

N ° Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2023

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

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées

Département de génie civil

Mémoire de Fin D'études

Présenté par :

BOUTOUGHMAS Mehdi

HACINI Adlane

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : **Génie Civil**

Option : **Structures**

Thème

**Etude expérimental du comportement flexionnel des poutres
renforcées avec des matériaux composite PRF**

Devant le jury composé de :

Mr : MOUSSAOUI FAHEM	MCB	UAMOB	Président
Mr : AOUADI ABDELHAK	MCB	UAMOB	Encadrant
Mr : REFFAS BRAHIM	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout-puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail.

Nous vifs remerciements vont à notre encadreur Mr Aouadi Abdelhak professeur à l'université AKLI MOHAND OULHADJ - BOUIRA qui nous a aidés à réaliser ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude envers les membres du comité d'évaluation, Mr Moussaoui Fahem et Mr Reffas Brahim, pour leur intérêt manifeste envers notre projet en acceptant de l'examiner attentivement et de le compléter grâce à leurs précieuses observations.

Nous exprimons notre gratitude envers tous les enseignants qui nous ont apporté des connaissances et du savoir, ainsi qu'envers l'équipe du laboratoire de Génie Civil de l'université AKLI MOHAND OULHADJ de BOUIRA. Leur accueil chaleureux, leur aide et leur assistance pendant nos recherches expérimentales ont été précieuses.

Finalement, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers tous nos proches, notre famille, nos parents, nos amis et tous ceux qui ont apporté leur contribution, qu'elle soit directe ou indirecte, à la réalisation de ce projet.

Dédicace

Ce modeste travail est dédié à :

Nos précieux parents, ainsi que nos chers frères et sœurs,

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers eux, pour leur présence inestimable et leur soutien indéfectible tout au long de nos années d'études. Leur engagement total à notre égard a été essentiel pour façonner la personne que nous sommes aujourd'hui. En leur dédiant ce travail, nous souhaitons humblement témoigner de notre reconnaissance sincère envers eux.

Nous exprimons notre sincère gratitude envers les familles Boutoughmas et Hacini, ainsi qu'envers toutes les personnes qui nous ont apporté leur soutien tout au long de notre parcours de formation.

TABLE DES MATIERES

REMERCEIMENTS	I
DEDICACE.....	II
TABLE DES MATIERES.....	III
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LIESTE DES ABREVIATIONS.....	X
RESUME.....	XI
ABSTRACT.....	XII
ملخص.....	XIII
INRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : COMPORTEMENT DU BETON

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. HISTORIQUE.....	4
I.3. LE BETON	5
I.3.1. LES CONSTITUANTS DU BETON.....	6
I.3.1.1. LE CIMENT	6
I.3.1.2. L'EAU.....	6
I.3.1.3. LES GRANULATS	7
I.3.1.4. LES ADJUVANTS.....	7
I.3.2. COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON	8
I.3.2.1. LE BETON EN COMPRESSION	8
I.3.2.2. LE BETON EN TRACTION	9
I.4. LES ACIERS D'ARMATURE	10
I.5. LES DEGRADATIONS DES MATERIAUX.....	12
I.5.1. PRINCIPALES CAUSES DES DEGRADATIONS DES STRUCTURES	13
I.5.1.1. LES DEGRADATIONS LIES AUX ERREURS HUMAINES	13
I.5.1.2. DEGRADATIONS CHIMIQUES DES STRUCTURES	14
I.5.1.3. DEGRADATIONS PHYSIQUES DES STRUCTURES.....	16
I.5.1.4. DEGRADATIONS MECANIQUES DES STRUCTURES.....	16
I.6. METHODES DE REPARATION ET RENFORCEMENT.....	17

I.6.1. RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN BETON	18
I.6.2. RENFORCEMENT PAR PROJECTION DU BETON	18
I.6.2.1. PROCEDE PAR VOIE SECHE	19
I.6.2.2. PROCEDE PAR VOIE HUMIDE	19
I.6.3. RENFORCEMENT PAR CHEMISES EN ACIER	20
I.6.4. RENFORCEMENT A L' AIDE DES TOLES COLLEES	21
I.7. CONCLUSION	22

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DES POUTRES PAR MATERIAUX COMPOSITE PRF

II.1. INTRODUCTION.....	23
II.2. FISSURATION ET MODES DE RUPTURE DES POUTRES EN BETON ARME.....	23
II.2.1. FISSURATION	23
II.2.2. MODES DE RUPTURE DES POUTRES EN BETON ARME	24
II.2.2.1. RUPTURE PAR CISAILLEMENT ET FLEXION	25
II.2.2.2. RUPTURE PAR CISAILLEMENT ET COMPRESSION	25
II.2.2.3. RUPTURE PAR CISAILLEMENT AVEC GLISSEMENT	26
II.2.2.4. RUPTURE PAR COUPURE	26
II.3. MATERIAUX COMPOSITES.....	27
II.3.1. DEFINITION DES MATERIAUX COMPOSITES « PRF »	27
II.3.2. LES MATERIAUX COMPOSITES EN « PRF »	27
II.3.3. LES FIBRES	29
II.3.3.1. FIBRES DE CARBONE	29
II.3.3.2. FIBRES DE VERRE	29
II.3.3.3. FIBRES D'ARAMIDE	30
II.3.4. MATRICE	31
II.3.5. DOMAINES D'APPLICATION	32
II.3.5.1. STRUCTURES EN BETON ARME	32
II.4. LES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT.....	34
II.4.1. RENFORCEMENT A L' AIDE DES MATERIAUX COMPOSITES « PRF » POLYMERE RENFORCE DE FIBRES.....	34
II.4.1.1. RENFORCEMENT A L' AIDE DES MATERIAUX COMPOSITES COLLE (Technique EBR)	35
II.4.1.2. TECHNIQUE DE RENFORCEMENT NSM (<i>Near Surface Mounted</i>)	36
II.4.1.3. TECHNIQUE DE RENFORCEMENT SNSM (<i>Saide Near Surface Mounted</i>)	37
II.5. CONCLUSION	38

CHAPITRE III : COMPAGNE EXPERIMENTALE

III.1. INTRODUCTION	39
III.2. MATERIAUX UTILISES	39
III.2.1. LE BETON	39
III.2.1.1. GRANULATS	40
III.2.1.2. CIMENT	41
III.2.1.3. EAU	41
III.2.2. RESINE	41
III.2.3. ARMATURE	42
III.2.4. LE RENFORT	43
III.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	45
III.3.1. POUTRES TESTEES	45
III.3.2. PREPARATION DES SPECIMENS	47
III.3.2.1. LES CARACTERISTIQUES DE BETON DURCI	47
III.3.2.2. MALAXAGE ET MISE EN ŒUVRE	48
III.3.2.3. PROCEDES DE MISE EN ŒUVRE DU RENFORT COMPOSITE SUR LES POUTRES	50
III.3.3. PROGRAMME D'ESSAI (CHARGEMENT ET ACQUISITION)	52
III.4. CONCLUSION	53

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

IV.1. INTRODUCTION	54
IV.2. RESULTATS ET DISCUSSION	54
IV.2.1. MODES DE RUPTURE	54
IV.2.2. COURBES FORCE-DEPLACEMENT	56
IV.3. EXPLOITATION DES RESULTATS OBTENUS	59
IV.3.1. EVALUATION DES GAINS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS	59
IV.3.2. EVALUATION DES GAINS DE DUCTILITE	65
IV.4. CONCLUSION	69
CONCLUSION GENERALE	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	72

LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1: COUPOLE DU PANTHEON DE ROME	4
FIGURE I.2: LA TOUR PERRET	5
FIGURE I.3: LES DIFFERENTS CONSTITUANTS DU BETON DESTINE A LA CONSTRUCTION	5
FIGURE I.4: LE MATERIAU BETON.	6
FIGURE I.5: LES ADJUVANTS	7
FIGURE I.6: LOI DE COMPORTEMENT DU BETON EN COMPRESSION SOUS CHARGEMENT STATIQUE	8
FIGURE I.7: DIFFERENTS ESSAIS DE TRACTION DU BETON	9
FIGURE I.8: EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION FTJ EN FONCTION DE CELLE A LA COMPRESSION FCJ.....	10
FIGURE I.9: LOI DE COMPORTEMENT MONOTONE DE L'ACIER	10
FIGURE I.10: DIAGRAMME CONTRAINTE-DEFORMATION D'ESSAIS DE TRACTION SUR LES DIFFERENTS TYPES D'ACIER	12
FIGURE I.11: PRINCIPALES CAUSES DES PATHOLOGIES DES STRUCTURES EN BETON ARME.....	13
FIGURE I.12: EXEMPLES DE DEGRADATION DE BETON PAR : (A) RAG ; (B) ATTAQUES SULFATIQUES ; (C) ATTAQUES ACIDES ; (D) LIXIVIATION ; (E) CORROSION DES ARMATURES.	15
FIGURE I.13: EXEMPLES DE DEGRADATION DE BETON PAR : (A) ABRASION ; (B) GEL-DEGEL ; (C) RETRAIT.....	16
FIGURE I.14: EXEMPLES DE DEGRADATION DE BETON PAR : (A) CHOC ET EXPLOSION ; (B) TASSEMENT ; (C) VIBRATION « SEISME ».....	17
FIGURE I.15: CHEMISAGE EN BETON ARME (A) D'UN POTEAU ; (B) D'UNE POUTRE.....	18
FIGURE I.16: PROJECTION PAR VOIE SECHE	19
FIGURE I.17: PROJECTION PAR VOIE HUMIDE	19
FIGURE I.18: RENFORCEMENT AVEC DES CHEMISES EN ACIER (A) POTEAUX CIRCULAIRES ET RECTANGULAIRES (B) POUTRE.....	20
FIGURE I.19: TOLES COLEES ; (A) DIFFICULTE DE MANUTENTION ; (B) RENFORCEMENT DU VIADUC DE TERRENOIRE PAR TOLES COLLEES PERFOREES -BREVET FREYSSINET.....	21
FIGURE II.1: PLAQUE DE COMPOSITE COLLEE SUR UNE POUTRE EN BETON ARME.....	23
FIGURE II.2: SCHEMATISATION DU PROCESSUS DE RUINE D'UN ELEMENT DE STRUCTURE.....	24
FIGURE II.3: RUPTURE PAR CISAILLEMENT ET FLEXION	25
FIGURE II.4: RUPTURE PAR CISAILLEMENT ET COMPRESSION.....	26
FIGURE II.5: RUPTURE PAR CISAILLEMENT ET GLISSEMENT	26
FIGURE II.6: RUPTURE PAR COUPURE.....	27

FIGURE II.7: MATERIAUX COMPOSITES EN POLYMERE RENFORCE DE FIBRES « PRF ».....	28
FIGURE II.8: LES TROIS TYPES DES FIBRES POUR « PRF ».....	30
FIGURE II.9: CONFINEMENT (CHEMISAGE) DE POTEAUX A L' AIDE DE PRF.....	32
FIGURE II.10: RENFORCEMENT D'UNE DALLE TRAVAILLANT DANS LES DEUX SENS PAR DES LAMELLES EN «PRF» : (A) DANS LES DEUX DIRECTIONS, (B) CONCENTREES EN PETITES REGIONS CIBLEES	33
FIGURE II.11: CONSOLIDATION DE DALLE PAR FIBRE DE CARBONE.....	33
FIGURE II.12: POUTRE DE PONT EN BETON RENFORCEE PAR FEUILLES DE PRF DE CARBONE COLLEES EXTERIEUREMENT	34
FIGURE II.13: POUTRE EN BETON ARME RENFORCEE PAR UNE LAMELLE EN PRF.....	34
FIGURE II.14: TECHNIQUE DE RENFORCEMENT EBR.....	36
FIGURE II.15: PLUSIEURS USAGE DE LA TECHNIQUE DE RENFORCEMENT EBR.....	36
FIGURE II.16: TECHNIQUE DE RENFORCEMENT NSM.....	37
FIGURE II.17: TECHNIQUE DE RENFORCEMENT SNSM.	37
FIGURE III.1: LES GRANULATS UTILISES DANS LA FORMULATION DU BETON.....	40
FIGURE III.2: LE CIMENT.	41
FIGURE III.3: RESINE (ELEMENT A) ET DURCISSEUR (ELEMENT B).	42
FIGURE III.4: FERRAILLAGE DES POUTRES TESTEES (L'UNITE EN MM).	42
FIGURE III.5: PREPARATION DE TISSU DE FIBRE DE JUTE.....	43
FIGURE III.6: PREPARATION DE TISSU DE FIBRE DE VERRE.....	44
FIGURE III.7: GEOMETRIE DES POUTRES TESTEES.	45
FIGURE III.8: ESSAI DE COMPRESSION A 28JOURS.....	47
FIGURE III.9: MALAXEUR A AXE VERTICAL DE CAPACITE 50L.	48
FIGURE III.10: PREPARATION DES POUTRES TESTEES.....	49
FIGURE III.11: PREPARATION DE LA RESINE.	50
FIGURE III.12: APPLICATION DU RENFORT.....	51
FIGURE III.13: LA CONFIGURATION DES POUTRES TESTEES.	52
FIGURE III.14: CONFIGURATION DU TEST DE FLEXION EN QUATRE POINTS.	53
FIGURE IV.1: COURBES FORCE-DEPLACEMENT POUR LA 1 ^{ERE} FAMILLE.	56
FIGURE IV.2: COURBES FORCE-DEPLACEMENT POUR LA 2 ^{EME} FAMILLE.....	57
FIGURE IV.3: COURBES FORCE-DEPLACEMENT POUR LA 3 ^{EME} FAMILLE.....	57
FIGURE IV.4: COURBES FORCE-DEPLACEMENT POUR LA 4 ^{EME} FAMILLE.....	58
FIGURE IV.5: COURBES FORCE-DEPLACEMENT POUR TOUTES LES VARIANTES TESTEES.....	59

FIGURE IV.6: CONFRONTATION DES VALEURS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 1 ^{ERE} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN.	60
FIGURE IV.7: GAINS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 1 ^{ERE} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN.	61
FIGURE IV.8: CONFRONTATION DES VALEURS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 2 ^{EME} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN.	61
FIGURE IV.9: GAINS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 2 ^{EME} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN.	62
FIGURE IV.10: CONFRONTATION DES VALEURS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 3 ^{EME} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN. .	62
FIGURE IV.11: GAINS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 3 ^{EME} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN.	63
FIGURE IV.12: CONFRONTATION DES VALEURS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 4 ^{EME} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN. .	63
FIGURE IV.13: GAINS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DES POUTRES RENFORCEES DE LA 4 ^{EME} FAMILLE EN COMPARAISON AVEC LA POUTRE TEMOIN.	64
FIGURE IV.14: CONFRONTATION DES VALEURS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DE TOUTES LES VARIANTES TESTEES.	64
FIGURE IV.15: GAINS DES FORCES ET DE DEPLACEMENTS DE TOUTES LES VARIANTES TESTEES.	65
FIGURE IV.16: GAINS DE DUCTILITE DES POUTRES RENFORCEES : FAMILLE 1 ET 2.....	66
FIGURE IV.17: GAINS DE DUCTILITE DES POUTRES RENFORCEES : FAMILLE 3 ET 4.....	66
FIGURE IV.18: GAINS DE DUCTILITE DE TOUTES LES POUTRES RENFORCEES.....	67

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I.1: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU CHEMISAGE EN BETON ARME.....	18
TABLEAU I.2: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PROJECTION DU BETON	20
TABLEAU I.3: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU CHEMISAGE EN ACIER.....	21
TABLEAU I.4: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES TOLES COLLEES.....	22
TABLEAU II.1: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PRF	27
TABLEAU II.2: COMPARATIF ENTRE LES TROIS TYPES DE COMPOSITES « PRF »	28
TABLEAU II.3: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES FIBRES DE CARBONE.....	29
TABLEAU II.4: CARACTERISTIQUES MOYENNES DES FIBRES.....	31
TABLEAU III.1: COMPOSITION DU BETON UTILISE ET LEURS CARACTERISTIQUES.....	40
TABLEAU III.2: DONNEES TECHNIQUES ET PROPRIETES DE LA RESINE.	41
TABLEAU III.3: CARACTERISTIQUES MECANQUES DE L'ACIER.....	43
TABLEAU III.4: CARACTERISTIQUES DE LA FIBRE DE JUTE.....	44
TABLEAU III.5: CARACTERISTIQUES DE LA FIBRE DE VERRE.....	44
TABLEAU III.6: CONFIGURATION DES POUTRES TESTEES.	46
TABLEAU III.7: CARACTERISTIQUES DU BETON DURCI A 28 JOURS.	47
TABLEAU IV.1: MODES DE RUPTURE DES POUTRES TESTEES.	55
TABLEAU IV.2: VALEURS DES FORCES ET DEPLACEMENT, GAINS DES FORCES ET DEPLACEMENTS A MI-TRAVEE DES POUTRES TESTEES.	60
TABLEAU IV.3: VALEURS DE L'INDICE DE DUCTILITE DES POUTRES TESTEES.....	65

LISTE DES ABREVIATIONS

PRF : Polymère renforcée de fibres

F_{c28} : La résistance mécanique à la compression à 28 jours

F_{t28} : La résistance mécanique à la traction à 28 jours

GFRP : Fibre renforcé polymères à base de Verre (Glass-fiber-reinforced polymer)

JFRP : Fibre renforcé polymères à base de Jute (Jute-fiber-reinforced polymer)

TP : Résine thermoplastique

TD : Résine thermodurcissable

HA : Armatures de hautes adhérences

PT : Poutre témoin

JI : Poutres renforcées dans la partie inférieure uniquement par un seul type de PRF : tissu en fibre de jute JFRP

VI : Poutres renforcées dans la partie inférieure uniquement par un seul type de PRF : tissu en fibre de verre GFRP

VIVD : Poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale à 45°) par le même type de PRF : tissu en fibre de verre GFRP

JIJD : Poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale à 45°) par le même type de PRF : tissu en fibre de jute JFRP

VIJD : Poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale à 45°) par deux types de PRF : tissu en fibre de verre GFRP dans la partie inférieure et le tissu en fibre de jute JFRP diagonale sur les deux côtés

JIVD : Poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale à 45°) par deux types de PRF : tissu en fibre de jute JFRP dans la partie inférieure et le tissu en fibre de verre GFRP diagonale sur les deux côtés

Résumé

Au cours des dernières années, de nombreux chercheurs se sont intéressés au renforcement des structures en béton armé en utilisant des matériaux composites. Cette tendance est due à une demande croissante en matière de renforcement, de réparation et de réhabilitation. Ces matériaux offrent une alternative captivante aux approches traditionnelles de renforcement.

Ce travail présente une nouvelle technique de renforcement des poutres en béton armé à l'aide des matériaux composites PRF, une campagne expérimentale a été effectuée afin d'étudier le comportement flexionnel d'une série des poutres renforcées par le collage extérieur des composites de verre GFRP et de jute JFRP et des poutres non renforcées.

*Une éprouvette cylindrique en béton de dimensions (16*32) cm² a été confectionnée afin de déterminer la résistance mécanique à la compression à 28 jours (F_{c28}).*

Une série de quatorze poutres (14), dont deux poutres (02) non renforcées (témoins) et douze (12) poutres renforcées par des différentes configurations de renforcement, ces poutres ont été soumises à l'essai de flexion quatre-points sous un chargement statique de vitesse de 0,05 MPa/s. Quatre poutres (04) renforcées par le tissu de jute JFRP, dont deux (02) renforcées qu'à la face inférieure et deux (02) renforcées à la face inférieure et latérale. La même configuration de renforcement pour quatre (04) autres poutres en utilisent le tissu en fibre de verre GFRP.

Les dernières quatre (04) poutres ont été renforcées par un renforcement hybride avec le tissu de verre GFRP et le tissu de jute JFRP, deux (02) poutres renforcées dans la face inférieure par le tissu en fibre de jute et sur les côtés latéraux par le tissu en fibre de verre et deux autres poutres (02) renforcées par le tissu en fibre de verre dans la face inférieure et le tissu en fibre de jute sur les côtés.

Enfin, la réponse charge-flèche, le déplacement à mi-travée, la ductilité et le mode de rupture des poutres testées, ont été enregistrées et analysés.

Mots clés : *poutre renforcée, Renforts hybrides, matériaux composite, résistance, ductilité, PRF, fibre de verre, fibre de jute.*

Abstract

Over the past few years, many researchers have been interested in strengthening reinforced concrete structures using composite materials. This trend is due to a growing demand for reinforcement, repair, and rehabilitation. These materials provide a compelling alternative to traditional reinforcement approaches.

This work presents a new technique for strengthening reinforced concrete beams using PRF composite materials. An experimental campaign was conducted to study the flexural behavior of a series of beams reinforced by externally bonding GFRP (glass fiber-reinforced polymer) and JFRP (jute fiber-reinforced polymer) composites, as well as non-reinforced beams.

*A cylindrical concrete test specimen with dimensions of (16*32) cm² was prepared to determine the compressive strength at 28 days (Fc28).*

A series of fourteen beams (14), including two unreinforced beams (02) as controls and twelve (12) beams reinforced with different configurations, are subjected to four-point bending tests under a static loading rate of 0.05 MPa/s. Four beams (04) are reinforced with jute fiber (JFRP), with two (02) reinforced only on the bottom face and two (02) reinforced on both the bottom and side faces. The same reinforcement configuration is applied to four (04) other beams reinforced with fiberglass (GFRP).

The last four (04) beams have been reinforced using a hybrid reinforcement with GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) and JFRP (Jute Fiber Reinforced Polymer). Two (02) beams are reinforced on the underside with jute fiber (JFRP) and on the lateral sides with fiberglass (GFRP), while the other two (02) beams are reinforced with fiberglass (GFRP) on the underside and jute fiber (JFRP) on the sides.

Finally, the response of the beam, the mid-span deflection, ductility, and failure mode of the tested beams were recorded and analyzed.

Keywords: *reinforced beam, Hybrid reinforcements, composite materials, strength, ductility, FRP, fiberglass, jute fiber.*

في السنوات الأخيرة، اجتذب تعزيز الهياكل الخرسانية المسلحة بالمواد المركبة اهتمام العديد من الباحثين، بسبب زيادة الحاجة إلى التعزيز والإصلاح وإعادة التأهيل. هذه المواد هي بديل رائع لأساليب التعزيز التقليدية.

يقدم هذا العمل تقنية جديدة لتقوية روافد الخرسانة المسلحة باستخدام المواد المركبة، تم إجراء دراسة تجريبية من أجل دراسة السلوك المرن لمجموعة من الروافد المعززة بالترابط الخارجي بألياف الزجاج GFRP وألياف الجيت JFRP.

تم عمل عينة خرسانية أسطوانية ذات أبعاد (16 * 32) سم² لتحديد المقاومة الميكانيكية للضغط في 28 يومًا.

تخضع سلسلة من أربعة عشر رافدة خرسانية (14)، منها رافدتين (02) غير معززين (شاهدة) واثنان عشرة (12) رافدة مدعمة بتعزيزات مختلفة، لاختبار الانحناء المكون من أربع نقاط تحت سرعة تحميل ثابتة 0,05 MPa/s. أربع روافد (04) معززة بنسيج الجيت، اثنان منها معززان على الجانب السفلي واثنان (02) على الجانب السفلي والجانبية. نفس تكوين التعزيز لأربعة (04) روافد أخرى ولكن هذه المرة تم إجراء التعزيز بواسطة نسيج الألياف الزجاجية.

تم تعزيز الروافد الأربعة الأخيرة (04) بتقوية هجينة بنسيج الألياف الزجاجية GFRP ونسيج الياف الجوت JFRP، رافدتين (02) مدعمتين في الجانب السفلي بنسيج ألياف الجوت JFRP وعلى الجانبين بنسيج الألياف الزجاجية GFRP ورافدتين (02) مدعمتين بنسيج الألياف الزجاجية GFRP في الجانب السفلي ونسيج ألياف الجوت JFRP على الجانبين.

أخيرًا، تم تسجيل وتحليل نتائج اختبار الانحناء؛ منحني الإزاحة بدلالة الحمولة، الليونة، ووضع الانهيار للحزم المختبرة.

الكلمات المفتاحية: الروافد المدعمة، التدعيم الهجين، المواد المركبة، المقاومة، الليونة، الألياف الزجاجية، ألياف الجيت.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Au fil des années, l'importance et l'étendue du patrimoine architectural se sont accrues. Dans le passé, la maintenance des structures était considérée comme une activité secondaire, bien qu'essentielle pour préserver le patrimoine et assurer le bon fonctionnement des équipements techniques. Elle était souvent négligée au profit de la conception et de l'ingénierie de la construction. Les ouvrages présentent aujourd'hui un grand nombre de dégradations, pouvant être causées par des facteurs mécaniques, physico-chimiques, accidentels ou encore des erreurs de calcul et de conception [1].

Au cours des dernières années, une attention considérable a été portée à la question du renforcement, en raison de l'augmentation des coûts liée à la réhabilitation des structures existantes. Dans ce contexte, l'importance de l'organisation et de la rationalisation de l'entretien est devenue essentielle pour permettre une planification adéquate et une réduction des dépenses. Ces défis économiques ont conduit à la mise en place de plans de maintenance qui englobent toutes les étapes, du diagnostic initial au renforcement effectif des structures.

En raison de leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques uniques, les matériaux composites ont acquis une position de choix dans le domaine du génie civil. Actuellement, l'utilisation du collage de matériaux composites est devenue l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la réparation et le renforcement des structures dans ce marché en plein essor [1]. Le collage de tissus ou de lamelles en matériaux composites peut renforcer plusieurs éléments structuraux.

Les éléments principaux à prendre en compte sont principalement les poutres, les poteaux et les dalles afin de trouver les meilleures approches pour le renforcement des structures.

Dans cette optique, une expérience a été réalisée pour examiner le comportement des poutres en béton armé renforcées par différentes combinaisons de tissus de verre et de jute (GFRP et JFRP). L'objectif principal de cette étude est de combiner les propriétés de chaque type de fibres afin d'améliorer la résistance, la déformabilité et la ductilité des poutres. De plus, l'objectif est de développer un modèle représentatif qui intègre les trois propriétés mécaniques désirées.

- Le premier chapitre présente une revue de littérature sur les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la construction du béton armé. Il aborde également la définition du béton armé, ses performances, l'identification des facteurs responsables de la détérioration des structures en béton armé et les approches de renforcement disponibles.

- Le deuxième chapitre aborde les principes fondamentaux liés à l'apparition de la fissuration dans le béton, ainsi que les modes de rupture couramment observés dans les poutres en béton armé. La définition et les performances mécaniques des matériaux composites ainsi que leurs compositions, leurs constituants, avantages et inconvénients et les différentes techniques de renforcement.
- Dans le cadre du troisième chapitre, nous abordons une investigation expérimentale détaillant le processus complet de confection des éprouvettes, avec une description bien détaillée des matériaux utilisés, les configurations des poutres renforcées ainsi que la procédure de l'essai de flexion quatre-points.
- Dans le chapitre quatre, nous avons exposé et examiné les conclusions tirées de l'essai de flexion à quatre points. Les résultats sont illustrés à l'aide de courbes représentant les forces et les déplacements, ainsi que d'histogrammes mettant en évidence les améliorations en termes de résistance, de déplacement et de ductilité.

CHAPITRE I

Comportement du béton

I. Chapitre : Comportement du béton

I.1. Introduction

Le béton, similaire aux formations rocheuses naturelles, possède une résistance remarquable à la compression, mais sa résistance à la traction est relativement faible. C'est pourquoi, depuis l'époque romaine, son utilisation en tant que matériau de construction a connu une véritable évolution avec l'introduction du béton armé. Ce procédé implique le renforcement du béton en incorporant des barres d'acier, permettant ainsi de compenser sa faible résistance à la traction. On attribue généralement l'invention du béton armé à Joseph Lambot, qui a réalisé en 1848 une barque en ciment armé flottante, ainsi qu'à Joseph Monier, qui a construit indépendamment des bacs à fleurs en 1849 en utilisant ce matériau. L'utilisation du béton armé dans les structures a rapidement gagné du terrain en France grâce à Joseph Monier, Coignet, François Hennebique et Armand Gabriel Considère. En 1906, une circulaire ministérielle a été émise, établissant des instructions pour l'utilisation du béton armé, ce qui a marqué la première codification de la conception et du calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau [2].

Depuis les années 1970, d'importantes recherches ont été menées sur le béton, en se concentrant particulièrement sur ses composants actifs. Ses travaux ont entraîné une amélioration significative des propriétés qualitatives et quantitatives du matériau. Dans les années 1980, aux États-Unis et au Japon, des bétons de qualité supérieure ont été développés et employés, présentant une résistance à la compression exceptionnelle. Ces matériaux ont atteint des niveaux impressionnants de 100 MPa (environ 1000 kg/cm²) et même 140 MPa (1400 kg/cm²) dans un bâtiment de Seattle, aux États-Unis. De plus, des expériences en laboratoire ont déjà permis d'obtenir des résistances dépassant les 600 MPa (6000 kg/cm²).

Les bétons à hautes performances sont des matériaux récents qui conservent les composants de base du béton traditionnel (ciment, granulats et eau), tout en présentant des propriétés mécaniques supérieures et une excellente durabilité [3].

Les avancées remarquables constatées sont attribuables aux améliorations réalisées par l'industrie des liants hydrauliques afin d'accroître la qualité des ciments, au développement d'adjuvants synthétiques spécifique, ainsi qu'à l'utilisation d'ultrafines.

I.2. Historique

L'utilisation d'un mélange de Chaux, d'argile, de sable et d'eau remonte à une époque très lointaine. Il a été employé dès 2600 avant J.-C. par les Égyptiens. Au cours du 1^{er} siècle, les Romains ont apporté des améliorations à ce "liant" en incorporant de la terre volcanique, ce qui lui permettait de durcir même sous l'eau, ainsi qu'en ajoutant du tuileau, un matériau obtenu en broyant des tuiles, pour améliorer la prise et le durcissement. L'un des premiers ouvrages significatifs en utilisant du béton est le Panthéon de Rome, érigé pendant le règne d'Hadrien en 128 ap.J-C. Ce monument impressionnant comporte une coupole hémisphérique de 43,20 mètres de diamètre, construite à partir d'un mélange de béton de pouzzolane [4].



Figure I.1. Coupole du Panthéon de Rome

L'introduction de l'utilisation du béton de ciment en architecture s'est faite grâce à l'introduction des bétons moulés et des pierres artificielles qui imitaient les pierres de taille réalisées en béton. Ces constructions utilisaient fréquemment du béton de ciment prompt naturel. Au début du XIXe siècle, la technique du moulage a été initiée dans les régions où le banchage était déjà connu. *François Coilteraux*, dès la fin du XVIIIe siècle, réalisait des moulages à Lyon et à Grenoble. Cette méthode permettait de reproduire une variété d'objets tels que des canalisations d'égouts, des vases, des statues, des balustrades, des pierres d'angles, des corniches, et bien d'autres. Par la suite, cette pratique s'est répandue dans de nombreuses grandes villes européennes, comme l'illustre l'exemple de la Tour Perret en 1925 (Figure I.2) [4].



Figure I.2. La Tour Perret

I.3. Le béton

Le béton, qui comprend une matrice cimentaire intégrant des granulats et des agrégats tels que des sables, des graviers et des cailloux, est un matériau largement employé dans tous les secteurs de la construction en raison de ses multiples atouts. Il offre la possibilité de modifier les propriétés du béton dans une large mesure et facilite les traitements mécaniques des mélanges de béton plastique, ce qui permet de réaliser des travaux sans nécessiter une main-d'œuvre coûteuse. Pour obtenir les caractéristiques mécaniques souhaitées, il est essentiel de formuler précisément les composants du béton [5]. La figure I.3 présente de manière concise tous les éléments essentiels requis pour fabriquer un béton classique utilisé dans la construction d'infrastructures de génie civil.

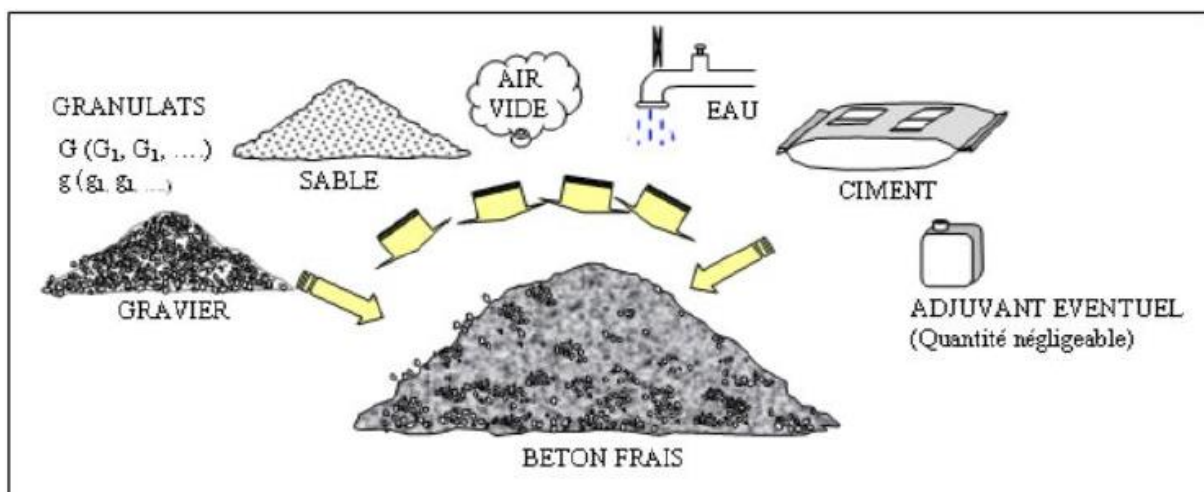


Figure I.3. Les différents constituants du béton destiné à la construction [5]

I.3.1. Les constituants du béton

Le béton est un matériau composite, obtenu après un mélange en proportions convenables de ciments, granulats, eau et éventuellement des adjuvants. Ces composants ont des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques différentes. La figure I.4 présente le matériau béton.



Figure I.4. Le matériau béton

I.3.1.1. Le ciment

Dans la composition du béton, le ciment occupe une fonction essentielle en tant qu'agent liant. Il est formé principalement de clinker, accompagné d'autres éléments secondaires tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes ou les fillers calcaires, qui sont des granulats fins obtenus par le broyage de roches. Il existe plusieurs catégories de ciment qui se distinguent par la proportion de leurs composants : le ciment portland CPA, le ciment portland composé CPJ, le ciment de haut fourneau, le ciment de haut fourneau à teneur en laitier, le ciment aux laitiers et le ciment aux cendres [4].

Le ciment portland est couramment utilisé dans la construction de bétons armés, tandis que le ciment portland composé est recommandé pour les travaux de dallage et de route. Les autres types de ciment sont destinés aux projets qui n'exigent pas une résistance élevée à la chaleur. Tous ces types de ciment conviennent aux travaux souterrains et aux structures massives exposées à des environnements agressifs, tels que l'eau.

I.3.1.2. L'eau

La proportion d'eau de gâchage doit être faite avec une attention bien particulière, il est impératif de respecter cette proportion d'eau, car par exemple, trop d'eau augmente la porosité

du béton et modifie donc ses propriétés mécaniques et sa durabilité. La norme AFNOR p18-303 définit les caractéristiques de cette eau. Un excès d'impuretés peut affecter non seulement la résistance mais aussi le temps de prise, et peut provoquer des efflorescences et la corrosion des aciers d'armatures néfastes à la durabilité du béton.

I.3.1.3. Les granulats

Les granulats sont essentiels, puisqu'ils représentent les deux tiers du volume du béton ; ils sont classés selon une granulométrie constituée par l'échelonnement des dimensions des grains en fines, sables, gravillons, cailloux. Les granulats possèdent des caractéristiques propres qui proviennent de la roche à partir de laquelle ils sont extraits, telles que la couleur et les propriétés mécaniques et physico-chimiques. Ils ont un impact direct sur les propriétés mécaniques et la longévité des bétons. Les granulats utilisés en technologie du béton sont de deux types :

- Le gros granulat tels les pierres et graviers concassés ou roulés, généralement refusés au tamis de 5mm ;
- Les granulats fins, tel le sable naturel, passant largement à 5mm.

Pour être utilisé, on exige que le granulat soit durable et chimiquement inerte, c'est-à-dire qu'il ne réagisse pas avec le liant et qu'il ne participe à la résistance que par la compacité qu'il lui confère [6].

I.3.1.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont ajoutés en quantités minimales lors de la préparation du béton ; ce sont des substances chimiques mélangées au béton pendant le malaxage, représentant moins de 3% du poids total du ciment, dans le but d'améliorer certaines caractéristiques du matériau [7].



Figure I.5. Les adjuvants [7]

I.3.2. Comportement mécanique du béton

Le béton armé est constitué d'une combinaison d'acier et de béton, deux matériaux qui réagissent de manière très différente lorsqu'ils sont soumis à des déformations, en particulier en traction. Ainsi, pour développer un modèle prédictif du comportement des éléments en béton armé, il est essentiel de bien comprendre les hypothèses formulées et les lois prises en compte pour définir le comportement de chaque matériau.

I.3.2.1. Le béton en compression

Le comportement du béton en compression est principalement défini par une relation contrainte-déformation non linéaire, même si sa composition comprend des matériaux élastiques et fragiles comme les granulats et la pâte de ciment. De plus, il démontre une certaine pseudo-ductilité liée à la formation de microfissures dans le matériau. En effet, lorsque la contrainte appliquée sur le béton dépasse les 40% de sa résistance en compression, des microfissures se forment et se propagent parallèlement à la charge lors de son augmentation [8].

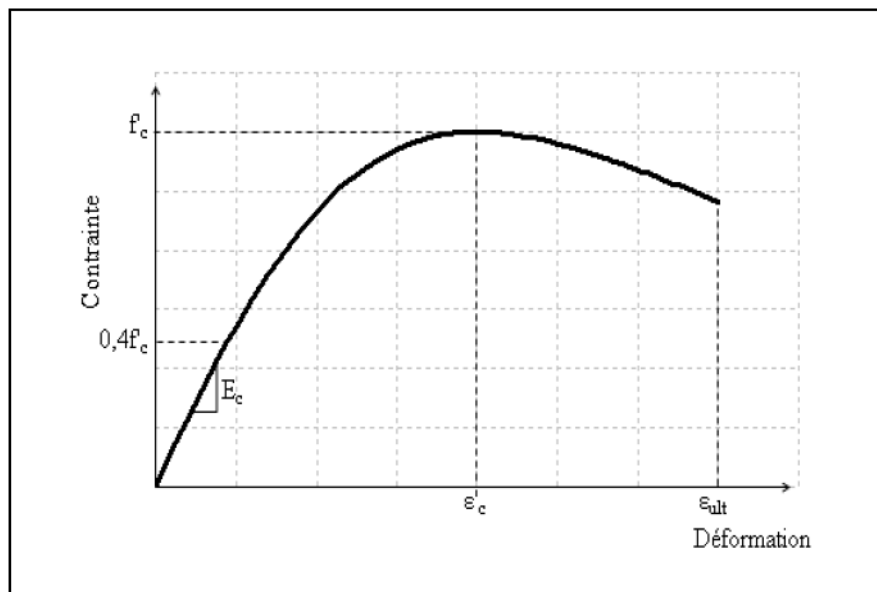


Figure I.6. Loi de comportement du béton en compression sous chargement statique [9]

La représentation basique de la relation entre la contrainte et la déformation du béton en compression est une courbe en forme de parabole, qui reflète de manière appropriée l'accroissement progressif de la résistance et sa diminution ultérieure. Cependant, cette courbe a tendance à surestimer le taux de décroissance des contraintes dans la partie descendante.

I.3.2.2. Le béton en traction

Le béton présente une propriété distinctive lorsqu'il est soumis à une force de traction, où l'on observe une propagation uniforme et constante de fissures se développant perpendiculairement à la direction de la charge. Cette particularité établit une corrélation pratiquement linéaire et proportionnelle avec le module d'élasticité du béton. Malgré sa valeur en tant qu'indicateur fiable, la résistance à la compression ne garantit pas automatiquement une corrélation directe avec la résistance à la traction. Cette corrélation est influencée par divers facteurs, tels que la méthode d'essai utilisée (traction directe, fendage ou flexion), la qualité du béton (faible, moyenne ou élevée), ainsi que les caractéristiques des granulats, des additifs chimiques ou minéraux présents [9].

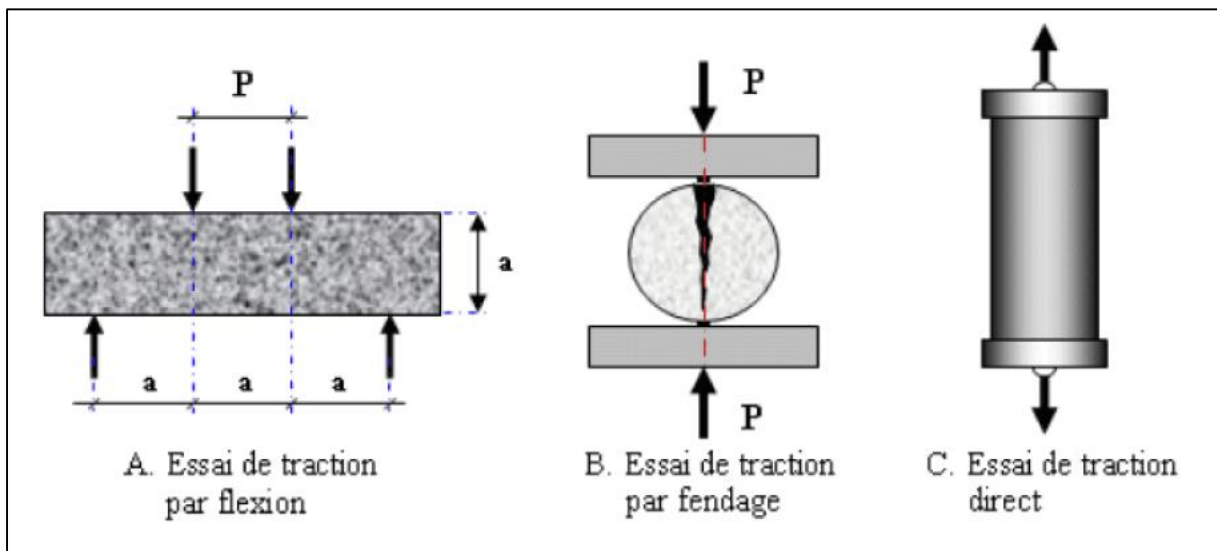


Figure I.7. Différents essais de traction du béton [10]

La relation (I.1) conventionnellement établit la résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, représentée par f_{tj} , en fonction de la résistance à la compression f_{cj} .

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad (\text{I.1})$$

Le graphique illustré dans la figure I.8 représente la variation de la résistance caractéristique à la traction f_{tj} en relation avec la résistance à la compression f_{cj} .

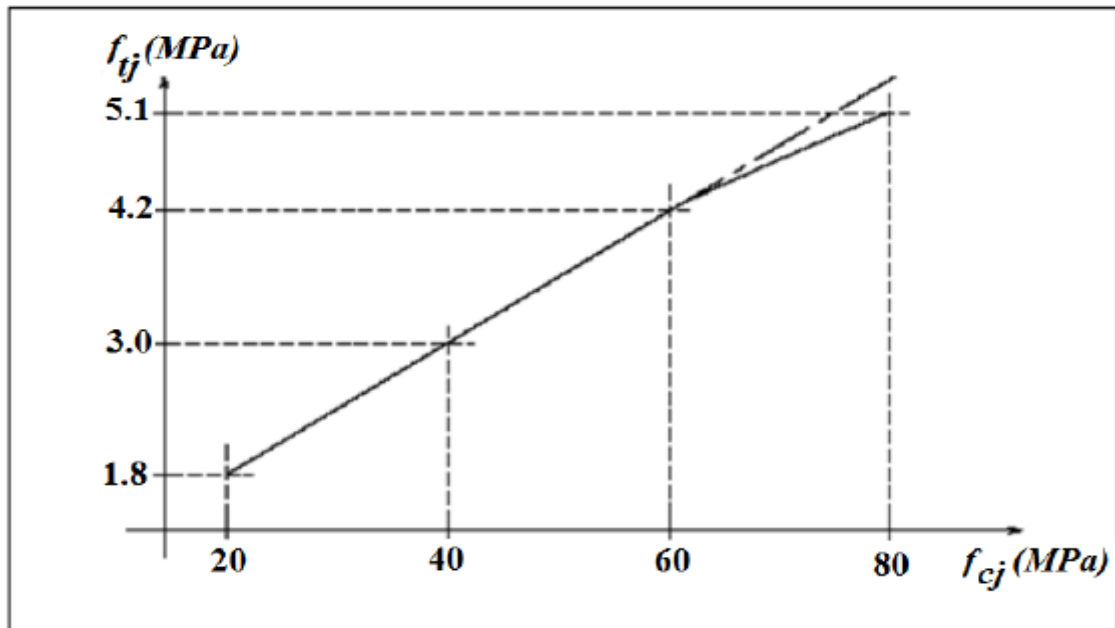


Figure I.8. Evolution de la résistance à la traction f_{tj} en fonction de celle à la compression f_{cj} [9]

I.4. Les aciers d'armature

L'utilisation de l'acier d'armature dans le béton armé vise à compenser la capacité limitée du béton à supporter les forces de traction. Il est généralement admis que les armatures entrent en jeu une fois que le béton se fissure. Après avoir atteint sa limite élastique, l'acier d'armature présente une grande ductilité lorsqu'il est correctement conçu. Ainsi, il permet aux éléments fléchis et fissurés du béton armé d'atteindre leur point de rupture ultime sans subir de rupture catastrophique.

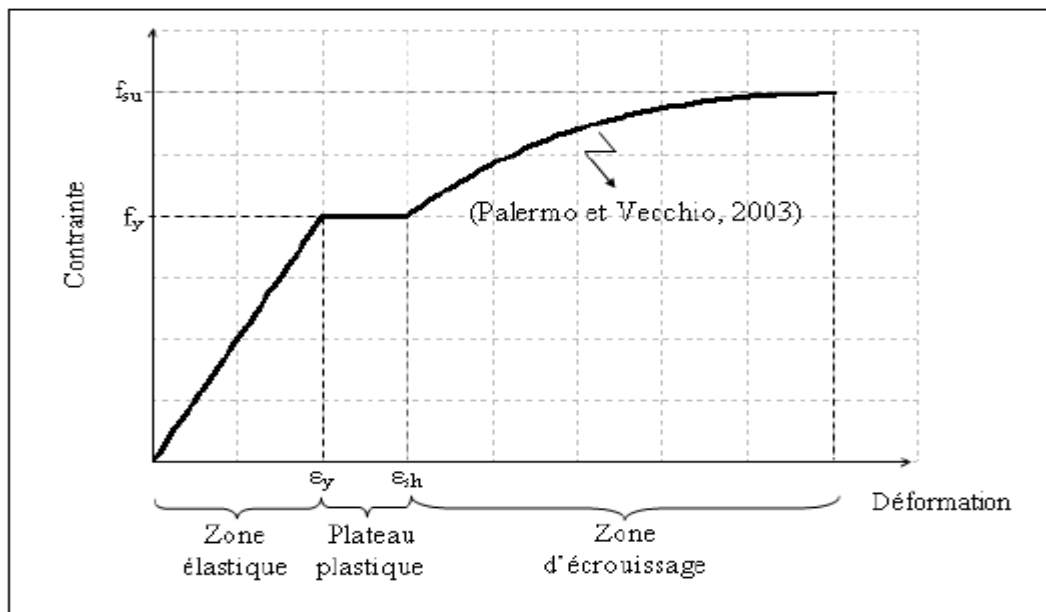


Figure I.9. Loi de comportement monotone de l'acier [11]

Il existe quatre catégories d'acier pour les armatures, classées selon leur degré de rigidité, de la moins rigide à la plus rigide [4] :

- Les aciers non traités thermiquement, avec une limite élastique garantie de 125 ou 235 MPa, sont connus sous le nom d'aciers doux. Ces aciers, identifiables par leur surface lisse (indiquée par le symbole \bar{A}), sont principalement utilisés pour la fabrication de crochets de levage en raison de leur remarquable capacité à se déformer considérablement avant de se rompre (ils présentent un allongement de 22%).
- Les aciers du type I, connus sous le nom d'aciers à haute adhérence, sont des aciers laminés à chaud qui possèdent une dureté naturelle. Ces aciers se caractérisent par une limite d'élasticité garantie de 400 MPa et un allongement à la rupture de 14%.
- Les aciers du type II, connus sous le nom d'aciers à haute adhérence, sont obtenus en laminant à chaud et en écroûtant avec une faible réduction de section par traction-torsion. Ces aciers spécifiques présentent une limite d'élasticité garantie de 500 MPa et une capacité d'allongement à la rupture de 12%.
- Les aciers tréfilés, obtenus par laminage à chaud avec une importante réduction de section et un fort écroûissage, sont couramment employés dans la production de treillis soudés et de fils enroulés sur les bobines. Ces aciers spécifiques présentent une limite d'élasticité garantie de 500 MPa et une capacité d'allongement à la rupture de 8%.

L'objectif de l'écroûissage consiste à accroître la résistance à la déformation permanente en éliminant la zone de plasticité, tout en réduisant la capacité d'allongement à la rupture (rendant l'acier plus fragile). Les quatre types d'acier présentent un comportement élastique similaire, avec un module de Young identique, $E_s = 210\,000$ MPa. La déformation à la limite élastique est généralement proche de 0,2%, en fonction de la valeur de la limite d'élasticité [4].

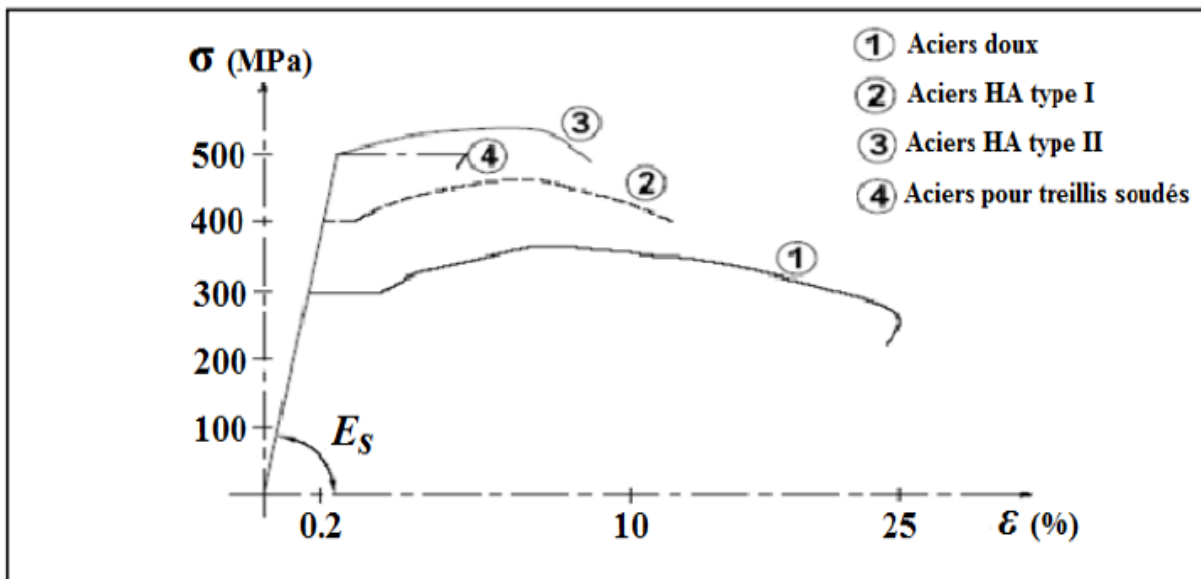


Figure I.10. Diagramme contrainte-déformation d'essais de traction sur les différents types d'acier [12]

I.5. Les dégradations des matériaux

Les études d'ouvrages en génie civil intègrent généralement des codes et des règlements de calcul qui incluent un coefficient de sécurité significatif. Ce coefficient garantit que la structure conçue dépasse largement les conditions réelles auxquelles elle sera soumise. Par conséquent, il est théoriquement rare que la défaillance de cette structure se produise. Cependant, de nombreux documents abordent fréquemment la question des dommages et de la détérioration associés. Les ouvrages, quels que soit leur type, sont exposés à diverses agressions (telles que les conditions climatiques, les facteurs physico-chimiques, les séismes, etc.) susceptibles de causer des altérations des matériaux et de compromettre la durabilité des structures, pouvant entraîner des problèmes potentiels, des dommages, voire des accidents. Il est souvent complexe d'établir le moment précis d'apparition d'une dégradation sur un ouvrage en service, que ce soit durant sa construction, peu après sa réalisation, ou bien à une date ultérieure. Or, après un diagnostic détaillé, il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique mais elle résulte d'un grand nombre de paramètres, relatifs et à la nature du matériau qu'à la conception de l'ouvrage et à sa réalisation. La première étape pour comprendre les éléments de la prévention consiste à acquérir une connaissance approfondie de la pathologie sous-jacente. En théorie, la logique de la prévention repose sur une approche simple : il est essentiel d'analyser les causes de la pathologie afin de mettre en place des mesures préventives visant à éviter la répétition des mêmes erreurs [13].

I.5.1. Principales causes des dégradations des structures

Dans Les matériaux les plus fréquemment employés dans le secteur de la construction sont principalement le béton et l'acier. Avec le temps, ces matériaux sont susceptibles de subir des dégradations en raison de leur composition initiale et des influences externes auxquelles ils ont été exposés. Ces dégradations ont des causes et conséquences diverses. Elles peuvent être soit causées par l'homme (mauvaises études, mauvaise réalisation ou bien mauvais usage). Comme elles peuvent être causées par des processus naturels : dégradations mécaniques (séismes, tassements, etc.), chimiques (agents agressifs, corrosion des armatures, etc.) et physiques (érosion, usure, etc.) (Figure I.11).

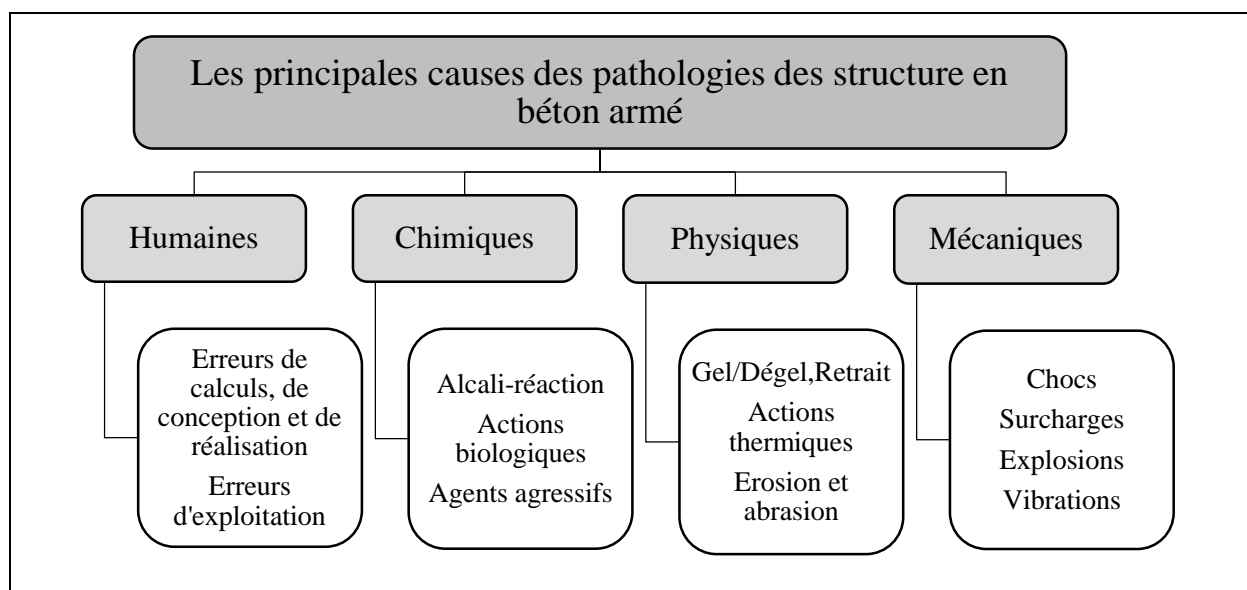


Figure I.11. Principales causes des pathologies des structures en béton armé [13]

I.5.1.1. Les dégradations liées aux erreurs humaines

Le classement et la catégorisation des origines des maladies et des dysfonctionnements des structures humaines suivent un schéma basé sur la répartition des responsabilités entre les personnes qui les conçoivent et celles qui les réalisent sur le chantier, ainsi que les utilisateurs.

- **Erreurs liées à la conception et aux calculs :** Les erreurs de conception architecturale et des études d'ingénierie sont très souvent à l'origine de plusieurs désordres affectant la structure (notamment en cas de séisme) [14].
- **Erreurs dues aux modifications de conception :** La durabilité d'une structure en béton peut être fortement influencée par divers facteurs de conception. Opter pour des critères de conception rigoureux peut considérablement retarder le processus de détérioration des structures en béton [15].

- **Erreurs liées à l'exécution des travaux :** La phase d'exécution des travaux est aussi importante que son prédécesseur. En effet, bon nombre des dégradations des structures tiennent leurs origines de cette étape de leur cycle de vie.
- **Erreurs liées à l'exploitation de la structure :** Cette dernière catégorie est la phase d'utilisation d'une structure. En effet, une mauvaise utilisation d'un ouvrage contribuerait à sa détérioration et ainsi réduirait sa durée de vie de service initialement prévue et favoriserait l'apparition de fissures et de déformations.

I.5.1.2. Dégradations chimiques des structures

La principale raison derrière toutes les détériorations chimiques provient de la capacité des agents solides à pénétrer ou des fluides à s'écouler à travers le béton, ce qui est déterminé par la perméabilité et, par conséquent, la porosité du matériau [16].

Les symptômes des attaques chimiques sont notamment la désagrégation des surfaces et l'apparition est/ou l'agrandissement des fissures. Ces désordres sont provoqués par :

- **Alcali réaction – Réaction alcali-granulats (RAG) :** La réaction alcalis-granulats (RAG), également connue sous le nom d'alcali réaction, se produit lorsque les composants alcalins présents dans le béton (issus du ciment, des additifs, des adjuvants, etc.) interagissent avec des granulats potentiellement réactifs qui contiennent de la silice réactive (ou acide silicique) [16].
- **Attaques sulfatiques :** Les sulfates présents dans l'environnement (sol, eau, mer, etc.) ou issus de la pollution domestique ou industrielle peuvent réagir avec certains composés présents dans le béton, tels que les aluminates, donnant ainsi naissance à de l'ettringite, également connue sous le nom de sel de Candlot. Ce processus de cristallisation entraîne une expansion significative du matériau et peut se produire à la fois pendant la phase plastique du durcissement (ettringite primaire) et après le durcissement complet (ettringite secondaire). La seule substance qui pose un danger au béton est l'ettringite secondaire, car les contraintes internes qu'elle génère entraînent des fissures et peuvent provoquer la détérioration de la structure [11].
- **Attaques acides :** Le pH élevé du béton est attribué aux composés hydratés présents dans sa pâte de ciment, ce qui lui donne une nature alcaline prononcée dans la phase interstitielle. Il peut manifester une réponse rapide face à des substances acides telles que les précipitations acides, les eaux naturelles imprégnées de dioxyde de carbone,

les effluents industriels ou agricoles qui ont des acides organiques, les eaux contenant des acides minéraux, ainsi que les eaux dépourvues d'impuretés.

- **Lixiviation** : La circulation d'eaux pures peut entraîner une lixiviation du béton, provoquant la dissolution des composants basiques tels que la portlandite, ce qui conduit à une augmentation de la porosité et accélère la détérioration des zones où l'eau pure circule.
- **Corrosion des armatures** : Les armatures sont habituellement positionnées à une distance de quelques centimètres de la surface du béton afin de minimiser les risques de corrosion. Lorsque ces armatures entrent en contact avec l'air ou l'eau, divers processus chimiques se déclenchent à proximité, entraînant leur détérioration. La quantité d'oxyde de fer générée par le processus de corrosion est environ huit fois supérieure à celle du métal initial, entraînant ainsi la formation de fissures et de dégradations significatives dans les constructions en béton armé [17].

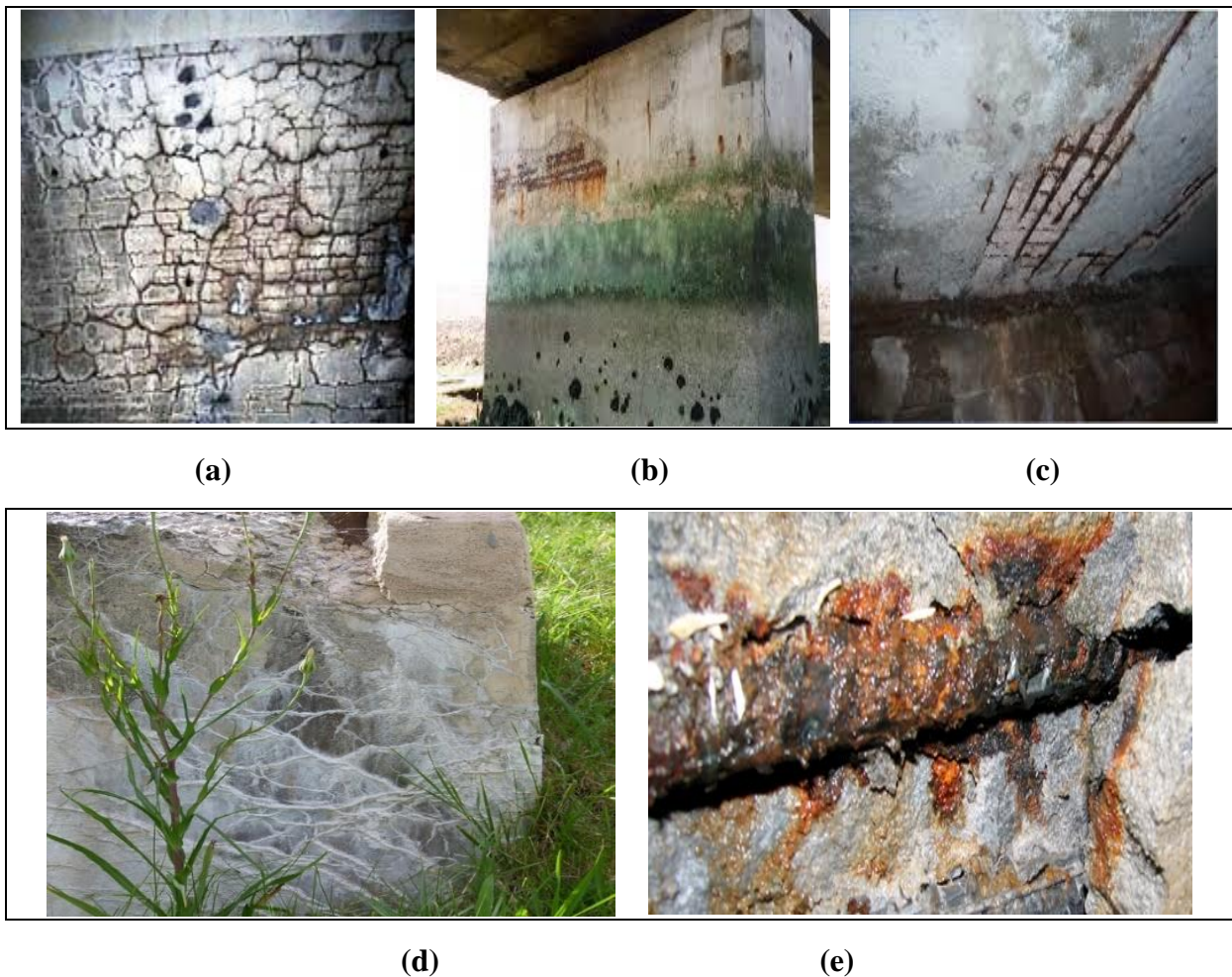


Figure I.12. Exemples de dégradation de béton par : (a) RAG ; (b) Attaques sulfatiques ; (c) Attaques acides ; (d) Lixiviation ; (e) Corrosion des armatures

I.5.1.3. Dégradations physiques des structures

Sur le plan physique, il est essentiel de comprendre que le béton possède des caractéristiques hydrauliques et poreuses. Par conséquent, les altérations physiques du béton résultent de divers facteurs tels que les surcharges, les sollicitations excessives, les frottements, les chocs thermiques, les gonflements et les retrait. Ces phénomènes sont étroitement liés à l'eau contenue dans le béton ainsi qu'aux échanges d'eau avec l'environnement.

- **Retrait** : Le retrait est un processus inhérent au béton, se produisant de manière régulière à travers différentes manifestations tout au long de sa prise et de son vieillissement, résultant d'un phénomène physico-chimique.
- **Le gel-dégel** : Lorsque l'eau en circulation à l'intérieur d'une structure ou dans des fissures préexistantes subit une baisse de température, elle gèle et augmente en volume, créant ainsi une pression qui endommage le béton. Ce phénomène de dégradation du béton dû au gel-dégel est généralement observé dans les régions froides [18] [19].
- **Erosion – Abrasion** : Les processus d'abrasion et d'érosion sont principalement observés dans les ouvrages de génie civil exposés à des flux d'eau intenses, tels que les barrages (avec l'érosion des évacuateurs de crues) et les conduites d'eau, ainsi que dans les structures soumises à des charges mécaniques répétitives.

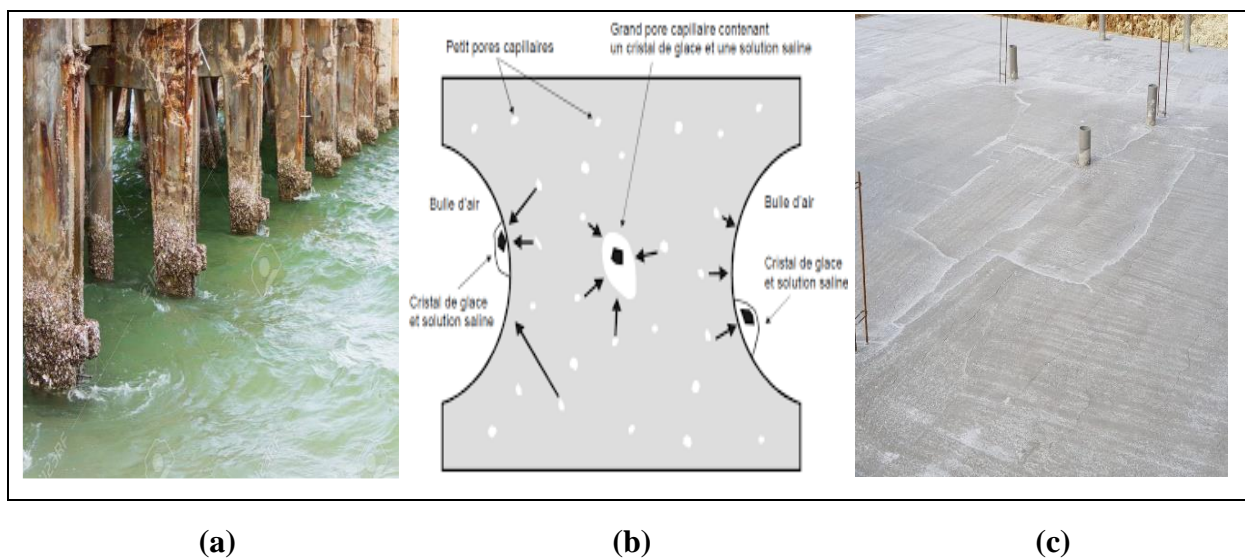


Figure I.13. Exemples de dégradation de béton par : (a) Abrasion ; (b) Gel-dégel ; (c) Retrait

I.5.1.4. Dégradations mécaniques des structures

Souvent, on observe des signes de perturbation tels que l'émergence fréquente de fissures, qui peuvent être amplifiés par une déformation excessive de la structure. Lorsque des forces soudaines, comme un choc, une explosion ou plus communément un tremblement de terre,

entraînent une dislocation plus ou moins prononcée du béton, il est généralement facile d'établir un lien évident entre les dommages constatés et leur origine.

- **Chocs et explosions** : Les ponts sont particulièrement sujets à des perturbations résultant de chocs, principalement causés par des poids lourds. L'impact de ces collisions est une source majeure de désordre pour les structures des ponts.
- **Tassements** : Le tassement correspond à la descente verticale d'un ouvrage, résultant de l'interaction entre le sol et la structure, causée par l'effet exercé par la fondation sur le sol.
- **Vibrations des structures en zone sismique** : Il est essentiel de maîtriser les contraintes et les déformations induites par les secousses sur une structure donnée. Afin d'assurer un contrôle adéquat, il est primordial de comprendre le comportement des éléments de la construction en relation avec les matériaux employés.

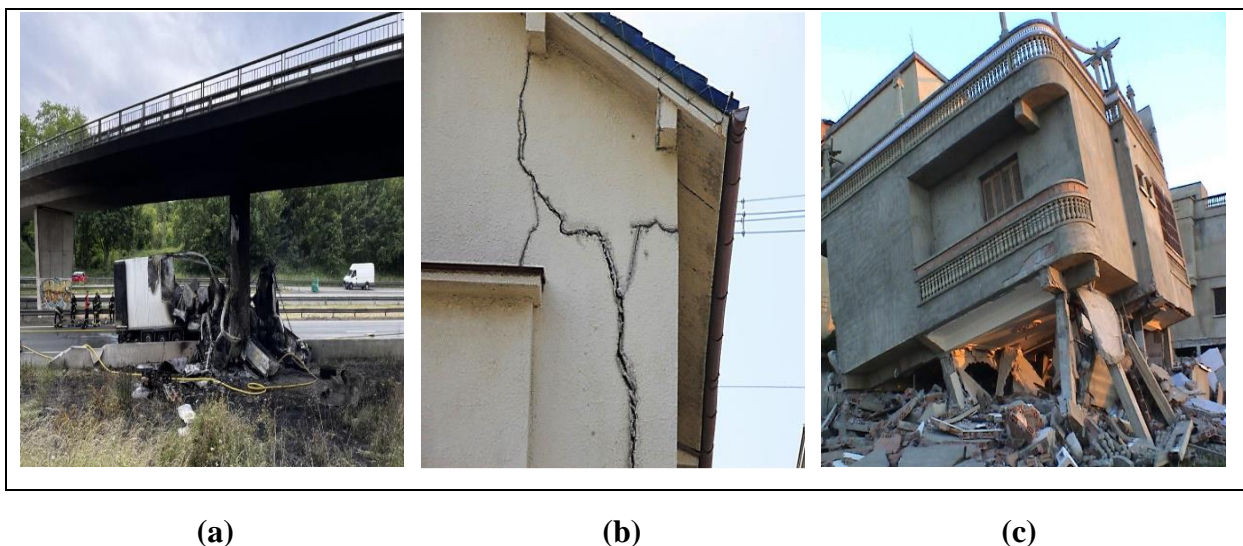


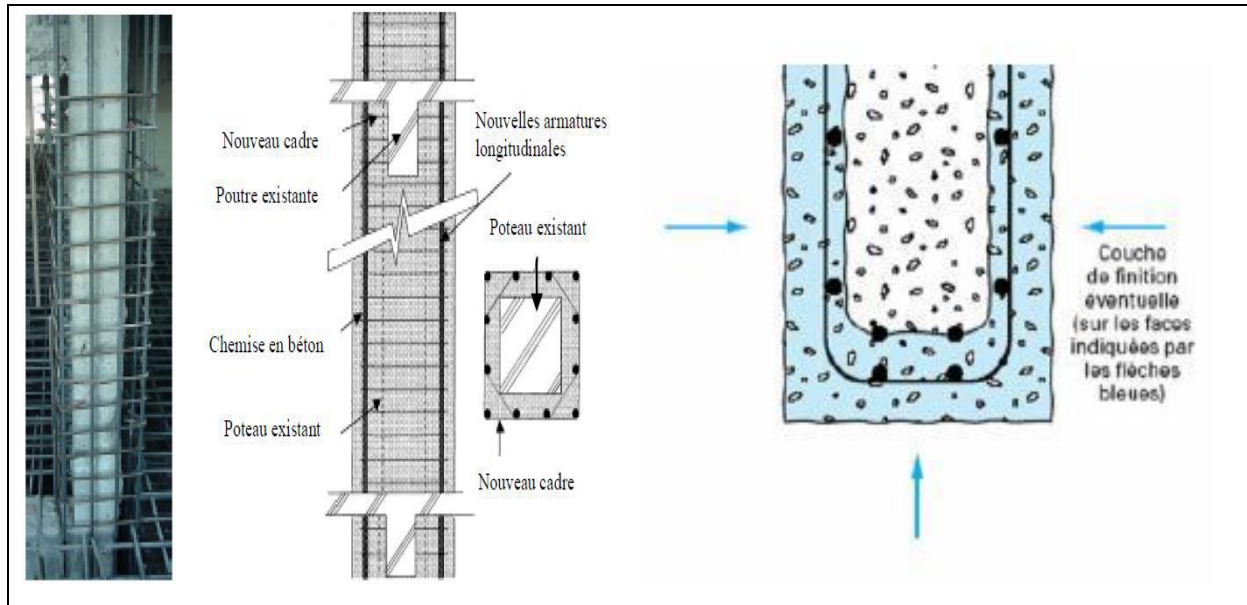
Figure I.14. Exemples de dégradation de béton par : (a) Choc et explosion ; (b) Tassement ; (c) Vibration « séisme »

I.6. Méthodes De Réparation Et Renforcement

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

I.6.1. Renforcement par chemisage en béton

Le renforcement par chemisage peut être considéré comme un confinement de la section primaire par une nouvelle couche secondaire en béton armé. Ce dernier s'accroche à l'ancienne pour augmenter sa résistance par l'accroissement de la section du béton et l'ajoute d'une section d'armature additionnelle (Figure I.15) [20].



(a) Poteau

(b) Poutre

Figure I.15. Chemisage en béton armé (a) d'un poteau [20] ; (b) d'une poutre [21]

Tableau I.1. Avantages et inconvénients du chemisage en béton armé [22]

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

I.6.2. Renforcement par projection du béton

Le béton projeté est un mélange des granulats de ciment de l'eau et souvent des ajouts ou des adjuvants. Cette technique préconise de projeter sur le support à renforcé à l'aide de l'air comprimé [21].

I.6.2.1. Procédé par voie sèche

Ce procédé consiste à transporter les matériaux secs dont le ciment et les granulats à l'aide de l'air comprimé. Ceci à travers une canalisation jusqu'à la lance où ils se mélangent à l'eau sous pression introduite par une bague perforée (Figure I.16) [23].

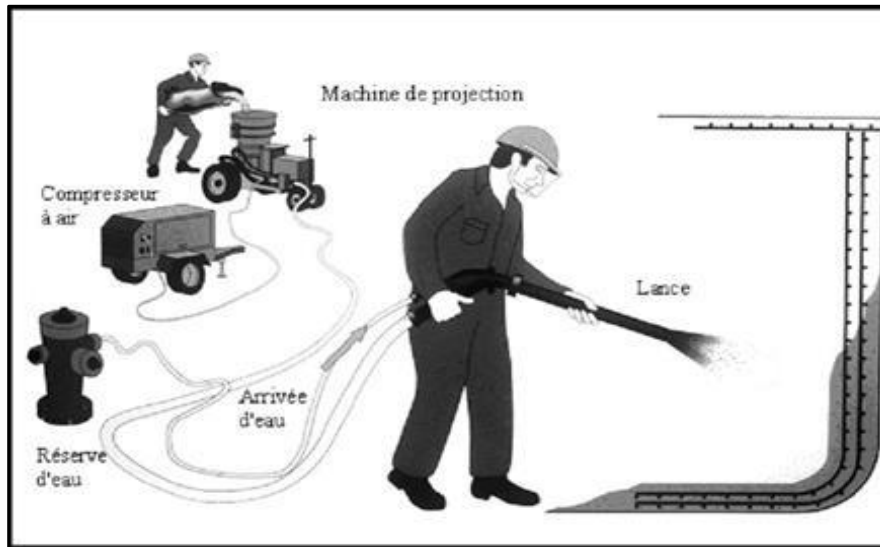


Figure I.16. Projection par voie sèche [23]

I.6.2.2. Procédé par voie humide

Ce procédé consiste à pomper un béton conventionnel dans un boyau et à le projeter à une vitesse élevée face à une surface au support en utilisant de l'air comprimé additionné à la lance. Ce procédé est utilisé pour les réparations profondes et volumineuses (Figure I.17) [23].

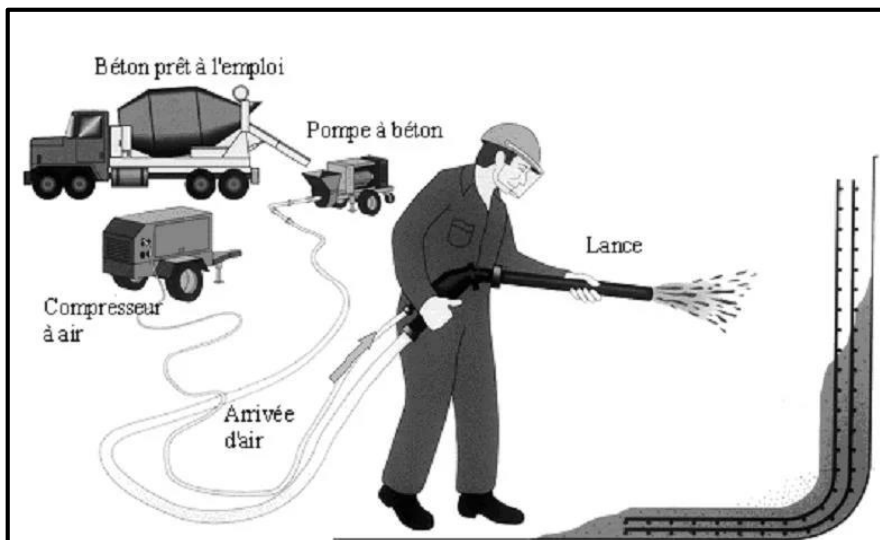


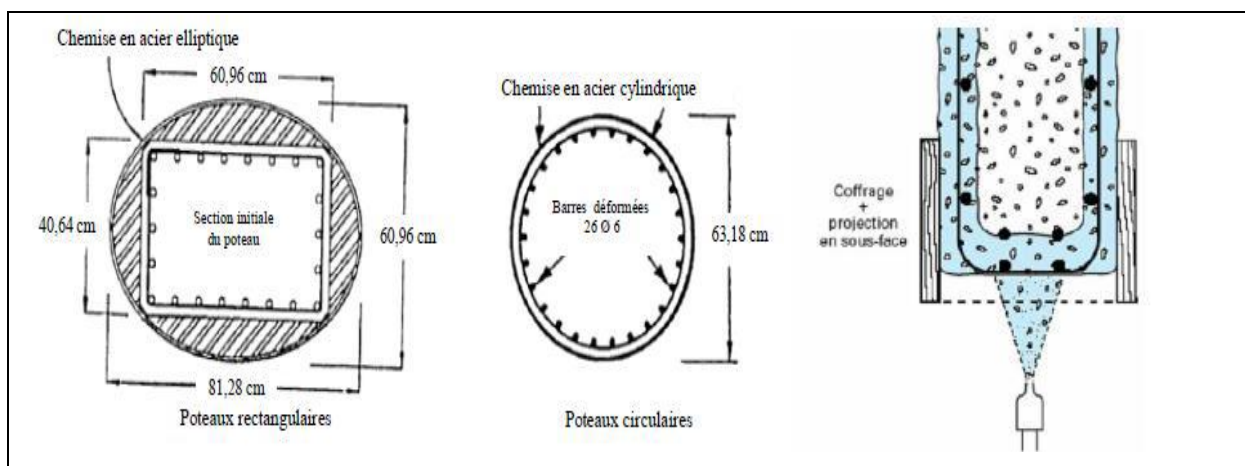
Figure I.17. Projection par voie humide [23]

Tableau I.2. Avantages et inconvénients de la projection du béton [22]

Avantages	Inconvénients
-Une bonne adhérence au support -Caractéristiques similaires à ceux du béton coffré. -Procédé assez économique.	-Difficulté de mise en œuvre. -Nécessité d'un matériel adéquat. -Problèmes d'hygiène et de sécurité.

I.6.3. Renforcement par chemises en acier

Le chemisage en acier est un procédé de renforcement des poteaux de forme circulaire et rectangulaire. Ce procédé vise à améliorer la résistance des éléments ayant subi des charges supplémentaires ou en cas d'endommagement issu à des situations accidentelles, des séismes à titre d'exemple. Par conséquent, les éléments de forme circulaire leurs chemisages se réalisent en incorporant deux demi-tubes en acier légèrement surdimensionné qui seront soudés verticalement. Par la suite, le vide entre l'ancien élément et le nouveau profilé est rempli en béton [24]. Tandis que, pour les éléments de forme rectangulaire le renforcement se fait sous une forme elliptique. Cette forme permet d'exercer un confinement par retenue passif notamment au niveau des rotules plastiques. La figure I.18 présente un poteau de forme rectangulaire avec un renforcement par chemisage elliptique et une autre circulaire [24]. Par ailleurs, ces procédés ont démontré une bonne tenue face aux efforts sismiques, particulièrement pendant le tremblement de terre de Northbridge en 1994, où plusieurs ponts renforcés par se procéder n'ont pas subi de dommages importants [22].



(a) Poteau

(b) Poutre

Figure I.18. Renforcement avec des chemises en acier (a) poteaux circulaires et rectangulaires [25] (b) poutre [21]

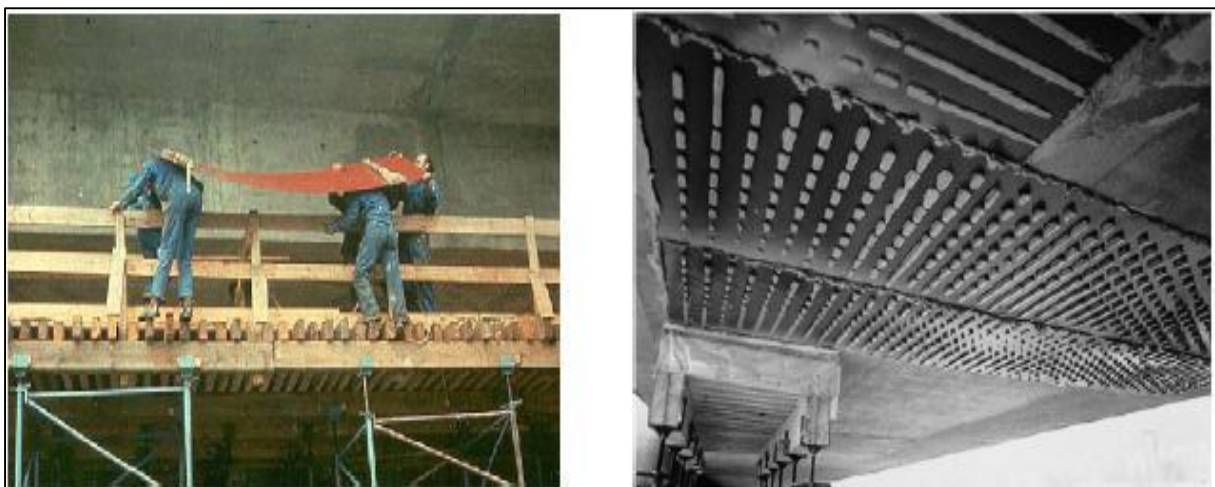
Tableau I.3. Avantages et inconvénients du chemisage en acier [22]

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

I.6.4. Renforcement à l'aide des tôles collées

Cette technique n'a pu voir le jour qu'une fois la colle adhésive à base d'époxy fut développée. La particularité d'époxy est d'avoir un niveau élevé d'adhésion permettant de transmettre des efforts de façon acceptable. Cette technique a été utilisée pour la première fois à Durban en Afrique du Sud. Le rôle de ce dernier été de compenser le manque d'acier oublié lors de l'exécution de l'ouvrage [21]. Ensuite, cette technique a été étudiée scientifiquement comme une technique de renforcement des poutres fléchies. Plusieurs chercheurs ont constaté son efficacité. Chose qui a motivé les Japonais à utiliser cette technique pour la réparation de 240 ponts à faible portance [26].

En 1977 Freyssinet Internationaux a décroché un brevet pour la technique des tôles perforées qui augmente l'adhérence des tôles avec la résine. La figure I.5 présente un exemple de la technique de renforcement par tôles collées [27].



(a) difficulté de manutention

(b) Renforcement du viaduc de Terrenoire

Figure I.19. Tôles collées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées -Brevet Freyssinet [27]

Tableau I.4. Avantages et inconvénients des tôles collées [27]

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

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes caractéristiques qui permettent d'identifier le matériau béton. Ainsi que les différents processus de sa dégradation qui peuvent être d'ordre humain, mécanique, physique et chimique.

Suite à ces dégradations qui peuvent nuire sur la résistance du béton et le coût très élevé de la démolition et la reconstruction, les chercheurs de ce domaine ont développé des méthodes qui peuvent être une solution efficace pour la réparation et le renforcement des structures en béton armé (chemisage, renforcement par projection du béton et à l'aide des tôles collées).

CHAPITRE II

*Techniques de renforcement des poutres
par matériaux composites PRF*

II. Chapitre : Techniques de renforcement des poutres par matériaux composite PRF

II.1. Introduction

Différentes méthodes sont traditionnellement utilisées pour renforcer les poutres en béton armé soumises à la flexion, notamment la post-tension externe et l'application de plaques en acier par collage. Cependant, ces approches présentent certaines limitations, allant de la complexité de leur mise en œuvre à leur capacité à maintenir une résistance à long terme. Au fil des années, une méthode de renforcement de plus en plus populaire pour les poutres en béton armé soumises à des forces de flexion consiste à utiliser des plaques ou des feuilles de polymère renforcées de fibres (PRF). En fait, dès les années 1980, les composites, plus précisément les PRF, ont été utilisés pour renforcer les poutres en béton armé exposées à des contraintes de flexion, dans le cadre des recherches menées au Laboratoire Fédéral Suisse pour l'essai des matériaux et la recherche [28]. Récemment, la plupart des études se sont concentrées sur l'application de PRF par collage pour améliorer la résistance à la flexion.

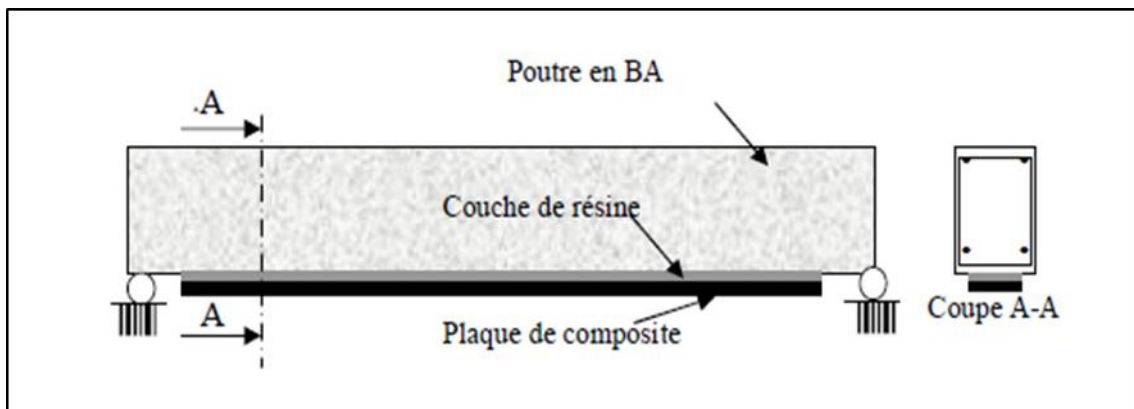


Figure II.1. Plaque de composite collée sur une poutre en béton armé

II.2. Fissuration et modes de rupture des poutres en béton armé

II.2.1. Fissuration

Le matériau en béton, constitué de granulats, présente une composition variée et une structure non uniforme. Outre cette diversité de composition, il présente également une hétérogénéité structurelle. Cette propriété se fait remarquer par l'apparition initiale de petites fissures dans la structure microscopique. Lorsque cette structure est exposée à des contraintes, des tensions localisées engendrées par des déformations incompatibles entre les granulats et le ciment peuvent provoquer l'émergence de fissures microscopiques supplémentaires. À mesure que la

charge augmente, ces microfissures se propagent et se rejoignent, formant ainsi une macrofissure qui provoque la défaillance du matériau (Figure II.2). Une fissure fait référence à une surface de rupture dans la structure du béton. La taille de cette discontinuité varie en fonction de l'instrument de mesure utilisé et de l'approche adoptée. Lorsqu'une fissure apparaît dans une structure et est soumise à des contraintes, elle peut s'agrandir et entraîner la fragmentation de la structure en plusieurs fragments [4].

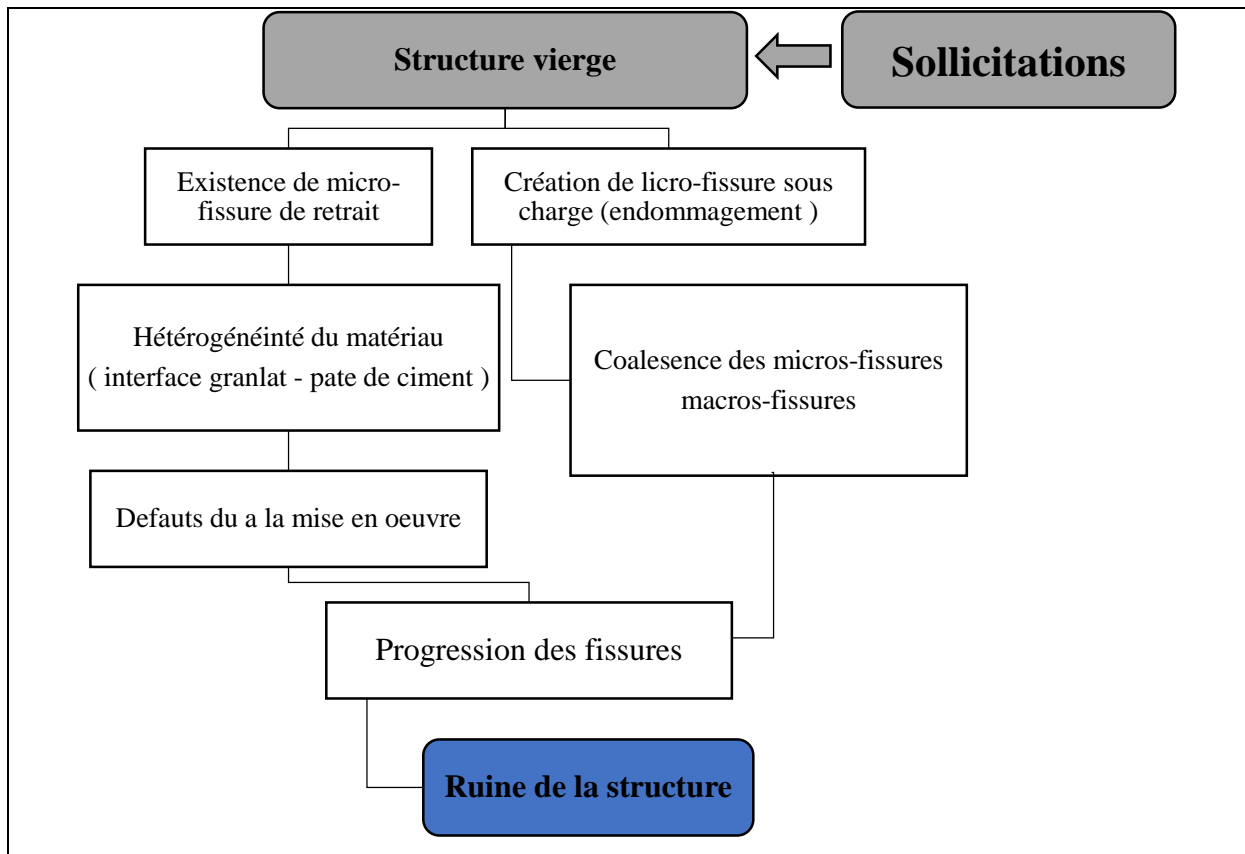


Figure II.2. Schématisation du processus de ruine d'un élément de structure [4]

Les poutres en béton armé présentent généralement deux catégories de fissures : les fissures verticales et les fissures obliques. Les fissures verticales se forment en premier en raison de la flexion, et se manifestent aux endroits où la contrainte de flexion est la plus intense. Les fissures obliques, quant à elles, se développent près des extrémités de la poutre, résultant de la combinaison de contraintes de cisaillement et de flexion [13].

II.2.2. Modes de rupture des poutres en béton armé

Il existe diverses options pour les méthodes de rupture, qui dépendent de plusieurs facteurs tels que le nombre d'armatures longitudinales et transversales, la configuration de la section, l'adhérence entre les armatures et le béton, la façon dont les barres sont ancrées au-dessus des appuis et la géométrie de la poutre [10]. Les divers modes de rupture couramment observés

pour une poutre en béton armé simplement appuyée peuvent être classifiés de la manière suivante :

II.2.2.1. Rupture par cisaillement et flexion

Ce type de défaillance se manifeste par la présence de fissures telles qu'illustrées dans la figure II.3. Cela peut se produire lorsque la poutre est relativement compacte et ne dispose pas d'une armature adéquate pour résister à la flexion sur toute sa longueur. Lorsque l'armature principale est réduite en fonction du diagramme des moments, la limite d'élasticité de l'acier est dépassée en dehors de la partie centrale de la poutre, là où l'effort tranchant et le moment fléchissant agissent simultanément. Ce phénomène entraîne une propagation excessive de fissures obliques, ce qui aboutit finalement à une rupture caractérisée par l'écrasement du béton dans la zone située au-dessus de ces fissures [10].

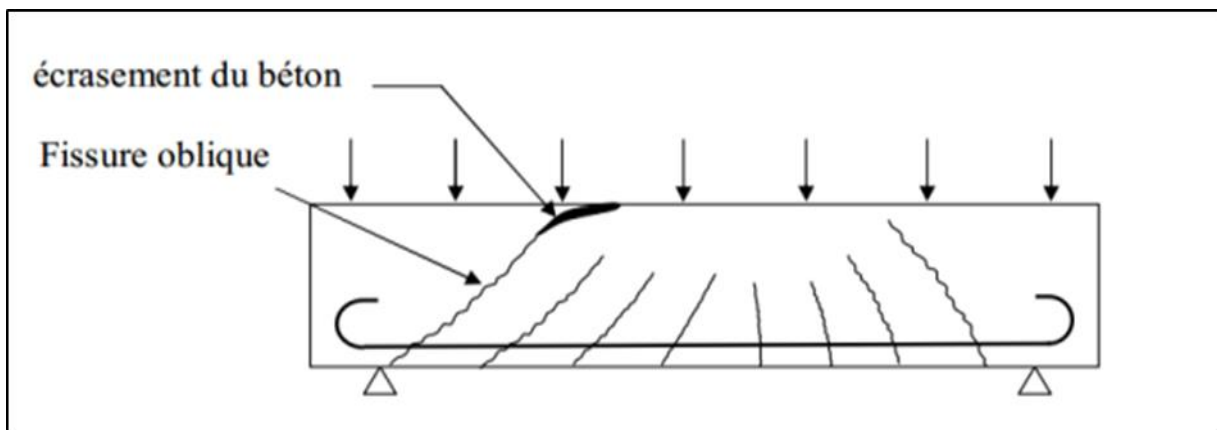


Figure II.3. Rupture par cisaillement et flexion [10]

II.2.2.2. Rupture par cisaillement et compression

Il est possible d'observer ce genre de rupture dans les poutres où l'armature principale est considérablement plus importante que l'armature transversale. Cette défaillance survient lorsque le béton se détériore et se déplace vers la zone de compression au-dessus de l'extrémité de la fissure oblique. Par conséquent, une articulation apparente se forme, provoquant une rotation simultanée avec un glissement tangentiel entre les deux parties de la poutre séparées par la fissure oblique (Figure II.4) [10].

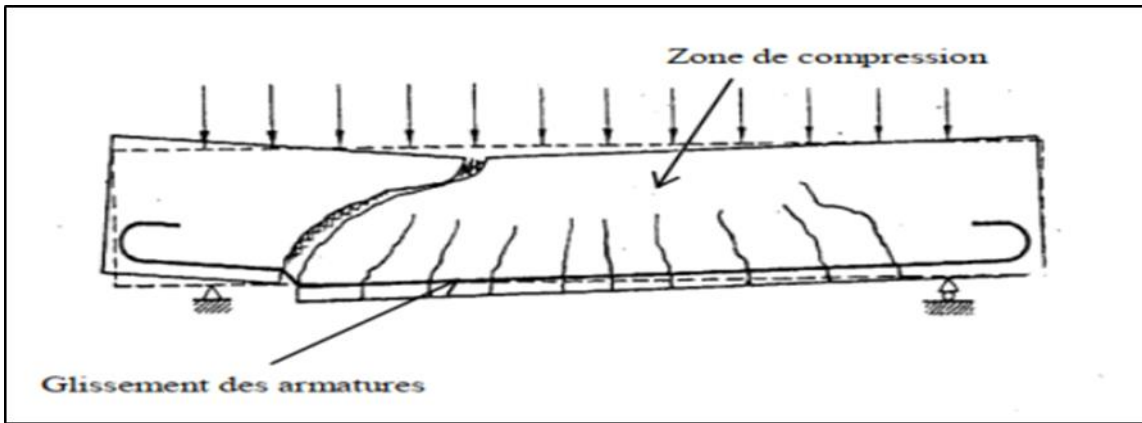


Figure II.4. Rupture par cisaillement et compression [10]

II.2.2.3. Rupture par cisaillement avec glissement

Ce phénomène de rupture est identifiable par l'émergence de fissures diagonales initiales, dont l'amplitude augmente sous l'effet de la charge, et par la formation de nombreuses fissures inclinées de petite taille le long de l'armature principale. La détérioration progressive de l'interaction entre l'acier et le béton conduit à une diminution progressive de la capacité portante de l'élément, principalement causée par le glissement des armatures principales au-dessus de l'appui (Figure II.5). Dans cette situation, si l'armature locale transversale n'est pas sélectionnée de manière appropriée, les extrémités pliées des barres lisses peuvent provoquer des fissures visibles sur la face avant de la poutre [4].

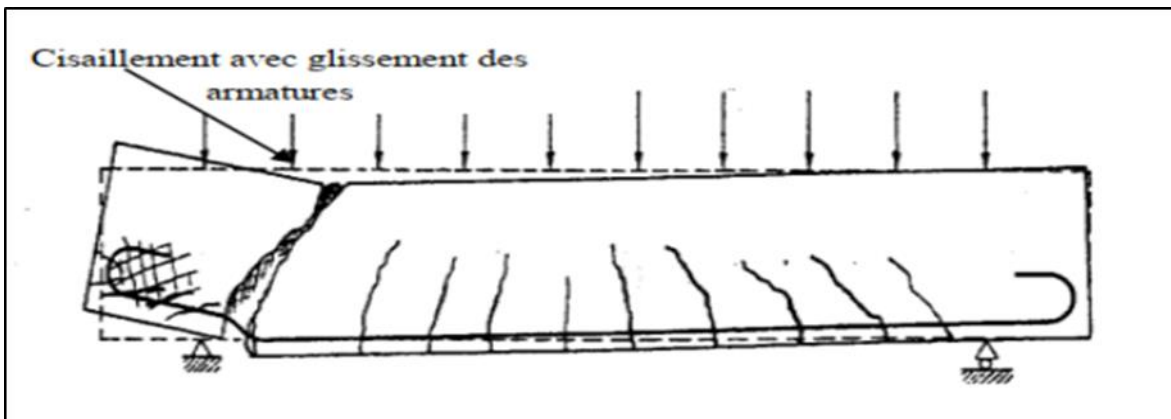


Figure II.5. Rupture par cisaillement et glissement [4]

II.2.2.4. Rupture par coupure

La rupture par coupure ne peut se produire que lorsque des poutres minces subissent une sollicitation transversale extrêmement élevée accompagnée d'un moment fléchissant faible (Figure II.6). Cela survient principalement lorsque des forces concentrées sont appliquées près de l'appui [10].

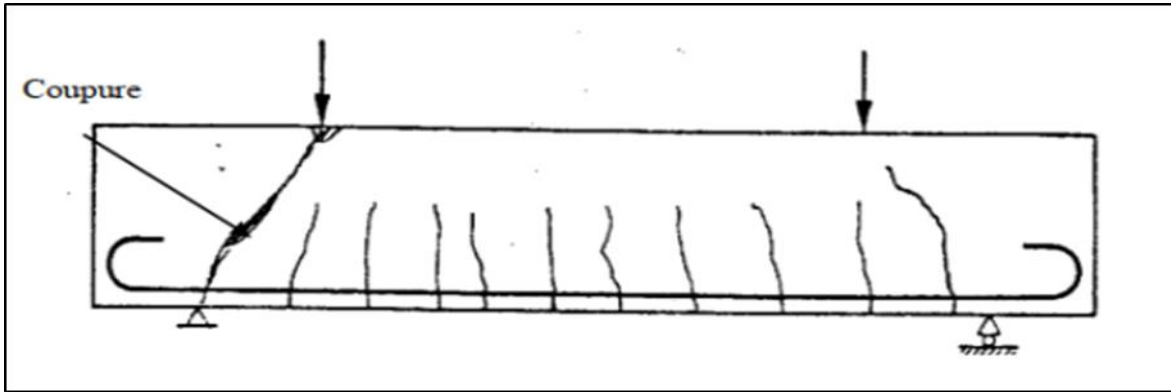


Figure II.6. Rupture par coupure [10]

II.3. Matériaux Composites

II.3.1. Définition des matériaux composites « PRF »

On peut définir le matériau composite comme étant le résultat d'un assemblage entre deux matériaux de nature différente, et qui ensemble donne des caractéristiques plus performantes que celle des deux matériaux séparés [29].

Toutefois, pour lui conférer d'autres caractéristiques l'occurrence la tenue aux chocs, la résistance aux ultraviolets, le comportement au feu, on rajoute généralement des charges. Ces charges se présentent sous la forme d'éléments fragmentaires ou des poudres ou des liquides [30].

II.3.2. Les matériaux composites en « PRF »

Parmi les différents types de matériaux composites, on a le polymère renforcé en fibres « PRF ». Il se différencie par rapport aux autres types par un renfort du type fibreux et une matrice thermosable. Les caractéristiques de ce type de matériaux composites dépendent du taux de fibre ainsi que leur direction. Les PRF sont anisotropes avec un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture [22].

Tableau II.1. Avantages et inconvénients des PRF [27]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Une densité faible. - Des caractéristiques mécaniques directionnelles. - Une bonne tenue face à la corrosion. - Une très bonne résistance à la fatigue. - Une flexibilité qui facilite sa manipulation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une forte anisotropie. - Une rupture fragile. - Un cout élevé par rapport à l'acier.

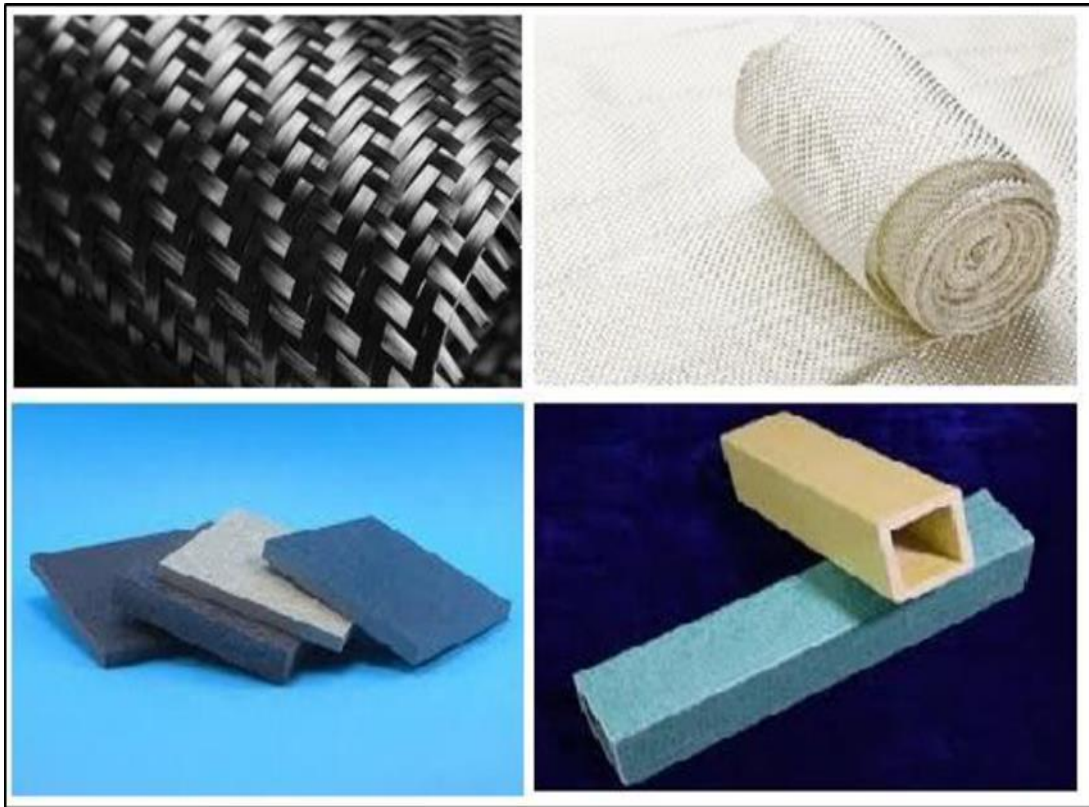


Figure II.7. Matériaux composites en polymère renforcé de fibres « PRF »

Tableau II.2. Comparatif entre les trois types de composites « PRF » [31]

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

II.3.3. Les fibres

Les types des fibres utilisées dans les polymères renforcés de fibres « PRF » sont les fibres longues ou bien les fibres continues. Contrairement à ceux utilisés lors du procédé de pulvérisation pour la construction des bateaux ainsi que les fibres utilisées dans des matériaux cimentaires renforcés qui mesurent de 10 à 50 mm. Ces fibres continues sont utilisées avec des taux élevés allons de 20 à 60% du volume de la résine polymère d'où l'appellation de polymère renforcé par des fibres (PRF) [32].

II.3.3.1. Fibres de carbone

Les fibres de carbone se distinguent par leur module d'élasticité exceptionnellement élevé, se situant entre 200 et 800 GPa. De plus, elles présentent une remarquable capacité d'allongement pouvant atteindre jusqu'à 2,5 % [33].

Tableau II.3. Avantages et inconvénients des fibres de carbone

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Une absorption nulle de l'eau ;- Une tenue face à plusieurs solutions chimiques ;- Une meilleure endurance à la fatigue.	<ul style="list-style-type: none">- Une conductivité électrique qui peut engendrer des corrosions galvaniques au contact avec l'acier ;- Un mauvais comportement au choc et à l'abrasion notamment ceux du type stratifié.

II.3.3.2. Fibres de verre

Les fibres de verre, en comparaison avec d'autres types de fibres, sont les plus abordables sur le marché et sont largement utilisées dans la fabrication de composites. Elles sont principalement composées de sable (silice) et contiennent des additifs tels que l'alumine, le carbonate de chaux, la magnésie et l'oxyde de bore. Leur module d'élasticité varie entre 70 et 85 GPa, et leur capacité d'étirement maximal se situe entre 2 % et 5 %, en fonction de leur qualité. Cependant, les fibres de verre présentent quelques inconvénients majeurs :

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

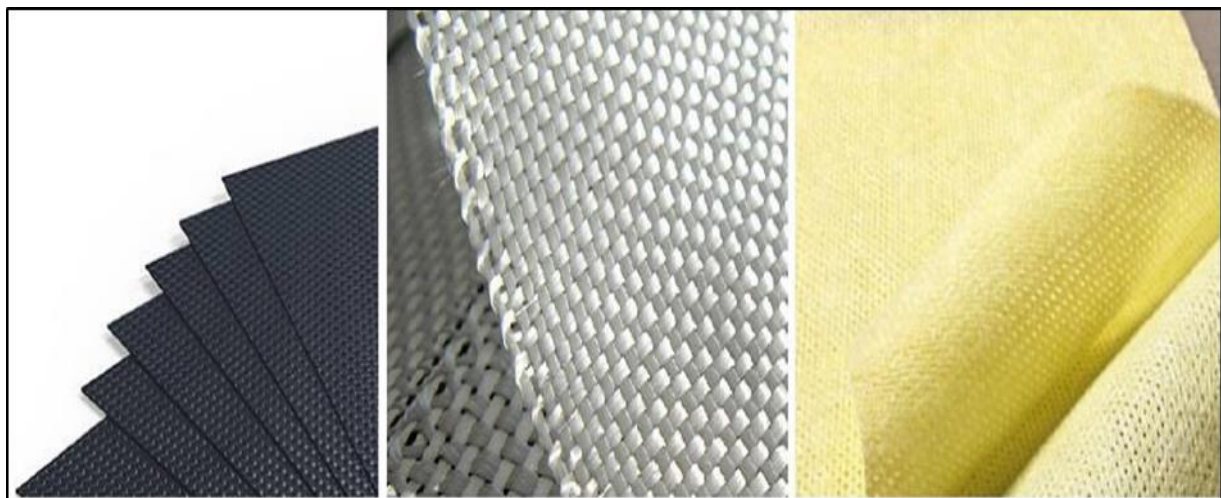
II.3.3.3. Fibres d'aramide

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

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

Cependant, leurs avantages impliquent une ténacité extrêmement élevée. Cette dernière est la raison de leurs utilisations dans de nombreux produits industriels, soit sous forme de tissu nu, soit comme renforts pour des composites PRF dont l'absorption énergétique est sollicitée. Par exemple ont peu trouvé des fibres d'aramide dans des gilets pare-balles (casques), des casques et Atténuateurs de chantier ou dans le domaine automobiles [32].

Les fibres d'aramide ont un module d'élasticité qui varie de 70 à 200 GPa et un allongement extrême varie de 1,5 à 5 % en fonction de la qualité [22].



• Fibre de carbone

• Fibre de verre

• Fibre d'aramide

Figure II.8. Les trois types des fibres pour « PRF »

Tableau II.4. Caractéristiques moyennes des fibres [30]

Fibres	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	ν	Cr	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0,5 \times 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000	-	0.2	3 200	4	$0,3 \times 10^{-5}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0,6	$0,08 \times 10^{-5}$
Carbone HR	07	1 750	230 000	50 000	0.3	3 200	1,3	$0,02 \times 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2,3	$-0,2 \times 10^{-5}$

II.3.4. Matrice

Le terme polymère est utilisé pour décrire un matériau constitué d'un ensemble de molécules, appelées macromolécules. Ces macromolécules consistent des unités répétitives ou des chaînes dans lesquelles les atomes sont maintenus ensemble par des liaisons covalentes. Le terme résine polymère ou bien plus simplement résine est utilisée dans l'industrie des composites pour désigner l'ingrédient polymère primaire dans la partie non fibreuse du matériau PRF. Cette partie non fibreuse est également connue sous le nom de matrice [32].

Les matrices jouent un rôle crucial dans la cohésion des fibres et la transmission des forces qui leur sont appliquées, tout en résistant aux contraintes tranchantes, aux forces transversales et aux forces de compression. En outre, elles ont la capacité de protéger les fibres de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques en assurant leur isolation [34].

On peut distinguer deux groupes primaires de polymères :

- Des polymères thermodurcissables (TD) ;
- Des polymères thermoplastiques (TP).

Ils se distinguent l'un de l'autre par la manière dont les chaînes moléculaires sont connectées lorsque le polymère est sous sa forme solide. Les polymères thermodurcissables ont une structure moléculaire réunie pour former un réseau tridimensionnel continu par des atomes

fortement liés, une structure de polymère thermodurcissable ne peut pas être chauffée et ramollie puis transformée en une autre forme elle est irréversible [32].

Les polymères thermoplastiques se constituent par des chaînes moléculaires maintenues ensemble par des forces faibles. Cela affecte leurs propriétés mécaniques et physiques en raison de l'encollage croisé. Ce polymère ne se fige pas, mais il reste plastique, et les chaînes moléculaires peuvent " s'écouler ". Toutefois, lorsque le polymère solide est chauffé, il peut être réinitialisé sous une forme différente lors du refroidissement donc il est réversible [32].

II.3.5. Domaines d'application

II.3.5.1. Structures en béton armé

➤ Confinement (chemisage) des poteaux en béton armé

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour améliorer ou réparer des poteaux en béton armé existants en utilisant des matériaux composites appelés "PRF". Les approches de renforcement se divisent en trois catégories, basées sur la technique employée pour créer le composite "PRF". Ces catégories englobent l'utilisation de couches stratifiées directement sur le poteau, l'enroulement de fils et l'application d'une coque préfabriquée en "PRF" pour le chemisage.



Figure II.9. Confinement (chemisage) de poteaux à l'aide de PRF [35]

➤ Renforcement des dalles en béton armé

Pour renforcer les dalles simplement appuyées, une méthode fondamentale consiste à utiliser des attaches ou des bandes en PRF sur la surface tendue de la dalle. Dans le cas des dalles qui travaillent dans les deux directions, des bandes en PRF croisées peuvent être utilisées (Figure II.10a), ou du PRF contenant des fibres dans les deux directions peut être utilisé. De plus, lorsqu'il est nécessaire de renforcer une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens,

il est possible de concentrer le renforcement soit dans la région centrale, soit dans la région des moments maximaux, selon les besoins. Dans ce cas, les attaches ou bandes en PRF sont arrêtées à une distance spécifique des bords de la dalle (Figure II.10b).

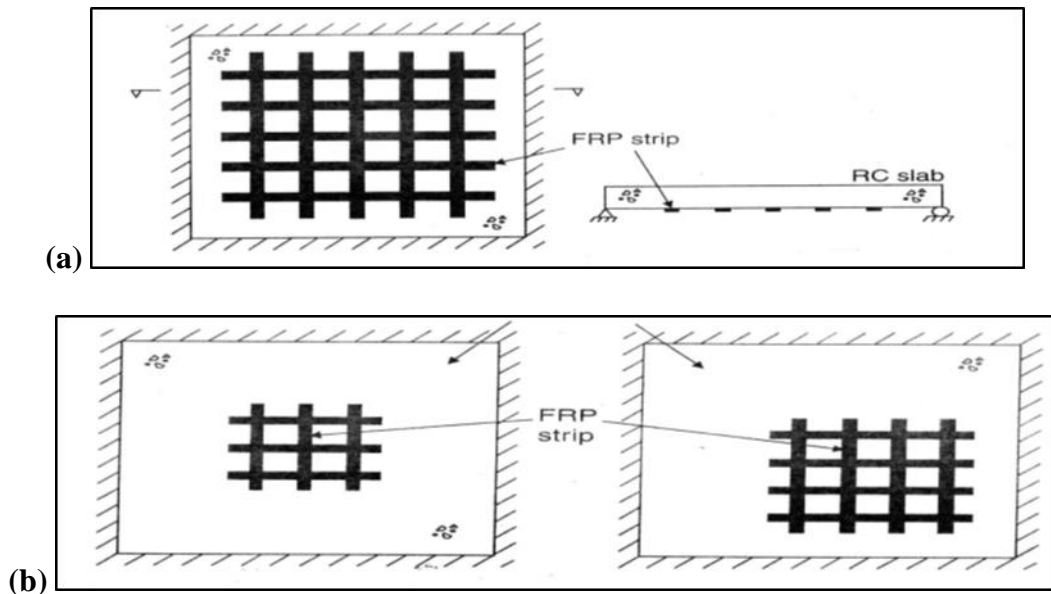


Figure II.10. Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF» : (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées [36]



Figure II.11. Consolidation de dalle par fibre de carbone [37]

➤ **Renforcement des poutres en béton armé**

En général, pour renforcer la résistance à la flexion des poutres en béton armé, les plaques ou les feuilles de PRF sont souvent utilisées et fixées sur la partie tendue pour améliorer la résistance à la flexion et dans la partie latérale pour renforcer la poutre envers le cisaillement (Figure II.12).



Figure II.12. Poutre de pont en béton renforcée par feuilles de PRF de carbone collées extérieurement [38]

De manière générale, il est courant d'améliorer la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant des composites "PRF" qui sont fixés par collage externe sur la surface de la poutre concernée (Figure II.13). Les lamelles ou feuilles composées de PRF sont souvent appliquées sur les zones soumises à la tension de l'élément en flexion, dans le but d'augmenter sa capacité à résister à la flexion, ou sur les côtés pour améliorer la résistance au cisaillement.

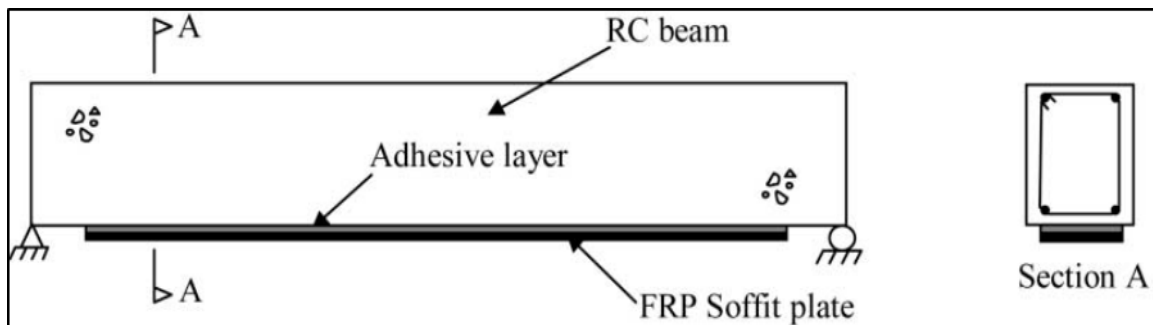


Figure II.13. Poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF [36]

II.4. Les techniques de renforcement

II.4.1. Renforcement à l'aide des matériaux composites « PRF » polymère renforcé de fibres

Les matériaux composites ont été développés au départ pour les industries aérospatiales et aéronautiques. C'est ensuite et à cause de la demande accrue des matériaux des constructions plus performants où les matériaux composites ont été introduits dans le domaine du bâtiment. La technique de renforcement par matériaux composites a été utilisée pour la première fois par

MEIER en 1991 sur des structures réelles en Suisse [39]. MEIER et son équipe ont eu recours à cette technique pour le renforcement d'une poutre du pont IBACH BRIDGE ayant une longueur totale de 228 mètres [28].

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

- Le rapport entre la résistance et le poids est extrêmement élevé.
- La flexibilité des matériaux composites qui offre la possibilité d'épouser différentes formes.
- Absence de corrosion.
- Résistance élevée notamment à la traction.

II.4.1.1. Renforcement à l'aide des matériaux composites collé (Technique EBR)

En 1998 Komlan et al ont classé les méthodes de renforcement par matériaux composites en trois catégories [21] :

La première est celle de Meier [28], elle consiste à coller à l'aide d'une résine époxy un plat ou plusieurs avec un durcissement à température ambiante.

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

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

L'ensemble des trois méthodes se résume à coller à la surface du béton au niveau de la partie tendue des plats ou des tissus en polymères renforcés de fibres « PRF » par l'intermédiaire d'une colle époxydique. La mise en place du renfort se fait après préparation de la surface à coller qui consiste à enlever les parties fragiles afin d'assurer une surface uniforme pour une bonne adhérence entre la résine et le béton. Cette technique de renforcement est connue sous le nom de (*Externally Bonded Reinforcement*) EBR. (Figure II.14) (Figure II.15).

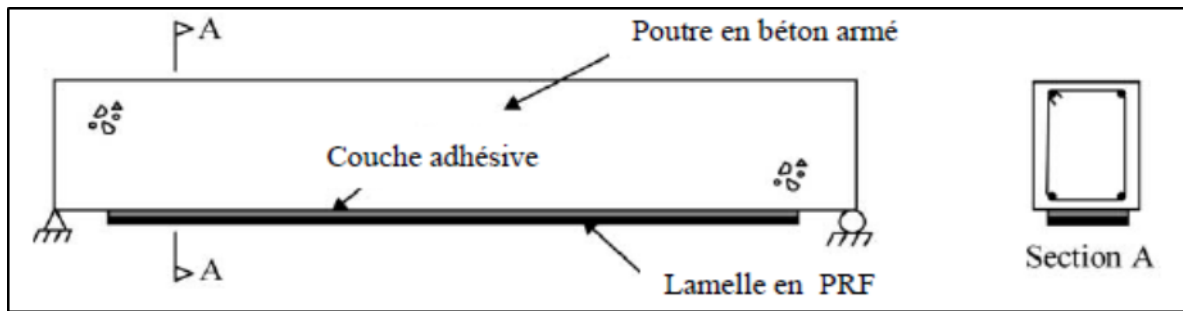


Figure II.14. Technique de renforcement EBR [31]



Figure II.15. Plusieurs usages de la technique de renforcement EBR [31]

II.4.1.2. Technique de renforcement NSM (*Near Surface Mounted*)

Le renforcement par PRF a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Plusieurs études parmi eux ont porté sur l'amélioration et la compréhension de la technique EBR. Cependant, d'autres études ont proposé une nouvelle technique appelée NSM (*Near Surface Mounted*). Représentant une innovation prometteuse dans le domaine du renforcement des structures en béton armé. Les chercheurs l'ont suggéré comme une alternative à la première. Au début, cette technique a été inspirée d'une ancienne technique similaire. Cette dernière a été utilisée en Europe, précisément en Suède dans le début des années 50. Une technique qui a été mise en œuvre pour le renforcement d'un pont en béton armé. Les ingénieurs ont creusé des rainures sur le béton où des barres d'acier ont été placées puis ils ont rempli les rainures par du mortier de ciment. En effet, la méthode NSM est similaire à la précédente à l'exception des tiges ou des plats en « PRF » qui remplace les barres d'acier, et la résine époxy au lieu du mortier de ciment [40] ; (Figure II.16).

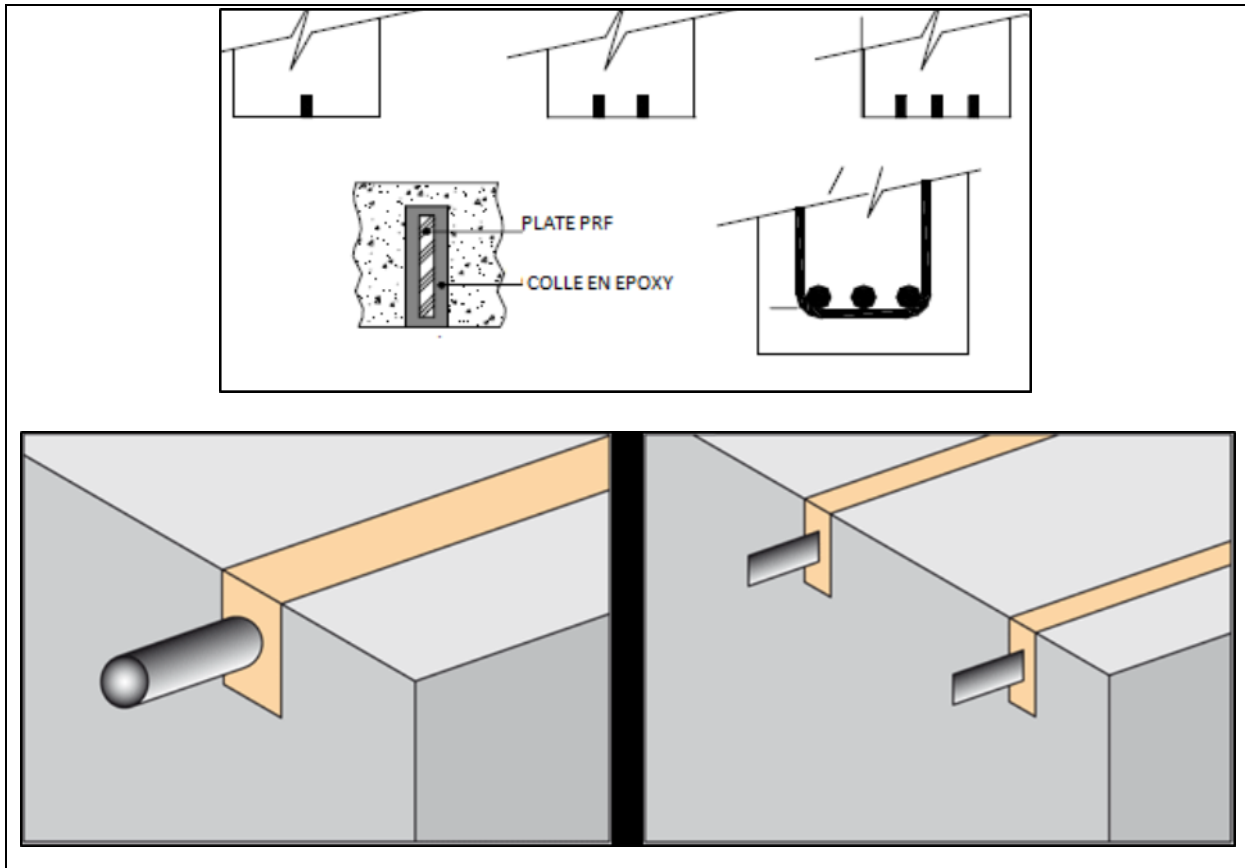


Figure II.16. Technique de renforcement NSM

II.4.1.3. Technique de renforcement SNSM (*Saide Near Surface Mounted*)

Ces cinq dernières années, des chercheurs comme *Sharaky* [41] et *Bilotta* [42], ont développé une nouvelle technique appeler SNSM (*Side Near surface mounted*). Cette dernière est similaire à l’NSM à l’exception de la position des renforts placés au niveau des facettes latérales au lieu de la partie inférieure des poutres.

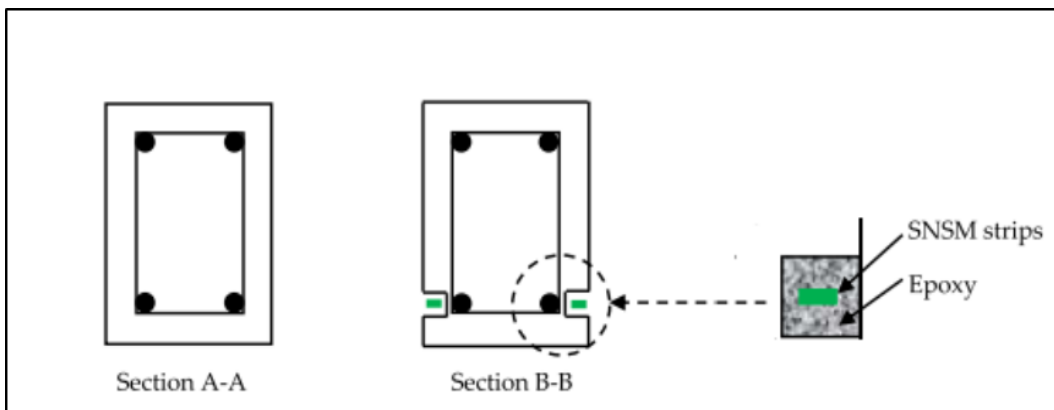


Figure II.17. Technique de renforcement SNSM

II.5. Conclusion

Il a été souligné dans le premier chapitre que les structures en béton armé nécessitent un renforcement ou une réparation pour un certain nombre de raisons. Il a été constaté que la méthode de renforcement avec les matériaux composites était une solution intéressante.

En raison de leurs caractéristiques mécaniques exceptionnelles, les matériaux composites ont été largement adoptés comme une solution prometteuse et efficace pour la réparation des ouvrages en génie civil.

Enfin, des nouvelles techniques de renforcement par matériaux composite PRF on était mise en place.

CHAPITRE III

Compagne expérimentale

III. Chapitre : Campagne expérimentale

III.1. Introduction

Dans le cadre de ce chapitre, nous exposons les étapes spécifiques du protocole expérimental qui a été mis en place au laboratoire de matériaux de la faculté du génie civil de l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira. Ces étapes ont été élaborées suite à une recherche approfondie sur le béton dans son ensemble, ainsi que sur les différentes approches utilisées pour renforcer les poutres en béton armé.

L'objet de cette étude consiste à améliorer la résistance à la flexion des poutres en béton armé en utilisant des matériaux composites. Plus précisément, nous nous concentrons sur un renforcement en utilisant des plaques composées de tissu en fibre de verre GFRP et de tissu en jute JFRP.

L'objectif de notre démarche était d'étudier plusieurs variables de renforcement entre le tissu en fibre de verre et le tissu de jute. Les variables considérées dans notre travail sont l'emplacement de chaque renfort par rapport à l'autre entre la zone tendue de la poutre et la zone d'appui.

Le calcul des proportions des différents constituants du béton, son malaxage, la pose du renfort ainsi que la conservation des éprouvettes sont des étapes soigneusement réalisées et bien décrites dans cette partie.

Enfin une description de la procédure d'essai de flexion est donnée.

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Le béton

Dans notre programme expérimental, nous avons choisi d'utiliser un seul type de mélange de béton pour la création des échantillons destinés à l'analyse. La composition de ce béton a été déterminée en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse [7], qui se base sur la norme NF P18-560 pour l'analyse granulométrique du sable et des différents composants de gravier. Les proportions en poids des constituants nécessaires pour obtenir un volume de 1 m³, ainsi que les caractéristiques du béton à l'état frais, sont répertoriées dans le tableau III.1. Le malaxage du béton a été réalisé à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 50 litres.

Tableau III.1. Composition du béton utilisé et leurs caractéristiques

Désignation	Poids spécifique (Kg/m ³)
Sable 0/3	648
Sable BOUSSAADA	97
Gravillon 8/15	710
Gravillon 15/25	400
Ciment (Kg)	350
Eau (L)	190

Rapport E/C	0,54
Masse volumique Mv (kg/m ³)	2390

III.2.1.1. Granulats

Dans cette étude on a utilisé un sable de provenance de BOUSSAADA.

Le sable 0/3, le gravier 8/15 et 15/25 de provenance de la carrière KEBBICHE-SETIF.



Figure III.1. Les granulats utilisés dans la formulation du béton

III.2.1.2. Ciment

Dans le cadre de cette étude, le ciment CPJ CEM I 42.5 R de la cimenterie de BISKRA est employé comme liant. La densité de ce matériau est évaluée à **3,1 t/m³**



Figure III.2. Le ciment

III.2.1.3. Eau

L'eau potable provenant du système de distribution de la ville de Bouira a été employée dans la préparation du béton.

III.2.2. Résine

La NOVA MASTICOLLE est une matrice utilisée pour améliorer la résistance, composée d'un liant polymère réactif comprenant une base en polymère réactif et un agent de durcissement. Ces deux éléments réagissent et subissent une polymérisation à des températures normales (entre 10°C et 35°C).

Tableau III.2. Données techniques et propriétés de la résine

Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Etat physique : EA : résine / EB : durcisseur • Couleur : EA : gris / EB : beige • Densité : 1,4 ± 0,04 • Adhérence : ≥ 3 MPa
Propriétés	<ul style="list-style-type: none"> • Résistances mécanique très élevées • Bonne adhérence sur tout support : béton, mortier, Pierre, brique, amiante-ciment, métaux... • Durcit sans retrait • Bonne dureté • Bonne tenue à l'abrasion, aux chocs et aux agents corrosifs



Figure III.3. Résine (élément A) et durcisseur (élément B)

III.2.3. Armature

La configuration géométrique, les dimensions et les spécifications du renforcement appliqué aux poutres soumises aux tests sont illustrées dans la figure III.4. Deux types d'armatures sont employés : deux barres d'armature de diamètre 10 mm positionner dans la partie tendue de la poutre (2HA10) et deux autres barres placer dans la partie comprimée de la poutre (2HA8). La valeur de l'enrobage des poutres est 25 mm. Pour les armatures transversales (cadres) On a utilisé des barres d'acier doux de 6 mm de diamètre, espacées de 2,5 cm aux extrémités et de 10 cm au milieu. Les propriétés mécaniques de l'acier sont récapitulées dans le tableau III.3.

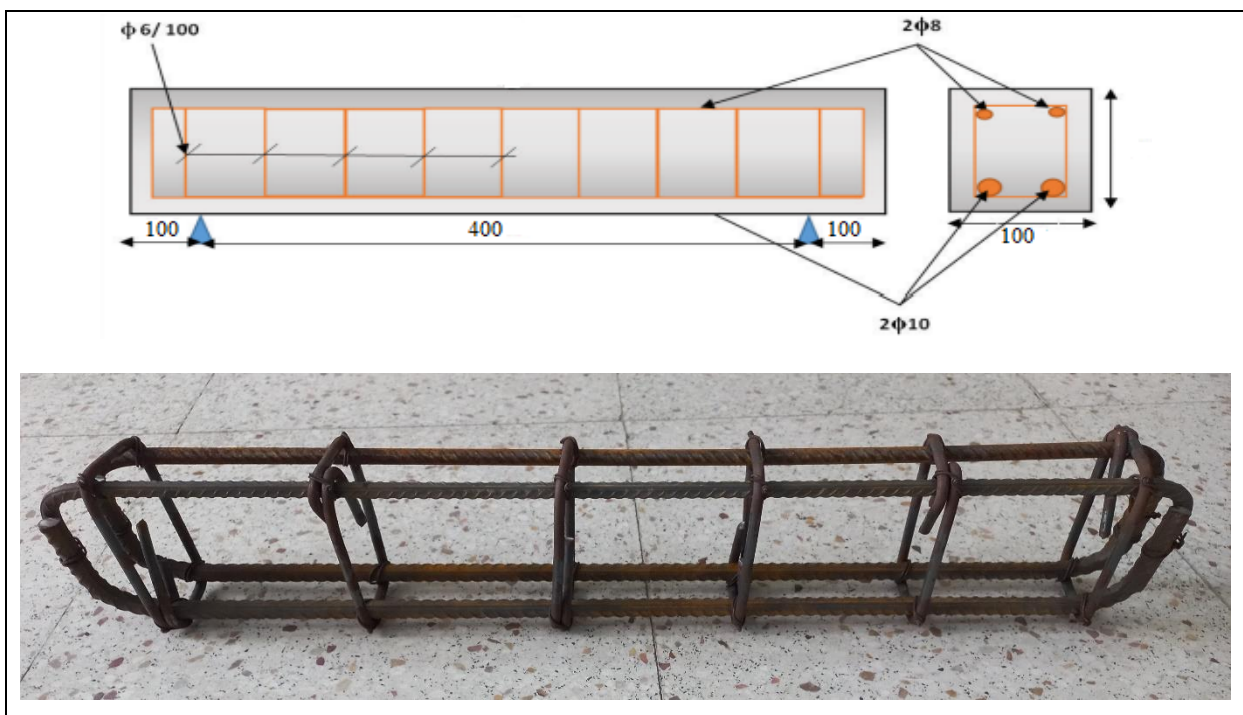


Figure III.4. Ferrailage des poutres testées (l'unité en mm)

Tableau III.3. Caractéristiques mécaniques de l'acier [43]

Types d'aciers	Désignation	Limite élastique fe (MPa)	Résistance à la rupture fr (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité E (MPa)	Coefficient de poisson ν
Armatures à haut adhérence	Fe E500	500	550	12	210000	0,3
Armatures doux	Fe E235	235	410	25	210000	0,3

III.2.4. Le renfort

Les matériaux composites ou les renforts utilisés dans notre expérience sont des polymères renforcés de fibre de jute et de verre. Il s'agit de plaques à base de tissus de verre et de jute imprégnées d'une résine époxy.

➤ Tissu en fibres de jute (JFRP)

La fibre végétale la plus économique, extraite par le processus de rouissage, provient de la plante de jute. L'Inde occupe la position dominante en tant que principal producteur mondial de cette fibre, représentant 60% de la production totale. Cette fibre se caractérise par sa grande résistance à la traction et sa faible élasticité.

La source de la fibre utilisée dans cette recherche est la toile de jute recyclée qui a été précédemment utilisée comme sacs d'emballage pour des produits alimentaires et agricoles (Figure III.5).

**Figure III.5.** Préparation de tissu de fibre de jute

Le tableau III.4 regroupe quelques caractéristiques de la fibre de jute.

Tableau III.4. caractéristiques de la fibre de jute [10]

Fibre	Module E (MPa)	Résistance (MPa)	Charge ultime (MPa)	Epaisseur (mm)	Elongation (%)
Jute	2794	28.54	29.6	2.25	1.24

➤ **Tissu en fibre de verre (GFRP)**

Les fibres de verre sont en généralement fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de la silice associée à divers oxydes (alumine, alcalins, alcalinoterreux). Le verre en renforcement, est souvent utilisé sous forme de tissu (Figure III.6).



Figure III.6. Préparation de tissu de fibre de verre

Les fibres de verre se démarquent largement en tant que renforts privilégiés dans le domaine des renforts composites en raison de leur remarquable rapport qualité-prix et de leurs excellentes performances.

Le tableau III.5, englobe l'essentiel des caractéristiques de la fibre de verre de type E.

Tableau III.5. caractéristiques de la fibre de verre [10]

Fibre	Module E (MPa)	Résistance (MPa)	Charge ultime (MPa)	Epaisseur (mm)	Elongation (%)
Verre type E	5850	108.96	124.50	1.64	2.66

III.3. Protocole expérimental

III.3.1. Poutres testées

Un total de quatorze (14) poutres identiques de section (150 x 100) mm² qui ont une longueur de 600 mm ont été fabriqués :

- Poutres témoin (PT) : Deux (02) poutres en béton armé.
- Poutres renforcées : Douze (12) poutres en béton armé renforcées par des plaques (400x 100) mm² collées à la surface inférieure et par des bandes diagonale (200 x 100) mm² collées sur la diagonale des deux côtés avec un espacement de 50 mm (Figure III.4). Ces poutres ont été divisées en six (6) groupes :
 - Groupe 1 : Deux (02) poutres renforcées dans la partie inférieure uniquement par un seul type de PRF : tissu en fibre de verre GFRP.
 - Groupe 2 : Deux (02) poutres renforcées dans la partie inférieure uniquement par un seul type de PRF : tissu en fibre de jute JFRP.
 - Groupe 3 : Deux (02) poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale dans la zone d'appui) par le même type de PRF : tissu en fibre de verre GFRP.
 - Groupe 4 : Deux (02) poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale dans la zone d'appui) par le même type de PRF : tissu en fibre de jute JFRP.
 - Groupe 5 : Deux (02) poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale dans la zone d'appui) par deux types de PRF : tissu en fibre de verre GFRP dans la face inférieure et le tissu en fibre de jute JFRP dans la diagonale en zone d'appui.
 - Groupe 6 : Deux (02) poutres renforcées dans la partie inférieure et sur les deux côtés (diagonale dans la zone d'appui) par deux types de PRF : tissu en fibre de jute JFRP dans la face inférieure et le tissu en fibre de verre GFRP dans la diagonale en zone d'appui.

Le tableau III.6 répertorie les différentes variations des poutres qui ont été étudiées.

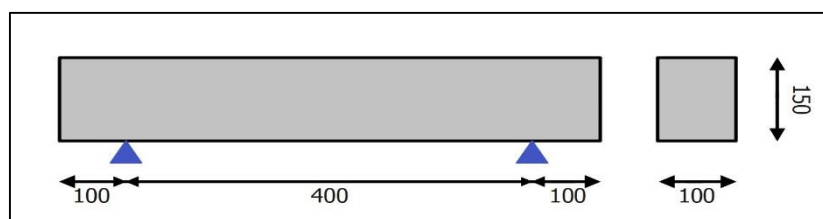



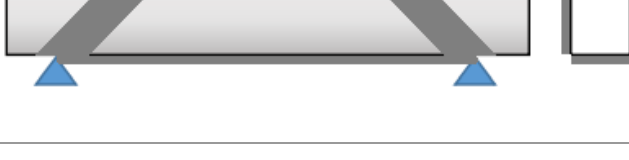
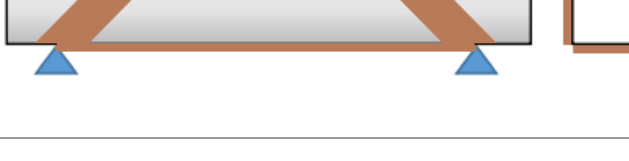
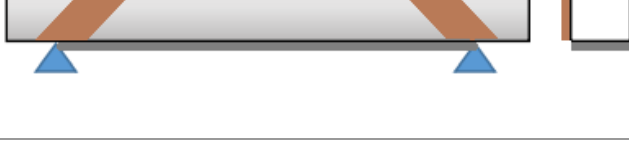
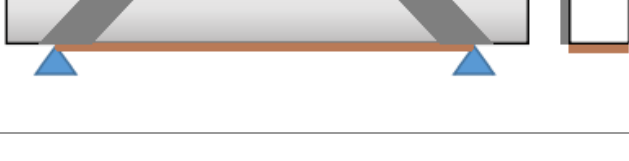



Figure III.7. Géométrie des poutres testées

Tableau III.6. Configuration des poutres testées

	Code	Configuration	Zone bas	Diagonale
Poutre témoin	PT		/	/
Groupe 1 : fibre de verre	VI		GFRP	/
Groupe 2 : fibre de jute	JJ		JFRP	/
Groupe 3 : fibre de verre	VIVD		GFRP	GFRP
Groupe 4 : fibre de Jute	JJJD		JFRP	JFRP
Groupe 5 : verre et jute	VIJD		GFRP	JFRP
Groupe 6 : jute et verre	JIVD		JFRP	GFRP
		 JFRP GFRP		

III.3.2. Préparation des spécimens

III.3.2.1. Les caractéristiques de béton durci

Un essai de compression appliqué sur une éprouvette cylindrique de dimensions (16*32) cm² à 28 jours nous a donné des résultats résumés dans le tableau III.7.



Figure III.8. Essai de compression à 28 jours

Tableau III.7. Caractéristiques du béton durci à 28 jours

Poids de l'éprouvette (Kg)	15,47
F_{c28} (MPa)	36,6
F_{t28} (MPa)	2,79

III.3.2.2. Malaxage et mise en œuvre

Le béton a été mélangé à l'aide d'un malaxeur à axe vertical, composé d'une cuve et de palettes centrales en rotation. Le malaxeur a une capacité de 50 litres, comme illustré dans la figure III.9.



Figure III.9. Malaxeur à axe vertical de capacité 50L

Le malaxage du béton a été effectué suivant les instructions suivantes :

- Verser dans le malaxeur le sable, le gravier et le ciment.
- Malaxer à sec pendant une minute.
- Pendant une durée de 15 secondes, versez uniformément 3/4 d'eau dans le mélange, tout en maintenant le malaxage constant. Continuez à mélanger pendant 2 minutes supplémentaires.

Une fois le malaxage terminé, les moules sont remplis en procédant de la manière décrite ci-dessous :

- En premier lieu, les moules sont graissés.
- On remplit les moules en deux couches avec une vibration de 30 secondes pour chaque couche.
- La surface de l'éprouvette de béton est arasée et lissée en utilisant une truelle pour obtenir une finition uniforme et lisse.

Une fois écoulées 24 heures, les poutres sont extraites des moules et placées dans un bassin d'eau à température ambiante pendant une période de 28 jours.



Figure III.10. Préparation des poutres testées

III.3.2.3. Procèdes de mise en œuvre du renfort composite sur les poutres

Pour effectuer une bonne mise en œuvre de l'emplacement du renfort composite et assurer l'adhérence entre les poutres et le renfort, on a suivi les étapes suivantes :

➤ Préparation du support béton

Le renforcement externe en tissu de fibres (composé de verre et de jute) a été appliqué sur les surfaces inférieures et latérales (à un angle de 45°) des poutres en béton armé à l'aide d'une technique d'adhésion. Avant l'application, une préparation de la surface du béton a été réalisée pour garantir une adhérence optimale entre le matériau composite et le béton.

➤ Préparation de la résine (NOVA MASTICOLLE)

La préparation de la résine a été effectuée selon les étapes suivantes :

- Le support (la poutre) doit être propre, exempte de toute trace de particules non adhérentes (graisse, poussière, huile...etc.) ;
- Il est nécessaire d'attendre un minimum de 28 jours avant d'utiliser des supports en béton ;
- Assurer d'achever toutes les préparations avant de commencer à mélanger la résine et le durcisseur, et ne préparer qu'une quantité de mélange qui peut être utilisée dans les 30 minutes avant qu'il ne commence à durcir ;
- En respectant le rapport de mélange de 553g d'élément B pour 836g d'élément A, mélanger l'élément B (durcisseur) et l'élément A (résine) dans un récipient ;
- Il est essentiel de veiller à agiter soigneusement les deux éléments constitutifs à l'aide d'un agitateur électrique fonctionnant à une vitesse de rotation réduite, afin de garantir un mélange uniforme.
- Remuer pendant 3 mn.



Figure III.11. Préparation de la résine

➤ **Application du renfort**

Pour le collage du renfort composite sur le support béton, on a procédé aux étapes suivantes :

- Application d'une couche de 1 mm de la pâte sur la surface de l'éprouvette (zone inférieure et latérale) à l'aide d'une spatule ;
- Repartir la pâte toute au long la surface renforcer à l'aide d'un rouleau ;
- Positionner et placer manuellement le tissu sur le support ;
- Presser fortement avec la main sur le tissu afin d'avoir une bonne adhérence entre la poutre, la pâte et le tissu ;
- Laisser sécher à l'air libre.



Figure III.12. Application du renfort

Les différentes configurations de renforcement ont été appliquées sur les poutres après un séchage de 3 jours, et sont illustrées dans la figure suivante :

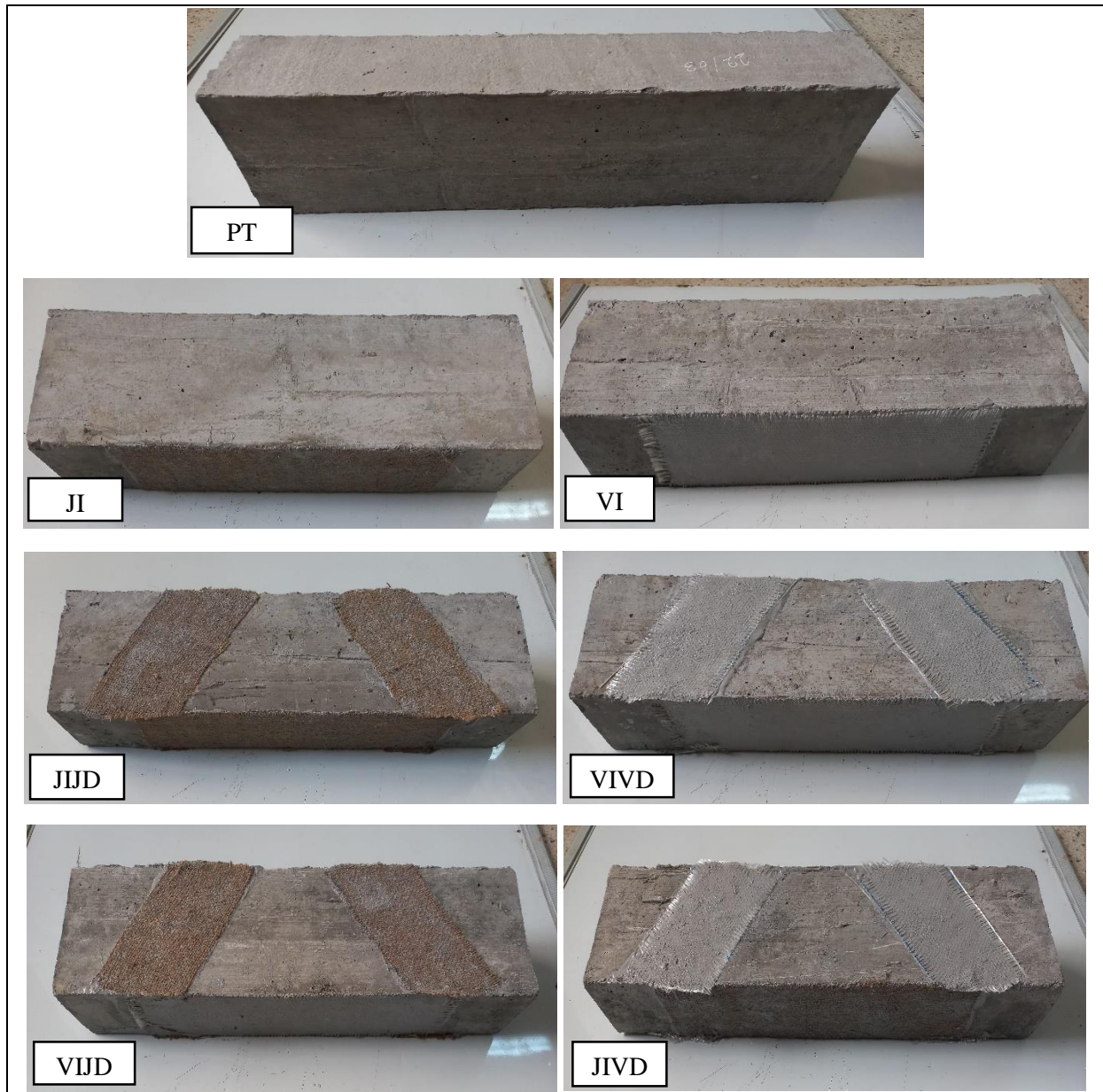


Figure III.13. La configuration des poutres testées

III.3.3. Programme d'essai (chargement et acquisition)

Les poutres ont subi une charge de flexion à quatre points jusqu'à leur rupture en utilisant une machine de test universelle de la marque (3R RP200), ayant une capacité de 200KN et une vitesse de chargement de 0,05MPa/s, conformément à la norme NF EN 12390-5. La distance entre les supports était de 400mm, tandis que la distance entre les deux plateaux de chargement était de 100mm (voir figure III.12). La machine d'essai, qui est contrôlée par ordinateur, a enregistré les valeurs de force verticale et les déplacements correspondants. Les déplacements au milieu de la portée des poutres ont été mesurés à l'aide de deux capteurs LVDT

(Transformateur Différentiel Linéaire Variable) positionnés à mi-portée, permettant ainsi de collecter différentes valeurs de déplacement.

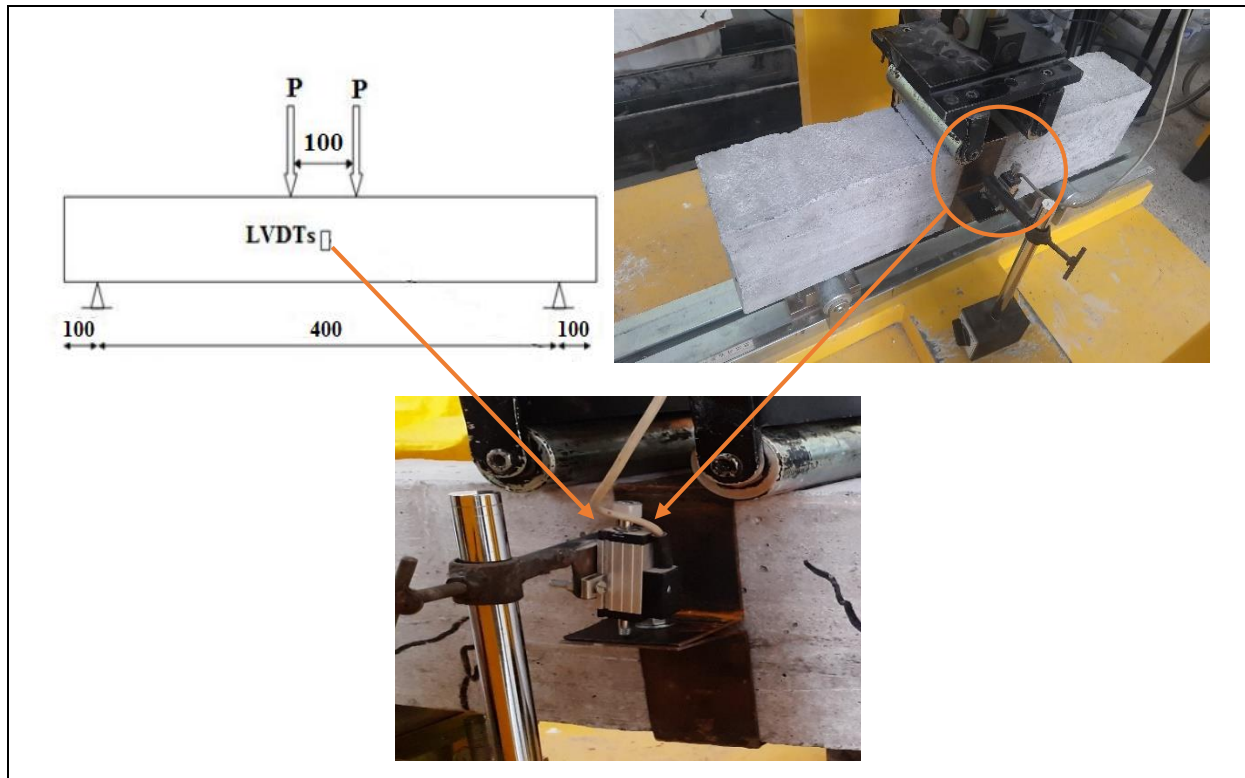


Figure III.14. Configuration du test de flexion en quatre points

III.4. Conclusion

Ce chapitre a été réservé à la description de la procédure expérimentale élaborée pour la confection des éprouvettes en béton armé pour le programme d'essais, et la méthode adoptée dans cette étude, qui est le renforcement externe des poutres par des tissus en fibre de jute et en fibre de verre.

L'étude expérimentale comprend une description détaillée des matériaux utilisés, des proportions des différents composants, ainsi que des propriétés physiques et mécaniques des renforts employés. Les différentes méthodes de renforcement sont exposées en détail, mettant en évidence les diverses étapes et variantes envisagées, depuis la préparation des échantillons en béton jusqu'à l'obtention de spécimens renforcés avec des tissus de verre et de jute prêts à être soumis à un essai de flexion en quatre points. La procédure de cet essai est également minutieusement expliquée dans ce chapitre.

Les résultats des différentes poutres testées sous l'essai de flexion quatre points font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Présentation et discussions des résultats

IV. Chapitre : Présentation et discussions des résultats

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats des essais de flexion quatre-points réalisés sur chaque série d'éprouvettes. Il aborde la capacité portante (charge supportée jusqu'à la rupture), la déformabilité (flèche), les modes de rupture, les gains de résistance, les déplacements et la ductilité. De plus, les courbes forces-déplacements des divers spécimens sont comparées.

IV.2. Résultats et discussion

IV.2.1. Modes de rupture

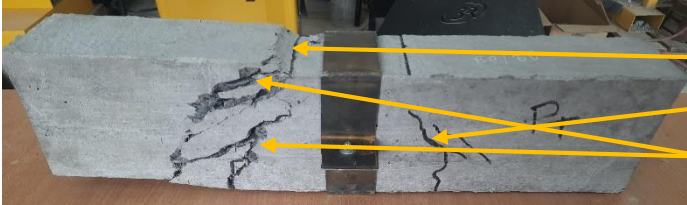


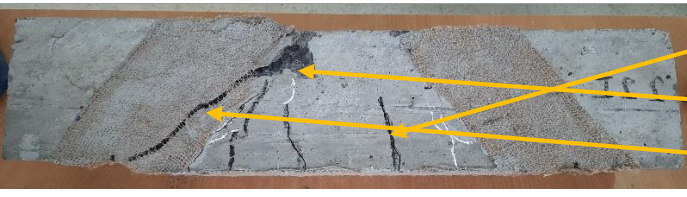

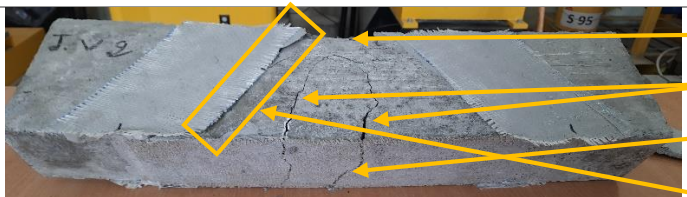
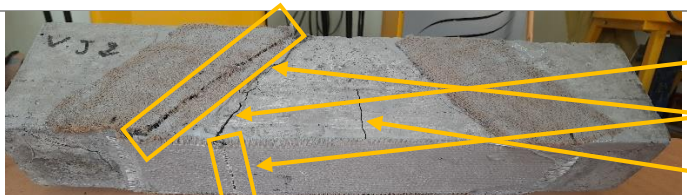
Il est crucial d'examiner en détail les mécanismes de défaillance détectés lors des essais sur les poutres afin de mieux évaluer l'efficacité du renforcement dans la réduction de la propagation des fissures. Cette caractéristique a une incidence directe sur la résistance des poutres étudiées. A cet effet, le tableau IV.1 regroupe les images des poutres testées à la rupture et un résumé du type de rupture finale de chaque type de poutres. Il est possible de constater que toutes les poutres testées montrent différents modes de rupture : écrasement du béton au sommet de la poutre, fissures de flexion, fissures de cisaillement par effort tranchant, décohésion et rupture du renfort PRF.

- Les poutres témoins ont été soumises à une charge de flexion, ce qui a entraîné une rupture conventionnelle du béton. Les échantillons ont montré une propagation importante des fissures diagonales, ainsi qu'un écrasement du béton dans la zone de compression en raison de sa fragilité.
- Il est observé une réduction dans la fréquence et la largeur des fissures sur les poutres qui ont bénéficié d'un renforcement à l'aide de composites PRF. Deux principaux modes de défaillance ont été identifiés pour les poutres renforcées : la décohésion et la rupture des renforts, avec des fissures de cisaillement se propageant vers le point de chargement, accompagnées de décohésion ou de rupture des composites PRF.

Les poutres renforcées par le tissu de jute JFRP ont subi des fractures sans décohésion, quelle que soit leur position, dans les faces inférieures ou dans les côtés. Le même mode de rupture a été observé pour le cas des poutres renforcées par le composite GFRP, quelle que soit leur position, une décohésion de renfort en fibre de verre sans fracture. Pour les renforcements hybrides : le tissu de jute JFRP quel que soit son emplacement par rapport au tissu de verre GFRP a subi une fracture sans décohésion par contre le

tissu de verre GFRP a subi une fracture dans la face inférieure et une décohésion dans les côtés.

Tableau IV.1. Modes de rupture des poutres testées

Code	Poutre	Mode de rupture
PT		<ul style="list-style-type: none"> -Écrasement du béton -Fissures de cisaillement -Propagation des fissures
JI		<ul style="list-style-type: none"> -Fissures de cisaillement -Propagation des fissures -Rupture de renfort JFRP
VI		<ul style="list-style-type: none"> -Fissures de cisaillement -Propagation des fissures -Décohésion de renfort GFRP
JJJD		<ul style="list-style-type: none"> -Fissures de flexion -Propagation de la fissure de cisaillement -Fracture de renfort JFRP
VIVD		<ul style="list-style-type: none"> -Fissures de cisaillement -Propagation des fissures et rupture de la poutre -Décohésion de renfort GFRP
JIVD		<ul style="list-style-type: none"> -Ecrasement du béton -Rupture par cisaillement et flexion -Rupture de renfort JFRP -Décohésion de renfort GFRP
VIJD		<ul style="list-style-type: none"> -Rupture par cisaillement -Fracture des renforts JFRP et GFRP -Fissure de flexion

IV.2.2. Courbes force-déplacement

Les résultats de la résistance à la rupture obtenus pour les différentes variantes des poutres testées sont illustrés dans les figures IV.1, IV.2, IV.3 IV.4, IV.5 et sur le tableau IV.2.

Les différentes variantes des poutres testées on était réparties en plusieurs familles selon le type de renforcement et l'emplacement d'un renfort par rapport à l'autre (fibre de verre et jute), cette répartition est comme suit :

- Poutre témoin (PT), poutres renforcées dans la partie inferieure par la fibre de jute (JI), et poutre renforcées dans la partie inférieure et diagonale par la jute (JIJD)

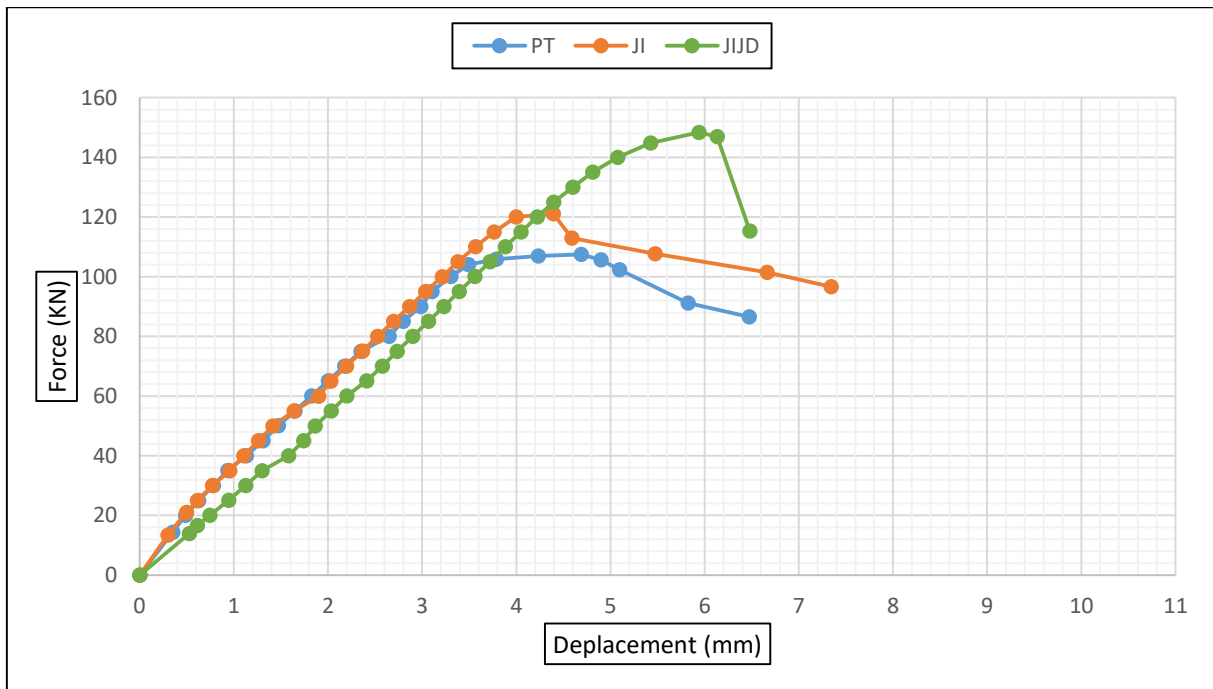


Figure IV.1. Courbes force-déplacement pour la 1^{ère} famille

Selon les résultats présentés dans la figure IV.1, il est évident que la première partie de la courbe est linéaire, ce qui représente la rigidité des poutres. En comparant les poutres renforcées avec la poutre témoin, il est clairement visible que la pente est plus prononcée dans le cas des poutres renforcées. Les valeurs enregistrées sont de 121,7 KN et 148,3 KN respectivement pour les poutres (JI) et (JIJD), tandis que la poutre témoin (PT) présente une valeur de 107,5 KN.

- Poutre témoin (PT), poutre renforcée dans la partie inférieure par la fibre de verre (VI) et dans la partie inférieure et latérale par le même renfort (VIVD).

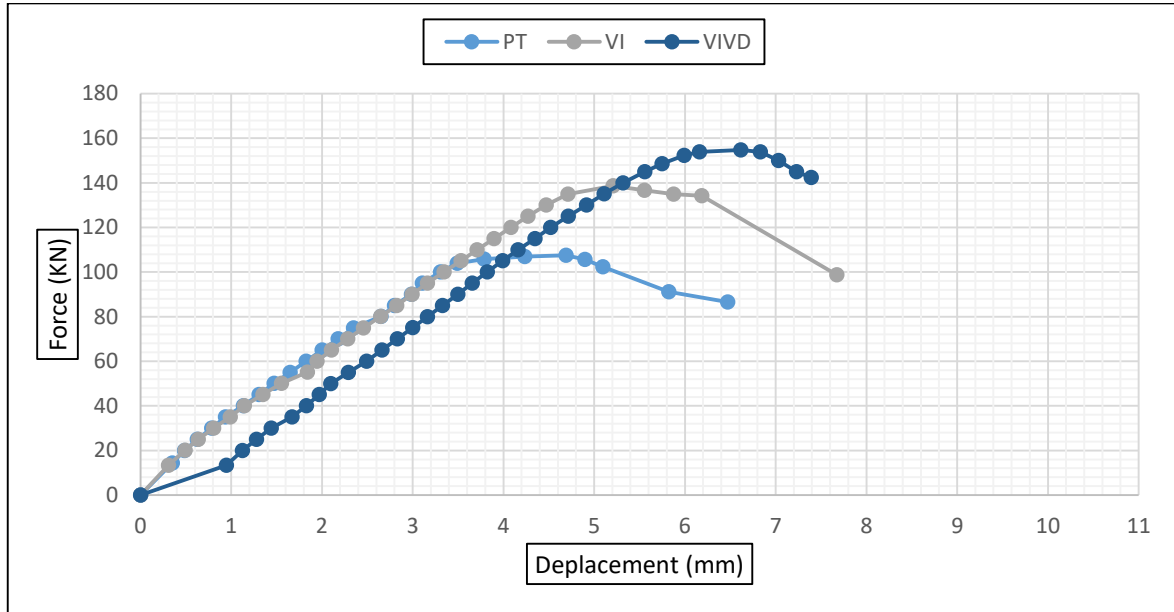


Figure IV.2. Courbes force-déplacement pour la 2^{ème} famille

Les courbes de la figure IV.2 nous montrent une stabilité croissante de la rigidité des poutres testées jusqu'à la rupture, les poutres (VI) et (VIVD) ont enregistré des valeurs de 138,6 kN et 154,7 kN respectivement, une augmentation considérable de la charge à la rupture a été enregistrée par rapport à la poutre de référence.

- Poutre témoin (PT), poutre renforcée dans la partie inférieure et latérale par le verre (VIVD) et jute dans la partie inférieure et latérale (JIJD).

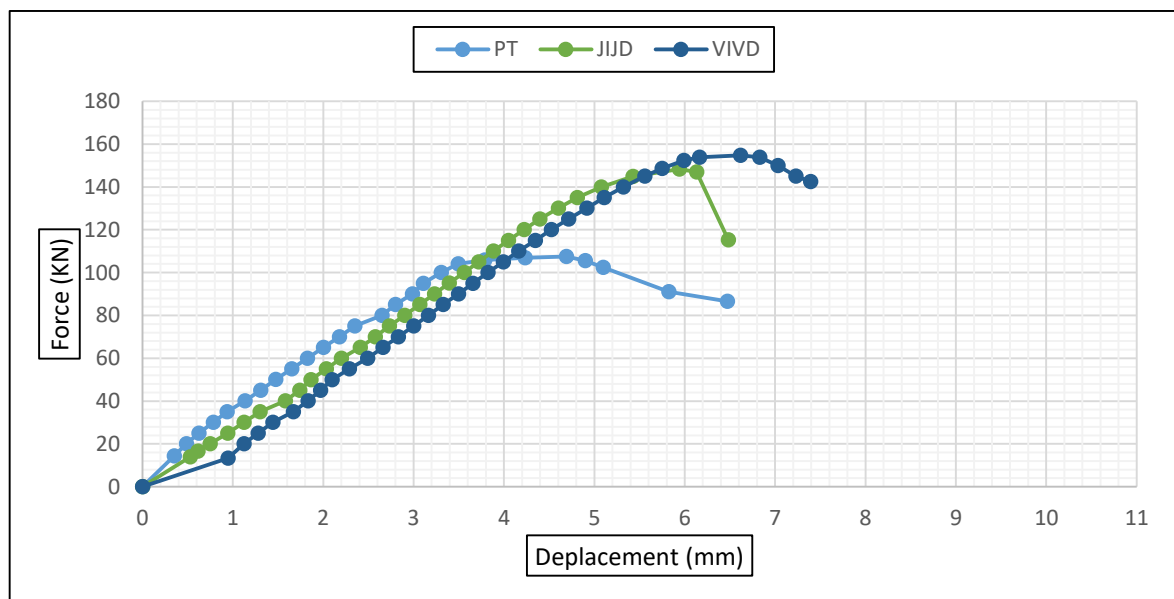


Figure IV.3. Courbes force-déplacement pour la 3^{ème} famille

Suite aux résultats obtenus lors de l'écrasement, les poutres (JIJD) et (VIJD) ont enregistré des valeurs de 148,3 KN et 154,7 KN respectivement, en comparant les courbes des poutres renforcées avec celle de la poutre témoin, la supériorité des poutres renforcées est clairement observée en termes de résistance à la rupture.

- Poutre témoin (PT), poutre renforcée dans la partie inférieure par le verre et la jute dans les côtés latéraux (VIJD), jute dans la partie inférieure et verre sur les côtés (JIVD)

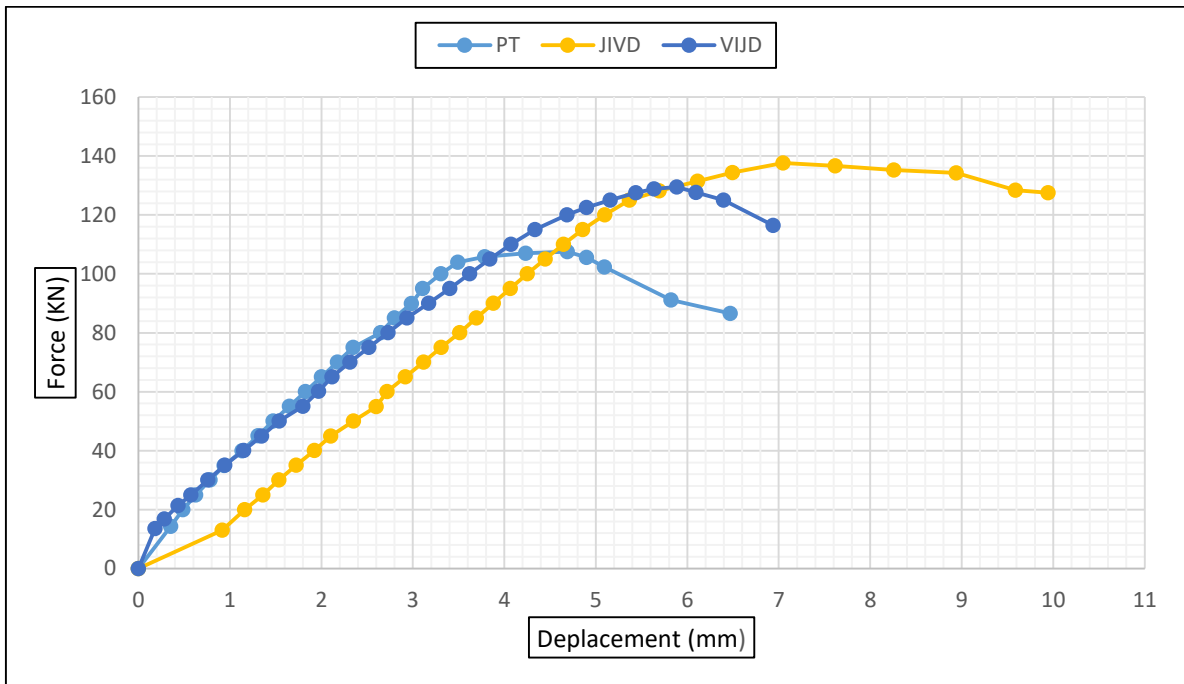


Figure IV.4. Courbes force-déplacement pour la 4^{ème} famille

La figure IV.4 nous montre l'efficacité de renforcement hybride, nous avons enregistré des valeurs de 137,6 KN et 129,6 KN qui correspondent aux poutres (JIVD) et (VIJD) et 107,5 KN pour la poutre témoin (PT).

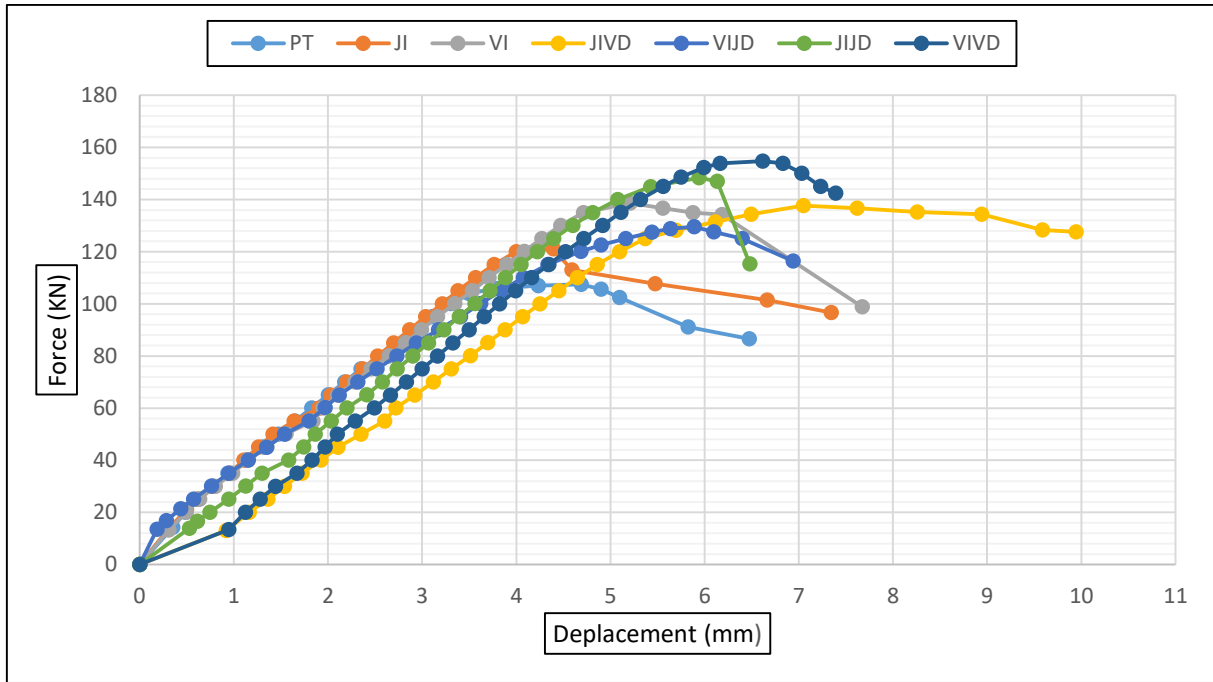


Figure IV.5. Courbes force-déplacement pour toutes les variantes testées

Selon les courbes des figures IV.1, IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5, les poutres renforcées présentent un comportement similaire à celui des poutres non renforcées lorsqu'elles sont soumises à un essai de flexion. Les trois phases typiques du comportement caractéristique sont :

- La première phase concerne le domaine élastique de la poutre, où aucune fissure n'est présente.
- La deuxième phase se situe dans le domaine élasto-plastique, où la poutre présente des fissures limitées en raison de la plastification des armatures tendues.
- Enfin, la troisième phase correspond au domaine plastique, caractérisé par la plastification complète des armatures tendues.

IV.3. Exploitation des résultats obtenus

Les améliorations de résistance, de déplacement et de ductilité des poutres renforcées par l'ajout de fibre de verre et de jute ont été évaluées en se référant aux courbes de force-déplacement correspondantes. Cette évaluation a permis de déterminer les gains obtenus par rapport à la poutre de référence.

IV.3.1. Evaluation des gains des forces et de déplacements

Les résultats des essais expérimentaux des forces et des déplacements verticaux, ainsi que les gains correspondants à mi-travée des différentes poutres testées, sont illustrés dans le tableau IV.2 et les figures IV.6 à IV.15.

Tableau IV.2. Valeurs des forces et déplacement, gains des forces et déplacements à mi-travée des poutres testées

Poutres	f_u (KN)	f_{us} (KN)	δ_u (mm)	δ_{us} (mm)	$\frac{f_{us} - f_u}{f_u}$ (%)	$\frac{\delta_{us} - \delta_u}{\delta_u}$ (%)
PT	107,5	/	4,68	/	/	/
JI	/	121,7	/	4,4	+13	-6
VI	/	138,6	/	5,2	+29	+11
JJD	/	148,3	/	6,92	+38	+47
VIVD	/	154,7	/	6,61	+44	+41
JIVD	/	137,6	/	7,04	+28	+50
VIJD	/	129,6	/	5,88	+21	+25

f_u : Force de rupture de la poutre témoin,

f_{us} : Forces de ruptures des différentes poutres renforcées,

δ_u : Déplacement verticale à mi-portée de la poutre témoin,

δ_{us} : Déplacement verticale à mi-portée des différentes poutres testées.

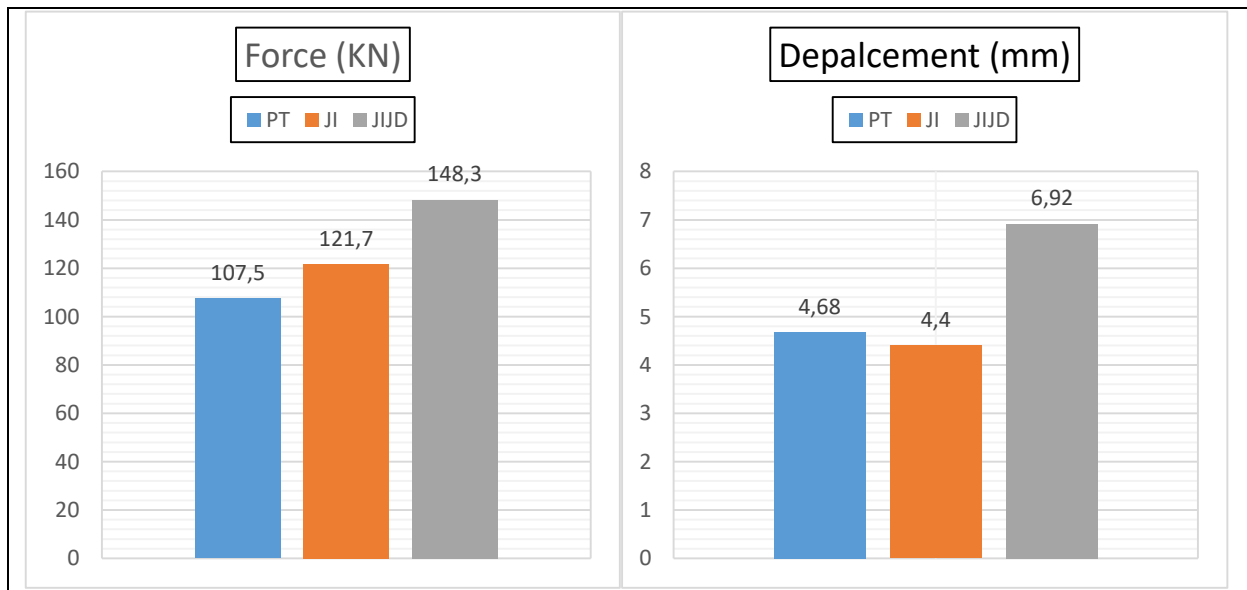


Figure IV.6. Confrontation des valeurs des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 1^{ère} famille en comparaison avec la poutre témoin

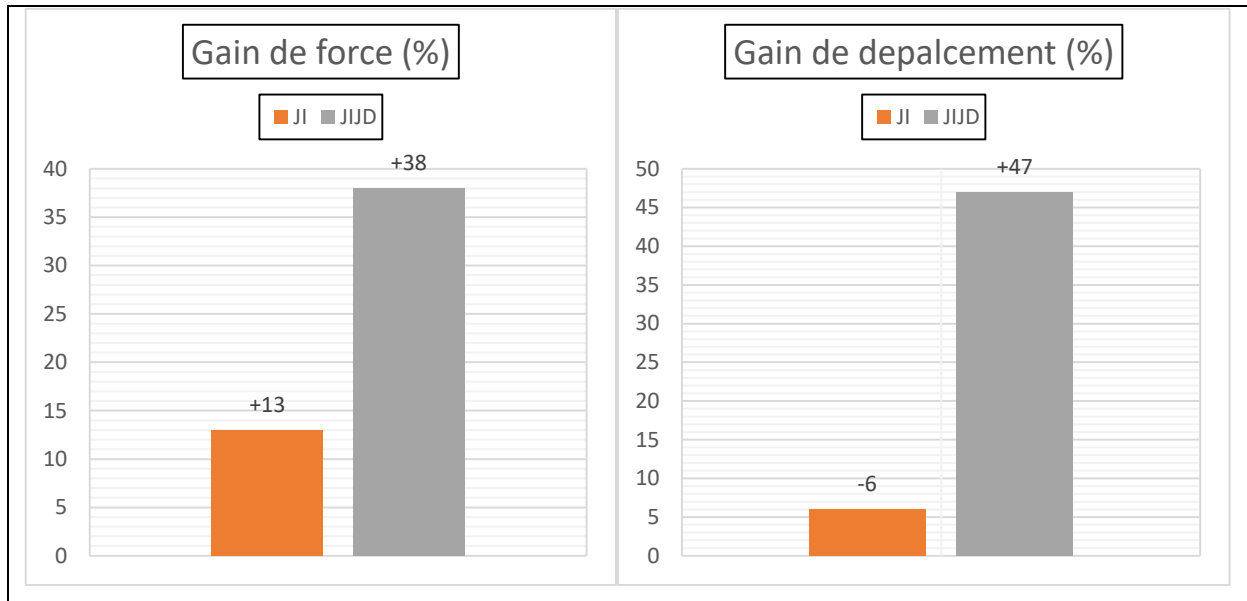


Figure IV.7. Gains des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 1^{ère} famille en comparaison avec la poutre témoin

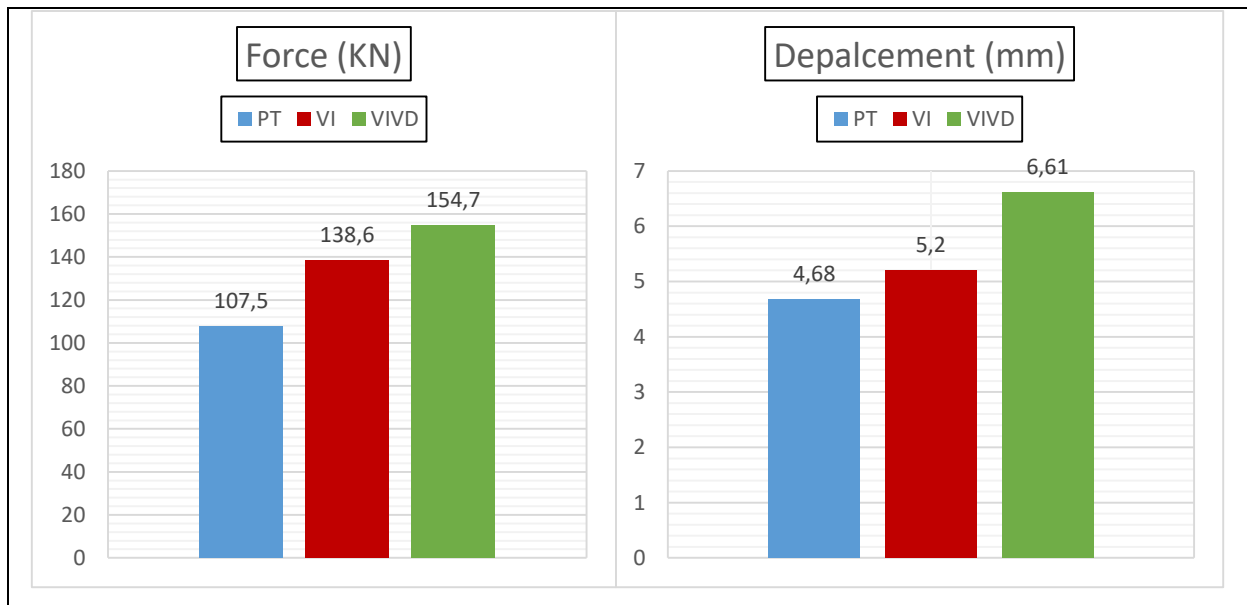


Figure IV.8. Confrontation des valeurs des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 2^{ème} famille en comparaison avec la poutre témoin

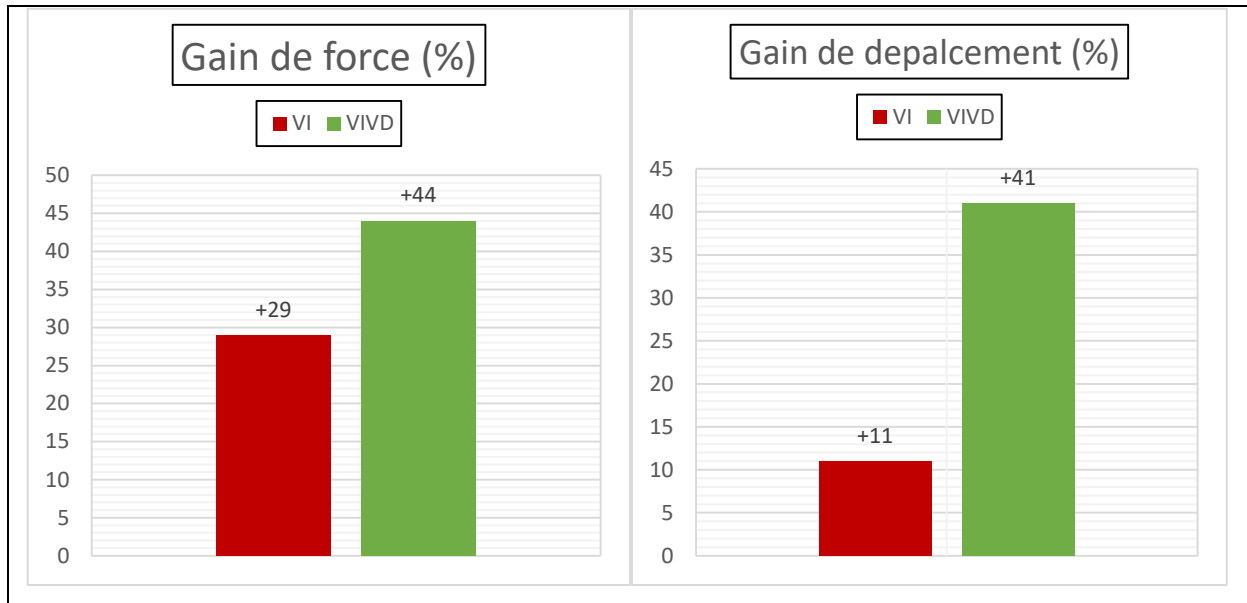


Figure IV.9. Gains des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 2^{ème} famille en comparaison avec la poutre témoin

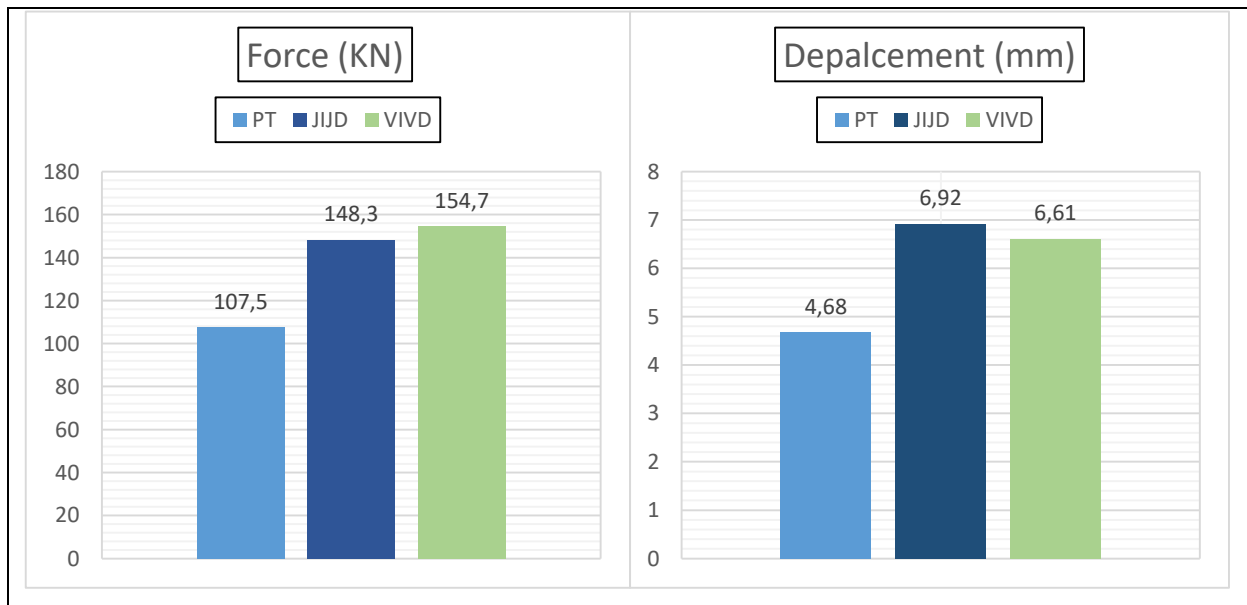


Figure IV.10. Confrontation des valeurs des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 3^{ème} famille en comparaison avec la poutre témoin

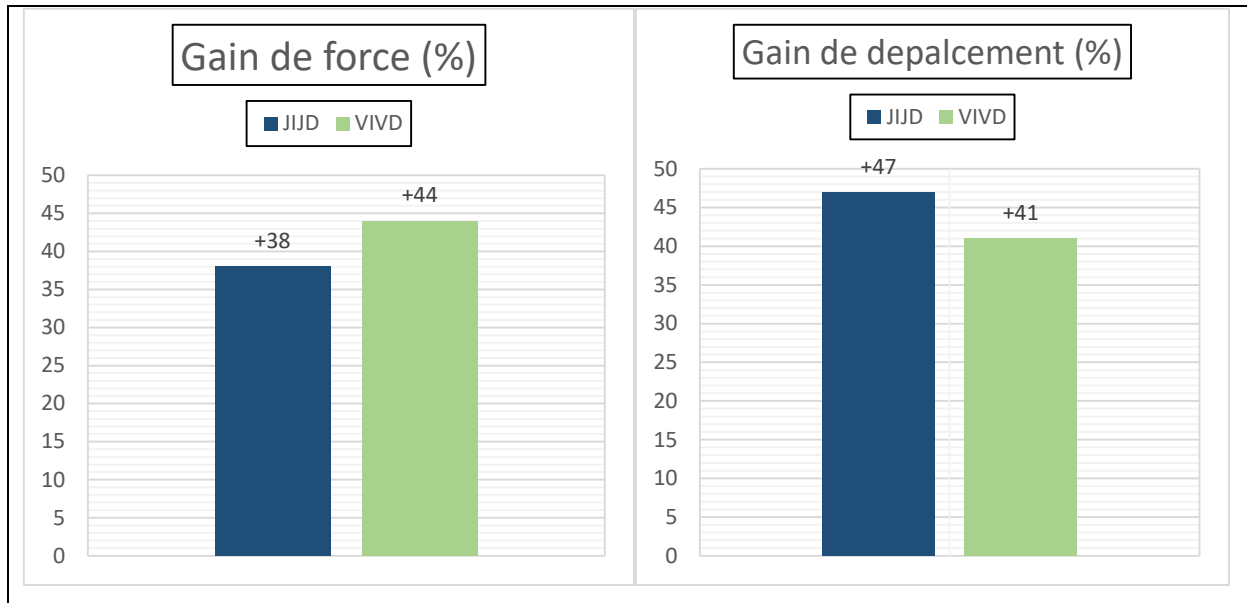


Figure IV.11. Gains des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 3^{ème} famille en comparaison avec la poutre témoin

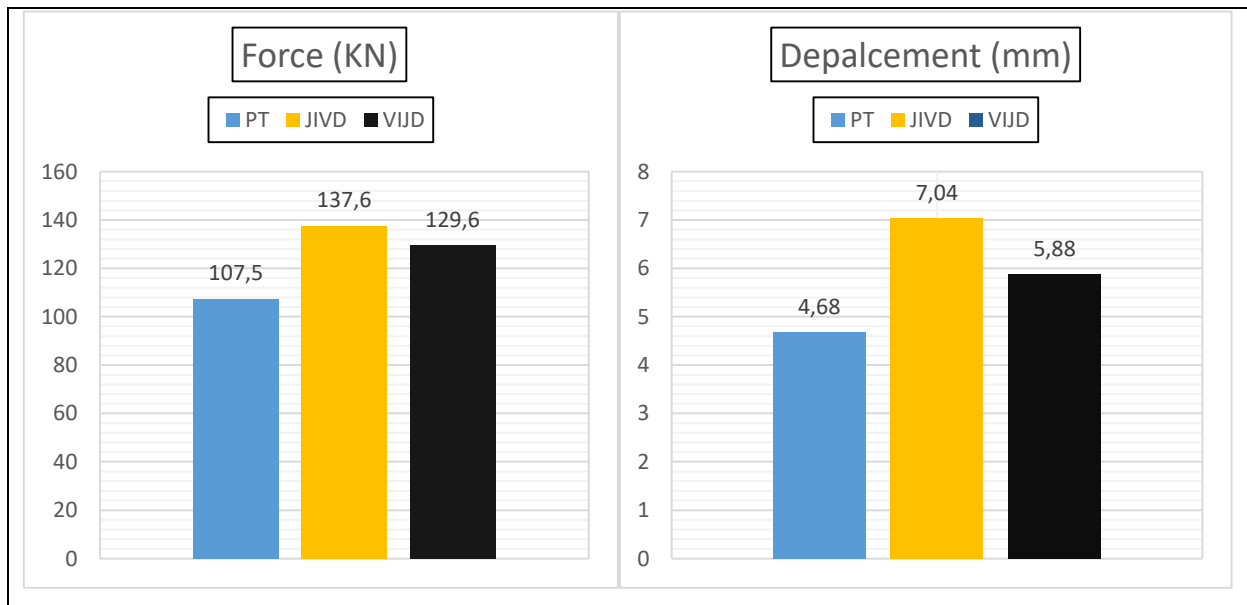


Figure IV.12. Confrontation des valeurs des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 4^{ème} famille en comparaison avec la poutre témoin

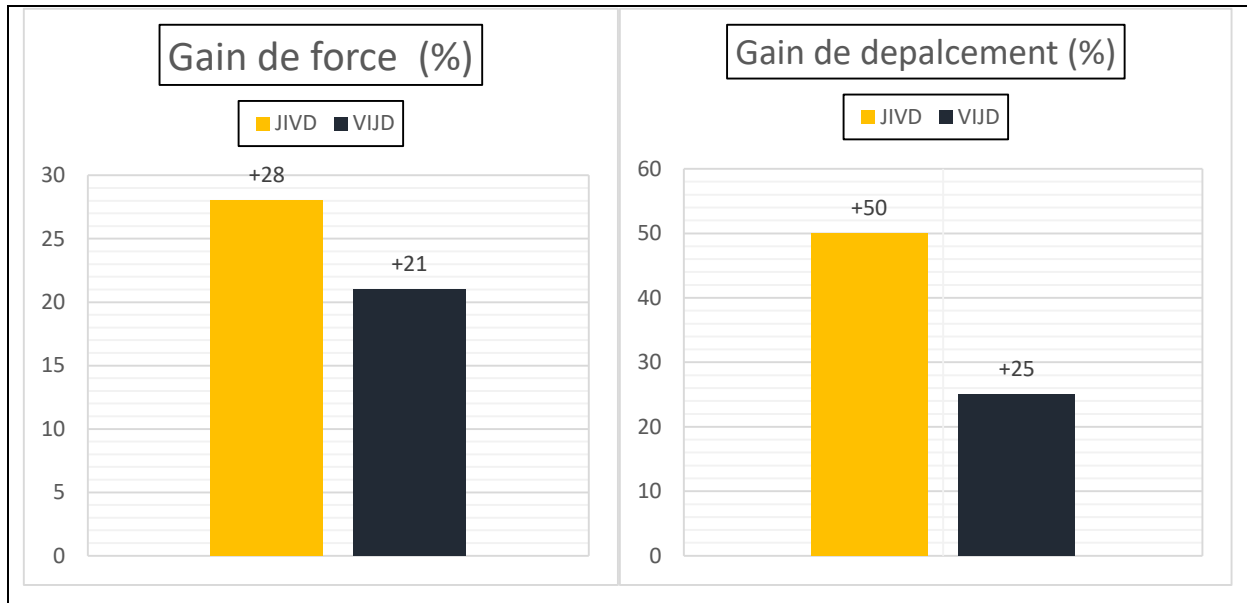


Figure IV.13. Gains des forces et de déplacements des poutres renforcées de la 4^{ème} famille en comparaison avec la poutre témoin

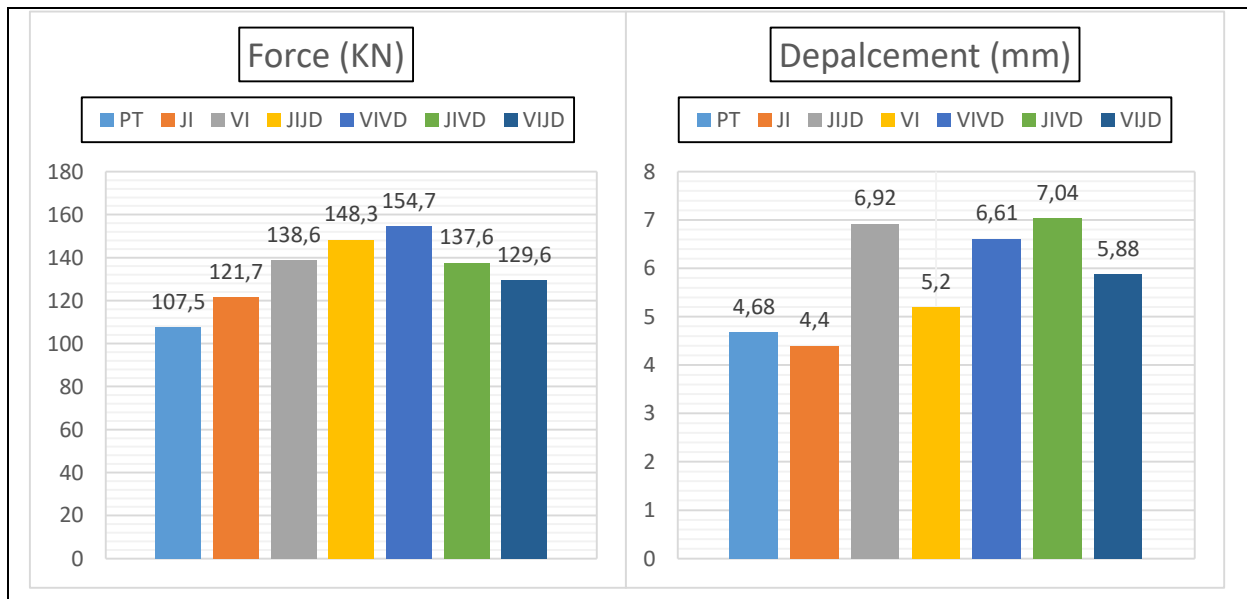


Figure IV.14. Confrontation des valeurs des forces et de déplacements de toutes les variantes testées

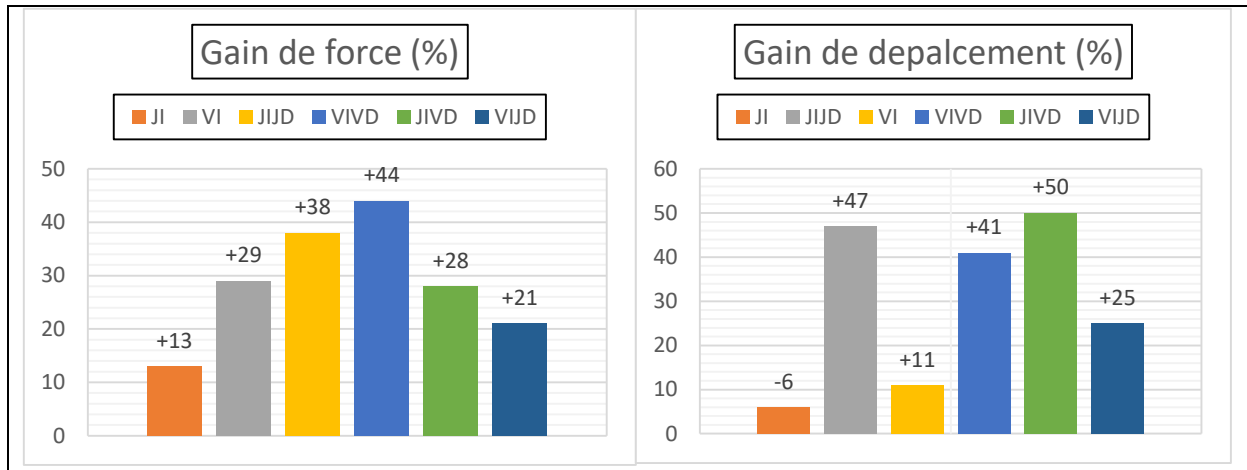


Figure IV.15. Gains des forces et de déplacements de toutes les variantes testées

IV.3.2. Evaluation des gains de ductilité

Afin de mesurer la ductilité de manière précise, il est possible d'utiliser l'indice de déformation, qui exprime le rapport entre l'énergie requise pour la rupture et l'énergie nécessaire pour atteindre la limite élastique :

$$\mu E = E_u / E_\gamma \tag{IV.1}$$

Ou :

E_u : Énergie totale équivalant de l'ensemble (poutre + acier + PRF).

E_γ : Énergie élastique (poutre + acier + PRF).

Les résultats présentés dans la Figure IV.11, IV.12 et le Tableau IV.3 fournissent les mesures de l'indice de ductilité pour les diverses poutres soumises aux tests, ainsi que les améliorations en termes de ductilité observées pour les poutres renforcées par rapport à la poutre de référence.

Tableau IV.3. Valeurs de l'indice de ductilité des poutres testées

Poutres	μ_e	μ_{es}	$\frac{\mu_{es} - \mu_e}{\mu_e} (\%)$
PT	2,76	/	/
JI	/	4,47	+62
VI	/	4,94	+78
JIID	/	4,98	+80
VIVD	/	5,13	+86
JIVD	/	4,73	+71
VIJD	/	4,53	+64

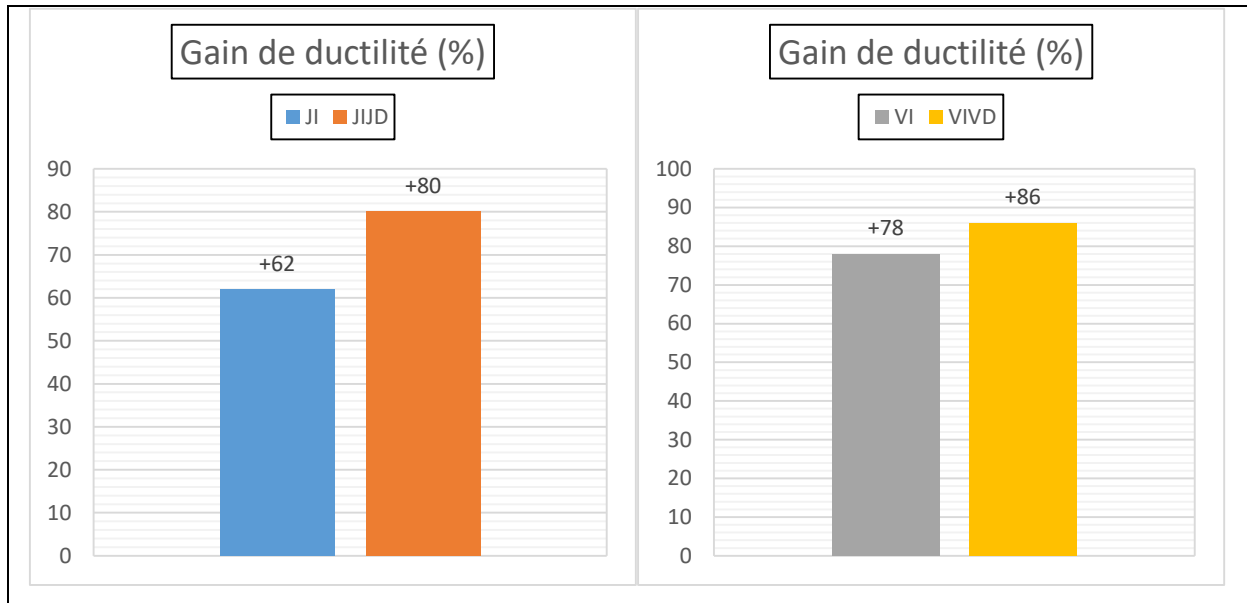


Figure IV.16. Gains de ductilité des poutres renforcées : famille 1 et 2

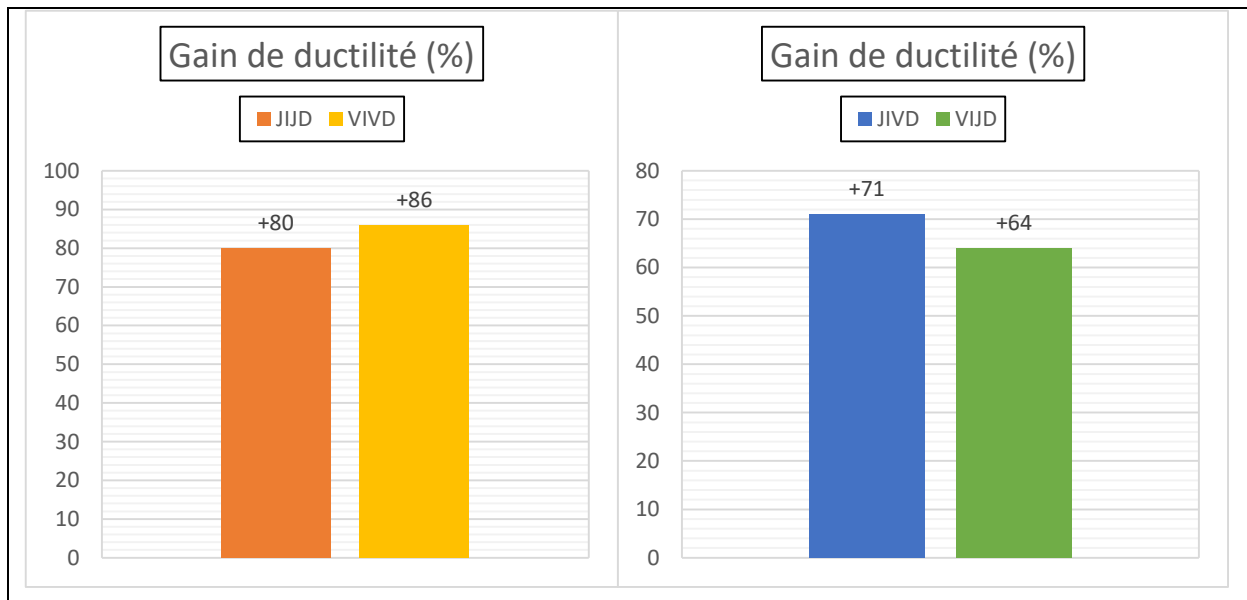


Figure IV.17. Gains de ductilité des poutres renforcées : famille 3 et 4

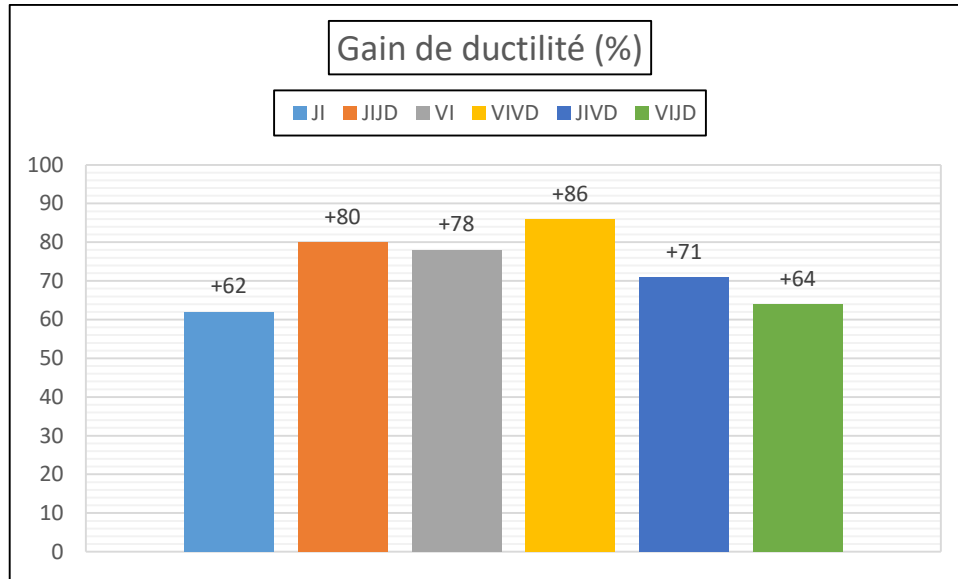


Figure IV.18. Gains de ductilité de toutes les poutres renforcées

En se basant sur les résultats obtenus dans ce chapitre concernant la résistance et la ductilité, ainsi que les valeurs présentées dans les tableaux IV.2 et IV.3, il est possible de conclure que la méthode de renforcement proposée a conduit à une amélioration significative de la résistance, de la ductilité et du déplacement vertical à mi-travée (flèche) pour toutes les poutres renforcées (à base de fibre de verre et de fibre de jute) par rapport à la poutre de référence. Cette amélioration peut être attribuée aux excellentes propriétés mécaniques des renforts, notamment leur résistance à la traction et leur module de Young élevés.

Le renforcement non-hybride en fibre de verre (partie inférieure et latérale) nous a donné les meilleurs résultats en termes de force et de ductilité.

Les poutres renforcées présentent des améliorations significatives en termes de charge ultime, de déplacement à mi-travée et de ductilité par rapport à la poutre de référence. Ces améliorations varient entre 13% et 44%, entre 11% et 50%, et entre 62% et 86% respectivement, en fonction du type de renfort et de la configuration utilisée. Toutefois, il convient de noter qu'une diminution de 6% du déplacement à mi-portée par rapport à la poutre de référence a été observée uniquement dans le cas de la poutre renforcée avec du tissu de jute dans sa partie inférieure (JI) (figures III.4 et tableau III.9).

- Les poutres de la 1^{re} famille montrent une amélioration en termes de résistance, déplacement et de ductilité, la poutre renforcée à la partie inférieure (JI) moins que celle qui est renforcée à la face inférieure et latérale (JIID) en terme des trois paramètres étudiés, nous avons enregistré une amélioration de la charge ultime de 13% et 38%

respectivement pour les poutres (JI) et (JIJD) par rapport à la poutre de référence. En terme de déplacement la poutre (JIJD) a enregistré des valeurs supérieures à celle de (JI), une augmentation de 47% pour la poutre renforcée à la partie inférieure et latérale par la jute (JIJD) par rapport à la poutre témoin (PT) et une diminution de 6% de déplacement à mi-travée pour la poutre (JI). La ductilité des poutres renforcées de la 1^{re} famille a subi une amélioration par rapport à la poutre témoin avec un pourcentage de 62% et 80% pour les poutres (JI) (JIJD) respectivement.

- Les poutres de la deuxième famille présentent des améliorations notables en termes de résistance, de déformation à mi-travées et de ductilité. En renforçant la partie inférieure de la poutre (VI), une augmentation de résistance de 29% par rapport à la poutre de référence et de 16% par rapport à la poutre renforcée à la partie inférieure (JI) a été observée. De plus, la capacité de déformation de la poutre (VIVD) est supérieure à celle de (VI), avec une augmentation de 41% et 11% par rapport à la poutre de référence, respectivement.

La poutre VIVD et VI ont enregistré une amélioration de 78% et 86% en termes de ductilité par rapport à la poutre (PT).

La propagation des fissures a été réduite en présence de fibre de verre, ce qui signifie que la poutre (VI) a subi des déformations supérieures à celle de la poutre témoin et la poutre renforcée par la jute (JI) dans la phase plastique.

- Pour les poutres de la 3^{eme} famille, la poutre renforcée dans la partie inférieure et latérale par la fibre de verre (VIVD), la charge ultime et le déplacement à mi-travée ont été améliorées de 44% et 41% respectivement, la ductilité a été aussi améliorée de 86%.

La poutre renforcée dans la partie inférieure et latérale par la fibre de jute (JIJD) a enregistré des améliorations de 38%, 47% et 80% en terme de force, déplacement et ductilité.

Les poutres renforcées par la fibre de verre (partie inférieure et latérale) nous ont donné les meilleures performances en termes de résistance et de ductilité, ceci dû aux fortes propriétés mécaniques (résistance à la traction et module de Young) de ces fibres.

- Pour le renforcement hybride des poutres de la 4^{eme} famille, la poutre renforcée par la fibre de jute dans la partie tendue et le verre sur les côtés JIVD a enregistré des valeurs supérieures à celle de verre dans la partie inférieure et jute sur les côtes (VIJD), soit une augmentation de 28%, 50% et 71% pour (JIVD) et 21%, 25% et 64% pour (VIJD) en terme de résistance, déplacement et ductilité respectivement.

IV.4. Conclusion

D'après les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Une amélioration significative de la résistance et la ductilité ont été constatées pour toutes les poutres renforcées.
- Les poutres renforcées à la partie inférieure par le tissu de jute JFRP n'ont enregistré aucune amélioration de déplacement à mi-portée par rapport à la poutre de référence.
- En termes de résistance mécanique, les poutres renforcées par des composites GFRP, ont donné les meilleurs résultats avec une amélioration de (44%).
- Les poutres renforcées par PRF hybride « verre + jute » montrent une meilleure déformabilité avec un taux qui égale à 50% par rapport à la poutre de référence, cette valeur a été enregistrée pour la poutre renforcée par le composite de jute à la partie inférieure et le verre dans la partie latérale (JIVD).
- En ce qui concerne la ductilité, on peut conclure que toutes les variantes des poutres renforcées ont montré un taux d'augmentation considérable. Le taux le plus élevé a été observé pour le cas des poutres renforcées par le tissu en fibre de verre (86%).

Depuis ces résultats obtenus, on peut conclure que la poutre typique qui a donné les meilleurs résultats en termes de résistance et de ductilité est la poutre renforcée par des fibres de verre dans la face inférieure et latérale.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

Dans le cadre d'une étude portant sur le renforcement des poutres en béton armé, des recherches expérimentales ont été menées pour examiner le comportement des poutres réparées à l'aide de matériaux composites (FRP) composés de tissu en fibres de verre et de fibres de jute. L'objectif principal de cette étude était de développer un modèle de renforcement typique des poutres afin d'améliorer leur résistance et leur capacité de déformation. Dans cette optique, un ensemble de quatorze poutres en béton armé a été soumis à des tests de flexion quatre-points en utilisant une charge statique.

Les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude sont les suivantes, en se basant sur les résultats obtenus :

- Le mode de rupture des poutres de référence et les poutres renforcées est le même ; rupture par cisaillement dû à l'effort tranchant, qui sont caractérisés par des fissures diagonales de point d'appui vers le point d'application de la charge.
- La résistance des poutres renforcées est significativement augmentée par rapport aux poutres non renforcées, avec des améliorations allant de 13% à 44%, en fonction du type et l'emplacement du renforcement. Cette augmentation de performance est attribuable aux propriétés mécaniques supérieures du renfort, notamment sa résistance à la traction et son module de Young.
- Les poutres renforcées avec un renfort en fibre de verre (partie inférieure et latérale) présentent un gain substantiel en termes de charge de rupture avec un gain de 44%.
- Une amélioration de déplacement à mi-travée des poutres renforcées par rapport à la poutre témoin qui varie de -6% à 50%, les poutres renforcées par le tissu de jute à la partie inférieure n'ont enregistré aucune amélioration de déplacement. Le renfort hybride en fibre de jute dans la face inférieure et le tissu de verre dans les côtés latéraux à montrer une meilleure résistance à la fissuration et une meilleure capacité de déformation par rapport aux autres poutres.
- L'amélioration de la ductilité des poutres renforcées à la face inférieure et sur les deux extrémités transversales par rapport aux poutres renforcées seulement à la face inférieure est presque identique, il varie entre 62% et 86%. Les poutres renforcées par le composite de verre présentent le gain de ductilité le plus élevé.

- Le système de renforcement des poutres typiques qui fournit à la fois les deux propriétés mécaniques résistance et ductilité, est les poutres renforcées par des composites de verre dans la face inférieure et latérale, l'amélioration de la charge de rupture et la ductilité sont de l'ordre de 44% et 86% respectivement.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **M. Boukhezar**, “réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites ”, thèse de magister université de Constantine, juillet 2009.
- [2] **Techniques de l'ingénieur**. Available: site internet: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-techniques-du-batiment-l-enveloppe-du-batiment-tiaebt2/>,» [En ligne].
- [3] **Tout sur le béton**. Available: Site internet: <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/la-resistance-du-beton-une-propriete-essentielle/>,» [En ligne].
- [4] **KHELOUL.F**, thèse de doctorat en génie civil, “modélisation du comportement à la fatigue d’éléments de construction en béton de fibres”, Université de Tizi ousou, Année 2012.
- [5] **Si SALEM**, “Développement d’une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation ”, thèse de doctorat l’Université de tizi Ouzou, 2016.
- [6] **B.Fourrée**, “ Béton de fibres, synthèse des études et recherches réalisées au C.E.B.T.P ”. Annales du C.E.B.T.P, pp04-58,, Décembre 1991.
- [7] **G.Dreux, J. Fiesta** “ Nouveau guide du béton et de ses constituants ” Huitième édition Eyrolles, Paris, 1998.
- [8] **MACGREGOR.J.G**, « Reinforced concrete: Mechanics and design » 3rd Edition, 393 p, 1997.
- [9] **MEHTA, KUMAR.P** « Concrete structure, properties », Ed Printicee-Hall. International Series in civil engineering and engineering mechanics, New-Jesey, 1986.
- [10] **Djeddi.F**, “Comportement en flexion des poutres de béton renforcées par matériaux composites hybrides”, thèse de doctorat université de Béchar, 2016.
- [11] **PALERMO.D., et VECCHIO, F.J** ««Compression Field Modelling of Reinforced Concrete Subjected to Reversed Loading»: Verification,,» *ACI Structural Journal*, Vols. %1 sur %2 Vol. 101, No. 2, pp. pp. 155-164, 2003.
- [12] **GORRISE. F**, « Essais et contrôle des bétons », Edition EYRILLES, 1978.
- [13] **Bousselham.A**, « comportement des poutres en béton armé Renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés », thèse de doctorat à l’école de technologie supérieur de MONTEREAL 2005..
- [14] **Mailvaganam, N.P**, Repair and Protection of Concrete Structures, CRC Press, 473p., 1991.

Références bibliographiques

- [15] **Peter H. Emmons**, Concrete Repairer and maintenance illustrated, R.S. MEANS COMPANY, ING., Construction Published & Consultations, Copyright 1994, 100 Construction Plaza, P.B. Box 800, Kingston, MA 02364-0800..
- [16] **Jean-Pierre Olivier et Angélique Vichot**, La durabilité des bétons, Association Technique de l'Industrie des Liant Hydrauliques, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 868, Paris, 2008.
- [17] «Cours de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada).» [En ligne]. Available: Site Internet : [www.civil.usherbrooke.ca/cours/ gci714/338](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/338) page.
- [18] **Pigeon M., Marchland J., Pleau R.**, Frost resistant concrete, Cons. Build. Mater, vol. Vol. 10, p. pp. 339 –348, 1996.
- [19] **Pigeon M., Marchand J., Zuber B.**, Freeze/thaw resistance, Editors Advanced Concrete Technology: Concrete Properties, vol. Vol. 11, p. pp. 1–16, 2003.
- [20] Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. Cem. Concr. Compos. 22, 59–79..
- [21] **Merdas, Abdelghani** ; Contribution à l'étude de l'adhérence renfort-béton et du comportement des poutres en BA renforcées par PRFC utilisant la technique NSM (Near Surface Mounted. Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2012.
- [22] **Benzaid, R., Mesbah, H.A., Chikh N-E.** Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton, Editions Universitaires Européennes, 2010.
- [23] **Gagnon, F., Jolin, M., Beaupré, D.** Enrobage de l'armature dans le béton projeté : évaluation et effets. Université Laval., 2004.
- [24] **Priestley, M.N., Seible, F., Calvi, G.M.** Seismic design and retrofit of bridges. John Wiley & Sons., 1996.
- [25] **Priestley, M.N., Seible, F., Xiao, Y., Verma, R.** Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-part 1: Theoretical considerations and test design. Struct. J. 91, 394–405., 1994.
- [26] **David, E.** Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composites- Etude expérimentale et modélisation., 1999.
- [27] **Luyckx, J.** Composites à fibres de carbone dans le génie civil. Ed. Techniques Ingénieur., 1999.
- [28] **Meier, U. Deuring, M.Meier, H. and Schwegler, G.** «CFRP bonded sheets, Fibre-Reinforced-Plastic (FRP), Reinforced for concrete Structures: properties and Applications,» vol. Vol.105, pp. Pages (10218-1037), 1993.

Références bibliographiques

- [29] **Redjeb, A** Simulation numérique de l'orientation de fibres en injection de thermoplastique renforcé. École Nationale Supérieure des Mines de Paris., 2007.
- [30] **CARMA**, 2006. GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES.
- [31] **Teng 2002_ Teng J.G., Chen,J.F., S.T et Lam,L** « FRP strengthened RC structures », John Wiley & sons, 2002.
- [32] **Bank, L. C.** Composites for construction: structural design with FRP materials. John Wiley & Sons., 2006.
- [33] **Châtain, M.** Matériaux composites : présentation générale. Tech. Ing. Plast. Compos. AM5000– 1, 2001.
- [34] **Wu, Z.Y.**, Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue. Ecole des Ponts ParisTech., 2004.
- [35] **Balaguru 2009., Balaguru, P.,Nanni, A.,Giancaspro, J, Taylor&Francis** «FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures – A guide to fundamentals and design for repair and retrofit » London (London 2009) p.UK-334., 2009.
- [36] **Teng, J.G., Chen, J.-F., Smith, S.T., Lam, L.** FRP: strengthened RC structures. Front. Phys. 266., 2002.
- [37] **Testechnifor**, « Présentation des renforts de dalles et de poteaux en béton armé avec des renforts en matériaux composite », 2013.
- [38] **Banthi.A** « Introduction à l'utilisation des composites PRF en construction » comité éducation d'ISIS. Queens, 2007.
- [39] **Foo, S., Naumoski, N., Saatcioglu, M.**, Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens. Ott. Ont. Can., 2001.
- [40] **De Lorenzis, L., Nanni, A., La Tegola, A.**, Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods, in: International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Proceedings, Advancing with Composites. pp. 9–11., 2000.
- [41] **Sharaky, I.A., Torres, L., Comas, J., Barris, C.**, Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. Compos. Struct. 109, 8–22., 2014.
- [42] **Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E., Pecce, M.**, Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. Compos. Struct. 124, 163– 175., 2015.
- [43] **Aouadi.A**, “ Contribution à l'amélioration du comportement en flexion des poutres en béton armé par l'intégration des grilles composites ”, thèse de doctorat univesité de Boumerdes, 2021.

Références bibliographiques

NF P18-560 “Granulats - Analyse granulométrique par tamisage”

NF EN 12390-5 Juin 2019 “Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes”