

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



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

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Thème

*Caractérisation expérimentale du comportement de
cylindres en béton, confinés avec des composites
à base de fibres végétales.*

Réalisé par : M^{lle} IGUENI Celia.

Soutenue publiquement Devant le jury composé de :

M ^{me} HADDAD-MALEK.O	Maitre de conférences (B)	UMMTO	Présidente
M ^{me} ALI AHMED.C	Maitre de conférences (B)	UMMTO	Encadreur
M ^{me} AKMOUSSLO	Maitre de conférences (B)	UMMTO	Examinatrice

08/07/2017

Remerciements

Je tiens à présenter mes plus vifs remerciements à ma promotrice M^{me} ALI AHMED pour l'aide qu'elle a apportée à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils, ses orientations et ses motivations tout au long de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à M^r SI SALEM. A pour tous ses encouragements et toute l'aide qu'il m'a apportée.

Je tiens à remercier très sincèrement M^r DEHMOUS. H pour ses conseils et sa volonté de m'aider durant ses passages au laboratoire.

Mes sincères remerciements vont aussi aux membres du jury, M^{me} HADDAD-MALEK.O et M^{me} AKMOUSSI.O pour l'intérêt qu'elles ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs remarques.

Je remercie par cette occasion nos enseignants qui nous ont enrichis de connaissances et de savoir ainsi que les ingénieurs du laboratoire de génie civil M^r BOUHERAOUA. R et M^{me} MADJBER, F, pour leur disponibilité et toute l'aide que j'ai eu de leur part.



Dédicace :

Au terme de ce travail je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force, la santé et la patience pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents

Yamina Kareb et Ramdane Igueni

Vous étiez toujours soucieux de notre bien-être et de notre réussite. Vous avez su nous guider dans la vie et nous transmettre l'éducation noble que vous avez reçue de vos parents.

Votre affection et votre encouragement ne m'ont jamais manqués.

Que ce travail soit pour vous une source de fierté et un témoignage de vos sacrifices.

A la mémoire de ma grand-mère Djouher, que dieu te préserve dans son vaste Paradis.

A ma tante Zedjiga et dada Rabah. Vous avez toujours été présents pour les bons conseils, pour m'encourager et m'aider, un grand merci pour vous, que dieu vous accorde santé, longue vie et bonheur.

A mes frères Sofiane et Samir.

A mes sœurs

Ouiza, son mari Ramdane et ses enfants : Alicia, Anais et Ilias.

Djamila, son mari Rachid et ses enfants : Rayane et Hacem.

Samira et son mari Mohamed et ses enfants : Amayas et le petit Yani.

Thinhinane et son mari Yacine

Dalila et son fiancé Ahcen

Lydia

Présents dans tous mes moments par votre soutien, je vous exprime à travers ce travail mes sentiments d'amour et de reconnaissance.

A mon oncle Achour et ses enfants.

A mes cousins et cousines.

A tous mes ami(e)s en particulier ceux de ma promotion (Haddad Abdelhak-Oussad Fetta- GuedriThinhinane- Djafour Tarik).

A tous ceux que j'aime et qui m'aime.

Celia

Résumé :

L'industrie des matériaux composites ne cesse d'évoluer et de croître en mettant en place de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. C'est en substitution des matériaux d'origine fossile que les matériaux d'origine naturelle (et surtout végétales) commencent à voir le jour. C'est dans ce contexte que notre travail de recherche est proposé. Il s'intéresse à l'étude de la possibilité de remplacer les matériaux composites à base de fibres synthétiques (verre) par des matériaux composites écologique à base de fibres végétales (jute) pour le confinement du béton, s'inscrivant ainsi, dans une démarche de développement durable.

Une campagne expérimentale est réalisée sur des éprouvettes de ($\varnothing 150\text{mm} \times 300\text{mm}$) en béton confinées par PRFJ en augmentant le taux de confinement (largeur et nombres de tours), chargées en compression jusqu'à la rupture, pour mettre en exergue les performances mécaniques de telles spécimens comparativement à celles en béton confinées par PRFV.

Les différents résultats issus de l'analyse expérimentale montrent l'efficacité du confinement proposé en termes d'apport positif en résistance, et montrent que pour le confinement du béton, les PRFV peuvent être substitués par des PRFJ à condition d'augmenter la densité de confinement de ce dernier. L'analyse de la variance a également mis en évidence l'effet de la largeur du PRFJ et du nombre de tours de l'hélice qu'il forme autour du cylindre, sur la résistance à la compression.

Les propriétés mécaniques spécifiques et le bilan environnemental avantageux des fibres de jute en font une alternative intéressante aux fibres de verre.

ABSTRACT

The composites industry continues to evolve and grow by developing new materials and new technologies. Replacing fossil materials by materials with natural origin (especially vegetable) seems to be one of the most promising. In this context our research is proposed. It is interested in studying the feasibility of replacing composite materials made from synthetic fibers (glass) by eco-friendly composite materials based on vegetable fibers (jute) for confinement of concrete.

An experimental companion is made on specimens of ($\text{Ø}150\text{mm} \times 300\text{mm}$) concrete confined by JFRP by increasing the confinement rate (width and number of turns), Loaded in compression up to rupture, To highlight the mechanical performance of such specimens compared to those of concrete confined by GFRP.

The results obtained from the experimental analysis show the effectiveness of the confinement proposed in terms of positive intake of resistance, and certify that for concrete confinement, GFRP can be substituted by JFRP with an increase in the containment density of the latter, because the recorded compressive strengths of the JFRP confined concrete test are similar to, and even greater than, that recorded for GFRP confined concrete. Analysis of the variance also revealed the effect of the width of the PRFJ and the number of turns of the helix it forms around the cylinder, on the compressive strength.

The specific mechanical properties and the advantageous environmental balance of the jute fibers make it an attractive alternative to glass fibers.

Sommaire :

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Synthèse bibliographique	
Introduction	4
I-1-Dégradation des ouvrages en BA	4
I-1-1-Dégradation d'origine chimique	4
I-1-1-1-Carbonatation	4
I-1-1-2-Attaques des chlorures	4
I-1-1-3-Attaques des sulfates	5
I-1-2-Dégradations d'origine mécanique	5
I-1-2-1-Tassement différentiel	5
I-1-2-2-Défauts de conception	6
I-1-3-Dégradations d'origine physique	6
I-1-3-1-Séisme	6
I-1-3-2-Gel dégel	6
I-1-3-3-Le retrait	7
I-2-Méthodes de renforcement	7
I-2-1-Adjonction d'armatures complémentaires (chemisage)	7
I-2-2-Béton projeté	7
I-2-3-Précontrainte additionnelle	8
I-2-4-Tôles d'acier collées	9
I-2-5-Confinement du béton avec les composites	9
I-3-Revue des travaux antérieurs sur le confinement du béton	10
I-4-Renforcement des éléments structuraux avec les matériaux composites	16
I-4-1-Renforcement des poteaux	16
I-4-2-Renforcement des poutres	16
I-4-3-Renforcement des dalles	17

I-5-Confinement du béton avec les composites à base de fibres végétales.....	17
I-6- Conclusion	18
CHAPITRE II Les matériaux composites et PRF	
Introduction.....	19
II-1- Les matériaux composites	19
II-2-Constituants des matériaux composites	20
II-2-1- La matrice.....	20
II-2-1-1-Les résines	20
II-2-1-2- Charges et additifs.....	21
II-2-2- Le renfort.....	24
II-2-2-1-Forme des renforts	25
II-3- Fibres synthétiques	27
II-3-1-Fibres de verre.....	27
II-3-2- Fibres de carbone	30
II-3-3- Les fibres d'aramide	31
II-4- Fibres naturelles.....	32
II-4-1- Fibres végétales	32
II-4-1-1- Le Lin.....	34
II-4-1-2- Le Sisal.....	34
II-4-1-3- Le chanvre.....	34
II-4-1-4- Le Jute de la plante jusqu'à la fibre	35
II-5-Mise en œuvre des composites.....	40
II-5-1-Moulage au contact	40
II-5-2-Moulage par projection	40
II-5-3-Moulage par compression	41
II-5-4-Moulage sous vide	41
II-5-6-Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding).....	42
II-6-Polymère renforcé de fibres (PRF).....	42
II-6-1-Définition D'un PRF	43

II-6-2-Avantages et inconvénients des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment et les travaux publics	43
II-6-3-Comportement du béton, confiné par PRF, à la compression	43
II-7-Conclusion.....	46
CHAPITRE III: Compagne expérimentale	
Introduction.....	49
III-1-Caractérisation des matériaux utilisés.....	49
III-1-1- Constituants du Béton	49
III-1-2- Caractérisations et constituants du renfort	51
III-1-2-1- Tissu en fibres de verre	51
III-1-2-2- Tissu en fibres de jute	51
III-1-2-3- La résine.....	53
III-2- Confection de béton et préparation des éprouvettes	55
III-2-1- Moules cylindriques.....	55
III-2-2- Coulage du béton	55
III-2-3 Démoulage et murissement des éprouvettes	56
III-2-4-Procédés de mise en œuvre du renfort.....	57
III-2-4-1-Traitement des surfaces.....	57
III-2-4-2-Collage des tissus sur les éprouvettes.....	58
III- 3- Caractérisation expérimentale du comportement mécanique.....	60
III-3-1- Essai de résistance à la compression	60
III-3-2- Essai par ultrason	61
III-3-3- Essai de traction sur le PRFV et PRFJ.....	62
III-4-Conclusion	63
CHAPITRE IV: Résultats et discussions	
Introduction.....	64
IV-1-Chargement et acquisition des données	64
IV-1-1-Essai de compression	64
IV-1-1-1-Résultats de l'essai	65

IV-1-1-2- Comparaison de l'effet du confinement par PRFV et PRFJ	66
IV-1-1-3-Influence du nombre de tours de confinement par PRFJ sur la résistance à la compression du cylindre en béton	67
IV-1-1-4- Influence de la largeur de la bande de confinement par PRFJ sur la résistance à la compression du cylindre en béton	68
IV-1-1-5- Synthèse de l'effet de la largeur de la bande et du nombre de tours sur la résistance du béton	69
IV-1-1-6-Comportement des cylindres confinés.....	70
IV-2- Traitement statistique des résultats expérimentaux.....	71
IV-2-1- Analyse de la Variance (ANOVA).....	71
IV-3-Mode de rupture	72
IV-4-Conclusion	73
Conclusion générale et perspectives	75
Références bibliographiques	78

Liste des figures :

Figure I-1 : Structures atteintes par la carbonatation.....	4
Figure I-2 : Agression du béton par activité des chlorures.....	5
Figure I-3 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.....	5
Figure I-4 : Tassement différentiel.....	5
Figure I-5 : Désordres dus au séisme.	6
Figure I-6 : Exemple de dommages causés par le gel-dégel	6
Figure I-7 : Chemisage en béton armé	7
Figure I-8 : Béton projeté	8
Figure I-9 : Précontrainte additionnelle.....	8
Figure I-10 : Plaques d'acier collées	9
Figure I-11 : Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites.....	16
Figure I-12 : Poutres en BA renforcées par matériaux composites	16
Figure II-1 : Schéma illustratif d'un matériau composite.	19
Figure II-2 : Différents types de matrice.....	20
Figure II-3 : Principaux matériaux de renfort.....	24
Figure II-4 : Eléments composants la forme linéique.	25
Figure II-5 : Chaîne et trame d'un tissu.....	26
Figure II-6 : Eléments composants la forme surfaciques.....	26
Figure II-7 : Les mats à fils coupés et à fils continus.....	27
Figure II-8 : Structures multidirectionnelles	27
Figure II-9 : Elaboration de la fibre de verre.....	28
Figure II-10 : Différents types de fibres naturelles.	32
Figure II-11 : Lin et fibre de lin.	34
Figure II-12 : Sisal et fibres de sisal.....	34
Figure II-13 : Chanvre et fibres de chanvre.	35
Figure II-14 : Jute et fibres de jute.	35
Figure II-15 : Etapes d'extraction de la fibre de jute	36
Figure II-16 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c).....	37
Figure II-17 : Tissu de jute.....	37
Figure II-18 : Structure de la fibre de jute.....	38

Figure II-19 : Moulage au contact.....	40
Figure II-20 : Méthode de projection simultanée.....	40
Figure II-21 : Méthode de moulage par compression.	41
Figure II-22 : Méthode du moulage sous vide.	41
Figure II-23 : Principe du moulage par injection de résine.....	42
Figure II-24 : Courbes contrainte-déformation d'un béton confiné et non confiné.	44
Figure II-25 : Courbes contrainte-déformation d'un béton confiné avec des «PRF». ..	45
Figure II-26 : Courbes contrainte-déformation d'un béton confiné avec des «PRF» par aspects de confinement	46
Figure III-1 : Constituants du béton.....	50
Figure III-2 : Tissu en fibres de verre.	51
Figure III-3 : Tissu en fibre de jute	52
Figure III-4 : Composants de l'adhésif (durcisseur et résine).....	54
Figure III-5 : Moules cylindriques (15*30) cm ²	55
Figure III-6 : Malaxeur à axe vertical	56
Figure III-7 : a-Vibration du béton sur la table vibrante, b- Moules remplies de béton	56
Figure III-8 : a- Eprouvettes en béton après démoulage, b- Cure d'hydratation du béton.....	56
Figure III-9 : Essai d'écrasement sur le béton témoin.	57
Figure III-10 : Nettoyage des surfaces des éprouvettes.	57
Figure III-11 : bandes de tissu de fibres de verre et de jute.	58
Figure III-12 : a- Bande de tissu de jute imprégné de résine, b- Collage du tissu sur le cylindre en béton, c- Eprouvette confinée par PRFJ, d- Eprouvette confinée par PRFV.	59
Figure III-13 : Eprouvettes confinées laissées sécher à température ambiante.	59
Figure III-14 : a- Essai d'écrasement sur éprouvette confinée avec PRFJ, b- : essai d'écrasement sur éprouvette confinée avec PRFV, c- presse utilisée pour les essais. ..	60
Figure III-15 : calibrage de l'appareil.	61
Figure III-16 : Utilisation d'un ultrason.....	62
Figure III-17 : Eprouvette de PRFV et PRFJ	62
Figure III-18 : a- Résultats de l'essai de traction sur le PRFV. b- Résultats de l'essai de traction sur le PRFJ.....	63
Figure IV-1 : Le montage extensométrique installé sur l'éprouvette à tester.....	64

Figure IV-2 : Effet du confinement sur la résistance pour CCV33 et CCJ33.....	67
Figure IV-3: Résistance à la compression pour différents nombre de tours de PRFJ en comparaison avec le confinement à 3 tours de PRFV pour la même largeur.....	68
Figure IV-4: Résistance à la compression pour différentes largeurs de PRFJ en comparaison avec le confinement à 3 cm de PRFV pour le même nombre de tours.....	69
Figure IV-5: Effet du confinement sur la résistance du béton.....	70
Figure IV-6: Courbe contrainte-déformation.....	71
Figure IV-7: Mode de rupture des éprouvettes confinées en PRFJ.....	73

Liste des Tableaux :

Tableau I-1 : Comparaison entre composites et acier.	10
Tableau II-2 : Propriétés des fibres de verre	30
Tableau II-3 : Caractéristiques des fibres de carbone	31
Tableau II-4 : Caractéristiques mécaniques des fibres aramides.....	31
Tableau II-5 : Composition chimique de la fibre de jute.	39
Tableau II-6 : Propriétés de la fibre de jute par rapport à d'autres fibres.....	39
Tableau II-7 : Avantages et inconvénients des PRF.	43
Tableau III- 1 : Dosage des Constituants du béton pour le programme expérimental .	50
Tableau III-2 : Propriétés mécaniques des fibres de jute et de verre.	52
Tableau III-3 : Variantes de confinement considérées.	53
Tableau III-4 : Caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.	54
Tableau III-5 : Résultats du test de compression sur le béton.	60
Tableau IV-1 : Résultats des essais de compression	65
Tableau IV-3 : Effet de nombre de tours de confinement sur la résistance à la compression du béton confiné	67
Tableau VI-4 : Effet de la largeur de confinement par PRFJ sur la résistance à la compression du béton.	68
Tableau IV-5 : Table de l'ANOVA pour le facteur nombre de tours.	72
Tableau IV-6 : Table de l'ANOVA pour le facteur largeur de la bande.....	72

Introduction générale

Introduction générale :

Le développement de nouveaux matériaux dépend des besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci recherchent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux". Cependant, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt de nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite.

Au cours de ces dernières années, l'industrie de la transformation des matériaux composites a bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications. Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels: légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes... ce qui explique l'utilisation croissante de ces matériaux dans différents secteurs (Aérospatial -Aéronautique - Défense-Sport-Biomécanique et dans le génie civil).

Afin de prolonger la durée de vie des structures de génie civil et d'assurer la sécurité des usagers, les structures en béton peuvent nécessiter un renforcement au cours de leur durée de service. La majorité des dommages des structures en béton sont causés par des déficiences au niveau de détails de construction des éléments structuraux, bien que les causes qui conduisent à un renfort structurel soient aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes. Citons par exemple : l'accroissement des charges qui sollicitent la structure, la rénovation des structures anciennes, le changement de la forme de la structure, les dégâts dans la structure dus au séisme vu que notre pays sujet de temps à autres à des secousses sismiques dévastatrices, la nécessité d'améliorer les conditions en service, etc.

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices et les ponts, les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. L'une de ces méthodes consiste à améliorer le comportement mécanique des colonnes en béton armé par l'application d'un confinement réalisé par l'enroulement et le collage externe d'une enveloppe en matériaux composites.

Les premières recherches sur l'application de ce nouveau matériau destinées aux ouvrages de génie civil datent de 1980, bien que ce soit plutôt vers 1990 que le matériau est utilisé, d'abord sur une base expérimentale, puis progressivement sur une base commerciale. Le confinement des colonnes en béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone ou d'aramide en utilisant des résines durcissant à température ambiante. Cette technique est largement employée pour son efficacité et sa facilité de mise œuvre. Toutefois l'utilisation à la fois de fibres synthétiques et de matrices polymères produit un impact négatif sur la santé humaine (allergie de la peau, cancer pulmonaire, etc.) et un impact écologique non négligeable.

Les chercheurs se sont alors tournés vers les fibres naturelles comme solution alternative à ces fibres synthétiques, d'autant plus qu'elles présentent des avantages non négligeables, comme leur biodégradabilité, leur faible coût, leur densité peu élevée, leur disponibilité, leur facilité de mise en œuvre, et leur capacité à être recyclées.

L'utilisation de fibres naturelles pour le renforcement extérieur de structures en béton apparaît comme une technique innovante, particulièrement intéressante pour les pays en voie de développement. Des essais sont actuellement menés par différentes équipes avec des fibres de bambou, de lin et de jute pour des utilisations avec des matrices ductiles. Une étude comparative des résultats de renforcement obtenus avec les différentes fibres naturelles pourrait conduire à des modèles applicables à diverses fibres.

Se basant sur une étude de confinement du béton avec des bandes hélicoïdales de polymère renforcé de fibres de verre (Ali Ahmed, 2016), nous nous sommes posés la question de savoir s'il était possible de trouver une variante du même type de confinement mais à base de fibres de jute, qui pourrait remplacer ce confinement avec des fibres synthétiques. Nous avons ainsi, fait varier le nombre de tours de l'hélice et la largeur de la bande du polymère à base de jute pour essayer de trouver la variante qui pourrait remplacer un confinement à base de fibres de verre pour 3 tours d'hélice et une largeur de 3cm. Notre travail s'inscrit ainsi dans une démarche de développement durable. Les propriétés mécaniques spécifiques et le bilan environnemental avantageux des fibres de jute en font une alternative intéressante aux fibres de verre.

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons entrepris une démarche de recherche scindée en quatre chapitres.

▪ **Le premier chapitre**, consacré à la synthèse bibliographique sur le confinement du béton avec les composites et les composites à base de fibres végétales en argumentant par quelques exemples de travaux antérieurs.

▪ **Le second chapitre** présente les généralités sur les matériaux composites et polymère renforcés de fibres (PRF) .Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement du béton confiné par PRF en précisant les matériaux composites utilisés.

▪ **Le troisième chapitre**, qui consiste l'objectif de cette étude, porte sur une investigation expérimentale très riche, où nous avons développé toutes les étapes suivies pour l'élaboration des corps d'épreuves. En deuxième partie nous avons présenté les différents essais mécaniques réalisés au laboratoire.

▪ **Le quatrième chapitre** : Nous avons alors présenté et interprété les résultats obtenus des essais réalisés.

En dernier, nous avons récapitulé nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.

CHAPITRE 1 :

Synthèse bibliographique

Introduction :

Le béton armé est le matériau de base le plus utilisé dans le génie civil depuis plus d'un siècle. Il peut se dégrader et perdre une part de ses propriétés sous l'influence de causes multiples qui peuvent être liées à sa qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. [OUL]

De ce fait les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

I-1-Dégradation des ouvrages en BA :**I-1-1-Dégradation d'origine chimique :****I-1-1-1-Carbonatation :**

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des bétons, qui conduit à la formation du carbonate de calcium par réaction chimique entre l'un des composants de ciment (la portlandite) et le dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂).

Lorsque la profondeur de la carbonatation atteint les armatures, le film de carbonatation disparaît et les armatures sont dépassivées ainsi que leur diamètre diminue ce qui conduit à une diminution de la résistance. Cette carbonatation pourrait aussi conduire à la rouille qui est une matière expansive qui peut causer l'éclatement du béton (**Figure I-1**).



Figure I-1 : Structures atteintes par la carbonatation.

I-1-1-2-Attaques des chlorures :

L'attaque par les chlorures forme avec la carbonatation la cause principale de la corrosion des armatures. Les chlorures se rencontrent principalement dans l'eau de mer et

l'eau de gâchage. Cette corrosion est due à un mécanisme similaire à celui de la carbonatation par pénétration des ions de chlore dans la matrice du béton (**Figure I-2**).



Figure I-2 : Agression du béton par activité des chlorures.

I-1-1-3-Attaques des sulfates :

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (Figure I-3). [SOU]

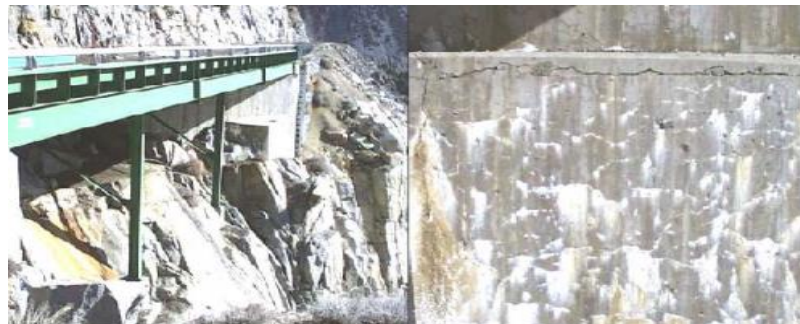


Figure I-3 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [SOU]

I-1-2-Dégradations d'origine mécanique :

I-1-2-1-Tassement différentiel :

Lorsqu'un sol se tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel (**Figure 1-4**).



Figure 1-4 : Tassement différentiel.

I-1-2-2-Défauts de conception

La plupart du temps, ce type d'erreurs résulte d'une insuffisance consécutive à des oublis ou à des impasses au niveau des études, parfois aussi d'un manque de coordination entre le bureau d'études et le chantier.

I-1-3-dégradations d'origine physique :

I-1-3-1-Séisme :

Un séisme est une manifestation de la tectonique des plaques. Il se traduit en surface par une vibration du sol provenant d'un déplacement brutal de la roche. En surface, un séisme peut dégrader ou détruire des bâtiments, produire des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles. Il peut aussi provoquer des chutes de blocs, une liquéfaction des sols meubles imbibés d'eau, des avalanches ou des raz de marée (tsunamis) (**Figure I-5**).



Figure I-5: Désordres dus au séisme.

I-1-3-2-Gel dégel :

Dans les zones où le climat est très froid, l'eau absorbée par le béton gèle si elle est exposée à des températures inférieures à zéro degré Celsius, le béton augmente de volume et la pression résultante pourra éclater ou épaufrer la surface du béton (**Figure I-6**).



Figure I-6 : Exemple de dommages causés par le gel-dégel.

I-1-3-3-Le retrait :

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton. Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur de l'élément de structure. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle

I-2-Méthodes de renforcement :

I-2-1-Adjonction d'armatures complémentaires (chemisage) :

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections (**Figure I-7**) par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage [**FUK**], [**MON**].

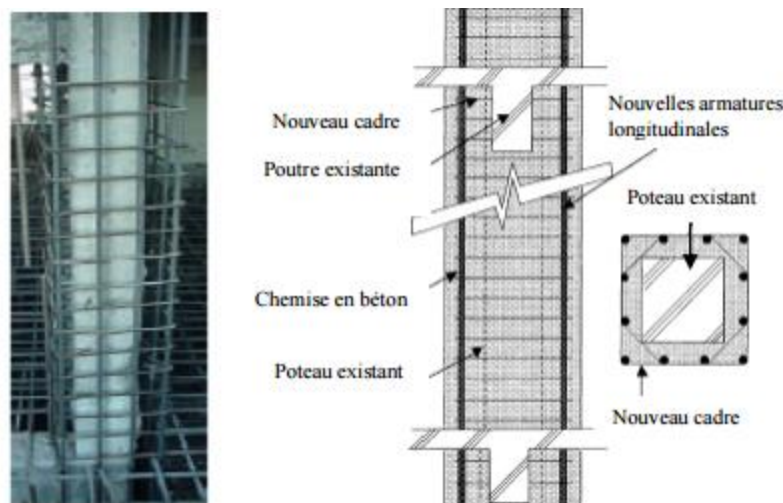


Figure I-7 : Chemisage en béton armé. [**FUK**]

I-2-2-Béton projeté :

Cette technique, très utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, consiste à projeter du béton contre la face à bétonner à l'aide d'un jet d'air sous pression.

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes de sécurité).

Il existe deux techniques principales de projection : par voie sèche et par voie humide, Dans le procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en centrale (**Figure I-8**). [**OUL**]

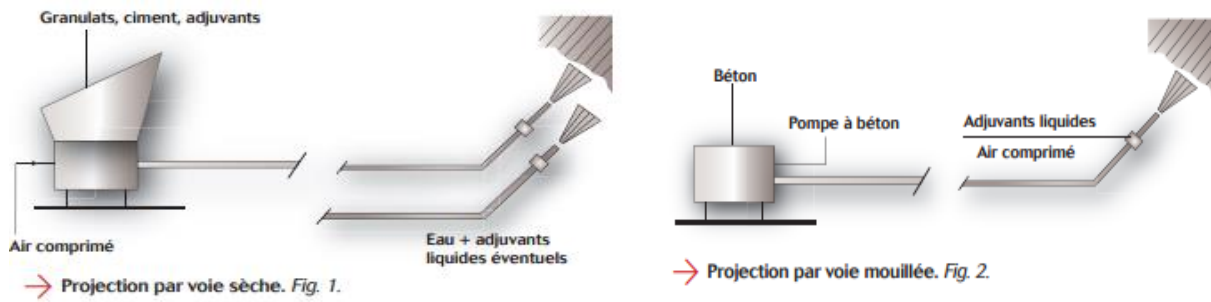


Figure I-8 : Béton projeté. [CON]

I-2-3-Précontrainte additionnelle :

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression aux zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées.

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint. Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi, des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. En fin, il faut prendre toutes les dispositions pour contrôler que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées (**Figure I-9**). [OUL]



Figure I-9 : Précontrainte additionnelle.

I-2-4-Tôles d'acier collées :

L'utilisation de plaques d'acier collées afin de renforcer des insuffisances locales ou globales s'est développée ces dernières années. C'est une technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer. Ces plaques sont généralement facilement inspectable pour faire le suivi des dégradations. Le collage de la plaque à la surface du béton assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de la structure renforcée. Les plaques d'acier collées peuvent être utilisées afin d'effectuer un renforcement en flexion, en cisaillement ou pour confiner des colonnes en béton.



Figure I-10 : Plaques d'acier collées. [BENZ]

Toutefois, en plus de la difficulté de la mise en œuvre, des problèmes de corrosion de l'acier mettent en péril la sécurité de ce type de renforcement.

Afin de remédier à ce phénomène de corrosion, l'utilisation des matériaux non métallique s'est avérée efficace. Il s'agit de renforcer les ouvrages en béton par le confinement avec des matériaux composites.

I-2-5-Confinement du béton avec les composites :

Au milieu du siècle passé, l'évolution dans le domaine des adhésifs a permis de mettre en place une nouvelle méthode de renforcement des structures par collage externe : le confinement.

Le renforcement de structures en béton par collage en surface de matériaux composites est une technique efficace et éprouvée. Sa facilité et rapidité de mise en œuvre en font une technique de prédilection pour renforcer les structures afin de prolonger leur durée de vie et assurer la sécurité des usagers. Cette technique repose sur le transfert des efforts entre le support béton et les fibres de renfort.

La première utilisation importante de matériaux composites dans le renforcement des structures remonte à 1991, en Suisse, pour la réhabilitation du pont d'Ibach. Ce pont est constitué d'une poutre caisson alors que des plaques de composites ont été appliquées sur la

surface tendue. 6,2 kg de feuilles de composite de 2 mm d'épaisseur et de 150 mm de largeur ont remplacé 175 kg d'acier. Le pont de Kattenbusch, en Allemagne, est aussi constitué de poutres caissons continues sur 11 portées. L'effet des gradients de température a amené une fissuration prématurée au niveau de certains joints. Un renforcement avec des plaques de fibre de verre a été utilisé. L'utilisation des matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement devient une solution préconisant un remplacement tout aussi efficace que l'acier. À titre comparatif, le **Tableau I-1** donne les avantages des composites sur l'acier. [OUL]

Tableau I-1 : comparaison entre composites et acier.

Critères	Avec les composites	Avec l'acier
Resistance en traction	Bas	Elevé
Epaisseur	Très élevée	Elevée
Corrosion	Très basse	Basse
Longueur des plaques	Non	Oui
Manutention	Illimitée	Limitée
Capacité de chargement	Facile, flexible	Difficile, rigide
Capacité de chargement	Direction longitudinale	Toute direction
Coût du matériau	Bas	Elevé
Coût des installations	Bas	Elevé
Application	Pas d'équipement	Appareil de levage et d'attache

I-3-Revue des travaux antérieurs sur le confinement du béton :

[Fardis et Khalili. 1981] entreprennent des essais de compression uni-axiale sur des cylindres en béton de dimensions 76 mm x 152 mm (3po x 6po) et 102 mm x 204 mm (4 po x 8 po) enveloppés dans différents tissus de matériaux composites à base de fibres de carbone (CFRP). Ils rapportent une augmentation de La résistance en compression et une amélioration de la ductilité, grâce à l'effet du confinement. Dans un autre article (Fardis et Khaiili 1982), les chercheurs proposent un modèle hyperbolique pour décrire la résistance en compression de béton confiné.

[Katsumata et coll. 1988] présentent des résultats d'une investigation expérimentale sur le comportement sismique des colonnes renforcées à l'aide de CFRP. Deux séries de dix modèles réduits de colonnes aux coins arrondis, de section cariée 200 x 200 mm, sont mises à l'essai afin d'évaluer l'efficacité de l'interface entre le béton et le CFRP. Dans la première série, un isolant est appliqué entre le béton et le matériau composite, alors que dans la deuxième série le matériau composite est collé directement en surface à l'aide d'une résine époxyde. Suite aux essais, les observations suivantes sont formulées :

-Le déplacement ultime ainsi que la capacité d'absorption d'énergie ont augmenté de façon linéaire avec la quantité de CFRP.

-La résistance sismique des colonnes renforcées à l'aide de CFRP était proche de celle des colonnes confinées à l'aide de frettes hélicoïdales.

-Pour une même quantité de CFRP, le déplacement ultime était très similaire dans les deux séries.

[Priestley et coll. 1992] conduisent une investigation sur l'utilisation d'un système d'enveloppe (jacket) composé de matériaux FRP à base de fibres de verre (GFRP) collés en surface à l'aide d'époxy pour améliorer la performance en flexion et en cisaillement des piles de pont en béton situées dans des régions sismiques. Ils présentent tout d'abord des modèles de design simples développés plus tôt (Priestley 1991, Priestley et Sieble 1991) pour le calcul de la ductilité et du cisaillement résultant de la réhabilitation ou du renforcement en question. Sept piles de pont sont réhabilitées à l'aide du système décrit plus haut et sont mises à l'essai pour valider les modèles. Trois (3) piles sont renforcées au niveau de la zone de rotule plastique avant d'être testées en flexion, alors que les quatre autres piles sont renforcées sur toute leur longueur avant d'être soumis à des essais de flexion en courbure double. Les résultats expérimentaux ont montré que le système de matériaux GFRP collés peut empêcher la rupture prématurée par insuffisance de longueur de chevauchement dans la zone de rotule plastique. Ils ont également montré que le système procure une augmentation appréciable de la résistance au cisaillement aux piles et aux colonnes qui présentent des insuffisances en matière de cisaillement.

[Saadatmanesh et coll. 1994] conduisent une analyse paramétrique portant sur le comportement de colonnes circulaires et rectangulaires renforcées à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone, collées en surface. Ils modélisent le confinement procuré par les lamelles à l'aide du modèle de Mander et coll. (1988). Quatre paramètres sont considérés en particulier: la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en FRP, l'espacement des lamelles et les propriétés du matériau des lamelles.

[Mastrapa. 1997] étudie l'effet de l'adhérence. Il met à l'essai 32 cylindres de béton de dimensions 150 x 300 mm (6 x 12 po), 16 de ces cylindres sont enveloppés à l'aide de 1, 3,5 ou 7 épaisseurs de tissu FRP à base de fibres de verre du type S, alors que les 16 autres spécimens sont confectionnés à l'aide de tubes GFRP type S ayant les mêmes épaisseurs et remplis du même béton que les premiers cylindres. Les essais de la première moitié sont réalisés en deux séries: dans la première série, les épaisseurs de l'enveloppe en FEW sont

collées, une couche à la fois, avec un recouvrement d'environ 17% du périmètre du cylindre, alors que **dans** la seconde série les épaisseurs sont appliquées en continu avec un recouvrement final de 32% du périmètre du cylindre. La résistance du béton non confiné de la série 1 est de 5.4 ksi. La résistance à la traction et le module d'élasticité du FRP sont respectivement de 85 ksi et 2984 ksi. Les résultats de ces travaux ont permis de conclure que la fabrication de l'enveloppe en FRP n'affecte pas de façon significative la résistance de colonnes confinées sous charges axiales.

[Seible, 1997] présente des équations pour le design de colonnes réhabilitées à l'aide de matériau en régions sismiques. Il considère les aspects suivants : (a) cisaillement, (b) confinement de la zone plastique, et (c) confinement de la zone de chevauchement des armatures. Ces équations sont validées par des essais expérimentaux.

[Kono et coll, 1998] étudient l'effet du confinement à l'aide de «PRFC» sur la rupture de l'adhérence par éclatement du béton. Ils conduisent des essais de compression sur 27 cylindres en béton de dimensions Ø100 mm x 200 mm de différents mélanges avec différentes quantités de couches de confinement (une, deux, et trois couches) pour mesurer les relations contrainte-déformation. Les résultats montrent que l'augmentation de la résistance en compression et celle de la déformation correspondant à la contrainte maximale des cylindres confinés à l'aide de «PRFC», varie linéairement avec le nombre de compression entre 30 et 40 MPa et un polymère renforcé de fibres de carbone «PRFC» dont la résistance ultime en traction varie entre 1280 et 3820 MPa et le module d'élasticité entre 220 et 235 GPa.

[Xiao and Ma, 1997, 1999] ont étudié le comportement d'un renforcement sismique, ils ont réalisé une série d'essais sur des poteaux circulaires en béton armé par le moyen d'un chemisage préfabriqué en composite FRP. Trois poteaux d'échelle 1/2 ont été testés sous une compression constante et une force latérale cyclique non alternée. Les poteaux ont montrés une amélioration significative des performances sismiques. Aussi un modèle analytique basé sur une analyse des réponses moment-courbure a été présenté. Dans un second travail les auteurs ont testés 3 poteaux d'échelle 1/2 dans les mêmes conditions mais avec une force latérale cyclique alternée (double courbure), une amélioration significative des performances sismiques a été constatée.

[Toutanji and Balaguru, 1998]; ont étudié l'influence de l'environnement sur la performance du confinement des poteaux pour cela un travail expérimental réalisé sur des

poteaux à échelle réelle confinés par un composite de CFRP ou de GFRP dans trois environnements différents: chambre climatique à température contrôlée, exposition à l'humidité et au sec, exposition au gel et dégel. Les résultats des tests ont montré que la résistance et la ductilité des spécimens enveloppés par le composite CFRP ne sont pas affectés par le passage d'un environnement humide à un environnement sec, alors que les spécimens enveloppés par le composite de GFRP ont montré une réduction des performances. À l'exposition au gel et au dégel, les spécimens ont montré une réduction significative de la résistance et de la ductilité dans le cas du GFRP et du CFRP.

[Wang et Restrepo 2001] ont proposé une méthode analytique pour calculer sous une compression axiale, les déformations à court terme des poteaux confinés par un composite en GFRP ainsi que le ferrailage transversal. Six poteaux de sections transversales de différentes formes ont été testés sous un chargement de compression centrée. Le modèle proposé a montré une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux. Les auteurs ont proposé une équation de forme simple pour les calculs manuels.

[Monti and Nistico, 2001], ont proposés une méthode de conception pour optimiser l'épaisseur du composite en FRP à mettre en place dans le but de faire une mise à jour de la réglementation concernant le confinement des piles de ponts. Ils ont réalisé une étude paramétrique basée sur le modèle classique de barres auquel ils ont implémenté un modèle de béton confiné, qui a montré malgré sa simplicité d'utilisation une excellente capacité de prédiction de la ductilité, prouvée par la confrontation à des résultats expérimentaux.

[Pantelides and Gergely, 2002], ont présenté une méthode d'analyse et de conception pour le renforcement sismique des poteaux de ponts à l'aide de composites en CFRP). Ce renforcement est conçu dans le but d'apporter une déformabilité et une ductilité supplémentaire aux poteaux. Les essais réalisés in-situ, ont démontrés le succès de la méthode; le pont renforcé a atteint un niveau de ductilité en déplacement appréciable, et a doublé la capacité de dissipation hystérétique de l'énergie comparé à son état de pré-renforcement.

[Li and Hadi, 2003], **[Hadi, 2005]**, ont testé 6 colonnes de sections circulaires ayant un élancement $\lambda=37$. Les poteaux sont confinés avec 0, 1, 3 et 5 couches de CFRP. Ils ont été soumis à une charge de compression excentrée de 42.5 mm; deux poteaux sont en béton armé le reste est en béton non armé. De façon générale, le gain en résistance obtenu reste marginal comparé à celui obtenu pour des poteaux soumis à une compression centrée, alors que

l'amélioration de la déformabilité est plus marquante, particulièrement pour les poteaux en béton non armé confinés. Le confinement a eu pour conséquence l'augmentation de la déformabilité latérale des poteaux, impliquant une augmentation de la capacité à la courbure. L'augmentation du nombre de couches a permis une légère augmentation de la résistance (environ 16% en passant de 1 à 5 couches CFRP). L'augmentation excessive du déplacement latéral a montré une capacité à redistribuer le moment de flexion.

[Hadi, 2005], a testé 7 poteaux de sections circulaires avec un élancement $\lambda = 18$, dont un poteau témoin; 3 poteaux renforcés longitudinalement par 0, 1 et 3 couches de CFRP et confinés transversalement par 3 couches de CFRP les 3 autres poteaux sont renforcés longitudinalement par 0, 1 et 3 couches de GFRP et confinés transversalement par 3 couches de GFRP. Ces poteaux ont été soumis à une charge de compression excentrée de 50 mm. Les poteaux renforcés et confinés par le CFRP ont montrés les meilleures performances en termes de résistance et de ductilité. Cette amélioration en résistance est directement liée à la résistance des matériaux composites en effet les essais de traction sur éprouvettes ont mis en évidence un rapport de résistance entre le CFRP et le GFRP voisin de 20, alors que, les déformations ultimes des deux matériaux sont voisines.

[Youssef et al. 2007], développent un modèle contrainte-déformation pour le béton confiné avec des matériaux composites «PRF». Le modèle est basé sur les résultats d'un large programme expérimental incluant des colonnes courtes circulaires ($\emptyset 406 \times 813$ mm et $\emptyset 152 \times 305$ mm), carrées (381 mm x 381 mm x 762 mm) et rectangulaires (254 mm x 381 mm x 762 mm) confinées en utilisant deux types de matériaux composites (PRFC et PRFV) avec une vaste gamme de rapport de confinement. Un total de 117 spécimens a été testé sous chargement axial. L'analyse des résultats d'essai montre que:

- La contrainte ultime, la déformation de rupture, les paramètres de l'enveloppe composite et la géométrie de la section sont les facteurs significatifs affectant le comportement contrainte-déformation du béton confiné avec des matériaux composites «PRF».

- Les courbes contrainte-déformation du béton confiné avec des matériaux composites

«PRF» sont bilinéaires ascendantes ou descendantes en fonction de la géométrie de la section et du rapport de confinement.

[**Quiertant et Clément en 2011**], ont étudié le comportement de poteaux renforcés par matériaux composites et soumis à une charge axiale excentrée de 20 mm par rapport à l'axe du poteau. Quatre configurations sont examinées et chaque configuration est testée sur deux corps d'épreuve (deux corps d'épreuve témoins sont également testés sans renforcement). Chaque configuration combine renforts longitudinaux à la flexion et confinement. Les essais ont montré que l'augmentation en termes de capacité portante n'est pas très importante, mais une augmentation très significative de la capacité de déformation a été observée.

[**Thong et al. 2013**], ont testé 60 colonnes, en béton armé, de 800mm de hauteur ayant une section carrée de 150 mm de côté. Chaque spécimen est armé de 4 barres longitudinales Ø12mm et 4 barres transversales lisses Ø6mm, espacées de 60 mm. Trois valeurs de la résistance caractéristique du béton non confiné sont considérées (40 MPa, 80 MPa et 100 MPa). Les spécimens sont confinés avec un CFRP de 75 mm de largeur présentant une densité de fibres unidirectionnelles de 340 g/m².

Les colonnes modifiées ont été par la suite enveloppées avec 3 couches de CFRP. Une série de spécimens a été soumise à une charge axiale concentrique, tandis que les autres colonnes ont été soumises à une charge excentrée. Les auteurs ont montré que la capacité portante ainsi que la ductilité des différents spécimens testés augmentent significativement. Il a été aussi montré que le CFRP avait le même effet de confinement sur les colonnes testées que sur les colonnes circulaires testées.

[**Ali ahmed et al. 2015**], ont testé l'effet du confinement par bandes hélicoïdales de PRFV. Ainsi, des éprouvettes cylindriques de dimensions Ø150x300 mm ont été confinées en considérant deux paramètres qui sont la largeur de la bande composite ainsi que le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre. Il a été montré que les cylindres ont gagné en résistance à la compression ainsi qu'en déformabilité.

Les quelques références cités dans ce paragraphe montrent que la majorité des travaux de recherches ont concernés des poteaux de section circulaire soumis à une compression monotone, témoignant ainsi de la rareté; des travaux de recherches réalisés sur les poteaux de section carré ou rectangulaire, des travaux sur des poteaux élancés, des poteaux soumis à un chargement de compression excentrée.

I-4-Renforcement des éléments structuraux avec les matériaux composites :**I-4-1-Renforcement des poteaux :**

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite.

[OUL]



Figure I-11 : poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites.

I-4-2-Renforcement des poutres :

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres.



Figure 1.12 : poutres en BA renforcées par matériaux composites

I-4-3-Renforcement des dalles :

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé.



Figure-1-13 : dalle en BA renforcé par matériaux composites

I-5-Confinement du béton avec les composites à base de fibres végétales :

Des études ont montré que les composites à base de fibres naturelles sont bien plus respectueux de l'environnement que ceux à fibres synthétiques. Les composites à fibres naturelles utilisent, au cours de leur cycle de vie, 45% de moins d'énergie que les composites à fibre de verre, et conduisent à moins d'émissions atmosphériques. La production des fibres naturelles a un impact environnemental plus faible que celles des fibres de verre : le taux de renfort en fibres naturelles plus élevé que pour les fibres de verre conduit à l'utilisation de moins de matériau polluant. [DO]

Plus récemment, l'application des fibres naturelles dans les composites FRP pour remplacer les fibres de carbone et de verre, et l'utilisation des **fibres végétales** comme renforcement du béton a gagné en popularité en raison des préoccupations environnementales croissantes (Yan et al. 2013a).

Parmi les différentes fibres naturelles, le lin, le chanvre, **le jute**, le coco et le sisal, sont rentables, elles offrent la meilleure combinaison potentielle de faible coût, poids léger, Et haute résistance et rigidité. Ils ont également déclaré que, parmi les fibres naturelles, la fibre de coco, comme renforcement dans le béton, a été largement étudié en raison de sa plus grande ténacité et du coût extrêmement bas, Ainsi que sa disponibilité (Yan et al. 2013b). Par conséquent, les fibres naturelles rentables comme renforcement du béton pour remplacer le coût, la consommation d'énergie élevée, et les fibres naturelles comme renforcement des composites pour remplacer les fibres de verre et de carbone sont les étapes majeures pour parvenir à une construction plus durable (Yan et al. 2013d).

I-6- Conclusion :

Dès leurs premières applications, les techniques de réparation des structures en béton au moyen de matériaux composites ont démontré d'excellentes performances et se sont révélés être nettement plus efficaces, fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement traditionnels.

Les matériaux composites permettent d'augmenter la durée de vie de certaines structures ou éléments structurels grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques.

Les travaux cités précédemment montrent que, le confinement des poteaux en béton ou en béton armé par une enveloppe de PRF, augmente leurs résistances ainsi que leurs déformabilité. Ces augmentations sont proportionnelles aux taux de confinement.

CHAPITRE II

Matériaux composites et PRF

Introduction :

Un des objectifs de ce deuxième chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constituants, de leurs propriétés ainsi que de leurs structures.

Etant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tous les types de composites. Néanmoins, nous tenterons de donner l'essentiel d'informations qui ont trait à ce domaine.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique, et pour certains d'entre eux une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

[BEL]

II-1- Les matériaux composites :

Un matériau composite est un matériau hétérogène, constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué, dans le cas le plus général, d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure, avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.

(Figure II-1)

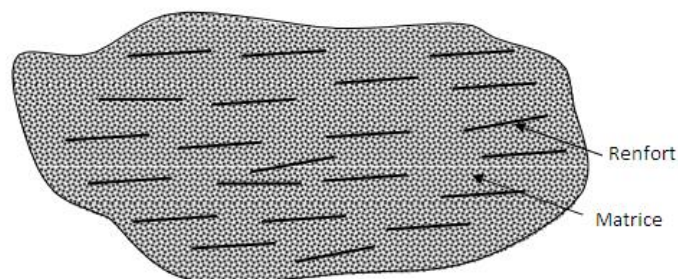


Figure II-1 : Schéma illustratif d'un matériau composite.

II-2-Constituants des matériaux composites :

II-2-1- La matrice :

Les matrices ont pour rôle de transférer les sollicitations aux fibres et de les maintenir en position, elles doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres, leur concentration massique doit être relativement faible de manière à conserver aux composites leurs caractéristiques mécaniques élevées.

La matrice est composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.), et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production.

D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène. [OUL]

L'organigramme ci-dessous présente, les différentes familles de matrices :

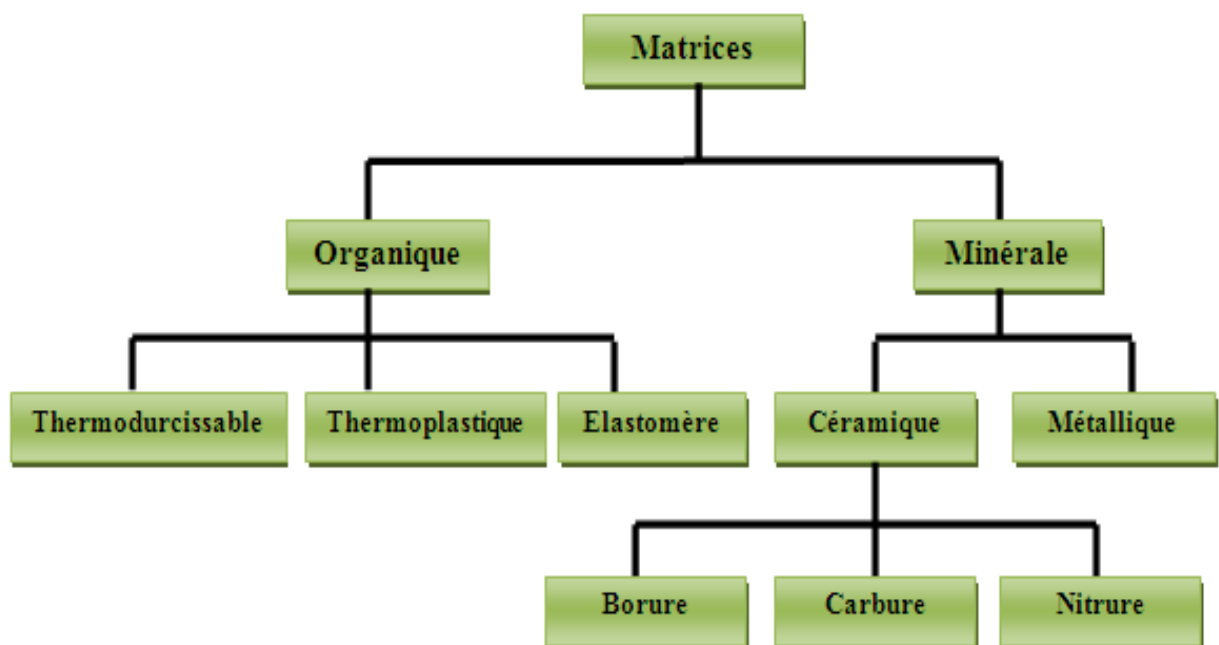


Figure II-2 : Différents types de matrice. [DJE]

II-2-1-1-Les résines :

Les résines sont des polymères modifiés par différents additifs et adjuvants. Les résines sont livrées sous formes de solutions, ou de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes de pré polymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. [OUL]

Deux grandes familles de résines existent : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

a- résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. [BEN]

b- résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mises en forme par chauffage et refroidissement [JUL].

c- matrices naturelles :

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et micro-organismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l'amidon, la cellulose et la lignine [BEW].

d- résines époxydes :

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques dont les principales applications concernent les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibres de verre ou de carbone) [BAR].

e- les résines thermostables :

Elles se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace [BERT].

II-2-1-2- Charges et additifs :

Les charges ou additifs sont des substances organiques, minérales, ou végétales qu'on ajoute à la résine, pour améliorer certaines de ses propriétés et réduire le prix du matériau composite.

 **les charges :**

L'objectif visé par leur utilisation, est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou d'en diminuer le coût en conservant ses performances. En général, ces

charges sont des microbilles ou des particules (poudre) [OUL]. Les principales charges utilisées sont

a- Les charges organiques :

Les charges cellulósiques utilisées comme étant des charges de résines thermodurcissables, ses avantages sont un coût peu élevé et une faible densité.

b- Les charges Minérales :

Ce sont les craies et les carbonates : Les craies présentent 99% de calcite, de silice et d'autres minéraux. Les carbonates de calcium ou de magnésium, sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardateurs de flamme.

c- Les charges Oxydes hydrates et métalliques :

• **Poudre et micro sphères :**

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium et de titane sont utilisés sous forme de poudre fine. Ils permettent de diminuer le prix de revient et augmenter la densité de la matière élastique.

• **Alumine et tri hydrate d'aluminium :**

L'alumine apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique, elle diminue le coefficient de dilatation thermique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu. L'hydrate d'aluminium est une charge qui du point de vue prix, est concurrentielle, elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion.

• **Trioxyc de d'antimonié :**

Il apporte aux résines une coloration blanche.

• **Céramique :**

Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0.4 et 2.4 et la dimension au-delà de 300 μm . Elle apporte une réduction de masse de 15 à 25% avec une amélioration de la résistance à la compression et au choc.

• **Le verre :**

-Poudres de verre : L'incorporation d'une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie de 13 μm , confère aux thermodurcissables une meilleure résistance à

l'abrasion et à la compression. Elle permet, par ailleurs, d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces mouillées.

-Billes de verre creuses : Elles sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent de gonflement, elles améliorent la résistance à la pénétration de l'eau et au vieillissement.

-Microsphères de verre : l'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35% la masse des pièces obtenues (destinées à l'industrie de l'automobile).

- **Le carbone :**

Le carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques à la fois comme colorant, barrière anti-ultraviolet, et antioxydant. Il améliore la résistance à la chaleur.

- ✚ **Les additifs :**

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés [BER]. Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- **lubrifiants et agents de démoulage :**

Ces agents ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules.

- **pigments et colorants :**

Les pigments sont des produits insolubles, se présentant, généralement, sous forme de poudres ou de paillettes. Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. A partir de ces pigments, il est également possible d'obtenir des pâtes colorantes. Les colorants sont des composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant organique, leur emploi est généralement limité, à cause de leurs mauvaises tenues chimique et thermique.

- **agents anti-retraits :**

Ces agents peuvent aboutir à un mauvais état de surface, un gauchissement ou des microfissurations de la pièce moulée, bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait ;

Il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti- retrait qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. [OUL]

Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentant sous forme de poudre ou de solution.

- agents anti-ultraviolets :

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines des rayons ultraviolets. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et éviter ainsi la détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation [BER].

II-2-2- le renfort :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire [MER], allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Ils sont caractérisés par :

- ✚ La nature de la fibre, minérale ou organique,
- ✚ l'architecture du renfort.

L'organigramme ci-dessous présente, les principaux matériaux de renfort.

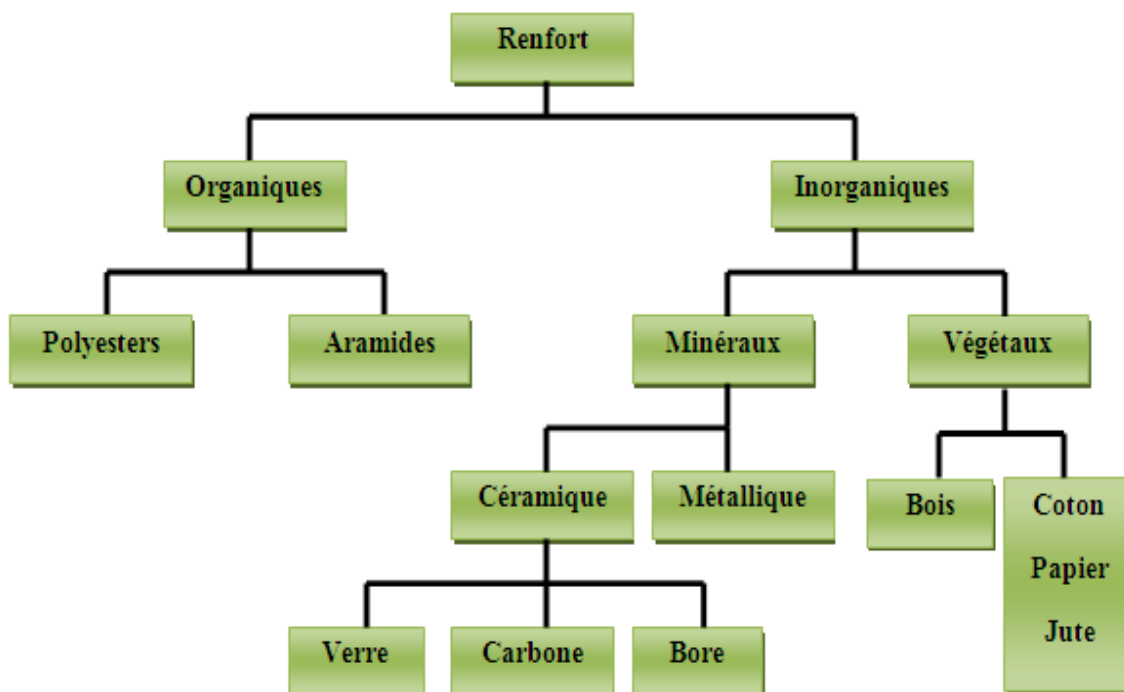


Figure II-3: Principaux matériaux de renfort. [MER]

Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15 micromètres. Il existe deux types de fibres:

- **fibres courtes:** quelques centimètres ou fractions de millimètres telles que, les feutres, les mats et les fibres courtes impactées utilisées en moulage
- **fibres longues:** coupées au moment de la fabrication du matériau composite, utilisées telles quelles ou bien tissées.

II-2-2-1-Forme des renforts :

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. Les renforts se présentent généralement sous diverses formes : linéique, surfacique et structures multidirectionnelles [MER].

➤ Formes linéiques :

Une fibre (diamètre environ de 10 μm) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres (Figure II-3). L'unité de masse linéique est le tex (1 tex = 1 g/km). [YAH]]

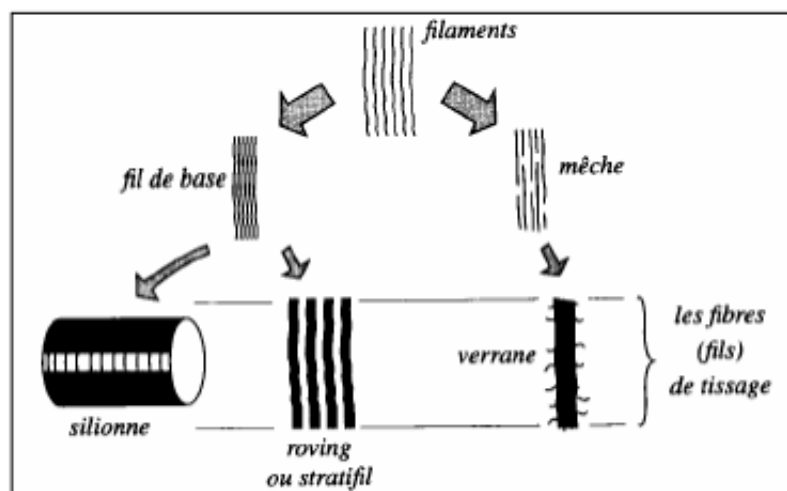


Figure II-4 : Eléments composants la forme linéique.

➤ forme surfacique :

1) Tissus et rubans :

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser (figure II-4). Il est constitué

- D'une **chaîne**, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu,
- d'une **trame**, ensemble de fils s'entrecroisent avec les fils de chaîne.

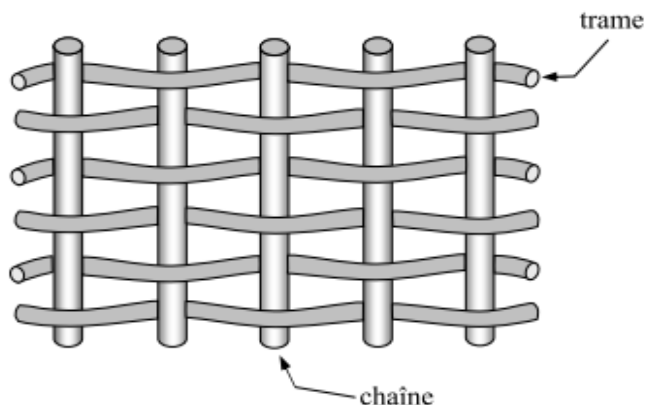


Figure II-5 : Chaîne et trame d'un tissu.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et de trame. La (**figure II-5**) illustre les armures classiques utilisées.

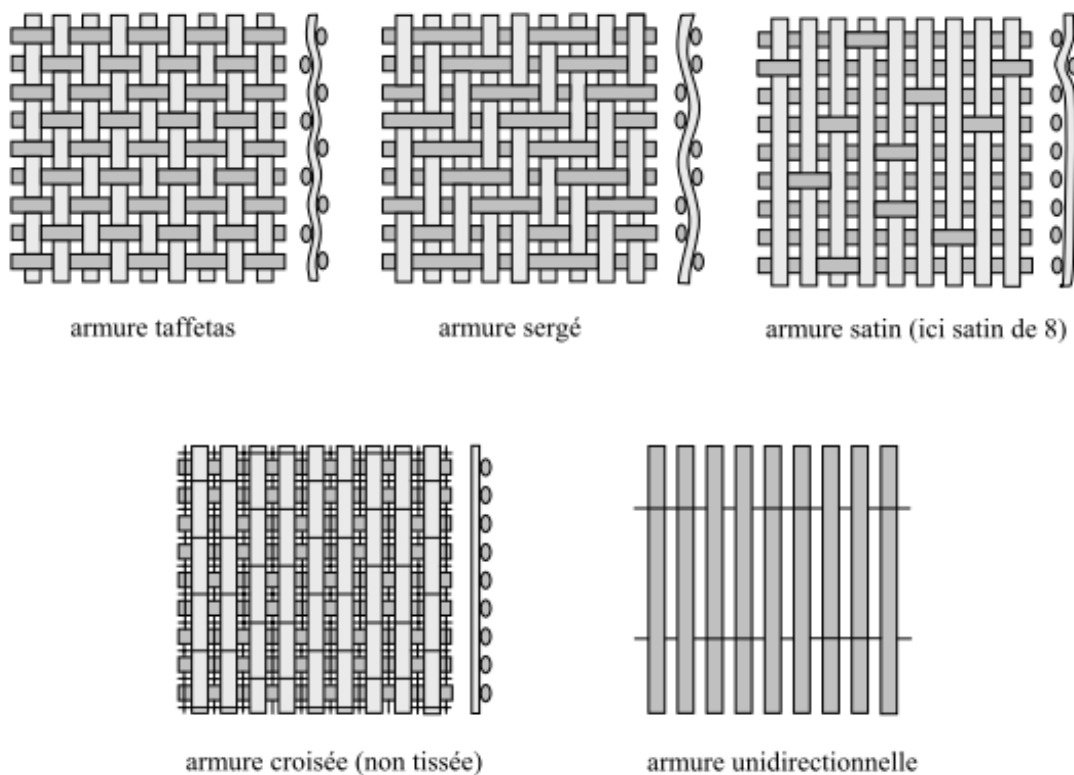


Figure II-6 : Eléments composants la forme surfaciques

2) Mats :

Ce sont des nappes de fils continus ou coupés (**Figure II-6**), disposés dans un plan suivant une direction aléatoire. Ils sont maintenus ensemble par un liant. Le mat est isotrope à cause de l'absence d'orientation préférentielle des fibres. [MER]

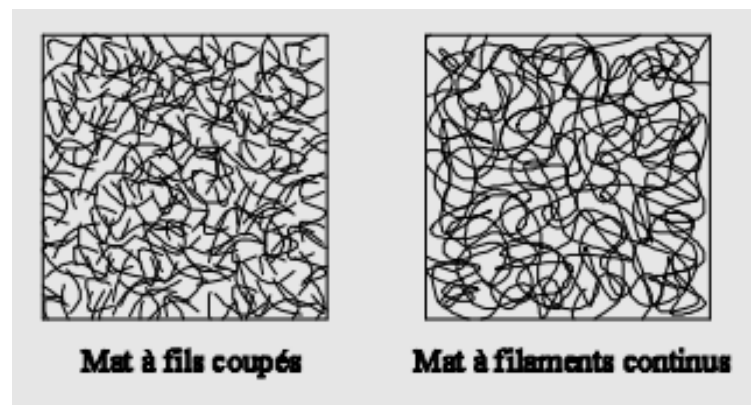


Figure II-7: Les mats à fils coupés et à fils continus. [MAT]

a- Structures multidimensionnelles : [BER]

Les fils sont disposés selon plusieurs directions (**Figure II-7**).

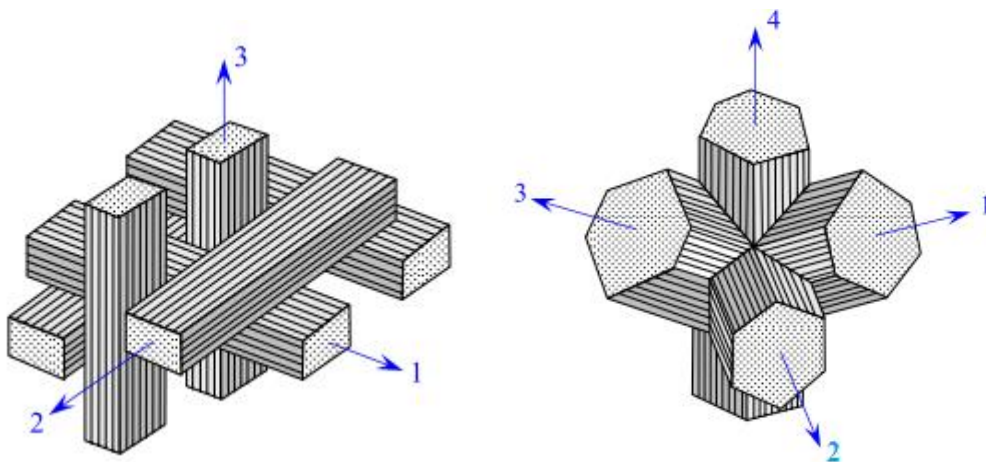


Figure II-8 : Structures multidirectionnelles

II-3- Fibres synthétiques :

Il existe plusieurs types de fibres synthétiques : fibre de verre, fibre de carbone, fibre aramide, fibre céramique, etc. Les plus répandues sont les fibres de carbone et les fibres de verre.

II-3-1-Fibres de verre :

❖ Elaboration :

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé notamment de silice, d'alumine, de chaux et de magnésie.

Les fibres de verre sont produites par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées aux environs de 1250°C (**Figure II-9**). A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues. Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique. [OUL]

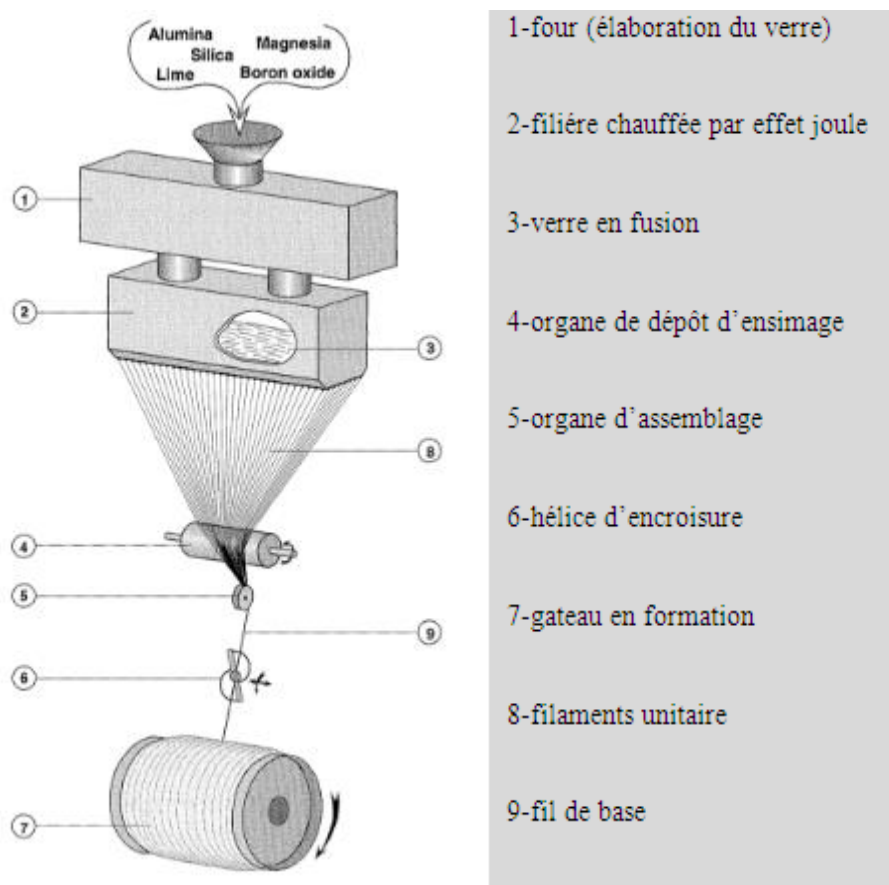


Figure II-9 : Elaboration de la fibre de verre. [MAT]

❖ Ensimage :

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons :

- L'absence de cohésion entre les filaments qui s'opposent à la constitution de fils.
- La sensibilité du verre à l'abrasion.
- La sensibilité à l'attaque à l'eau.
- La création de charges électrostatiques consécutive aux divers frottements.

Pour pallier à ces défauts, on réalise à la sortie de la filière, une opération dite "ensimage", qui consiste à déposer à la surface des filaments de verre, un produit d'ensimage de composition complexe. [BER]

❖ **Types de fibres de verre :**

Suivant leurs compositions, différents types de verre filables peuvent être obtenus comme indiqué dans le **Tableau II-1**.

Tableau II-1 : Types de fibres de verre. [HAL]

Type de verre	Caractéristiques générales
E	Usage général : bonne propriétés électrique
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R, S	Hautes propriétés mécaniques

Les fibres de verre E : elles sont initialement développées pour leurs bonnes propriétés électriques d'isolation. Cependant, elles deviennent actuellement les fibres les plus utilisées sur le marché des fibres de renforcement en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et leur coût modéré (de 2 à 5 fois moins chères que les autres types). [NGU]

Dans la pratique le verre E constitue environ 99% de la production et les autres verres sont réservés à des applications spécifiques. Dans le domaine du génie civil les verres E et S sont principalement utilisés. [BER]

Les fibres de verre D : elles sont composées essentiellement de silice et de bore, et dotées de très bonnes propriétés d'isolation électrique. Elles sont développées pour les applications électriques à très hautes performances telles que les radômes pour les avions militaires.

Les fibres de verre C : contiennent une forte teneur en la silice (jusqu'à 65%) qui leur confère une meilleure tenue que les fibres de verre E dans les milieux chimiques et particulièrement dans les milieux acides. Elles sont utilisées comme couches de protection anticorrosion des pièces dans le génie chimique ou dans la fabrication des bacs d'accumulateur.

Les fibres de verre R ou S : contiennent à hautes teneurs, de la silice et de l'alumine mais pas d'oxyde de bore ou de métaux alcalins. L'absence de ces composants (dits fondants car ils diminuent la température de fusion des mélanges vitrifiables) entraîne des conditions d'élaboration plus difficiles et des coûts plus élevés.

❖ Caractéristiques :

Les fibres de verre présentent de bonnes propriétés en termes de stabilité et de résistance chimique et thermique. Elles ont une large gamme de tailles de fils et de nombreuses options de tissage permettant à l'utilisateur de choisir la meilleure association de performance de matériau et d'économie. Le **Tableau II-2** présente certaines propriétés des fibres de verre. [NGU]

Tableau II-2 : Propriétés des fibres de verre.

Fibres	Masse volumique (g/m ³)	Allongement à la rupture en traction (%)	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité en traction (GPa)
Verre E	2.54-2.61	4.6-4.8	3200-3400	72-73
Verre D	2.14	4.5	2500	55
Verre A	2.45	4.4	3100	71
Verre C	2.49	4.8	3300	70.3
Verre R	2.55	5.2	4400	86

En observant le **Tableau II-2**, on remarque que l'élongation maximum des fibres de verre à la rupture varie de 4,4 % à 5.2%. On trouve aussi que les fibres de verre présentent un ratio élevé résistance/poids, donc elles sont intéressantes pour les applications où une résistance importante et un poids minimum sont nécessaires.

Sous des influences thermiques, les fibres de verre présentent des avantages tels que : une résistance élevée et une stabilité de dimension. Elles sont inorganiques et ne brûlent pas. Elles conservent environ 25 % de leur résistance initiale à 540°C. Les fibres de verre ont un faible coefficient d'expansion thermique qui conduit à une faible déformation ainsi qu'elles supportent une exposition à des températures extrêmement élevées ou basses.

La plupart des produits chimiques ont peu ou pas d'effets sur les fibres de verre. Elles n'absorbent pas l'humidité et ne changent pas physiquement ou chimiquement si elles sont exposées à l'eau.

II-3-2- Fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres de précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. [LAU]

Le principe d'élaboration, est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de

raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

Suivant les conditions de fabrication, il existe deux types de fibres de carbone

- Fibre de carbone à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation
- Fibre de carbone à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation.

Les caractéristiques de ces fibres sont données dans le **Tableau II-3**.

Tableau II-3 : Caractéristiques des fibres de carbone. [HAB]

Filament	Carbone HR	Carbone HM
Densité	1.78	1.8
Résistance à la traction (MPa)	3500	2200
Module de traction (MPa)	200000	400000
Allongement à la rupture (%)	1	0.5
Température à la fusion (°C)	2500	2500

II-3-3- Les fibres d'aramide:

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours. L'élaboration des fibres d'aramide est effectuée à basse température (-10 °C), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite tirées et traitées thermiquement afin d'augmenter leur module d'élasticité [BEL]. Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont rapportées dans le **Tableau II-4**.

Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides, à savoir:

- Résistance faible à la compression, à la flexion, au flambement.
- Sensibilité au cisaillement.

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre-matrice. Compte tenu de leur légèreté et de leur bonne résistance au choc, à l'impact et à l'abrasion, les fibres aramides sont utilisées pour la fabrication de blindages et de produit de friction et de joints.

Tableau II-4. Caractéristiques mécaniques des fibres aramides.

Caractéristique	Kevlar 29	Kevlar 49
Masse volumique ρ (kg/m³)	1440	1450
Module de Young E_f (MPa)	60000	120000
Contrainte à la rupture (MPa)	3000	3000
Allongement à la rupture (%)	36	19

II-4- Fibres naturelles :

Les fibres naturelles semblent être une alternative de moindre impact environnemental que les fibres issues de matières fossiles, grâce à leur faible densité, leur faible coût et leurs propriétés spécifiques compétitives. Le terme « fibres naturelles » regroupe les fibres organiques d'origine végétale (cellulosique) et animale (protéinique), et les fibres minérales comme l'amiante. Toutefois dans le cadre de ce travail, les fibres naturelles désigneront plus spécifiquement les fibres végétales. Parmi les fibres végétales, se distinguent les fibres provenant des poils séminaux des graines comme le coton ; les fibres libériennes extraites de tiges de plantes comme le jute, le lin ou le chanvre; et les fibres issues de feuilles comme le sisal, de troncs ou d'enveloppes de fruits comme la noix de coco.[HAL]

L'organigramme de la **Figure II.10**, présente les différents types de fibres naturelles.

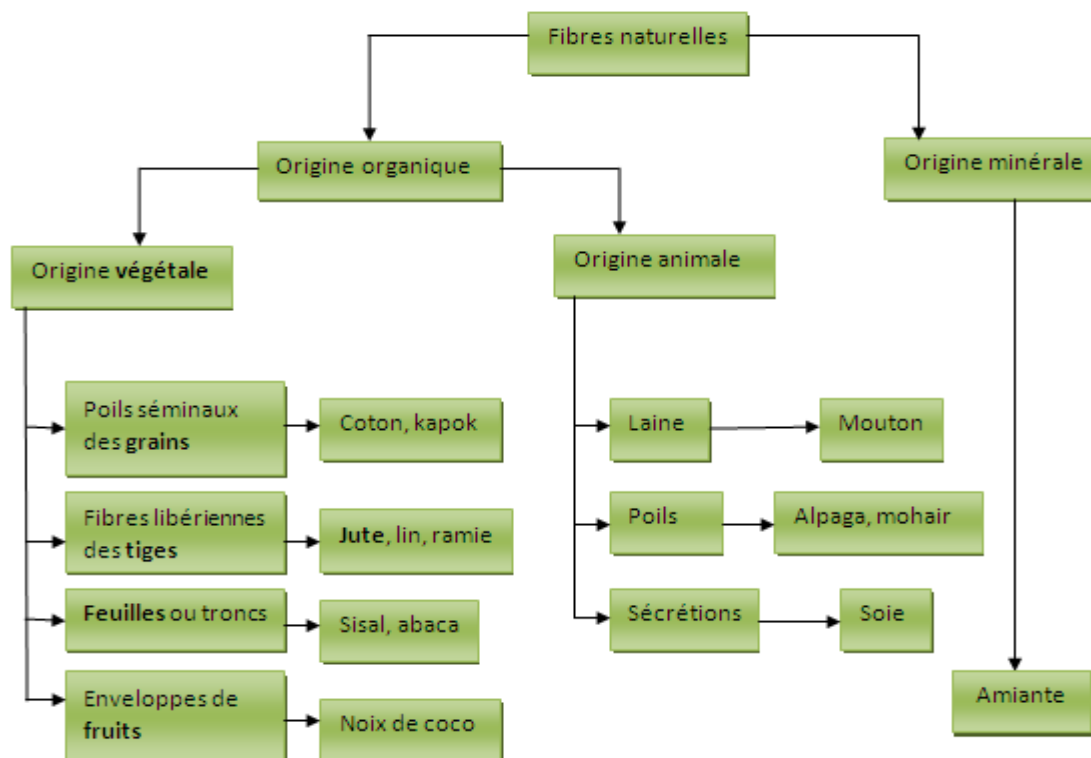


Figure II-10: Différents types de fibres naturelles. [MOH]

II-4-1- Fibres végétales :

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante. [NEN], [MIC].

Les fibres végétales peuvent être subdivisées en trois groupes:

- fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie),
- fibres extraites de feuilles (sisal, abaca), d'enveloppes de fruits (noix de coco)

De nombreuses variétés de fibres provenant du liber (tige) sont utilisées aussi bien pour la confection d'étoffes raffinées que pour la fabrication de cordages. Outre le lin, extrait de la tige le chanvre, le jute et la ramie sont utilisés pour la fabrication de tissus plus grossiers, de cordes et de ficelles. Ces fibres sont les plus utilisées dans les composites polymères grâce à leur résistance mécanique élevée et leurs propriétés spécifiques.

➤ **Utilisation des fibres végétales : avantages et inconvénients : [MOH]**

Outre l'avantage direct de réduire l'impact négatif sur l'environnement au stade de la fabrication, un composite renforcé par des fibres végétales (naturelles) contribue également au respect de l'environnement.

Par comparaison avec les fibres de verre, elles offrent néanmoins des avantages certains tels que :

- Faible densité.
- Non abrasives par rapport aux fibres de verre (longévité de l'outillage).
- Des propriétés spécifiques élevées.
- Facilement recyclables.
- Moins fragiles que les fibres synthétiques (mise en œuvre faciles courbures).
- Biodégradables.
- Large gamme de variétés disponibles et renouvelables à travers le monde.
- Génération d'emplois dans le monde rural.
- Faible consommation d'énergie.
- Coût de revient limité.

Cependant, pour différentes applications, ces matériaux doivent être spécialement traités par rapport à (au):

- L'homogénéité des propriétés des fibres.
- Degré de polymérisation et de cristallinité.
- La bonne adhésion fibre/matrice.
- La résistance à la pénétration de l'humidité
- Comportement au feu.

II-4-1-1- Le Lin :

Le lin appartient à la famille des linacées (*Linum usitatissimum*). C'est une plante annuelle dont la tige atteint de 0.60 à 1.20 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm. Les fibres de lin sont extraites de la tige de la plante (**Figure II-11**). L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. . [NGU]



Figure II-11 : Lin et fibre de lin.

II-4-1-2- Le Sisal :

Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long (**Figure II-12**). Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivée en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3mm. [CAR]



Figure II-12 : Sisal et fibres de sisal.

II-4-1-3- Le chanvre :

Le chanvre (*Cannabis sativa*) est une plante libérienne, dont la hauteur varie de 1 à 3 m. Il présente des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses (**Figure II-13**). La longueur des fibres de chanvre est assez élevée en moyenne de 20 à 50 mm. Ces fibres sont utilisées dans les domaines du textile (tapis et vêtements), des agro textiles (toile anti-

érosion), de l'automobile (composite pour panneaux intérieurs), du papier (fibres de renfort) et du bâtiment (isolation thermique). Cultivé dans les pays à climat tempéré. [NGU]



Figure II-13 : Chanvre et fibres de chanvre.

II-4-1-4- Le Jute de la plante jusqu'à la fibre :

Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvacées, Il vient en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisation. Le jute est très polyvalent. (**Figure II-14**). C'est une fibre libérienne, extraite des tiges de deux espèces végétales de la famille des Tilliacées : *Chorchorusolitorius* et *Chorchoruscapsularis*. [BOU]



Figure II-14 : Jute et fibres de jute.

❖ Extraction de la fibre de jute :

Près de 85% du monde de la culture du Jute est concentrée dans le delta du Gange (Inde et Bangladesh). Les semis se font entre mars et mai en fonction de la pluviométrie et du terrain. Cette plante apprécie un sol de type alluvial. La mousson lui offre un climat propice à sa croissance (chaud et humide). Le Jute est coupé au bout d'une période allant de 120 à 150 jours, au moment où la fleur commence à se faner et le fruit à se former. Les tiges sont effeuillées, les feuilles pouvant servir d'engrais.

La fibre intéressante correspond au phloème (tissu conducteur de la sève chez les végétaux) qui se trouve sous l'écorce. Elle ne représente que 6% du poids total de la plante verte. Plusieurs étapes sont nécessaires afin de la récupérer (**Figure II-15**).

Après la récolte (fauchage), les tiges de Jute sont liées en bottes et immergées dans de l'eau stagnante ou à faible courant pour les libérer de la pectine et autres substances mucilagineuses qui les soudent, c'est **le rouissage**. Les méthodes de rouissage (isolement des fibres) utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse de la tige sont soit biologiques, soit chimiques, mais au vu du prix des produits chimiques, la méthode biologique (extraction traditionnelle) est plus répandue. Les tiges restent immergées dans l'eau pendant environ 20 jours, jusqu'à ce que la fibre se sépare facilement de l'écorce.

Ensuite, c'est **l'écorage**. Les tiges sont frappées, bottes par bottes, avec un maillet de bois pour rompre l'écorce. Quand les fibres sont libérées, on les lave en les écartant en éventail afin d'enlever à la main les dernières impuretés.

Les fibres sont essorées et mises à sécher deux ou trois jours au soleil dans des cordes et assemblées en balles. Les reflets dorés et soyeux de la fibre de Jute lui ont valu le nom de "fibre d'or".



Figure II-15 : Etapes d'extraction de la fibre de jute

Les fibres de jute sont ensuite peignées mécaniquement afin de créer de grandes longueurs et de les débarrasser de leur impuretés.

La longueur de la fibre est de 1 à 4 m et le diamètre est de 20 à 25 μm . Elle résulte de l'assemblage d'une dizaine ou plus de fibres élémentaires à section polygonale avec une ouverture centrale. Ces fibres sont ensuite tressées ou filées pour former les brins (Figure II-16). [BOU]



Figure II-16 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c).

Le jute constitue, avec les autres fibres du genre *Agave*, les nombreuses variétés cultivées dans des conditions tropicales et subtropicales. Il est plus "grossier" que le lin et les autres fibres libériennes. Il est commercialisé sous forme de tissu de masse surfacique de 370 g/m^2 . Les torons constituant la trame et la chaîne ont un diamètre moyen égal à 0.6mm. Ils contiennent environ 120 fibres. La chaîne et la trame ont un entrelacement de 10 et 20 torons respectivement par 20 mm (Figure II-17). [BOU]

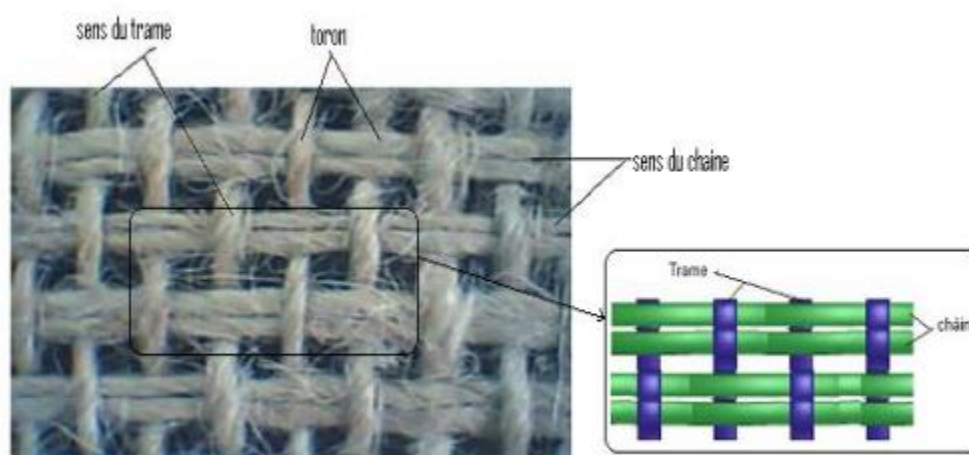


Figure II-17 : Tissu de jute.

❖ Structure de la fibre de jute :

Le jute est multicolore en structure (**Figure II-18**). La paroi cellulaire d'une fibre est constituée d'un certain nombre de couches : la paroi primaire et la paroi secondaire (S), qui est à son tour composée de trois couches (S1, S2 et S3). Comme dans toutes les fibres lignocellulosiques, ces couches contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine à des quantités variables. Les fibres individuelles sont liées par une région riche en lignine connue sous le nom de lamelle médiane. La cellulose atteint la concentration la plus élevée dans la couche S2 (environ 50%) et la lignine est la plus concentrée dans la lamelle médiane (environ 90%) qui, en principe, est exempte de cellulose. La couche S2 est généralement de loin la couche la plus épaisse et domine les propriétés des fibres. La cellulose, un composant primaire de la fibre, est un polymère de condensation linéaire constitué d'unités de Danhydro-glucopyranose réunies par des liaisons β -1, 4-glucosidiques. Les longues chaînes de cellulose sont reliées entre elles en faisceaux appelés micro-fibrilles (**Figure II-18**).

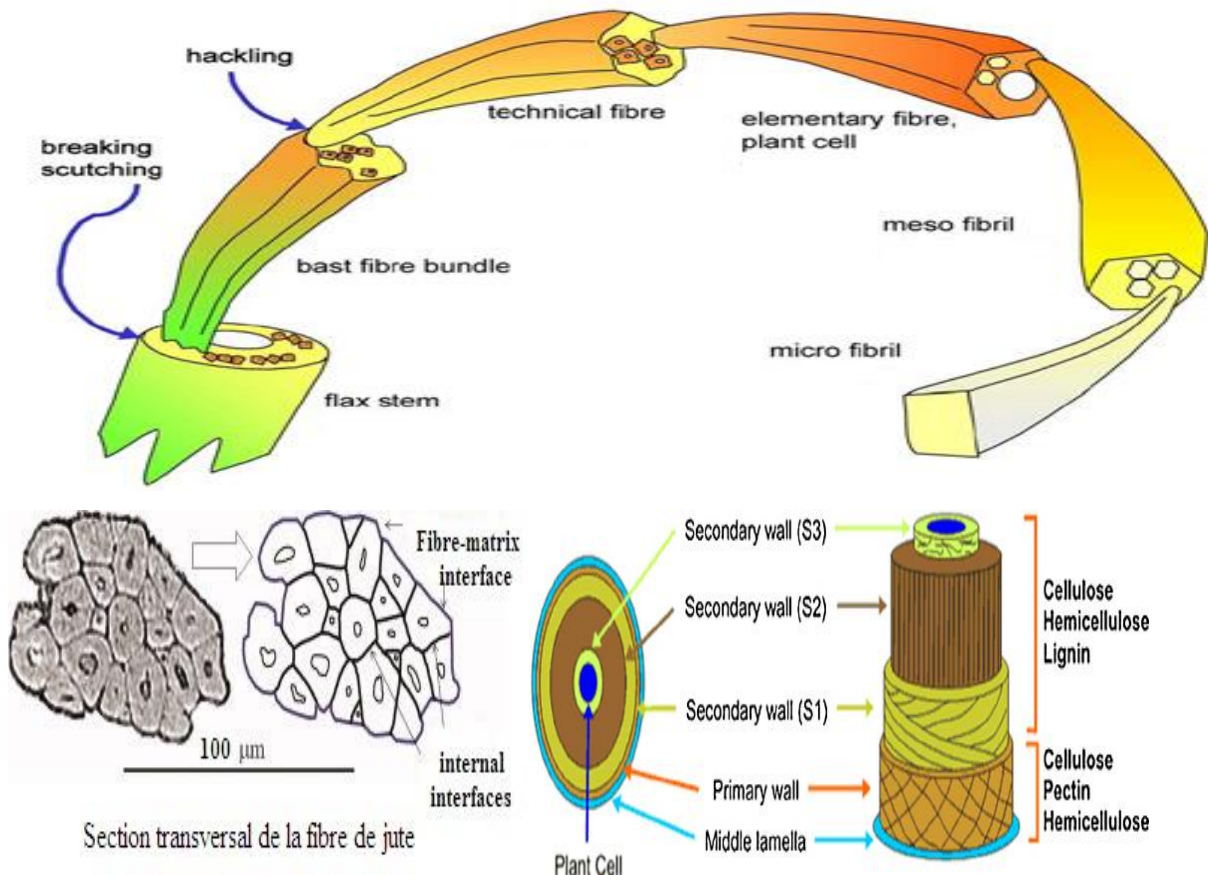


Figure II-18 : Structure de la fibre de jute.

Les hémicelluloses se retrouvent également dans toutes les fibres végétales. Elles sont des polysaccharides liés dans des chaînes de ramifications relativement courtes. Ils sont intimement associés aux micro-fibrilles de cellulose, incorporant la cellulose dans une matrice. Les hémicelluloses sont très hydrophiles et ont des masses moléculaires plus faibles que la cellulose et la lignine. Le degré de polymérisation (DP) est d'environ 50 à 200. Les deux principaux types d'hémicelluloses sont les xylanes et les glucomannanes.

La lignine est un polyphénol ramifié de manière aléatoire, composé d'unités de phénylpropane (C9). C'est le polymère le plus complexe parmi les matériaux naturels de masse moléculaire élevée ayant une structure amorphe. Parmi les trois principaux constituants des fibres, on s'attend à ce que la lignine soit celle qui a le moins d'affinité pour l'eau. Une autre caractéristique importante de la lignine est qu'elle est thermoplastique (c'est-à-dire à des températures d'environ 90 °C, elle commence à se ramollir et à des températures d'environ 170 °C, elle commence à s'écouler).

La composition chimique de la fibre de jute ainsi que ses caractéristiques, sont données dans les **Tableaux II-5** et **Tableau II-6** respectivement.

Tableau II-5 : Composition chimique de la fibre de jute. [INT]

constituants	Pourcentage (%)
Cellulose	60-62
Hémicellulose	22-24
Lignine	12-14
Autres	1-2

Tableau II-6 : Propriétés de la fibre de jute par rapport à d'autres fibres. [HAL]

Fibre	Densité	Module E (GPa)	Contrainte (MPa)	Allongement (%)
Jute	1.44-1.48	26.5	393-780	1.5-1.9
Cotton	1.55	5.5-12.6	287-597	7-8
Lin	1.53	43-72	900-1800	2.5-4.1
Ramie	1.56	50-80	500-1000	1.2-3.8
Sisal	1.34-1.45	9-21	610-720	3-7
Chanvre	1.07	35	390	1.6

La fibre de jute possède une résistance et une rigidité spécifiques modérément élevées. Par conséquent, il convient comme renforcement dans une matrice de résine polymère. Cependant, il présente des variations de diamètre considérables avec la longueur des filaments individuels. Les propriétés de la fibre dépendent de facteurs tels que la taille, la maturité et les méthodes de traitement adoptées pour l'extraction de la fibre. Les propriétés telles que la

densité, la résistivité électrique, la résistance à la traction finale et le module initial sont liées à la structure interne et à la composition chimique de la fibre.

II-5-Mise en œuvre des composites :

Pour la fabrication des composites, il existe plusieurs méthodes. On en présente ici quelques-unes avec leurs principes. Ces méthodes sont généralement faciles à exécuter et demandent un coût d'investissement faible en matériels. [CAR], [DEC], [BERT].

II-5-1-Moulage au contact :

C'est la méthode la plus simple qui demande le moins d'équipements. On utilise des moules en bois vernis, en métal, etc., sur lesquels on dépose successivement : un agent de démoulage, une couche de surface (optionnelle) et des couches successives de renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante (**Figure II-19**).

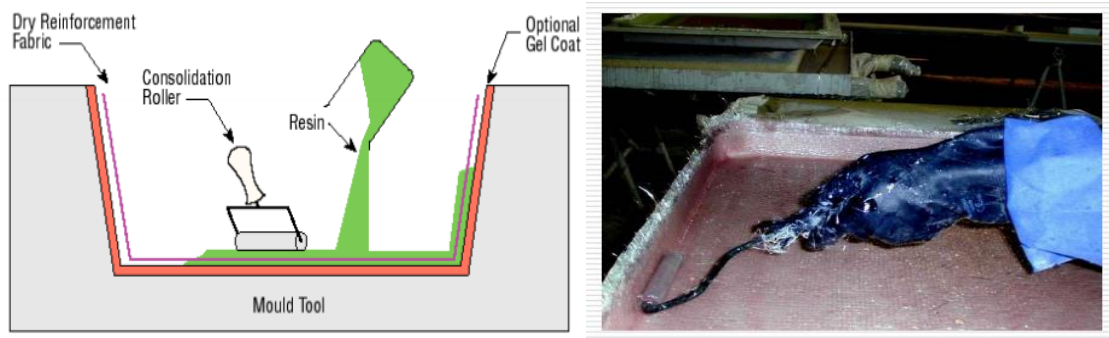


Figure II-19 : Moulage au contact.

II-5-2-Moulage par projection :

Dans cette méthode, la résine et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme (**Figure II-20**).

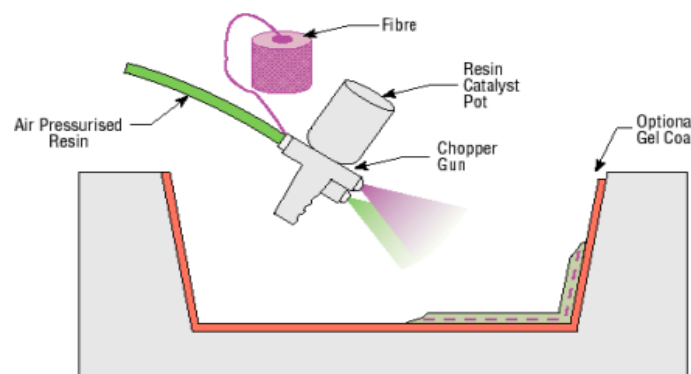


Figure II-20 : Méthode de projection simultanée.

II-5-3-Moulage par compression :

Le moulage par compression est l'un des procédés les plus économiques pour la production de grandes séries de pièces de petites et de moyennes dimensions. Dans ce procédé, on place une préforme de compound de moulage (résine, renfort, catalyseur et additifs déjà pré-mélangés dans des proportions optimales) dans la cavité d'un moule chauffé, et ensuite on la presse aux dimensions finales. On utilise des pressions qui vont de 0.5 à 15 MPa (**Figure I-21**).

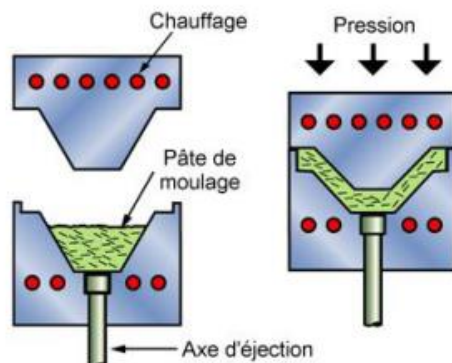


Figure II-21 : Méthode de moulage par compression.

II-5-4-Moulage sous vide :

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant les caractéristiques des pièces.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être admise ponctuellement par l'aspiration consécutive au vide (**Figure II-22**).

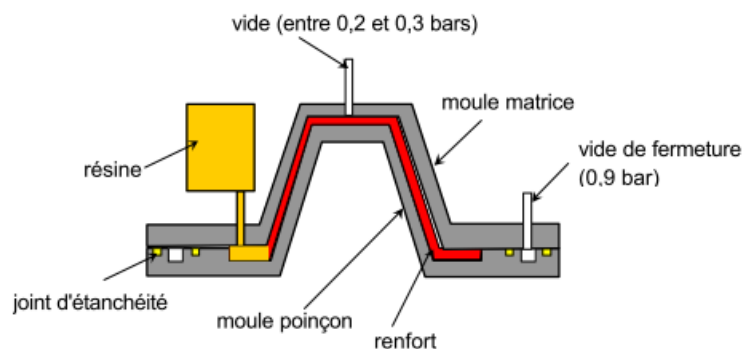


Figure II-22 : Méthode du moulage sous vide.

II-5-6-Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding) :

Le moulage par transfert de résine consiste à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation des résines est réalisée par le vide ou par l'injection de la résine. Cette méthode permet d'atteindre des taux volumiques élevés des fibres, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes complexes (**Figure II-23**).

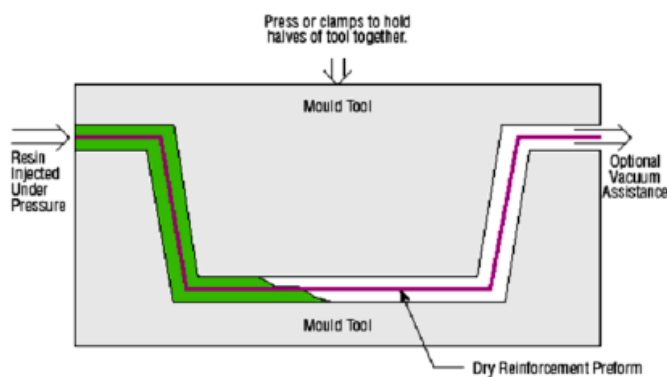


Figure II-23 : Principe du moulage par injection de résine.

II-6-Polymère renforcé de fibres (PRF) :

La technologie des composites structuraux de polymères renforcés de fibres (PRF) est apparue pour la première fois au milieu des années 1930, sous la forme d'une coque de bateau expérimentale faite de fibre de verre et de résine de polyester. Malgré leurs débuts quelque peu incertains, les composites PRF ont révolutionné des industries entières, dont l'aérospatiale, la marine, l'automobile, l'infrastructure ainsi que les secteurs industriels. Des applications militaires dans les années 1940, aux secteurs manufacturiers et industriels dans les années 1950, les composites PRF sont progressivement devenus la solution de rechange privilégiée aux techniques de réfection traditionnelles. Leur popularité était principalement attribuable à leur excellent rapport résistance/poids ainsi qu'à leur résistance supérieure et inhérente aux conditions climatiques et aux effets corrosifs des milieux salés.

Cette technologie a ensuite fait son entrée dans le domaine de l'infrastructure en Europe, au Japon et aux États-Unis dans les années 1970 et 1980, où elle a commencé à être utilisée pour la réfection de piliers, tabliers et poutres de ponts ainsi que pour la réparation de tunnels et de quais maritimes.

Depuis, les besoins en matière de rénovation et de consolidation de bâtiments et de structures de ponts en béton armé ne cessent d'augmenter. De nombreux facteurs ont contribué à populariser l'utilisation des composites PRF encollés de l'extérieur en tant que matériaux de restauration pratiques et économiques, notamment la détérioration causée par les conditions environnementales; les dommages provoqués par les impacts; l'augmentation des charges de calcul due à des exigences de codes plus sévères, particulièrement dans le domaine parasismique; des changements dans l'utilisation des structures; et le besoin d'augmenter la résistance et la ductilité pour corriger les erreurs de conception ou de construction. [MAP]

II-6-1-Définition D'un PRF:

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres « PRF » sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice. Leur comportement dépend principalement du pourcentage de fibres et des propriétés mécaniques des constituants. Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture. [BENZ]

II-6-2-Avantages et inconvénients des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment et les travaux publics :

Les différents avantages et inconvénients des PRF sont énumérés dans le **Tableau II-7**.

Tableau II-7.avantages et inconvénients des PRF.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Faible densité ; ❖ Propriétés mécaniques longitudinales ❖ Absence de corrosion ; ❖ Très bonne tenue à la fatigue ; ❖ Facilité de manipulation. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ anisotropie très marquée ; ❖ comportement à la rupture de type fragile des composites ; ❖ prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

II-6-3-Comportement du béton, confiné par PRF, à la compression :

Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge,

conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, sa résistance ainsi que sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton.

Le confinement du béton qui consiste à empêcher ces déformations, peut être réalisé soit par une enveloppe externe, soit par un faible espacement entre les étriers. [MOU]

La **Figure II-24** met en évidence les différences de comportement entre le béton confiné et le béton non confiné, le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton : la résistance à la compression $f_{cc} > f_{co}$ et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression $\varepsilon_{cc} > \varepsilon_{co}$; il augmente aussi de façon significative le pouvoir absorbant d'énergie du béton.

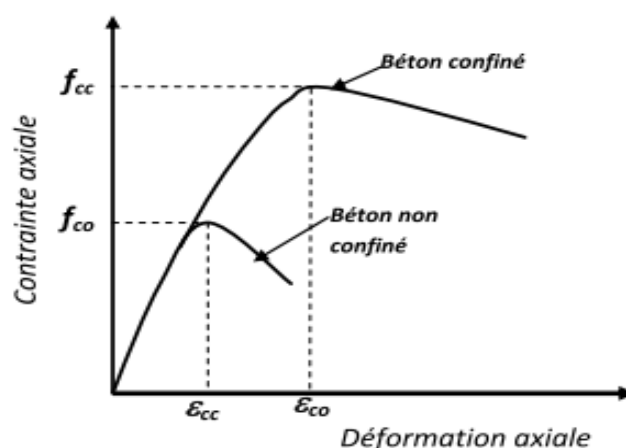


Figure II-24 : Courbes contrainte-déformation d'un béton confiné et non confiné. [KHE]

Les essais expérimentaux existants ont montré que les courbes contrainte-déformation des colonnes circulaires en béton confinées avec des matériaux composites «PRF» présentent une allure caractéristique bilinéaire (diagramme de type ascendant (**Figure II-25**), avec un brusque adoucissement après une zone de transition qui se manifeste au seuil de la résistance à la compression maximale du béton non confiné f'_{co} . [TOU], [SAM]

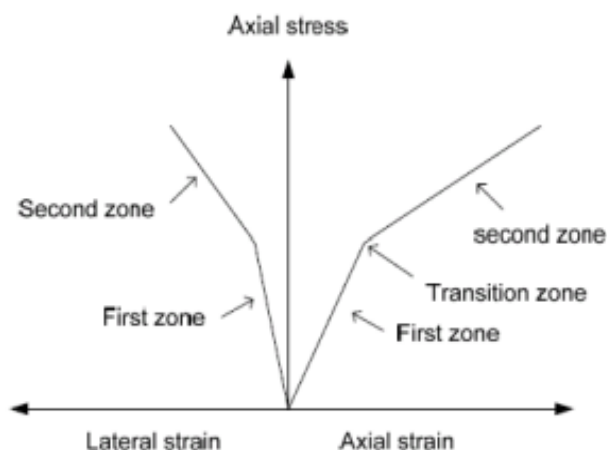


Figure II-25 : Courbes contrainte-déformation d'un béton confiné avec des «PRF». [MOU]

Dans la première branche linéaire, le béton reprend principalement la charge axiale, l'inclinaison de la courbe contrainte-déformation est semblable à celle du béton ordinaire (non confiné) [TOU], ce qui montre que le comportement est peu affecté par le «PRF». Dans la seconde branche linéaire, le béton est fissuré et la force de confinement du «PRF» est activée. La contrainte du béton confiné augmente linéairement avec l'augmentation de la contrainte dans le composite «PRF» et atteint son maximum à la rupture du «PRF». Dans ce cas la contrainte ultime (valeur au pic) du béton confiné et la déformation ultime du «PRF» sont atteintes simultanément [MIR].

Néanmoins, la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRF dépend en grande partie du pourcentage de la surface enveloppée. Pour des niveaux de contrainte faible, la réponse du béton confiné est semblable à celle du béton non confiné, par contre lorsque la contrainte dépasse la limite de rupture du béton ordinaire, le PRF se trouve mobilisé et la courbe présente un deuxième tronçon linéaire ascendant jusqu'à la rupture du PRF. Ceci traduit le phénomène de confinement.

Deux aspects de confinement apparaissent (**Figure II-26**) :

- ❖ lorsque le niveau de confinement est faible, les déformations engendrées avoisinent les déformations ordinaires, ce que l'on appelle couramment « softening strain »
- ❖ lorsque le confinement est élevé, nous sommes dans ce cas en présence de grandes déformations, on parle alors de « strain-hardening ». [KHE]

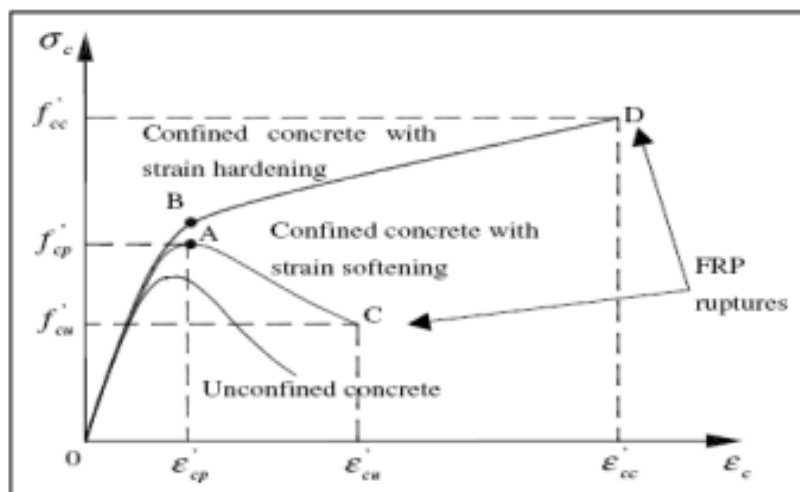


Figure II-26 : Courbes contrainte-déformation d'un béton confiné avec des «PRF» par aspects de confinement. [KHE]

II-7-conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction aux matériaux composites, donnant une description de leurs constitutions, leurs propriétés ainsi que leurs structures, détaillant le mode de fabrication ou d'extraction des fibres synthétique (verre) et des fibres végétales (jute) renforçant les composites à utiliser dans le chapitre qui suit.

L'introduction dans le domaine du génie civil de ces matériaux composites de type polymère renforcés de fibres (PRF), présente de nombreux avantages fonctionnels tel que:

- Une légèreté du tissu.
- Une mise en œuvre aisée.
- Une liberté de formes.

Le béton confiné présente une augmentation remarquable en termes de résistance à la compression, toutefois la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRF dépend en grande partie du pourcentage de la surface enveloppée, lorsque le confinement est élevé, la courbe présente de grandes déformations par contre lorsque le niveau de confinement est faible, les déformations engendrées avoisinent les déformations ordinaires.

CHAPITRE III

Compagne expérimentale

Introduction :

Ce chapitre est totalement consacré à la présentation des démarches utilisées dans le cadre de la compagne expérimentale (protocole expérimental) menée au laboratoire de matériaux de l'université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU. Les différentes étapes de confection des éprouvettes, les caractéristiques des matériaux utilisés (béton, composites) ainsi que la conduite des essais de compression y sont décrites. Ces derniers étant conduits sur des cylindres confinés avec des bandes hélicoïdales de PRFV et PRFJ. Des bandes de tissu de verre ou de jute sont collées en surface de cylindres ($\varnothing 150\text{mm} \times 300\text{mm}$) en béton au moyen d'une résine époxy.

Le programme expérimental comporte 21 éprouvettes au total. Parmi cette série, 3 cylindres ont été réservés à la caractérisation du béton, 3 autres ont été confinés avec 2 bandes de PRFV ayant une largeur de 3 cm et formant deux hélices de sens contraires (dextre et senestre), tandis que les 15 cylindres restants ont été confinés avec des bandes de PRFJ, des mêmes façons que les cylindres précédents.

L'objectif de la démarche étant de trouver la variante de confinement en PRFJ qui pourrait remplacer celui en PRFV. Plusieurs variantes de confinement en PRFJ sont ainsi testées. Nous avons également fait varier la largeur de la bande ainsi que le nombre de tours d'hélice qu'elles forment autour des cylindres.

III-1-caractérisation des matériaux utilisés :**III-1-1- Constituants du Béton :**

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydratée et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de lier les granulats pour former un conglomérat solide.

1) Ciment : C'est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise et qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Un seul type de mélange de béton a été utilisé pour la fabrication des différents spécimens à étudier. La formulation de ce béton a été déterminée à partir de la méthode de Dreux-Gorisse. Le ciment utilisé est un ciment portland de type CPJ-CEMII/B 42.5 N produit par LAFARGE Algérie.

2) Granulats : Ils constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive.

On utilise généralement pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par de sables et des gravillons, on emploie également des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, comme les argiles, les schistes et les silicates.

Les granulats sont lavés et séchés à l'étuve à température de 105°C, ils sont mis en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité et stockés au laboratoire de l'université.

3) Eau : de façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer qui contient environ 30 g/l de chlorures de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet. Les différents constituants du béton sont résumés dans la **Figure III-1**.

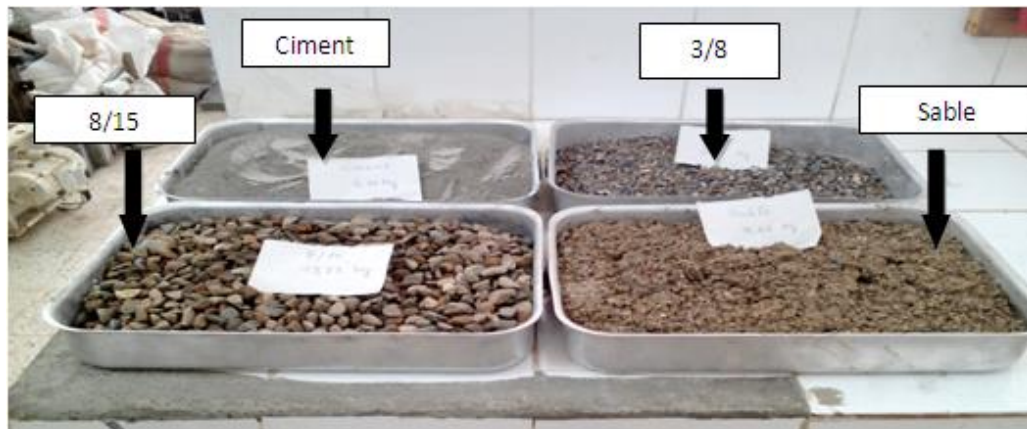


Figure III-1 : Constituants du béton

Les fractions massiques utilisées pour un volume de 1m³ de béton sont données dans le **Tableau III-1**.

Tableau III- 1 : Dosage des Constituants du béton pour le programme expérimental

Composant	Masse pour 1 m ³ de béton
Ciment (kg/m ³)	350
Sable (kg/m ³)	824.4
3/8 (kg/m ³)	240
8/15 (kg/m ³)	784.4
Eau (litre/m ³)	200

III-1-2- Caractérisations et constituants du renfort :

Les renforts utilisés sont des polymères renforcés de fibres de verre et de fibres de jute, qui sont formés respectivement de tissu de verre et de tissu de jute.

III-1-2-1- Tissu en fibres de verre :

Les fibres de verre sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois catégories :

- **Fibres E** : pour les composites grandes diffusions (GD) ;
- **Fibres D** : pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés) ;
- **Fibres R** : pour les composites hautes performances (HP).

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

Nous avons utilisé un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de verre, tissé de façon bidirectionnelle ayant une couleur blanche (**Figure III-2**).

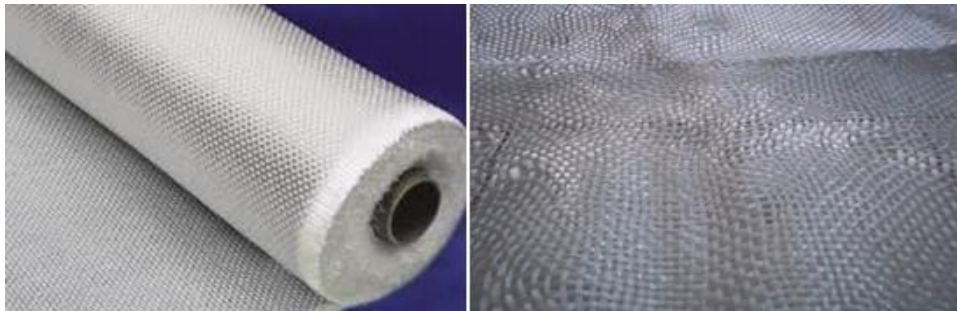


Figure III-2 : Tissu en fibres de verre.

III-1-2-2- Tissu en fibres de jute :

Le mot jute désigne à la fois les fibres ainsi que la plante dont sont issues. La fibre de jute est longue, douce et brillante. Sa longueur varie de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois. Elle présente une forte résistance à la traction et une faible extensibilité. Pour notre étude expérimentale nous avons utilisé un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de jute, tissé de façon bidirectionnelle (**Figure III-3**).



Figure III-3 : Tissu en fibre de jute.

Les Propriétés de la fibre de jute et de verre sont récapitulées dans le **Tableau III-2**.

Tableau III-2 : Propriétés mécaniques des fibres de jute et de verre.

Fibres	Densité (g/cm ³)	Module de Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Jute	1.3	26.5	393-773	1.5-1.8
Verre type E	2.5	70	2000-3500	2.5

Le tableau III-3 présente les six variantes de bandes de verre et de jute utilisées dans les essais, en faisant varier la largeur et le nombre de tours (longueur). La longueur des bandes est donnée par la formule III.1.

$$L = n\sqrt{S^2 + 4\pi^2R^2} \quad \text{III. 1}$$

L : Longueur de la bande.

n : nombre de spire.

S : pas de l'hélice.

R : rayon du cylindre.

L'ensemble des cas considérés est donné dans le **Tableau III-3**.

Tableau III-3 : Variantes de confinement considérées.

Désignation	Nature du PRF	Nombre de spires de l'hélice	Largeur	Longueur (m)
CCV33	Verre	3	3 cm	1.42
CCJ33	Jute	3	3cm	1.42
CCJ43	Jute	4	3 cm	1.92
CCJ53	Jute	5	3 cm	2.4
CCJ34	Jute	3	4 cm	1.42
CCJ35	Jute	3	5 cm	1.42
CBO	Cylindre en béton ordinaire.			

III-1-2-3- La résine :

La résine utilisée pour la mise en forme de l'élément tubulaire renforcé par le tissu PRFJ et PRFV, est une résine organique à performances élevées, de type époxyde, conçue par Granitex (Algérie). Cette dernière est obtenue en mélangeant la résine (A) avec une proportion de 1/3 en masse de durcisseur (B). Le mélange est effectué pendant 3 minutes dans le but d'éviter l'inclusion de bulles d'air. Le temps d'application de la résine était d'environ une heure. Après cette période de temps, il y a avait une augmentation de chaleur, une apparition d'une couleur rouge du mélange et un durcissement subi de la résine, qui la rendait inutilisable. Donc, seule la quantité applicable pour une période d'une heure était préparée à l'avance, afin d'éviter des pertes inutiles, toutes les recommandations du fournisseur (la température, l'humidité) ont été respectées. Le **Tableau III-4** résume les caractéristiques de la résine fournie par le fabricant

Tableau III-4 : Caractéristiques de la résine fournie par le fabricant.

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

Les résines époxydes sont utilisées d'une façon incontournable pour les applications structurales, cet intérêt provient de ses propriétés spécifiques :

- Très bonne tenue aux agents chimiques.
- Faible retrait.
- Bonne tenue mécanique.
- Forte adhésion au renfort.
- Bonne tenue aux températures élevées..



Figure III-4 : Composants de l'adhésif (durcisseur et résine).

III-2- Confection de béton et préparation des éprouvettes :

III-2-1- Moules cylindriques :

Des cylindres de diamètre 150mm et de hauteur 300mm conformément à la norme NF P18406 ont été utilisés afin de caractériser le béton utilisé (**Figure II-5**).

- Volume d'un cylindre : $V_c = \pi D^2 * \frac{h}{4} = 0.0053 \text{ m}^3$ III.2



Figure III-5 : Moules cylindriques (15×30) cm².

III-2-2- Coulage du béton :

Le matériel nécessaire est préparé (balance, récipients, spatules, truelles). Le liant, les agrégats fins et les agrégats grossiers sont pesés et pris selon les proportions citées précédemment. Le volume de chaque gâchée est de 16 l (pour 3 éprouvettes de 300mm×150mm). Le mélange de ces constituants a été fait dans un malaxeur à axe vertical (**Figure III-6**). La séquence de malaxage retenue est la suivante :

1. Introduire le sable, les gravillons et le ciment dans le malaxeur ;
2. Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 60 s ;
3. Laisser le malaxeur en marche et Verser l'eau graduellement et laisser se malaxer pendant quelques minutes.

Les moules prévus pour les éprouvettes de béton ont été préparés et huilés pour faciliter le décoffrage. Le coulage des éprouvettes a été fait en sept séries de trois dans des moules cylindriques. Le béton est compacté par vibration sur une table vibrante (**Figure III-7**).



Figure III-6 : Malaxeur à axe vertical.



Figure III-7 : a-Vibration du béton sur la table vibrante, b- Moules remplies de béton.

III-2-3 Démoulage et murissement des éprouvettes :

Après la mise en place du béton dans les moules les éprouvettes ont été conservées. Après 24 heures, elles sont démoulées, puis référencées (**Figure III-8-a**), (on mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes en béton la date de leur confection). La cure d'hydratation du béton a été réalisée en conservant les spécimens dans un bac d'eau, à température constante de 20° C pendant 28 jours, selon la norme européenne (NF 2001) relative à la conservation des éprouvettes en béton (**Figure III-8-b**).



Figure III-8 : a- Eprouvtes en béton après démoulage, b- Cure d'hydratation du béton.

Trois éprouvettes vont être testées après 28 jours de durcissement (béton témoin) pour obtenir la résistance référentielle du béton utilisé (**Figure III-9**), 18 éprouvettes vont être confinées après 28 jours de durcissement, ensuite testées pour l'obtention de la résistance caractéristique en compression du béton confiné.



Figure III-9 : Essai d'écrasement sur le béton témoin.

III-2-4-Procédés de mise en œuvre du renfort :

III-2-4-1-Traitement des surfaces :

Pour réussir le bon fonctionnement d'un renforcement par la méthode de collage externe de matériaux composites, il faut préparer un support de bonne qualité. La préparation de ce dernier a pour objectif d'éliminer toute rugosité superficielle, de graisse, de laitance et toute autre partie hétérogène.

Le nettoyage des surfaces des éprouvettes est effectué par polissage à l'aide d'une brosse métallique et de papier verre (**Figure III-10**) avant que celles-ci ne soient dépoussiérées à l'aide d'un séchoir.



Figure III-10 : Nettoyage des surfaces des éprouvettes.

III-2-4-2-Collage des tissus sur les éprouvettes :

Les bandes de tissu de renforcement (fibres de verre et fibres de jute) ont été mesurées ensuite découpées à l'aide des ciseaux (**Figure III-11**), la longueur des bandes de confinement, correspond au nombre de tours choisi pour un confinement partiel en utilisant des lanières en spirale continue, cette méthode de confinement est une méthode intermédiaire aux deux autres existantes (confinement total ou partiel en utilisant des anneaux discrets) qui a montré des gains en résistance et en ductilité tout en gagnant en terme de matière, d'après ALI AHMED et al .,2015.



Figure III-11 : Bandes de tissu de fibres de verre et de jute.

Les bandes de tissu de jute et de verre sont imprégnées de résine époxy à l'aide d'un pinceau (**Figure III-12-a**), ensuite Collées à la surface des spécimens de béton à l'aide d'un processus de pose à la main (**Figure III-12-b**). Il s'agit d'une stratification au contact, dans laquelle la résine joue à la fois le rôle de matrice du composite, et celui d'adhésif assurant la liaison entre le composite et le substrat béton.

Une fois le tissu est posé sur l'éprouvette selon une trajectoire hélicoïdale, il doit être marouflé à l'aide d'un rouleau. Ce procédé permet d'éviter la formation de poches d'air occlus dans le plan de collage car l'air s'échappe à travers les mailles du tissu.

De la même manière, une autre bande est collée dans le sens contraire à la première (**Figure III-12-c** et **Figure III-12-d**).

Les deux extrémités des spécimens ont été enveloppées par deux bandes de tissu (jute ou verre) de 2cm de largeur s'étalant sur une longueur égale au périmètre augmenté du quart de périmètre pour éviter l'échec prématuré des spécimens par rupture prématurée des bandes composites, du moment que cette procédure permet au PRF de développer pleinement sa résistance à la traction.



Figure III-12 : a- Bande de tissu de jute imprégné de résine, b- Collage du tissu sur le cylindre en béton, c- Epreuve confinée par PRFJ, d- Epreuve confinée par PRFV.

Les éprouvettes ont été séchées à température ambiante pendant 10 jours avant les essais mécaniques, temps requis pour le murissement de la résine dans les conditions de laboratoire (**Figure III-13**).



Figure III-13 : éprouvettes confinées, laissées sécher à température ambiante.

III- 3- caractérisation expérimentale du comportement mécanique :

III-3-1- essai de résistance à la compression :

La résistance mécanique en compression d'un béton correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette (**Figure III-14-a** et **Figure III-14-b**).

Tous les spécimens cylindriques sont testés selon la norme NF P 18-406. L'essai est conduit sous un chargement quasi-statique avec une vitesse de 0,5 KN/m. Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique avec une étendue de capacité 2000 KN de type ELE (**Figure III-14-c**). Elle comporte deux plateaux, un plateau inférieur mobile et un plateau supérieur fixe.



Figure III-14 : a-Essai d'écrasement sur éprouvette confinée avec PRFJ, b-Essai d'écrasement sur éprouvette confiné avec PRFV, c -Presse utilisée pour les essais.

Les tests menés pour définir la résistance caractéristique du béton de référence ont révélé les résultats consignés dans le **Tableau III-5**.

Tableau III-5 : Résultats du test de compression sur le béton.

Eprouvettes	Contrainte à la compression (MPa)	Contrainte moyenne(MPa)
N°1	22,41	22.39
N°2	24,43	
N°3	20,34	

III-3-2- Essai par ultrason :

En plus de l'essai d'écrasement pour l'appréciation des propriétés de nos bétons, nous avons également travaillé avec un essai non destructif (mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers l'échantillon de béton).

Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation ultrasonique à savoir :

- **Calibrage de l'appareil :**

L'appareil doit être remis à zéro en utilisant régulièrement la barre de calibration et en particulier si la fréquence du transducteur est modifiée ou si les câbles sont changés. La valeur de calibration attendue (μs) est marquée sur la barre de calibration.



Figure III-15: calibrage de l'appareil.

Coupler les transducteurs avec la barre de calibration en appliquant le couplant sur les transducteurs et les deux extrémités de la barre et en appuyant fermement sur la barre de calibration de $25 \mu\text{s}$ (**Figure III-15**).

- **Le surfaçage des éprouvettes :**

La surface des éprouvettes doit être lisse pour faciliter le passage des ondes ultrasonique, cette étape est très importante pour que les transducteurs soient en contact avec le béton.

- **La préparation des points de mesure :**

Cette opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (on peut marquer ces points avec de la craie ou avec un crayon), en évitant d'appliquer les sondes sur des cavités, ainsi les enduire de gel pour assurer le couplage acoustique.

Ainsi, on place les câbles qui relient les transducteurs et l'afficheur, et on met les transducteurs aux milieux des deux faces opposées de l'éprouvette, enfin on lit le temps de passage sur l'écran (**Figure III-16**).



Figure III-16 : Utilisation d'un ultrason.

La lecture est effectuée trois fois pour chaque éprouvette, et chaque variante de confinement présente trois répétitions.

III-3-3- Essai de traction sur le PRFV et PRFJ :

Afin de caractériser le PRFV et PRFJ, une série d'essai de traction est menée sur des éprouvettes rectangulaires selon les normes ISO 527-1, ISO 527-2 et ISO 527-5 recommandées par l'AFGC (2003), pour la caractérisation des matériaux composites stratifiés in-situ utilisés pour la réparation des structures en béton.

La forme ainsi que les dimensions des éprouvettes sont illustrées sur la **Figure III-17**. Les talons sont constitués de stratifiés verre résine selon la norme EN ISO 527-1, pour éviter que la rupture ne se produise dans les mors de la machine d'essai.

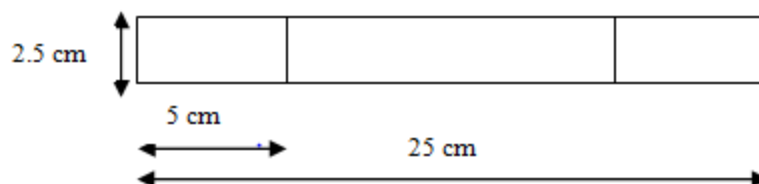


Figure III-17. Epreuve de PRFV et PRFJ

La rupture des plaques composites, intervient lorsque la contrainte de traction atteint celle des fibres. La concentration des contraintes au voisinage de la rupture, produit un mode de rupture qui dépend principalement de la capacité portante des fibres et des propriétés de l'interface de contact. La **Figure III-18** reproduit les résultats du test de traction sur les éprouvettes en PRFV et en PRFJ.

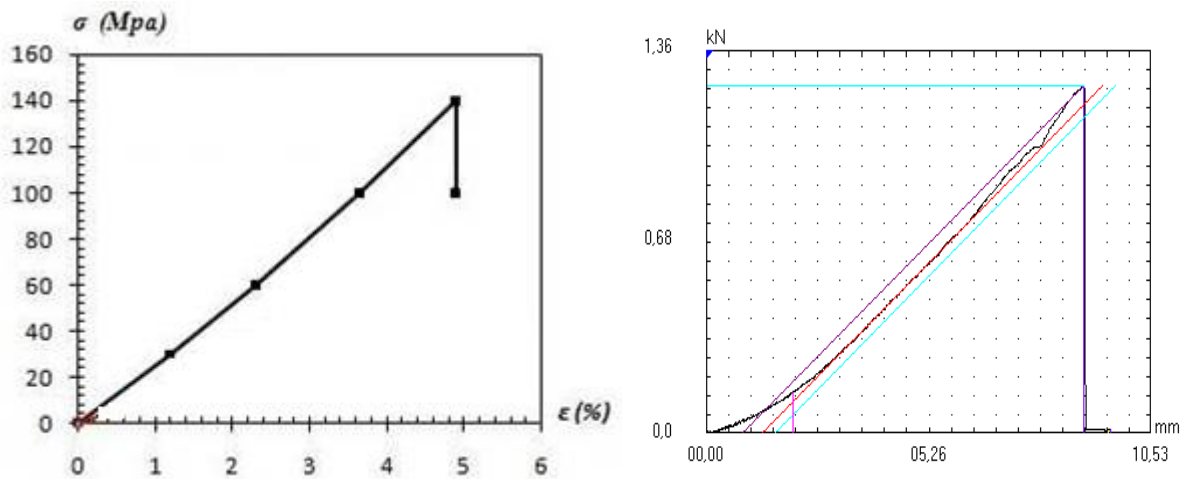


Figure III-18 : a- Résultats de l'essai de traction sur le PRFV.

b- Résultats de l'essai de traction sur le PRFJ.

III-4-Conclusion :

Dans cette partie, nous avons exposé le matériel et la méthode utilisés pour le type de confinement adopté dans cette étude, à savoir le confinement des cylindres en béton avec des bandes hélicoïdales de PRF.

La compagne expérimentale a été exposée, en commençant par la description des matériaux utilisés, ainsi que leurs compositions. Le mode de confinement y est bien décrit, en mettant l'accent sur les différentes étapes du confinement, allant de la préparation des spécimens en béton jusqu'à l'obtention d'éprouvettes confinées avec des bandes hélicoïdales de PRF prêtes à être soumises à un essai de compression dont la procédure est également détaillée dans ce chapitre, en vue d'étudier la possibilité de remplacer les fibres de verre par des fibres naturelles de jute, une démarche qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Les résultats des différents essais de compression font l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Résultats & discussions

Introduction :

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. Il est organisé en deux parties. La première concerne les résultats de l'essai de compression sur des éprouvettes en béton non confinés et sur des éprouvettes en béton confinés avec du PRFV et du PRFJ, la deuxième partie présente les modes de rupture observés des cylindres en béton confiné.

IV-1-Chargement et acquisition des données :**IV-1-1-Essai de compression :**

Un chargement axial a été effectué sur des éprouvettes non confinées (béton témoin) et des éprouvettes confinées à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité maximale de 2000 kN, de type ELE, elle comporte un plateau inférieur mobile et un plateau supérieur fixe. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s. Le raccourcissement axial et l'expansion latérale des échantillons sont mesurés par un montage extensométrique équipé de deux comparateurs de déplacements installés respectivement dans le sens vertical et radial au milieu de l'extensomètre avec lecture manuelle des données (**Figure IV-1**).



Figure IV-1 : Le montage extensométrique installé sur l'éprouvette à tester.

IV-1-1-1-Résultats de l'essai :

Les résistances mécaniques obtenues pour les différentes variantes du béton confiné sont données dans le **Tableau IV-1**. Sur le même tableau nous avons donné les résistances moyennes et les déformations axiales et radiales sur trois mesures ainsi que les valeurs des écarts types des mesures de résistance. Ces écarts type sont calculés sur les trois mesures de chaque béton confiné selon la formule suivante :

$$Ecart\ type = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{ci} - R_{cmoy})^2}{n-1}} \quad IV-1$$

Avec : n : nombre de mesures (pour un nombre d'opération limitée $n \leq 10$ on prend $n-1$ au lieu de n) ; R_{cmoy} : résistance à la compression moyenne de l'éprouvette i.

Tableau IV-1 : résultats des essais de compression

type de confinement	Force Max (KN)	Résistance (MPa)	moyenne (MPa)	ϵ_l	ϵ_l moy	ϵ_t	ϵ_t moy	E type
CBO	396,1	22,41	22,39	2,59	1,94	0,5	0,5	2,045
	431,6	24,43		1,69		0,55		
	359,4	20,34		1,56		0,45		
CCV33	512,3	28,99	28,095	3	2,75	0,4	0,575	0,895
	480,6	27,2		2,5		0,75		
	496,45	28,095		2,75		0,575		
CCJ33	389,4	22,03	24,21	2,2	2,2	1,26	1,26	1,929
	439,79	24,9		/		/		
	453,92	25,7		/		/		
CCJ34	471	26,66	27,94	1,5	2,45	0,4	0,35	1,305
	517,2	29,27		3,4		0,3		
	492,78	27,9		2,45		0,35		
CCJ35	484,8	27,44	30,51	3,6	3,6	0,54	0,54	2,739
	554,6	31,4		/				
	577,56	32,7		/				
CCJ43	542,5	30,7	28,42	2,8	2,65	0,47	0,64	2,712
	449,3	25,42		2,5		0,81		
	514,68	29,14		2,65		0,64		
CCJ53	512,2125	29	29,2	3,5	3,7	0,3	0,325	0,2
	516	29,2		3,7		0,325		
	519,2775	29,4		3,9		0,35		

IV-1-1-2- Comparaison de l'effet du confinement par PRFV et PRFJ :

Pour une meilleure appréciation des résultats nous avons représenté sur le **Tableau IV-2** les différences en résistance ainsi que les pourcentages des deux types équivalent en confinement du béton confiné par PRFV et PRFJ par rapport au béton non confiné (béton témoin).

Tableau IV-2 : Comparaison de l'effet de confinement par PRFV et PRFJ pour CC33.

Type de confinement	Résistance (MPa)	La différence (MPa)	Le pourcentage (%)
CBO	22.39	/	/
CCV33	28,095	5.705	25.48
CCJ33	24.21	1.82	8.12

La comparaison des résultats enregistrés en matière de résistance à la compression, montre clairement qu'on ne peut remplacer le confinement par PRFV par un confinement en PRFJ pour la même densité de confinement. En effet, il ressort que le confinement par PRFV permet d'enregistrer des valeurs plus élevées de résistance à la compression que celles dues au confinement par PRFJ, pour la même variante de confinement, à savoir des bandes à 3 tours, de largeur 3 cm. On enregistre ainsi, une valeur de 28.095 MPa pour les CCV33 qui correspond à un gain de 25.48%, contre une résistance de 24.21 MPa correspondant à un gain de résistance de 8.12% (**Tableau IV-2**).

Toutefois, il est bien de souligner que même pour les CCJ33, on a pu avoir des résistances assez bonnes en comparaison au béton de référence. Ce résultat montre l'intérêt de l'utilisation de ce composite pour le renforcement des bétons.

L'histogramme de la **Figure IV-2** montre clairement ces augmentations en les comparant avec le béton non confiné (béton témoin).

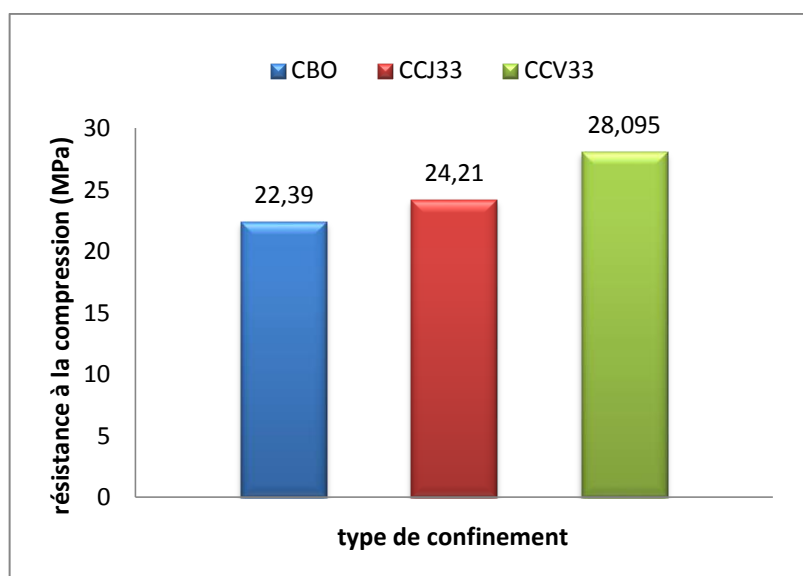


Figure IV-2 : Effet du confinement sur la résistance pour CCV33 et CCJ33.

IV-1-1-3-Influence du nombre de tours de confinement par PRFJ sur la résistance à la compression du cylindre en béton :

Il ressort des résultats donnés dans le **Tableau IV-3**, que le nombre de tours de confinement avec le PRFJ, influence la résistance à la compression qui s'améliore avec l'augmentation du nombre de tours du PRFJ.

Tableau IV-3 : Effet de nombre de tours de confinement sur la résistance à la compression du béton confiné :

variante	Type de confinement	Résistance MPa	La différence (MPa)	le pourcentage (%)
1	CCV33	28.095	5.705	25.48
2	CCJ33	24,21	1.82	8.12
3	CCJ43	28.42	6.03	26.93
4	CCJ53	29.20	6.81	30.41

La résistance a, en effet, augmenté considérablement, allant jusqu'à 29.20 MPa pour un confinement à 5 tours de PRFJ qui donne de meilleurs résultats en comparaison avec le confinement à 3 tours de PRFV, pour la même largeur. On enregistre ainsi, un gain de 30.41 % pour le PRFJ contre un gain de 25.48 % pour le PRFV.

Il est à noter que même la variante de confinement avec 4 tours de PRFJ à 3 cm, donne une résistance plus élevée que celle du béton confiné avec 3 tours de PRFV pour la même

largeur. On enregistre, en effet, pour cette variante, une valeur de 28.42 MPa correspondant à un gain de 26.93%.

L'histogramme ci-dessous illustre l'augmentation de la résistance en fonction du nombre de tours de confinement :

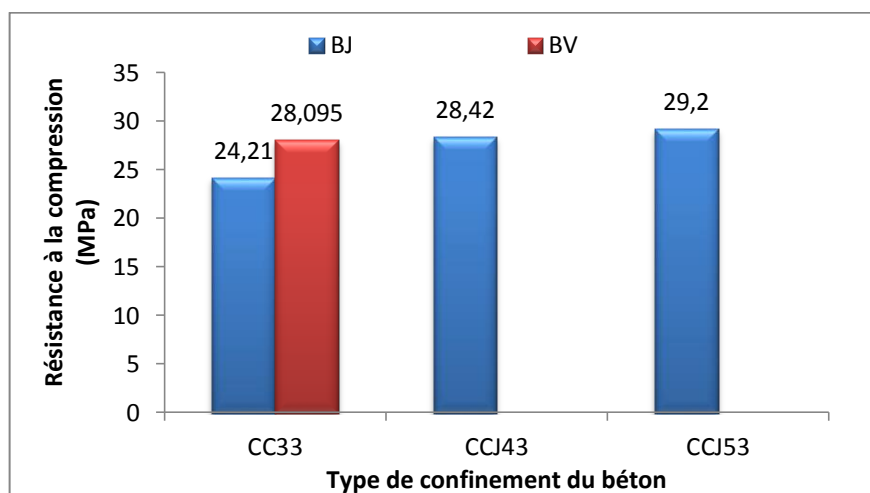


Figure IV-3 : Résistance à la compression pour différents nombre de tours de PRFJ en comparaison avec le confinement à 3 tours de PRFV pour la même largeur.

Il ressort de ces résultats que le confinement à 3 tours avec des bandes de PRFV de 3 cm de largeur peut être remplacé par un confinement de même type, mais à 4 ou 5 tours de PRFJ de même largeur.

IV-1-1-4- Influence de la largeur de la bande de confinement par PRFJ sur la résistance à la compression du cylindre en béton :

Les résultats consignés dans le **Tableau IV-4** montre clairement que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la largeur de la bande de PRFJ.

Tableau VI-4 : Effet de la largeur de confinement par PRFJ sur la résistance à la compression du béton.

variante	Type de confinement	Résistance (MPa)	La différence (MPa)	Le pourcentage (%)
1	CCV33	28.095	5.705	25.48
2	CCJ33	24.21	1.82	8.12
3	CCJ34	27.94	5.55	24.79
4	CCJ35	30.51	8.12	36.26

La résistance à la compression atteint une valeur de 30.51 MPa, pour un confinement avec des bandes à 3 tours et 5 cm, ce qui correspond à un gain en résistance de 36.26 %, contre un gain de 25.48 % pour un confinement avec des bandes de PRFV à 3 tours et 3 cm.

Il est à noter aussi que la variante de confinement à 3 tours et 4 cm de PRFJ présente un gain de 24.79 %, non loin de celui enregistré pour le PRFV à 3 tours et 3 cm.

En somme, le confinement en PRFV à 3 tours et 3 cm peut être remplacé par un confinement à 3 tours et 5 cm de PRFJ.

L'histogramme ci-dessous introduit la résistance à la compression en fonction de l'augmentation de la largeur de confinement, dont on distingue clairement l'amplification des résistances pour chaque variante de confinement.

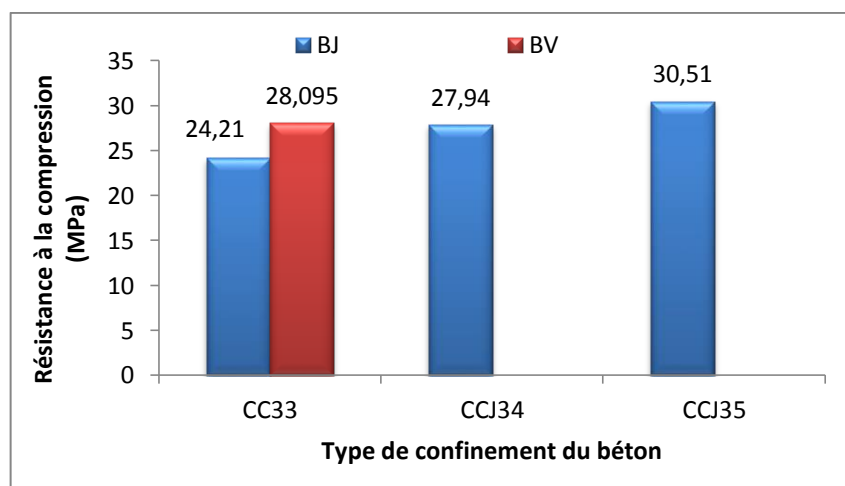


Figure IV-4 : Résistance à la compression pour différentes largeurs de PRFJ en comparaison avec le confinement à 3 cm de PRFV pour le même nombre de tours.

IV-1-1-5- Synthèse de l'effet de la largeur de la bande et du nombre de tours sur la résistance du béton :

De cette étude expérimentale on déduit que le confinement par le PRFV est efficace pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques du béton confiné comme il est mentionné dans les paragraphes précédents, or l'objectif de notre étude est de trouver un autre renfort non synthétique pour remplacer le verre. Donc on s'est intéressé au renfort en jute et les résultats obtenus sont remarquables comme illustré sur l'histogramme de la **Figure IV-5**.

Malgré que le verre possède des caractéristiques mécaniques bien meilleures que celles de jute et le confinement par PRFV a donné une résistance à la compression plus grande que celle donnée par le confinement par PRFJ en utilisant la même densité de confinement (3 tours et 3 cm de largeur), mais en faisant augmenter cette densité de 1 cm de largeur on remarque une amélioration rapide de la résistance à la compression du béton confiné qui se rapproche

de celle du béton confiné par PRFV. De même pour l'ajout d'un tour de PRFJ, on a trouvé une résistance équivalente à celle trouvée dans le cas du PRFV plus un gain en résistance de 0.325 MPa.

On a enregistré ainsi une augmentation de résistance en amplifiant la densité de confinement de 1 cm par rapport au cas précédent et cette résistance dépasse celle enregistrée pour le béton confiné par PRFV. Et le seuil en résistance enregistré dans cette étude est atteint lors de l'ajout d'un autre tour de PRFJ, cette résistance qui dépasse les 36% d'amélioration est plus grande que toutes les variantes étudiées y compris celle du béton confiné par le PRFV.

L'histogramme ci-dessous récapitule les différentes variantes de confinement et leurs effets sur la résistance à la compression des cylindres en béton :

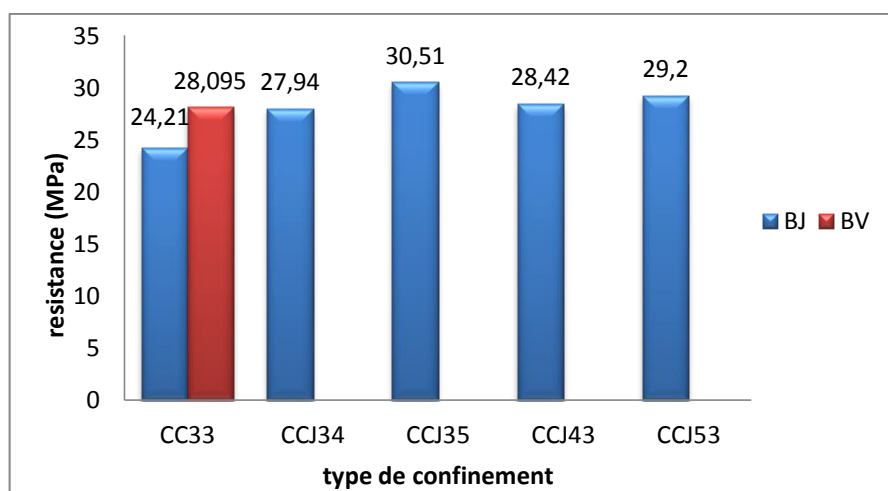


Figure IV-5 : Effet du confinement sur la résistance du béton.

IV-1-1-6-Comportement des cylindres confinés:

Le comportement du béton confiné à 3 tours et 3 cm de PRFV et celui des variantes de confinement en PRFJ susceptibles de le remplacer, à savoir CCJ34 et CCJ43, est examiné.

la réponse globale contrainte-déformation de l'éprouvette en compression sous l'effet du confinement avec le PRF est décrite par les courbes contraintes- déformations. Ces courbes permettent d'apporter plus de clarté par rapport au comportement des cylindres confinés.

On remarque que la courbe contrainte-déformation du béton confiné par PRFV est de même allure que celles des bétons confinés par PRFJ (**figure IV.5**), qui présentent des écarts infimes entre elles et celle du béton confiné par PRFV. L'écart maximal enregistré est de 0.68%.

Les courbes montrent clairement que la résistance et la déformabilité des spécimens confinés avec PRFJ, sont tributaires de la largeur de la bande et de la valeur du pas de l'hélice, résultats rapportés par Ali Ahmed et al. 2016, pour le même type de confinement mais avec PRFV.

Lorsque le béton cède, le composite est sollicité pour reprendre la totalité de la charge de compression jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.

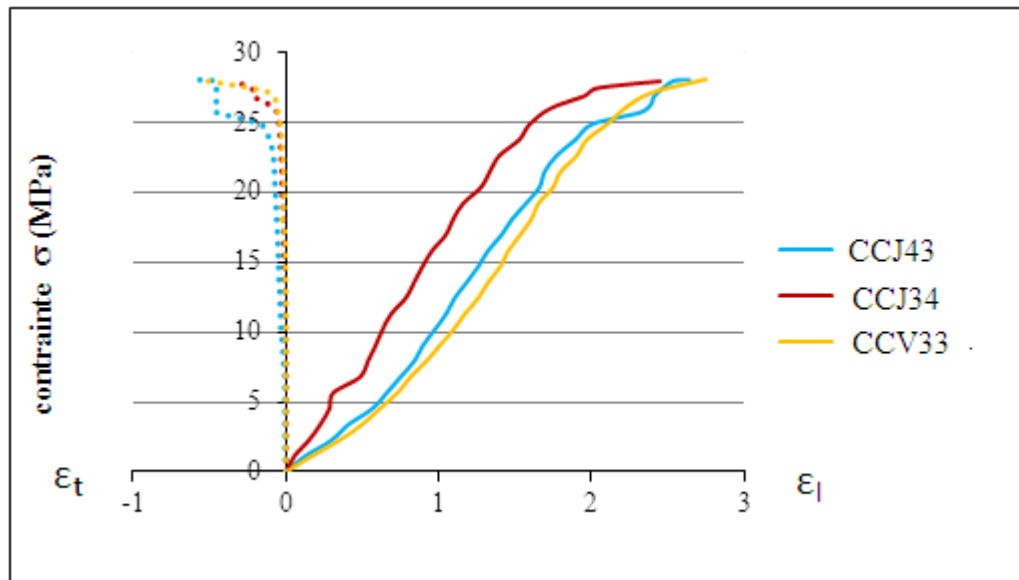


Figure IV-6 : Courbe contrainte-déformation.

Le comportement de l'éprouvette devient quasi ductile, puisque les déformations axiales des cylindres confinés augmentent pour atteindre un gain de 41.75 % des CCV33 par rapport au béton référence. De même, des gains de 26.28 % et 36.56 % sont respectivement enregistrés pour CCJ34 et CCJ43. Il est à noter que ce gain atteint 90.72 % pour CCJ53, ce qui démontre l'aptitude des éprouvettes confinées avec le PRFJ à se déformer axialement.

IV-2- Traitement statistique des résultats expérimentaux

Dans cette partie, seront réalisées deux analyses de la variance (ANOVA), dans le but de confirmer l'effet du nombre de tours et de la largeur de la bande sur la résistance à la compression du béton confiné hélicoïdalement avec un PRFJ.

IV-2-1- Analyse de la Variance (ANOVA) :

Elle a pour principe de tester l'effet d'un facteur qualitatif sur une variable quantitative mesurée au sein de l'échantillon étudié. La variable quantitative mesurée étant la résistance à la compression, où nous avons considéré trois répétitions de la mesure, tant dis que le facteur contrôlé est le nombre de tours, qui présente 3 modalités pour la première ANOVA, tant dis que la deuxième ANOVA sera réalisé pour le facteur largeur de la bande, qui présente trois modalités également.

Ces analyses ont été conduites sous le logiciel R et les résultats obtenus sont donnés dans les tables de l'ANOVA (**Tableau IV-5**) pour chaque facteur. Cette table résume l'ensemble des calculs du programme d'une ANOVA.

Tableau IV-5 : Table de l'ANOVA pour le facteur nombre de tours.

```

Analysis of Variance Table

Response: résistance
          Df Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
Ntrs      2 43.233 21.6163  5.8303 0.03921 *
Residuals 6 22.245  3.7076
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Les résultats révèlent une différence significative entre les différents nombres de tours considérés, puisque le logiciel donne une p-value égale à 0.03921 qui est inférieur au risque d'erreur fixé par les statisticiens à des valeurs qui n'excèdent pas 5%. Ceci permet de rejeter l'hypothèse testée qui stipule que le facteur nombre de tours n'a pas d'effet sur la résistance à la compression. Au final, nous pouvons affirmer que le nombre de tour a un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.

Tableau IV-6 : Table de l'ANOVA pour le facteur largeur de la bande.

```

Analysis of Variance Table

Response: résistance.1
          Df Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
largeur   2 60.275 30.1373  6.9896 0.02708 *
Residuals 6 25.871  4.3118
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Les résultats révèlent une différence significative entre les différentes largeurs considérées, puisque le logiciel donne une p-value égale à 0.02708 qui est inférieure au risque d'erreur fixé par les statisticiens à des valeurs qui n'excèdent pas 5%. Ceci permet de rejeter l'hypothèse testée qui stipule que le facteur largeur de la bande n'a pas d'effet sur la résistance à la compression. Au final, nous pouvons affirmer que la largeur a un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.

IV-3-Mode de rupture :

Tous les spécimens confinés présentent un comportement similaire et donc le même mode de rupture. La rupture ainsi produite a été quasi ductile sans doute à cause de l'énergie emmagasinée par le PRF durant le chargement des spécimens.

La rupture des cylindres (Ø150x300 mm) confinés avec des «PRFV» ainsi que «PRFJ» a été marquée par une rupture des fibres de verre et de jute dans le sens longitudinal du cylindre (une rupture par dilatation radiale du béton qui cause une rupture en traction des

fibres) et parfois, elle se propage suivant des lignes brisées sur la hauteur du spécimen (**Figure IV-6**).

Ce mode de rupture a été reporté par la majorité des essais existants réalisés sur des éprouvettes cylindriques en béton confinées avec des PRF (Teng et al. 2002, Lam et Teng 2003a, Berthet et al. 2005).



Figure IV-9 : Mode de rupture des éprouvettes confinées en PRFJ.

Ce mode de rupture est probablement dû à la nature bidirectionnelle des tissus en fibres de verre et de jute utilisées, ce qui a pour effet de redistribuer les contraintes sur toute la hauteur du spécimen. Les fibres orientées dans l'axe vertical (trame) supportent les fibres de la chaîne et les rendent solidaires les unes des autres. Dans tous les cas, l'enveloppe composite est déchirée sur presque toute la hauteur.

Après rupture, nous avons remarqué que le béton fissuré sous l'action de la charge de compression reste retenu à l'intérieur du confinement hélicoïdal, jusqu'à la rupture totale des bandes composites. C'est le comportement classique d'un béton confiné sous compression axiale.

IV-4-Conclusion :

Les différents résultats issus de l'analyse expérimentale montrent l'efficacité du confinement proposé en termes d'apport positif en résistance.

On a constaté que le confinement partiel des éprouvette en béton par des PRFJ apporte un gain en résistance qui varie avec la variation du taux de confinement, elle est de l'ordre de 8 % pour un confinement de 3 tours et 3cm et dépasse les 36% pour un confinement de 3 tours et 5 cm. Comme on a remarqué que l'évolution de la résistance est directement proportionnelle à l'augmentation de la largeur ainsi que le nombre de tours de confinement.

Comme on peut conclure de ces résultats que le confinement par PRFV peut être remplacé par PRFJ en augmentant la densité de confinement par ce dernier de 1 cm de largeur ou de 1 tours de confinement par PRFJ.

Le mode de rupture observé est le même pour les différents spécimens, il s'agit d'une rupture des fibres de verre et de jute dans le sens longitudinale du cylindre, cette rupture est dû à la nature bidirectionnelle des tissus utilisés.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives :

L'objectif de ce travail de recherche est d'examiner la possibilité d'utiliser des fibres de jute (fibres végétales) pour le confinement extérieur de béton comme alternative aux fibres de verre (fibres synthétiques), sachant que la protection de l'environnement est un enjeu majeur dans les prochaines décennies et le développement des matériaux dits « verts » devrait y contribuer de manière significative.

Cette étude, se veut une contribution à la compréhension du comportement mécanique des composites à renforts végétaux. Ces derniers complètent la grande famille des matériaux et apportent des avantages et des spécificités qu'il faut, certes, maîtriser. Le renforcement des polymères par des fibres de jute et leurs dérivés permet non seulement la valorisation d'une ressource naturelle renouvelable, mais également l'amélioration des propriétés mécaniques du béton confiné par ces polymères ; positionnant ainsi ces nouveaux matériaux, dans certains cas, en concurrence directe avec les composites à renforts en fibres de verre.

Après une étude bibliographique sur les causes des désordres et les différentes techniques de renforcement des structures en béton, en approfondissant nos recherches sur l'utilisation des matériaux composites comme solution efficace et approuvée par les multiples avantages qu'ils nous procurent, nous avons, ensuite, cité quelques travaux antérieurs sur le confinement des structures en béton en utilisant des composites à base de fibre synthétique et naturelle.

Nous avons présenté, par la suite, le deuxième chapitre dont l'objectif principal est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constituants, de leurs propriétés ainsi que de leurs structures. Notre intérêt s'est porté également sur les Polymères Renforcés de Fibres (PRF) et au comportement du béton confiné par ces derniers, en mentionnant d'une manière détaillée les matériaux composites utilisés dans notre étude expérimentale.

Le travail expérimental s'est particulièrement orienté vers la comparaison des charges à la rupture entre le béton seul, le béton confiné par PRFV et le béton confiné par PRFJ. L'étude a porté sur 21 spécimens cylindriques de dimension ($\phi 15 \times 30$ cm) : ces éprouvettes ont été réparties en trois séries, deux séries composées de 3 éprouvettes chacune, la première est un béton de référence (non confiné), l'autre série est un béton confiné hélicoïdalement par des bandes de 3 tours et 3cm de largeur de Polymère Renforcé de Fibres

de verre (PRFV). La troisième série est composée de 15 éprouvettes, qui sont réparties en 5 groupes de 3 éprouvettes chacun, confinées par différentes variantes de PRFJ.

L'ensemble des spécimens a été testé en compression simple et les résultats sont détaillés dans le quatrième chapitre. Nous avons pu, ainsi, montrer :

- Un gain de résistance ultime pour toutes les éprouvettes confinées allant jusqu'à 25.48 % pour le béton confiné par PRFV et 36.26 % pour les éprouvettes confinées par 3 tours et 5 cm de largeur du PRFJ.
- Que l'amélioration de la résistance ultime varie avec le nombre de tours ainsi que la largeur de la bande de confinement par PRFJ. L'étude statistique réalisée nous a permis de confirmer que les facteurs nombres de tours de l'hélice et largeur de la bande ont un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.
- Que les confinements à 3 tours et 4cm, ou à 3 tours et 5 cm ou bien même à 5 tours et 3 cm en Polymère Renforcé avec des fibres de Jute (PRFJ), pouvaient bien substituer le confinement à 3 tours et 3cm en PRFV.
- Que le mode de rupture observé pour toutes les éprouvettes était le même, il est marqué par une rupture des fibres de verre et de jute dans le sens longitudinal du cylindre (une rupture par dilatation radiale du béton qui cause une rupture en traction des fibres). Ce mode de rupture est probablement dû à la nature bidirectionnelle des tissus en fibres de verre et de jute utilisées, ce qui a pour effet de redistribuer les contraintes sur toute la hauteur du spécimen.

L'utilisation du composite à base de fibre végétale dans le renforcement des structures en béton est une solution qui peut s'avérer pratique en terme de gain de matière, de résistance, de facilité de mise en œuvre sans oublier la biodégradabilité de la fibre ainsi que le moins d'impacts qu'elle produit sur l'homme et sur l'environnement.

PERSPECTIVES :

En perspective, plusieurs aspects demandent à être complétés avant de pouvoir effectivement utiliser les fibres de jute pour le renforcement extérieur de structures en béton.

Une campagne d'essais avec plus d'échantillons serait nécessaire pour pouvoir prétendre à des propriétés mécaniques représentatives et exactes.

- Réaliser un confinement partiel pour renforcer les colonnes en béton endommagé par le PRFJ et autres polymères renforcé par des fibres naturelles.
- Tester la durabilité et la résistance au feu des enveloppes composites à base de fibres naturelles

- Réaliser une simulation numérique par le biais d'un code de calcul, et les résultats expérimentaux obtenus serviront au calibrage.
- Pour des raisons de fiabilité, l'utilisation d'une résine biosourcée ou biodégradable, époxy ou autre, permettrait d'obtenir un matériau véritablement écologique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

[ALI] : Ali Ahmed C. « optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, de structures endommagées : techniques- expérimentation et modélisation ».thèse de doctorat, 2016.

[BEL] : **Hicham BELHANNACHI** « réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé » Université Mentouri, Constantine, Thèse de Magister 2009.

[BEN] : **BEN CHABANE Tarik** « analyse expérimental des éléments de structure renforcés par des matériaux composites » Mémoire de Master 2013

[BENZ]: **Riad BENZAID** « Contribution à l'Étude des Matériaux Composite Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton » université mentouri Constantine, thèse de doctorat 2010.

[BER] : **J.M. BERTHELOT**, matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4eme édition, 2002.

[BERT] **J.M. Berthelot.** Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York. 1999.

[BOU] : **Mohamed El Hadi BOURAHLI** « Caractérisation d'un composite verre / époxy » université Ferhat Abbas Sétif 1, thèse de doctorat 2014.

[CAR] Centre d'animation régional en matériaux avancés - **CARMA**, Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origines renouvelable. CARMA, 2006.

[CON] Construction Moderne / Annuel Ouvrages d'art 2011 « Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton »

[DJE] **Djellad Zohra Amal** « contribution à l'étude des dalles renforcées par des composites : analyse expérimentale et modélisation »université mouloud Mammeri Tizi Ouzou, mémoire de magister 2015

[DEC] **R.P.C.Decathlon.** Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS, 2005.

[DO] **DO THI Vi Vi** « Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non » Université de Grenoble, 2011.

[FUK]: Fukuyama, H. et Sugano, S. (2000) “Studies Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake”, Cement and Concrete Composites, Vol. 22, pp. 59-79.

[HAB] : Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh « Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton ». Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp. 264, 2010, 978-613-1-55146-8.

[HAL] : Anne HALLONET « Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin - Application au renforcement de structures en béton par collage externe ». Université Claude Bernard Lyon 1, Thèse de doctorat 2016.

[INT] International Journal of Textile Science 2012, 1(6): 84-93 DOI: 10.5923/ j.textile.20120106.05 « Jute Composites as Wood Substitute ».

[KHE]: KHELOUI Fatma « modélisation du comportement à la fatigue d'élément de construction en béton de fibre » université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, thèse de doctorat 2012.

[LAU] : Laurent Gornet, Généralités sur les matériaux composites, <http://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296/fr/> .

[MAP] : MAPEI – Siège social des Amériques 1144 East Newport Center Drive Deerfield Beach, Floride 33442 1 888 US-MAPEI (1 888 876-2734) / 954 246-8888 « Polymères renforcés de fibres (PRF) »

[MAT] : Anh Dung NGÔ – Daniel Poirier , Matériaux composites MEC620.

[MER] : Merdas Abde-ELGHANI, « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA » Université Des frères Mentouri-Constantine, Thèse de Magister2005.

[MOH] : Mohamed El Hadi BOURAHLI « Caractérisation d'un composite verre / époxy ». UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF 1. thèse de doctorat 2014.

[MIC]: F. Michaud, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage » université Laval thèse Phd 2003.

[MICH] **Michel LeBlanc** « Confinement de colonnes de béton circulaires à l'aide de fibre de carbone » ingénieur Montréal, Septembre 2000.

[MIR] : **Mirmiran, A., Shahawy, M. Samaan, M. et El Echary, H.** (1998) “Effect of column parameters on FRP-confined concrete”, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 2, No. 4, pp. 175-185.

[MON]: **Monti, G.** (2003) “Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP”, Technical report, Teheran, 22 July 2003, 29 p.

[MOU]: **MOUSSAOUI Boualem** « Apport du confinement du béton sur le comportement des éléments de structure au flambement » université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, mémoire de Magister 2011.

[NEN] : **A.Y. Nenonene**, « Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bio adhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage », université de Toulouse, thèse de doctorat 2009.

[NGU] : **Anh Vu NGUYEN** « Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques » université Blaise Pascal, thèse de doctorat 2015.

[OUA] : **OUAMMAR-AKILA** « les bétons à base de GBD résistance et vitesse à l'Ultrason et porosité ouverte ». Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, mémoire de fin d'étude 2014.

[OUL] : **OULD EL HACEN zein el abidine** « renforcement du béton par les matériaux. Composites » Université de Tébessa, Mémoire de Master 2016.

[SAM] : **Samaan, M., Mirmiran, A., et Shahawy, M.** (1998) “Model of confined concrete by fiber composites, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 1025-1031.

[SOU] **Soumaya Amina BENSALFIR** ; Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs.

[TOU]: **Toutanji, H.** (1999) “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets.” ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 3, pp. 397-404.

[YAH] : YAHIAOUI LAMIA « Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss) » UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF-UFAS. Mémoire de Magister 2011.

[YAH] : YAHIAOUI Souâd « étude expérimentale de la durabilité des éléments fissurés en béton armé rigidifiés par les matériaux composites » UNIVERSITE M'HEND BOUGARA DE BOUMERDES. Mémoire de Magister 2006.

[YOU]: Youcef SI YOUCEF « contribution à la compréhension du comportement des poteaux élancés en béton arme confines et renforcés par la fibre de carbone » Université de Bretagne Sud 2010.