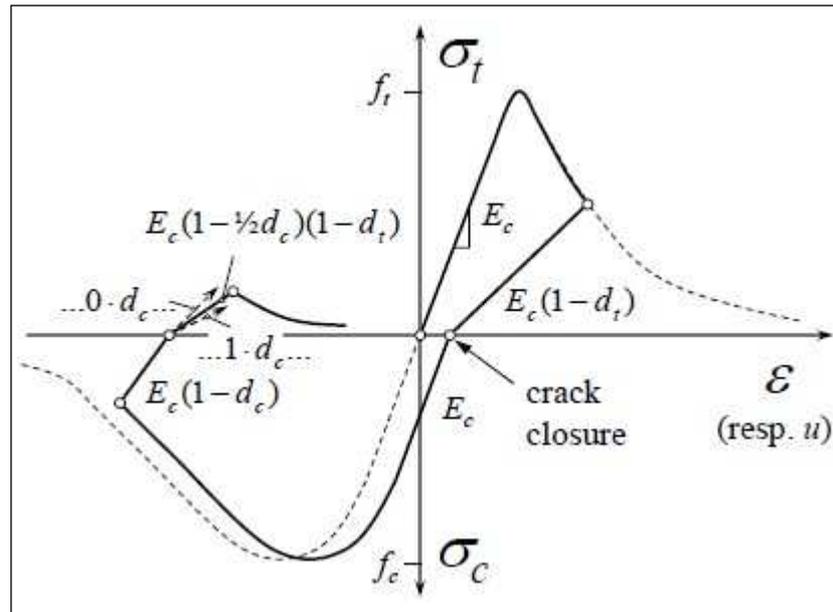


Figure III.5. Récupération de rigidité sous chargement monotone uniaxial [101]

Les facteurs poids sont supposés être des propriétés matérielles, ils contrôlent la récupération de la rigidité lors de l'inversion de charge : traction-compression.

$$\begin{aligned} S_t &= 1 - w_t r^*(\sigma_{11}); & 0 \leq w_t \leq 1 \\ S_c &= 1 - w_c (1 - r^*(\sigma_{11})); & 0 \leq w_c \leq 1 \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

$$\text{Où } r^*(\sigma_{11}) = H(\sigma_{11}) = \begin{pmatrix} 1 & \text{si } \sigma_{11} \succ 0 \\ 0 & \text{si } \sigma_{11} \prec 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.20})$$

w_t et w_c sont des paramètres matériels qui contrôlent la restitution de la rigidité après un cycle traction compression comme illustré sur la figure (III.5).

Si : $w_c = 1$, le matériau a récupéré sa rigidité et retrouve son module d'élasticité initial E_0

Si : $0 < w_c < 1$, la récupération est partielle ;

Si : $w_c = 0$, la récupération est nulle.

A cause de la forte localisation des déformations, ce modèle, diverge rapidement dès que le critère de fissuration est atteint. Pour éviter cette divergence, les paramètres principaux à définir soigneusement sont : la loi contrainte-déformation (puisque cette dernière permet de calculer les valeurs d'écroutissage) qui ne doit pas poser de problème d'intégration numérique et l'utilisation des énergies de fissuration qui offrent à l'algorithme du modèle une bonne capacité de convergence [102]. Les paramètres du modèle numérique du béton utilisé dans notre étude numérique sont représentés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1. Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton.

Paramètres		Dénomination
Notations	Valeur	
f_c (Mpa)	30.57	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.3 f_c$ (Mpa)	9.17	Contrainte élastique en compression
ϵ_{c1} (‰)	2.2	Déformation au pic en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06 f_c$ (Mpa)	2.43	Contrainte maximale en traction
ϵ_{tm} (‰)		Déformation correspondante à f_{t0}
$E = 11000(f_c)^{1/3}$ (Mpa)	34394.67	Module de Young instantané
$a_c = 2 \frac{f_c}{f_{c0}} - 1 + 2 \sqrt{\left(\frac{f_c}{f_{c0}}\right)^2 - \frac{f_c}{f_{c0}}}$	10.96	Paramètre pilotant la courbe de compression avant le pic
$b_c = f_{c0} \frac{l_c}{G_{fc}} \left(1 + \frac{a_c}{2}\right)$	82.72	Paramètre pilotant la courbe de compression après le pic
a_t	0.5	Paramètre pilotant la courbe de traction avant le pic
$b_t = f_{t0} \frac{l_c}{G_{ft}} \left(1 + \frac{a_t}{2}\right)$	415.14	Paramètre pilotant la courbe de traction après le pic
w_c (µm)	180	L'ouverture maximale des fissures
ν	0.19	Coefficient de poisson
ψ	32°	Angle de dilatation
a_f	1.16	Rapport entre contrainte bi-axiale/uniaxiale
a_e	0.1	Paramètre du potentiel d'écoulement

III.3.2 Un modèle élastique-Orthotrope pour les composites

Les matériaux composites ont un comportement particulier, ceci est dû essentiellement à deux facteurs : le premier résulte de son comportement anisotrope dans les couches élémentaires et le deuxième facteur dérive de la stratification qui consiste en l'empilement de plusieurs couches. Le but de cette section est de présenter le comportement élastique des matériaux orthotropes utilisés dans la nouvelle conception proposée.

Les composites orthotropes, à l'image des tissus FRP de la figure (III.6) sont des composites dont le renfort est généralement constitué de fils unidirectionnels croisés à 90°. Les symétries orthogonales, deux à deux des plans font que ces matériaux se comportent, du point de vue élastique, comme les matériaux orthotropes. D'une manière générale, l'architecture classique du tissu FRP à fibres longues confère au matériau trois axes orthogonaux de symétrie.

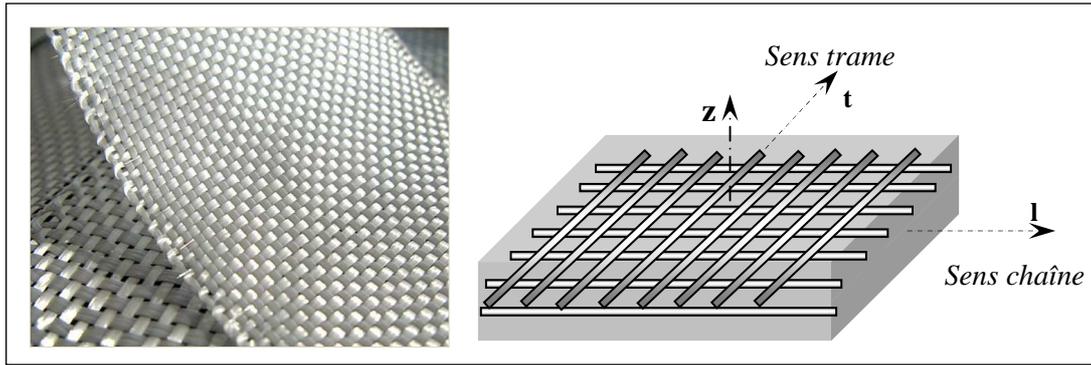


Figure III.6. Pli d'un matériau composite orthotrope

III.3.2.1 Notion d'élasticité

Dans le cadre de l'élasticité linéaire, le comportement d'un matériau considéré continu, peut être décrit par la loi de Hooke généralisée, qui se présente sous une forme reliant le tenseur des contraintes $\overline{\sigma}$ au tenseur des déformations $\overline{\varepsilon}$ par la matrice de rigidité [C]. La loi de comportement a la forme de l'équation (III.21):

$$\Delta\sigma_{ij} = E_{ijkl}\Delta\varepsilon_{kl} \quad (\text{III.21})$$

III.3.2.2 Matrice de rigidité et de souplesse

La loi de comportement élastique d'un composite orthotrope peut être donnée en fonction des constantes de rigidité C_{ij} ou des constantes de souplesse S_{ij} . La matrice de rigidité s'écrit, après simplification due à la symétrie par rapport à trois plans de symétrie, comme suit:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (\text{III.22})$$

Les coefficients de la matrice de souplesse peuvent être obtenus par l'inversion de la matrice de rigidité : $S = C^{-1}$. La loi de Hooke, en utilisant la matrice de rigidité, s'écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}. \quad (\text{III.23})$$

La loi de comportement en fonction de la matrice de souplesse est donnée par l'équation (III.24). Les constantes de rigidité permettant d'évaluer les coefficients de la matrice de rigidité et de souplesse sont données dans le tableau (II.8) du chapitre précédent.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

III.3.2.3 Mécanismes et critères de rupture

Les critères de rupture interactifs permettent d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des composites. La ruine des matériaux composites n'est pas initiée par un unique mécanisme d'endommagement élémentaire, mais elle est la conséquence de l'accumulation de plusieurs modes de dégradation [20].

Dans notre étude, les critères interactifs de *Hill-Tsai* et *Tsai-Wu* sont utilisés, puisque les critères de la contrainte maximale et de la déformation maximale ne prennent pas en compte les interactions entre les contraintes principales et les déformations principales et supposent que les mécanismes élémentaires de la rupture sont des phénomènes indépendants.

➤ Critère de Hill-Tsai

Ce critère est surtout utilisé pour les composites à fibres continues unidirectionnelles. Tsai suppose que le point qui correspond à $\sigma_{11} = \sigma_{22} = Y$, $\sigma_{12} = 0$ est sur la surface de rupture. Il y a donc ruine du matériau lorsque les contraintes normales σ_{11} et σ_{22} atteignent la tension ultime transversale Y (sens normal aux fibres). L'état limite de contraintes n'est pas atteint tant que l'inégalité est vérifiée.

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{X_{LT}}\right)^2 = 1 \quad (\text{III.25})$$

➤ Critère de Tsai-Wu

L'augmentation du nombre de paramètres des équations théoriques (III.25) peut rendre les résultats théoriques plus proches des résultats expérimentaux. En ce qui concerne notre modélisation numérique, l'expression suivante est admise comme critère de rupture.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad i, j = 1 \dots 6 \quad (\text{III.26})$$

Ou les paramètres F_i et F_{ij} caractérisent le matériau FRP utilisé. Ils dépendent des contraintes à la rupture X et Y déterminées par des essais mécaniques, données dans le chapitre précédent.

III.4. Simulation avec Abaqus

Avant d'utiliser le code de calcul de manière opérationnelle, il est essentiel d'explorer ses capacités et surtout ses limites à travers des tutoriaux qui sont à sa disposition. Abaqus est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécaniques, il est développé dans le but de simuler des phénomènes physiques. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement le comportement expérimental des matériaux et de jouer sur certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d'en optimiser leur conception. Deux tâches sont alors à accomplir : générer le fichier de données (prétraitement), et exploiter les résultats dans un autre fichier (post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe: elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux et des chargements suivant une syntaxe précise.

III.4.1 Présentation des modèles

Dans le cadre de la présente étude numérique basée sur la méthode des éléments finis, la modélisation des poutres est menée dans un espace tridimensionnel (3D) : Voir figure (III.7). Les analyses numériques sont de type non linéaire, et permettent de déterminer le mode de ruine et le niveau de charge correspondant. Pour cela, des poutres en béton-composite sous chargement monotone de flexion ont été modélisées et confrontées avec des poutres en béton armé avec (deux (02) barres de $\phi 10$ dans la zone tendue. Ces armatures sont supposées suivre un comportement élastoplastique parfait, avec écrouissage isotrope basé sur le critère tridimensionnel des contraintes de Von Mises [103].

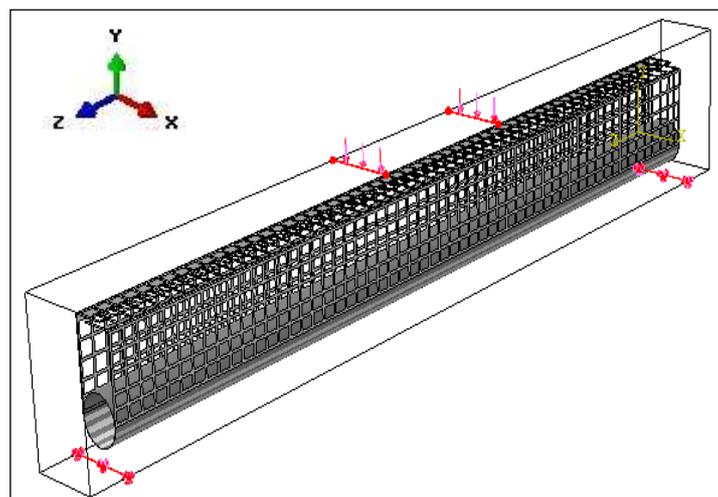


Figure. III.7. Modélisation tridimensionnelle (3D) d'une poutre en béton-composite

Les essais de caractérisation des différents matériaux utilisés (Voir le chapitre précédent) dénotent des comportements qui ont été pris en considération, à travers la considération des différents paramètres mécaniques intrinsèques identifiés lors des essais. Les simulations que nous allons conduire vont permettre d'une part : de réaliser une étude comparative du comportement mécanique des éléments étudiés, et d'autre part de vérifier la pertinence des résultats expérimentaux à travers le modèle élément fini proposé.

III.4.2 Géométries et conditions aux limites

Les caractéristiques géométriques et les conditions aux limites et de chargement sont illustrées sur la figure (III.9). Toutes les dimensions ainsi que toutes les propriétés mécaniques des différents matériaux constitutifs représentées dans le chapitre précédent ont été soigneusement introduites, afin de prendre en compte tous les paramètres d'étude et de valider le modèle élément finis proposé. Le tissu composite et l'élément tubulaire de forme circulaire de la figure (III.8) sont modélisés séparément avec leurs propriétés mécaniques et géométriques, en suite, ils sont intégrés dans la matrice continue en béton.

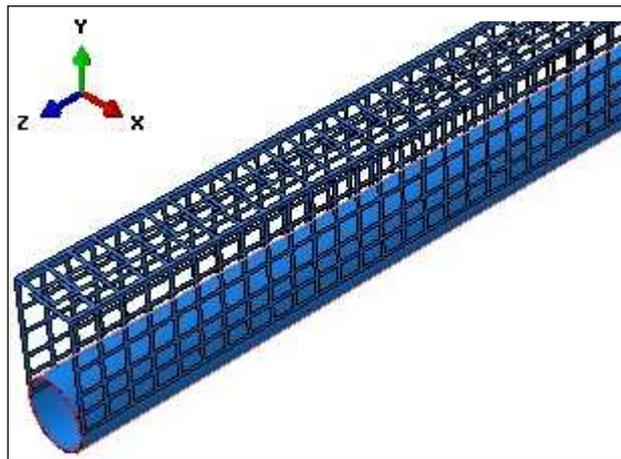


Figure. III.8. Modélisation géométrique de l'enveloppe en composite

Comme les essais réalisés au laboratoire et avec des conditions de chargement similaires, les poutres composites modélisées sont soumises à un chargement monotone de flexion quatre-points croissant jusqu'à la rupture, avec une incrémentation de charge de 10^{-3} . Les points d'application du chargement, ainsi que les distances entre charges et entre appuis, sont illustrés par la figure (III.9).

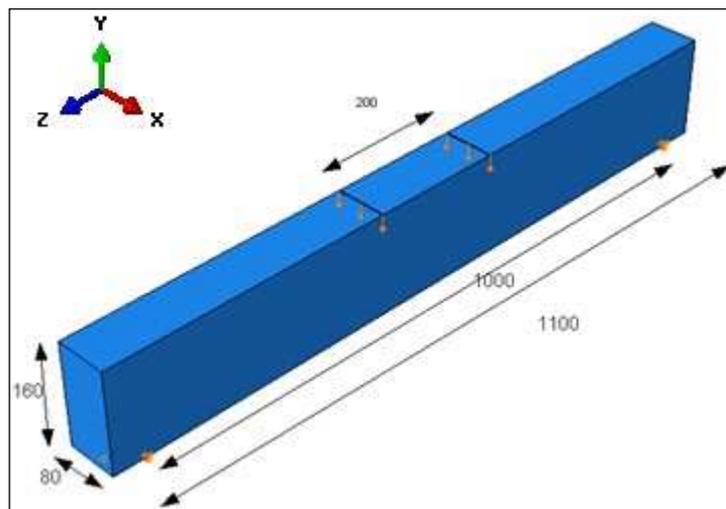


Figure. III.9. Poutre en béton composite sous chargement de flexion

III.4.3 Maillage et éléments finis

La génération d'un maillage est la fondation des résultats numériques, habituellement, seule les zones susceptibles de développer des phénomènes significatifs sont maillées finement, le reste de la structure est alors maillée plus grossièrement. Il est possible de choisir la technique de maillage, le type des éléments et leur forme (Voir Figure III.1). Mais l'utilisation d'éléments de même taille, nous affranchit de l'influence de leur taille sur les résultats numériques. De plus, la densité de notre maillage doit être optimale, afin de réduire, autant que possible, la taille du problème et le temps d'exécution.

Les poutres sont maillées plus finement dans les endroits susceptibles à la rupture. Des éléments finis tétraédriques éléments linéaires solides (3D) HEX8 (éléments d'Abaqus, composés de huit nœuds, ayant chacun six degrés de liberté) avec une formulation lagrangienne (C3D8) sont utilisés pour mailler la poutre en béton avec une dimension de 2 cm dans les trois directions. Le tissu composite est maillé par des éléments finis quadratiques (2D) à quatre nœuds avec 8 degrés de liberté, avec une dimension d'un centimètre dans les deux directions, ce qui assure un maillage très raffiné.

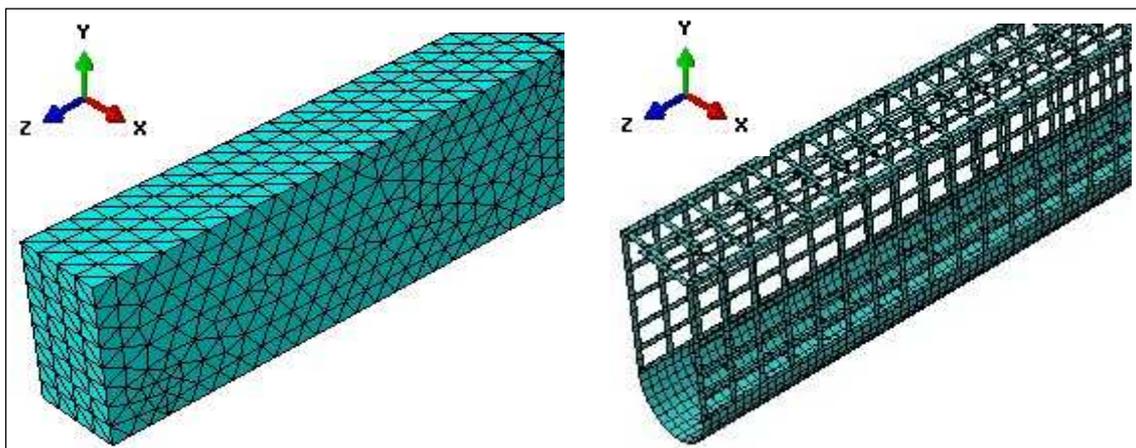


Figure III.10 Maillages adoptés lors des simulations numériques des poutres composites

III.4.5 Modélisation du contact Béton/Composites

Le contact entre les éléments tubulaires et l'enveloppe composite est modélisé par une technique classique de pénalité [104] avec une représentation de type « maître-esclave ». La condition d'impénétrabilité des nœuds esclaves dans la surface maître se traduit alors par un effort normal pénalisant le long de la surface de contact. Le comportement de l'adhésif est considéré comme élastique isotrope jusqu'à rupture. La couche adhésive entre le tissu composite FRP et l'élément tubulaire forment le joint adhésif. L'interaction entre les éléments tubulaires enveloppés par l'enveloppe FRP et ceux du béton est assurée par la fonction EMBEDDED REGION d'Abaqus.

La décohésion dans le système composite étudié peut avoir lieu soit dans les différentes composantes, soit à l'interface entre les composantes. La fissuration de l'interface suit la trajectoire qui nécessite le minimum d'énergie. La rupture à l'interface n'a lieu que dans le cas d'une mauvaise préparation de la surface de contact.

III.5. Résultats et interprétation

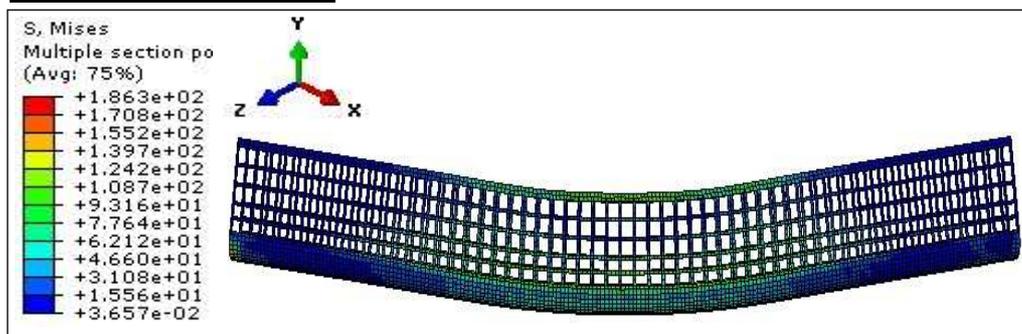
Une étude comparative est réalisée entre les résultats de la simulation numérique et ceux de la campagne expérimentale, afin de valider le modèle élément fini proposé. Pour se faire, les résultats de la simulation en termes d'évolution des contraintes et des déformations et de dégradation de la rigidité sont présentés et discutés, ces résultats sont confrontés en les courbes forces-déplacements, contraintes-déformations et forces-dommages.

III.5.1 Evolution des contraintes

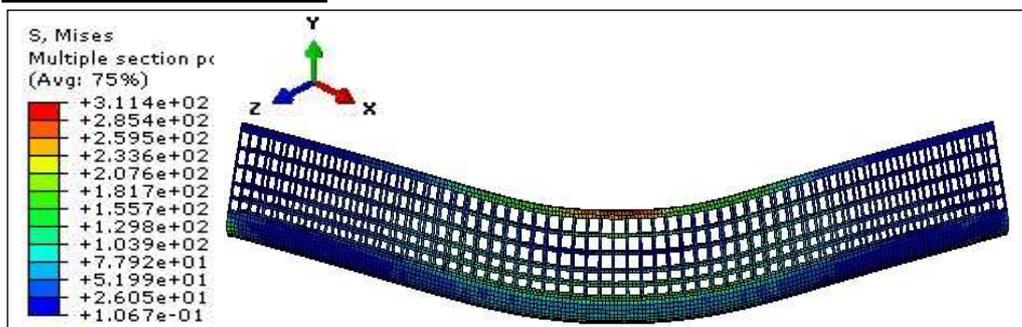
Les cartographies de la figure (III.11) et (III.12) montrent l'évolution des contraintes de Von Mises et de Hill-Tsai respectivement dans l'enveloppe FRP, pour divers valeurs de l'incrément de charge. Elles ont pour objectif de renfoncer et de valider les apports de l'expérience dans l'analyse des phénomènes observés et notamment l'effet du confinement.

➤ *Contrainte de Von Mises*

Pour un incrément de 0.25



Pour un incrément de 0.75



Pour un incrément de 1

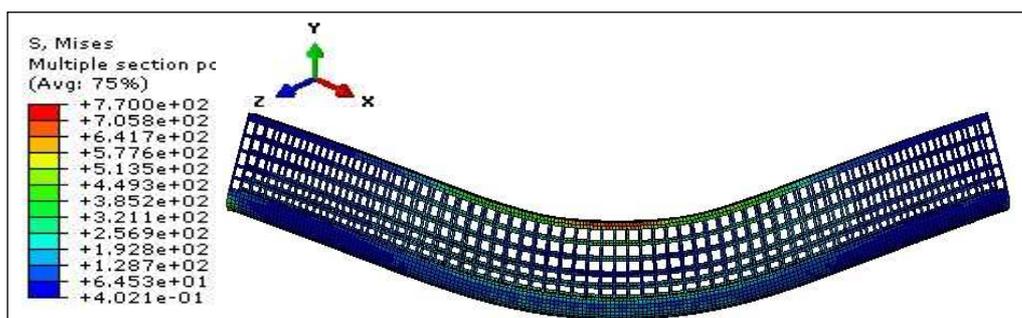


Figure III.11 Evolution des contraintes de Von-Mises dans le tissu composite FRP

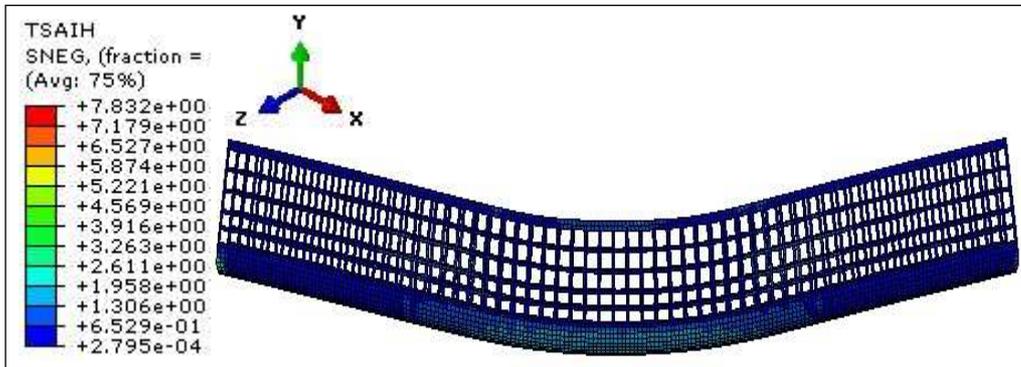
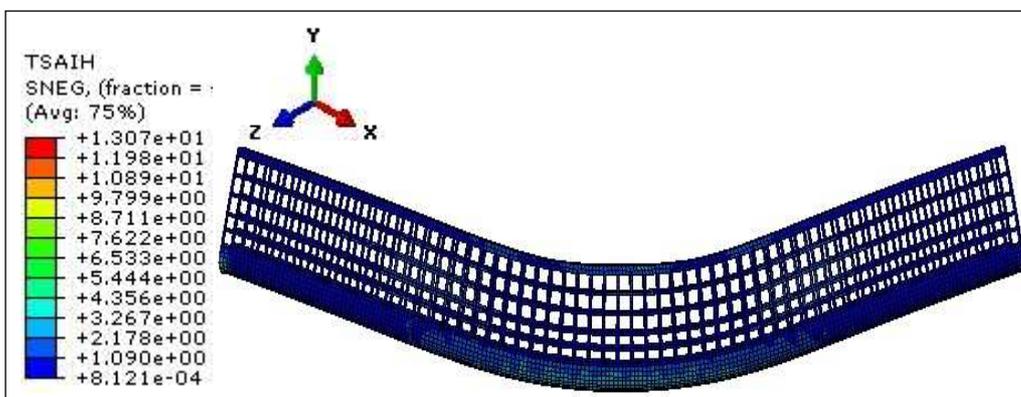
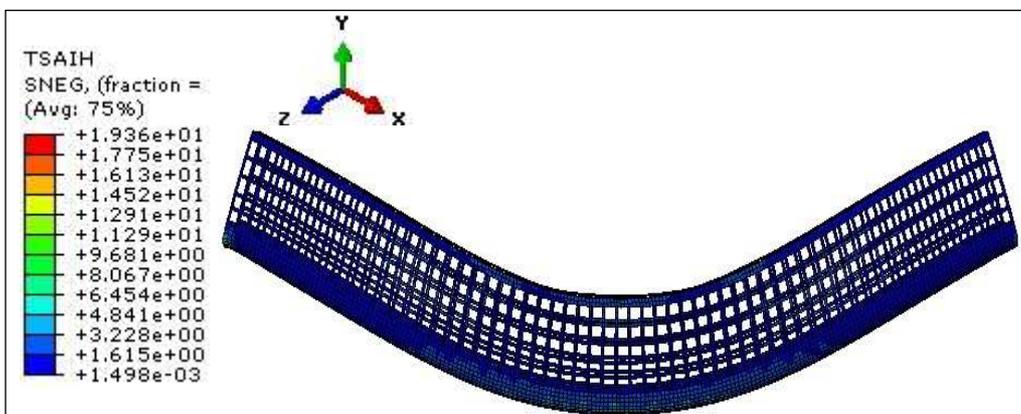
➤ *Contrainte de Hill-Tsai*Pour un incrément de 0.25Pour un incrément de 0.75Pour un incrément de 1

Figure III.12 Evolution des contraintes de Hill-Tsai dans le tissu composite FRP

L'évolution du chargement extérieur appliqué entraîne une évolution significative du champ des contraintes dans les deux spécimens considérés. Le champ de contrainte apparaît en premier lieu dans les zones tendues en flexion pour les deux spécimens, puis il se propage avec une vitesse très importante selon des bielles inclinées dans la poutre de référence jusqu'à la rupture. Contrairement à la poutre composite développée, qui présente un certain de seuil de résistance, le champ de contrainte est localisé au niveau de la zone comprimée, la vitesse de propagation du champ des contraintes est largement réduite.

L'évolution des contraintes de cisaillement dues aux déformations radiales de l'élément tubulaire, dans le spécimen développé est empêchée, grâce à la mobilisation de la pression latérale du confinement.

Les performances mécaniques du tissu GFRP procure à l'élément poutre un seuil de résistance. Afin de satisfaire et de vérifier ces conclusions, l'évolution des contraintes dans la zone comprimée et tendue du tissu composite FRP en fonction des déformations est représentée sur la figure (III.14).

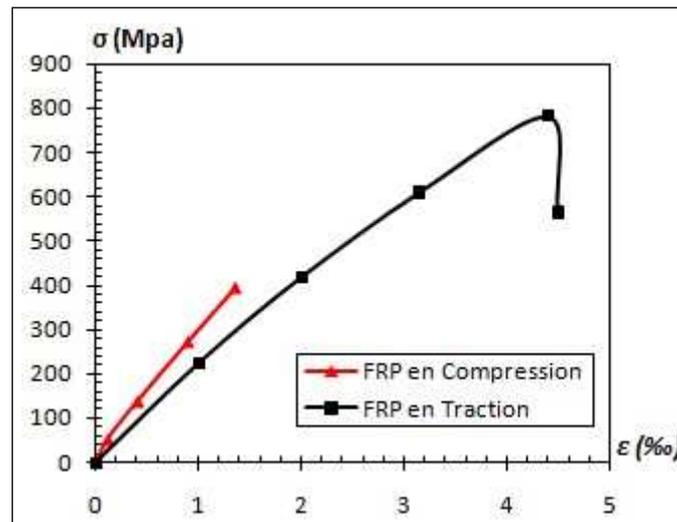


Figure III.13. Confrontation des courbes contraintes-déformations

Les courbes de la figure présentent un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture, le tissu FRP est caractérisé par une contrainte de rupture en traction de l'ordre de 800 Mpa, et une contrainte de rupture en compression de l'ordre de 400 Mpa avec une déformation correspondante modérée.

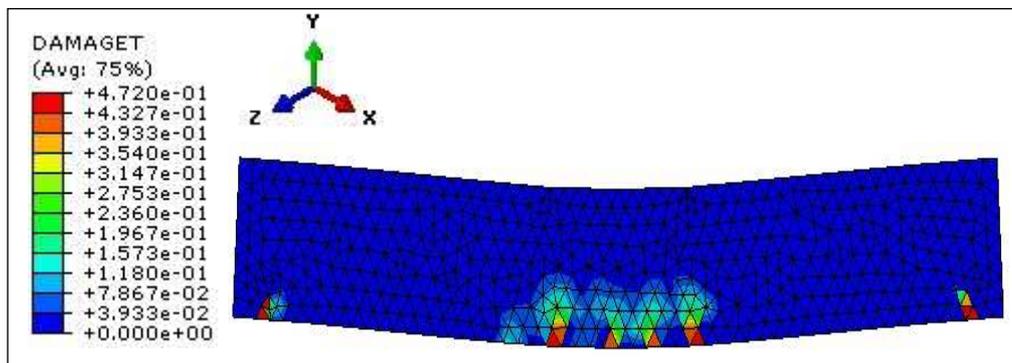
Ces résultats numériques nous renseignent sur le rôle capital de l'enveloppe composite dans la reprise des sollicitations et son influence sur les modes de rupture. Ils mettent en évidence la conjugaison des performances mécaniques du tissu composite, pour empêcher la propagation du champ de contrainte dans la direction de la portée et de la hauteur de la poutre composite.

III.5.2 Evolution des dommages

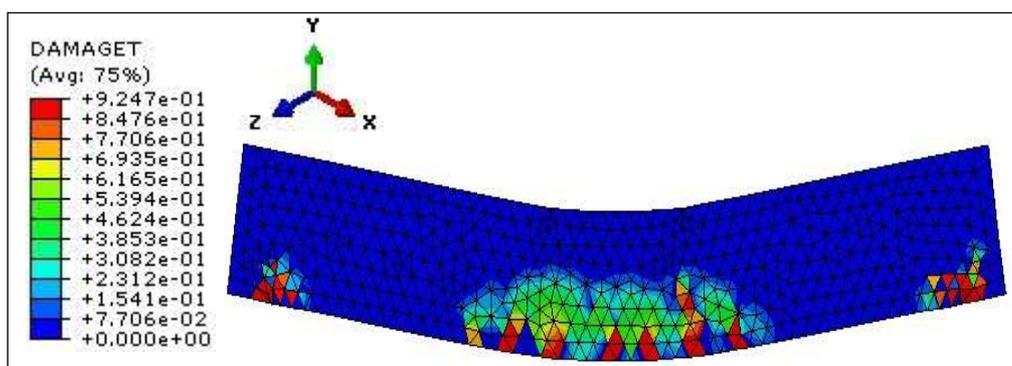
Le modèle élément fini proposé pour la modélisation du comportement mécanique du béton permet de représenter l'évolution des fissures (propagation des fissures) dans les éléments considérés. Une analyse des processus de fissuration et des modes de rupture est réalisée, à travers l'évolution des dommages dus à la compression et à la traction dans les poutres en béton composite, pour différents taux de chargements appliqués. Les résultats sont représentés par les cartographies des figures (III.14) et (III.15) ci-dessous.

➤ *Les dommages de traction*

Pour un incrément de 0.25



Pour un incrément de 0.75



Pour un incrément de 1

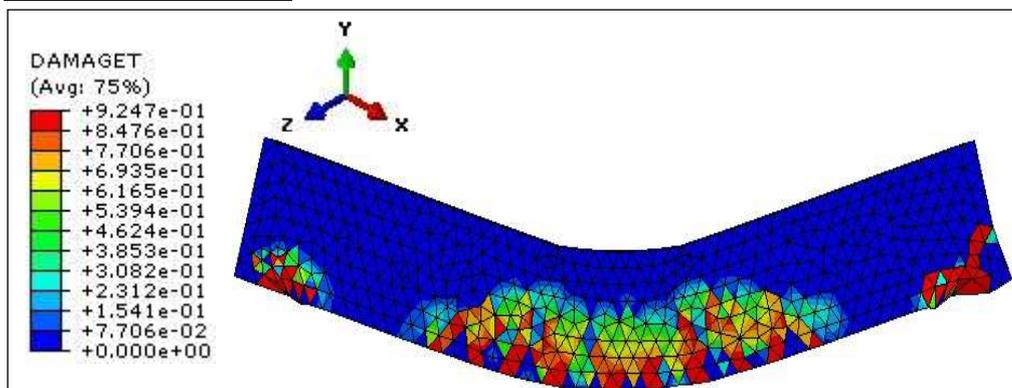
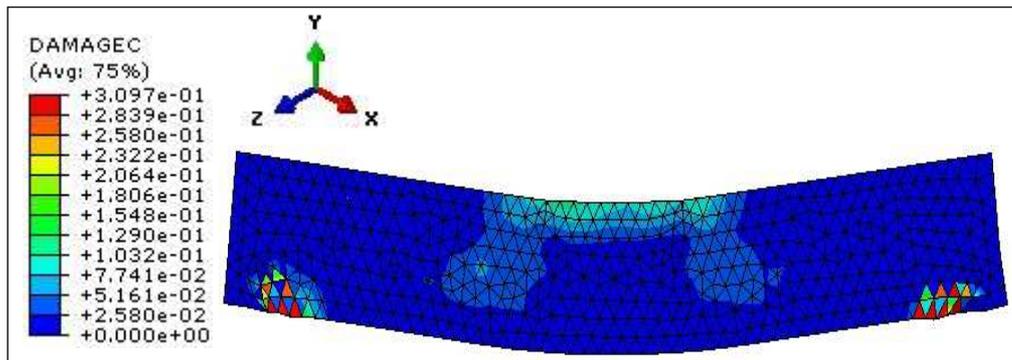


Figure III.14. Représentation de l'évolution des dommages dus à la traction.

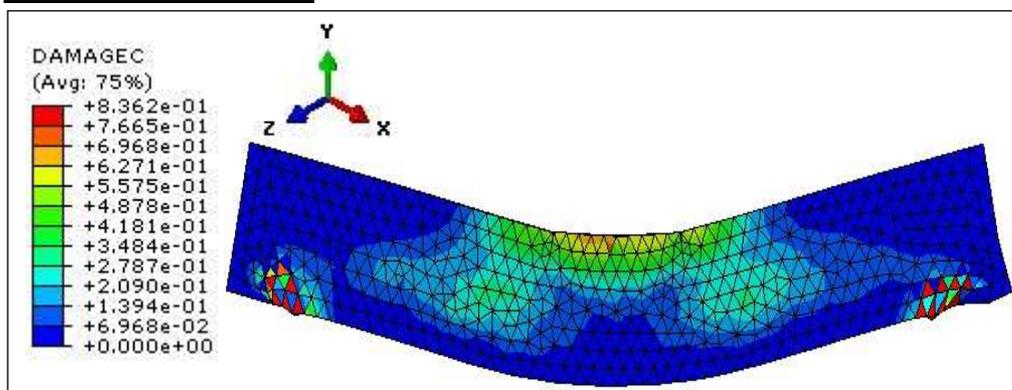
Nous constatons qu'au cours de l'augmentation du chargement extérieur appliqué, les dommages se développent progressivement tout le long des poutres, si on analyse d'une manière précise l'état de l'endommagement on remarque qu'à un même taux de chargement et au même endroit, ceux des poutres de référence en béton armé sont plus importants que ceux de la poutre composite. Des microfissures de flexion apparaissent en premier lieu dans la zone tendue pour des chargements assez modérés, suivies des premières fissures de cisaillement à travers des bielles inclinées.

➤ *Les dommages de compression*

Pour un incrément de 0.25



Pour un incrément de 0.5



Pour un incrément de 1

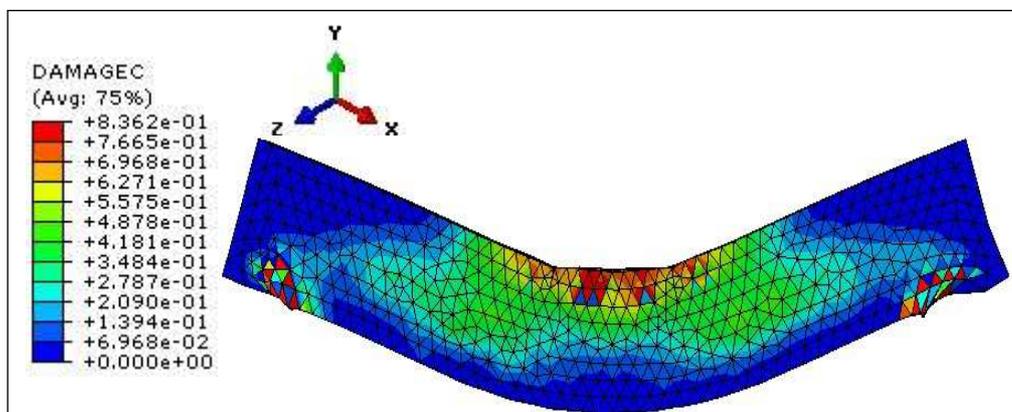


Figure III.15 Représentation de l'évolution des dommages dus à la compression

Pour un incrément de charge modéré, des fissures apparaissent dans la zone de compression et se propagent très rapidement dans la zone d'application de l'effort vers le point d'application de l'effort tranchant, en revanche pour la poutre en béton-composite qui présente une reprise partielle à l'effort tranchant par l'enveloppe composite, les fissures se propagent lentement et tardivement, avec des faibles largeurs des ouvertures.

L'évolution des dommages de compression et de traction en fonction du chargement appliqué pour la fibre la plus comprimée et la plus tendue des poutres étudiées : à savoir la poutre composite et celle de référence est représentée sur la figure (III.16) et (III.17) suivantes.

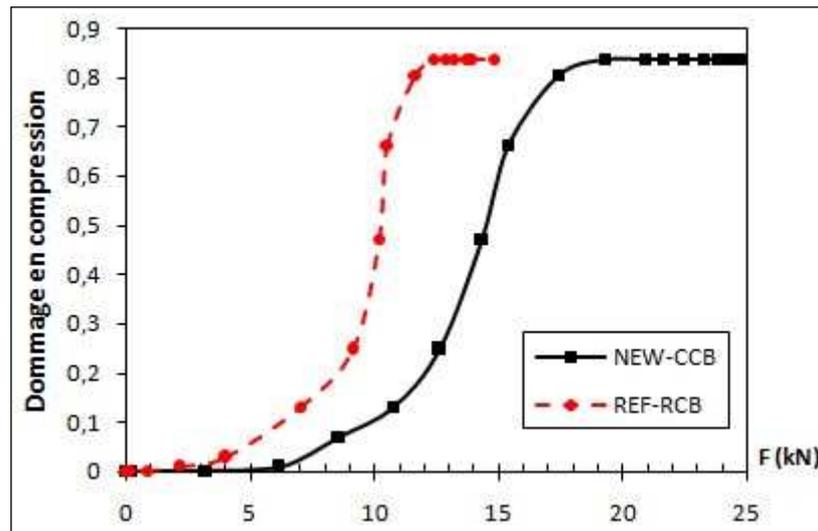


Figure III.16 Confrontation des courbes forces-dommages en compression

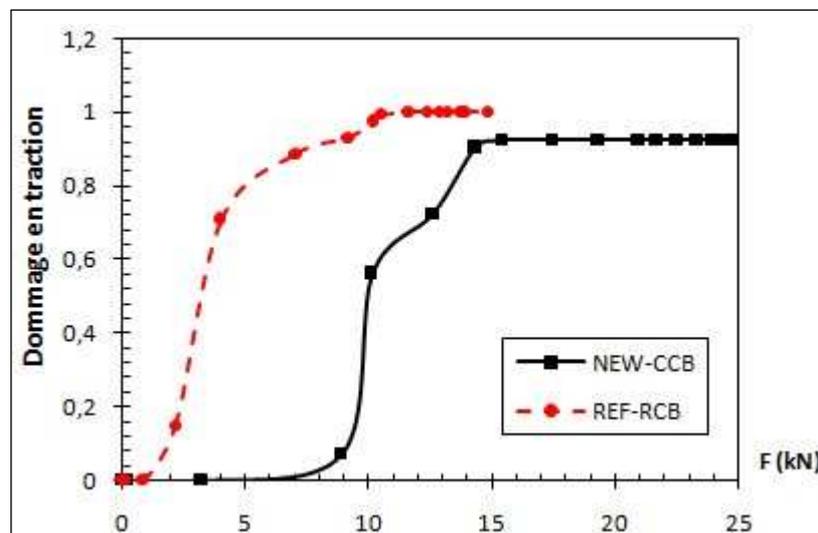


Figure III.17 Confrontation des courbes forces-dommages en traction

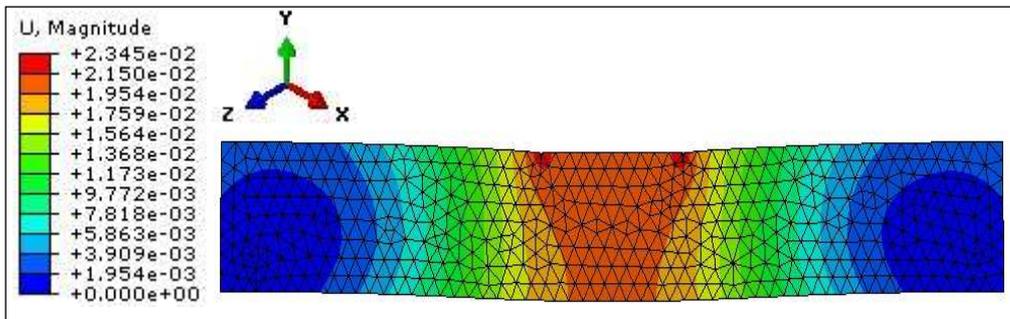
Les variables de l'endommagement en compression et en traction prennent des valeurs allant de 0 (les poutres sont dans un état non fissuré) jusqu'à 1 (la rupture finale de l'élément). L'apparition de la première fissure de traction pour la poutre de référence (REF-RCB) correspond à un chargement extérieur de 2,34 kN, tandis que cette dernière apparaît pour une charge de 7,64 kN pour la poutre composite (NEW-CCB). La valeur d'endommagement critique en traction est atteinte pour une charge de 9,31 kN pour la poutre de référence, cependant celle de la poutre composite est atteinte pour un chargement de 13,73 kN.

Une réduction de la vitesse de propagation des dommages de traction est de 45 %. Les variables d'endommagement en compression présentent un comportement similaire à celles de traction, l'apport maximal en termes de réduction des dommages du système proposé est de l'ordre de 23% comparativement à la poutre de référence en béton armé.

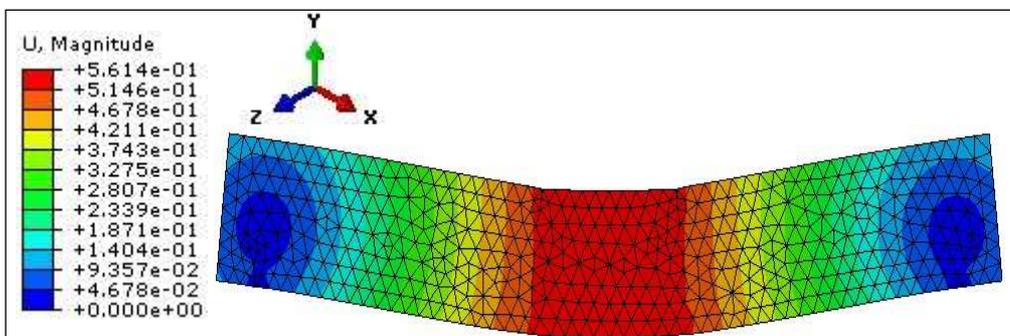
III.5.3 Evolutions des déplacements globaux

Nous reproduisons dans ce qui suit l'évolution de la distribution des déformations, des déplacements globaux et de la dégradation de la rigidité, lors des simulations des poutres composites pour trois incréments de chargements différents (voir Figure III.18).

Pour un incrément de 0.25



Pour un incrément de 0.75



Pour un incrément de 1

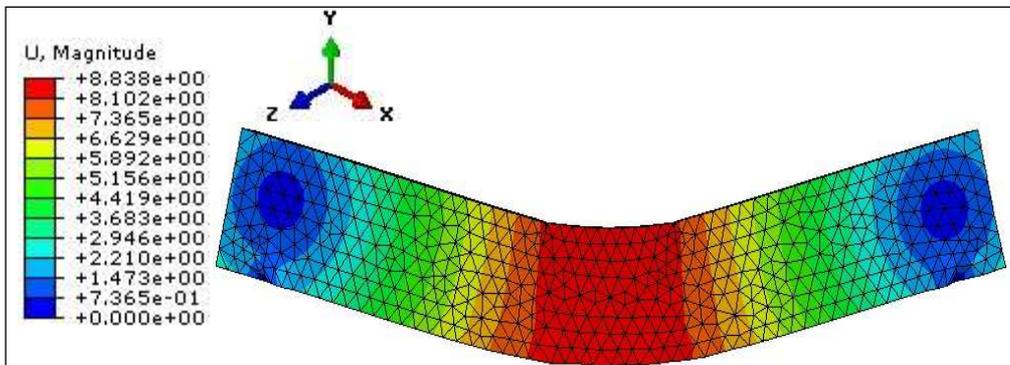


Figure III.18 Représentation de l'évolution des déplacements globaux

Les poutres en béton-composite présentent un meilleur comportement en termes de déplacement par rapport aux poutres de référence avec un ferrailage classique. Une réduction du déplacement maximal est entre 31,85% et 64,44% pour les différents incréments de charge considérés. Ceci, est illustré dans la figure (III.18). La ductilité et la déformabilité sont considérablement améliorées, on voit clairement que la flèche de rupture de la poutre de référence qui est de l'ordre de 8.83 (mm), est très inférieure à celle de la poutre composite, qui est aux alentours de 5.82 mm. Le gain maximal en ductilité est estimé à environ 70 %. La présence du tissu composite dans la masse du béton tendu, lui permet d'atteindre la phase de

densification du champ des déformations, après un temps de chargement très long, de ce fait, la propagation de ce champ le long des poutres composites se trouve ralentit pendant les premiers incréments de chargement. La distribution des forces dans l'élément tubulaire et le tissu composite à travers ses mailles qui le constituent est représentée sur la figure (III.19).

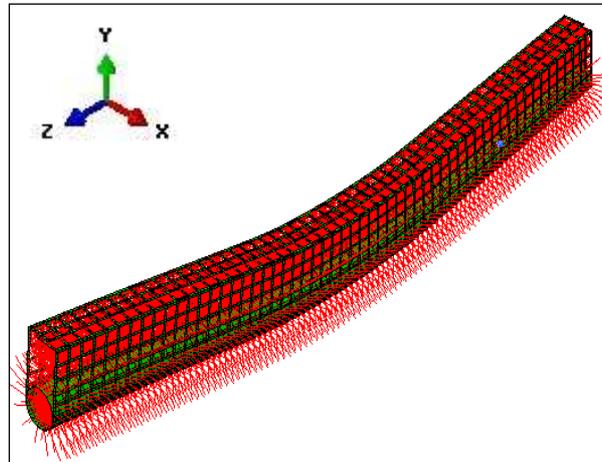


Figure III.19. Représentation de l'effet de confinement

La simulation numérique, nous a permis de constater qu'au fur à mesure que l'incrément de l'effort appliqué augmentait, un champ de force plus important se développe sur toute la circonférence de l'élément tubulaire, ce qui permet d'éviter ses déformations radiales au cours du chargement. Le champ de force s'élargit vers le tissu FRP qui constitue l'enveloppe composite et se développe sur chaque maille de ce dernier, ce qui permet d'exercer une contrainte latérale sur le béton tendu emprisonné entre les deux tissus. , à cet effet, le béton résiste mieux aux sollicitations appliquées ; Ceci constitue un atout positif pour notre système mécanique, puisqu' il retarde l'apparition et la vitesse de propagation des fissures. L'utilité de cette analyse est de confirmer que l'enveloppe composite en FRP influe sur le comportement mécanique local et global de la poutre composite proposée.

III.5.4 Confrontation et validation du modèle élément fini

Étant donné que notre modèle expérimental et numérique ont la même géométrie et sont constitués de matériaux possédant les mêmes propriétés physiques, nous nous permettons de faire une comparaison entre nos résultats numériques et expérimentaux. Afin de vérifier la fiabilité de la procédure numérique, nous confrontons nos prévisions qualitatives et quantitatives sur le comportement des structures étudiées avec nos observations expérimentales. L'aspect qualitatif de la confrontation comprend la visualisation des zones endommagées et la visualisation de la rupture dans le béton. En ce qui concerne l'aspect quantitatif de la confrontation, nous avons choisi de suivre et de comparer l'évolution des paramètres identifiés expérimentalement : déplacement vertical et évolution des capacités portantes. La figure (III.20) montre l'évolution du chargement extérieur appliqué en (kN) en fonction du déplacement vertical à mi-travée (flèche en (mm) jusqu'à la rupture pour les deux spécimens d'étude considérés

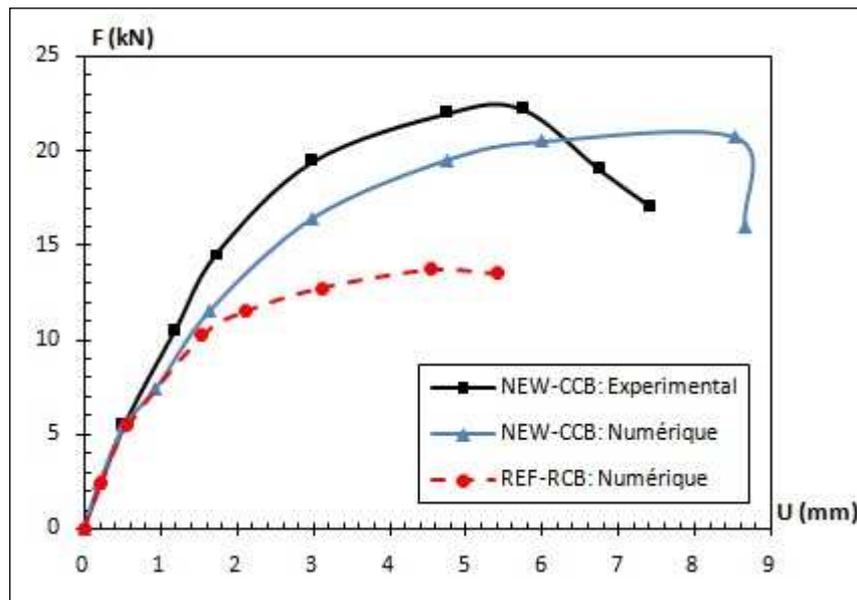


Figure III.20. Confrontation des courbes F-U : Numériques et expérimentales

Nous observons que l'allure du graphe de la simulation numérique présente une bonne correspondance avec l'allure du graphe donné par l'analyse expérimentale. On constate une bonne corrélation. Les valeurs de la capacité portante sont sensiblement différentes, pour la poutre en béton composite (NEW-CCB), la charge maximale donnée par la simulation est de 20,44 kN, cependant la capacité portante moyenne obtenue par les essais est de l'ordre de 22,51 kN. D'autre part, le rapport de capacité portante, obtenue expérimentalement est de l'ordre de $F_{cc\ exp} / F_{c0} = 1.66$. Numériquement ce ratio est environ égal à $F_{cc\ num} / F_{c0} = 1.52$; la différence entre le modèle numérique et l'analyse expérimentale est inférieure à ($< 2,5\%$), ce qui est beaucoup moins que la dispersion expérimentale normale.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la procédure numérique, qui nous a permis de simuler le comportement mécanique des poutres composites sous chargement de flexion. Les actions principales permettent de créer la géométrie et les conditions aux limites du modèle ainsi que le fonctionnement du code de calcul Abaqus sont soigneusement résumés. La complexité du modèle, en termes de géométries et de lois de comportement formulées, impose l'utilisation d'une solution numérique à base de la méthode des éléments finis. Notre modèle élément fini, permet de quantifier la réponse locale et la réponse globale de la structure étudiée, à travers l'évolution des déplacements, des déformations et des contraintes en fonction de l'évolution de la charge appliquée avec une adéquation satisfaisante, et permet également de compléter et de valider les observations expérimentales réalisées dans le chapitre précédent.

En conclusion, une bonne concordance est obtenue entre les résultats du modèle numérique et les résultats obtenus expérimentalement. La visualisation des cartographies de propagation des zones endommagées en compression et en traction et de la fissuration dans le béton reste cohérente, eu égard aux résultats obtenus dans la partie expérimentale de notre étude.

Chapitre IV

Modélisation et proposition d'un modèle de confinement

Chapitre IV : Modélisation et proposition d'un modèle de confinement

IV.1. Introduction

La modélisation analytique est une schématisation théorique, basée sur des concepts fondamentaux, permettant de transcrire le comportement d'un matériau ou d'une structure sous diverses sollicitations extérieures. Elle permet, également de prendre en compte les relations existantes entre les divers paramètres mécaniques intrinsèques du système étudié [105]. L'évaluation de la capacité portante de la poutre en béton-composite, à travers un modèle théorique est une étape importante et primordiale pour la gestion et l'optimisation de la nouvelle conception proposée. En effet, l'intérêt de ce modèle est de déterminer le comportement global de ce nouveau système mécanique et de valider les résultats des approches expérimentales et numériques rapportées dans les chapitres précédents.

Dans ce chapitre, la modélisation analytique de la poutre composite est menée selon deux approches : la première est basée sur l'équilibre d'une section transversale considérée (VER), afin d'évaluer finement le champ de déformation et de contrainte, ainsi que les efforts développés par les matériaux constitutifs à savoir : la force latérale du confinement et la force de traction développée par le tissu composite intégré dans la matrice béton. La deuxième est une approche globale, basée sur la théorie classique des poutres, elle permet d'évaluer la capacité portante de la poutre composite sous chargement de flexion quatre points, comparativement à la poutre de référence en béton armé. Ce modèle de confinement permet de prendre en considération la contribution de tissu FRP à travers la génératrice du tube en polymère à reprendre les efforts de flexion, ainsi que la pression latérale de confinement mobilisée par l'enveloppe composite. Les résultats obtenus par le modèle théorique sont confrontés avec ceux des essais expérimentaux et de la simulation numérique pour un intervalle de confiance de 95%, afin de permettre une meilleure compréhension du comportement de cette nouvelle poutre en béton composite.

IV.2. Notions de confinement

Dans le souci primordial d'améliorer les performances mécaniques du matériau béton sous chargement extérieur et dans l'objectif de prolonger la durée de vie des structures en génie civil, de nouvelles approches de renforcement et de confinement sont proposées [106-110]. Le point de départ de toutes ses approches, est que la défaillance d'une structure soumise à des sollicitations diverses est provoquée par la naissance des fissures, donc apparition des déformations permanentes, qui imposent une diminution significative de la rigidité du matériau [111]. Un élément de structure en béton soumis à un chargement extérieur se déforme latéralement, ces déformations induisent une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge jusqu'à la rupture. Si cette structure est retenue latéralement de façon à réduire ces déformations latérales, la résistance de l'élément en béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène, qui consiste à empêcher ces déformations radiales est communément appelé confinement du béton [112].

La confrontation du comportement d'un béton non confiné et confiné avec plusieurs configurations de confinement est présentée sur les courbes typiques : contraintes-déformations de la figure (IV.1). Ces courbes mettent en évidence les différences de comportement entre ces deux matériaux. Dans le cas d'un confinement flexible, la contrainte de rupture (point C) est inférieure à la contrainte au pic (point A) et la pente est négative dans le comportement post-pic (adoucissement). D'autre part, lorsque un confinement est rigide, la contrainte ultime augmente au-delà du pic, du coup le béton confiné présente un comportement écrouis; la contrainte à la rupture (point D) est plus élevée que la contrainte au (point A) : voir figure (IV.1).

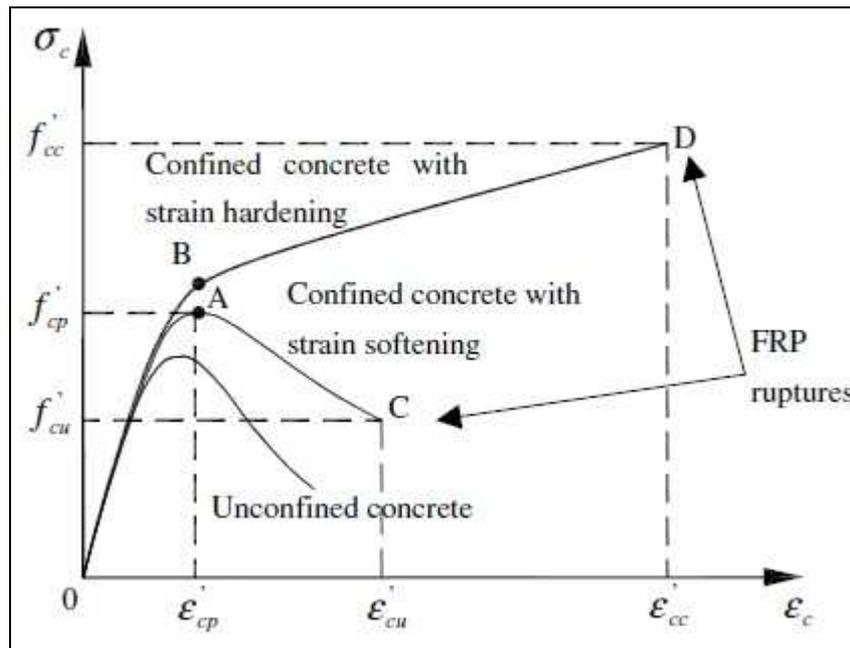


Figure IV.1. Courbes contrainte-déformation pour différents taux de confinement [113]

Généralement, l'effet du confinement permet d'augmenter deux caractéristiques intrinsèques du béton à savoir: sa résistance à la compression $f_{cc} > f_{co}$ et sa déformation correspondante à la contrainte ultime de compression $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_{co}$; il permet aussi d'augmenter de façon considérable l'énergie d'absorption du béton. D'autre part, l'étude théorique des éléments confinés par des matériaux composites montre que le comportement mécanique du béton confiné est élastique-plastique suivant la théorie de l'endommagement isotrope [114].

IV.3 Synthèse des modèles de confinement

La littérature scientifique fournit plusieurs articles qui se sont inscrits dans le cadre des recherches expérimentales et théoriques, dans le but de développer de nouveau modèle de confinement de béton. Jusqu'à ce jour, ces travaux ont apporté des révélations prometteuses quand à l'efficacité d'utilisation de ces modèles. Les premiers modèles ont été développés sur des éléments en béton confinés par le collage d'éléments en acier sur les faces exposées aux sollicitations dues aux efforts de chargement, mais la grande sensibilité de ce matériau à la corrosion, ainsi que son poids élevé et son cout exhaustif ont fait que son utilisation présente

des inconvénients majeurs. A cet effet, les matériaux composites sont alors utilisés comme substitut potentiel à l'acier dans le domaine de confinement et de réhabilitation des structures en béton. En 1928-29, Richart et al [115], ont effectué une série d'essais pour le confinement des colonnes de béton. Plus tard entre 1930 et 1933, le ACI [116] a développé des expressions pour la résistance et de la déformation des colonnes et des poutres en béton.

Les matériaux composites à base de fibres «PRF» ne sont utilisés pour le confinement du béton que depuis le début des années 1980, à l'exception de l'utilisation de tubes en plastique (PVC) remplis de béton, ait débuté dès la fin des années 1970 (Kurt 1978 [117]). Ainsi grâce à la conjugaison des performances mécaniques des composites et celles du béton, les auteurs on pu constater, de façon très nette, une amélioration significative de la résistance et de la ductilité dans le comportement des structures en béton confinées par des bandes en FRP.

IV.3.1 Modèle de résistance

Le modèle de confinement proposé par Richart, pour des cylindres en béton soumis à une pression hydraulique (confinement actif) fut l'un des premiers modèles théoriques de résistance développés. L'auteur a constaté que la résistance en compression du béton confiné est fonction de la pression latérale appliquée. Pour cela, il a proposé le modèle donné par la relation (IV.1)

$$f_c = f_0 + K_1 (f_l)^\alpha \quad (\text{IV.1})$$

Avec f_c et f_0 sont respectivement la résistance du béton confiné et non confiné ; Cependant f_l représente la pression latérale de confinement. Les paramètres K_1 et α sont des coefficients inconnus de l'efficacité du confinement à calibrer par une analyse d'ajustement, dans le but de minimiser la différence entre la capacité de résistance théorique et celle obtenue expérimentalement.

IV.3.2 Modèle de déformation

Concernant la déformation axiale ε_c correspondante à la résistance en compression axiale maximale du béton confiné avec des composites FRF, les auteurs ont proposé le modèle donné par l'équation (IV.2).

$$\varepsilon_c = \varepsilon_o \left(1 + K_2 \frac{f_l}{f_o} \right) \quad (\text{IV.2})$$

Avec ε_c et ε_o sont respectivement les déformations axiales correspondantes à la résistance maximale du béton confiné et non confiné. Le paramètre K_2 est à calibrer avec des résultats expérimentaux, généralement ce paramètre est cinq fois supérieur à celui de l'efficacité du confinement ($K_1 = 5K_2$).

Un résumé de certains modèles de résistance et de déformation du béton confiné par intégration des composites à base de fibre de verre (GFRP encased concrete) est présenté dans le tableau (IV.1) suivant :

Tableau IV.1 Synthèse des modèles du béton confiné avec intégration de GFRP (Mpa)

Auteurs	Resistance du béton	Déformation correspondante
Fardis and Khalili (1981) [118]	$\frac{f_c}{f_0} = [1 + 2.05(\frac{f_l}{f_0})]$	$\varepsilon_c = 0.002[1 + 0.5(\frac{E_f t_f}{D f_0})]$
Karbhari and al (1993) [119]	$\frac{f_c}{f_0} = [1 + 2.1(\frac{f_l}{f_0})^{0.87}]$	$\varepsilon_c = 0.002[1 + 5(\frac{2 t_f f_f}{D \cdot f_0})]$
Samaan and al (1998) [120]	$\frac{f_c}{f_0} = [1 + 6(\frac{f_l}{f_0})^{0.7}]$	$\varepsilon_c = \frac{f_c - 0.872 f_0 - 0.317 f_f - 6.258}{245.61 f_0^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f t_f}{D}}$
Spoelstra and Monti (1999) [121]	$\frac{f_c}{f_0} = [0.2 + 3(\frac{f_l}{f_0})^{0.5}]$	$\varepsilon_c = \varepsilon_0 [2 + 1.25(\frac{E_c}{f_0}) \varepsilon_f \sqrt{\frac{f_c}{f_0}}]$
Saafi and al (1999) [122]	$\frac{f_c}{f_0} = [1 + 2.2(\frac{f_l}{f_0})^{0.84}]$	$\varepsilon_c = \varepsilon_0 [1 + (537 \varepsilon_f + 2.6)(\frac{f_c}{f_0} - 1)]$
Bentayeb , Ait tahar & chateaneuf (2007) [114]	$\frac{f_c}{f_0} = [1 + (\frac{\varphi_1}{\varphi_2} f_l)]^*$	$\varepsilon_c = \varepsilon_0 [1.3 + 6.3(\frac{\varphi_1 \varphi_2 f_l}{f_0})]$

* φ_1 φ_2 , **, t_f et D les paramètres géométriques des modèles en (mm).

E_f et f_f sont le module et la résistance du GFRP en (Mpa).

IV.4. Modèle proposé

Le modèle proposé dans la présente étude est formulé en vue d'estimer la capacité portante de la poutre en béton-composite, comparativement à la poutre de référence en béton armé, en se basant sur les résultats données par l'analyse expérimentale et numérique. Le présent modèle s'inspire de celui de Richart, et également de ceux des études antérieures des anciens auteurs cités dans le tableau (IV.1).

La configuration considérée du béton confiné, dans la conception développée est adoptée. On admet que le tissu composite GFRP reprend les déplacements latéraux et empêche les déformations radiales de l'élément tubulaire sous chargement de flexion, grâce à la mobilisation de la contrainte latérale de confinement. Le modèle de confinement proposé, est fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques du tissu composite et du tube polymère. Les sections ci-dessous seront portées sur les différentes étapes de modélisation permettant de développer et de valider le modèle.

IV.4.1 Modélisation géométrique de la section

La section transversale de la poutre composite est illustrée sur la figure (IV.2). Le tube polymère de forme cylindrique de diamètre (ϕ) intégré dans la zone tendue de la poutre est

renforcé par un tissu GFRP, pour maintenir un seuil de résistance et de rigidité. Le tissu composite est prolongé dans la direction de la hauteur de la poutre, afin de former une enveloppe (Jacket), permettant de mobiliser une pression latérale de confinement, aussi assurer la continuité de toute la section transversale.

Les coordonnées (x) et (y) définissent le plan de la poutre de longueur (L) et de section transversale $(b \times h)$, tandis que l'axe (z) est l'origine à la surface du milieu de la poutre dans le sens de la hauteur. La section transversale de la poutre de référence présente des conditions de géométrie et de chargement similaires à celle de la poutre composite.

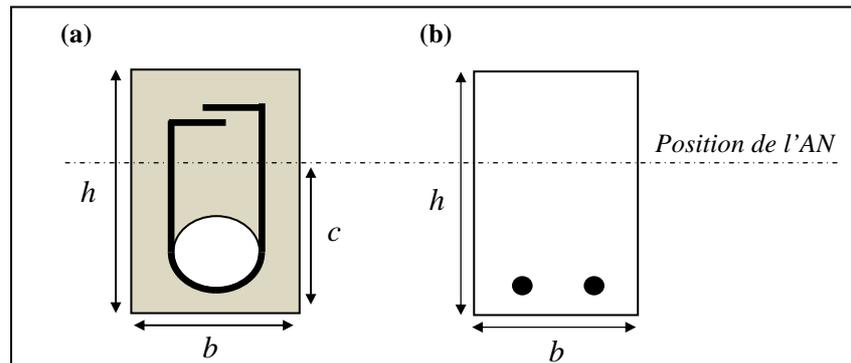


Figure IV.2. Modélisation géométrique ; (a)- Béton-Composite, (b)- Béton-Armé

IV.4.2 Equilibre de la section

La figure (IV.3) représente l'équilibre de la section transversale de la poutre composite soumise un moment fléchissant croissant jusqu'à la rupture, développé sous un chargement de flexion 4-points. La pression latérale de confinement σ_l mobilisée grâce à la différence des rigidités entre les deux matériaux compatibles à savoir le béton et le composite FRP, agit à l'état post-fissuration de la section (Etat Limite Ultime) et elle est supposée suivre une distribution rectangulaire des contraintes.

La section A_d développée par le tissu composite à travers la génératrice de l'élément tubulaire permet de reprendre les efforts de flexion. Ce qui permet de s'opposer aux déformations latérales du tube et de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion.

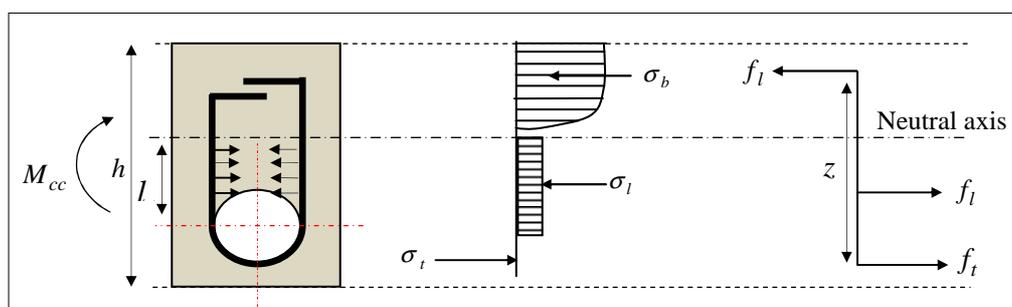


Figure IV.3 Equilibre de la section de la poutre composite : Contraintes & Forces

Tenant compte de tous les matériaux constitutifs, le moment de résistance ultime de la section considérée située à mi-portée de la poutre composite, relativement au point d'application de la force de compression du béton, est calculé par l'équation (IV.3) suivante :

$$M_{cc} = f_t z + f_c \left(\frac{l_f}{2} + \frac{h}{3} \right) \quad (\text{IV.3})$$

Où f_b et f_l sont respectivement la force de compression du béton, et la force latérale de confinement.

La force de traction f_t développée par le tissu à travers la génératrice du tube est fonction des paramètres géométrique et mécanique du tissu composite listés ci-dessous.

IV.4.3 Modélisation géométrique du tissu FRP

Le tissu composite est constitué d'un ensemble de filaments unidirectionnel croisé à 90°, avec trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux : Voir figure (IV.4). La modélisation géométrique du tissu composite en (FRP) est menée dans la direction des trames (transversale) et des chaînes (longitudinale) suivant l'hypothèse des contraintes planes (Epaisseur négligeable par rapport aux deux autres portées).

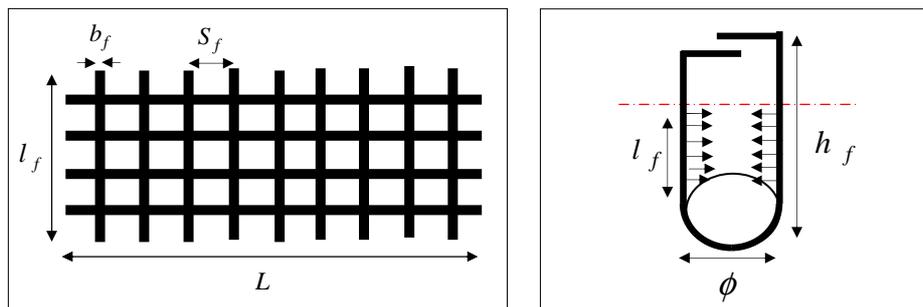


Figure IV.4 Caractéristiques géométriques du tissu composite

Les caractéristiques géométriques du tissu FRP dans la direction de la portée et de la hauteur de la poutre sont données comme suit :

S_f : Espacement entre deux chaînes et deux trames successives : maille en (mm).

b_f : Section transversale d'un filament en (mm²).

Les paramètres h_f et l_f sont respectivement la hauteur totale de l'enveloppe composite et la hauteur de l'enveloppe FRP affectant le béton tendu (zone de confinement). La section développée par le tissu en flexion à travers la génératrice du tube estimée en fonction des paramètres géométriques du FRP mentionnées ci-dessus est donnée par la relation (IV.4)

$$A_d = \frac{\pi \phi b_f}{2 S_f} \quad (\text{IV.4})$$

Finalement, la force de traction développée par l'enveloppe composite sous chargement de flexion est donnée par la relation (IV.5), elle est fonction de la résistance ultime du tissu FRP (f_f) évaluée par les essais de caractérisation menés dans la campagne expérimentale.

$$f_t = \frac{\pi \phi b_f}{2 S_f} f_f \quad (\text{IV.5})$$

IV.4.4 Evaluation de la contrainte latérale de confinement

En général, la contrainte latérale de confinement est considérée comme le facteur le plus important qui affecte le comportement mécanique du béton, elle permet de modifier la forme de la courbe de capacité dans sa partie plastique [114], Aussi, elle permet le passage d'un mode de rupture fragile à un mode ductile. En utilisant le coefficient d'efficacité de confinement, l'expression de la pression de confinement à la rupture de l'enveloppe FRP (Voir figure IV.5) est calculée en fonction de la résistance à la traction et de la densité du composite par rapport au volume de béton confiné, comme indiqué dans l'équation (IV.6).

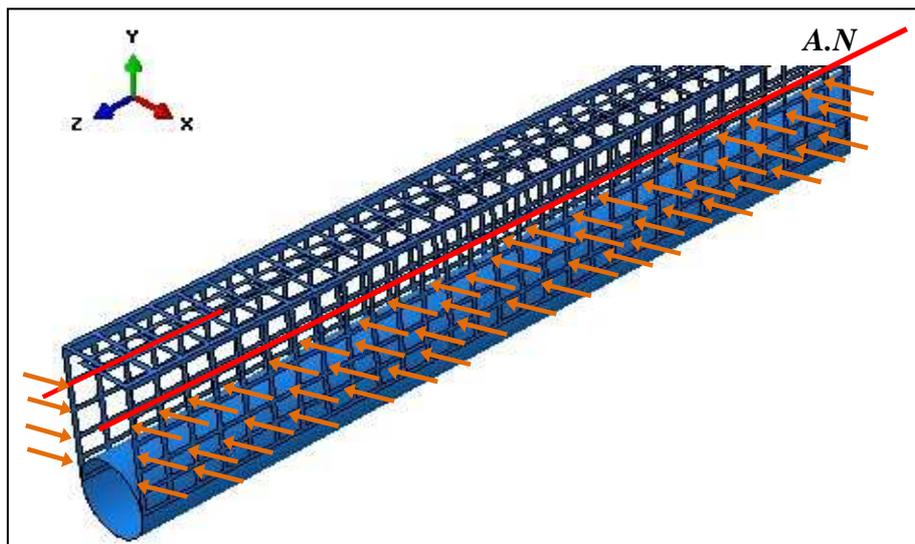


Figure IV.5 Contrainte de confinement mobilisée par l'enveloppe GFRP

La contrainte de confinement σ_l est l'un des paramètres intrinsèques affectant la capacité portante et la rigidité des poutres en béton confinés par des composite FRP. Elle est donnée par l'équation classique (IV.6) suivante :

$$\sigma_l = \frac{1}{2} \rho_f f_f \quad (\text{IV.6})$$

Où ρ_f est la fraction volumique du tissu composite FRP par rapport au béton tendu confiné. Cette densité est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_f = \frac{V_c}{V_{bc}} = \frac{4 b_f}{\phi S_f} \quad (\text{IV.7})$$

Tenant compte des relations (IV.6) et (IV.7), la contrainte de confinement mobilisée par l'enveloppe composite est donnée par la relation (IV.8) suivante :

$$\sigma_l = \frac{2b_f}{\phi S_f} f_f \quad (\text{IV.8})$$

Sous l'effet du chargement extérieur appliqué, l'enveloppe composite comprime le béton tendu et empêche les déformations radiales du tube polymère, dans ce cas la force latérale résultante de la contrainte du confinement f_l s'écrit comme suit :

$$f_l = \sigma_l \cdot S_{\text{tissu}} \quad (\text{IV.9})$$

Où S_{tissu} est la section de l'enveloppe composite dans la direction de la portée de la poutre (L), elle est donnée en fonction de la hauteur du GFRP par rapport à l'axe neutre de la section (l_f). L'équation (IV.9) s'écrit alors comme suit :

$$f_l = \sigma_l \cdot \frac{4b_f l_f L}{S_f^2} \quad (\text{IV.10})$$

Substituant l'équation (IV.8) dans la relation (IV.10), on obtient la relation finale de la force latérale de confinement mobilisée par l'enveloppe composite.

$$f_l = \frac{8b_f^2 l_f}{\phi S_f^3} L \cdot f_f \quad (\text{IV.11})$$

IV.4.5 Relation entre les forces

Sur la base des observations des études expérimentales et numériques antérieures et avec des conditions aux limites et du chargement similaires, un modèle est formulé tenant compte de la position de l'enveloppe composite dans le spécimen, la nature ainsi que de la contrainte de traction de celle-ci. On considère une poutre en béton composite en équilibre sous un chargement de flexion quatre (04) points (Voir figure IV.6).

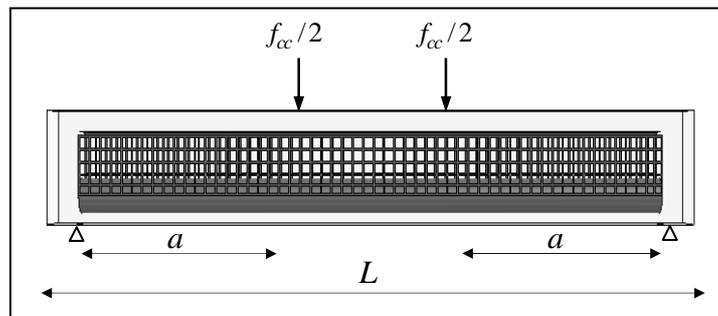


Figure IV.6 Poutre en béton-composite sous flexion 4- points

On s'intéresse au calcul et à la modélisation du comportement mécanique d'une poutre en béton-composite soumise à la flexion, on admet les hypothèses des calculs suivantes :

- Flexion plane d'une section à plan moyen, chargée dans son plan et symétrique par rapport à l'axe passant par son centre géométrique.
- Conservation de la section plane après déformation.
- Absence de glissement relatif entre le béton et les composites.
- L'influence de l'effort tranchant est négligée.

Tenant compte des hypothèses de calcul, les moments ultimes agissant au centre géométrique de la section sont donnés comme suit :

$$\begin{cases} M_{c0} = A_s \cdot z \cdot f_y \\ M_{cc} = A_d \cdot z \cdot f_f + f_l \cdot c \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Avec M_{cc} et M_{c0} : sont respectivement les moments résistants de la poutre composite et celui de la poutre en béton armé. f_y et A_s sont respectivement la contrainte ultime et la section transversale des aciers, z est la position de l'axe neutre.

Les capacités portantes des spécimens d'étude, sous chargement de flexion 4 point sont données par la relation (IV.13) suivante.

$$\begin{cases} f_{c0} = \frac{2 A_s f_y}{a} z \\ f_{cc} = \frac{2 A_d f_f}{a} + \frac{2 f_l}{a} \left(\frac{l_f}{2} + \frac{h}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

S'appuyant sur le modèle de Richart, et dans le but d'évaluer la réponse ultime de la poutre composite confinée en fonction de celle de référence (non confinée). Le coefficient de confinement f_c/f_0 est donné sous la forme de l'équation (IV.14) suivante :

$$\frac{f_c}{f_0} = \left[k_1 + k_2 \left(\frac{f_l}{f_0} \right) \right] \quad (\text{IV.14})$$

Le paramètre d'efficacité du confinement k_2 dans le cas d'une poutre composite confinée par une enveloppe continue en GFRP, est calculé en fonction des caractéristiques géométriques de la section. Cependant le paramètre k_1 est évalué en fonction du rapport des forces de traction des FRP et des aciers. Les paramètres de confinement k_1 et k_2 sont donnés par les relations (IV.15 et (IV. 16).

$$k_1 = \frac{A_d f_f}{A_s f_y} \quad (\text{IV.15})$$

$$k_2 = \frac{2}{a} \left(\frac{l_f}{2} + \frac{h}{3} \right) \quad (\text{IV.16})$$

IV.4.6 Paramètre non linéaire du modèle

Sous des sollicitations ultimes, une section en béton composite se fissure et se plastifie. Le calcul en élasticité linéaire ne permet plus d'évaluer les déformations réelles de la section, on est alors amené à introduire un paramètre non linéaire au modèle.

Les résultats des essais rapportés dans le chapitre précédant ainsi que les caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux utilisés (Voir figure II.1, tableau II.9 et II.10 du chapitre II) sont utilisés pour calibrer le modèle de confinement proposé dans la relation (IV.14). Le paramètre non linéaire est introduit dans le but d'ajuster le modèle.

Finalement nous proposons l'équation (IV.17) qui permet de prédire la réponse maximale de la poutre composite comparativement à la poutre de référence.

$$f_c = f_0 \left[0.9 + 0.38 \left(\frac{f_l}{f_0} \right)^{0.72} \right] \quad (\text{IV.17})$$

Les relations (IV.14-17) seront en suite utilisées dans l'analyse fiabiliste, afin d'évaluer l'influence de la variabilité des différents paramètres sur le modèle de confinement proposé, et également d'estimer la sensibilité statistique et mécanique de chaque paramètre.

IV.5. Validation du modèle

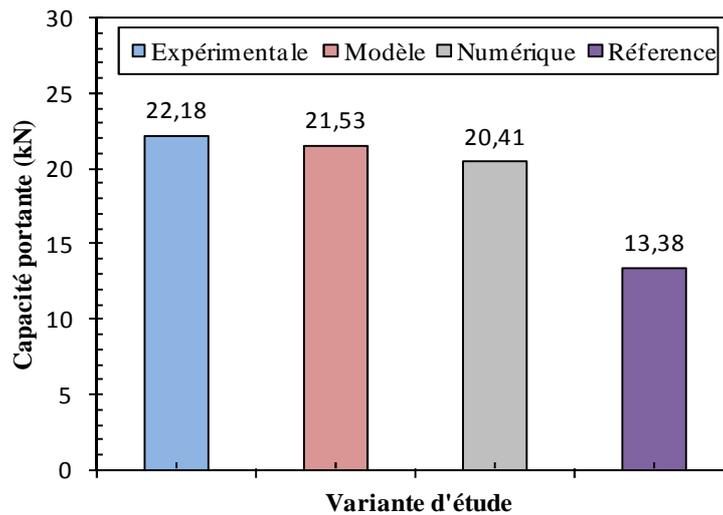
Le modèle théorique alors développé n'aurait été valable que pour décrire une expérience avec des matériaux, un environnement, des conditions de chargement identiques à ceux utilisés lors des essais. Afin qu'il décrit d'avantage la réalité, le modèle proposé est validé à travers la confrontation des résultats des essais et de la simulation avec ceux du modèle pour les deux variantes d'étude à savoir : la poutre en béton composite et la poutre de référence en béton armé avec un ferrailage conventionnel. Enfin une étude statistique permettant d'évaluer l'efficacité des résultats obtenus pour un intervalle de confiance de 95% est nécessaire pour caler le modèle théorique proposé.

IV.5.1 Validation expérimentale et numérique

Le tableau (IV.2) récapitule les résultats obtenus par les trois (03) approches menées dans la présente étude pour l'évaluation de la capacité portante et le coefficient de confinement de la nouvelle poutre composite développée (expérimentale, numérique et analytique).

Tableau IV.2 Confrontation des résultats expérimentaux, numériques et théoriques

Spécimens	f_{c0}	f_{cc} Essais	f_{cc} Numérique	f_{cc} modèle	f_x/f_{c0}	f_x/f_{c0}	f_x/f_{c0}
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	Essais	Numérique	Modèle
1	13.42	22.72	20.41	21.65	1.46	1.52	1.61
2	12.93	23.67	20.41	21.03	1.60	1.58	1.63
3	13.32	19.63	20.41	21.45	1.71	1.53	1.61
4	12.51	23.41	20.41	20.57	1.71	1.63	1.64
5	14.32	22.81	20.41	22.54	1.59	1.43	1.57
6	13.78	20.88	20.41	21.95	1.52	1.48	1.59
Moyenne	13.38	22.18	20.41	21.53	1.66	1,53	1.61
Ecart type	0.63	1.59	/	0.69	0.10	0.07	0.03
IC (%)	± 0.51	± 1.27	/	± 0.55	± 0.08	± 0.05	± 0.02

**Figure IV.7** Confrontation des résultats expérimentaux, numériques et théoriques

Une bonne concordance, en termes de capacité portante et du coefficient de confinement, est observée entre les résultats expérimentaux menés sur six (06) spécimens identiques, ceux de la simulation numérique à base d'éléments finis et ceux du modèle mécanique proposé (Voir figure IV.7). En effet, l'erreur relevée sur les capacités portantes en flexion entre le modèle et l'expérimental s'est avérée de l'ordre de 2,93, ce qui est fort satisfaisant.

IV.5.2 Ajustement statistique

Une modélisation statistique est menée dans le but de calibrer les résultats obtenus par le modèle de confinement. Afin de mettre en exergue l'efficacité et la concordance de ces résultats en termes de corrélation statistique, l'évolution de la capacité portante ainsi le

coefficient de confinement suivant les différentes approches de la présente étude, est confrontée dans les figures ci-dessous (IV.8-11) pour un intervalle de confiance de 95%.

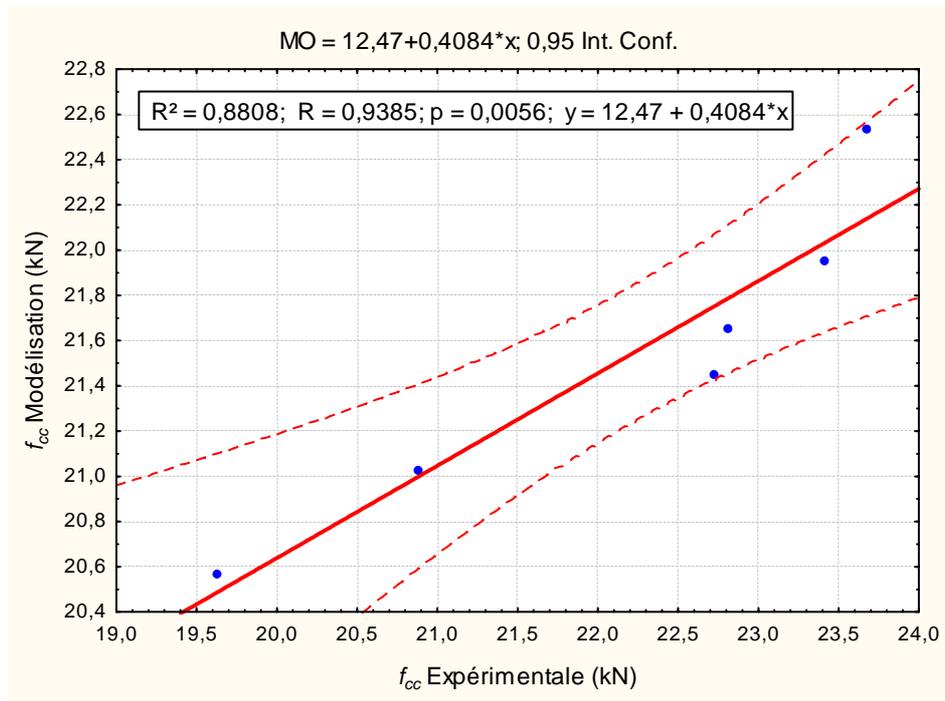


Figure IV.8 Confrontation de la capacité portante : Expérimentale vs. Modèle

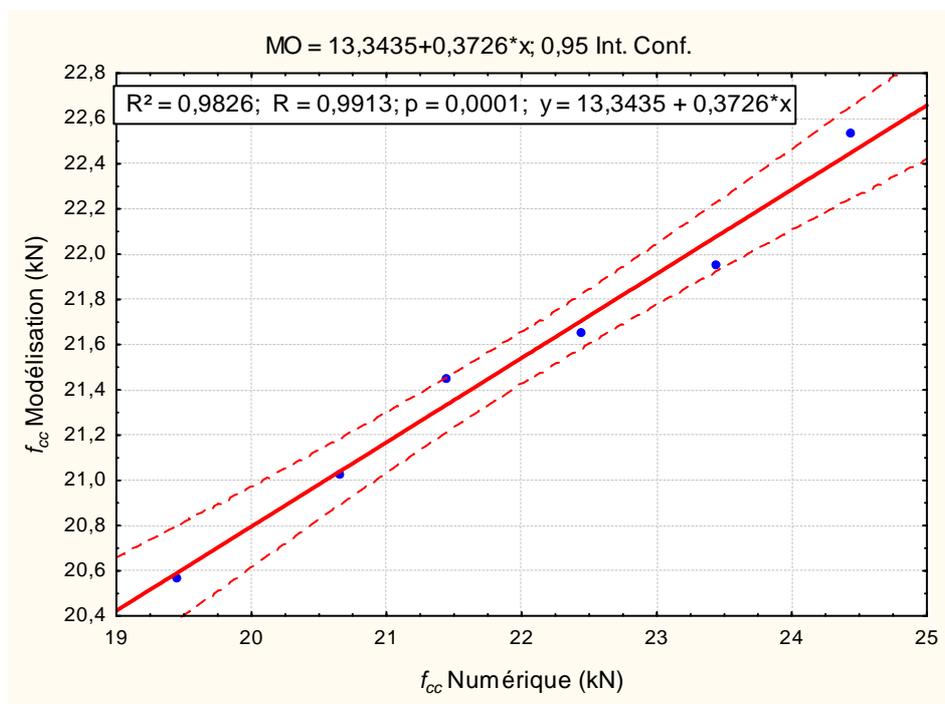


Figure IV.9 Confrontation de la capacité portante : Numérique vs. Modèle

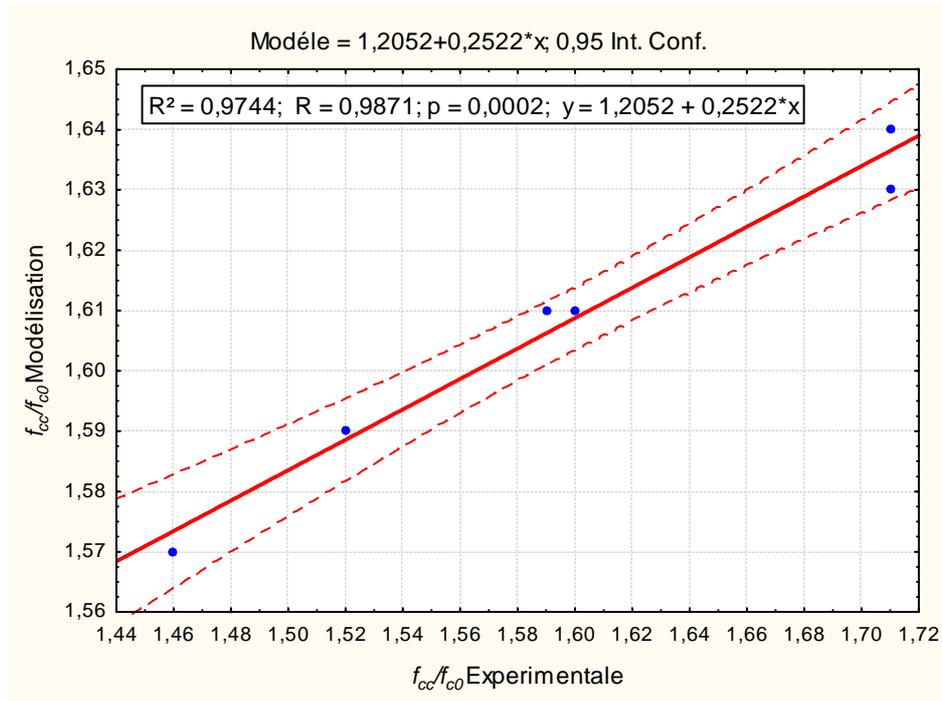


Figure IV.10 Confrontation du coefficient de confinement : Expérimentale vs. Modèle

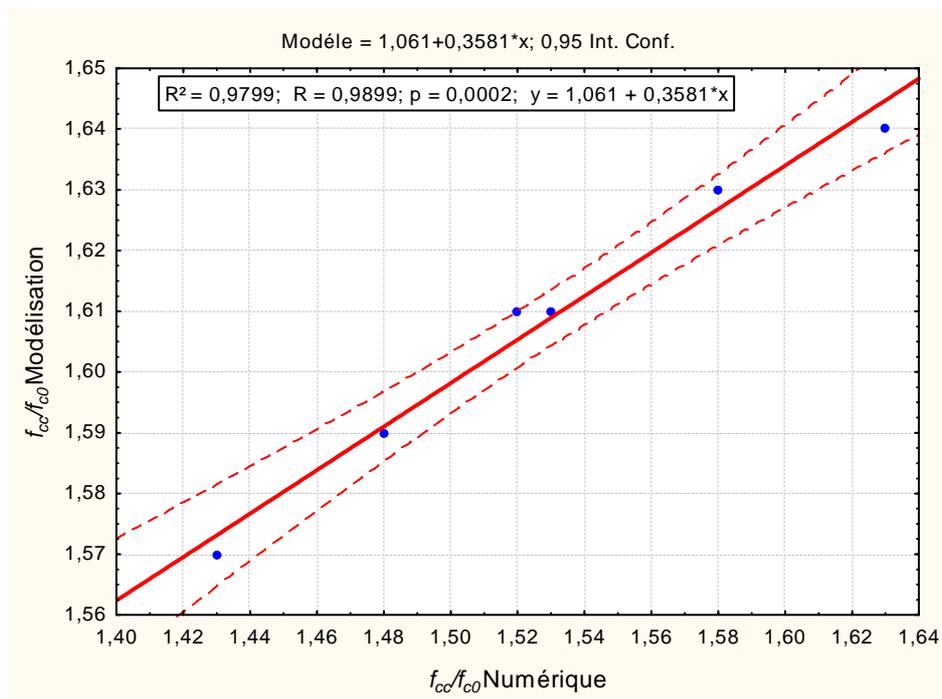


Figure IV.11 Confrontation du coefficient de confinement: Numérique vs. Modèle

La confrontation montre que la résistance moyenne à la rupture expérimentale et numérique de la poutre composite développée est de l'ordre de 22,18 kN et 20,41 kN respectivement, tandis que la résistance moyenne à la rupture obtenue par le modèle de confinement proposé est de 21,53 kN. D'autre part, une très bonne concordance est observée en termes de rapport

de confinement f_{cc}/f_{c0} . Les valeurs moyennes de ce coefficient obtenues par les essais et par la simulation numérique sont de l'ordre de 1.66 et 1.53 respectivement. Théoriquement ce ratio est de l'ordre de 1.61. La différence entre le modèle mécanique de confinement et les expériences est $< 2,5\%$, ce qui est beaucoup moins que la dispersion expérimentale normale. L'apport positif de l'enveloppe composite en GFRP est appréciable, le coefficient de confinement indique bien l'efficacité du nouveau concept introduit.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle de confinement permettant de prédire la réponse ultime des poutres composites soumises à la flexion est proposé et validé. Hormis les hypothèses de bases de la théorie utilisée, l'application numérique a montré l'effet et la contribution positive des propriétés mécaniques et géométriques de l'enveloppe composite sur le comportement global de la poutre développée. Cependant, cette modélisation qui s'ajuste correctement avec les modèles antérieures rapportés dans l'étude bibliographique, nous a permis d'établir un complément de résultat et de conclusions préliminaires à la compréhension du comportement mécanique de la nouvelle conception développée. Néanmoins, d'autres modélisations seront nécessaires pour optimiser les formes et les paramètres conceptuels de notre proposition.

Chapitre V

Approches probabiliste et fiabiliste

Chapitre V : Approches probabiliste et fiabiliste

V.1. Introduction

Afin d'assurer une durée de vie prolongée des matériaux et des structures composites, qui sont limités par la dispersion de leurs propriétés mécaniques, notamment au niveau de leurs résistances à la rupture [123], des modèles fiabilistes, statistiques et probabilistes sont développés et proposés par plusieurs chercheurs [124-129]. Le point de départ de ces modèles est que les réponses de ces structures à des chargements extérieurs doivent satisfaire les besoins du service, concernant les divers critères de ruptures. Chaque critère peut décrire un état limite et le dépassement de cet état limite signifie la défaillance de la structure. Par conséquent, ces méthodes fiabilistes permettent de déterminer la probabilité de dépassement d'états limites et de prévoir la ruine de la structure pendant sa durée de service. Aussi d'évaluer quantitativement le risque de défaillance compte tenu des incertitudes mises en jeu à savoir : le chargement extérieur, les propriétés des matériaux et les caractéristiques géométriques, et permettent également d'optimiser la conception pour des risques considérés.

La vérification de la fiabilité des structures composites est prise en considération dans les formalismes de réglementations sous forme de niveau [130]. Dans le formalisme de format de *niveau I* les fonctions de chargement et de résistance sont pondérés par des facteurs partiels de sécurité établis selon des méthodes qui tiennent compte des incertitudes, qui peuvent être déterminées par voie statistique si des informations nécessaires sont disponibles. Pour le formalisme de vérification de la fiabilité de niveau II, qui sera appliqué dans la présente étude, les sollicitations et les résistances seraient des variables aléatoires caractérisées par leur loi de densité de probabilité ou par leurs estimations statistiques, et dans lequel également serait indiqué, pour chaque état limite, un niveau de probabilité de défaillance, en d'autre terme les facteurs de résistance (R) et de chargement (S) sont des quantités statistiques ayant une tendance centrale (moyenne) et une dispersion autour de cette moyenne (écart-type). Dans cette optique, l'analyse de fiabilité des applications mécaniques repose typiquement sur des probabilités ou des distributions de probabilité des propriétés des matériaux et consiste à propager des incertitudes et/ou des méconnaissances dans des modèles de calcul spécifiques afin d'obtenir une probabilité de défaillance d'une fonction du système étudié.

Dans ce chapitre, un couplage entre les méthodes de fiabilité de niveau II et le modèle de confinement développé dans la chapitre (IV) précédent est réalisé sur des poutres en béton-composite chargées en flexion 4-points. Nous nous sommes focalisés sur le comportement global du système mécanique ainsi que la réponse ultime des matériaux constitutifs, avec une défaillance par rupture en flexion. L'approche fiabiliste proposée a pour but d'évaluer l'influence de la variabilité des différents paramètres pour la détermination des états limites de défaillance. La probabilité de défaillance est estimée par la méthode géométrique d'approximation du premier ordre 'FORM' (First Order Reliability Method) basée sur la détermination de l'indice de fiabilité β , à travers une approximation géométrique de la fonction d'état limite. Les variabilités de ces propriétés mécaniques et géométriques sont ainsi introduites dans le modèle stochastique et les probabilités de défaillance et les indices de fiabilité résultants sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux.

V.2. Approche déterministe

La sécurité offerte par une structure est considérée comme suffisante lorsqu'une éventuelle défaillance exposerait le système mécanique à un risque inférieur à une limite acceptable. La fiabilité d'une structure se caractérise quant à elle par la performance de celle-ci à remplir une fonction définie sous des conditions données, pendant une durée fixée et en respectant le niveau de sécurité exigé.

Dans cette optique, une étude déterministe est menée ici pour représenter les fonctions d'état limite $G_i(\{X\})$ d'une manière explicite en fonction des variables aléatoires liés à la géométrie, aux propriétés mécaniques et au chargement. Il s'agit donc de décrire, en premier lieu, les chargements imposés (chargement de flexion appliqué et le poids propre des poutres), ensuite évaluer analytiquement les expressions de la résistance et du chargement de flexion appliqué à la poutre composite.

V.2.1 Fonction de résistance

Cette partie est destinée à présenter les conditions de résistance de la poutre composite comparativement aux poutres témoins, pour définir les fonctions de performance concernant les états limites. La fonction résistance ultime est évaluée par l'équation (V.1), développée dans le chapitre précédent (équation V. 14). Cette équation est déterminée en utilisant comme axe de référence pour l'équilibre des forces l'axe qui est défini par le point d'application de la résultante des efforts du béton comprimé dans la section considérée.

$$f_{cc} = f_{c0} \left[k_1 + k_2 \left(\frac{f_l}{f_0} \right) \right] \quad (\text{V.1})$$

Le premier terme correspond à l'apport du tissu composite en flexion, à travers la génératrice du tube en polymère, exprimé en fonction des paramètres géométriques et mécaniques du tissu et du tube, comme données par les relations suivantes :

$$A_f = \frac{\pi \cdot \phi \cdot b_f}{2 S_f} \quad (\text{V.2})$$

$$k_1 = \frac{A_f f_f}{A_s f_y} \quad (\text{V.3})$$

Le deuxième terme de l'équation représente la contribution positive de l'enveloppe composite, qui est également exprimé en fonction des paramètres géométriques de la poutre et du tissu FRP:

$$k_2 = \frac{2}{a} \left(\frac{l_f}{2} + \frac{h}{3} \right) \quad (\text{V.4})$$

Les différentes dénominations des paramètres définissant la fonction de résistance de la poutre composite sont définies dans le chapitre précédent, ces paramètres seront ensuite modélisés comme des variables aléatoires afin d'évaluer leur influences sur la fonction d'état limite.

V.2.2 Fonction de chargement

La fonction de chargement est définie pour des conditions similaires à celles de la campagne expérimentale, le premier terme de la fonction représente la charge extérieure de flexion (P) appliquée sur la poutre, le deuxième terme est la charge due au poids propre de la poutre. Finalement, Les efforts globaux (P_T) qui résultent du chargement dans la section critique située à mi-travée de la poutre, sont déterminés par l'équation suivante :

$$P_T = P + \omega_b S_c L \quad (\text{V. 5})$$

Avec (ω_b) et (S_c) sont respectivement la densité de béton et l'aire de la section transversale totale de la poutre composite.

Toutes les variables sont définies dans la Liste de Notations, et modélisées selon des lois de probabilité permettant, ainsi de décrire de manière théorique le caractère aléatoire des matériaux utilisés à travers des densités de probabilités.

V.3. Couplage mécano-fiabiliste

L'approche fiabiliste (FORM /SORM) requiert de définir l'état de défaillance de la structure, par une fonction de défaillance. Pour des problèmes comportant de nombreuses incertitudes pouvant conduire à des erreurs, il est recommandé de réaliser un couplage direct basé sur une représentation approchée explicite de la fonction de performance (G). Dans ce couplage direct, l'indice de fiabilité est déterminé par une méthode d'optimisation, qui réalise une transformation des variables aléatoires de l'espace physique à un espace centré réduit, et appelle la fonction de performance pour obtenir la réponse complète du modèle.

V.3.1 Principe de modélisation

Une approche probabiliste est menée dans le but d'évaluer l'influence de la variabilité des différents paramètres pour la détermination des états limites de défaillance de la poutre en béton-composite, par application de la méthode FORM. Cette approche est menée selon deux parties principales : la première est déterministe, qui permet de formuler d'une manière explicite les fonctions de performances. La deuxième partie est probabiliste, dont les variables sont représentées selon une loi de densité de probabilité. Dans le cadre de cette approche, la modélisation est menée selon les étapes suivantes:

- La définition d'un vecteur de variables aléatoires $\{X\}$. Ce vecteur aléatoire contient les variables, représentant les données géométriques, les propriétés mécaniques, les variables de chargement. Chaque variable sera, alors, décrite par une distribution statistique.
- Un scénario décrivant la défaillance du système mécanique étudié, dans notre étude, on considère les modes de défaillances obtenues par les essais expérimentaux.
- Un modèle qui traduit la réponse physique de ce scénario, et qui nous permet de construire la fonction de performance $G(\{X\})$ en fonction de la résistance et du chargement. Ainsi qu'une solution numérique pour évaluer les indices de fiabilité et les probabilités de défaillance, pour différent taux de chargement.

V.3.2 Fonction de performance

Une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) sur la base des travaux numériques et expérimentaux des chapitres précédents est réalisée pour lister leurs scénarios de défaillances. Finalement, le scénario de défaillance, défini dans cette étude, est lié à la rupture des poutres par le moment fléchissant développé sous un chargement de flexion 4-points. Ce critère de défaillance est défini à l'aide de la fonction d'état limite, donnée par la relation (V.6).

$$G(\{X\}) = R - S = f_{cc}(f_{c0}, \phi, b_f, l_f \dots) - P_T(P, \bar{\omega}_B, L \dots) \quad (\text{V. 6})$$

La marge de sûreté de la poutre développée s'annule lorsque l'ouverture des fissures dépasse la valeur limite définie par la fonction d'état limite. Quand l'état limite ultime est atteint, la défaillance aura lieu lorsque le moment résistant équivaut au moment sollicitant. D'autre part, lorsque la fonction est posée égale à zéro, elle définit un état limite. La fonction correspond à la frontière entre le domaine de sécurité pour lequel $G_i(\{X\}) > 0$, et le domaine de défaillance pour lequel $G_i(\{X\}) = 0$. L'un des objectifs des outils de la fiabilité est donc de pouvoir estimer le nombre d'occurrences qui rendent la fonction $G_i(\{X\})$ négative ou positive, afin d'obtenir un niveau de probabilité correspondant.

V.4. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à estimer l'importance des paramètres statistiques des variables aléatoires à savoir : leur moyenne, leur écart-type, leurs coefficients de variation dans le modèle fiabiliste. En d'autres termes, elle consiste à caractériser l'impact de cette variabilité sur la réponse, en évaluant le rapport entre les coefficients de variation respectifs, afin de choisir celles qui seront retenues dans le vecteur aléatoire.

L'intérêt de considérer l'ensemble des variables dans la définition de l'état limite permet d'obtenir leur sensibilité "déterministe" et "statistique". Cela permet des actions plus efficaces dans l'optimisation de la conception et d'éliminer des variables du vecteur aléatoire, ce qui rend les calculs fiabilistes plus accessibles. Toutefois, il est important de coupler à cette analyse une étude de la sensibilité mécanique et une analyse de sensibilité statistique de l'indice de fiabilité β aux variables aléatoires.

V.4.1 Variables aléatoires

La modélisation de la structure dans l'approche fiabiliste est déterminée par la définition d'un vecteur de variables aléatoires $\{X\}$. Chaque variable sera, alors, décrite par une distribution statistique. Les variables aléatoires, concernant la fonction d'état limite de la relation (V.6) pour une poutre en béton-composite soumise à un chargement de flexion sont de trois catégories : les variables liées à la géométrie, celles liées aux propriétés mécaniques internes des matériaux constitutifs du système et celles liées au chargement extérieur appliqué, y compris le poids propres des poutres. Les tableaux (V.1-3) résument les paramètres de position et de dispersion de toutes les variables aléatoires considérées.

Les valeurs moyennes de la géométrie des poutres, du tissu FRP et du tube sont celles retenues dans la partie expérimentale. Les coefficients de variation ainsi que le type de distribution sont déterminés en s'inspirant des travaux d'autres auteurs [131-134, 37], les valeurs des écarts types sont estimées à partir de la relation (V.7) suivante :

$$\bar{\sigma} = C.o.v * \bar{x} \quad (V.7)$$

Tableau V.1. Variables aléatoires liées à la géométrie de la poutre

Paramètres (mm)	Symbole	Moyenne	E. type	C.o.v (%)
Largeur de la section droite de la poutre	b	80	2.00	2.50
Hauteur de la section droite de la poutre	h	160	4.00	
Portée de la poutre	L	1000	25.0	
Diamètre de l'élément tubulaire	ϕ	50	1.25	
Section d'un filament du tissu FRP	b_f	3	3.50	1.00
Espacement entre deux filaments du FRP	S_f	15	0.15	
Hauteur de l'enveloppe FRP dans la zone du béton tendu de la section transversale	l_f	120	1.20	
Distance de l'appui au point de la charge	a	400	4.00	

Les paramètres statistiques des variables liées aux propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont donnés dans le Tableau (V.2). Les coefficients de variation du module et de la résistance du FRP sont déterminés par des essais et celui relatif à la densité du béton est déterminé par les recommandations faites par Silva et al [135].

Tableau V.2. Variables aléatoires liées aux propriétés mécaniques

Paramètres (Mpa)	Symbole	Moyenne	Ecart type	C.o.v (%)
Résistance du béton à la compression	f_{c28}	30,57	5.50	22
Module d'élasticité du tissu FRP	f_f	82000	3280	4.00
Module d'élasticité des aciers	f_y	13600	544	
Densité du béton (N/m ³)	ϖ_b	25E-6	2.5E-6	10*

Le Tableau (V.3) fournit les caractéristiques des variables aléatoires liées au chargement extérieur, dont les paramètres statistiques sont mesurés avec une bonne précision dans la campagne expérimentale validée par la simulation numérique.

Tableau V.3. Variables aléatoires liées aux chargements

Paramètres (kN)	Symbole	Moyenne	Ecart type	Cv (%)
Force de rupture de la poutre composite	f_{cc}	22.37	2.2	4.00
Force de rupture de la poutre de référence	f_{c0}	13.69	3.3	15.00

V.4.2 Sensibilité statistique de β

L'analyse FORM permet également d'accéder à un certain nombre de résultats complémentaires au moyen desquels, il est possible de définir plusieurs types de mesures d'importance ou de sensibilité, aussi bien mécaniques que fiabilistes. L'étude de l'importance des variables donne une idée claire et précise sur le comportement mécano-fiabiliste du système étudié. En effet, il s'agit d'identifier les effets d'une variation de ces paramètres sur la réponse du système et sur ses défaillances potentielles. La finalité consiste à sélectionner les variables les plus significatives, pour mieux les maîtriser, selon leurs rôles par rapport au comportement mécanique ou fiabiliste.

Les facteurs d'omissions γ_i donnés par la relation (V.8) permettent de fournir la sensibilité statistique, en évaluant l'influence d'une variable sur la fiabilité, en la fixant à une valeur déterministe [37]. Dans notre étude l'indice de fiabilité calculé à partir des variables aléatoires X et $\beta_{X_i=x_i}$. L'indice de fiabilité dit conditionné, calculé en fixant la variable aléatoire X_i à la valeur x_i pour une valeur de $\beta = 0.6317$.

$$\gamma_i = \frac{\beta_{X_i=x_i}}{\beta} \quad (\text{V.8})$$

Les résultats du facteur d'omissions pour chaque variable aléatoire du scénario de défaillance pris en considération, sont présentés dans le tableau (IV.4). Plus la valeur est proche de 1, moins la variable est influente, étant donné qu'en la considère comme déterministe, elle induit peu de variation de l'indice de fiabilité

Tableau V.4. Sensibilité de l'indice de fiabilité

Variables	$\beta_{X_i=x_i}$	γ_i	Proposition
ϕ	0.6299	0.997	Déterministe
h	0.6627	1.049	
L	0.6291	0.995	
ω_b	0.6327	1.001	
F	0.7488	1.185	Probabiliste*
b_f	1.521	2.407	
S_f	0.740	1.212	
f_f	0.692	1.134	

On peut effectivement accéder aux cosinus directeurs α_i qui nous renseignent sur la sensibilité, au point de conception P^* , de l'indice de fiabilité par rapport à chaque variable aléatoire normée U_i . En pratique, des simulations numériques ont été effectuées par un couplage direct entre le modèle de fiabilité et le modèle de base pour les cosinus directeur donnés par l'équation (V.9) suivante :

$$\alpha_i = -\frac{\partial \beta}{\partial U_i}(P^*) \quad (\text{V.9})$$

Les cosinus directeurs qui reflètent les importances respectives des différentes variabilités introduites dans le modèle sur la fiabilité de la structure étudiée, sont présentés sur l'histogramme de la figure (V.1) qui représente la sensibilité de l'indice de fiabilité des variables aléatoires. On peut conclure que la plus grande influence est donnée par les paramètres géométriques et mécaniques de l'enveloppe composite, qui jouent un rôle stochastique important.

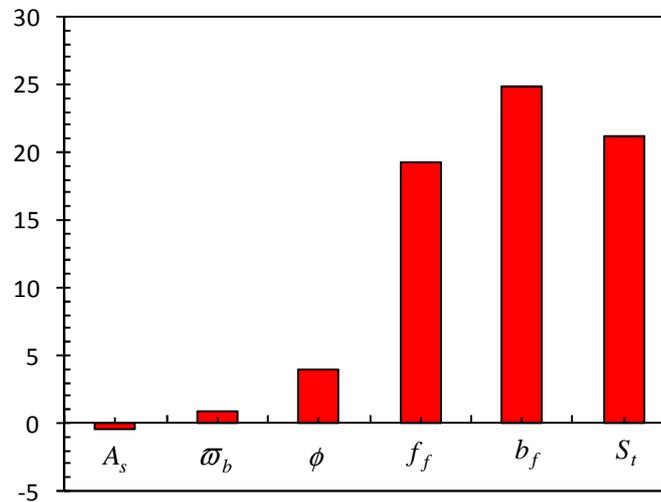


Figure. V.1 Importance de chaque variable aléatoire dans l'analyse de sensibilité

Ces résultats montrent l'importance statistique de la contrainte de rupture en traction du tissu GFRP (f_f), ainsi que sa section transversale (b_f) et l'espacement entre deux mailles successives (S_f), qui permet d'assurer la continuité de la matrice béton entre la zone tendue et comprimée de la poutre. La densité du béton (ϖ_b) et le diamètre total du tube (ϕ) ont des effets statistiques et mécaniques négligeables et peuvent être traités comme déterministes.

V.5. Application de la méthode FORM

Cette méthode est basée sur la détermination de l'indice de fiabilité β qui permet ensuite d'accéder à une valeur approchée de la probabilité de défaillance. La difficulté dans l'évaluation de la fiabilité provient de la nature incertaine des phénomènes mis en jeu sur la structure considérée, qui ont un impact significatif sur les performances du système. Les sections ci-dessous seront portées sur les différentes étapes de modélisation statistique, probabiliste et fiabiliste permettant de développer le modèle probabiliste propre à la structure proposée. Cette analyse est faite à partir de programmes spécifiques développés avec les logiciels R et Statistica.

V.5.1 Test de normalité

Afin d'évaluer la probabilité de défaillance par la méthode FORM, il est important de vérifier la normalité de la fonction résistante et de chargement. Dans le cas contraire, il aurait fallu utiliser une transformation basée sur une méthode d'optimisation. Les tests de normalité des deux fonctions aléatoires considérées à savoir : la fonction des résistances (R) et la fonction des sollicitations (S) ont été évaluées par le test de normalité Kolmogorov-Smirnov.

Les P-values associées indiquées dans le Tableau (V.5) sont plus élevées que les niveaux de signification habituellement utilisés pour tester la normalité (le niveau de signification est de 5%), c'est-à-dire, nous acceptons l'hypothèse nulle, qui confirment que les échantillons étudiés suivent une loi normale de distribution. En outre, les intervalles de confiance à 95% des C.O.V ne dépassent pas les 15 %, ce qui est inférieur à la dispersion normale.

Tableau V.5. Modélisation statistique des variables de la fonction de résistance

Spécimens	Moyenne (kN)	C.o.v (%)	P-value associée	I _c (%)
C-B	8.89	3.14 %	0.98	± 4.47
C-T-B	7.23	4.56 %	0.85	± 5.25
R-C-B	14.12	6.58 %	0.48	± 14.01
C-C-B	21.41	3.45 %	0.88	± 11.81

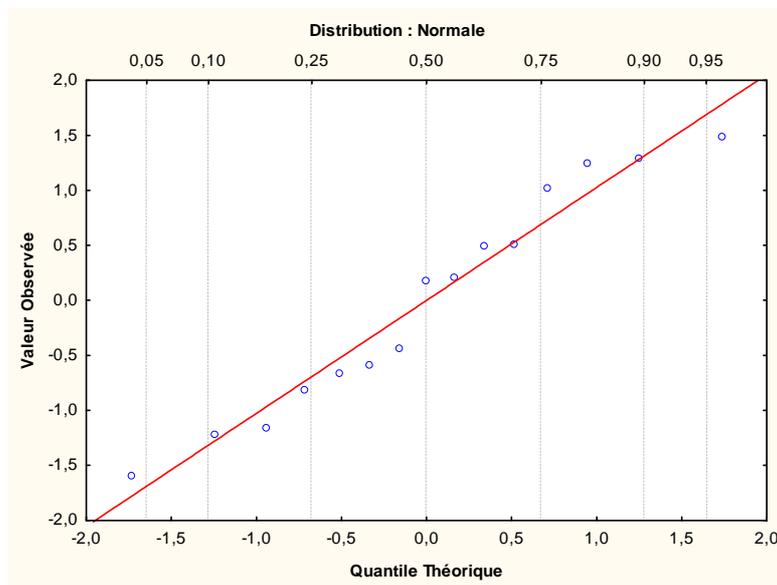


Figure. V.2 Graphe de la probabilité de la fonction de résistance

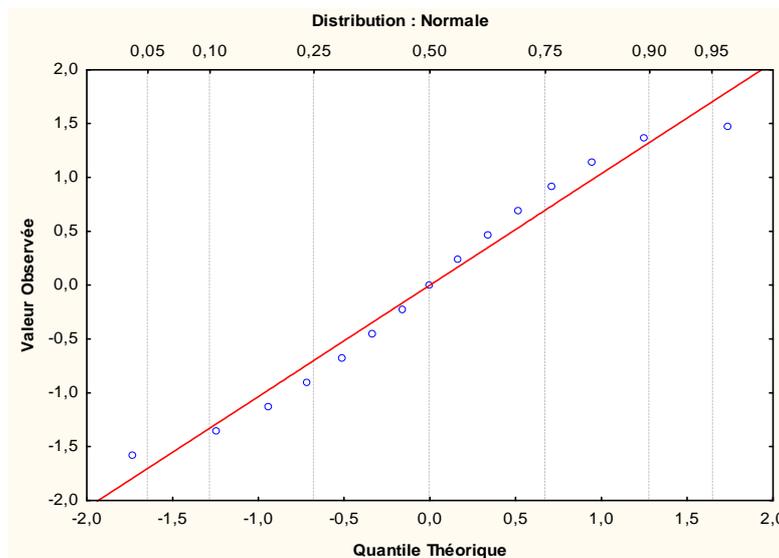


Figure. V.3 Graphe de la probabilité de la fonction sollicitation

Une vérification graphique de la normalité de nos distributions est effectuée, en utilisant le graphe de la probabilité normale avec le logiciel Statistica. Lorsque les données évaluées suivent une ligne droite, la distribution peut être considérée comme normale. Les graphes de la probabilité empirique (Quantile-Quantile) en fonction des données R et S sont respectivement présentés dans les Figures (V.2) et (V.3). Les variables suivent parfaitement la ligne droite, ce qui confirme les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov.

V.5.2 Densité de probabilité

La densité de probabilité permet de représenter la loi normale donnée sous forme d'intégrales, d'une manière graphique les critères d'étude déterminés. Les figures (V.4) et (V.5) montrent les densités des probabilités dans l'espace standard du vecteur des variables aléatoires M_S et M_R des fonctions de sollicitation et résistance de la poutre composite. L'estimation de la variabilité de la résistance d'un matériau peut être obtenue par la détermination de la probabilité de défaillance du matériau sous l'effet du chargement.

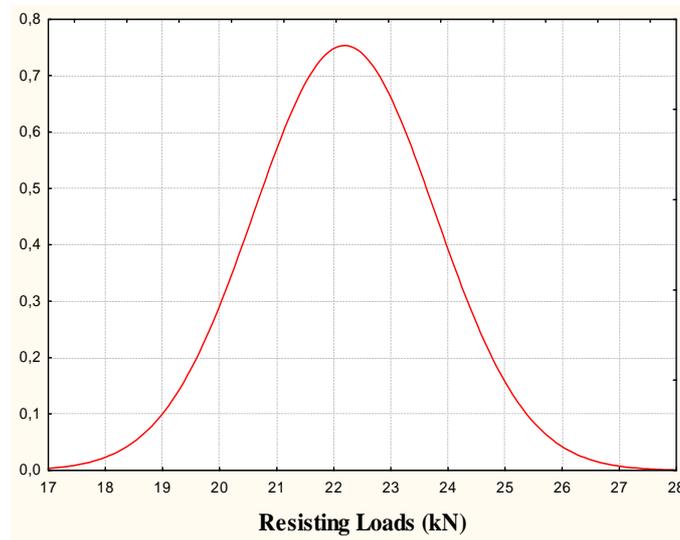


Figure. V.4 Densité de probabilité de la fonction de résistance

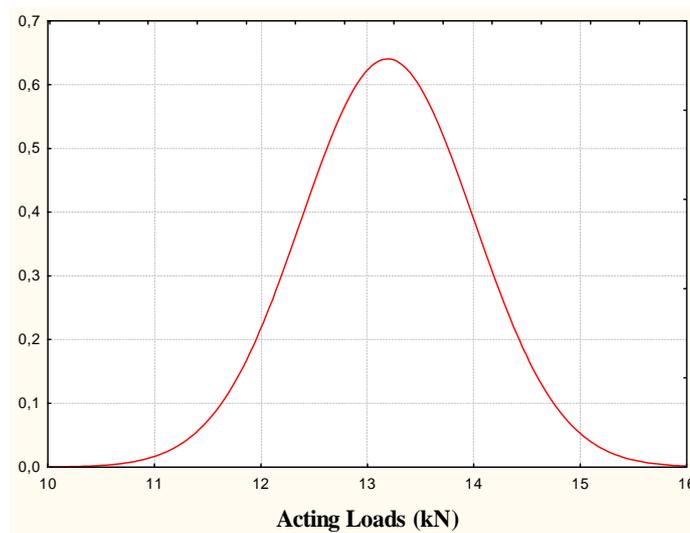


Figure. V.5 Densité de la probabilité de la fonction sollicitation

V.5.3 Transformation de Rosenblatt

Les variables aléatoires de l'espace physique, sont transformées en des variables centrées réduites et indépendantes, cette application permet de remplacer la métrique de l'espace physique par une métrique euclidienne, tout en gardant la valeur de la probabilité en chacun des points de cet espace. Différentes transformations iso-probabilistes permettent ainsi de faire ce passage [59]. La transformation utilisée dans le cadre de cette étude est celle de Rosenblatt [136]. L'application de la transformation de Rosenblatt conduit à la relation (10).

$$U_i = \frac{(X_i - u_i)}{\sigma_i} \quad (\text{V.10})$$

Cette transformation permet de déterminer la distance minimale (β) de l'origine à la surface d'état limite $H(U)=0$ dans l'espace normé centré réduit. Cette distance définit un hyperplan tangent à la fonction d'état limite. La figure (V.6) montre les densités des probabilités conjointes dans l'espace normé centré réduit du vecteur des variables aléatoires « U » des fonctions résistance et sollicitation de la poutre composite.

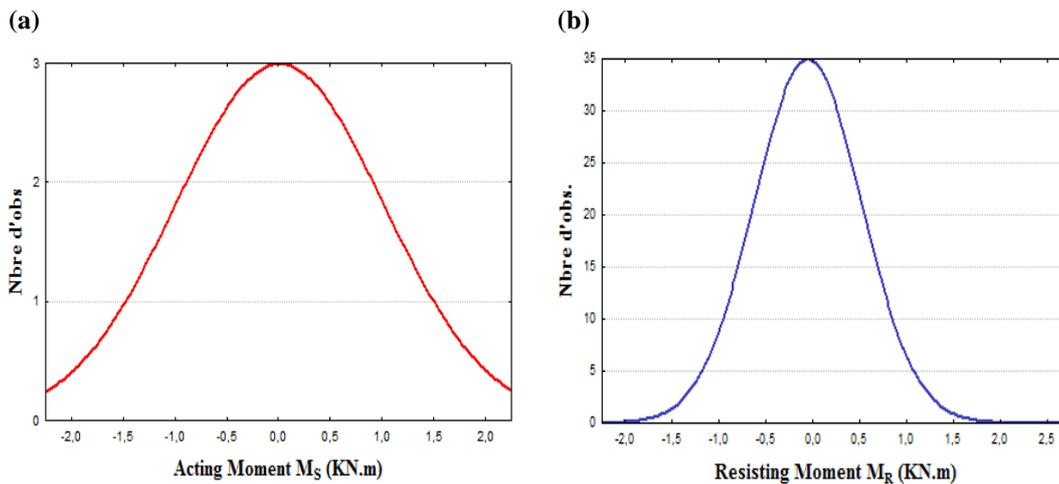


Figure. V.6 Densité des probabilités dans l'espace normé centré réduit.

V.5.4 Indicateurs de fiabilité

La théorie de la fiabilité vise à déterminer la probabilité de défaillance d'un système de structure à l'aide d'une formulation aléatoire des données du problème, cette probabilité est donnée par la relation (V.11) :

$$P_f = P \left[G(\{X\}) \leq 0 \right] = \int_{D_f} f_{x_x}(x_i) dx_1 \dots dx_n \quad (\text{V.11})$$

La probabilité de défaillance, en principe est faible, le calcul analytique conduit à des erreurs importantes. Dans cette optique, l'indice de fiabilité ' β ' est exprimé selon la fonction de répartition de loi normale standard, comme indiqué par la relation (V.12). Une fois β est déterminé, une probabilité de défaillance conventionnelle lui est associée.

$$P_f = \phi(-\beta) = -\phi\left(\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) \quad (\text{V.12})$$

V.6. Résultats et discussion

Un modèle fiabiliste spécifique est développé, permettant de représenter l'évolution de l'indice de fiabilité ainsi que la probabilité de défaillance du système mécanique en fonction du chargement extérieur de flexion appliqué au moyen de la méthode FORM. L'idée générale de cette partie est de mesurer et discuter la pertinence des simulations issues du modèle théorique vis-à-vis des résultats expérimentaux.

V.6.1 Evolution de l'indice de fiabilité

Le tableau (V.6) présente les résultats de l'analyse fiabiliste menée sur deux spécimens d'étude à savoir : la poutre en béton-composite et la poutre de référence en béton armé, pour différent taux de chargement considéré.

Tableau V.6. Résultats de l'analyse fiabiliste

Chargement appliqué P (kN)	Poutre composite		Poutre en BA	
	β	P_f	β	P_f
3	5.53	2.36E-7	5.46	6.65E-4
5	4.31	3.32E-5	3.35	0.09
10	2.87	0.26	1.85	0.91
12	2.35	0.64	0.07	0.94
15	2.11	0.85	0.00	1.00
20	1.61	0.98	0.00	1.00

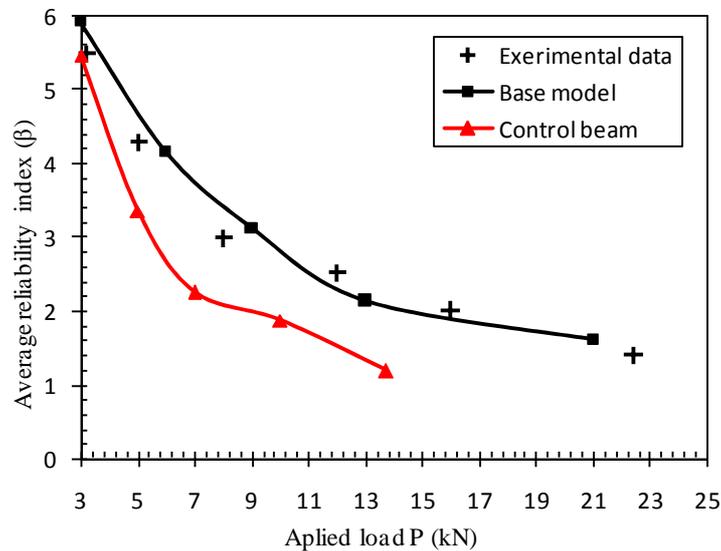


Figure. V.7 Evolution de l'indice de fiabilité en fonction du chargement

L'indice de fiabilité, qui reflète le risque d'amorçage des fissures de flexion, diminue de façon significative en fonction du chargement extérieur appliqué (voir Tableau V.6). Ceci est traduit par la propagation des fissures de flexion dans les éléments, jusqu'à l'état limite défini par le modèle fiabiliste. La fiabilité de la poutre de référence diminue très rapidement. La rupture est atteinte pour une capacité portante maximale de 13,12 KN. La marge de sûreté de la poutre

développée, s'annule pour une capacité portante de 22,32 kN. Les courbes montrent clairement l'amélioration en termes de performances mécaniques et de capacité portante de la poutre développée, comparativement à la poutre de référence.

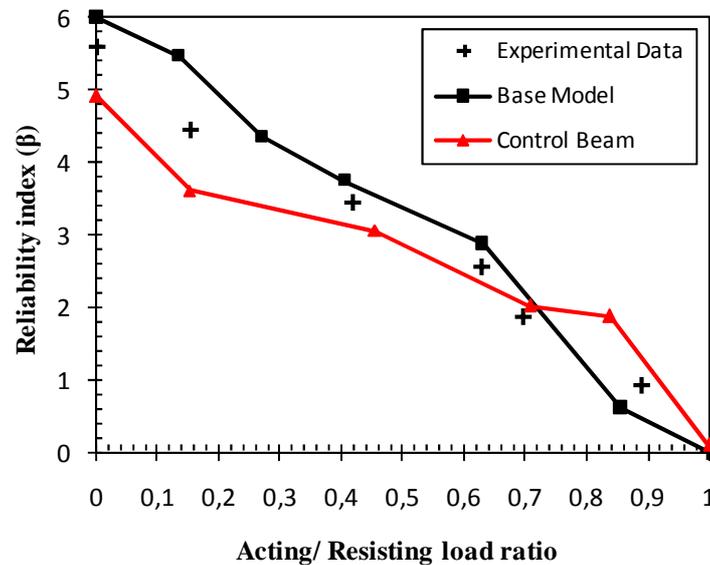


Figure. V.8 Evolution de l'indice de fiabilité en fonction du rapport R/S.

Un complément de résultats obtenus de l'analyse fiabiliste par la méthode FORM est illustré sur la figure (V.9), qui représente les domaines de défaillance et les fonctions de performance, dans l'espace standard correspondant à un chargement extérieur appliqué de 10kN. Les courbes montrent clairement l'amélioration en termes de performances mécaniques, et de capacité portante de la poutre développée.

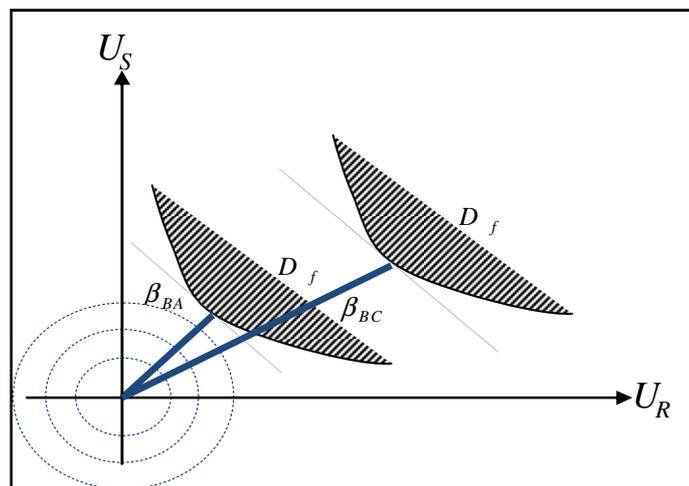


Figure. V.9 Illustration graphique de l'indice de fiabilité de la méthode FORM

L'indice de fiabilité de la poutre composite correspondant à l'apparition de la première fissure est défini comme la distance minimale vaut $\beta = 2.37$. La confrontation montre que la poutre de référence présente un domaine de sureté moins inférieur à celui de la poutre développée, l'indice de fiabilité de la poutre de référence, correspondant à l'apparition de la première fissure est égal à $\beta = 1,83$. L'apport en termes de performances mécaniques est estimé à 60%.

V.6.2 Evolution de la probabilité de défaillance

La figure (V.10) montre l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction de l'évolution de la capacité portante des structures considérées au cours du chargement. La probabilité de défaillance augmente significativement en fonction du chargement extérieur appliqué. Cette probabilité est nulle au début du chargement pour les deux systèmes considérés, puis elle se propage jusqu'à la rupture totale des éléments.

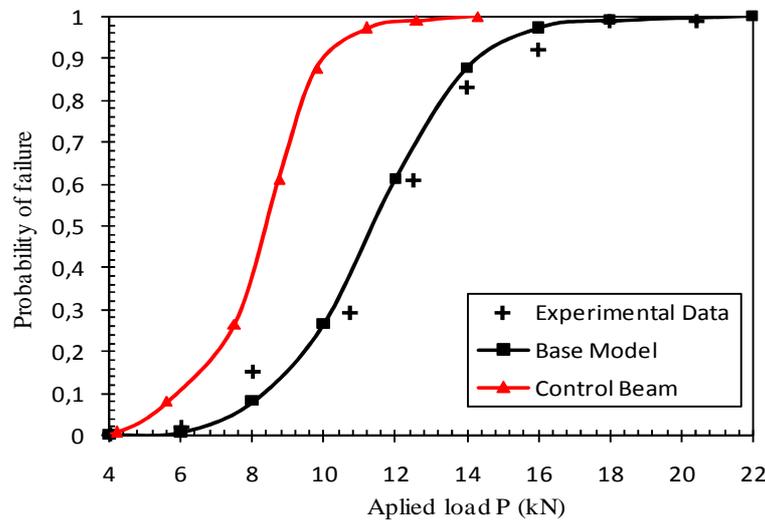


Figure. V.10 Evolution de la probabilité de défaillance

A première vue, on constate un sérieux décalage entre la probabilité de la poutre développée et celle de référence. A titre d'illustration, la probabilité de défaillance de la poutre composite est environ égale à 26 % pour $F = 10$ kN, alors que la poutre de référence présente une probabilité de défaillance de l'ordre de 90% pour le même taux de chargement. Cette amélioration, qui est fonction de la conjugaison des performances mécaniques du tissu composite, permet à la fois d'augmenter la charge engendrant la première fissure et de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion dans l'élément poutre.

V.7. Conclusion

Cette analyse met en évidence l'influence de la variabilité des paramètres des fonctions de chargement et de résistance sur la fonction d'état limite, à travers un modèle fiabiliste appliqué sur des poutres composites, soumises à un chargement de flexion 4-points.

L'objectif principal consiste à valider, à travers une analyse fiabiliste, cette nouvelle technique de réalisation de poutres en béton composite. L'indice de fiabilité qui reflète l'état de sûreté de l'élément est estimé par la méthode d'approximation du premier ordre FORM.

Le traitement des différents résultats de l'analyse fiabiliste permet de valider les résultats obtenus dans l'analyse expérimentale, et laisse entrevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux composites pour améliorer les performances mécaniques, notamment la capacité portante et la ductilité des poutres composites sous chargement de flexion. Une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques est observée lors de la confrontation de l'indice de fiabilité. Enfin, il est recommandé de procéder à l'analyse d'optimisation, afin d'évaluer les paramètres conceptuels de notre système mécanique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux antérieurs, inhérents aux différentes techniques de renforcement et de confinement des structures en béton armé, ont montré l'efficacité des matériaux composites à améliorer les performances mécaniques. Néanmoins, le mode de rupture le plus fréquemment observé est le délaminage de la plaque de renforcement de son support béton, dû à une forte concentration de contraintes aux bords, ce qui conduit à la rupture précoce de ces structures renforcées par collage de plaques composites. A cet effet, dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons proposé un nouveau procédé innovant de réalisation de poutre en béton composite, qui consiste à intégrer un élément tubulaire en polymère dans la zone tendue de la poutre, mécaniquement inefficace, enveloppé par un tissu composite, prolongé le long de la hauteur de la section droite de la poutre et disposé perpendiculairement à l'axe neutre de la section, pour améliorer d'une part sa rigidité flexionnelle, de s'opposer au développement des déformations latérales et d'autre part de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion et de cisaillement. L'objectif est de réduire le poids propre de la structure et d'améliorer ces performances mécaniques.

La première partie de la thèse a été consacrée à la recherche bibliographique sur les matériaux utilisés dans cette étude et leurs pathologies. Nous avons rappelé les différentes propriétés mécaniques du béton, des matériaux composites et des matériaux polymères. Ensuite, nous avons présenté les démarches, ainsi que les différentes utilisations et applications des matériaux composites à base de fibres dans le renforcement, le confinement, la réparation et le confortement des structures de génie civil. Enfin, nous nous sommes penchés sur les concepts fondamentaux, relatifs aux approches statistiques, probabilistes et fiabilistes des structures composites et leurs applications dans le domaine du génie civil. L'étude bibliographique a mis en évidence les limites scientifiques et techniques des applications de réhabilitation et de renforcement par collage de matériaux composites et les difficultés de mise en œuvre d'une approche couplant la mécanique et la fiabilité.

La deuxième partie comporte les différentes méthodes d'évaluation des contributions apportées, par le système mécanique proposé. La première section est consacrée à l'étude expérimentale. On a, tout d'abord, caractérisé mécaniquement les matériaux utilisés, puis on a élaboré et testé plusieurs poutres composites, de dimensions normalisées, sous chargement de flexion, pour mettre en évidence l'efficacité de la technique proposée, en termes d'apport positif en résistance et en ductilité, comparativement aux poutres de référence. Les différents résultats obtenus permettent de formuler les conclusions suivantes :

- L'incorporation de l'élément tubulaire dans la zone tendue de la poutre, a induit une réduction de poids propre de la poutre, environ de 20%, comparativement aux poutres classiques en béton armé, de même caractéristiques géométriques.
- Une amélioration très nette de la valeur de la charge engendrant la première fissure, grâce à l'association des deux matériaux : composite et polymère,

- Le gain en termes de capacité portante (résistance à la rupture) de la poutre en béton-composite est de l'ordre de 60%, par rapport à la poutre de référence en béton.
- Le gain en termes de ductilité (Allongement à la rupture) est de l'ordre de 70%, grâce au comportement relativement ductile des composites utilisés.
- La mobilisation de la pression latérale de confinement permet de s'opposer aux déformations latérales et de diminuer la vitesse de propagation des fissures de cisaillement.
- La rupture de la poutre de référence est plus brutale que celle en béton composite, qui est caractérisée par une concentration des fissures au niveau des points d'application du chargement. Une amélioration très remarquable en termes de temps de rupture.

Après avoir étudié expérimentalement le comportement des poutres en béton-composite et formulé des conclusions préliminaires, nous avons procédé à une modélisation numérique avec une géométrie explicitement en 3D, pour simuler leur comportement mécanique sous chargement. Nous avons formulé des lois constitutives pour tous les composants de la structure composite et les lois d'interaction entre eux. Ainsi, nous avons défini les critères de rupture locale.

La complexité du modèle géométrique et les lois de comportement non linéaire des matériaux, nous ont conduits vers une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis. La réponse ultime locale et globale de la structure est obtenue par une procédure incrémentale. Une bonne concordance est obtenue entre les résultats donnés par le modèle numérique et ceux obtenus expérimentalement ; en termes : d'évolution des déplacements, des déformations et des contraintes. La visualisation des cartographies de la propagation des dommages et des fissures, dans le béton, reste cohérente. Les résultats obtenus par les essais mécaniques, confirment l'absence des déformations latérales engendrées par le gonflement de l'élément tubulaire en polymère.

Par la suite, nous avons procédé à une modélisation analytique. Un nouveau modèle de confinement de type 'résistance', permettant de prendre en considération la contribution du tissu FRP à travers la génératrice du tube en polymère à reprendre les efforts de flexion, ainsi que la pression latérale de confinement mobilisée par l'enveloppe composite est proposé et validé par les résultats des essais mécaniques. Une bonne concordance est obtenue entre les résultats prédits par le modèle analytique et ceux donnés par les essais et par la simulation.

Cette modélisation s'ajuste correctement avec les modèles antérieurs rapportés dans la littérature. Cependant, on a relevé une petite différence entre les capacités portantes calculées théoriquement et données expérimentalement. Cette différence est due aux déplacements initiaux des poutres composites qui ne sont pas pris en considération dans le modèle théorique. Néanmoins, ceci nous a permis d'établir un complément de résultats et de conclusions préliminaires pour mieux comprendre le comportement mécanique de la nouvelle conception développée.

Devant la variabilité du comportement des structures composites, la prise en compte des incertitudes de la phase de conception et des variabilités de leurs paramètres conceptuels, une approche associant les méthodes de fiabilité et la modélisation théorique a été proposée pour prendre en compte les défaillances structurelles de la poutre composite. L'indice de fiabilité a été estimé par la First Order Reliability Method (FORM). La variabilité des propriétés mécaniques et géométriques est introduite dans le modèle stochastique. Les probabilités de défaillance et les indices de fiabilité résultants sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux. Le traitement des différents résultats obtenus en termes d'évolution de l'indice de fiabilité, qui reflète l'état de sûreté de l'élément et en termes de probabilité de défaillance due à l'amorce et la propagation des fissures de flexion, laisse entrevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux composites, pour améliorer les performances mécaniques, notamment la capacité portante des poutres composites. La confrontation montre la contribution du tissu composite en GFRP à la diminution de la vitesse de propagation des fissures de flexion dans la poutre considérée.

Les différents résultats obtenus sont très encourageants, toutefois, des études complémentaires devraient être réalisées pour confirmer et améliorer ces résultats. Par conséquent, pour la suite du travail, nous proposons les perspectives suivantes :

- Tenir compte de l'effet d'échelle, à travers d'autres essais mécaniques sur des poutres de grande dimension, afin de tenir compte des grandes déformations.
- Utiliser d'autres formes géométriques des éléments tubulaires et évaluer les paramètres conceptuels adéquats de notre proposition.
- Optimiser la conception proposée, à travers une étude de sensibilité statistique, mécanique et couplée de chaque variable aléatoire liée au système étudié.
- Modélisation des différents scénarios de défaillance susceptibles de se produire, par une approximation quadratique de la surface de défaillance (SORM).
- Intégrer dans les simulations numériques des modèles de glissement, pour tenir compte de l'adhérence entre les différents composants de la poutre développée.
- Développer un modèle analytique de type 'déformation' afin de transcrire le comportement réel et d'évaluer la réponse exacte et complète de la poutre composite.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **D Kian Karimi and al** “*Testing and modeling of a novel FRP-encased steel–concrete composite column*” *Composite Structures* 93 (2011) 1463–1473.
- [2] **Fei-Yu Liao** “*Behaviour of composite joints with concrete encased CFST columns under cyclic loading: Experiments*” *Engineering Structures* 59 (2014) 745–764
- [3] **G. Vasudevan and al** "study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling" *Strength of Materials*, Vol. 45, No. 2 March, (2013).
- [4] **T. Hassaine Daouadji** : “*analytical analysis of the interfacial stress in damaged reinforced concrete beams strengthened by bonded composite plates*” *Strength of Materials*, Vol. 45, No. 5, September, (2013)
- [5] **Woraphot Prachasaree**: “*Structural Performance of Light Weight Multi cellular FRP Composite Bridge Deck Using Finite Element Analysis*” *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* (2012)
- [6] **AFPS–Parasismic French Association**. *The seism of May 21, 2003 in Algeria. Preliminary report of the AFPS mission*, Ministry for ecology and the durable development, 8 July; (2003).
- [7] **El Houssain ROCHDI** « *contribution a l’analyse du comportement mecanique de dalles en beton arme renforcees par materiaux composites*» Thèse de Doctorat, L’universite clude bernard - lyon 1 2004.
- [8] **ARMY TM** .”*Appendix E: Guidelines for the evaluation of existing materials [en ligne], Seismic Design Guidelines for Upgrading Existing Buildings*. Navy NAVFAC P-355.2, 1988. Disponible sur: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/armytm/tm5-809-10-2/>
- [9] **BREYSSE D., ABRAHAM O.** *Méthodologie d’évaluation non destructive de l’état d’altération des ouvrages en béton*. Association Française de Génie Civil. Editeur : Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 1er Edition, 556p. ISBN : 2-85978-405-5.
- [10] **ADAM et NEVILLE .M.** « *Propriétés des bétons* ». Editions Eyrolles, Paris, 2000.
- [11] **ROTILIO.J.D** (1998) « *Contribution des actions variables aux déformations a long terme des ponts en béton* » Thèse de doctorat ; Université libre de Bruxelles, Belgique
- [12] **E. Freyssinet**, «*Progrès pratiques des méthodes de traitement mécanique des bétons* », Deuxième Congrès de l’Association internationale des ponts et charpentes, octobre 1936.

- [13] **Youcef FRITIH** « *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé* » Thèse de Doctorat, L'INSA de Toulouse université Claude Bernard - LYON 1 2009
- [14] **Abrishami H.H., Mitchell D.** (1997) “*Influence of Steel Fibers on Tension Stiffening*”. ACI Structural Journal, V. 94, No. 6, pp. 769-776.
- [15] **ACI Committee 544.** (1988) “*Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 5, pp. 563-580.
- [16] **A. Blaga.** « *Les thermoplastiques* », Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Digest de la construction au Canada 158F, Ottawa, 1975.
- [17] **A. Blaga.** « *Les plastiques thermodurcissables* », Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Digest de la construction au Canada 159F, Ottawa, 1975.
- [18] **Jesse. F, Curbach. M** « *Strength of continuous AR-glass-fibre reinforcement for cementitious composites*”, RILEM International Workshop High Performance Fiber reinforced cement composite 12, 337-348, 2003
- [19] **Hana ALJEWIFI** « *Etude su comportement à l'arrachement des fils-multi filamenteux enrobés dans une matrice cimentaire et influence de l'imprégnation* » Thèse de doctorat, de l'université Cergy-Pontoise, France 2001.
- [20] **J.M. Berthelot** « *Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures* » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN: 2-7430-0771-0. pp 72
- [21] **K. Saidani** « *Analyse des composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine* » Thèse de Doctorat, L'université de Tizi Ouzou 2013
- [22] **ZE YI WU** « *Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue* » Thèse de Doctorat, de l'école nationale des ponts et chaussées Paris 2004.
- [23] **D. Broseta, G. H. Fredrickson, E. Helfand** “*Molecular weight and polydispersity effects at polymer-polymer interfaces*”, Macromolecules 23, 132-139, 1990
- [24] **H. Pernot, M. Baumert, F. Court** “*Design and properties of co-continuous nanostructured polymers by reactive blending*” Nature Materials 1, 54-58, 2002.
- [25] **Engineered concrete solutions.** “*crack control ecs3 [en ligne]*”. new zealand: ecs, august 1999. http://www2.holcim.com/upload/nz/publications/ecs_crack_control.pdf
- [26] **Todor ZHELIAZOV** « *Renforcement Des Structures En Béton Armé Par Collage De Matériaux Composites* » Thèse de Doctorat de l'Université de Reims 2008.
- [27] **TENG, J. G., CHEN, J. F., SMITH, S. T., LAN, L.** “*RC Structures Strengthened with CFRP Composite*”, Research Centre For Advanced Technology in Structural Engineering , The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2000.

- [28] **ARDUINI, M., DI TOMASO, A., NANNI, A.**, “*Brittle Failure in FRP Plated and Sheet Bonded Beams.*”, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 4, pp.: 363-370, 1997
- [29] **R. BENZAID H.A. MESBAH N. CHIKH** « *Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton* » hal-00782103, version 1 - 30 Jan 2013 978-613-1-55146-8
- [30] **Spoelstra. M and Monti. G** “*FRP-Confined concrete model*”, Journal of composite construction, ASCE, 3(3): 143-150,(1999)
- [31] **T. Croston** « *Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites (approche probabiliste)* » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux ; 2006
- [32] **Thomas H.-K. Kang**: “*Shear-Strengthening of Reinforced & Prestressed Concrete Beams Using FRP: Part II – Experimental Investigation*” Int J of Con Struc and Mat Vol.6, No.1, pp.49~57, March (2012)
- [33] **C. Cremona.** « *Approche probabiliste de la performance des structures* ». Hermès-Lavoisier, Paris, 2010.
- [34] **Anthony HÄHNEL** «*Approche mécano-probabiliste système en conception pour la fiabilité* » Thèse de Doctorat, Université BLAISE PASCAL - Clermont II ; 2012.
- [35] Charles Muller (1973). *Initiation aux méthodes de la statistique linguistique*. Numéro 32 in Unichamp. Champion, réédition 1992. ISBN : 2-85203-270-8.
- [36] **S. MOHAMMADKHANI-SHALI** « *Contribution a l'etude de la redondance dans les ponts : analyses des mecanismes de defaillance par surfaces de reponse* » Thèse de Doctorat, de l'École Nationale des Ponts et Chaussées ; 2007.
- [37] **P. BEUCAIRE** « *Application des méthodes fiabilistes à l'analyse et à la synthèse des tolérances* » ; Thèse de Doctorat, Université BLAISE PASCAL - Clermont II ; 2013.
- [38] **O. MAIRAGOUNA** « *Approche probabiliste du comportement mécanique des composites thermoplastiques assemblés par soudage laser* » Thèse de Doctorat, de l'École nationale supérieure des mines de Paris ; 2012.
- [39] **LÍ JIANG** « *Calcul en fatigue des ouvrages métalliques par la mécanique de la rupture (approche probabiliste)* » ; Thèse de Doctorat, de l'École Nationale des Ponts et Chaussées ; 1994.
- [40] **S. HAMZA** « *Analyse probabiliste de la vulnerabilite sismique des batiments existants : Application aux structures à portiques en beton armé* » ; Thèse de Doctorat, de l'université de Marne-la-Vallée, France ; 2102.
- [41] **J. EL HASSAN** « *Évaluation fiabiliste de l'impact des facteurs climatiques sur la corrosion des poutres en béton armé : Application au cas libanais* » ; Thèse de Doctorat, de Université BLAISE PASCAL - Clermont II ; 2010.

- [42] **J. MAYNADIER** « *Approches statistiques et fiabilistes en dynamique des structures* » ; Thèse de Doctorat, de l'institut national des sciences appliquées, Paris ; 2003.
- [43] **X. S. NGUYEN** ; « *Algorithmes probabilistes appliqués à la durabilité et à la mécanique des ouvrages de génie civil* » ; Thèse de Doctorat, de l'INSA de Toulouse ; 2007.
- [44] **Clement Rau** “*Statistiques inferentielles Université*” Paul Sabatier - Toulouse 3 IUT de Toulouse 3 A Departement GEA PONSAN
- [45] **Weibull W** “*A statistical theory of the strength of materials*”, Royal Swed. Inst. Eng. Res., Vol. 151, 1939.
- [46] **Si Salem. A, Ait Taleb S , Ait tahar K** « *Analyse fiabiliste de la capacité portante d'une poutre composite* » 5^{ème} SNMPE'2014 ;pp 164-170 ; 12 et 13 Mai, 2014 Boumerdès, Algérie.
- [47] **Si Salem. A, Ait Taleb. S , Ait tahar. K** « *Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP* » ; Frontiers of Structural and Civil Engineering, 9 (2): 154-162 (2015).
- [48] **Si Salem A, Ait Taleb S & Ait tahar K** « *Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components*» Procedia Engineering, 114(C); 173-180 (2015).
- [49] **F. Deheeger** « *Couplage mecano-fiabiliste : SMART - methodologie d'apprentissage stochastique en fiabilité* » ; Thèse de Doctorat, de l'université BLAISE PASCAL - Clermont II ; 2008
- [50] **B. Richard** « *Comportement des éléments de structures en béton armé dégradés par corrosion : la problématique de la modélisation de l'interface acier/béton en présence de corrosion* » ; Thèse de Doctorat, de l'université Paris est, 2010.
- [51] **C. Cannamela** « *Apport des méthodes probabilistes dans la simulation du comportement sous irradiation du combustible à particules* » ; Thèse de Doctorat, de l'université Paris VII ;2008.
- [52] **Q. Lü, B.K** “*Low Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surfacemethod and SORM*” Computers and Geotechnics 38 (2011) 1008–1021
- [53] **H. Baalousha, J. Kongeter.** “*Stochastic modelling and risk analysis of groundwater pollution using FORM coupled with automatic differentiation*” Advances in Water Resources 29 (2006) 1815–1832.
- [54] **Der Kiureghian** “*The geometry of random vibrations and solutions by FORM and SORM*” Probabilistic Engineering Mechanics 15 (2000) 81–90.
- [55] **Wong F.S** “*Slope stability and response surface method*”. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 1984,vol.110, p.32-53.

- [56] **Bucher C.G., Bourgund U;** “*A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems*”; Structural Safety, 1990, vol. 7 p. 57-66.
- [57] **E. Rosenblueth** ; “*Two points estimates in probabilities*”. Appl Math modelling, 1981, vol.5 (2), p.329-225.
- [58] **E. Fairbairn, F. Ebecken, F. Ulim** « *Détermination of probabilistic parameters of concrete solving the inverse problem by using artificial neural networks* ». Computers and Structures, 2000, vol.78, p.497-503.
- [59] **H. Dehmous** «*Fiabilité et micromécanique des matériaux composites Application à la passerelle de Laroin* » Thèse de Doctorat, de l’Institut National Polytechnique de Toulouse ; 2007
- [60] **H. Dehmous, H. Weleman** « *Multi-scale reliability analysis of composite structures Application to the Laroin footbridge* ». Enginee Failure Analysis 18 (2011) 988–998.
- [61] **H. Weleman, H. Dehmous** “*Reliability analysis and micromechanics: A coupled approach for composite failure prediction*” International Journal of Mechanical Sciences 53 (2011) 935–945
- [62] **G. Vasudevan and al** « *Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling* » Strength of Materials, Vol. 45, No. 2 March, (2013).
- [63] **Woraphot Prachasaree:** « *Structural Performance of Light Weight Multi cellular FRP Composite Bridge Deck Using Finite Element Analysis* » Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. (2012)
- [64] **C. Lacasse** « *Etude expérimentale et analytique du comportement en compression-flexion de poteaux composites partiellement enrobés de bétons haute performance et de bétons renforcés de fibres métalliques* » Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de Montréal 2011.
- [65] **M. C. Sundarraja and G.G Prabhu** « *Experimental Investigation on Strengthening of CFST Members under Flexure Using CFRP Fabric* » Arab J Sci Eng (2014) 39:659–668DOI 10.1007/s13369-013-0640-z
- [66] **Thomas H.-K. Kang** « *Shear-Strengthening of Reinforced & Prestressed Concrete Beams Using FRP: Part II – Experimental Investigation* » Int J of Con Struc and Mat Vol.6, No.1, pp.49~57, March (2012)
- [67] **A. Hajipour** « *A high performance fibre reinforced cement based plaster for retrofitting RC members* » Materials and Structures (2013) 46:277–288 DOI 10.1617/s11527-012-9901-7
- [68] **Wang Su-yan** « *Mechanism of improving ductility of high strength concrete T-section beam confined by CFRP sheet subjected to flexural loading* » J. Cent. South Univ. (2013) 20: 246–255DOI: 10.1007/s11771-013-1482-2

- [69] **R. Contamine** « *Contribution à l'étude du comportement mécanique des composites textile-mortier. Application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant* » Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1 ; 2011.
- [70] **E. Rochdi** « *Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites* » Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1 ; 2014.
- [71] **Y. Si Youcef** « *Contribution a la compréhension du comportement des poteaux elances en beton arme confines et renforces par la fibre de carbone* » Thèse de Doctorat, l'Université européenne de Bretagne 2010.
- [72] **T. Hassaine Daouadji** « *Analytical analysis of the interfacial stress in damaged reinforced concrete beams strengthened by bonded composite plates* » *Strength of Materials*, Vol. 45, No. 5, September, (2013).
- [73] **T.C. Triantafillou, N. Plevris** « *Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials* » *Materials and Structures* (1992). 25, 201-211
- [74] **S. Cattaneo et al** « *Flexural behaviour of reinforced, prestressed and composite self consolidating concrete beams* » *Construction & Building Materials* 36 (2012) 826–837
- [75] **G. Promis et al** « *Analytical modeling of the bending behavior of textile reinforced mineral matrix composite beams* » *Composite Structures* 93 (2011) 792–801
- [76] **S. Avril** « *Caractérisation expérimentale et modélisation de la fissuration dans une poutre en béton armé réparée par matériaux composite* » *Compte rendu des 13ème journées nationales sur les composites*, vol1, 2003
- [77] **H. Garden, L.C Hollaway** « *An experimental study of the failure mode of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates* » *Composites Part B*, 1998, vol 29B, pp 411-424.
- [78] **T. Kamada** « *The effect of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system* ». *Cement&Concr composite*, 2000, Vol 22, pp 423-431
- [79] **M R. Mahri** « *Seismic performance parameters of RC beams retrofitted by CARDIFRC* » *Engendering structure*, vol 26, 2004, pp 2069-2079.
- [80] **D.-S. Yang et al** « *Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites* » *Composite Structures* 88 (2009) 497–508.
- [81] **F. Taouche** « *Modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibres* » Thèse de Doctorat, Université de Tizi Ouzou 2012.
- [82] **ZE YI WU** « *Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton arme pré-fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue* » Thèse de Doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées ; 2004.
- [83] **Behfarnia. K** « *The effect of tension stiffening on the behavior of R/C beam* » *Asian journal of civil engineering*, (2009) VOL 10, N° 3 PAGES 243/255

- [84] **Ait tahar K, Si Salem,** *Development and analysis of a new design concrete composite beam* "(2014) 5th International Symposium on Aircraft Materials: ACMA – Marrakech, MOROCCO, April 23-26, 2014
- [85] **Association française de normalisation** « *Essai pour béton durci* » Norme européenne- norme française NF EN 12390-2, Octobre 2001, Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes. ISSN 0335-3931.
- [86] **A. Aouameur-Mesbah** « *Analyse non-linéaire matérielle et géométrique des structures coques en béton arme sous chargements statiques et dynamiques* » Thèse de Doctorat, de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ; 1998.
- [87] **E. Van Geel** « *Concrete behaviour in multiaxial compression: Experimental Research* » Thèse de Doctorat, Université de Eindhoven; 1998.
- [88] **A. Krayani** « *Modèle élastoplastique endommageable non local pour la modélisation du comportement structurel du béton* » XXV^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil ; 2007
- [89] **Z. N. Taqieddin** « *elasto-plastic and damage modeling of reinforced concrete* » PhD thesis, University Amman, Jordan, 2001
- [90] **J. Mazars** « *Modélisation simplifiée 3D du comportement dynamique de structures en béton armé* » XXIII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil ; 2005.
- [91] **H. Karlsson** « *ABAQUS documentation version 6.10 et 6.12 : Theory Manual* » Inc, Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA; 2010.
- [92] **G. Vasudevan and S. Kothandaraman** « *Study on Non-Linear Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams using Ansys By Discrete Reinforcement Modeling* » Strength of Materials, Vol. 45, No. 2, March, 2013
- [93] **Jialai Wang, Chao Zhang** « *Nonlinear fracture mechanics of flexural–shear crack induced debonding of FRP strengthened concrete beams* » International Journal of Solids and Structures 45 (2008) 2916–2936.
- [94] **R. Al-Rousan, R. Haddad** “*NLFEA sulfate-damage reinforced concrete beams strengthened with FRP composites*”; Composite Structures 96 (2013) 433–445
- [95] **E. Martinelli et al** « *A 1D finite element model for the flexural behaviour of RC beams strengthened with MF-FRP strips* » Composite Structures 107 (2014) 190–204.
- [96] **D. De Domenico et al** « *A FE-based limit analysis approach for concrete elements reinforced with FRP bars* » Composite Structures 107 (2014) 594–603
- [97] **A. Krayani** « *Contributions a la modélisation non linéaire du comportement mécanique du béton Et des ouvrages en béton arme et précontraint* » Thèse de Doctorat, de L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes ; 2007.
- [98] **Adam et M. Neville** « *Propriétés des bétons* ». Editions Eyrolles, Paris, 2000.
- [99] **J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller and E. Onate** « *A plastic-damage model for concrete* » International Journal Solids Structures 25(3), 1989, 299-326

- [100] **S. Oller, E. Onate, J. Oliver, and J. Lubliner** « *Finite element nonlinear analysis of concrete structure using a plastic-damage model* » *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 35, pp. 219-231, 2001
- [101] **J. Lee, G.L. Fenves** « *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures* » *Journal of Engineering Mechanics* (1998), 124 (8), pp. 892-900
- [102] **D.Ngo, A.C. Scordelis** « *Finite element analysis of reinforced concrete beams* » *Journal of the American Concrete Institute* (1967); 64 (14): 152-163.
- [103] **Y.R. Rashid** « *Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels* » *Nuclear Engineering and Design* (1968)., Vol. 7, No. 4, pp. 334-344.
- [104] **J. Lemaitre, J. L. Chaboche** « *Mécanique des matériaux solides* » Paris, Ed: Dunod, 2001, 544p.
- [105] **S. Murakami** « *A Continuum theory of creep and creep Damage* » In A.R.S. Ponter et D. R. Hayhurst eds., 3rd Creep in Structures Symposium, Leicester, pp 422- 443 IUTAM, Springer Verlag 1980.
- [106] **P. Mark, M. Bender** « *Computational modeling of failure mechanisms in reinforced concrete structures* » *Architecture and Civil Engineering* Vol. 8, No 1, 2010.
- [107] **J. R. Rots** « *Computational modeling of concrete fracture* » Ph.D. dissertation, Delft, University of Technology., Netherlands, 1988.
- [108] **A. Kezmane** « *Optimization of the Reinforcement Positioning in the Squat Reinforcement Concrete Walls* » *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 5, October 2013.
- [109] **A. Ahmed, V.K.R. Kodur** « *Effect of bond degradation on fire resistance of FRP strengthened reinforced concrete beams* » *Composites: Part B* 42 (2011) 226–237.
- [110] **R. Garcia et al** « *Bond behaviour of substandard splices in RC beams externally confined with CFRP* » *Construction and Building Materials* 50 (2014) 340–351
- [111] **R. Kotynia** « *Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement* » *Construction and Building Materials* 32 (2012) 41–54
- [112] **R. Carrazedo et al** « *Plasticity based stress–strain model for concrete confinement* » *Engineering Structures* 48 (2013) 645–657
- [113] **R. Realfonzo, A. Napoli** « *Confining concrete members with FRP systems: Predictive vs design strain models* » *Composite Structures* 104 (2013) 304–319
- [114] **L. Ombres** « *Concrete confinement with a cement based high strength composite material* » *Composite Structures* 109 (2014) 294–304
- [115] **F.J. De Caso y Basalo et al** « *Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement* » *Construction and Building Materials* 32 (2012) 55–65

- [116] **V.P. Berardi, G. Mancusi** « *A mechanical model for predicting the long term behavior of reinforced polymer* » *Concretes Mechanics Research Communications* 50 (2013) 1–7
- [117] **M.F.M. Fahmy, Z.S. Wu** « *Evaluating and proposing models of circular concrete columns confined with different FRP composites* » *Composites: Part B* 41 (2010) 199–213
- [118] **G. Wu et al** « *Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites* » *Construction and Building Materials* 20 (2006) 134–148
- [119] **F. Bentayeb, K.Ait tahar et A.Chateauneuf** « *New technique for reinforcement of concrete columns confined by embedded composite grid* » *Construction and Building Materials* (2007) doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.06.015
- [120] **Richart, F.E., Brandtzaeg, A. et Brown, R.L.** (1929) « *The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression* » Engineering Experiment Station, Bulletin No. 190, University of Illinois, Urbana, USA.
- [121] **American Concrete Institute (ACI)** « *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures* ». ACI 440.2R-02, Farmington Hills, Michigan, USA
- [122] **Kurt, C.E.** (1978) « *Concrete filled structural plastic columns* » *Proceedings of the American Society of civil engineering*, Vol. 104, No. ST1, pp. 55-63.
- [123] **Fardis, M.N. et Khalili, H.H.** (1981) « *Concrete encased in fiberglass-reinforced plastic* », *ACI Material Journal*, Proceedings Vol. 78, No. 6, pp. 440-446.
- [124] **Karbhari VM, Gao Y.** « *Composite jacketed concrete under uniaxial compression verification of simple design equation* ». *J Mater Civil Eng* 1997:185–93.
- [125] **Mirmiran, A., Shahawy, M. Samaan, M. et El Echary, H.** (1998) « *Effect of column parameters on FRP-confined concrete* », *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.
- [126] **Spoelstra, M.R. et Monti, G.** (1999) « *FRP-confined concrete model* » *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 3, No. 3, pp. 143-150.
- [127] **Saafi, M., Toutanji, H.A. et Li, Z.** (1999) « *behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes* », *ACI Matls Journal*, Vol. 96, No. 4, pp. 500-509.
- [128] **Ait tahar K, Taouche F, Bouamra Y** (2012) « *Parametric analysis of the models of confinement of the concrete column* », *Key Engineering Materials* Vol. 498 (2012) pp 1-14 © Trans Tech Publications, Switzerland
- [129] **B. Behnam, C. Eamon** « *Reliability-based design optimization of concrete flexural members reinforced with ductile FRP bars* » *Construction & Building Mater* 47 (2013).
- [130] **H. Dehmous, H. Weleman, M. Karama, K. Ait tahar** « *Reliability approach for fibre-reinforced composite design* », -*International Journal for simulation and multidisciplinary design optimization*, IJSMDO/2008/ISI/02, vol 2 p1-9 Ed. EDP.

- [131] **S.C.Ribeiro, S.M.C. Diniz** "*Reliability-based design recommendations for FRP reinforced concrete beams*" *Engineering Structures* 52 (2013) 273–283.
- [132] **Frangopol DM et al** "*Effects of load path and load correlation on the reliability of concrete columns*" In: *probabilistic mechanics and structural reliability*. Massachusetts, USA (1996) p. 206–19
- [133] **Frangopol DM, Ide Y, Spacone E, Iwaki I** "*A new look at reliability of reinforced concrete columns*". *Journal of Structural Safety* (1996); 2(18):123–50.
- [134] **H. Baalousha, J. Kongeter** "*Stochastic modelling and risk analysis of groundwater pollution using FORM coupled with automatic differentiation*" *Advances in Water Resources* 29 (2006) 1815–1832
- [135] **R.C Silva** « *Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé* » Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [136] **Y. Bereriche** « *Contribution de l'approche contrainte résistance à l'évaluation de la Fiabilité des structures* » Thèse de Doctorat, de l'université Laval Québec ; 2010.

RESUME

Une nouvelle technique de conception des poutres en béton composite, qui présentent à la fois des performances mécaniques intéressantes et un poids propre réduit, est proposée dans cette étude. Cette nouvelle conception consiste à intégrer un élément tubulaire en polymère dans la zone tendue de la poutre, mécaniquement inefficace, enveloppé par un tissu composite, prolongé le long de la hauteur de la section droite de la poutre et disposé perpendiculairement à l'axe neutre de la section, pour améliorer d'une part sa rigidité flexionnelle, de s'opposer au développement des déformations latérales et d'autre part de diminuer la vitesse de propagation des fissures de flexion et de cisaillement, en mobilisant la pression latérale de confinement, due à la différence des rigidités entre les deux matériaux à savoir : le béton et le tissu composite en GFRP.

Une campagne expérimentale sur des poutres en béton composite chargées en flexion quatre points jusqu'à la rupture, pour mettre en exergue les performances mécaniques de telles poutres comparativement aux poutres de conception traditionnelle en béton armé, est réalisée. Pour mieux comprendre le comportement de la nouvelle poutre composite, une simulation numérique à base des éléments finis et une modélisation analytique couplée à une approche fiabiliste (la méthode FORM) sont également réalisées. Ces analyses mettent en évidence l'influence de la variabilité des différents paramètres liés à la géométrie, aux propriétés mécaniques et aux conditions de chargement, pour la détermination des états limites de défaillance, ainsi que leurs influences directes sur les modes de rupture des spécimens considérés.

Mots clés : Conception, poutre composite, essais, modélisation analytique, simulation numérique, approche fiabiliste.

ABSTRACT

The main objective of this study is to design a new concrete composite beam; structural elements with low cost and high mechanical performances to weight ratio are developed. The proposed technology consists to integrate in the flexural tensile zone of the concrete beam a cylindrical polymer tube wrapped by a GFRP fabric in order to improve its flexural stiffness, which allows to avoid problems due to interface between concrete and composite materials. In order to oppose to the development of lateral deformations of the polymer tube, the GFRP fabric was extended along the height of the cross section of the composite beam. The mobilization of the confinement pressure due to the difference stiffness of all these compatible materials namely: Concrete, Polymer tube and GFRP fabric allows reducing the cracks initiation and the cracks propagation, which makes the structure significantly efficient.

Experimental investigation completed by non linear finite element analyses are carried out on concrete-composite beam under typical four point bending loads until failure, to highlight the enhancement in terms of mechanical performances of the new beam compared to conventional reinforced concrete ones. In order to draw complete conclusions about the interest of the proposed technology, a coupled approach between theoretical modeling and the classical reliability analysis was performed to assess the influence of the variability of the parameters related to the geometrical characteristics, the mechanical properties, and the loading path for the determination of the failure limit states. The reliability index which reflects the risk exposure of cracks initiation was assessed by the FORM method.

Keywords: Design, Composite beam, Experiments, theoretical modeling, numerical investigation, Reliability approach.