

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE DES MATERIAUX**



-LMMC-

MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE : SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX

Option : Physique et mécanique des matériaux

Présenté par : M^{lle} YAHIAOUI Souâd

THEME

***ETUDE EXPERIMENTALE DE LA DURABILITE DES
ELEMENTS FISSURES EN BETON ARME RIGIDIFIES PAR
LES MATERIAUX COMPOSITES***

Soutenu le : 27 Mai 2006

Devant le jury composé de

M ^r BEZAZI B.	Professeur	UMBB	Président
M ^r AIT TAHAR K.	Maître de conférence	UMMTO	Rapporteur
M ^r BAHAR R.	Professeur	UMMTO	Examineur
M ^r ZERIZER A.	Maître de conférence	UMBB	Examineur
M ^r MEDDAHI A.	Maître de conférence	UMBB	Examineur

RESUME

Le travail proposé porte sur l'étude expérimentale du comportement mécanique des éléments de structure en béton armé renforcés ou / et réparés par application direct d'un tissu en fibres de verre sur le support en béton en utilisant la technique de marouflage.

Le but essentiel de cette étude réside, dans l'apport en retour de rigidité et de résistance aux éléments endommagés, après le renforcement.

Une caractérisation expérimentale du comportement mécanique par essai de compression axiale et de traction par flexion est réalisée, en considérant deux approches, à savoir l'application du composite avant fissuration et après fissuration et en utilisant deux types de chemisage, à savoir un demi chemisage et un chemisage complet de la section transversale tout le long de l'élément.

Mots clés : béton, matériaux composite, rigidité, ductilité, fissuration, essai, rupture

ABSTRACT

The work suggested concerns the experimental study of the mechanical behavior of the elements of structure out of concrete reinforced or / and repaired by application direct with a glass fiber fabric on the concrete support by using the technique with taping.

The essential goal of this study resides, in the contribution in return of rigidity and strength to the elements damaged, after the reinforcement.

An experimental characterization of mechanical behavior by test of axial compression and tensile per inflection is carried out, by considering two approaches, namely the application of the composite before cracking and cracking and by using two types of lining, namely a half lining and a complete lining of the cross section out along the element.

Key words: composite concrete, materials, rigidity, ductility, cracking, test, failure.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué d'une part au laboratoire « LMMC » de l'université de Boumerdes, et d'autre part, au niveau des laboratoires CETIM de Boumerdes et CNERIB -Soudania, dirigé par mon encadreur Monsieur K. AIT TAHAR maître de conférence à l'UMMTO ; à qui j'exprime ma profonde gratitude pour m'avoir suivi et dirigé ; sa détermination et ses qualités humaines m'ont apporté un soutien moral important ; qu'il soit spécialement et sincèrement remercié pour son aide constante.

Mes vifs remerciements vont également vers Messieurs, les professeurs, ABADLIA M.T. et BEZZAZI B. pour l'aide, l'encouragement et les moyens didactiques qu'ils ont mis à ma disposition pour mener à terme mon travail.

Je remercie tous les membres du groupe mécanique du laboratoire LMMC, en particulier HACHEMANE B. et BELKORICHI B. sans oublier les laborantins

Un grand merci à tout le personnel du laboratoire CETIM de Boumerdes et du centre national CNERIB de Soudania en particulier Mr BELLAL et Mr MEZIANI, pour m'avoir aidé à réaliser l'essentiel de mes essais mécaniques et à mener à terme la partie expérimentale.

Je remercie tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et juger ce travail, je leur exprime toute ma gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.

DEDICACES

A mes chers parents.

A mes frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I. Pathologie et techniques de réparation des éléments fissurés en béton armé

I.1- Généralités.....	5
I.2-Comportement pathologique des ouvrages.....	7
I.2.1. Principales causes de désordres affectant les ouvrages en béton armé	7
I.2.2. Les différents types de fissures.....	11
I.3. Techniques de renforcement et réparation.....	14
I.3.1 Gainage.....	15
I.3.2.. Injections.....	16
I.3. 3. Adjonction d'armatures complémentaires.....	16
I.3.4. Béton projeté.....	17
I.3.5. Tôle colée.....	17
I.3.6. Précontrainte additionnelle.....	18
I.3.7. Renforcements par matériaux composites.....	18
I.4. Conclusion du chapitre.....	21

Chapitre II. Matériaux composites : définitions et performances mécaniques

II.1 Généralités sur les matériaux composites.....	24
II.2. Définitions.....	24
II.3. Composition des matériaux composites.....	24
II.3.1. Les principales fibres.....	27
II.3.2.Procedes d'élaboration des fibres.....	31
II.3.3. Principales combinaisons.....	32
II.4.Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	33
II.5. Utilisation des matériaux composites.....	33
II.6. Application des MC dans le génie civil.....	34
II. 7. Comportement mécanique d'un composite UD.....	35
II.8. Détermination expérimentale.....	38
II.9. Conclusion du chapitre.....	42

Chapitre III. Identification expérimentale des matériaux utilisés et technique de réalisation proposée

III.1- Introduction.....	45
III.2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	46
III.2.1. Constituants du béton.....	46
III.2.2. Constituants de matériaux composites.....	56
III.3- Préparation et confection des corps d'épreuve.....	59
III.3.1. Confection de béton.....	60
III.3.2. Procédés de mise en œuvre du renfort.....	65
III.4- Conclusion du chapitre.....	70

Chapitre IV. Caractérisation expérimentale du comportement mécanique

IV.1. Introduction	72
IV.2.Caractérisation expérimentale du comportement mécanique.....	73
IV.2.1. Essais de résistance à la compression.....	74
IV.2.1.1 Description de l'essai.....	74
IV.2.1.2. Résultats des essais.....	75
IV.2.1.3. Mode de rupture observé.....	79
IV.2.2. Essai de résistance à la traction par flexion.....	80
IV.2.2.1. Description de l'essai.....	80
IV.2.2.2. Résultats de l'essai de flexion	82
IV.2.2.3. Mode de rupture.....	89
IV.3. Analyse des résultats et conclusion.....	93

CONCLUSION GENERALE.....	97
---------------------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	99
---	-----------

Liste des tableaux et figures

Tableaux

Tableau I.1. Performances du câble composite.....	19
Tableau II.1. Différents types de verres filables.....	27
Tableau II.2. Composition des verres de type E,D et R.....	28
Tableau II.3. Synthèse d'utilisation des résines et renforts.....	32
Tableau II.4. Expressions des modules de l'ingénieurs en fonctions des coefficients de rigidité et de souplesse.....	37
Tableau III.1. Analyse granulométrique du gravier 8/15- NF P18-560.....	47
Tableau III.2. Analyse granulométrique du gravier 15/25- NF P18-560.....	47
Tableau III.3. Analyse granulométrique du sable 8/15- NF P18-560.....	48
Tableau III.4. Equivalent de sable.....	49
Tableau III.5. Mesure des masses volumiques, du coefficient d'absorption et de Porosité.....	50
Tableau III.6. Composition chimique du sable et du gravier.....	51
Tableau III.7. Composition minéralogique du sable et du gravier.....	51
Tableau III.8. Caractéristiques physiques du ciment.....	53
Tableau III.9. Composition chimique du ciment.....	53
Tableau III.10. Composition minéralogique du ciment.....	54
Tableau III.11. Caractéristiques mécaniques du ciment.....	54
Tableau III.12. Caractéristiques physiques de la résine époxy.....	56
Tableau III.13. Caractéristiques mécaniques de la résine époxy.....	57
Tableau III.14. Composition chimique de la fibre de verre.....	58
Tableau III.15. Caractéristiques mécaniques de la fibre de verre.....	59
Tableau III.16. Composition du béton selon la formulation Dreux Gorisse.....	61
Tableau IV.1 Résultat de l'essai de compression sur le béton témoin.....	75
Tableau IV.2 Résultat de l'essai de compression sur le béton fissuré réparé par Chemisage.....	75

Tableau IV.3 Résultat de l'essai de compression sur le béton non fissuré renforcé par chemisage.....	75
Tableau IV.4 Résultats effort (contrainte)-déplacement longitudinal des différents types de béton en compression.....	76
Tableau IV.5. Eléments de comparaison pour les différents types de béton en compression.....	76
Tableau IV.6 Résultats de l'essai de flexion sur le béton témoin	
Tableau IV.7 Résultats de l'essai de flexion sur le béton non fissuré renforcé par demi-chemisage.....	82
Tableau IV.8 Résultats de l'essai de flexion sur le béton non fissuré renforcé par chemisage complet.....	82
Tableau IV.9 Résultats de l'essai de flexion sur le béton fissuré réparé par demi-chemisage.....	82
Tableau IV.10. résultats de l'essai de flexion sur le béton fissuré réparé par chemisage complet.....	83
Tableau IV.11 Résultats force (contrainte)- flèches des différents types de béton en compression.....	83
Tableau IV.12. Eléments de comparaison pour les différents types de béton en flexion.....	84

Figures

Figure I.1. Fissuration d'une poutre en béton armé en milieu salin.....	09
Figure I.2. Fissuration de poutres et de poteaux d'une structure âgée atteinte d'alcali réaction.....	10
Figure I.3. Impact provoqué par un camion hors gabarit sur un tablier de pont...	11
Figure I.4 Câble composite de précontrainte.....	19
Figure II.1. Organigramme des principaux matériaux de renforts.....	25
Figure II.2. Organigramme des principales familles de matrices.....	26
Figure II.3. Formation linéique.....	29
Figure II.4. Différentes formes de tissage.....	30
Figure II.5. Formes surfaciques.....	31
Figure II.6. Matériau composite unidirectionnel.....	35
Figure II.7. Cellule élémentaire d'un composite unidirectionnel.....	36

Figure II.8. Traction longitudinal.....	39
Figure II.9. Traction transversale.....	40
Figure II.10. Traction hors axe.....	41
Figure III.1. Analyse granulométrique du sable et du gravier NF P18-560.....	48
Figure III.2 Evolution de la résistance à la flexion du ciment.....	55
Figure III.3 Evolution de la résistance à compression du ciment.....	55
Figure III.4. Malaxeur à axe vertical de capacité 65l.....	61
Figure III.5. Affaissement du béton mesuré par le cône d'Abrams.....	62
Figure III.6. Ferrailage placé à l'intérieur du moule.....	63
Figure III.7. vibration du béton à l'aide de table vibrante.....	64
Figure III.8 Finition de l'opération de moulage.....	64
Figure III.9. Faces rectifiées par coulage d'une couche de soufre.....	65
Figure III.10 Appareillage d'essai et fissuration des éprouvettes par essai de flexion.....	66
Figure III.11. Appareillage d'essai et fissuration des éprouvettes par essai de compression.....	66
Figure III.12 Eprouvettes après application du renfort composite.....	69
Figure IV.1. Essai de compression.....	74
Figure IV.2. Courbe Contrainte-Déplacement selon le type de béton.....	77
Figure IV.3. Variation de la masse volumique selon le type de béton.....	77
Figure IV.4. Variation de la force de rupture selon le type de béton.....	78
Figure IV.5 Variation de la contrainte de rupture selon le type de béton.....	78
Figure IV.6. Variation de la déformation à la rupture selon le type de béton...	78
Figure IV.7. Machine de flexion -TONI TECHNIK- 200KN	81
Figure IV.8. Banc d'essai de flexion.....	81
Figure IV.9 Variation de la masse volumique selon le type de béton.....	84
Figure IV.10. Courbe Contrainte-Déplacement selon le type de béton.....	85
Figure IV.11. Courbe Contrainte-Déplacement selon le type de béton.....	85
Figure IV.12. Courbe Contrainte-Déplacement selon le type de béton.....	86
Figure IV.13. Courbe Contrainte-Déplacement selon le type de béton.....	86
Figure IV.14. Courbe Contrainte-Déplacement selon le type de béton.....	87
Figure IV.15. Variation de la force de rupture selon le type de béton.....	87

Figure IV.16. Variation de la contrainte de rupture selon le type de béton.....	88
Figure IV.17. Variation de la déformation à la rupture selon le type de béton....	88
Figure IV.18. Mode de rupture du béton témoin.....	90
Figure IV.19. Mode de rupture du béton réparé/renforcé par demi chemisage...	91
Figure IV.20. Mode de rupture du béton non fissuré renforcé par chemisage Complet.....	92
Figure IV.21. Mode de rupture du béton fissuré réparé par chemisage complet..	93

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, la réfection et le renforcement des ouvrages en béton armé prennent de plus en plus de l'importance dans la construction. Plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des armatures, la fissuration du béton, des changements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution de normes, des accidents (choc contre un élément de structure), l'endommagement par un tremblement de terre, la prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, etc.

En général, la réparation permet de compenser les pertes de rigidités ou de résistances. Le renforcement améliore les performances et la durabilité de l'ouvrage.

Les méthodes classiques de renforcement et de réparation comme l'augmentation de section par l'ajout de nouvelles barres d'armatures (renforcement par ferrailage additionnel) ou d'un nouveau béton (augmentation de la section transversale), sont souvent difficiles à réaliser, très onéreuses et nécessitent une intervention lourde sur la structure.

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. Dès le milieu des années soixante, on a commencé à appliquer des lames d'acier sur des structures en béton. Ces dernières sont collées à la surface du béton à l'aide d'une résine époxy. Cette méthode constitue une avancée majeure dans le domaine de la réfection, car elle simplifie grandement, le travail par rapport aux méthodes traditionnelles. Toutefois, des problèmes de corrosion de l'acier mettent en péril la sécurité de ce type de renforcement [3].

Afin de remédier à ce phénomène de corrosion, l'utilisation des matériaux non métalliques s'est avérée efficace, ce fut l'apparition des matériaux composites en particulier, les FRP (Fiber Reinforced Polymer). Ces matériaux ont été adoptés dans le domaine de la construction vers les années soixante dix, au Japon, au USA et en Europe [7,8].

Actuellement, on recense de nombreuses recherches menées sur l'utilisation des FRP pour le Renforcement de colonnes par confinement et pour le renforcement en flexion de poutres et de dalles [1,5,6,9,24].

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. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique et phonique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions.

Dans chacun des marchés d'application (bâtiment, automobiles, électricité, équipements industriels,...), les performances citées auparavant sont à l'origine de solutions technologiques innovantes [10].

Dans la pratique de la construction, trois qualités de fibres se sont imposées : les fibres de verre, de carbone et d'aramide. Le choix entre ces fibres dépend d'une part, de leurs caractéristiques intrinsèques, de leur coût et de leur compatibilité mécanique avec le support à renforcer.

L'étude entreprise porte sur le développement d'une méthode de renforcement ou/ et de réparation des structures en béton armé par application de tissus composites en fibres de verre, dans le but d'assurer un certain retour de rigidité et d'augmenter la durabilité.

Cette étude est présentée en quatre chapitres :

Le premier chapitre 'Pathologie et techniques de réparation des éléments fissurés en béton armé', est totalement consacrée à une synthèse d'une recherche bibliographique sur la vulnérabilité et le comportement mécanique des structures en béton armé. Les différentes techniques de renforcement ou/ et de réparation par utilisation de différents matériaux, en particulier les matériaux composites y sont présentées.

L'analyse de cette recherche, nous a conduit vers l'utilisation des matériaux composites comme renfort assurant un retour de rigidité et de résistance. Ceci, justifie notre intérêt pour ces matériaux, qui seront largement développés dans le chapitre qui suit.

Le deuxième chapitre 'Matériaux composites : définition et performances mécaniques' définit les matériaux composites ainsi que leur composition, leurs constituants, leurs propriétés mécaniques, géométriques, etc.

Vu les performances du tissu composite en fibres de verre, sa disponibilité sur le marché Algérien, son coût moins prohibitif par rapport aux autres fibres, nous avons opté pour son utilisation dans la réparation et le renforcement des corps d'épreuves en béton armé.

Le troisième chapitre intitulé ' Identification expérimentale et technique de réalisation proposée'. Est constitué de deux parties.

La première partie présente les résultats de la caractérisation mécanique, physique et chimique des différents constituants de base des matériaux utilisés, à savoir, le béton armé et les matériaux composites constitués de tissu de verre et d'une résine époxy. La deuxième partie, expose les différentes étapes de formulation, de confection et d'élaboration des corps d'épreuve, et particulièrement le procédé proposé, de mise en œuvre du renfort composite.

La technique de renforcement adoptée consiste à une application directe par marouflage, du tissu imprégné d'une matrice époxyde sur le support de béton.

Dans le quatrième chapitre ' Caractérisation expérimentale du comportement mécanique' sont décrits les essais d'écrasement des corps d'épreuve jusqu'à la rupture. L'essai de compression axiale et l'essai de traction par flexion.

Deux cas y sont étudiés, le premier consiste à appliquer le tissu en fibres de verre sur les éléments déjà fissurés et le deuxième consiste à l'appliquer sur un béton non fissuré (béton sain). Pour chaque cas deux types de chemisage sont adoptés. Le chemisage complet de la section transversale et le chemisage jusqu'à la position de l'axe neutre, tout le long de l'élément.

Tous les résultats obtenus, sont présentés et analysés dans ce chapitre.

Pour finir, ce mémoire se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

PATHOLOGIE ET TECHNIQUES DE REPARATION DES ELEMENTS

FISSURES EN BETON ARME

Chapitre I. PATHOLOGIE ET TECHNIQUES DE REPARATION DES ELEMENTS FISSURES EN BETON ARME

I.1. GENERALITES

L'analyse du comportement pathologique des ouvrages d'art peut mettre en évidence des désordres et des comportements particuliers qui trouvent leurs explications dans la dégradation des matériaux constitutifs (corrosion des aciers, vieillissement physico-chimique des bétons, alcali réaction, fluage, relaxation...), qui peuvent aussi s'expliquer par d'éventuelles erreurs de conception (erreurs de calcul, défauts d'exécution) ou la prise en considération de sollicitations accidentelles (séisme, choc, impact).

L'intégrité des structures en service dépend essentiellement de la variation de leurs résistances au cours d'exploitation. Dans le secteur du génie civil ou de travaux publics, les fissures dues aux sollicitations dynamiques ou statiques, sont la cause principale des défaillances.

Il est donc nécessaire de protéger les structures, de les réparer et parfois de les renforcer.

Réparer une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu. La renforcer par contre, consiste à augmenter son niveau de service et en particulier, l'augmentation de sa ductilité et de sa résistance pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations non prises en compte dans les calculs (un séisme par exemple) [31].

L'étude pathologique de la vulnérabilité et du comportement mécanique des structures en béton armé endommagées a conduit vers l'utilisation des matériaux composites comme renfort assurant un retour de rigidité et de résistance.

Vu les performances mécaniques très élevées des matériaux composites (faible poids, résistances élevées ; performances vis-à-vis de la corrosion ; etc.) ils peuvent concurrencer les matériaux traditionnels [1].

Les matériaux composites sont définis comme étant l'association d'au moins deux matériaux différents. La matrice et le renfort. L'association de ces deux derniers permet de conjuguer leurs performances physiques et mécaniques et de donner un matériau dont les caractéristiques sont beaucoup plus élevées. L'intérêt d'utilisation de ce composite réside dans sa souplesse, sa facilité de mise en œuvre et sa grande contribution à rigidifier les structures endommagées.

Des recherches dans cet axe, ont été mises en œuvre. Elles consistent à renforcer les structures en béton armé par collage du renfort sur les faces externes. Ce qui a conduit à une étude approfondie du comportement de l'interface à la rupture et le mode d'endommagement et de décohésion des matériaux constituant l'interface [2,4,5,18,26,27].

Dans ce chapitre sont exposé les différentes causes d'endommagements des structures et des ouvrages en béton armé et sont données les techniques traditionnelles et nouvelles de réparation et de renforcement.

I.2. LE COMPORTEMENT PATHOLOGIQUE DES OUVRAGES EN BETON ARME

I.2.1. PRINCIPALES CAUSES DE DESORDRES AFFECTANT LES OUVRAGES EN BETON ARME

I.2.1.1. Dégradation des matériaux

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage.

Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants :

- Érosion, abrasion et choc

Les ouvrages les plus touchés par l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants et à l'action des vagues à chaque marée.

La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion .

- Altération physico-chimique du béton

L'eau et l'hygrométrie des conditions ambiantes sont à l'origine de différents mécanismes de dégradation du béton. L'eau, lors de sa percolation au sein du béton, dissout des constituants tels que la chaux et augmente la porosité du béton. Si, de plus, l'atmosphère est chargée d'anhydride sulfureux, le béton voit sa résistance mécanique diminuer et son niveau d'alcalinité chuter. Cette perte d'alcalinité peut aussi être induite par la carbonatation [11] du béton. La variation de la nature basique du milieu est une des causes de l'accélération de la corrosion des aciers.

Une autre cause de vieillissement du béton correspond aux mécanismes d'alcali réaction entre les granulats et le ciment. La formation de gels expansifs qui en résulte se traduit par un gonflement du béton et par le développement de fissures.

L'action de sulfates et de chlorures, présents particulièrement dans les sels de déverglaçage, se traduit par la formation d'étringite au contact de la chaux et des aluminates

du ciment qui s'expande et, en conséquence, fissure le béton. Les pertes de performances du béton favorisent la corrosion des armatures sous l'action combinée de l'eau et des chlorures [29].

- Action des cycles de gel -dégel

Selon le taux de porosité et de perméabilité des bétons, l'eau peut s'infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures. La dégradation par gel dégel du béton est amplifiée par des chocs thermiques causés par l'apport de chaleur dû à la fusion de la glace.

- Retrait du béton

L'élimination de la quantité d'eau en excédent dans la formulation d'un béton pour assurer des conditions d'ouvrabilité acceptables se traduit par des variations dimensionnelles du béton. Le retrait, gêné par la présence d'armatures, a tendance à solliciter le béton en traction dès son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures.

- Corrosion des armatures

Les différentes causes de fissuration des bétons décrites préalablement limitent la protection des armatures et favorisent la dégradation des aciers passifs ou des câbles de précontrainte en diminuant l'alcalinité du béton et en favorisant l'action des chlorures.

Le gonflement des armatures, par formation de rouille, qui en résulte, a tendance à accélérer les mécanismes de fissuration du béton, figure I.1.

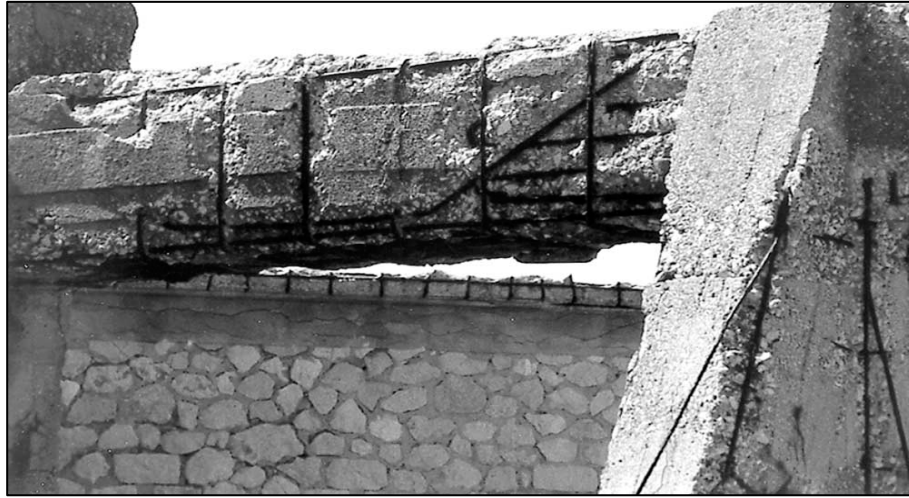


Figure I.1. Fissuration d'une poutre en béton armé en milieu salin

I.2.1.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution.

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement ou de fonctionnement de l'ouvrage.

Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou de ruptures non acceptables.

Aussi, une évaluation imparfaite des conditions de sollicitations cycliques des ouvrages et des lois de comportement en fatigue des matériaux est susceptible de remettre en cause les résultats de calcul et le dimensionnement pour une durée de vie escomptée.

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur les imperfections de coffrage, les défauts de bétonnage figure I.2, les incohérences du ferrailage ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage.

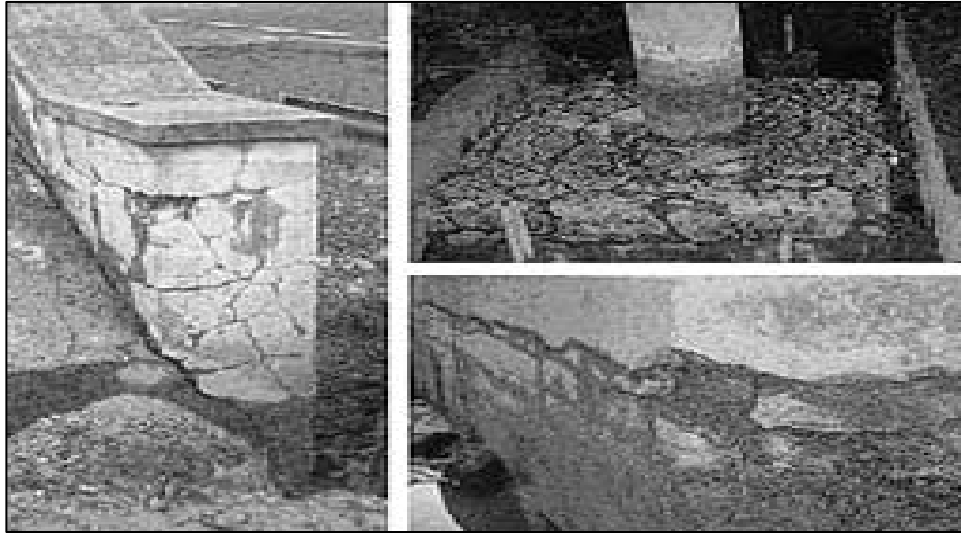


Figure I.2 Fissuration de poutres et de poteaux d'une structure âgée atteinte d'alcali réaction

I.2.1.3. Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage.

L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent.

Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles) qui ont été sous-estimées lors de l'exécution de l'ouvrage. C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiments vis-à-vis des sollicitations sismiques ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de pont, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules figure I.3[30].

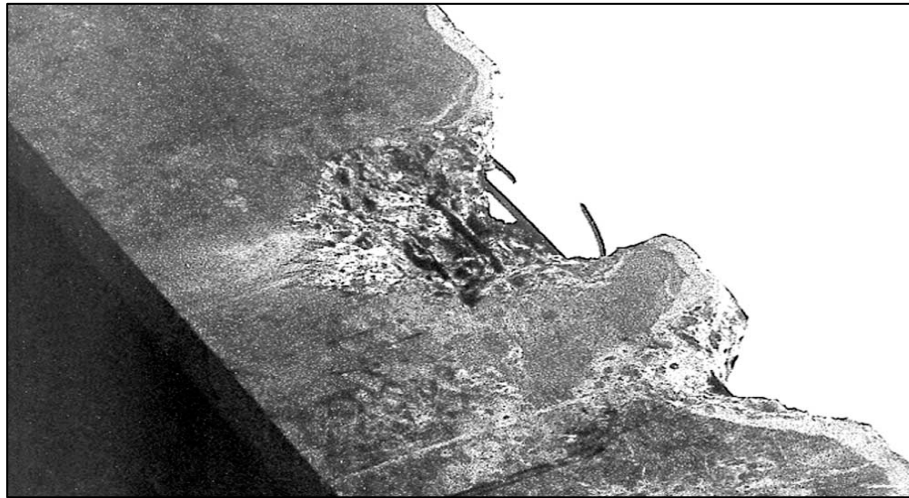


Figure I.3. Impact provoqué d'un camion hors gabarit sur un tablier de pont

I.2.2.LES DIFFERENTS TYPES DE FISSURES

a- Origine des fissures

Une fissure est la manifestation visible d'un état de contraintes anormal, de traction ou de cisaillement, qui a atteint la limite de rupture du matériau. En effet, si les scientifiques s'efforcent de classer les fissures suivant leur origine, il n'en demeure pas moins qu'elles sont toutes issues d'un dépassement de la contrainte limite de traction à un moment donné de la vie de l'ouvrage [12].

Les différents types de fissures sont les suivants :

- Les fissures de compression qui sont la conséquence du gonflement du matériau dû à l'effet de poisson.
- Les fissures de traction pure qui résultent d'une traction directe.
- Les fissures de flexion dues à l'allongement de la fibre tendue.
- Les fissures de cisaillement dues aux contraintes de traction principales.
- Les fissures de retrait dues à des efforts de traction superficielle conséquence d'une perte de volume du matériau.

- Les fissures thermiques ou les fissures hygrométriques dues à des efforts de traction engendrés par la contraction d'une pièce bridée.
- Les fissures dues au gel qui ont pour origine la rupture du béton sous la poussée due au gonflement de l'eau sous l'effet du gel.
- Les fissures par effet de corrosion dues à une augmentation de volume des armatures.

b- Caractéristiques d'une fissure

Les fissures sont caractérisées par :

L'âge

L'âge d'une fissure est difficile à cerner de façon précise quand elle n'est pas provoquée par une cause accidentelle et signalée. Néanmoins, la connaissance de cette donnée ne manque pas d'intérêt. On peut, selon les conditions ambiantes, se faire une idée de l'injectabilité de la fissure : en effet, une fissure risque avec le temps de se trouver partiellement obstruée par la formation de cristaux de calcite, la végétation ou la poussière et devenir alors difficilement injectable.

On admet couramment qu'une fissure « jeune » de moins de deux ans ne présente pas de difficulté d'injection et que le résultat est plus aléatoire pour des fissures de plus de deux années.

Le tracé

Le tracé d'une fissure se définit par son orientation et sa longueur mesurable sur l'ouvrage. L'orientation de la fissure est souvent révélatrice de son origine.

Lorsque la fissure est continue sur l'axe d'orientation, elle est dite fissure franche. Lorsque l'axe d'orientation est défini par plusieurs fissures successives, elle est dite discontinue. Le tracé d'une fissure est rarement rectiligne, donc rarement confondu avec son axe d'orientation.

L'ouverture

L'ouverture de la fissure peut s'évaluer facilement à l'œil nu sur son tracé en prenant un repère sur un réglet, ou au moyen d'appareils de mesure spécialisés.

Il est couramment admis de définir l'ouverture d'une fissure par l'ouverture maximale relevée sur le tracé.

La profondeur

Une fissure est dite traversante lorsqu'elle est visible sur au moins deux faces de la structure. Elle est dite aveugle quand elle est supposée traversante, mais débouche sur une face non accessible de la structure. Une fissure aveugle est souvent d'ouverture importante et peut donc laisser passer les fluides corrosifs – eau ou air.

Une fissure est dite de surface quand son ouverture est maximale en surface et devient nulle au sein du matériau. Sa profondeur peut néanmoins être importante si l'épaisseur du matériau est, elle-même, importante.

L'activité

L'activité caractérise la variation dimensionnelle de l'ouverture de la fissure dans le temps. On appelle fissures mortes les fissures dont l'ouverture reste constante quelles que soient les variations de températures ou de charges de l'ouvrage.

On désigne par fissures actives les fissures dont l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs (température, charges, vibrations, etc).

L'ouverture moyenne d'une fissure active est la demi somme de l'ouverture minimale et de l'ouverture maximale [12].

I.3. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT ET DE REPARATION DES ELEMENTS FISSURES EN BETON ARME

La maintenance des ouvrages est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et dans la mesure où les conditions de réparation sont de plus en plus difficiles. Elle consiste à protéger en assurant une meilleure étanchéité et en limitant la corrosion, à réparer en cherchant à compenser les pertes en rigidité et en résistance, à renforcer en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage [4].

Suivant l'importance et les causes de désordres, ou des insuffisances identifiées, le projet de réparation et/ou de renforcement est basé sur la mise en œuvre d'une ou de plusieurs techniques que l'on peut ranger dans l'une des cinq catégories suivantes [12].

- Les réparations de surface.
- La protection du béton.
- La régénération des matériaux.
- L'ajout de force (ou de déformations).
- L'ajout de matière.

On peut être amené à procéder :

- A des remises en état d'éléments de structures présentant des défauts visibles que l'on cherche simplement à camoufler ou à atténuer pour obtenir un aspect plus satisfaisant ; celles-ci consistent généralement en l'obturation de fissures, qui sont dues le plus souvent à l'action du retrait et des variations climatiques et qui n'apparaissent pas liées à des insuffisances de résistance mécanique. On procède à une injection de produit plastique dans les fissures que l'on a éventuellement élargies au préalable.
- Au renforcement ou à la réparation d'élément insuffisamment résistants.

Le renforcement ou la réparation des ouvrages en béton sont souvent réalisés par adjonction de matière dans les zones où les sections qui sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou de changements des conditions d'exploitation, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs

(problème de renforcement) ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradations (problème de réparation)

La solution retenue pour renforcer ou réparer un élément doit satisfaire aux impératifs suivants :

- Le monolithisme de l'élément doit être réalisé, afin de permettre un fonctionnement mécanique satisfaisant.
- Les qualités des matériaux d'adjonction doivent être au moins égales à celles des matériaux constitutifs de l'ouvrage à renforcer ou à réparer.

Les plus courants procédés de renforcement ou/et de réparation sont décrits dans les paragraphes suivants.

I.3.1. GAINAGE

L'utilisation de gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés.

Cette technique consiste à reconstituer ou à accroître la section d'un élément en service (surtout celle d'un élément travaillant en compression) en le gainant de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui-même en béton. Il est possible de gainer de béton des sections en acier ou en maçonnerie.

Les travaux de préparation des surfaces avant l'opération de gainage revêtent une importance primordiale.

Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinées à ménager un vide entre le coffrage même et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent [31].

I.3.2.INJECTION

C'est une opération qui consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.

Les éléments en béton armé, isolés ou en réseau, endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0,2mm et 2mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé.

Les éléments dont les fissures dépassent 2mm de largeur peuvent être réparés par injection de mortier époxydique [31].

Les travaux d'injection nécessitent une préparation des fissures : On ignore souvent l'état interne des fissures. Pour cela il est absolument nécessaire de procéder à leur nettoyage, avant toute injection, à l'air comprimé ou à l'eau sous pression.

I.3.3.ADJONCTION D'ARMATURES COMPLEMENTAIRES

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure.

Dans tous les cas, les armatures existantes conservées doivent faire l'objet de soins de manière à éviter la poursuite de leur dégradation.

Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. Il faut donc porter une attention particulière à la disposition et à l'ancrage de ces armatures.

Les armatures complémentaires peuvent s'inscrire dans la géométrie de l'élément (par exemple, en les disposant dans des engravures dimensionnées en fonction du diamètre de l'acier et des caractéristiques du produit d'enrobage) ou en surépaisseur (le treillis soudé

constitue alors souvent une bonne solution). La protection des armatures en surépaisseur est assurée par un béton coulé ou projeté.

Dans tous les cas, un enrobage minimal égal au diamètre des barres est nécessaire

I.3.4. BETON PROJETE

Cette technique, très au point et très utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrages endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires.

La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée.

Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact.

Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage.

Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé puis vibré.

La projection est possible dans toutes les directions et, en particulier, en plafond.

I.3.5. TOLES COLLEES

Ce procédé est un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés.

La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles et la réalisation du placage, doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées.

La colle est une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5mm à 1mm.les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur normalement limitée à 3mm

Le nombre de réparations de ce type est assez faible. En effet, d'une part il faut que le béton soit de qualité pour que les efforts puissent passer convenablement du béton aux tôles. D'autre part, l'expérience a montré que les tôles résistaient mal aux chocs (bâches flottantes, véhicules hors gabarit...) [12].

I.3.6. PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE

Une insuffisance de résistance vis-à-vis de la flexion ou l'effort tranchant d'une structure en béton arme peut être compensée par une précontrainte additionnelle. Ainsi, les sections, soumises au départ à une sollicitation de flexion simple, sont amenées à supporter une sollicitation de flexion composée.

I.3.7. RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BETON ARME PAR MATERIAUX COMPOSITES

L'étude du comportement pathologique des ouvrages en béton armé en béton précontraint, en charpente métallique, en bois, met en évidence des endommagements de matériaux et des structures dus à des erreurs de conception à des modifications de conditions d'exploitation, au vieillissement des matériaux. Suivant les différentes causes de désordre, les opérations de maintenance des ouvrages consistent à :

- Les protéger en limitant corrosion et en assurant de meilleurs conditions d'étanchéité.
- Les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance.
- Les renforcer en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage.

Les matériaux composites, grâce à leurs caractéristiques mécaniques élevées et leurs faibles poids propres, leurs très bonnes performances vis-à-vis de la corrosion, leurs aptitudes au formage et au moulage, sont des matériaux particulièrement intéressants pour remplir les fonctions de confortement des ouvrages du génie civil.

I.3.7.1. Technique de renforcement par précontrainte additionnelle :

En substitution des câbles métalliques, des joints pultrudés carbone-époxyde et verre-époxyde sont utilisés (figureI.7)

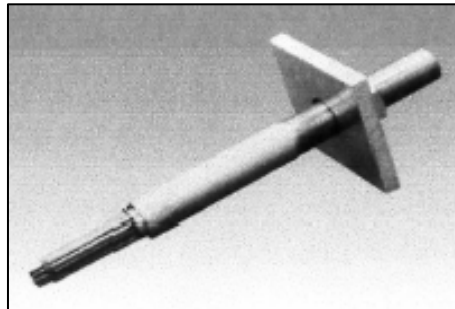


Figure I.7. Câble composite de précontrainte

Les avantages des câbles composites sont :

- Gains de poids.
- Très bonnes performances en fatigue et en fluage des renforts unidirectionnels.
- Les pertes de précontrainte peuvent être minimisées.

Tableau I.1. Performances du câble composite [32]

Caractéristiques	Spécifications
Matrice.....	Epoxyde
Fibre de carbone(%)	65
Module de Young..... (Gpa)	147
Résistance à la rupture..... (Mpa)	2 250
Allongement à la rupture..... (%)	1,5
Densité	1,6
Coefficient de dilatation(%)	2à3
Pourcentage de relaxation.....(°C ⁻¹)	0,68 × 10 ⁻⁶

I.3.7.2. Procédure actuelle de renforcement par collage de tissu composite

Cette méthode de renforcement se réalise en respectant les étapes suivantes :

1. Traitement de surface.
2. Application de la colle sur le support.
3. Dépose du tissu composite sous conditions de pression et de température.
4. Imprégnation et débullage des renforts.
5. Inspection régulière de l'état du composite (jauges,...)

- Modes de ruine

- Ruine du composite
- Ruine de l'interface
- Ruine du matériau renforcé au voisinage du renfort
- Vieillessement de l'interface

I.4. Conclusion du chapitre

Cette recherche bibliographique sur la pathologie et les techniques de réparation des structures de génie civil, nous a permis de conclure que :

Le renforcement des structures en béton armé par ajout d'armatures externes est une technique couramment utilisée depuis la fin des années 60. En effet, il est dans la plupart des cas plus rentable de réparer que de reconstruire.

Avec l'essor que connaît les matériaux composites, suite à leurs performances mécaniques, de plus en plus des techniques de renforcement et de réparation de structures de génie civil en utilisant ces matériaux sont développées et proposées.

La construction des bâtiments fait déjà un large usage des matériaux composites. En effet dans beaucoup de cas ils sont les seules à répondre, en même temps à de multiples exigences fonctionnelles, tout en conservant un prix de revient acceptable.

La synthèse de cette recherche bibliographique, nous a conduit d'une part à nous intéresser en premier lieu, aux matériaux composites, qui seront largement développés dans le chapitre qui suit, puis en second lieu , de proposer une technique de renforcement et de réparation par matériau composite .

Chapitre II

MATERIAUX COMPOSITES : Définitions et Performances mécaniques

Chapitre II. MATERIAUX COMPOSITES : Définitions et Performances mécaniques

II.1. GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

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 offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonctions, forme et matériaux, au sein des réalisations de systèmes de plus en plus performants. Légèreté, anisotropie, plurifonctionnalité sont des atouts pour ces matériaux. Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

II.2. DEFINITION

Comme l'indique le terme, « matériau composite » évoque un matériau différent des matériaux macroscopiquement homogènes habituels. On appelle maintenant de façon courantes « matériaux composites » des arrangements de fibres continues ou non d'un matériau résistant (le renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice conserve leur disposition géométrique aux fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce.

Le matériau ainsi obtenu est très hétérogène et très fortement anisotrope [28].

II.3. COMPOSITION DES MATERIAUX COMPOSITES

En général, un matériau composite est composé de deux constituants la 'matrice', élément qui est destiné au transfert de charges et à la protection du deuxième constituant qui est le renfort.

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite ; il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Il permet aussi d'améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc.

Les caractéristiques recherchées pour le renfort sont : les caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne comptabilité avec les matrices, facilité de mise en œuvre, faible coût.

Le renfort est sous forme lamellaire, granulaire ou fibreuse. Ces derniers se présentent suivant trois modes de mise en œuvre :

- Les fils : unidirectionnels : toutes les fibres sont orientées suivant une même direction.
- Les tissus : bidirectionnels : les fibres sont placées selon deux directions perpendiculaires.
- Les mats : multidirectionnels : les fibres sont dans tous les sens.

Les principaux matériaux de renfort sont :

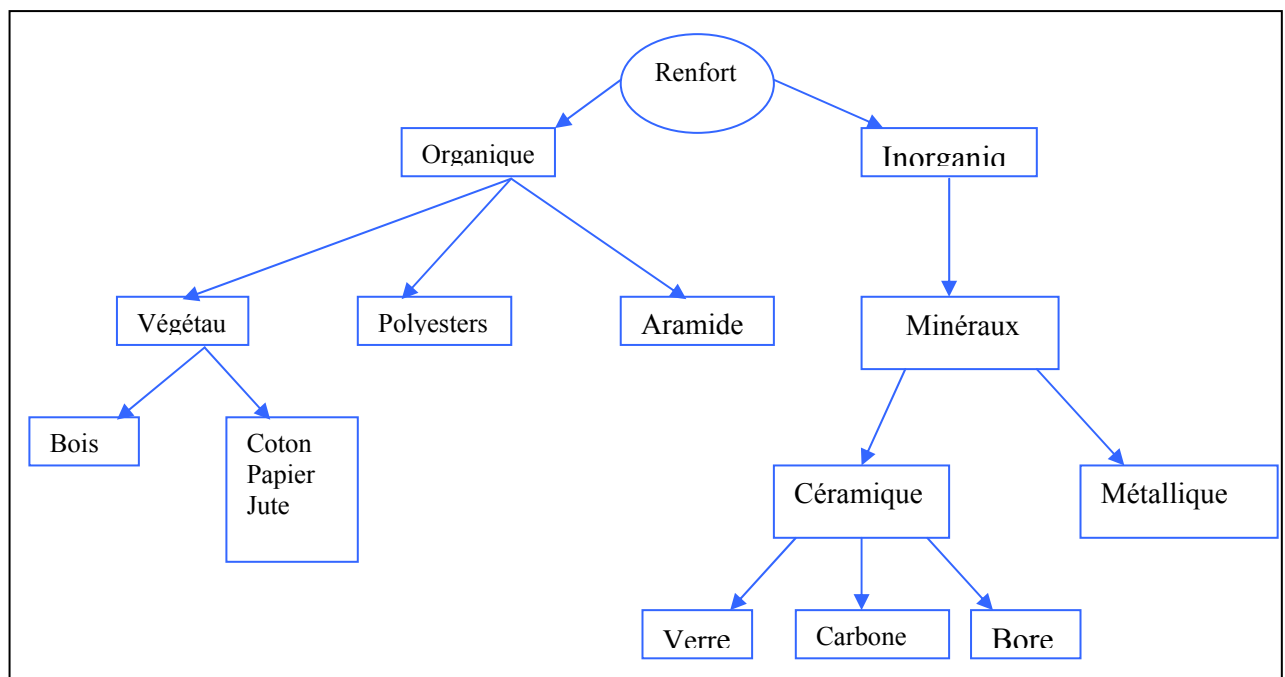


Figure II.1. Organigramme des principaux matériaux de renforts

La matrice lie les fibres du renfort entre eux et assure la répartition des contraintes c'est « l'emballage ». Elle assure également une protection chimique. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. On distingue trois grandes familles :

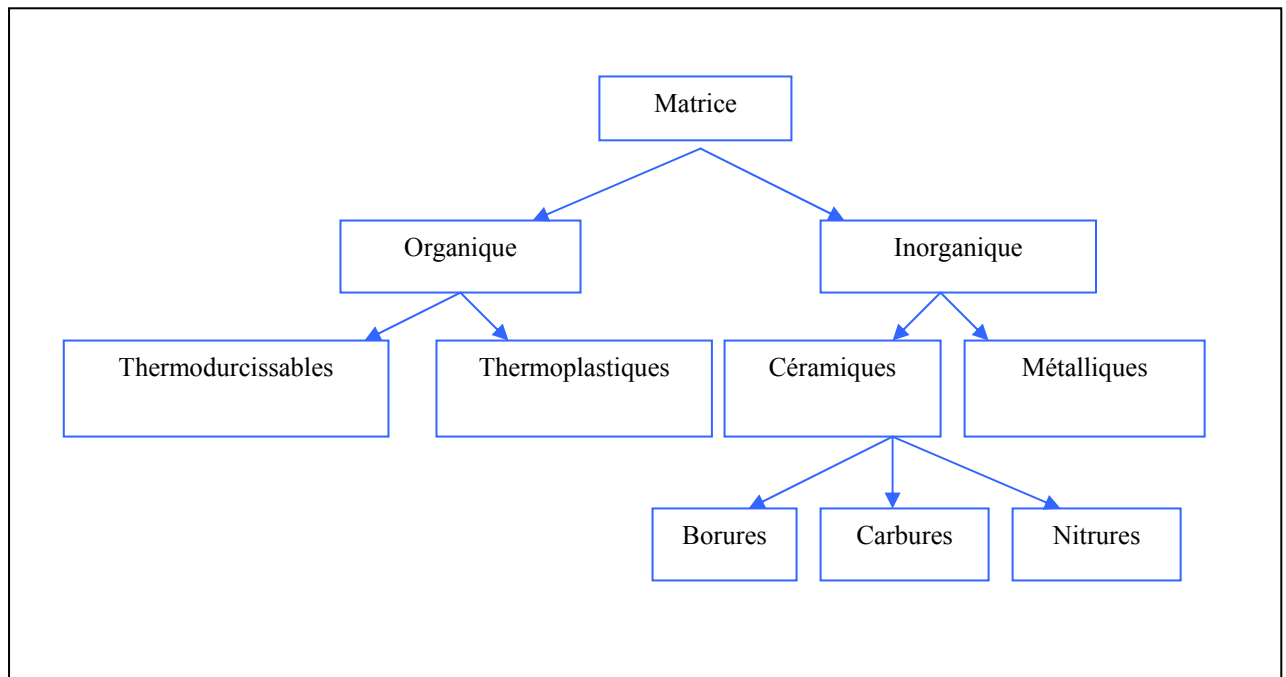


Figure II.2. Organigramme des principales familles des matrices

Actuellement les matériaux composites les plus répandus sont ceux à matrice organique. L'emploi des composites à matrice métallique ou céramique reste très limité.

Les matrices organiques sont obtenues à partir de polymères thermoplastiques ou thermodurcissables (résines). Pour la résine plastique, la mise en forme est assurée par un simple chauffage de la résine, puis le matériau prend la forme voulue lors du refroidissement. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie automobile pour les grandes séries.

Pour les résines thermodurcissables, la mise en forme est assurée avant la polymérisation, avant que le matériau ne devienne définitivement rigide.

II.3.1. LES PRINCIPALES FIBRES

- Les fibres de verre

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simple d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renfort utilisés actuellement dans les matériaux composites [13].

Suivant leurs compositions, différents types de verre filables peuvent être obtenus (tableau II. 1).

Tableau II .1. Différents types de verres filables [13]

Type	Caractéristiques générales	Domaine d'application
E	Bonnes propriétés électriques	Usage général (grande diffusion)
D	Hautes propriétés diélectriques	Construction de matériel électrique
C	Bonne résistance chimique	Les couches superficielles des structures exposées sur le plan chimique
R,S	Haute résistance mécanique	Réalisation des structures à hautes performances

Les différents composants des verres ont des fonctions spécifiques dans l'élaboration et les caractéristiques du produit final. On peut citer :

- L'élément de base ou vérificateur constitué par la silice.
- Le fondant, qui facilite l'élaboration du verre, notamment en abaissant la température de fusion du mélange.
- Le stabilisateur qui accroît les performances recherchées (mécaniques, diélectriques, etc.) [14].

Le tableau II.2, nous donne la composition des fibres de verre les plus utilisées

Tableau II.2. Compositions des verres de type E, D et R [13]

Constituants		Composition en masse (%)		
		Verre E	Verre D	Verre R
Silice	SiO ₂	53-54	73-74	60
Alumine	Al ₂ O ₃	14-15,5	/	25
Chaux	CaO	20-24	05-06	9
Magnésie	MgO			6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	6,5-9	22-23	/
Fluor	F	0-0,7	/	/
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	<1	0,1-0,2	/
Oxyde de titane	TiO ₂			/
Oxyde de sodium	Na ₂ O	<1	1,3	/
Oxyde de potassium	K ₂ O		1,5	/

- Les fibres de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une température de combustion de 1000°C à 1500°C.
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800°C à 2000°C [15].

- Les fibres d'aramide

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. On trouve deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- Les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances [15].

II.3.2 ARCHITECTURE DES RENFORTS

Les renforts se présentent généralement sous diverses formes : linéique, surfacique et structures multidirectionnelles.

a- Formes linéiques

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres (une dizaine), et ne peuvent par conséquent être utilisées sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes figure II.3.

L'unité de masse linéique est le tex ($1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$).

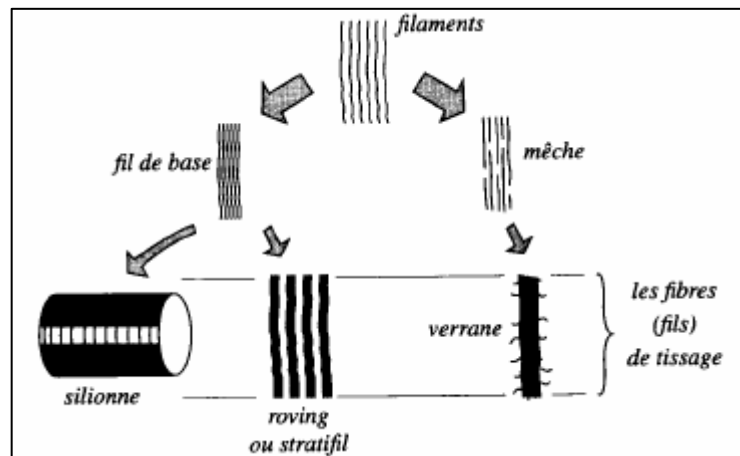


Figure II.3 : Formation linéique [28]

b- Formes surfaciques

- Tissus et rubans

Un tissu est un ensemble surfacique de fils ou de mèches. 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'entrecroisant avec les fils de chaîne figure II.4.

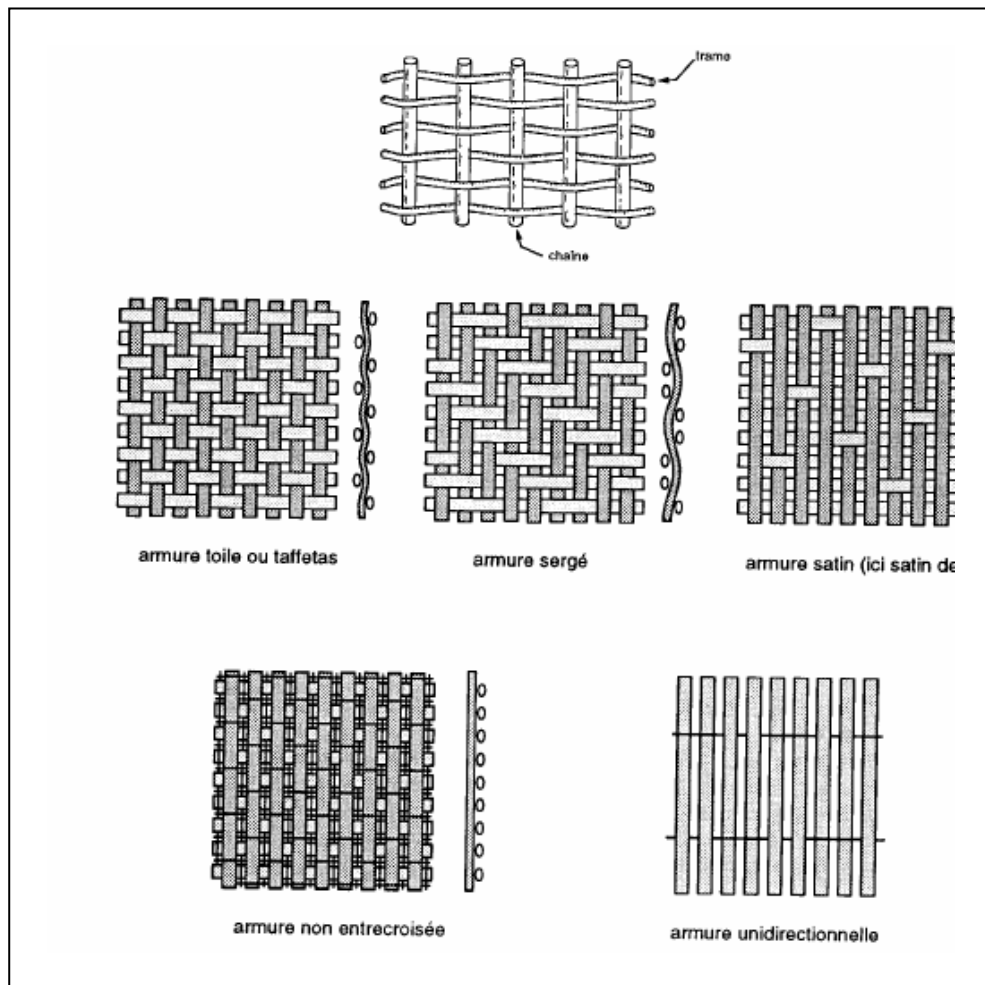


Figure II.4 : Différentes formes de tissage [13]

- Mats

Ce sont des nappes de fils continus ou coupés, 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.

c- Structures multidimensionnelles

- Tresses et préformes

Il est possible de réaliser des tresses ou préformes par tissage cylindrique ou conique d'un tissu tubulaire. Les fils s'entrecroisent en hélice.

- Tissus multidirectionnels :

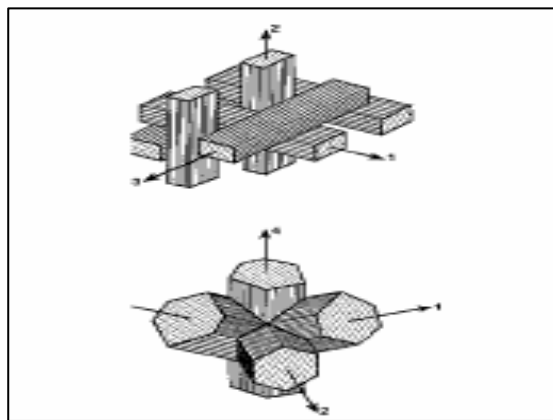


Figure II.5: Formes surfaciques [13]

II.3.3. PROCEDES D'ELABORATION DES FIBRES

- Les fibres de verre

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage de verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées par effet joule aux environs de 1250°C. 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, de diamètres déterminés (généralement de 5 à 15µm).

Ces filaments reçoivent préalablement une protection à fonctions multiples par dépôt d'un ensimage. Ce dernier permet d'assurer différents rôles :

- Compatibilité de la liaison fibre – matrice.
- Cohésion interfilamentaire (raideur du fil) pour qu'il soit manipulable.
- Protection contre l'abrasion générée par la mise en œuvre (frottement contre pièces métalliques).
- Elimination des charges électrostatiques dues aux frottements.
- Augmentation du mouillage de la fibre au cours de l'imprégnation.

On trouve généralement deux types commercialement disponibles : E et S.

II.3.3. PRINCIPALES COMBINAISONS DE RESINES ET DE RENFORTS

Le tableau II.3, présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites « hautes performances (HP) » ou « grande diffusion (GD) ». On notera que les composites HP se distinguent essentiellement des composites GD par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et, corollairement, par leur coût plus élevé [10].

Tableau II.3. Tableau de synthèse de l'utilisation des résines et renforts

Résines	Nom	Fibres de renforts				
		<i>Verre E</i>	<i>Verre D</i>	<i>Verre R</i>	<i>Carbone</i>	<i>Aramide</i>
Thermodurcissables TD	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastiques TP	Polypropylène	GD				
	Polyamide	GD		HP		

II.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MATERIAUX COMPOSITES

Avantages

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.
- Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvant, pétrole.

Inconvénients

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

II.5. UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES

L'éventail des applications des matériaux composites est très large :

- Electricité et électronique : isolants, supports de disjoncteurs et de circuits imprimés....
- Bâtiments et travaux publics : habitations, cheminées d'usine, piscines, coffrages, cloison, portes, sanitaires...
- Transports routiers : pièces de carrosseries, roues, calandres, ressorts de suspension, sièges...
- Transports ferroviaires : voitures, avant de motrices, gaines de ventilation...
- Transports maritimes : hovercrafts, vedettes, voiliers de compétition...
- Transports aériens : avion de tourisme, pièces d'avion : bords d'attaque, volets, dérives,

pales d'hélicoptères, disques de freins d'avion...

- Transport spatial : corps de propulseurs, réservoirs...
- Mécanique générale et divers : bras de robots manipulateurs, corps de vérins, tuyauteries, bouteilles de gaz sous pression.

II.6. APPLICATION DES COMPOSITES DANS LE GENIE CIVIL

II.6.1. COMPOSITES DANS LE BATIMENT

Les performances recherchées dans ce domaine sont :

II.6.1.1 Mécanique

L'amélioration des qualités des mortiers et bétons de ciment par l'adjonction de fibres divers, a donné le béton armé et précontraint, l'amiante, ciment et le béton plaqué etc.

Le renforcement n'est efficace que si certaines conditions de déformabilité relative permettent de transmettre aux fibres des efforts en rapport avec leur résistance, les conditions thermiques extrêmes, doivent être compatibles avec les coefficients de dilatation, modules d'élasticité et résistances mécaniques des matériaux associés.

L'amélioration de la résistance du béton à l'usure peut être obtenue par des revêtements superficiels de plastique chargés ou l'adjonction de poudres très dures (carborundum) au béton.

II.6.1.2 Amélioration de la sécurité

La rupture d'un produit utilisé dans le bâtiment peut ou non être dangereuse. Il est souvent nécessaire pour diverses raisons, que la mise hors service d'un élément de structures ne se traduit pas par la chute de pièces ou de morceaux dangereux. Dans cette classe, on peut trouver les verres armés, les vitrages de sécurité, divers produit verriers destinés aux alliages de fenêtres.

II.6.1.3 Amélioration de certaines propriétés physique

Dans cette catégorie, on trouve les associations de matériaux capables de remplir une fonction déterminée. Par exemple, le panneau d'allège qui est imperméable à l'eau et à l'air, il a un coefficient de transmission thermique K donné, une bonne résistance mécanique aux efforts statiques et aux chocs ainsi qu'un aspect décoratif, tant pour la face intérieure que pour la face extérieure. Il a aussi une bonne résistance aux agents agressifs extérieurs et intérieurs et une bonne tenue au gel et aux effets de l'insolation.

II.6.1.4 Recherche d'effet décoratif

La recherche de couleurs, de formes, d'états de surface particulières, peut conduire à des associations particulières de matériaux, tels qu'enduits plastiques, contre collage de matériaux divers, marbres et pierre reconstituées.

II.7. COMPORTEMENT ELASTIQUE D'UN COMPOSITE UNIDIRECTIONNEL[13]

Nous introduisons dans ce paragraphe la notion de matériau composite unidirectionnel. Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres.

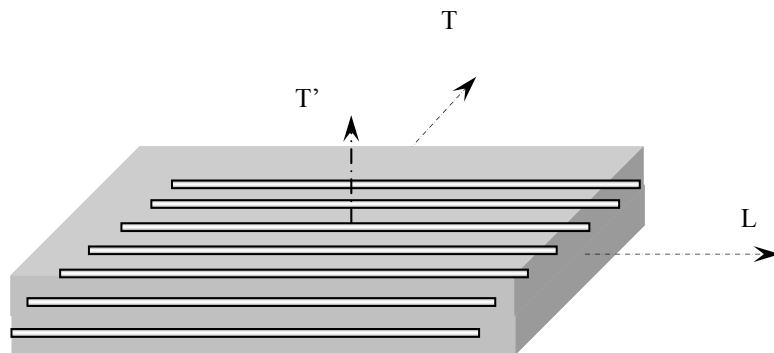


Figure II.6. Matériau composite unidirectionnel

Si l'on considère une cellule élémentaire de ce type de matériau, constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice. On obtient un matériau orthotrope possédant un axe de révolution. C'est pourquoi ce type de matériau est appelé *matériau orthotrope de révolution* ou *isotrope transverse*.

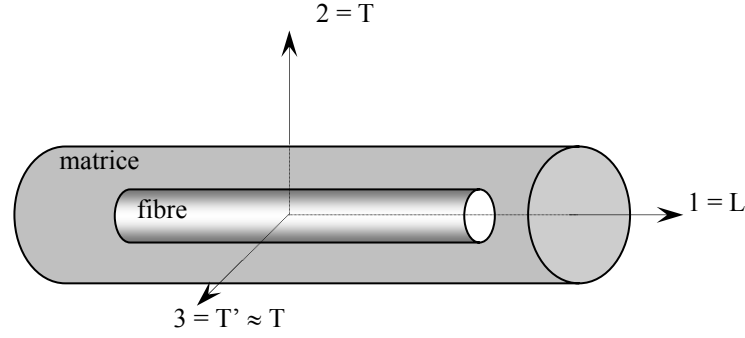


Figure II.7. Cellule élémentaire d'un composite unidirectionnel

Cette propriété conduit à la forme suivante des matrices de rigidité et de flexibilité :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (S_{22} - S_{23}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Les propriétés du matériau unidirectionnel sont déterminées par 5 constantes indépendantes.

Les expressions des modules de l'Ingénieur sont résumées dans le tableau II.4.

Tableau II.4. Expression des modules d'Ingénieurs en fonction des coefficients de rigidité et de souplesse [13]

Désignation	Notation	expression	expression
Module de Young longitudinale	E_L	$C_{11} - 2 \frac{C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}}$	$\frac{1}{S_{11}}$
Coefficient de poisson	ν_{LT}	$\frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}}$	$-\frac{S_{12}}{S_{11}}$
Module de Young transversal	E_T	$C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22} - 2C_{23}) + C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}$	$\frac{1}{S_{22}}$
Coefficient de Poisson	ν_{TL}	$\frac{C_{12}(C_{23} - C_{22})}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}$	$-\frac{S_{12}}{S_{22}}$
Coefficient de Poisson	$\nu_{TT'}$	$-\frac{C_{12}^2 - C_{11}C_{23}}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}$	$-\frac{S_{23}}{S_{22}}$
Module de cisaillement longitudinal	G_{LT}	C_{66}	$\frac{1}{S_{66}}$
Module de cisaillement transversal	$G_{TT'}$	$\frac{C_{22} - C_{23}}{2}$	$\frac{1}{2(S_{22} - S_{23})}$
Module de cisaillement	$G_{LT'}$	C_{66}	$\frac{1}{S_{66}}$
Module de compression latérale	K_L	$\frac{C_{22} + C_{23}}{2}$	$\frac{1}{2\left(S_{22} + S_{23} - 2\frac{S_{12}^2}{S_{11}}\right)}$

II.8. DETERMINATION EXPERIMENTALE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

II.8.1. INTRODUCTION

Le comportement élastique d'un matériau composite peut être décrit entièrement par la connaissance de :

- Neuf (9) coefficients dans le cas d'un matériau composite orthotrope.
- Cinq (5) coefficients dans le cas d'un matériau composite unidirectionnel.

Dans le cas particulier d'un état de contraintes planes, le nombre de coefficients nécessaires pour décrire le comportement d'un matériau composite (qu'il soit orthotrope ou unidirectionnel) se réduit à quatre (4). Ces quatre coefficients sont :

- Le module de Young longitudinal E_L
- Le module de Young transversal E_T
- Le coefficient de Poisson ν_{LT}
- le module de Coulomb G_{LT}

Les essais utilisés pour la détermination de ces coefficients sont développés dans le paragraphe qui suit.

II.8.2. LES ESSAIS MECANIQUES

II.8.2.1 Essai de traction longitudinale

Dans cet essai, la force F est appliquée suivant la direction des fibres (composite unidirectionnel) ou suivant la direction chaîne (composite tissu) sur la section droite S_1 du matériau, figure II.8.

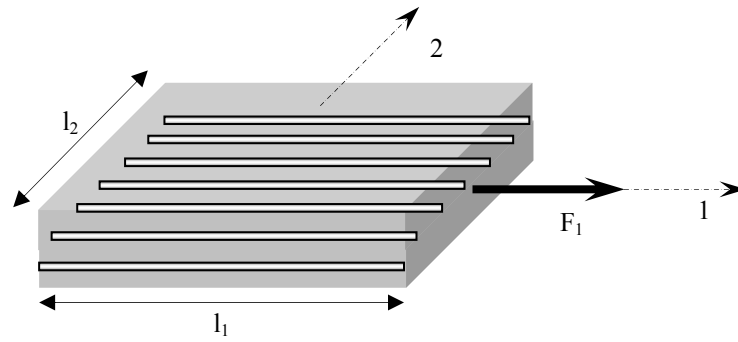


Figure II.8. Traction Longitudinale

La contrainte σ_{11} est donnée en fonction de la force F_1 appliquée suivant l'axe 1, perpendiculairement à la section transversale S_1 , comme suit :

$$\sigma_{11} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{II.3})$$

L'étude expérimentale consiste, à mesurer sur l'éprouvette les paramètres suivants :

- La charge appliquée F_1
- L'allongement de l'éprouvette suivant la longueur l_1 : Δl_1
- la variation de la longueur transversale l_2 : Δl_2

La déformation longitudinale ε_{11} est donnée par :

$$\varepsilon_{11} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (\text{II.4})$$

La déformation transversale ε_{22} est donnée par :

$$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (\text{II.5})$$

On déduit :

Le module d'élasticité longitudinal E_L (Young) :

$$E_L = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient de Poisson ν_{LT} :

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{II.7})$$

II.8.2.2 Essai de traction transversale

Dans cet essai, la force F est appliquée suivant la direction transverse aux fibres, figure II.9. Perpendiculairement aux fibres dans le cas d'un matériau composite unidirectionnel. Dans le sens de la trame dans le cas d'un matériau composite tissu.

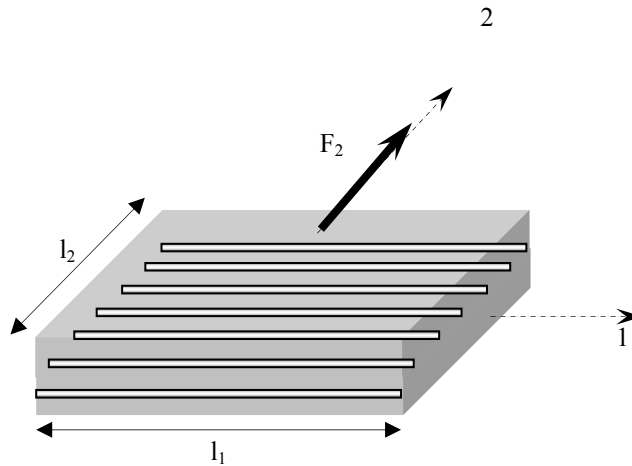


Figure II.9. Traction transversale

La contrainte σ_{22} est donnée en fonction de la force F_2 appliquée suivant l'axe 2, perpendiculairement à la section transversale S_2 , comme suit :

$$\sigma_{22} = \frac{F_2}{S_2} \quad (\text{II.8})$$

L'étude expérimentale consiste, à mesurer sur l'éprouvette les paramètres suivants :

- La charge appliquée F_2
- L'allongement de l'éprouvette suivant la longueur l_2 : Δl_2
- la variation de la longueur transversale l_1 (suivant la longueur l_1) Δl_1

La déformation transversale ε_{22} est donnée par :

$$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (\text{II.9})$$

La déformation longitudinale ε_{11} est donnée par :

$$\varepsilon_{11} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (\text{II.10})$$

On déduit :

Le module d'élasticité transversal E_T (Young) :

$$E_T = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{II.11})$$

Le coefficient de Poisson ν_{TL} :

$$\nu_{TL} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{II.12})$$

Les valeurs ainsi obtenues doivent vérifier la relation suivante :

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad (\text{II.13})$$

II.8.2.3 Essai de traction hors axes

Un essai usuellement utilisé pour mesurer le module de cisaillement longitudinal G_{LT} . Dans cet essai, la force F est appliquée à 45° de la direction des fibres ou de la chaîne, figure II.10.

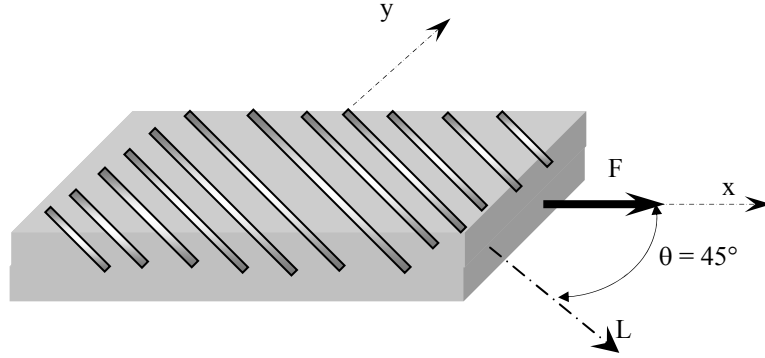


Figure II.10. Traction hors axe

La contrainte σ_{xx} est donnée en fonction de la force F appliqué suivant l'axe x , perpendiculairement à la section transversale S , comme suit :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad (\text{II.14})$$

L'étude expérimentale consiste, à mesurer sur l'éprouvette les paramètres suivants :

- La charge appliquée F .
- L'allongement de l'éprouvette selon l'axe x (suivant la longueur l_x) Δl_x .

La déformation suivant l'axe x ϵ_{xx} est donnée par :

$$\epsilon_{xx} = \frac{\Delta l_x}{l_x} \quad (\text{II.15})$$

On déduit :

Le module d'élasticité suivant l'axe x :

$$E_x = E_{45} = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}} \quad (\text{II.16})$$

Nous savons que :

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right) \quad (\text{II.17})$$

Nous constatons que dans cette relation, seul le module de cisaillement (Coulomb) G_{LT} est inconnu. Nous déduisons alors [13] :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \quad (\text{II.18})$$

II.9. CONCLUSION DU CHAPITRE

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, dans la nature. Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrice, le renfort, les charges et les additifs) afin d'avoir les meilleures qualités qui dépendent :

- Des propriétés des matériaux constituants.
- Des distributions géométriques des constituants.
- De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix de ces matières, la technique et le procédé de fabrication à une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau.

Vu les performances du tissu composite en fibres de verre, sa disponibilité sur le marché Algérien, son coût moins prohibitif par rapport aux autres fibres, nous avons opté pour son utilisation pour la réparation et le renforcement des corps d'épreuves en béton armé.

La technique de renforcement utilisée sera détaillée dans la partie expérimentale.

Chapitre III

IDENTIFICATION EXPERIMENTALE
DES MATERIAUX UTILISES
ET TECHNIQUE DE REALISATION
PROPOSEE

Chapitre III. IDENTIFICATION EXPERIMENTALE DES MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUE DE REALISATION PROPOSEE

III.1. INTRODUCTION

La majorité des matériaux sont utilisés à des fins structurales, c'est-à-dire pour supporter des contraintes. Leurs propriétés mécaniques sont alors les propriétés principales à considérer, pour une utilisation donnée. Toutefois, pour être en mesure d'utiliser un matériau de façon rationnelle il est important de connaître ces caractéristiques physiques et chimiques.

La normalisation des modes d'essais et de la confection du béton dans un laboratoire de recherche est une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton « normal » qui peut satisfaire aux normes internationales afin qu'on puisse comparer ses qualités et ses caractéristiques avec des résultats obtenus ailleurs [21].

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie est consacrée à une caractérisation mécanique, physique et chimique permettant d'identifier les constituants de base des deux matériaux utilisés, à savoir le béton armé et le matériau composite constitué de tissu de verre et d'une résine époxy. La deuxième partie expose les différentes étapes de formulation, de confection et d'élaboration des corps d'épreuve, et particulièrement le procédé de mise en œuvre du renfort composite proposé.

Les différents essais pour cette caractérisation et l'élaboration des corps d'épreuve ont été réalisés au sein du centre d'études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction – CETIM – de Boumerdes.

III.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.2.1. CARACTERISATION DES CONSTITUANTS DU BETON [16]

III.2.1.1. Les granulats

Les granulats (sable et graviers) ont une influence directe sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton frais et durci. Pour avoir donc un béton maniable, résistant et durable, il faut caractériser et optimiser au maximum les granulats entrant dans sa composition.

Dans cette étude, nous nous sommes limités à une seule composition en granulats :

- Le sable roulé (0/5) de la sablière Baghlia.
- Le gravier (8/15 et 15/25) de la carrière Ammal.

a- *Analyse granulométrique (NF P18-560)*

L'analyse granulométrique par tamisage est réalisée suivant la norme NF P18-560 avec une tamiseuse à fréquence réglable de 50Hz. La durée de vibration est de 15mn

Les quantités des granulats testés sont les suivantes :

- 1500g pour le sable (0/5).
- 3000g pour le gravier (8/15).
- 5000g pour le gravier (15/25).

Ces quantités de granulats sont au préalable, lavées et séchées.

Les modules des tamis (m_{tam}) sont calculés par la formule suivante :

$$m_{\text{tam}} = 10 \text{ Log}_{10} (D \cdot 10^3) + 1 \quad (\text{III.1})$$

Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux (III.1), (III.2) et (III.3) et illustrés par la figure III.1.

Tableau III.1 Analyse granulométrique du gravier 8/15 - NF P18-560

Echantillon : GRAVIER 8/15			
Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h} $M_{1S}=646g$ $M_{1h}=650g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=3000g$ Masse totale sèche : $M_S = (M_{1S}/M_{1h}) M_h = 2981,5g$ Masse sèche après lavage : $M_{Sl} = 2870g$			
Ouverture Tamis (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
16	0	0	100
12,5	66	2,21	97,79
10	494	16,57	83,43
8	1321	44,31	55,69
6,3	2368	79,42	20,58
5	2643	88,65	11,35
Fond de tamis	2870	96,26	3,74
/	$R_n = 2643$	/	/
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=227g$	Observation Propreté superficielle : $\zeta = 3,74\%$ Taux d'humidité : $w = 0,61\%$		
$R_n + T_n = 2870g$			
$100[M_{Sl} - (R_n + T_n)]/M_{Sl} = 0$			

Tableau III.2 Analyse granulométrique du gravier 15/25 - NF P18-560

Echantillon : GRAVIER 15/25			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=5000g$ Masse totale sèche : $M_S = (M_{1S}/M_{1h}) M_h = 4992,3g$ Masse sèche après lavage : $M_{Sl} = 4911g$			
Ouverture Tamis (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
25	0	0	100
20	708	14,18	85,82
16	2262	45,31	54,69
12,5	4380	87,73	12,26
10	4785	95,85	4,15
8	4853	97,21	2,79
6,3	4878	97,71	2,29
5	4904	98,23	1,77
Fond de tamis	4911	98,37	1,63
/	$R_n = 4904$	/	/
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=7g$	Observation Propreté superficielle : $\zeta = 1,63\%$ Taux d'humidité : $w = 0,15\%$		
$R_n + T_n = 4911g$			
$100[M_{Sl} - (R_n + T_n)]/M_{Sl} = 0$			

Tableau III.3 Analyse granulométrique du sable - NF P18-560

Echantillon : SABLE			
Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h} $M_{1S}=471g$ $M_{1h}=500g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=1500g$ Masse totale sèche : $M_S=(M_{1S}/M_{1h}) M_h = 1413g$ Masse sèche après lavage : $M_{Sl} = 1345g$			
Ouverture Tamis (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	3	0,21	99,79
4	9	0,64	99,36
3,15	40	2,83	97,17
2,5	112	7,93	92,07
1,25	488	34,54	65,46
0,63	826	58,46	41,54
0,315	1128	79,83	20,17
0,16	1275	90,23	9,77
0,125	1319	93,35	6,65
0,08	1343	95,05	4,95
Fond de tamis	1345	95,19	4,81
/	$R_n = 1343$	/	/
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=2g$	Observation Sable analysé et caractérisé par un module de finesse $M_f = 2,75$ Pourcentage en particules fines : $\zeta = 4,81\%$ Taux d'humidité : $w = 6,16\%$		
$R_n + T_n = 1345g$			
$100[M_{Sl} - (R_n + T_n)]/M_{Sl} = 0$			

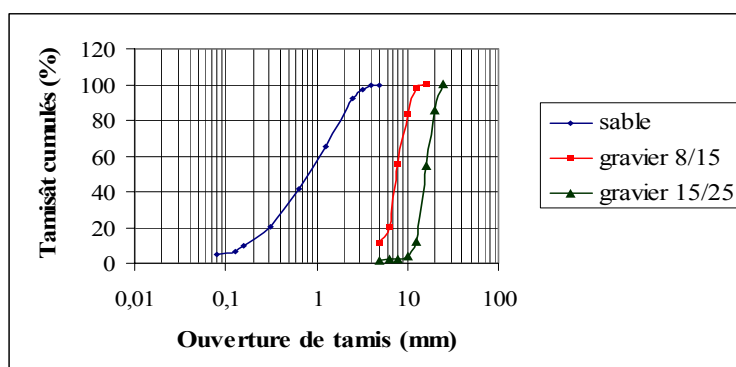


Figure III.1 Analyse granulométrique du sable et du gravier (NF P18-560)

b- Analyse physique

- Propreté du sable (Essai équivalent de sable (NF P18-598))

L'essai équivalent de sable rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans le sable testé en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins. L'essai consiste à mélanger dans une éprouvette cylindrique normalisée un poids défini de sable avec une solution floculante. Après agitation, on laisse le mélange reposer sans perturbation pendant vingt minutes ensuite on mesure la hauteur h_1 du sédiment et h_2 du floculat.

L'équivalent de sable est donné par la formule suivante :

$$ES = (h_1/h_2) \times 100 \quad (III.2)$$

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau III.4

Tableau III.4 Equivalent de sable

Echantillon	ES	ESV
Sable	47,04	47,67

ES : Equivalent de sable mesuré au piston.

ESV : Equivalent de sable a vue.

- Mesure des masses volumiques, de la porosité et du coefficient d'absorption

L'essai pour déterminer les masses volumiques, la porosité et le coefficient d'absorption des granulats est réalisé conformément à la norme :

- NF P18-554 pour le gravier.
- NF P18-555 pour le sable.

Ces caractéristiques physiques sont définies comme suit :

- La masse volumique réelle est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, y compris les vides contenus dans les grains.

$$\rho_r = M_S / (M_a - M'_a) \quad (\text{III.3})$$

- Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition en eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition partielle est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20°C à la pression atmosphérique.

$$Ab = [(M_a - M_S) / M_S] \times 100 \quad (\text{III.4})$$

- La masse volumique réelle imbibée est le quotient de l'échantillon imbibé par le volume qu'il occupe (volume réel).

$$\rho_{ri} = M_a / (M_a - M'_a) \quad (\text{III.5})$$

- La porosité est définie comme le rapport du volume des vides contenus dans les grains et accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon.

$$n = [(M_w - M_S) / (M_w - M'_w)] \times 100 \quad (\text{III.6})$$

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau III.5

Tableau III.5. Mesure des masses volumiques, du coefficient d'absorption et de la porosité

Echantillon	Masse volumique réelle (t/m ³)	Masse volumique imbibée (t/m ³)	coefficient d'absorption (%)	Porosité (%)
Sable	2,58	2,62	1,55	/
Gravier 8/15	2,66	2,68	0,96	2,55
Gravier 15/25	2,67	2,69	0,61	1,64

c- Analyse chimique

L'analyse chimique des granulats a donné les résultats résumés dans le tableau III.6

Tableau III.6 Composition chimique du sable et du gravier

Composition chimique	Teneur (%)	
	SABLE	GRAVIER
Na ₂ O	0,54	0,10
MgO	0,97	1,32
Al ₂ O ₃	5,34	0,68
SiO ₂	44,14	4,65
SO ₃	0,12	0,45
K ₂ O	0,47	0,18
CaO	22,12	50,10
Fe ₂ O ₃	4,46	0,79

- Composition minéralogique des granulats (sable – gravier)

Une composition minéralogique des granulats (sable – gravier) est évaluée sur la base des résultats chimiques. Elle est donnée par le tableau III.7

Tableau III.7 Composition minéralogique du sable et du gravier

Minéraux	Teneur (%)	
	SABLE	GRAVIER
Quartz	37,5	4,00
Calcite	39,0	86,0
Dolomite	1,50	6,00
Feldspath Na, Ca	4,50	/
Min. ferrugineux	4,50	1,00
Gypse	/	1,00
Kaolinite	6,00	/
Muscovite	4,00	/
Chlorite	3,00	/
Argile	/	2,00

III.2.1.2. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé, issu de la cimenterie de RAIS HAMIDOU, avec une résistance de classe réelle de 40,5MPa.

a- Analyse physique

- Masse volumique absolue

La méthode utilisée est celle du densimètre qui consiste à :

- Remplir le densimètre jusqu'au niveau « 0 » avec du benzène.
- Y verser une masse de 64g de l'échantillon.
- Lire directement le volume absolu V_{abs} .

La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{abs} = M / V_{abs} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (\text{III.7})$$

- Surface spécifique de Blaine (SSB) (NF P15-442)

La surface spécifique est mesurée à l'aide du perméabilimètre de Blaine et elle est calculée par l'équation suivante :

$$SSB = \frac{K \sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \text{ (cm}^2\text{/g)} \quad (\text{III.8})$$

K : Constante de l'appareil, ρ : Masse volumique absolue en g/cm³,

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise, t : Temps de passage de l'air dans la poudre en seconde.

D'autres essais ont aussi été réalisés sur le ciment selon les normes EN 196-2, EN 196-3 et selon la méthode microscopique (ONO).

L'ensemble des résultats obtenus est donné dans le tableau III.8

Tableau III.8 caractéristiques physiques du ciment

Echantillon : CIMENT		Résultats
Consistance normalisée	H ₂ O	23,20%
Temps de prise	Début	155mn
	Fin	190mn
Stabilité	Froid	/
	Chaud	1,97mm
Essai de retrait	03jours	115,62µm/m
	07jours	225,00µm/m
	28jours	381,25µm/m
Essai de gonflement	03jours	37,50µm/m
	07jours	37,50µm/m
	28jours	75,00µm/m
Masse volumique absolue		3,12 g/cm ³
Finesse suivant la méthode de Blaine		3184 cm ² /g

b- Analyse chimique

L'analyse chimique du ciment a donné les résultats résumés dans le tableau III.9

Tableau III.9 Composition chimique du ciment

Composition chimique	Teneur (%)
SiO ₂	21,64
Al ₂ O ₃	5,30
Fe ₂ O ₃	3,04
CaO	62,19
MgO	1,08
K ₂ O	0,90
Na ₂ O	0,29
SO ₃	2,77
CaO libre	2,37
Cl	0,007
Insoluble	2,76
P.F	2,49

- Composition minéralogique du ciment

La composition minéralogique du clinker est déduite de la composition chimique en utilisant les équations de BOGUE [17]

Cette composition est donnée par le tableau III.10.

Tableau III.10 Composition minéralogique du ciment

Phase	Constituants minéraux du clinker	Teneur rapportée au clinker (%)
cliker	C ₃ S	51
	C ₂ S	29
	C ₃ A	10
	C ₄ AF	08
	CaO.L	02
Régulateur de prise	Gypse	05
Ajouts	Poussière de fumée	07

c- Caractérisation mécaniques du ciment

Les essais mécaniques sur le ciment, à savoir l'essai de compression et l'essai de flexion ont donnés les résultats résumés dans le tableau III.11 et illustrés par les figures III.2 et III.3

Tableau III.11. Caractéristiques mécaniques du ciment

Echéances en jours	Contrainte en flexion (MPa)	Contrainte en compression (MPa)
02 jours	2,28	18,38
07 jours	6,13	32,20
28 jours	7,03	40,21

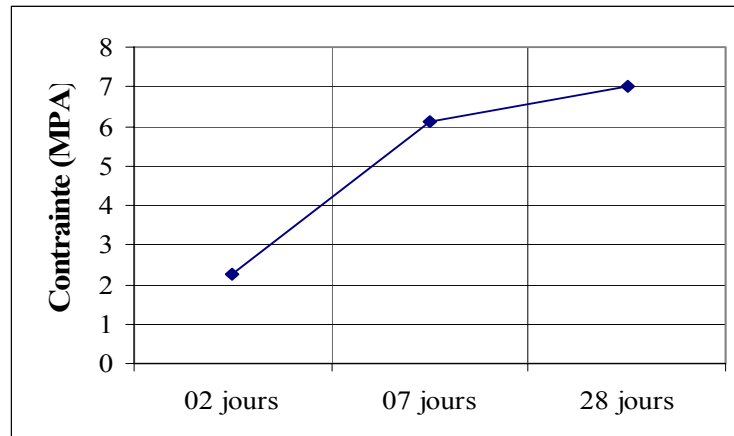


Figure III.2 Evolution de la résistance à la flexion du ciment

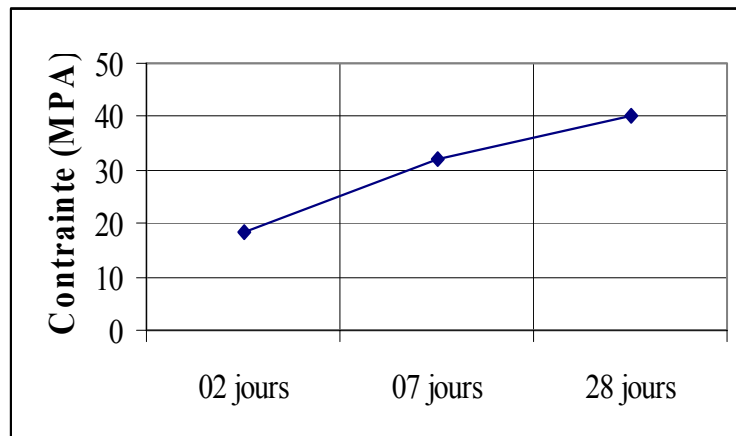


Figure III.3 Evolution de la résistance à la compression du ciment

III.2.1.3. Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet de la ville de Boumerdes pour le gâchage.

Il en résulte par l'analyse de cette eau l'inexistence de matière en suspension ainsi qu'une quantité infime de sels dissous.

- Matières en suspension = néant.
- Sels dissous = 0,01g/l

III.2.2. CONSTITUANTS DU MATERIAUX COMPOSITE

Le matériau composite utilisé dans cette étude est composé d'une résine époxy et d'un tissu en fibres de verre.

III.2.2.1. La résine époxyde

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges sont les matrices des composites à hautes performances.

Les résines époxydes proviennent de la réaction entre l'épichlorydrine et le bisphénol (ou parfois, épichlorydrine / polyphénol). La réaction de durcissement nécessite un agent de réticulation ou durcisseur. On distingue plusieurs classes de résine en fonction du durcissement à froid ou à chaud et de la tenue en température. [27].

Les résines époxydes se caractérisent par des performances élevées, une bonne tenue en température, des performances adhésives certaines, ainsi qu'un retrait volumique limité.

La résine utilisée pour la réparation et le renforcement des éléments en béton armé est le MEDAPOXY INJECT. C'est une résine époxy sans solvant livrée sous forme de kit pré dosé à deux composants :

Elément A : Résine, Elément B : Durcisseur.

Cette résine possède les caractéristiques suivantes [33] :

a- Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont données par le tableau III.12.

Tableau III.12 caractéristiques physiques de la résine époxy

Masse volumique	1100 à 1500 kg/m ³
Densité	1,1 ± 0,1
Viscosité à 25°C	800 MPa.s
Température de fléchissement sous charge	290°C
Absence totale de retrait au durcissement	/

b- Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de la résine sont données par le tableau III.13

Tableau III.13 Caractéristiques mécaniques de la résine époxy

Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contraint à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Résistance à la compression	70 MPa
Adhérence sur béton	> 3 MPa

c- Autres caractéristiques

En plus des caractéristiques citées ci-dessus la résine MEDAPOXY INJECT possède les caractéristiques suivantes :

- Excellente adhérence sur supports béton et mortier.
- Très bonne mouillabilité qui permet le passage du produit dans les interstices les plus fins.
- Le produit mélangé a une durée de vie (résine + durcisseur) limitée. Elle est de 30mn à 20°C.
- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 35°C.
- Rapport du mélange : Élément A : 3kg ; Élément B : 2kg

d- Domaine d'application

Le MEDAPOXY INJECT est spécialement conçu pour la réparation des microfissures sur béton et mortiers.

III.2.2.2. La fibre de verre

Les fibres de verre constituent le renfort essentiel des composites grandes diffusions (GD) et font l'objet d'une consommation très importante.

Elles sont réalisées à partir de silice (SiO_2) et suivant les additifs, trois types de verre sont produits : la fibre E., la fibre D et la fibre R.

Pour notre étude expérimentale nous avons utilisé un tissu constitué de fibres de verre continues type E dont les caractéristiques sont citées ci-dessous :

a- Caractéristiques physiques

- Etat physique : Solide.
- Forme : tissu constitué de fibres continues d'épaisseur 0,25mm (ISO 4603).
- Poids surfacique : 300 g/m^2 .

b- Composition chimique

La composition chimique de la fibre de verre est donnée par le tableau III.14

Tableau III.14 .Composition chimique de la fibre de verre

Constituants		(%)
Silice	SiO_2	53-54
Alumine	Al_2O_3	14-15,5
Chaux	CaO	20-24
Magnésie	MgO	
Oxyde de bore	B_2O_3	6,5-9
Fluor	F	0-0,7
Oxyde de fer	Fe_2O_3	<1
Oxyde de titane	TiO_2	
Oxyde de sodium	Na_2O	<1
Oxyde de potassium	K_2O	

c- Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques du tissu de fibres de verre sont résumées dans le tableau III.15.

Tableau III.15 caractéristiques mécaniques de la fibre de verre [NF ISO 4606]

Contrainte de rupture à la traction (MPa)	2500
Module d'élasticité en traction (GPa)	74
Allongement à la rupture en traction (%)	4,5

III.3. PREPARATION ET CONFECTION DES CORPS D'EPREUVE

Dans cette étude expérimentale de réparation et de renforcement des éléments en béton armé, deux approches sont proposées, la première, l'application de l'enveloppe composite sur des éléments déjà soumis à la rupture, donc fissurés et la deuxième, l'application de l'enveloppe composite sur un béton non fissuré (non soumis aux essais).

Deux types de chemisage sont adoptés. Un demi chemisage, appliqué sur la partie tendue de la poutre et un chemisage complet appliqué sur toute la surface de l'élément.

Deux essais sont réalisés sur ces corps d'épreuve. L'essai de compression et l'essai de flexion par traction.

Ceci a conduit au choix de forme et du nombre des éprouvettes suivant :

- Trois série d'éprouvette cylindrique de dimensions (16×32cm) pour la compression :
 - Trois éprouvettes pour le béton témoin.
 - Trois éprouvettes pour le béton fissuré puis réparé par chemisage.
 - Trois éprouvette pour le béton non fissuré renforcé par chemisage.

- Cinq séries d'éprouvettes prismatiques de dimensions (14×14×56cm) pour la flexion :
 - Trois éprouvettes pour le béton témoin.
 - Trois éprouvettes pour le béton fissuré puis réparé par demi chemisage.
 - Trois éprouvettes pour le béton fissuré puis réparé par chemisage complet.
 - Trois éprouvettes pour le béton non fissuré renforcé par demi chemisage.
 - Trois éprouvettes pour le béton non fissuré renforcé par chemisage complet.

Le nombre total d'éprouvettes réalisées pour cette étude expérimentale est alors :

- Neuf éprouvettes cylindriques (16×32cm).
- Quinze éprouvettes prismatiques (14×14×56cm).

III.3.1. CONFECTION DU BETON DES CORPS D'EPREUVE

III.3.1.1. Formulation du béton

En se basant sur une longue expérience, et sur une connaissance très riche de la pratique du béton, Dreux et Gorisse ont pu élaborer une méthode de composition pratique et simple, qui est d'une part, le fruit d'une centaine de formules destinées aux différents ouvrages, et d'autre part elle présente la synthèse de plusieurs méthodes basées sur la connaissance préalable d'une courbe granulométrique de référence telle que les méthodes d'Abrams, de Bolomy, de Caquot, de Joisel et Fauny [20].

Dans cette étude expérimentale cette méthode de formulation a été adaptée pour la composition du béton étudié.

La méthode de DREUX GORISSE consiste à déterminer à partir de la courbe granulométrique (figure III.1), les différents pourcentages des composants du béton ensuite de les transformés en masse [13,19].

En utilisant cette méthode, on a obtenu pour 1m^3 de béton la composition donnée dans le tableau III.16.

Tableau III.16. Composition du béton selon la formulation DREUX GORISSE

Composant	Volume (l/m^3)	Poids (kg/m^3)
Ciment	113	350
Sable	266,76	688
Eau	198	198
Gravier 8/15	133,38	355
Gravier 15/25	301,86	806
total	1013	2397

La composition calculée est de masse volumique égale à $2,397\text{t/m}^3$.

Le rapport (eau/ciment) = 0,56

III.3.1.1. Malaxage et mise en œuvre du béton

a- Type et caractéristiques du malaxeur

Le mélange du béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical constitué de cuve et palettes centrales tournantes. Sa capacité est de 65l (figure III.4). Ce type de malaxeur est très efficace et fourni dans la plupart des cas un béton très homogène. Il permet pendant le malaxage d'observer et de corriger le dosage en eau si c'est nécessaire.



Figure III.4 Malaxeur à axe vertical de capacité 65l

b- Séquences de malaxage

Le malaxage du béton est effectué de la manière suivante :

- Verser dans le malaxeur le sable, le ciment et le gravier.
- Malaxer à sec pendant 15 secondes.
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme pendant les 15 secondes qui suivent. Continuer le malaxage durant 180 secondes.

c- Mesure de l'ouvrabilité

L'ouvrabilité est évaluée à l'aide du cône d'Abrams, en mesurant l'affaissement selon la norme NF P18-451 (figure III.5).

On a obtenu un affaissement égal à 7cm.



Figure III.5. Affaissement du béton mesuré par le cône d'Abrams

c- Ferrailage

Le ferrailage est constitué de deux barres 2T8HA pour la partie tendue et deux barres 2T6HA pour la partie comprimée avec un cadre Ø6 d'espacement 10cm.

d- Remplissage des moules et conservation des éprouvettes

Deux types de moules en acier sont utilisés :

- Moules prismatiques de dimensions (14×14×56cm).
- Moules cylindriques de dimensions (16×32cm)

Les moules sont remplis de la manière suivante :

- Placer en premier le ferrailage dans le moule dans le cas des moules prismatiques (figure III.6).
- Remplir en deux couches le moule à l'aide d'une pelle à coque cylindrique malaxeur-moule.
- Soumettre le moule à une vibration externe à l'aide d'une table vibrante à raison de 10 à 30 secondes la couche (figure III.7).
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle (figure III.8).
- Après 24 heures les éprouvettes sont retirées des moules, puis conservées dans des bacs d'eau à une température de 20°C jusqu'à 28 jours.

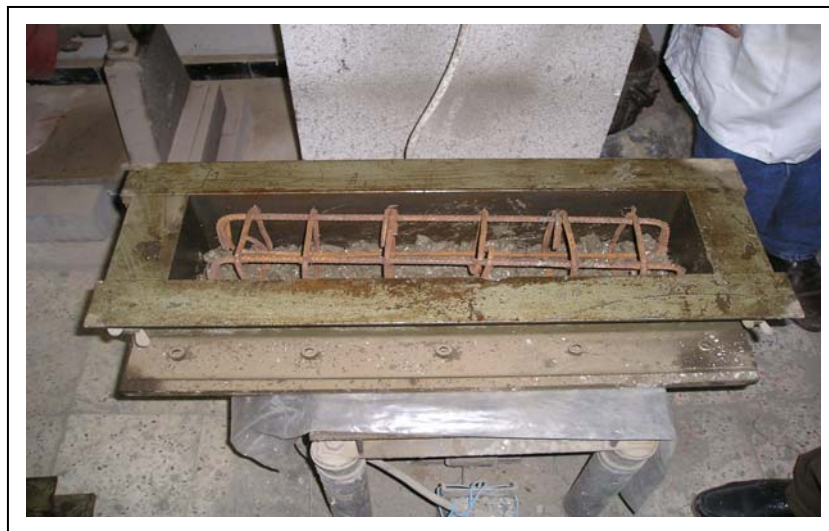


Figure III.6. Ferrailage placé à l'intérieur du moule



Figure III.7. Vibration du béton à l'aide de table vibrante



Figure III.8. Finition de l'opération de moulage

e- Surfaçages des faces extrêmes

Les faces extrêmes des éprouvettes cylindriques sont rectifiées par coulage d'une couche de soufre liquide suivant la norme NF P18-416 pour éviter toute excentricité des charges appliquées lors de l'essai de compression (figure III.9).

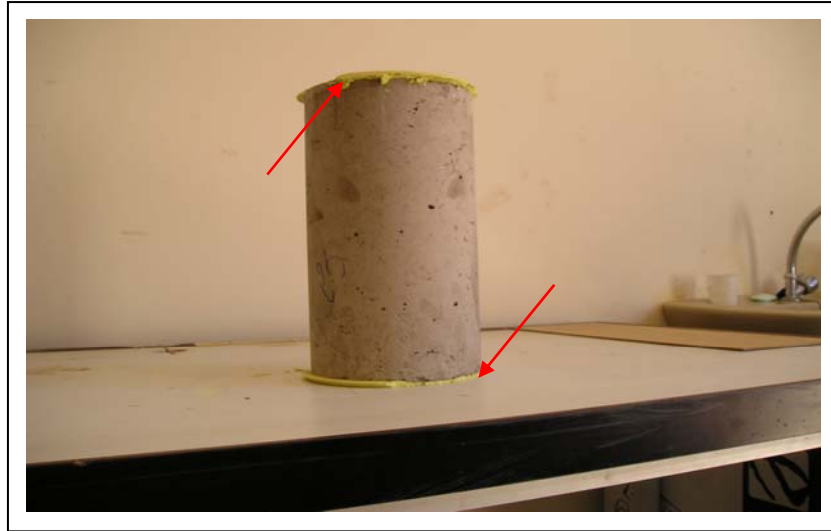


Figure III.9. Faces rectifiées par coulage d'une couche de soufre

III.2.2. PROCÉDES DE MISE EN ŒUVRES DU RENFORT COMPOSITE

Deux types d'éprouvettes sont à considérer :

- Eprouvettes fissurées
- Eprouvettes non fissurées.

Il est donc nécessaire de préparer ces éprouvettes avant de leur appliquer le renfort.

a- Fissuration des éprouvettes destinées à la réparation

- Les six éprouvettes prismatiques destinées à la réparation par l'enveloppe composite sont soumises à un effort par essai de flexion jusqu'à fissuration dense. L'essai est réalisé par une machine TONI TECHNIK de capacité 100KN (figure III.11).
- Les trois éprouvettes cylindriques destinées à la réparation par l'enveloppe composite sont fissurées en compression par écrasement par une presse hydraulique TONI TECHNIK de capacité 3000KN jusqu'à fissuration dense (figure III.10).

Une fois les éprouvettes écrasées, elles sont réparées en premier lieu par colmatage.
Les fissures sont élargies et nettoyées puis colmater avec du ciment.

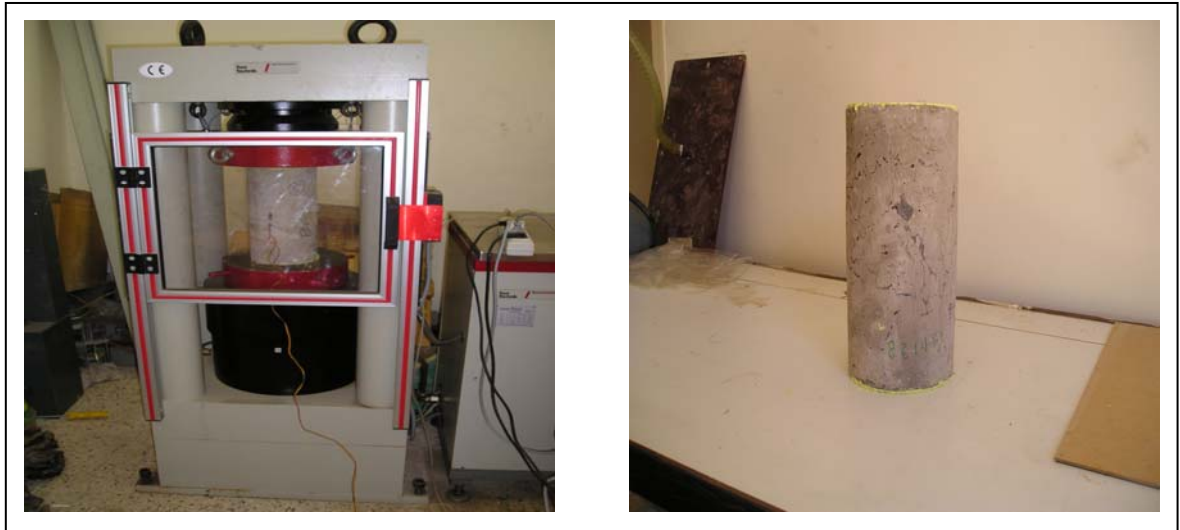


Figure III.10 Appareillage d'essai et fissuration des éprouvettes cylindriques par essai de compression



Figure III.11 Appareillage d'essai et fissuration des éprouvettes prismatiques par essai de flexion

b- Application du renfort

Le chemisage est réalisé selon les étapes suivantes :

- Préparation du support

Le bon fonctionnement d'une réparation ou d'un renforcement par le procédé chemisage par matériau composite exige un support de bonne qualité.

La préparation du support béton a pour objectif d'éliminer toute trace superficielle, de graisse de laitance et de toute partie hétérogène

La surface des éprouvettes est nettoyée par polissage à l'aide d'une brosse métallique puis dépoussiérée à l'aide d'un aspirateur.

- Préparation du tissu

Le tissu est découpé soigneusement aux dimensions souhaitées

Une fois coupé, le tissu doit rester soit à plat, soit enroulé. En aucun cas, il ne doit être plié afin de ne pas endommager les fibres.

- Préparation de la résine

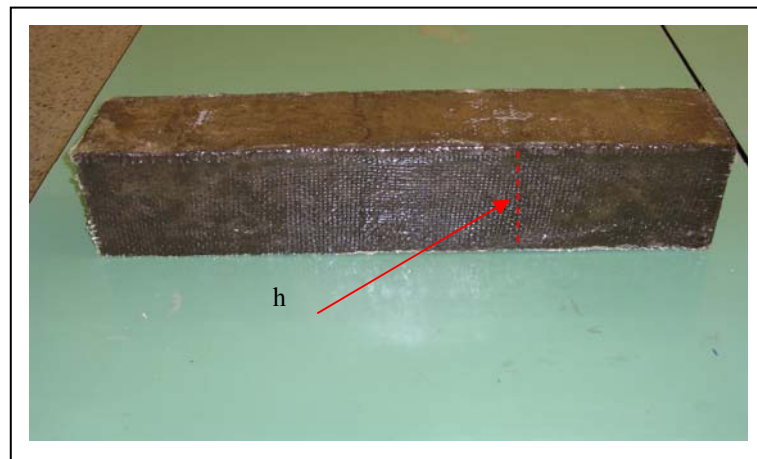
Le mode de préparation est le suivant :

- Le produit mélangé a une durée de vie limitée, elle est de 30mn à 20°C.
- Terminer tous les préparatifs avant la préparation du mélange et ne préparer que la quantité du mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant le Médapoxy Inject, afin d'obtenir un mélange homogène et de complètement vider les récipients afin de respecter le rapport du mélange.
- Verser l'élément B(durcisseur) dans l'élément A (résine) en veillant à respecter le rapport de mélange : 665g d'élément B pour 1kg d'élément A.
- Ne pas mélanger manuellement.
- Remuer pendant 3 à 5mn avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation.
- Racler plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.

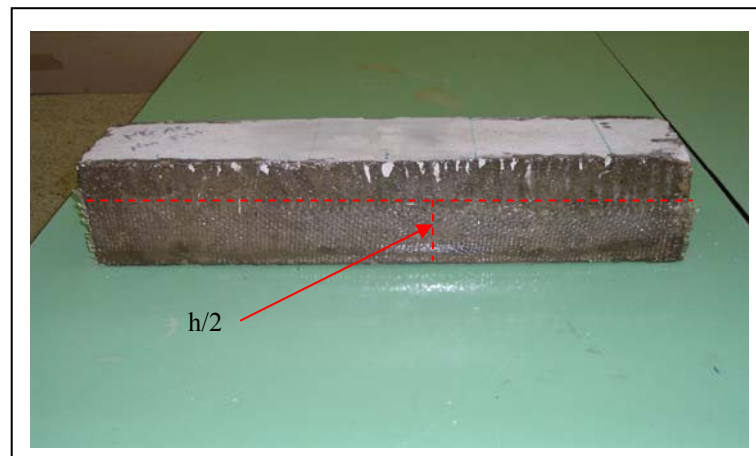
- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 35°C.
- Les résines époxydiques peuvent irriter la peau et les muqueuses, en conséquences, il est conseillé de mettre des gants de caoutchouc lors de l'utilisation.

- **Application du renfort**

- Appliquer une couche de 1 à 2mm de résine sur la surface de l'éprouvette et la répartir avec un rouleau.
- Positionner et plaquer manuellement le tissu sur le support.
- Presser fortement à l'aide d'un rouleau maroufleur.
- Appliquer une autre couche de résine sur le tissu et presser une deuxième fois avec le rouleau.
- Le marouflage soigné doit être poursuivi jusqu'à obtenir un reflux continu sur les bords.
- Enlever l'excédent de colle avec une spatule et ne pas le réutiliser.
- Laisser sécher à l'air libre minimum sept jours (figure III.12)



a) Chemisage complet de la section transversale



b) Demi chemisage jusqu'à l'axe neutre de la section transversale



Figure III.12. Eprouvettes après application du renfort composite

III.4. Conclusion du chapitre

L'identification expérimentale réalisée sur les différents constituants, du béton et de l'enveloppe composite à base de fibres de verre, a permis de quantifier leurs propriétés intrinsèques, qui seront utilisées pour la confection et la réalisation des corps d'épreuve, destinés aux essais mécaniques qui seront développés dans le chapitre qui suit. Le procédé d'application du tissu, ainsi que les deux variantes, à savoir, un chemisage complet de la section transversale et un chemisage jusqu'à la position de l'axe neutre, tout le long de l'élément, sont réalisés.

Signalons également, que les deux approches, dont la première consiste à appliquer le matériau composite sur les éléments déjà soumis à la rupture (fissurés), alors que l'autre, consiste à appliquer le tissu composite au béton non fissuré (béton sain), sont retenues, dans le but d'en déduire l'apport, soit dans le retour de rigidité, soit l'augmentation de la rigidité initiale de l'élément en béton armé, ce qui améliorera certainement la durabilité.

La présente technique originale et pratique, complètement différente, par rapport aux techniques appliquées, à savoir une application directe par marouflage, du tissu imprégné d'une matrice époxyde, sur le support de béton, est proposée.

Chapitre IV

CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE

CHAPITRE IV. CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE

IV. 1. INTRODUCTION

L'étude du comportement pathologique des ouvrages en béton armé, met en évidence des endommagements des matériaux et de structures dus à des erreurs de conception, à des modifications de conditions d'exploitation et au vieillissement des matériaux [25]. Suivant les différentes causes de désordres, les opérations de maintenance des ouvrages consistent à :

- Les protéger en limitant la corrosion et en assurant de meilleures conditions d'étanchéité.
- Les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des éléments porteurs.

Les matériaux composites, grâce à leurs caractéristiques mécaniques très performantes (poids propres faibles, résistance vis-à-vis de la corrosion, aptitude au formage et au moulage) sont des matériaux particulièrement intéressants pour remplir les fonctions de confortement des ouvrages du génie civil.

En fonction de l'évolution de la dégradation, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. L'évolution des conditions d'exploitation de chargement est souvent induite soit par la modification du chargement, soit par la modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent. Aussi, il y a lieu de prendre en considération la non conformité dans certains cas, des structures vis-à-vis des sollicitations sismiques.

Les techniques de réparations ont connus, des avancées importantes ces dernières années. Parmi ces techniques, nous pouvons citer :

- Les opérations de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique ou polymérique après traitement de la poutre dégradée.
- Injection du polymère dans les fissures.
- Projection du béton fibré ou non fibré.
- Collage des tôles d'acier.
- Application d'une précontrainte additionnelle par câbles métalliques ou composites

Dans le cadre de ce travail, on propose une technique de renforcement des structures endommagées par application d'un tissu de fibres de verre par marouflage direct sur le support (les faciès) béton. Une étude expérimentale du comportement mécanique en compression axiale et en traction par flexion jusqu' à rupture est effectuée.

Deux approches sont proposées, la première en appliquant le matériau composite aux éléments déjà fissurés, la deuxième en appliquant le renfort au béton non fissuré. Les deux techniques nous permettent de mieux estimer l'efficacité mécanique, en particulier la contribution du renforcement dans le retour de la rigidité.

IV.2. CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE

La caractérisation du comportement mécanique du béton étudié a été effectuée par approche expérimentale au niveau du laboratoire des matériaux minéraux et composites (LMMC) de Boumerdes et au niveau du centre national des études et recherches intégrées au bâtiment (CNERIB) Soudania.

Indexation des éprouvettes

BTC	Béton témoin pour compression
BRC	Béton non fissuré renforcé par chemisage pour compression
BFC	Béton fissuré réparé par chemisage pour compression
BTF	Béton témoin pour flexion
BRDCF	Béton non fissuré renforcé par demi chemisage pour flexion
BFDCF	Béton fissuré renforcé par demi chemisage pour flexion
BRCCF	Béton non fissuré renforcé par chemisage complet pour flexion
BFCCF	Béton fissuré réparé par chemisage complet pour flexion
C	Enveloppe matériaux composites

IV.2.1. ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION (NF P18-406)

IV.2.1.1 Description de l'essai

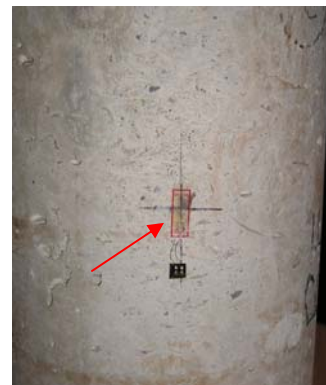
L'essai de compression est réalisé selon la norme NF P18-406. Les éprouvettes sont disposées entre deux plateaux d'une presse hydraulique 'TONI TECHNIK d'une capacité de 3000 KN avec une vitesse de chargement de 0,5 KN/s

Un ensemble de jauges extensométriques collées sur la face latérale de l'éprouvette au milieu et reliées à une chaîne de mesure. Pour chaque chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante sont simultanément enregistrées.

Les faces extrêmes de l'éprouvette doivent être rectifiées par abrasion ou par coulage d'une couche de soufre liquide pour éviter toute excentricité des charges appliquées figureIV.1.



Figure IV.1.a. Rectification des faces



FigureIV.1.b. Collage de la jauge



FigureIV.1.c. Machine de compression
'TONI TECHNIK'
Capacité3000KN



Figure IV.1.d. Jauge extenso métrique collée
à la surface de l'éprouvette

Figure IV-1 Essai de compression

IV.2.1.2 Résultats des essais

Les différents résultats obtenus lors de l'essai de compression centrée, en particulier la variation des déplacements longitudinaux en fonction des efforts appliqués et les résistances, sont donnés dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5 et sont illustrés par les figures IV.2, IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6.

Tableau IV.1. Résultats de l'essai de compression sur le béton témoin

Type de béton	Dimensions (cm ²)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance à la compression simple</i>		
					Force de rupture (KN)	Section (cm ²)	Contrainte de rupture (MPa)
BTC	16×32	28	15,014	2,334	640	201,06	31,83
	16×32	28	15,161	2,356	650	201,06	32,33
	16×32	28	15,369	2,389	660	201,06	32,83

Tableau IV.2. Résultats de l'essai de compression sur le béton fissuré réparé par chemisage

Type de béton	Dimensions (cm ²)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance à la compression simple</i>		
					Force de rupture (KN)	Section (cm ²)	Contrainte de rupture (MPa)
BFC	16×32	> 28	15,532	2,414	630	201,06	31,33
	16×32	> 28	15,499	2,409	640	201,06	31,83
	16×32	> 28	15,471	2,405	620	201,06	30,84

Tableau IV.3. Résultats de l'essai de compression sur le béton non fissuré renforcé par chemisage

Type de béton	Dimensions (cm ²)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance en compression simple</i>		
					Force de rupture (KN)	Section (cm ²)	Contrainte de rupture (MPa)
BRC	16×32	> 28	15,226	2,366	320	201,06	15,91
	16×32	> 28	15,176	2,359	295	201,06	14,67
	16×32	> 28	15,988	2,485	345	201,06	17,15

Tableau IV.4. Résultats effort (contrainte)-déplacement longitudinal des différents types de béton

Force (KN)	Contrainte (MPa)	Déplacement longitudinal (10 ⁻⁴ mm)		
		BTC	BFC	BRC
10	0,50	0,32	0,49	0,01
20	1,00	0,74	0,72	0,03
30	1,49	0,94	0,98	0,05
40	1,99	1,20	1,26	0,06
50	2,49	1,43	1,53	0,07
75	3,73	1,63	2,19	0,11
100	4,97	2,38	2,85	0,16
125	6,22	2,89	3,55	0,22
150	7,46	3,25	4,03	0,30
175	8,70	3,78	4,52	0,41
200	9,95	4,06	4,88	0,53
225	11,20	4,44	5,48	0,74
250	12,43	4,84	5,98	1,10
275	13,68	5,04	6,52	1,50
300	14,92	5,28	6,88	1,89
350	17,41	6,49	7,78	2,44 F=320 σ=15,92
400	19,89	7,18	8,58	
450	22,38	8,22	9,48	
500	24,87	8,89	10,28	
550	27,36	9,85	11,28	
600	29,84	10,60	12,68	
630	31,33	11,19	14,32	
640	31,83	11,50		

Tableau IV.5. Eléments de comparaison pour les différents types de bétons

Type de béton	Masse volumique ρ (g/cm ³)	Force de rupture F_r (KN)	Contrainte de rupture σ_r (MPa)	Déplacement à la rupture ε_r (10 ⁻³ mm)
BTC	2,36	640	31,83	11,50
BFC	2,41	630	31,33	14,32
BRC	2,40	320	15,92	2,44

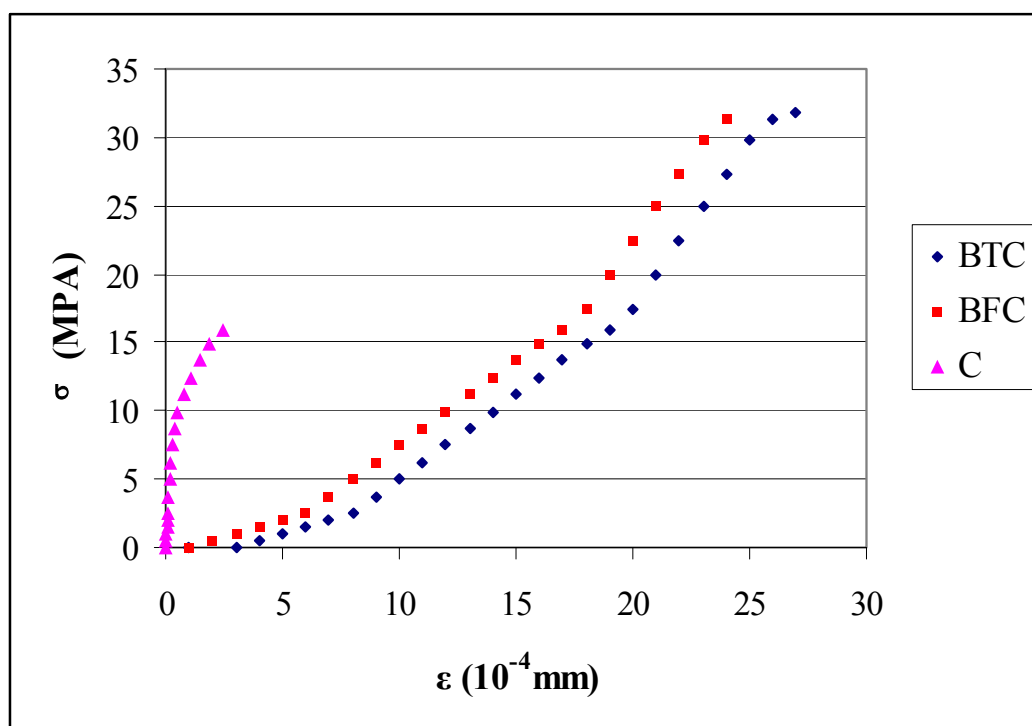


Figure IV.2. Courbe Contrainte – Déplacement selon le type de béton

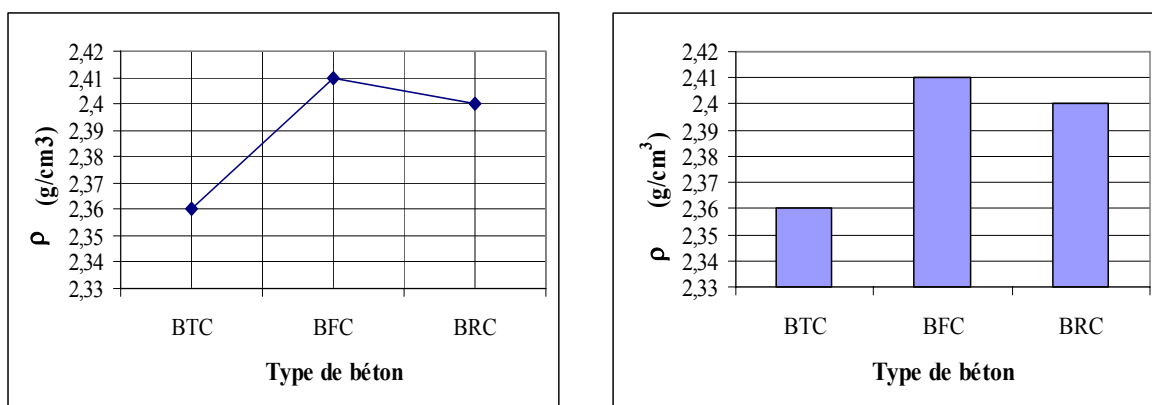


Figure IV.3. Variation de la masse volumique selon le type de béton

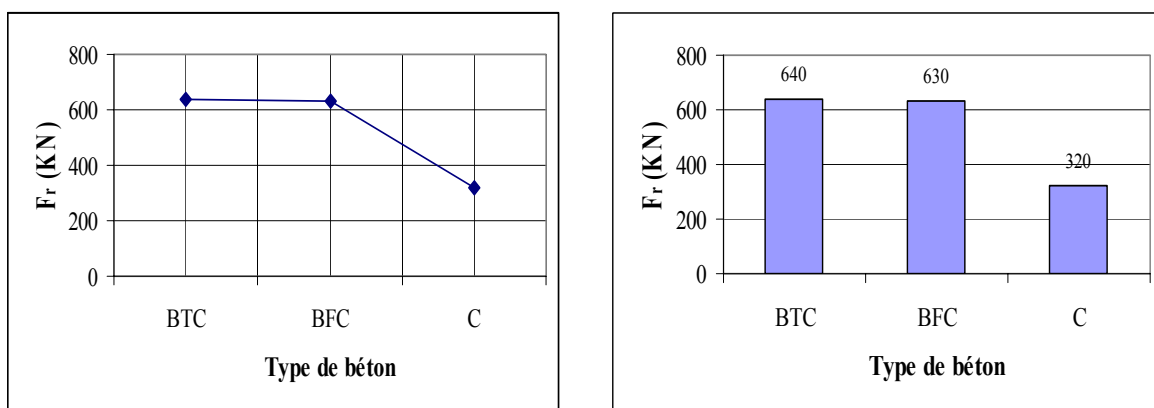


Figure IV.4. Variation de la force de rupture selon le type de béton

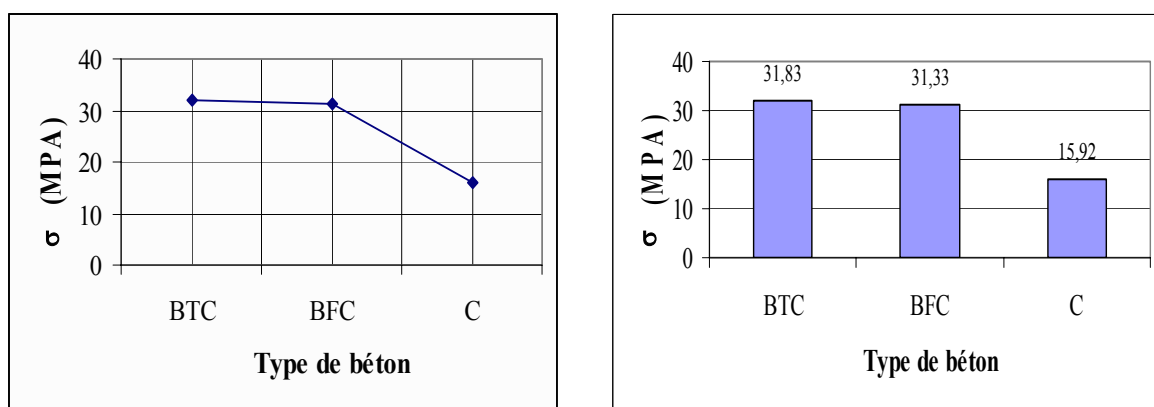


Figure IV.5. Variation de la contrainte de rupture selon le type de béton

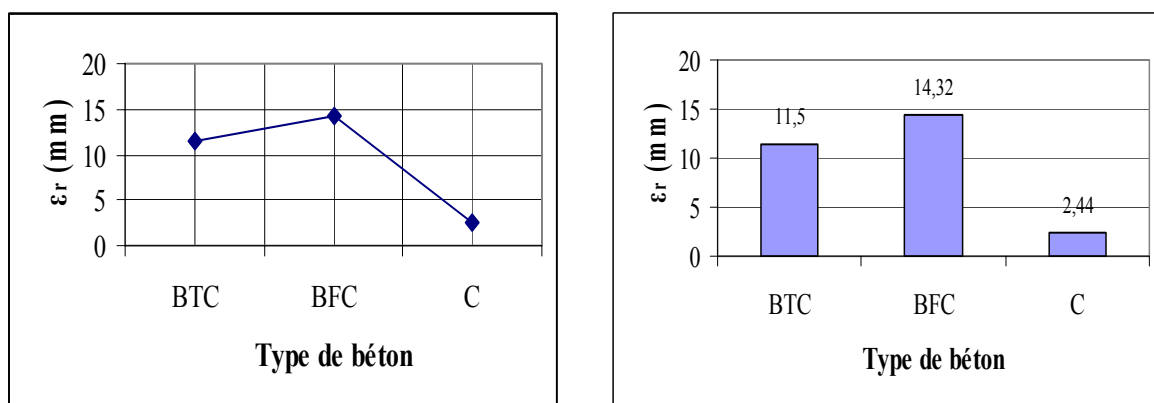


Figure IV.6. Variation de la déformation à la rupture selon le type de béton

IV.2.1.3. Mode de rupture observé

a- Rupture du béton témoin

Au fur et à mesure que la force de chargement augmente, on observe l'apparition de fissures parallèles, au début à l'axe d'application de la charge puis elles se propagent dans toutes les directions pour donner une fissuration dense provoquant la rupture de l'éprouvette

b- Rupture du béton fissuré réparé par chemisage en tissu composite

On observe presque le même mode de rupture que celui du béton de référence, à savoir l'apparition puis la propagation et la densification des fissures jusqu'à la rupture. Le tissu de fibres de verre est rompu en traction et la dégradation du béton est plus avancée que celle du béton témoin. Néanmoins les fragments du béton qui se sont détachés sont maintenus par l'enveloppe matériaux composite, ce qui est avantageux du point de vue sécurité. L'inconvénient dans ce cas est qu'on n'arrive pas à suivre les fissures et leur mode de propagation sur le béton à travers l'enveloppe, mais on peut remédier à ce problème par l'utilisation de jauges de contrôles.



Figure IV. Mode de rupture des éprouvettes lors de l'essai de compression

IV.2.2 ESSAI DE RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION (NF P18-407)

IV.2.2.1 Description de l'essai

L'essai est mené en flexion quatre points conformément à la norme NF P18-407.

Les corps d'épreuve de forme prismatique et de dimensions (14×14×56 cm) sont écrasés par le biais d'une presse hydraulique TONI TECHNIK d'une capacité de 200KN avec une vitesse de chargement constante de 0,5KN/s figure IV.7.

Ils sont sollicités par deux charges concentrées aux tiers de la portée. Ce dispositif permet d'analyser une partie centrale soumise à la flexion pure, sans l'influence d'un effort tranchant figure IV.8.

Pour chaque chargement, la valeur de l'effort ainsi que la flèche correspondante, sont simultanément enregistrées.

La contrainte est calculée par application des formules de la résistance des matériaux pour une poutre sur quatre appuis :

$$\sigma = \frac{3F}{a^2} \quad (\text{IV.1})$$

L'essai est réalisé en considérant différents types de corps d'épreuve :

- Eprouvettes témoins.
- Eprouvettes fissurées réparées par demi chemisage de la section transversale.
- Eprouvettes fissurées réparées par chemisage complet de la section transversale.
- Eprouvettes non fissurées renforcées par demi chemisage de la section transversale.
- Eprouvettes non fissurées renforcées par chemisage complet de la section transversale.



Figure IV.7. Machine de flexion de capacité 200kN – TONI TECHNIK –

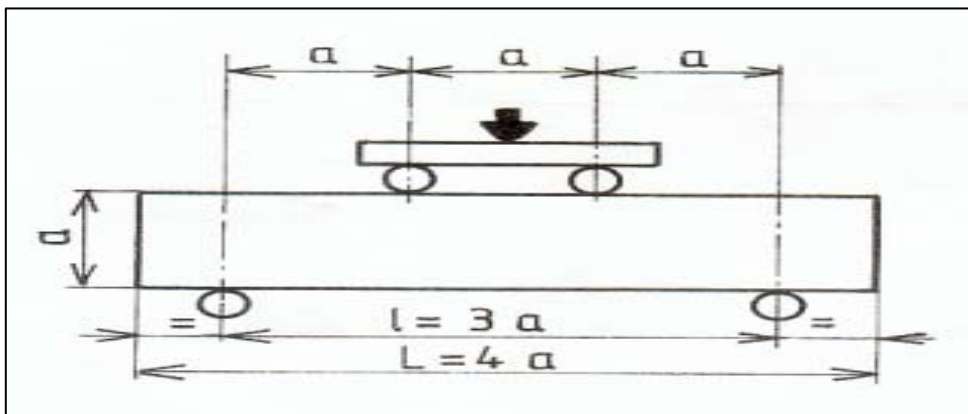


Figure IV.8. Banc d'essai de flexion

IV.2.2.2 Résultats de l'essai de flexion 4 points

Les résultats de l'essai de flexion 4 points sur les différents types des corps d'épreuve sont donnés sous forme de tableaux (tableaux : IV-6, IV-7, IV-8, IV-9, IV-10, IV-11, IV-12) et de courbes (figures : IV-18, IV-19, IV-20, IV-21, IV-22, IV-23, IV-24, IV-25, IV-26).

Tableau IV.6 . Résultats de l'essai de flexion sur le béton témoin

Type de béton	Format (cm)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance en flexion</i>	
					Force de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
BTF	14×14×56	28	28,031	2,554	49,29	7,55
	14×14×56	28	28,044	2,555	58,63	8,97
	14×14×56	28	27,914	2,543	62,08	9,50

Tableau IV.7 Résultats de l'essai de flexion sur le béton non fissuré renforcé par demi chemisage

Type de béton	Format (cm)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance en flexion</i>	
					Force de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
BRDCF	14×14×56	>28	28,329	2,581	118,6	18,15
	14×14×56	>28	28,211	2,570	114,3	17,50
	14×14×56	>28	27,966	2,548	111,5	17,07

Tableau IV.8. Résultats de l'essai de flexion sur le béton non fissuré renforcé par chemisage complet

Type de béton	Format (cm)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance en flexion</i>	
					Force de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
BRCCF	14×14×56	>28	27,910	2,543	118,7	18,17
	14×14×56	>28	28,086	2,559	115,0	17,60
	14×14×56	>28	28,216	2,571	113,0	17,30

Tableau IV.9. Résultats de l'essai de flexion sur le béton fissuré réparé par demi chemisage

Type de béton	Format (cm)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance en flexion</i>	
					Force de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
BFDCF	14×14×56	>28	27,326	2,490	95,5	14,62
	14×14×56	>28	28,230	2,572	95,4	14,60
	14×14×56	>28	28,402	2,588	96,2	14,72

Tableau IV.10. Résultats de l'essai de flexion sur le béton fissuré réparé par chemisage complet

Type de béton	Format (cm)	Age (jours)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	<i>Résistance en flexion</i>	
					Force de rupture (KN)	Contrainte de rupture (MPa)
BFCCF	14×14×56	>28	28,297	2,578	98,0	15,00
	14×14×56	>28	28,451	2,592	114,0	17,45
	14×14×56	>28	27,757	2,529	113,6	17,38

Tableau IV.11. Résultats force (contrainte)-flèche des différents types de béton

Force (KN)	Contrainte (MPa)	Flèche (mm)				
		BRCCF	BRDCF	BFCCF	BFDCF	BTF
2	0,30	0,08	0,05	0,11	0,13	0,08
4	0,62	0,14	0,13	0,16	0,26	0,11
5	0,77	0,17	0,26	0,21	0,29	0,12
10	1,53	0,27	0,37	0,29	0,41	0,19
15	2,30	0,33	0,45	0,35	0,52	0,31
20	3,07	0,39	0,54	0,44	0,63	0,44
25	3,83	0,47	0,59	0,49	0,75	0,59
30	4,60	0,53	0,71	0,59	0,85	0,74
35	5,35	0,68	0,80	0,69	0,96	0,84
40	6,12	0,79	0,91	0,78	1,07	0,96
45	6,88	0,89	1,00	0,92	1,18	1,08
50	7,65	0,99	1,11	1,02	1,29	1,26
55	8,42	1,11	1,27	1,14	1,41	1,36
60	9,18	1,22	1,41	1,22	1,50	1,49=56,67 Cte=8,67
65	9,95	1,33	1,63	1,32	1,62	
70	10,72	1,50	1,78	1,42	1,74	
75	11,48	1,69	1,95	1,52	1,84	
80	12,25	1,85	2,13	1,63	1,97	
85	13,02	2,03	2,31	1,72	2,13	
90	13,78	2,30	2,62	1,86	2,30	
95	14,53	2,47	2,68	1,99	2,46	
100	15,30	2,76	2,95	2,29	2,66=95,7 Cte=14,65	
105	16,07	3,15	3,29	2,67		
110	16,83	4,19	4,49	3,1=108,53 Cte=16,62		
115	17,60	4,86	4,61=114,8 Cte=17,57			
115,57	17,68	5,01				

Tableau IV.12. Eléments de comparaison pour les différents types de bétons

Type de béton	Masse volumique ρ (g/cm ³)	Force de rupture F_r (KN)	Contrainte de rupture σ_r (MPa)	Gain en résistance G_σ (%)	Flèche ε_r (mm)	Gain en déformation G_ε (%)
BTF	2,55	56,67	8,67	0	1,49	0
BFDCF	2,55	95,70	14,65	68,97	2,66	78,52
BFCCF	2,56	108,53	16,61	91,58	3,10	108,05
BRDCF	2,56	114,80	17,57	102,65	4,61	209,40
BRCCF	2,56	115,57	17,69	104,04	5,01	236,24

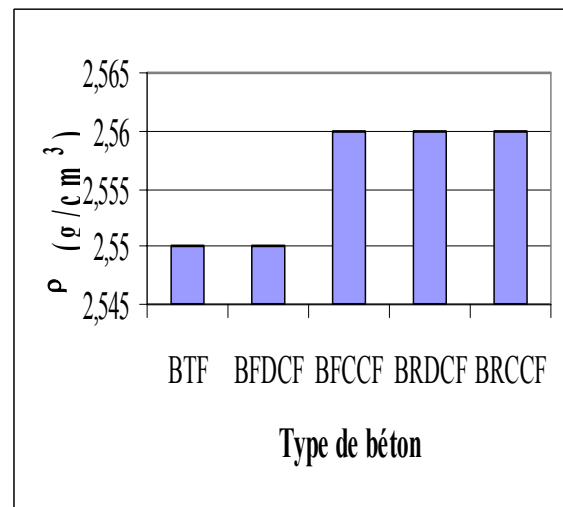
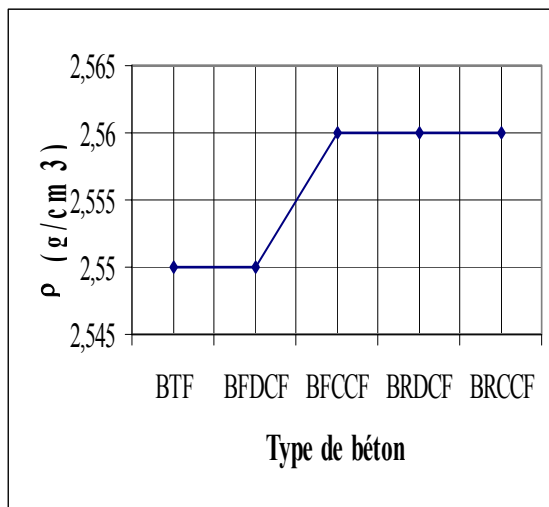


Figure IV.9. Variation de la masse volumique selon le type de béton

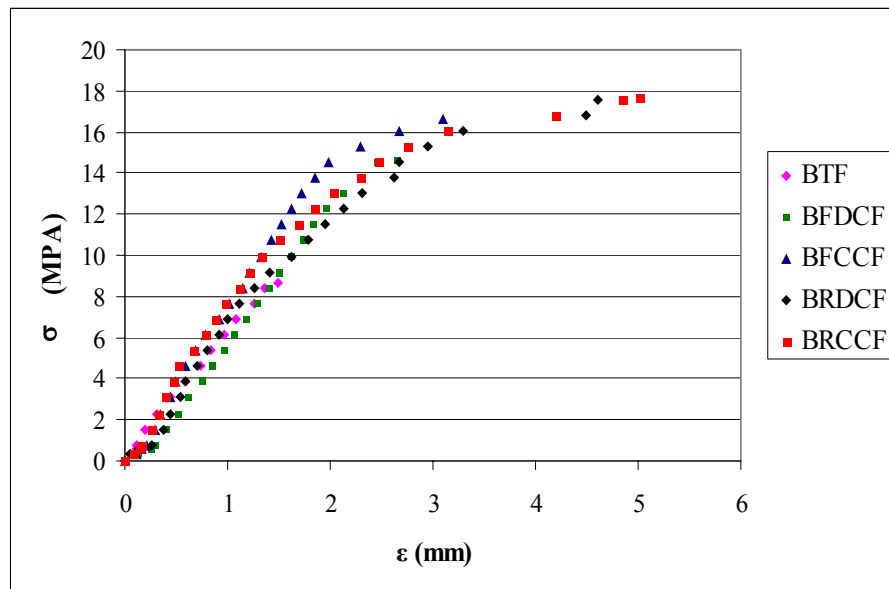


Figure IV.10. Courbe Contrainte – Déplacement selon le type de béton

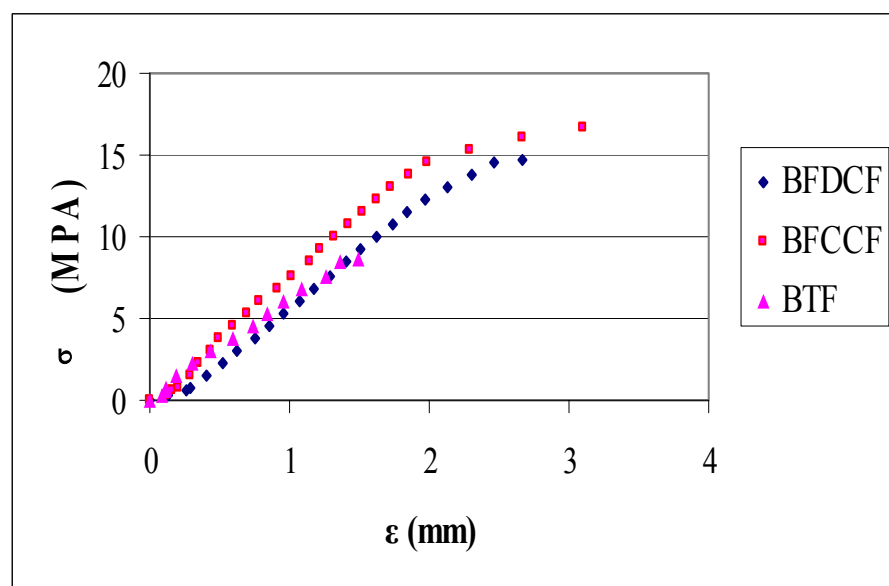


Figure IV.11. Courbe Contrainte – Déplacement selon le type de béton

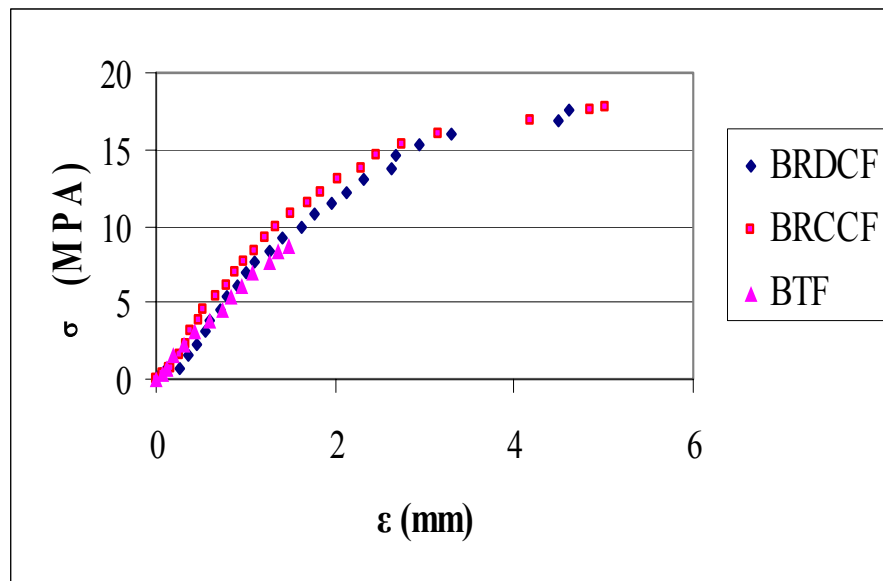


Figure IV.12. Courbe Contrainte – Déplacement selon le type de béton

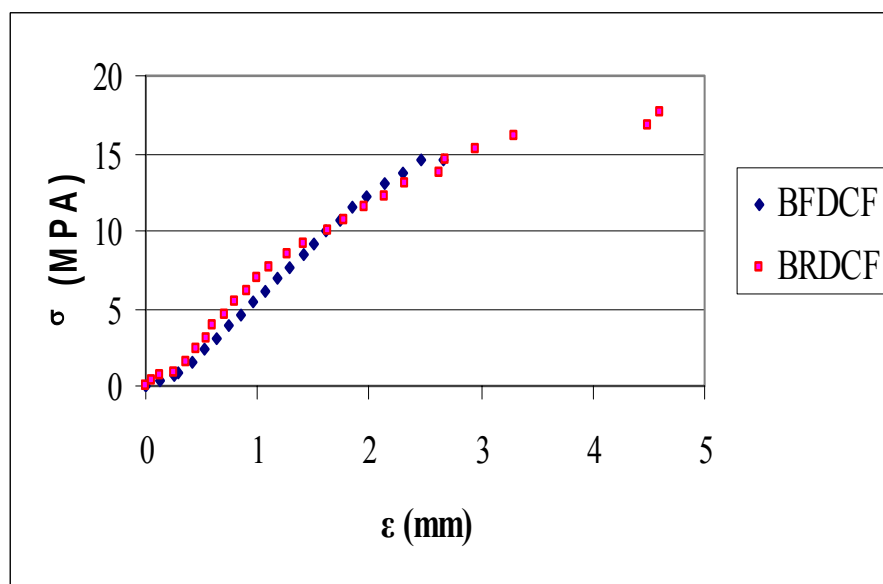


Figure IV.13. Courbe Contrainte – Déplacement selon le type de béton

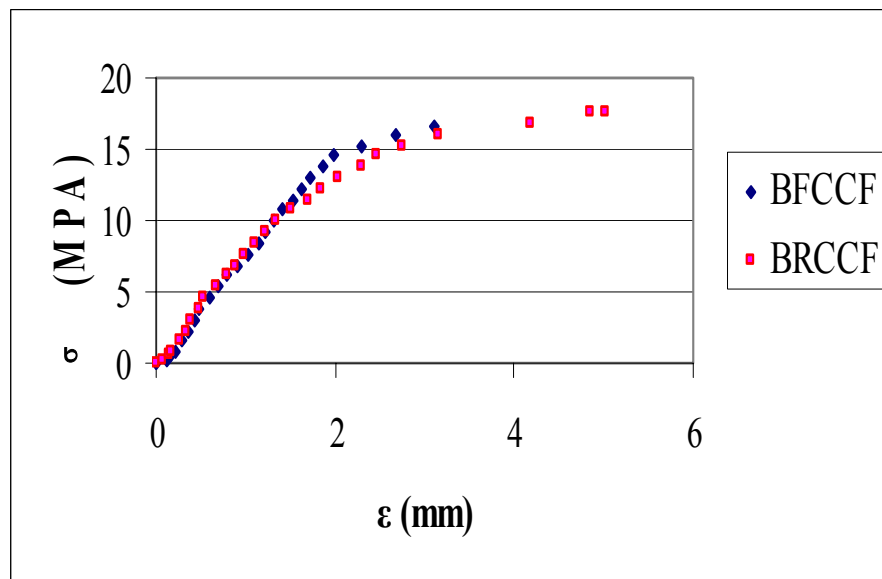


Figure IV.14. Courbe Contrainte – Déplacement selon le type de béton

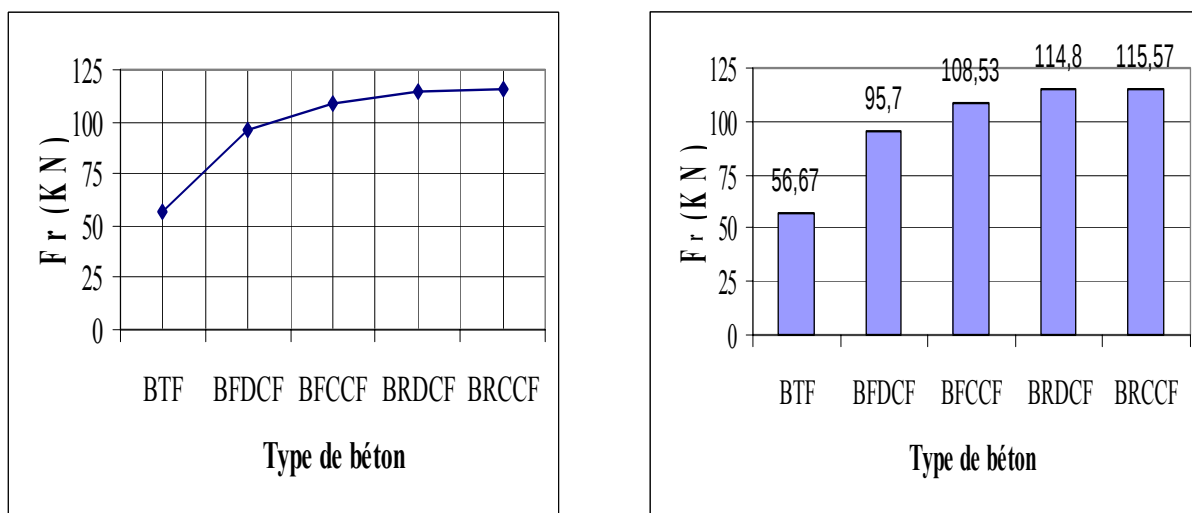


Figure IV .15. Variation de la force de rupture selon le type de béton

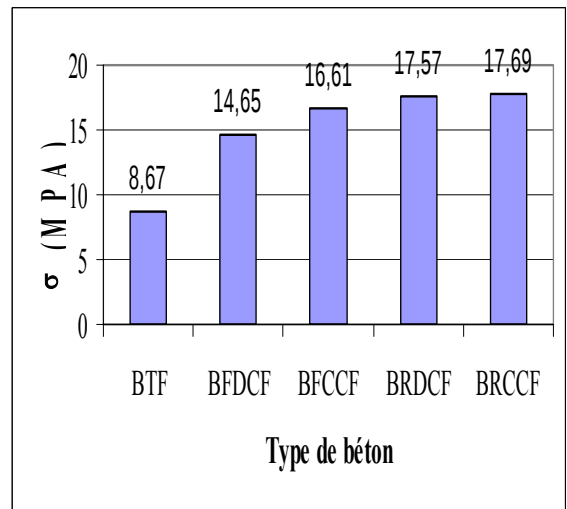
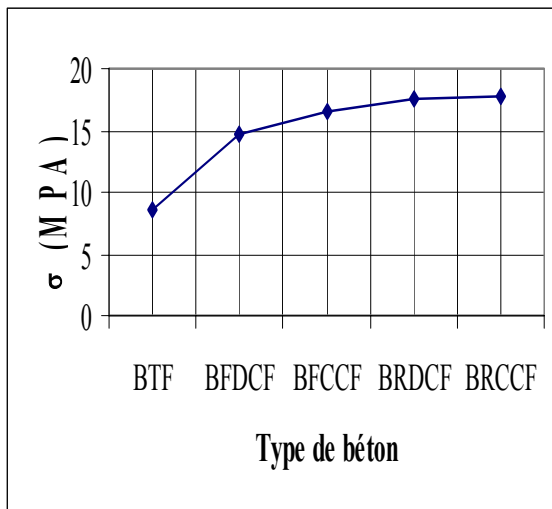


Figure IV.16. Variation de la contrainte de rupture selon le type de béton

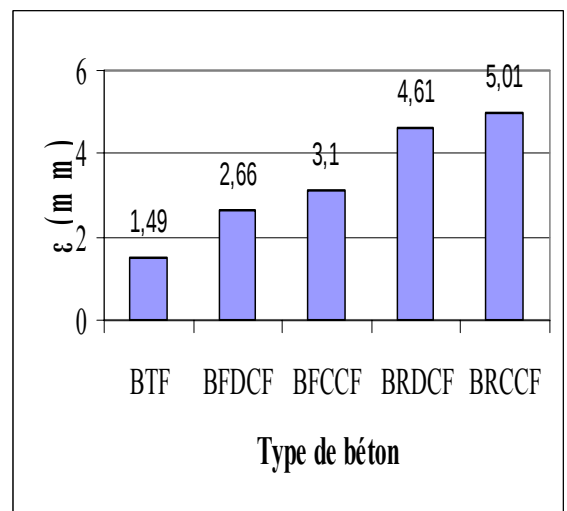
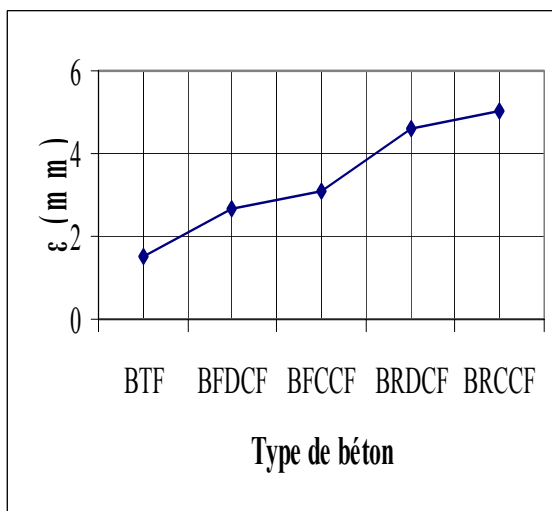


Figure IV.17. Variation de la déformation à la rupture selon le type de béton

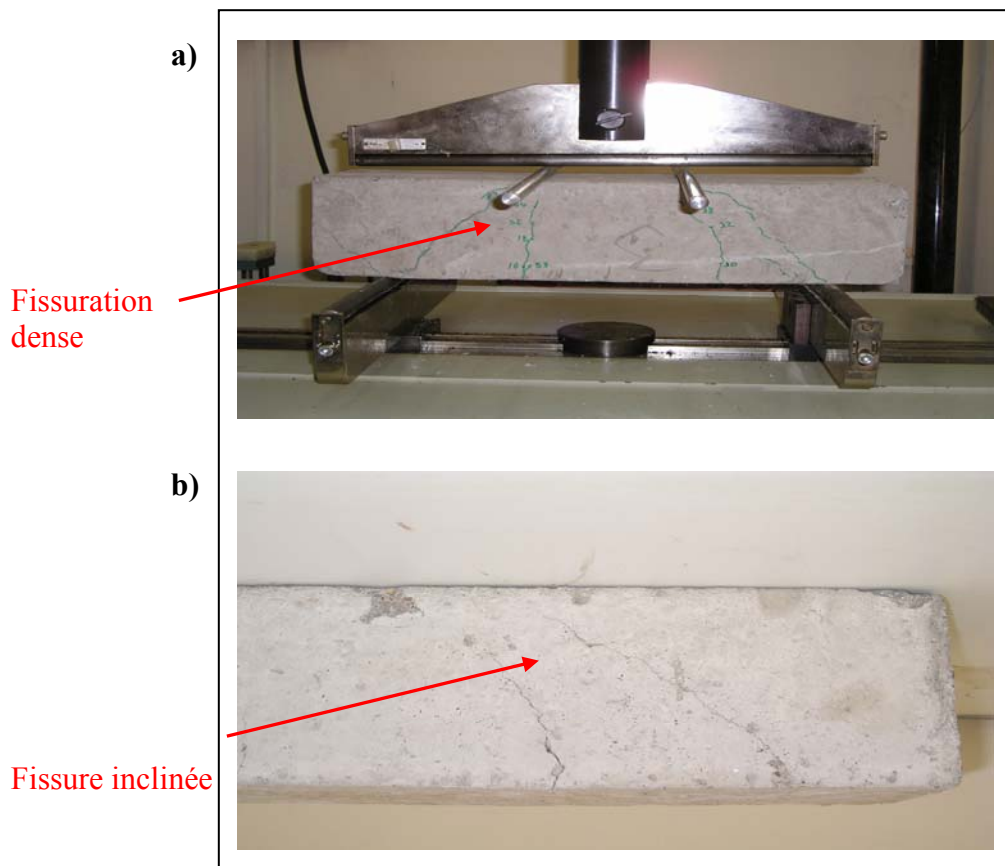
IV.2.2.3. Mode de rupture

a. Rupture du béton témoin

Le béton de référence subit une rupture classique d'un béton sollicité en flexion avec un écoulement des aciers d'armatures suivi par l'épuisement de la résistance à la compression du béton.

Le mode de rupture observé sur les éprouvettes en béton armé, présente une amélioration sensible concernant l'amorce des microfissures et la vitesse de propagation des fissures est nettement réduite par rapport au béton non armé. Figure IV.18. Les armatures reprennent les efforts de traction et le béton tendu participe par effet d'engrainement et de goujon. La résistance développée par la section est nettement améliorée.

Lors de l'essai de flexion 4 points, on observe une densification de fissures qui se développent, tout le long de l'élément, au fur et à mesure que l'on augmente le taux de chargement. La rupture est obtenue par écrasement des bielles inclinées au niveau des appuis.



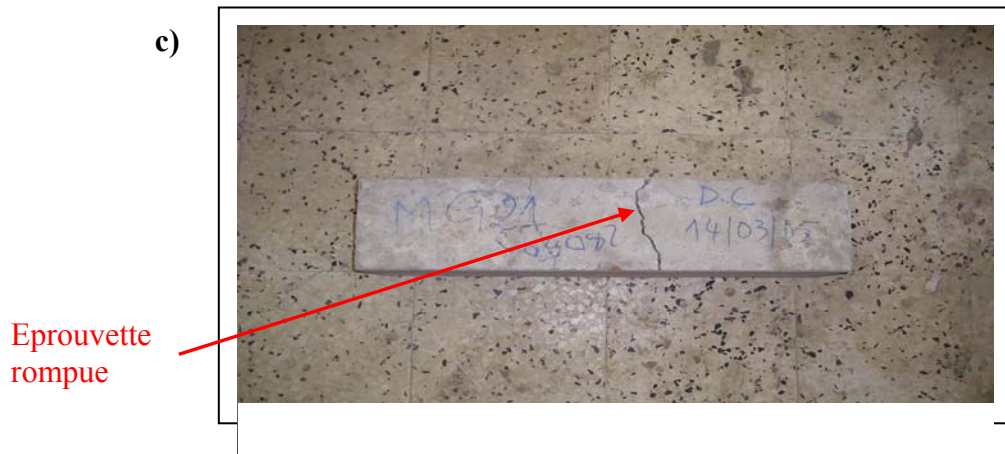


Figure IV.18. Mode de rupture du béton témoin

b. Rupture du béton réparé ou renforcé par matériaux composites

Dans cette étude, on a considéré quatre types de corps d'épreuve.

- Béton non fissuré renforcé par demi chemisage en tissu composite de fibres de verre.
- Béton non fissuré renforcé par chemisage complet en tissu composite de fibres de verre.
- Béton fissuré réparé par demi chemisage en tissu composite de fibres de verre.
- Béton fissuré réparé par chemisage complet en tissu composite de fibres de verre.

. Béton non fissuré renforcé par demi chemisage en tissu composite de fibres de verre

Lors de l'essai, on a observé presque le même mode de rupture que pour le béton armé non fissuré, à savoir l'apparition puis la propagation des fissures inclinées au niveau des appuis. L'apport induit par le tissu composite réside dans l'augmentation de la charge de rupture. Aucun décollement du tissu composite n'a été observé au niveau de l'interface composite – béton. Ceci peut être expliqué par le fait que la contrainte de cisaillement développée reste très limitée par rapport à la valeur limite figure IV.19.



Figure IV.19. Mode de rupture du béton réparé/renforcé par demi chemisage

- **Béton non fissuré renforcé par chemisage complet en tissu composite de fibres de verre**

Le chemisage complet de l'élément fléchi, modifie son mode de rupture. On observe en premier lieu, la formation de fissure au niveau de la mi-travée, ensuite son développement parallèlement à la charge appliquée au fur et à mesure que celle-ci augmente. La rupture est obtenue par rupture total du tissu composite et la dégradation du béton est plus avancée que celle du béton témoin, figure IV.20. Nous regrettons, par faute de moyen de ne pas avoir pu suivre le développement de la micro fissuration par un microscope. Ce qui aurait permis, de mieux connaître le type d'évolution de la fissure et le transfert de charge au composite.

L'apport de ce type de chemisage réside, aussi dans le fait que la chute des fragments du béton qui se détachent est empêchée par l'enveloppe constituée de fibres de verre imbibée d'époxy.



Figure IV.20. Mode de rupture du béton non fissuré renforcé par chemisage complet

- Béton fissuré réparé par chemisage complet en tissu composite de fibres de verre

L'apport du chemisage complet de la section de l'élément fléchi, réside dans la modification du mode de rupture. En effet, on a observé, en premier lieu, la formation de la fissure au niveau de la travée qui se développait parallèlement au taux de chargement appliqué. La rupture est obtenue par rupture total du tissu composite. Nous regrettons par faute de moyen de ne pas pu avoir suivre le développement de la micro fissuration par un microscope. Ce qui aurait permet de mieux connaître le type d'évolution de la fissure et le transfert de charge au composite. La charge de rupture dans le cas d'un élément fissuré réparé par le tissu composite est nettement supérieure par rapport à celle appliquée pour le béton non fissuré renforcé.



Figure IV.21. Mode de rupture du béton fissuré réparé par chemisage complet

IV.3. Analyse des résultats et conclusion

L'analyse des résultats obtenus dans cette étude expérimentale, nous a permis d'en déduire les remarques et conclusions suivantes :

- La masse volumique des corps d'épreuve avec chemisage (demi chemisage – chemisage complet) ne varie presque pas, par rapport à celle des corps d'épreuve de référence. Ceci revient au caractère léger des matériaux composites.
- La force de rupture à la compression du béton fissuré et réparé (BFC) a atteint 630KN, elle est presque égale à celle du béton témoin (640KN). Ce mode de réparation a permis la récupération à 98% de la résistance perdue de l'élément fissuré.
- Un gain de 24,5% en déformation sous compression, est obtenu pour les éprouvettes fissurées et réparées par l'enveloppe matériaux composite. En plus de la résistance récupérée, on a réussi à obtenir un élément plus ductile que l'élément de référence.

- Contrairement aux éprouvettes fissurées puis réparées (BFC), la force de rupture et la déformation à la rupture en compression des éprouvettes non fissurées et renforcée (BRC) sont beaucoup plus petites que celles du béton témoin. Ceci peut s'expliquer par le fait que, la machine d'essai a enregistré la force de rupture et la déformation à la rupture du matériau composite et non pas celles de l'ensemble (béton + matériaux composite). Il fallait donc, placer des jauges extensométriques sur la support du béton avant chemisage. Par faute de moyen, l'essai n'a pas pu être réalisé convenablement.
- Lors de l'essai de traction par flexion, on observe une augmentation considérable des forces de rupture et des flèches à la rupture pour chaque type de béton (BFDCF, BFCCF, BRDCF, BRCCF) par rapport à celle du béton témoin (BTF). Dans tous les cas, on a réussi à augmenter la résistance et la ductilité respectivement jusqu'à 204% et 336% pour l'élément BRCCF.
- On constate pour le béton fissuré puis réparé, qu'on a réussi non seulement à récupérer la résistance perdue de l'élément, mais à l'augmenter jusqu'à 169% pour BFDCF et 191,5% pour BFCCF. En plus de cette récupération de résistance, le béton obtenu après réparation est plus ductile que le béton témoin, vu qu'un gain de 78,5% et 108,05% en déformation a été réalisé, respectivement pour les éprouvettes BFDCF et BFCCF.
- On remarque que la hauteur du chemisage dans le cas du béton fissuré puis réparé influe sur la résistance et la ductilité au même temps. Plus on augmente la hauteur du chemisage, plus la résistance et la ductilité augmentent. Elles ont augmenté respectivement de 22,6% et 29,5% pour l'éprouvette BFCCF.
- Le renforcement par le tissu en fibres de verre a donné un gain de 102,7% en résistance et 209,4% en déformation pour l'éprouvette BRDCF et un gain de 104% en résistance et 236% en déformation pour l'éprouvette BRCCF. On remarque que la hauteur du chemisage influe peu sur la résistance, par contre son apport réside dans son apport en ductilité. Plus la hauteur du chemisage augmente, plus la ductilité augmente.

- La hauteur du chemisage influe, également sur le mode de rupture de l'élément .Lors de l'essai de flexion sur l'éprouvette BRDCF, la fissuration commence au niveau des appuis, puis se propage dans toutes les directions, pour donner une fissuration dense puis la rupture. Par contre pour l'éprouvette BRCCF, la fissuration commence à mi-travée puis se propage parallèlement à la force de chargement au fur et à mesure que celle-ci augmente, pour donner ensuite la rupture.
- L'intérêt du chemisage réside aussi, du point de vue sécurité, dans le fait qu'il empêche la chute et la projection des fragments du béton qui, se détachent sous chargement.

Enfin, en conclusion, notre approche conceptuelle a porté sur l'amélioration du mode de rupture fragile du béton ordinaire en lui conférant une plus grande ductilité, à travers le contrôle des mécanismes de fissuration par l'utilisation de la technique de chemisage par tissu composite. L'apport en rigidité par le tissu composite aux éléments de structures déjà fissuré ou /et non fissuré est largement obtenu et montré à travers les différents résultats expérimentaux. Ceci permettra sans aucun doute, d'entreprendre par la suite des investigations plus poussées pour caractériser le matériau renforcé sous différentes sollicitations, en particulier sous charges cycliques et à la fatigue.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Durant leur vie les structures et les ouvrages en béton armé, sont soumis à des contraintes statiques, dynamiques et climatiques pouvant causer leur détérioration et leur endommagement.

Selon les différentes causes de désordres les opérations de maintenances des ouvrages consistent à les protéger en limitant leur corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance ou à les renforcer en améliorant leurs performances et leur durabilité.

Ceci a fait l'objet de cette étude expérimentale.

Dans le cadre de ce travail, on propose une technique de réparation et de renforcement par collage externe d'un tissu en fibres de verre appliqué par marouflage direct sur le support béton.

Une étude expérimentale du comportement mécanique de deux séries distinctes de corps d'épreuve est réalisée. La première série concerne des éléments en béton armé déjà fissurés et la deuxième série concerne des éléments non fissurés (béton sain).

Pour chaque série de corps d'épreuves deux types de chemisage sont adoptés. Un chemisage complet de la section transversale et un demi chemisage jusqu'à l'axe neutre de la section transversale.

Le comportement mécanique de ces échantillons est déterminé par l'essai de compression axiale et l'essai de traction par flexion.

Les résultats obtenus montrent :

- L'amélioration du mode de rupture fragile du béton ordinaire, en lui conférant une plus grande ductilité, à travers le contrôle des mécanismes de fissuration par l'utilisation de la technique de chemisage par tissu composite.
- L'apport en rigidité du tissu composite aux éléments de structures déjà fissuré ou /et non fissuré.

On a donc réussi à améliorer les caractéristiques mécaniques de ces éléments et par conséquent leur durabilité. Ceci permettra sans aucun doute, d'entreprendre par la suite des investigations plus poussées pour caractériser le matériau renforcé sous différentes sollicitations, en particulier sous charges cycliques et à la fatigue.

*Références
Bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BERTHELOT.J.M., FERRIER, E., HAMELIN, P., 'Compressive behaviour of concrete externally confined by composite jackets'. Part B: modeling. Construction and building materials 20 , 2006, pp. 338-347.
- [2] AVRIL, S., FERRIER, E., VAUTRIN, A., HAMELIN, P., SURREL, Y., 'A full-Field optical method for the experimental analysis of reinforced concrete beam repaired with composites'. Composites Part A : applied science and manufacturing.: 35 , 2004, pp. 873-884
- [3] PILAKOUTAS K., HE JH. AND WALDRON P. CRFP «plate strengthening of RC beams, International Conference on Structural Faults & Repair», Edinburgh, 1997, pp.119-127.
- [4] HAMELIN, P., 'AFGC recommendations concerning strenthening and repairing of concrete structures with composite materials'. AFGC/RILEM. Seminar on advences in materiels and structures, Bagneux, France, 2002.
- [5] TOUTANJI ,HA., 'Stress-strain characteristics of concrete columns confined with advanced fiber composite sheets'. ACI. Mater J May- June, 1999, p404.
- [6] SAAMAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. 'Model of concrete confined by fiber composites' . Journal of Structure and Engineering , September 1998, p 1025.
- [7] PINZELLI R. «Kevlar Aramid Fiber for external Strengthening & Repair of Concrete Structures, International Conference on Structural Faults & Repair», London, 1999.
- [8] TUMIALAN G., NANNI A, BELL T AND FUKUYAMA H. «FRP Composite for Strengthening Civil Infrastructure Around the World», SAMPE Journal, vol. 38, n°5, September/October 2002, pp. 9-15.

[9] KARBHARI VM., 'Composite jacketed concrete under uniaxial compression verification of simple design equation'. J Mater Civil Eng, 1997, pp. 185-93.

[10] LOUIS BERREUR, BERTRAND DE MAILLARD, STANISLAS NOSPERGER. «Industrie Française des Matériaux Composites. Etude prospective et stratégique», pp3-24, p129. Revue apparue le 17 décembre 2001.

[11] MAMILLAN M. «Restauration des bâtiments en béton armé», Traité construction, (1994).

[12] J-A CALGARO et R. LACROIX, «Maintenance et Réparation des Ponts», pp390.

[13] J. M. BERTHELOT, «Matériaux Composites –comportement mécanique et analyse des structures-», 3^{ème} édition, 1999, pp5-30, p642.

[14] JEAN-LOUIS Billoët, «Introduction aux Matériaux Composites à Hautes Performances», 1993, pp9-22-54, p85.

[15] Glossaire des Matériaux Composites», C.A.R.M.A, Actualisation décembre 2004, pp2-3, p32.

[16] «Recueil de normes françaises du bâtiment – Bétons et constituants du béton», 2^{ème} édition, 1984.

[17] DURIEZ M. et Arrambide J. «Nouveau traité de matériaux de construction», Editions Dunod. Paris, (1961).

[18] GIRARD, C., DANO, M.L., PICARD, A., GENDRON, G., Bearing behavior of mechanically fastened joints in composite laminates - Part I: Strength and local strains , Mechanics of Advanced Materials and Structures, vol. 10, no. 1, pp. 1-21

[19] JACQUES BARON, Jean-Pierre OLLIVIER, «Les bétons bases et données pour leur formulation», Editions Eyrolles, troisième tirage 1999, pp143, p522.

- [20] GEORGES DREUX, «Nouveau guide du béton», Editions Eyrolles, Paris 1985, pp36-47-116.
- [21] JEAN-MARIE DORLOT, Jean-paul BAÏLON, jaques MASOUNAVE, «Des matériaux», 2^{ème} édition revue et augmentée, pp1-7, p466.
- [22] JONES, ROBERT M., Mechanics of composite materials 2^e edition, Philadelphia: Taylor & Francis, 1998. 519p.
- [23] ADAM M. NEVILLE, «Propriétés des bétons», Editions Eyrolles, septembre 2000, p806.
- [24] AVRIL, S., VAUTRIN, A., HAMELIN, P. & Surret, Y. 2002 Local and Global Analysis of Cracked Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Laminates. In proceedings of ECCM10 Brugge, Belgium.
- [25] HAMELIN, P. 2002 AFGC Recommendations concerning strengthening and repairing of concrete structures with composite materials. In AFGC/RILEM Seminar on Advances in Materials and Structures Bagneux, France. Structures, Vol. 1, pp. 265-270, Oct. 1997.
- [26] SIERRA RUIZ, V., DESTREBECQ, J.F. ET GREDIAC, M. « The transfer length in concrete structures repaired with composite materials : a survey of some analytical models and simplified approaches » Composite Structures, Vol. 55, N° 4, pp. 445-454, 2002.
- [27] SIERRA RUIZ, V., « Renforcement d'éléments structuraux en béton armé à l'aide de matériaux composites : analyse fine de la zone d'ancrage» Thèse doctorale. Université Blaise Pascal, 191p., Déc. 2002.
- [28] Daniel Gay, «Matériaux Composites», Hermes, 4^{ème} édition revue et augmentée, 1997, pp19, p672.
- [29] CALGARO J-A et LACROIX R. Pathologie et évaluation des ponts existants. Traité construction (1999)

[30] POINEAU D. La précontrainte dans les travaux de réparation et de renforcement des ponts. Annales ITBTP, n°501, p.43-84, fév.1992]

[31] Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement – CGS.

[32] HAMELIN P. Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites, pp10.

[33] «Granitex Nouveaux Produits, Fiche Technique», Oued Smar, Alger, Algerie