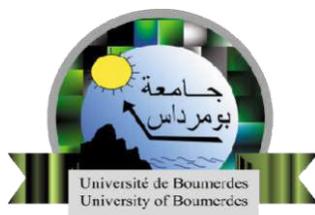


N° Ordre...../FSI/UMBB/2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA–BOUMERDES



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master
Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux en Génie Civil

THEME

**Renforcement des colonnes en béton
par les matériaux composites textiles
mortiers (TRM)**

Réalisé par :

- ZEROUAL Belhadj
- DRISS Mustapha

Proposé et suivi par :

PROF. M^r : GHERNOUTI . Y

Jury:

- M^r CHAID.
- M^r BOUCHOUIKA A.
- M^{me} RABEHI B.

Année universitaire 2017-2018

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le savoir et la volonté surtout la patience pour poursuivre nos études supérieurs et réaliser ce modeste travail

Nous tenons à remercier profondément et sincèrement tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail et particulièrement

à :

Notre promoteur Monsieur GHERNOUTI YOUCEF

qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique et pratique de notre projet de fins d'études.

Nous tenons aussi à remercier : Tous les enseignants de département matériaux en génie civil. et le département génie des procédés sans oublié son

Chef Monsieur AKSAS

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes du laboratoire LNHC pour leurs aides Messieurs : Abouhi Arezki et Abid Ali , Bouchouk Hilal ,

Amine ,Kamel , Redha, Azzdine ,Rabah ,Salim ,Omer, Elhadj

Nous tenons aussi à remercier toute l'équipe de TEKNACHEM

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes de groupe MMGC16

Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidées, conseillées, orientées et encouragées

Driss & Zeroual

Dédicaces



*Je dédie cette thèse
À MES CHERS PARENTS*

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

À Ma femme qui m'a aidé et encouragé

Mes Enfants

Alaa Et Mohamed Idriss, que dieu vous protège et vous garde

A Mes chers et Adorable Frères et Sœurs

Ahmed, Ali, Omar Abd Elkader, Ibrahim, Sedam Hossein et Okeba

A ma Belle-mère et Ami Ahmed qu'ils me soutien

Beaucoup dans mes moments difficiles.

A toutes les familles : DRISS, CHARAOUI ET REZZOUG

A TOUS MES AMIS

Qu'ils Ont Partage Avec Mois Le Bien Et Le Mal.

A Mon binôme Belhadj et sa famille.



Driss Mustapha

Dédicaces



Je dédie cette thèse...

À MES CHERS PARENTS FATOUMA et BOUMEDIENNE

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être.

AMESCHERS ET ADORABLE FRÈRES ET SŒURS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et de ma connaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

M-M-A-R-A-F-R-M-A

À MON EPOUSE ET MES ENFANTS

*Mohamed, Aya et Soudjoud, que dieu vous protège et vous garde
A mes belles sœurs, ma belle-mère et ami Salem qu'ils me soutiennent
Beaucoup dans mes moments difficiles.*

A ma petite sœur Bessma

A TOUS MES AMIS

QU'ILS ONT PARTAGÉ AVEC MOI LE BIEN ET LE MAL.

A mon binôme Mustapha et sa famille.

A tous mes ex collègues du service béton LNHC

A toute l'équipe de TEKNACHEM

Belhadj ZEROUAL



SOMMAIRE

Resumé	1
1. Introduction Générale.....	2
<u>CHAPITRE I : Pathologies Des Ouvrages en Beton et les methodes du diagnostic</u>	
I.1. Pathologies Des Ouvrages En Beton :.....	4
I.1.1 Introduction.....	4
I.1.2. Les type des patholohgies :.....	4
I.1.2.1. D'origine chimique.....	4
I.1.2.2. D'origine mécanique:.....	7
I.1.2.3. D'origine physique :.....	9
I.2. MÉTHODES DE DIAGNOSTIC:.....	10
I.2.1 Introduction:.....	10
I.2.2 Examen visuel ou morphologique:.....	10
I.2.3 Essais sur le béton.....	10
I.2.3.1 Essais non destructifs:.....	10
<u>CHAPITRE II : TECHNIQUES DE RENFORCEMENT</u>	
II.1. Introduction.....	14
II.2. Adjonction d'armatures complémentaires.....	14
II.3. Béton projeté.....	15
II.3.1 Projection par voie sèche.....	15
II.3.2. Projection par voie humide.....	15
II.4. Tôles d'acier collées.....	16
II.5. MATERIAUX COMPOSITES.....	17
II.5.1. Definition :.....	17
II.5.2. Caractéristiques générales.....	18
II.5.3 Polymère renforcé de fibres (PRF).....	19
II.5.3.1 .Matrices.....	20
II.5.3.2 .Résines.....	20
II.5.3.3. Fibres	21
II.5.4. Caractéristiques des fibres.....	22
II.5.5. Architecture des fibres.....	23

II.5.6. Comportement des poteaux confinés par PRF.....	25
II.5.6.1. Introduction.....	25
II.5.6.2 Méthodes de confinement :.....	26
II.5.6.3 Comportement mécanique.....	27
II.5.7. Textile-Reinforced Mortar (TRM).....	33

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III .1. INTRODUCTION.....	37
III .2. CIMENT:	37
III .3. EAU DE GACHAGE :.....	39
III .4. LES GRANULATS :.....	39
III.4.1. CARACTERISTIQUES DES SABLES :.....	39
III.4.1.1. Analyses granulométriques et classes granulaires réelles:.....	40
III.4.1.3.Module de finesse (Mf) : Selon NFP P18-560MF.....	41
III.4.1.4. Equivalent de sable (SE) NF EN 933-8 :.....	41
III.4.1.5.Masse volumique :.....	41
III.4.1.6. Résistance à la fragmentation de sable (Friabilité) :.....	41
III.4.2. CARACTERISTIQUES DES GRAVILLONS :.....	42
III.4.2.1. Analyses granulométriques et classes granulaires réelles :.....	42
III.4.2.3.Masse volumique :	43
III.4.2.4. Propreté superficielle des gravillons (f) :.....	44
III.4.2.5. Coefficient D'aplatissement (FI):.....	44
III.4.2.6.Essai de Dureté :.....	44
III.5. Remarque	45
III.6. MATERIAUX DE REPARATION :	45
III.6.1. Les fibres de carbone :.....	45
III.6.2. Tissus de fibre de verre :.....	46
III.6.3. Résine :	47
III.6.4.Mortier de réparation :	48
III.6.5.Grilles en fibre de Verre :.....	51
III.6.6.Grilles métallique :.....	51

III.7 FORMULATION DE BTON	53
III.8.1. Confection des éprouvettes du béton :	55
III.8.2. Renforcement des éprouvettes :	56
III.8.2.1. Mise en œuvre des TRM (Textile Reinforced Mortar)	56
III.8.2.2. Mise en œuvre Des PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone.....	58
III.8.3. Abréviations les éprouvettes désignés à l'essai :	61
III.8.4. Essai à la compression.....	63
VI. Discussions Des Resultats	64
VI.1.Conclusion	72

Figure I.1 : Structures atteintes par la carbonatation.

Figure I.2 : *Structure atteinte par l'attaque des chlorures*

Figure I.3 : Mécanisme de l'attaque des sulfates

Figure I.4 : Epaufrures dues à l'alcali-réaction

Figure I.5 : Influence de la corrosion des armatures.

Figure I.6 : *Tassement Différentiel*

Figure I.7 : Désordres dus au séisme

Figure I.8 : Scléromètre

Figure I.9 : Principe de l'auscultation dynamique à l'ultrason.

Figure I.10: Sonde de Windsor

Figure I.11: Pachomètre.

Figure I.12: Corrosimètre

Figure I.13: Fissuromètre

Figure I.15: Carottage.

Figure II.1: Adjonction d'armatures supplémentaires

Figure II.2 : Béton projeté par voie humide..

Figure II.3 : Béton projeté par voie sèche

Figure II.4: précontrainte additionnelle.

Figure II.5 : Plaques d'acier collées.

Figure II.6 : Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites

Figure II.7 : Composants d'un matériau composite

Figure II.8 : Différents types de matrices.

Figure II.9 : différents types de fibres.

Figure II.10 : Tissu en fibres de carbone

Figure II.11: Mat en fibres de verre.

Figure II.12 : Structure D'un Stratifi

Figure II.13 : Contraintes-déformations d'un béton confiné et non confiné

Figure II.14 : Confinement des poteaux par stratification directe.

Figure II.15 : Confinement des poteaux par enroulement filamentaire.

Figure II.16 : Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge

Uniaxiale de compression

Figure II.17 : Mécanisme de rupture d'un béton enveloppé d'un PRF soumis à une charge de compression.

Figure II.18 Modes de rupture d'un béton renforcé par un PRF à base de fibres de verre et de résine époxy

Soumis à une charge de compression

Figure II.19 : Influence de la résistance initiale du béton sain sur la résistance axiale du béton

Renforcé pour différents Epaisseur

Figure II.20 : Influence de l'épaisseur du PRF sur le comportement contrainte/déformation

Figure II.21 : Influence de l'angle d'orientation des fibres sur la valeur du module élastique.

Figure II.22 : Influence de l'orientation des fibres du FRP sur le comportement contrainte/déformation

Figure II.23 Effet de l'état de la longueur de liaison et du module élastique sur les contraintes circulaire

Figure II.24 : Effet de l'état de liaison sur le comportement contrainte/déformation

Figure II.25 : Tenue au feu pour différents éléments renforcés et isolés par PRF

Figure II.26 : Aillage de fibres de basalte dans deux directions.

Figure II.27 : *Renforcement d'une chambre forte par TRM.*

Figure III.1: Sac de ciment CPJ-CEMII

Figure III.2: *Courbe d'analyse granulométriques des granulats*

Figure III.3 : Tissu de Fibre De Carbone

Figure III.4 : Tissu de Fibre de verre

Figure III.5 : Différents composants ce Sika-Dur-330

Figure III.6: Produit Sika-latex (5L)

Figure III.7 : fumée de Silice.

Figure III.8 : Mortier de réparation confectionné dans des moules prismatique

Figure III.9 : Essai de compression et Essai de flexion trois points

Figure III.10: Grille de Fibre de Verre et Grille Métallique

Figure III.11 : Eprouvettes Testées.

Figure III.12 : *Machine de traction ZWICK-ROWEL*

Figure III.13 : Disposition Des Grilles Sur La Machine De Traction

Figure III.14: Granulats (sable, gravier)

Figure III.15: *Moules cylindrique (16*32) cm*

Figure III.16 .Malaxeur

Figure III.17 : Confection des éprouvettes en béton sur chantier

Figure III.18 : Etapes de traitement de la surface des éprouvettes

Figure III.19 : Préparation des grilles (métallique et en verre)

Figure III.20 : Préparation du mortier de réparation

Figure III.21 : Renforcement des éprouvettes en béton par la technique TRM (grille en verre)

Figure III.22 : Renforcement des éprouvettes en béton par la technique TRM (grille en métallique)

Figure III.23 : Découpage de fibre de carbone

Figure III.24 : Mélange des composants A et B

Figure III.25 : Application de la couche de colle sur la surface de béton

Figure III.26: Collage de tissus avec la Résine

Figure III.27 : *Éprouvette confinés* par (PRFV) et(PRFC)

Figure III.28: Éprouvette soumise à la compression simple

Figure IV.1 : Contrainte à la compression des variantes PRFC et PRFV par rapport le béton témoin

Figure IV.2 : Gain de contrainte à la compression des variantes en TRM par rapport BT

Figure IV.3 : Effet de nombre de nappes de grille de fibre de verre

Figure IV.4 : Effet de nombre de nappes de grille métallique

Figure IV.5 : Effet de type de grille sur la résistance à la compression

Figure IV.6 : Effet de nombre et de type grille sur la résistance à la compression

Figure IV.7 : Résistances à la compression des variantes PRF par rapport celles de TRM

Tableau II.1 : Exemples de matériaux composites.

Tableau II.2 : Comparaison des matrices TD et TP.

Tableau II.3: Caractéristiques générales des différents types des fibres [3]:

Tableau II.4 : Performances comparées des différents types d'architecture.

Tableau III.1 : *Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ-CEMII/AGICA*

Tableau III.2 : *Caractéristiques physiques du ciment CPJ-CEMII/A GICA*

Tableau III.3 : *Composition minéralogique du ciment CPJ-CEMII/A GICA*

Tableau III.4 : *Composition chimique du ciment CPJ-CEMII/A GICA*

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du sable : 0/1 BOUSSAADA

Tableau III.6 : *Analyse granulométrique du sable : 0/4 Carrière Bouzegza*

Tableau III.7 : *Valeur de module de finesse*

Tableau III.8 : *Valeurs des équivalents des sables & du bleu de méthylène*

Tableau III.9 : *Valeurs des masses volumiques*

Tableau III.10: *Valeurs de Friabilité*

Tableau III.11: *Analyse granulométrique du gravillon (3/8) BOUZEGZA*

Tableau III.12 : *Analyse granulométrique du gravillon 8/15 /BOUZEGZA*

Tableau III.13: *Analyse granulométrique du gravillon 15/25 BOUZEGZA*

Tableau III.14: *Valeurs des masses volumiques*

Tableau III.15 : Propriétés des gravillons

Tableau III.16: *Coefficient D'aplatissement*

Tableau III.17 : *Coeff. LA (Los-Angeles)*

Tableau III.18 : *Caractéristique Mécaniques De Fibre De Carbone*

Tableau III.18 : *Mélange Granulaire (Dmax =25mm)*

Tableau III.19 : *Caractéristique Mécaniques De Fibre De Verre*

Tableau III.20 : *Caractéristiques Générales de la Résine Sika-dur-330.*

Tableau III.21 : formulation de mortier

Tableau III.22 : *Caractéristiques physiques du sable Oued Souf*

Tableau III.23: *Résistances à la compression et à la traction par flexion sur mortier à 7 et 28 jours*

Tableau III.24 : *Caractéristique Mécanique Des Grilles Utilisées*

Tableau III 25 : *Mlange granulaire (D max=25 mm)*

Tableau III 26 : *Proportions du différent constituant de compositions*

Tableau III.27 : *Résistance à la compression du béton durci*

Tableau III.28: *Abréviations Des Variantes*

Résumé

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale qui étudie le comportement du béton en compression et évalue l'effet de renforcement par deux techniques, la première technique concerne le renforcement par des matériaux composites en PRF (polymère renforcé de fibre de carbone ou fibre de verre) et la seconde technique est une nouvelle technique qui est dans la voie de développement, le renforcement par les composites textiles mortier (Textile Reinforced Mortar : TRM) a base de grille métallique ou grille en fibre de verre.

Un total de sept (07) variantes de béton, un béton non confiné et six bétons confinés à l'aide de deux techniques sont soumis à la compression axiale. Les objectifs de cette étude sont de vérifier l'applicabilité et l'efficacité du confinement par les deux techniques pour améliorer le comportement du béton, d'évaluer l'effet du confinement par PRF et TRM.

Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de confinement du béton par les deux techniques dans l'amélioration de la résistance à la compression et de la déformation. Les résultats sont également similaires dans le cas de confinement de béton par PRFC et par TRM avec deux nappes de grilles métallique.

Mots clés : Confinement, composites, PRF, TRM, grilles.

1. Introduction Générale :

La dégradation des structures est considéré parmi les problèmes majeurs dans le domaine de la construction ; et la plupart des structures présentent des signes de faiblesse et ne répondent ou ne répondront plus aux exigences pour lesquelles elles ont été conçues. Les causes sont multiples, on peut citer : des erreurs lors de l'étude ou de l'exécution, un accroissement des charges, un changement de l'exploitation de la structure, la corrosion des armatures, des actions accidentelles telles que les séismes ou les chocs...

L'apparition de ces problèmes ne laisse que deux solutions: la reconstruction ou la réparation. Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que la réparation ou le renforcement, Ce qui fait que celles-ci seront plus appropriées.

Le renforcement des structures en génie civil a pour but de réparer et de mettre en conformité des structures existantes, soit pour des raisons de pertes de propriétés initiales, pour des raisons deremise à niveau liées à de nouveaux règlements ou de nouveaux usages, soit pour des raisons esthétiques.

De nombreuses techniques ont été développées pour le renforcement des structures en béton armé comme le chemisage des poteaux, l'incorporation de profilé smétalliques, l'augmentation de la section du béton avec ou sans augmentation des armatures.

Dans les années précédentes, la technique la plus utilisée était le collage de plaques métalliques dans les parties les plus sollicitées. Cette technique résout le problème de dégradation des structures par augmentation de la capacité portante des éléments structuraux mais elle présente de sérieux inconvénients dont la corrosion des armatures, la difficulté de maniabilité et l'impossibilité d'ancrer les plaques sur des surfaces irrégulières...

Récemment, des travaux de recherche ont été menés pour remplacer ces plaques d'acier par un matériau non corrosif, plus léger et de haute résistance ; les polymères renforcés de fibres (PRF) offrent une alternative préférable. [3]

L'utilisation de plaques en matériaux composites augmente les performances des éléments renforcés. Comparativement aux autres techniques de renforcements les PRF présentent les avantages suivants: légèreté, haute résistance, facilité de mise en œuvre, absence de corrosion, possibilité et facilité d'élaboration des formes complexes avec un minimum d'opérations.

Le mémoire se divise en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur pathologies des ouvrages en béton ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.

Le deuxième chapitre décrit les méthodes de renforcement des structures en béton armé dégradées et fait un survol sur l'utilisation des matériaux composites PRF et les composites textiles mortiers.

Le troisième chapitre expose les caractéristiques des matériaux utilisés pour la réalisation de ce travail

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus, leurs discussions et interprétation

Le travail est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : Pathologies des ouvrages en béton et les méthodes du diagnostic

I.1. PATHOLOGIES DES OUVRAGES EN BETON ARME :

I.1.1 Introduction

Le béton armé est le matériau de base le plus utilisé dans le génie civil depuis plus d'un siècle. Il peut se dégrader et perdre une part de ses propriétés sous l'influence de causes multiples qui peuvent être liées à sa qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Des pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir. Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit un diagnostic nécessaire pour la prise des décisions relatives à la maintenance de l'ouvrage concerné.

I.1.2. Type des pathologies :

Il existe plusieurs types de pathologie à savoir :

I.1.2.1. Origine chimique

➤ **Carbonatation**

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux. Elle conduit à la formation du carbonate de calcium par réaction chimique entre la portlandite et le gaz carbonique présent dans l'air. Le taux de présence du gaz carbonique varie en fonction du milieu où se trouve l'ouvrage.[3]

Cette réaction contamine la basicité des bases alcalines présentes dans la solution interstitielle du béton conduisant à une diminution du Ph du béton de 13 à une valeur avoisinant 8 voire moins. Lorsque la profondeur de la carbonatation atteint les armatures, le film de carbonatation disparaît et les armatures sont dépassivées ainsi le diamètre des armatures diminue ce qui conduit à une diminution de la résistance. Cette carbonatation pourrait aussi conduire à la rouille qui est une matière expansive qui peut causer l'éclatement du béton.



Figure I.1 : Structures atteintes par la carbonatation [6].

➤ **Attaque des chlorures**

L'attaque par les chlorures forme avec la carbonatation la cause principale de la corrosion des armatures.

Les chlorures se rencontrent principalement dans l'eau de mer et l'eau de gâchage.

Cette corrosion est due à un mécanisme similaire à celui de la carbonatation par pénétration des ions de chlore dans la matrice du béton.



Figure I.2 : Structure atteinte par l'attaque des chlorures [6].

➤ **Attaque des sulfates**

Les sulfates peuvent se rencontrer essentiellement dans les zones agricoles où on utilise les engrais et fertilisant du sel.

Les sulfates peuvent aussi provenir des fumées et des résidus dégagés par les industries chimiques.

En réaction avec la pâte de ciment, trois composés peuvent se former en fonction de la concentration en sulfates, du Ph et de la température: l'ettringite, le gypse et la thaumasite.

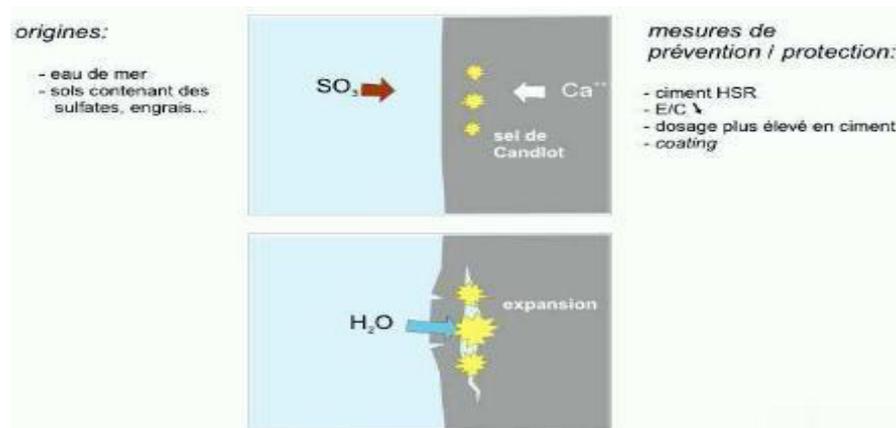


Figure I.3 : Mécanisme de l'attaque des sulfates [6].

➤ Alkali-réaction

Une autre cause des dégradations chimiques est l'alkali-réaction. Ce phénomène peut se produire si les granulats sont réactifs.

L'alkali-réaction regroupe toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte du ciment hydraté.

Les études ont montré que trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions aient lieu :

- Le granulats doit être réactif.
- Un taux d'humidité relativement élevé compris entre 80 et 85%.
- Une grande concentration en alcalins.



Figure I.4 : épaufrures dues à l'alkali-réaction [5].

➤ Corrosion des armatures

Certaines attaques chimiques conduisent à la corrosion des armatures.

On peut définir la corrosion comme la transformation des métaux en composé divers sous l'action de phénomènes naturels.

La dégradation causée par ce phénomène est facile à déceler. Les symptômes en sont : une surface oxydée, piquée, laissant apparaître en général des plaques et écailles d'oxydes facilement détachables, d'aspect rouge brun, typique.

Dans le cas de l'acier, ce composé adhère mal au métal d'où il est issu et se détache facilement en écailles; la surface de la section se trouve réduite.

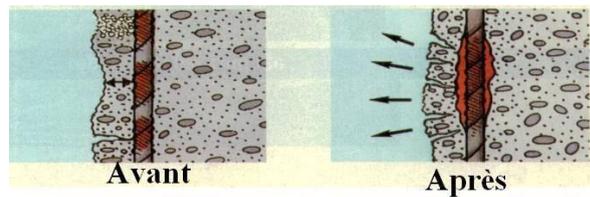


Figure I.5 : Influence de la corrosion des armatures [6].

La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité). De plus, la réaction (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier.

Des fissures internes reliant les armatures peuvent aussi disloquer le béton. La décohésion peut présenter des pustules ou des plaques de béton. Les manifestations diffèrent selon l'épaisseur du béton, l'écartement et le diamètre des aciers. Il en résulte que l'élément en béton armé ne fonctionne plus, au point de vue de la résistance des matériaux, comme il avait été calculé primitivement.

I.1.2.2. Origine mécanique:

➤ **Tassement différentiel**

Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel.³³

Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si les efforts sont incompatibles avec la sécurité des matériaux.

Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont:

- **Sols compressibles.**

- Les remblais récents
- Le non homogénéité du sous-sol defondations
- L'emploi des fondations hétérogènes
- Les affouillements du sol sous lesfondations
- La modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau...



Figure I.6 : Tassement différentiel [1].

- **Ondes de chocs**

Le béton est susceptible de s'épauprer quand il est soumis à des ondes de choc. Ceci est dû aux différentes vitesses de propagation des ondes dans les différents matériaux (les agrégats, le liant et les armatures).

- **Défauts de conception**

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

I.1.2.3. Origine physique :

- **Seisme**

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



Figure I.7 : *Désordres dus au séisme* [1] .

- **Gel dégel**

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

- **Retrait**

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton. Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur de l'élément de structure.

Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle.

I.2. MÉTHODES DE DIAGNOSTIC:

I.2.1 Introduction:

Le diagnostic d'un ouvrage permet avant tout de déterminer l'état de santé, les éventuelles pathologies présentes ainsi que leur ampleur. Cependant le diagnostic peut avoir deux finalités. Soit il est mené afin de déterminer exactement quels sont les désordres présents en vue de leur traitement, soit il est effectué afin de connaître l'évolution des désordres dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme.

Le déroulement du diagnostic repose essentiellement sur l'examen visuel ou morphologique, des mesures sur site ou au laboratoire au moyen d'appareillages spécifiques. Cependant, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

I.2.2 Examen visuel ou morphologique:

Contrôle visuel est probablement le plus important de toutes les démarches du diagnostic. Il peut souvent fournir des informations utiles à l'œil bien formé. Des informations détaillées peuvent être recueillies à partir d'inspection visuelle pour donner une indication préliminaire de l'état de la structure et de permettre la formulation d'un programme de tests ultérieurs.

I.2.3 Essais sur le béton

I.2.3.1 Essais non destructifs:

- **Scléromètre** (Selon la norme NF EN 12 504-4)

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul



Figure I.8 : Scléromètre

- **Auscultation dynamique à l'ultrason : (Selon la norme NF EN 12 504-4)**

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

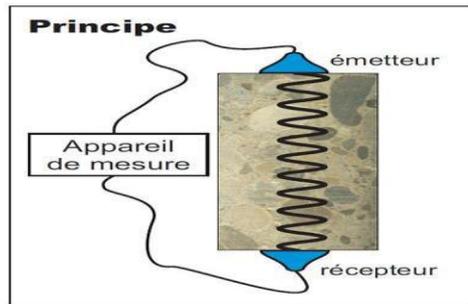


Figure I.9 : principe de l'auscultation dynamique à l'ultrason [14].

- **Essai de résistance à la pénétration:**

La sonde de Windsor est généralement reconnue comme le meilleur moyen pour exécuter l'essai de résistance à la pénétration. La profondeur de la pénétration fournit une indication de la résistance du béton à la compression.



Figure I.10: Sonde de Windsor [5]

- **Les détecteurs d'armatures:**

Ces appareils permettent de détecter la présence d'armatures, leur position (enrobage notamment) et leur diamètre. IL y a trois types de détecteurs:

A- Pachomètre

Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructif. Il permet de déterminer le position exact des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature. Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un flux magnétique par l'appareil.



Figure I.11: Pachomètre. [5].

B- Corrosimètre

Employé dans le but de détecter la corrosion des armatures, d'ouvrages en béton avant l'apparition des dommages visibles, en mesurant le potentiel de surface du béton.

L'instrument permet de mesurer les champs électriques spontanés dans les structures en béton, pour repérer les zones favorables à la corrosion galvaniques des armatures.



Figure I.12: Corrosimètre [5].

C-Fissuromètre

Le fissuromètre est un outil facile à utiliser, qui permet de mesurer, puis d'enregistrer les dimensions et l'évolution des fissures sur des ouvrages en béton armé. Cet accessoire de mesure est très utilisé pour le diagnostic des structures dégradées.



Figure I.13: Fissuromètre [4].

Essais destructifs Le D-Carottage

Le carottage est un prélèvement d'échantillons de béton pour pouvoir faire des essais au laboratoire et obtenir des renseignements sur l'état de la structure. Par exemple:

- L'identification des agrégats
- La détérioration des agrégats
- L'homogénéité du béton
- La profondeur d'une éventuelle carbonatation
- La répartition des fissures
- L'analyse chimique: la teneur en ciment, présence et quantité de chlorures.

Des essais physico – mécaniques: densité, résistance à la compression, module d'élasticité



Figure I.15: Carottage [14].

CHAPITRE II : Techniques de renforcement des ouvrages en béton

II.1. Introduction

Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

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

II.2. Adjonction d'armatures complémentaires

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'ils s'agit de remplacer des aciers corrodés ou lorsqu'ils s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par recouvrement ou par soudure.

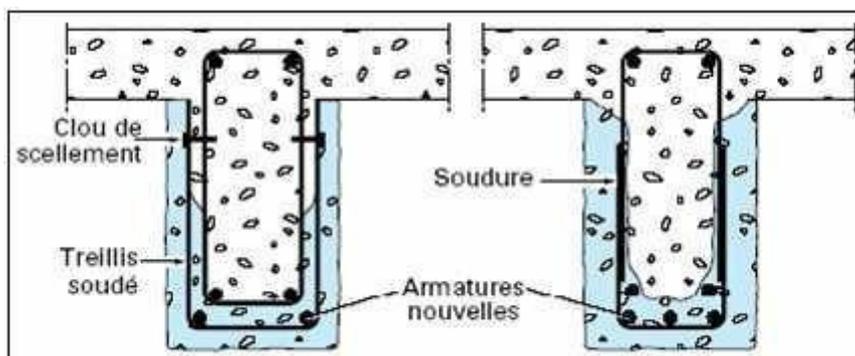


Figure II.1: Adjonction d'armatures supplémentaires [3].

Enfin l'enrobage des nouvelles armatures doit être assuré par un mortier assurant une adhérence suffisante avec les armatures et avec le béton existant.

II.3. Béton projeté

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

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

Il existe deux techniques principales de projection : par voie sèche et par voie humide, Dans le procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en centrale.

II.3.1 Projection par voie sèche

Le procédé par voie sèche est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs, c'est-à-dire le ciment et les granulats, sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance.

L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la lance par l'entremise d'une bague perforée, cette bague permet le mélange de l'eau avec les matériaux.

Le malaxage de l'eau et des matériaux secs se produit dans la lance et au contact de la surface. LaFigure 3-2 présentel'appareillage nécessaire à l'application de béton projeté par voie sèche.

II.3.2. Projection par voie humide

Le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimé ajouté à la lance.

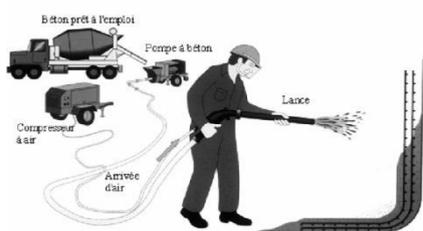


Figure II.2 : béton projeté par voie humide. [9].

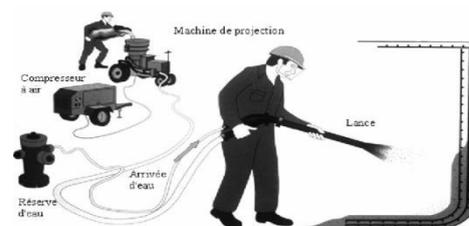


Figure II.3 : béton projeté par voie sèche [9].

II.4. Tôles d'acier collées

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



Figure II.5 : Plaques d'acier collées [9].

Ces méthodes présentent beaucoup d'inconvénients tels que: La difficulté de mise en œuvre, la durée, la corrosion des aciers, etc. Dès lors, les chercheurs ont tenté de trouver des matériaux de substitution qui régleraient ce problème.

Diverses conditions doivent être réunies pour obtenir les meilleurs résultats en effectuant un renforcement par plaques d'acier. Il faut vérifier que la structure elle-même peut recevoir ce type de modification et que d'autres défauts n'apparaîtront pas suite au renforcement.

II.5. Matériaux composites

Étant donné ces nombreux avantages, les matériaux composites représentent un très bon investissement en ce qui traiterait au renforcement et à la réhabilitation des structures en béton armé.

Les seuls inconvénients sont le coût du matériau et le manque de connaissances autant sur son comportement à long terme sur les structures que sur les techniques de conception. Cependant, le coût des matériaux ne représente généralement que 20% du coût total pour une construction conventionnelle. En éliminant les coûts se rattachant à la main-d'œuvre et à l'équipement, les matériaux composites devraient très bien concurrencer les méthodes traditionnelles de réparation. Cependant, les proportions du coût des Matériaux sur le coût de la main-d'œuvre seraient grandement modifiées. L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour des ouvrages en BA permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à des ouvrages en béton ordinaire non confiné [2].

II.5.1. Définition :

Les matériaux composites peuvent être définis comme assemblage de deux ou plusieurs matériaux dont la combinaison aboutit à la naissance d'un nouveau matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Leurs principaux avantages en comparaison avec les matériaux de construction traditionnels sont : leur haute résistance mécanique et chimique, grande rigidité, liberté de forme, légèreté, ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés, ils offrent une meilleure isolation thermique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au **Tableau (II.1)**.

Dans un sens plus restrictif, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort et une matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Le renfort assure la résistance et la rigidité du matériau, la matrice maintient les éléments de renfort dans leurs dispositions, assure le transfert des charges au renfort et donne au matériau sa forme désirée. Le renfort peut être sous forme de fibres ou de particules,

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice.

Tableau II.1 : Exemples de matériaux composites [2].

Type de composite	Constituants	Domaine
1) Composites à matrice organique <ul style="list-style-type: none"> • Papier • Carton 	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère	Imprimerie Bâtiment Toitures Automobile
2) Composites à matrice Minérale <ul style="list-style-type: none"> • bidon • Composite-carbone 	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	Génie civil Aviation Espace
3) Composites à matrice métallique	Aluminium /fibres de bore Aluminium /fibres de carbone	Aérospatial

II.6.2. Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue a habituellement des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée "la matrice " la phase discontinue est appelée "le renfort" Figure II.7.

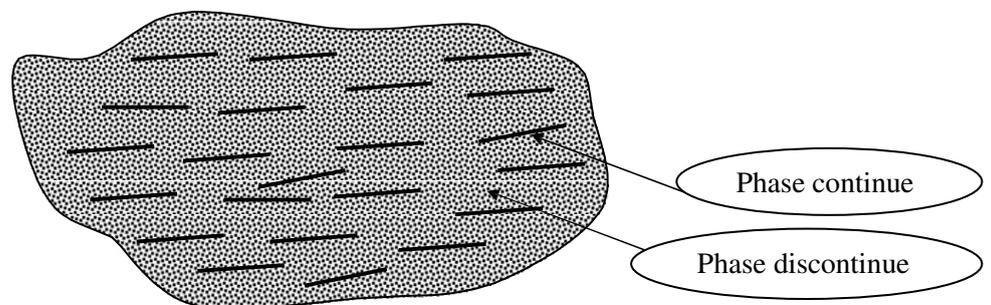


Figure II.7 : Composants d'un matériau composite [13].

Les propriétés des matériaux composites résultent de :

- Les propriétés des matériaux constituants.
- Leurs distributions géométriques.
- Leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La nature des constituants et leurs propriétés.
- La géométrie du renfort, et sa distribution.
- La nature de l'interface : matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse), la concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, sa distribution uniforme assurera une homogénéité du matériau composite.

Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans des zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas des matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'isotropie du matériau composite.

Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées.

II.5.3 Polymère renforcé de fibres (PRF)

Le développement de la science des matériaux a permis l'apparition du concept de « composite ».

le monde de la construction, non étranger à cette évolution, a employé très tôt ces matériaux composites au travers de ses technologies et techniques. Dans le domaine du renforcement et de la réhabilitation, le PRF est le matériau dont l'irruption a été la plus marquée. L'association de fibres et d'une matrice mère permet d'obtenir de bons résultats en renforcement sans accroissement de poids ni de modifications excessives des éléments originaux [7].

II.5.3.1 Matrices

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

Les matrices utilisées dans la fabrication, actuellement 99% des matrices utilisées sont des matrices organiques.

La matrice est composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.), et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production, d'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène. [7]

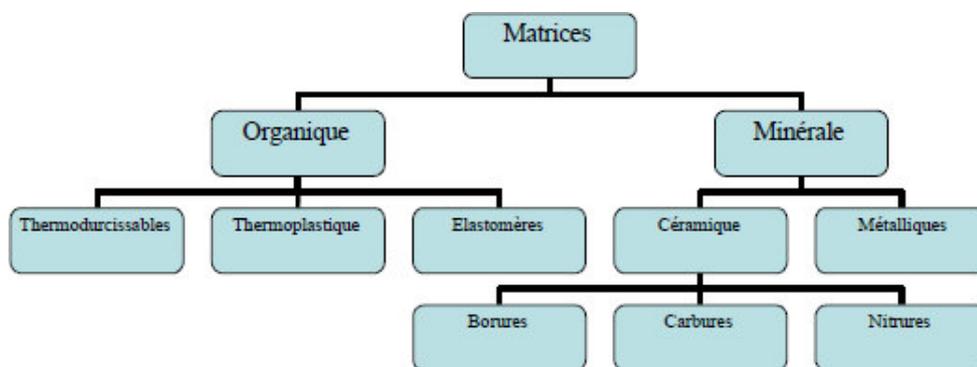


Figure II.8 : Différents types de matrices [7].

II.5.3.2 Résines

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

Deux grandes familles de résines existent : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques [3].

A) - Resines thermodurcissables

- **Comparaison entre TP et TD**

Tableau II.2 : Comparaison des matrices TD et TP [13].

TP (thermoplastiques)	TD (thermodurcissables)	Matrices
Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser	Etat de base
Illimité	Réduit	Stockage
Difficile	Aisée	Mouillabilité des renforts
Chauffage + refroidissement	Chauffage continue	Moulage
Court	Long (polymérisation)	Cycle
Asses bonne	Limitée	Tenue au choc
Réduite	Meilleure	Tenue thermique
Recyclables	Perdus ou utilisés en charges	Chutes et déchets
Propreté	Emanations de solvants	Conditions de travail

II.5.3.3. Fibres

Les fibres assurent la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites, ils sont caractérisés par :

- La nature de la fibre : minérale ou organique.
- L'architecture de renfort : unidirectionnelle ou bidirectionnelle.
- Principaux matériaux de renfort.

Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15 micromètres

Il existe deux types de fibres :

- Fibres courtes : quelques centimètres ou fraction de millimètre, les feutres, les mats et les fibres courtes impactées utilisées en moulage

- Fibres longues: coupées au moment de la fabrication du matériau composite, utilisées telles quelles ou bientissés.

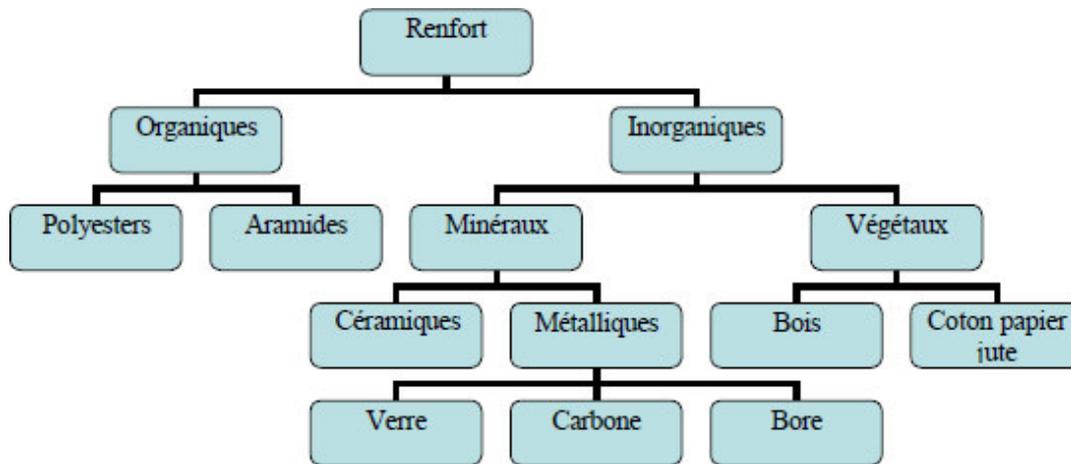


Figure II.9 : différents types de fibres [3].

II.5.4. Caractéristiques des fibres :

Tableau II.3: Caractéristiques générales des différents types des fibres [3]:

	Diamètre du filament (μm)	Masser volumique (kg)	Module d'élasticité longitudinal (N/mm^2)	Module de cisaillement (N/mm^2)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (N/mm^2)	Allongement à la rupture (%)	Coefficient de dilatation Thermique
Renforts	D	Mv	E	G	K	G	A	U
Verre E	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0.5^\circ 10$
Verre R	10	2500	86 000		0.2	3 200	4	$0.3^\circ 10$
Carbone HM	6.5	1800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0.08^\circ 10$
Carbone HR	7	1750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	$0.02^\circ 10$
Kevlar 49	12	1450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$0.2^\circ 10$

II.5.5. Architecture des fibres

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

- **Formes linéiques:**

Une fibre (diamètre environ de 10 μm) est trop petite pour être utilisée seule. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de masse linéique est le tex (1 tex = 1g/km).

- **Formes surfaciques:**

- **Tissus et rubans :**

Ce sont des nappes de fibres continues, disposés dans un plan suivant une direction bien déterminée.

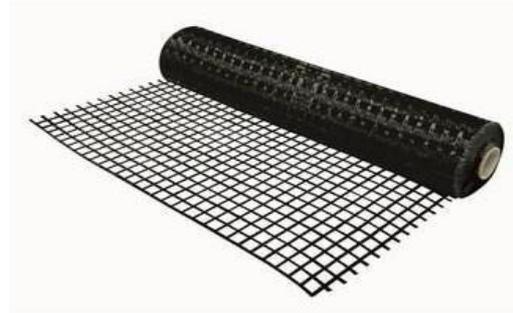


Figure II.10 : Tissu en fibres de carbone [16].

- **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.



Figure II.11: Mat en fibres de verre [16].

➤ Stratifiés

Les stratifiés sont constitués de couches successives (plis) de renfort (fils, stratifils, mats, tissus etc...) imprégnés de résine.

Chaque pli est caractérisé par le type et l'orientation du renfort

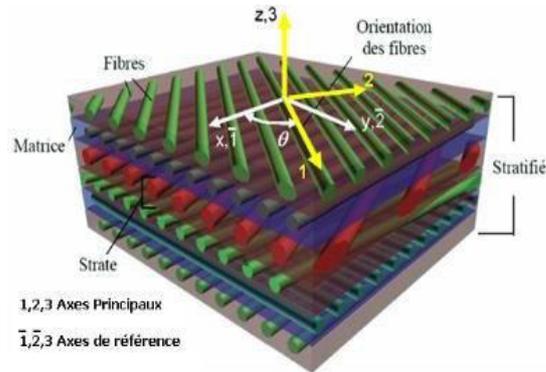


Figure II.12 : Structure D'un Stratifié [3].

Tableau II.4 : Performances comparées des différents types d'architecture [3].

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	Quelconque	30%	Verre
Mats fibres coupées	Moyen	Quelconque	30%	Verre ou carbone
Fibres continues	Intermédiaire	Unidirectionnelle	50 à 70%	Toutes
Tissu	Fort	Bi ou tri directionnelle	30 à 70%	Toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bidirectionnelle si superposition)	50 à 85%	Toutes

II.5.6. Comportement des poteaux confinés par PRF

II.5.6.1. Introduction

Quand le béton est soumis à une charge de compression axiale, celui-ci se déforme latéralement, cette déformation provoque au fur et à mesure que la charge augmente des microfissures qui se développent et se propagent en macrofissures jusqu'à la rupture du béton. Si le béton est latéralement confiné dans le but de réduire cette déformation, sa résistance et sa ductilité se voit augmentée. Ce phénomène est généralement appelé confinement du béton. En 1928-29, *Richart et al* ont effectué une série de tests utilisant la pression d'eau pour le confinement des colonnes circulaires. Ils ont observé que l'augmentation de la force était directement proportionnelle à la pression de confinement. Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes de béton soumises à une charge axiale augmente la force et la ductilité de ces dernières d'une quantité considérable [1].

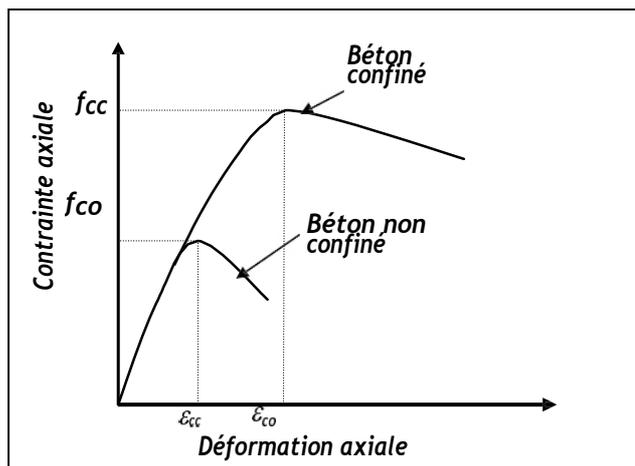


Figure II.13 : Contraintes-déformations d'un béton confiné et non confiné [1].

Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton : la résistance en compression et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression ; il augmente aussi de façon considérable le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes.

II.5.6.2 Méthodes de confinement :

Ils existent plusieurs techniques pour confiner les colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites PRF. Trois méthodes sont les plus utilisées à savoir : la stratification directe, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en PRF.

- **Stratification directe**

La stratification directe est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites PRF (**Figure II.13**). Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnés par les résines du polymère et enveloppés en suite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact, avec l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement.



Figure II.14 : confinement des poteaux par stratification directe. [2].

- **En roulement filamentaire**

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur (Figure 5.16). Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du PRF, l'orientation de la fibre et le control de la fraction du volume ce qui mène le top gain.

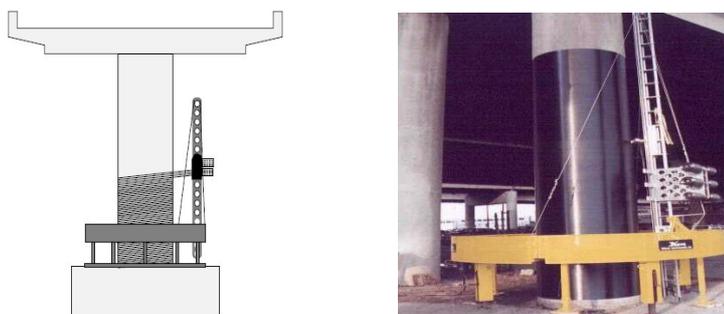


Figure II.15: Confinement des poteaux par roulement [12].

- **Chemisage par coquille préfabriquée**

Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en PRF sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bondes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation. Elles peuvent être fabriquées en demi-cercles ou demi-rectangles selon la forme du poteau à confiner.

Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en PRF est essentiel. Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésives ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne.

II.5.6.3 Comportement mécanique

Lorsqu'une colonne confinée avec des matériaux composites PRF est soumise à une compression axiale, le béton s'étend latéralement et cette expansion sera confinée par l'enveloppe de PRF.

L'action de confinement exercée par le composites PRF sur les colonnes de section circulaire est illustrée sur la Figure. Pour les sections circulaires, le béton est soumis à un confinement uniforme, et la pression maximale de confinement fournie par le PRF est en rapport direct avec l'épaisseur et la Résistance du PRF ainsi que le diamètre de la section du béton confiné.

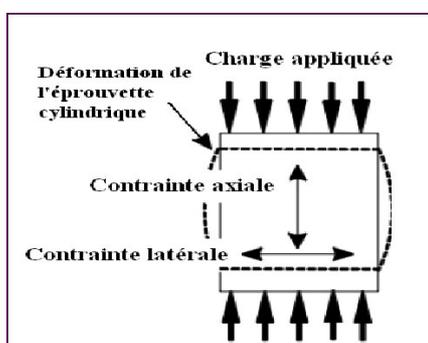
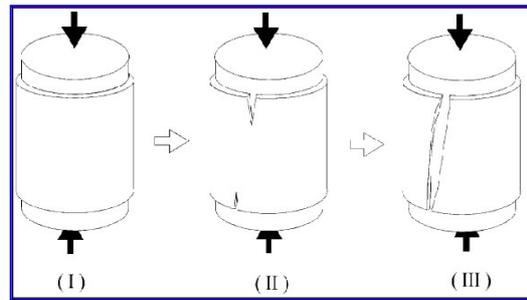


Figure II.16 : Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge Uniaxiale de compression [3].

L'enchemisement par un PRF permet donc de retarder la dilatation latérale de l'éprouvette de béton en la confinant, limitant la propagation de fissures internes ce qui repousse la charge nécessaire à la rupture du béton.



(I) : Application d'une charge en surface d'une colonne.

(II) : Initialisation de fissures depuis le haut et le bas du renfort.

(III) : Propagation des fissures vers le milieu de la colonne enveloppée.

Figure II.17 : Mécanisme de rupture d'un béton enveloppé d'un PRF Soumis à une charge de compression [8]

Le mécanisme de rupture suggère que le dimensionnement du renfort ne devrait pas être basé uniquement sur la résistance à la rupture ou sur la déformabilité de l'enveloppe de renfort et que les gains de résistance devraient être réduits selon l'augmentation de la friabilité et de l'excentricité du béton. D'autres paramètres sont à prendre en compte comme nous le détaillerons ci-dessous.



Figure II.18 Modes de rupture d'un béton renforcé par un PRF à base de fibre de verre et de résine epoxy soumis à une charge de compression [14].

Les courbes de déformation en fonction de la contrainte de compression d'éprouvettes de béton renforcées présentent trois régions distinctes :

- une première zone similaire à celle d'un béton non renforcé, elle représente donc la réponse du béton à la sollicitation,
- une zone intermédiaire de transition plus ou moins importante selon la présence d'armatures,
- une troisième zone pseudo-plastique caractéristique du FRP : une fois seulement le béton endommagé le renforcement prend le contrôle des déformations de l'éprouvette et sa participation à la résistance peut être mesurée.

L'effet du renforcement sur la résistance limite à la rupture est d'autant plus important que le béton initialement est résistant [Parvin et al, 2006].

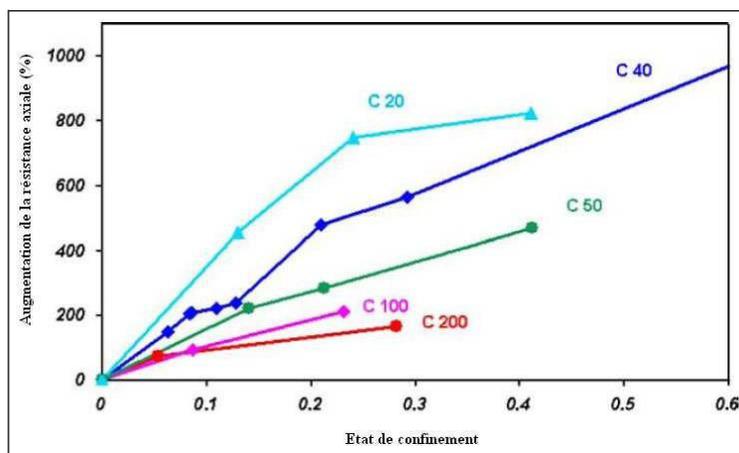


Figure II.19 : Influence de la résistance initiale du béton sain sur la résistance axiale du béton Renforcé pour différents Epaisseur du renforcement [9].

L'épaisseur du renforcement conditionne le confinement de l'éprouvette et donc améliore sa résistance à la contrainte axiale. Il a été prouvé que, et ce quelque soit la nature du PRF, plus l'épaisseur du renforcement augmente, plus la résistance à la compression du béton enchemisé s'améliore.

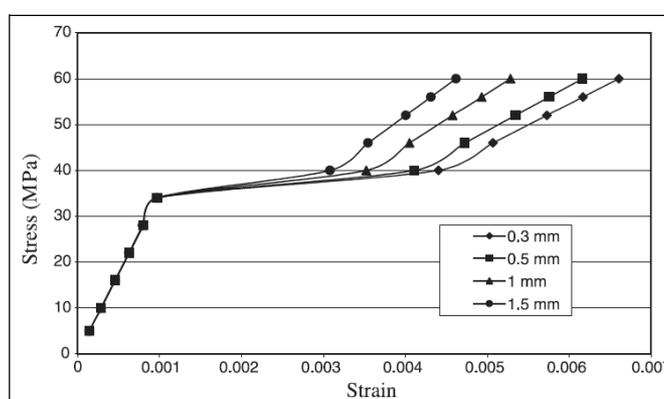


Figure II.20 : Influence de l'épaisseur du PRF sur le comportement contrainte/déformation [9]

Ce pendant, les résultats d'une étude canadienne montrent que les gains en résistance ne sont pas linéairement reliés à l'épaisseur de l'enveloppe de renfort : aucune proportionnalité entre ces deux paramètres n'a donc pu être établie [Shrive et al. 2003].

L'épaisseur du renfort est pourtant limitée car au-delà d'un certain nombre de couches la ductilité du renfort se trouve affectée et donc il sera moins performant car moins apte à se déformer pour Confiner le béton

- **Orientation des fibres**

L'orientation des fibres joue sur leur module élastique (**Figure II.22**).

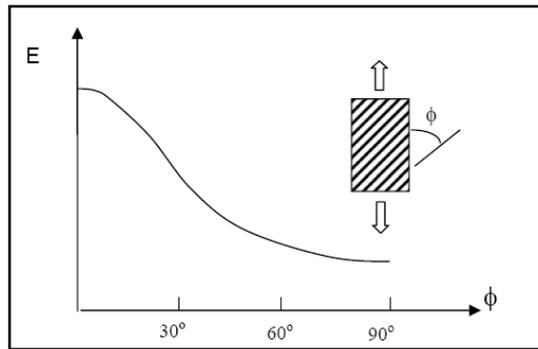


Figure II.21 : Influence de l'angle d'orientation des fibres sur la valeur du module élastique [9].

La direction d'orientation des fibres par rapport aux efforts appliqués à la structure est capitale car elle conditionne les performances du renforcement.

Certains PRF ont des fibres dans une seule direction, d'autres intègrent un tissu qui reprend autant d'efforts longitudinaux que transversaux. Il existe même des PRF dont les fibres sont orientées à 45° (l'orientation est définie par rapport au plan horizontal de l'élément à renforcer), mais leur utilisation est réservée à des structures hautement techniques et donc moins répandue.

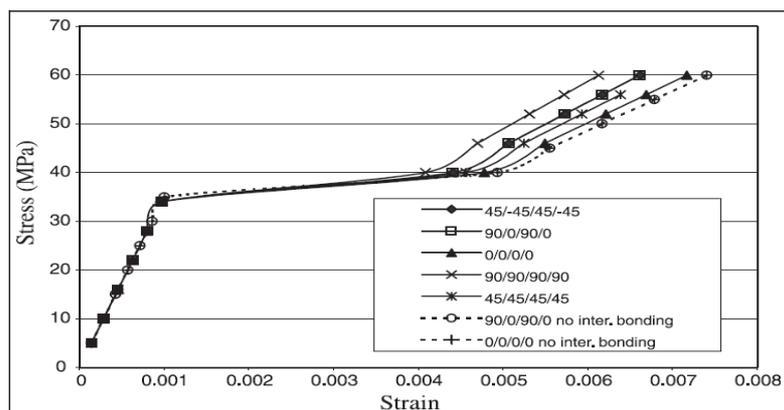


Figure II.22 : Influence de l'orientation des fibres du PRF sur le comportement contrainte/déformation [9]

Diverses études scientifiques ont été menées sur ce sujet de l'orientation des fibres. Afin de confiner au mieux une colonne de manière latérale, les fibres du renfort sont traditionnellement orientées selon la circonférence de celle-ci. Il a été observé que les fissures internes générées par l'application de la charge et menant à la rupture du renfort se développaient à 45° par rapport à leur orientation. Des études ont donc prouvé que le renfort pouvait être optimisé par l'application de différentes couches d'orientation différentes [Parvin et al.2005]. Pour une même épaisseur de renfort, la configuration 0°/45°/0° s'avère meilleure que 45°/0°/45° et celle de référence 0°. Ces résultats sont complétés par une étude pour une configuration 0°/15°/0° qui améliore les performances comparée à une simple orientation circulaire, mais moins que pour des configurations utilisant l'orientation à 45°.

- **Longueur du PRF**

Une étude relate que, bien qu'une augmentation de l'épaisseur du renfort soit bénéfique pour améliorer la résistance, il n'en n'est pas toujours de même pour la longueur [Lau et al, 2001]. En effet, pour les PRF à fort module et à faible nombre de couches au-delà d'une certaine longueur, dont les auteurs proposent une méthode de détermination, des contraintes négatives apparaissent dans la circonférence de la colonne, détériorant les propriétés de résistance et menant à une rupture rapide. Ces contraintes sont dues à l'apparition de microfissures en haut et en bas du renfort là où le renforcement subi les contraintes radiales maximales.[3].

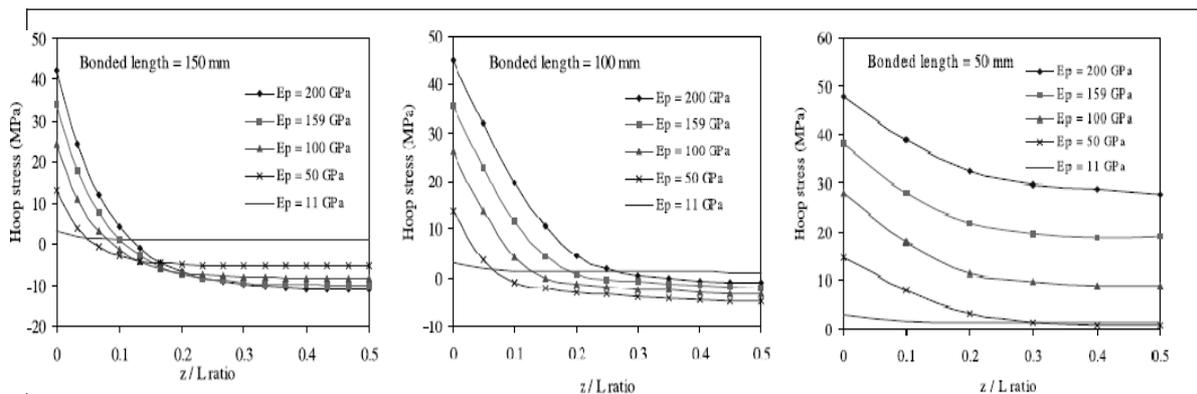


Figure II.23 : Effet de l'état de la longueur de liaison et du module élastique sur les contraintes circulaires [13]

- **Adhésion entre le béton et le FRP**

L'état de l'interface entre le béton et le FRP et plus particulièrement la liaison entre les deux éléments est évidemment un des principaux paramètres gouvernant l'efficacité du renforcement [Li et al, 2003a].

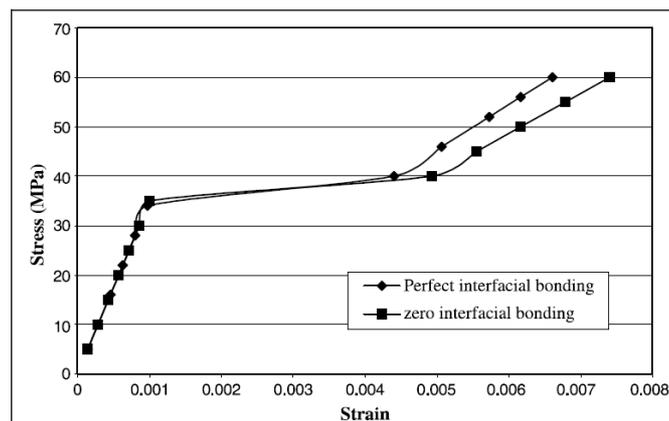


Figure II.24 : Effet de l'état de liaison sur le comportement contrainte/déformation [13].

D'autre part, Li et al. Montrent que plus la liaison est parfaite, plus les fibres orientées de façon axiale sont efficaces que celles orientées circulairement. Au contraire, si l'adhésion du renfort sur le béton est mauvaise alors l'orientation des fibres importe peu sur les performances du renfort.

- **Résistance au feu**

La résistance au feu est une problématique importante car les éléments à renforcer ; qu'ils se trouvent à l'intérieur de parkings, d'habitations ou qu'ils soient des éléments de tunnels ou de ponts ; doivent garantir un maintien structurel pendant une certaine durée en cas d'incendie. D'autre part, les matériaux de construction doivent limiter au maximum la propagation des flammes et leur combustion ne doit pas générer ni de fumées toxiques ni d'émanations dangereuses. Ces points sont critiques pour des matériaux chimiques tels que les polymères renforcés de fibres.

Les PRF sont très sensibles à l'élévation de température : dès que la température approche celle de transition vitreuse des fibres, de la matrice ou encore de l'adhésif (T_g , généralement entre 65 et 100°C pour les matériaux ici traités), le composite se détériore : la rupture des liaisons chimiques rend le renforcement totalement inutile.

En l'absence de données, les PRF sont déclarés inefficaces vis-à-vis de la résistance au feu.

Des produits spécifiques d'isolation des PRF ont été développés par des industriels pour leur conférer une tenue au feu. Ils ont été testés lors de simulation d'un incendie sur différentes colonnes en isolation d'une ou deux couches de renforts CFRP ou GFRP (respectivement numérotée 1, 2, 3 et 5 sur la figure suivante) et comparée à une colonne renforcée non isolée (colonne 4) [Green et al. 2006]. L'isolant est un mortier contenant des fillers et des hydrofuges spécifiques.

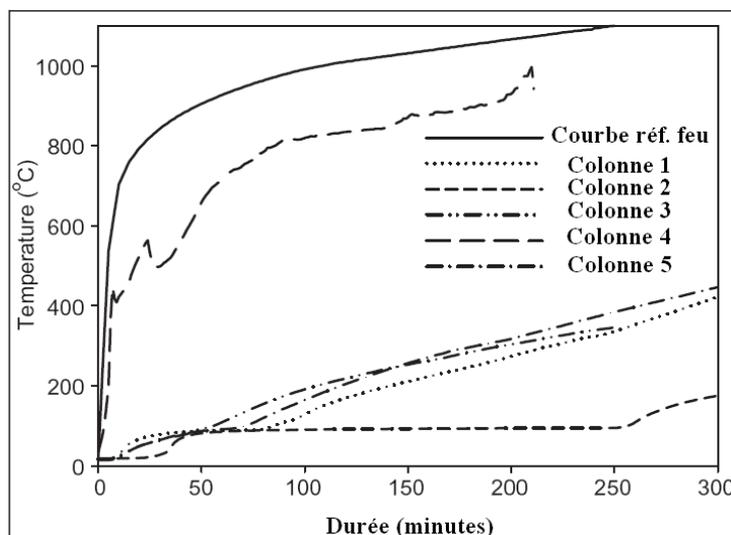


Figure II.25 : Tenue au feu pour différents éléments renforcés et isolés par PRF [13].

Les résultats présentés sur la figure précédente démontrent que sans isolant la résistance au feu d'une colonne renforcée est pratiquement nulle alors qu'avec un isolant la tenue au feu de la colonne renforcée permet d'atteindre les niveaux réglementaires d'endurance.

Il faut donc adapter le type de fibres, de polymère et d'adhésif en fonction de l'environnement extérieur auquel sera exposé le renforcement et des contraintes mécaniques subies par l'élément en béton.

L'inspection et la maintenance sont des aspects clef pour assurer la pérennité des structures renforcées afin de prévenir tout désordre. Une inspection uniquement visuelle n'est pas envisageable car les renforcements masquent les signes de dommages (fissuration, délamination, ...) qui surviennent le plus souvent dans le béton ou à l'interface entre le béton et le renfort. Un suivi par thermographie ou radar est

II.5.7. Textile-Reinforced Mortar (TRM)

L'utilisation des PRF dans les domaines du renfort et de la réhabilitation a constitué une grande avancée. Pourtant, peu d'améliorations ont été amenées pour palier leurs limites : bien que l'emploi des PRF soit rapide et permette un accroissement de la résistance mécanique sans augmenter le poids de la structure, certains inconvénients majeurs subsistent. Les plus importants sont:

- le comportement limité des résines époxy à hautes températures, surtout si la température de transition vitreuse est dépassée,
 - la destruction du renforcement par le feu : en cas d'incendie les températures importantes dégradent la matrice polymérique annihilant l'action du renforcement,
 - le coût important de l'époxy comparativement à d'autres matériaux.
 - la mauvaise applicabilité des résines époxy sur des surfaces humides ou à basses températures,
 - la faible perméabilité à la vapeur du renforcement,
 - l'incompatibilité des résines époxy avec certains supports,
 - la perte d'esthétisme de la structure ou du bâtiment suite au renforcement
- Des points précédents, trois apparaissent comme particulièrement préjudiciables. Tout d'abord le problème du feu : la dégradation du PRF réduira la capacité portante du bâtiment, ce qui peut provoquer l'effondrement de ce dernier. Ensuite, l'incompatibilité entre l'époxy et certains substrats : ainsi, le PRF ne peut s'appliquer sur la pierre naturelle. À tout ceci il faut ajouter le désagrément visuel que peut provoquer un traitement par PRF sur un bâtiment enrichissant le patrimoine culturel.[1]

La somme de ces inconvénients démontre la nécessité de chercher une matrice inorganique qui remplacerait le polymère sans susciter de problèmes similaires. Dans ce but, un nouveau système de renforcement structurel est en cours de développement dans lequel du mortier est employé comme matrice pour les fibres. Ce produit est appelé Textile Reinforced Mortar (TRM). Actuellement beaucoup de recherches sont menées sur ce matériau car dès ses premières utilisations il a montré des résultats pleinement satisfaisants. [1]

- **Matériau**

Le concept de base du TRM est le même que celui du PRF : un réseau de fibres est incorporés dans une matrice qui se charge de distribuer les efforts entre elles. C'est à ce titre un matériau composite.

- **Fibres**

Le TRM étant une amélioration basée sur le concept du PRF, il est logique que les matériaux employés pour ce dernier type de renforcement soient aussi utilisés dans le TRM à l'exception des fibres de verre dont l'emploi a déjà été commenté. L'amélioration de la technique de synthèse de ces fibres et la fin de plusieurs brevets limitant jusqu'alors leur développement a catapulté l'utilisation ce matériau. En outre, un autre point à considérer est son faible coût comparativement aux autres fibres.

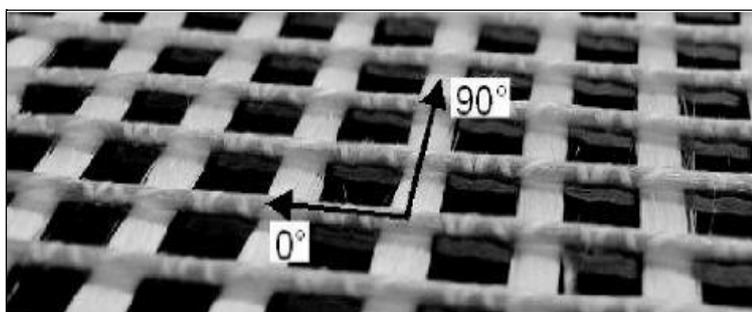


Figure II.26 : Aillage de fibres de basalte dans deux directions. [13]

Les fibres utilisées se présentent généralement sous forme de maillage ou de tissu afin de faciliter leur mise en œuvre. Quelques fabricants de tissu de basalte sont arrivés à enrober de polymère le maillage, conférant ainsi une plus grande cohésion au réseau de fibres, ce qui facilite son application tout en garantissant l'adhérence des couches de mortier au travers des cavités de la maille.

- **Matrice**

Le concept de TRM est apparu par la nécessité d'utiliser un matériau inorganique comme matrice. Il a été prouvé que le mortier à base de ciment, matériau très conventionnel, était capable d'agir comme matrice de renforcement. L'apparition sur le marché de mortiers modifiés avec des polymères a aussi décuplé le développement du TRM, en obtenant des caractéristiques bien meilleures que celles d'un mortier conventionnel.

- **Adhésif**

Le TRM n'a pas besoin, en principe, d'adhésif puisque le mortier lui-même se charge d'assurer l'adhésion du renfort sur le substrat. Généralement, on emploie uniquement une série de mortiers d'amorçage compatibles avec la surface à renforcer. Un des points qui ont motivé la mise au point du TRM est le manque d'adhérence entre les résines époxy et certains substrats. Ce nouveau produit à base

de mortier peut être collé à ces substrats. Cependant les niveaux d'adhérence de l'époxy ne sont pas atteints.

- **Composite**

Tout comme dans Le PRF l'orientation des fibres va conditionner le comportement global du renforcement. Le niveau de développement technique du TRM n'a pas encore atteint celui du PRF, la focalisation actuelle des recherches sur ce nouveau matériau laisse supposer qu'à court terme sa caractérisation et sa maîtrise seront bien meilleures que pour le PRF.

- **Application du TRM**

On pourrait penser qu'appliquer un mortier sur un béton ne nécessiterait pas autant de préparation que pour l'application de l'adhésif du renforcement par PRF ; ce n'est cependant pas le cas car un très bon état de surface est obligatoire.

Bien qu'une certaine rugosité soit nécessaire pour assurer l'accroche entre le mortier et la surface, il faut veiller à éviter au niveau de la surface toute présence de poussière ou d'éléments particuliers susceptibles de se détacher. Suivant le type de substrat, un certain niveau de propreté est requis. Souvent le nettoyage est réalisé par la projection de sable sous pression (sablage).

Pour l'application de la première couche de mortier, que ce soit le mortier d'amorçage ou le mortier matriciel, il est nécessaire d'humidifier la surface du substrat pour éviter que celui-ci absorbe l'eau du mortier, ce qui modifierait son dosage et par là même ses propriétés.

Une fois la première couche de mortier appliquée sous le maillage ou le tissu, en veillant à ce que les fibres soient orientées en accord avec les contraintes du renforcement, les fibres sont recouvertes d'une autre couche de mortier. Il est possible d'appliquer plusieurs couches de (tissu + mortier) pour augmenter les capacités du renforcement.

- **Éléments de flexion**

La faible adhérence du mortier avec le béton limite l'utilisation du TRM comme renforcement en zone de flexion : il n'est pratiquement pas employé sur des poutres car se détache de l'élément structurel dès que les efforts appliqués deviennent importants. En ce qui concerne les murs (principalement de maçonneries), cette technique a su trouver sa place. Elle est entre autres un bon système d'alerte étant donné l'augmentation de la ductilité du mur et évitant son écrasement instantané. Les parois subissent généralement des charges de compression verticales, souvent excentrées, et des charges horizontales, induisant des efforts de flexion.

- **Confinement de support**

L'idée de base de ce système est la même que pour le PRF : on cherche à obtenir une augmentation de la résistance en compression et un comportement plus ductile face à la rupture.

On n'obtient pas les mêmes niveaux de résistance que pour les FRP, mais une augmentation considérable de la déformabilité. Dans ce cas, le support est entièrement recouvert de TRM, en mettant autant de couches de tissu que nécessaire. Cette solution est très intéressante en zone d'activité sismique importante, où un accroissement du comportement ductile est préférable à une augmentation de la résistance.

- **Renforcement d'éléments de maçonnerie**

Dans le domaine des structures du patrimoine historique, le **TRM** est particulièrement intéressant pour le renfort de voutes et arcs.



Figure II.27 : Renforcement d'une chambre forte par TRM [8].

CHAPITRE III : Caractérisations des matériaux utilisés

III .1. INTRODUCTION

La qualité du béton dépend de la qualité de ces constituants. Le béton est essentiellement constitué de la pâte cimentaire et des granulats. La pâte se compose de liant (ciment avec ou sans ajouts), d'eau et d'air. Celle-ci agissant comme une colle, durcit et forme une masse qui, du fait de la réaction chimique du ciment et de l'eau, prend la consistance d'une roche pour former le béton. Les granulats sont généralement divisés en deux catégories : les granulats fins qui sont les sables naturels ou manufacturés dont la taille des particules va jusqu'à 5 mm. Les gros granulats sont constitués de particules dont la taille peut aller jusqu'à 25mm.

Pour toute combinaison de matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment. Une teneur en eau élevée dilue la pâte (la colle du béton). La réduction de la quantité d'eau présente les avantages tels que l'augmentation de la résistance en compression et en flexion, la réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption et la réduction des tendances à la fissuration causée par le retrait. [5]

III .2. Ciment:

On a utilisé le ciment *CPJ-CEM II/A 42.5* est un ciment gris offrant une haute résistance initiale et finale, contenant 15% de fillers calcaires. Ses caractéristiques minéralogiques et chimiques sont regroupées dans les tableaux ci-dessous.



Figure III.1: Sac de ciment CPJ-CEMII

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ-CEMII

Résistance(MPa)	Age		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression	10	35.4	Limite inférieure (Li) : ≥ 42.5 Limite supérieure (Ls) : ≤ 62.5
Flexion	4.27	5.91	6.81

Tableau III.2 : Caractéristiques physiques du ciment CPJ-CEM II

Caractéristique	Valeurs	Unités
Consistance normale	27.04	%
Début de prise	> 60	Minutes
Fin de prise	~225	
Masse volumique absolue	3.07	g/cm ³
Masse volumique apparente	1.3	
Surface spécifique(SSB)	4465	cm ² /g

Tableau III.3 : Composition minéralogique du ciment CPJ-CEMII

Phase	Eléments	Teneur(%)
<i>Clinker</i>	C3S	58
	C2S	16
	C3A	7
	C4AF	12
	CaO	1
<i>Régulateur de prise</i>	Gypse	6
<i>Ajouts</i>	Calcaire	17

Tableau III.4 : *Composition chimique du ciment CPJ-CEMII*

<i>Eléments</i>	<i>Teneur(%)</i>
<i>SiO₂</i>	<i>18.47</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>4.63</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>3.34</i>
<i>CaO</i>	<i>61.08</i>
<i>MgO</i>	<i>1.16</i>
<i>K₂O</i>	<i>0.71</i>
<i>Na₂O</i>	<i>0.40</i>
<i>SO₃</i>	<i>2.64</i>
<i>Chlorures</i>	<i>0.017</i>
<i>CaO libre</i>	<i>0.87</i>
<i>Insolubles</i>	<i>2.15</i>
<i>P.A.F</i>	<i>6.69</i>

III .3. Eau de gâchage :

On a utilisé l'eau de sondage de la région d'Oued SMAR.

III .4. Les Granulats :

III.4.1. Caractéristiques des Sables :

On a utilisé est deux types de sables le premier est un sable des dunes provenant de Boussaâda et l'autre c'est un sable concassé de Carrière de **Bouzegza**.

III.4.1.1. Analyses granulométriques et classes granulaires réelles:

Le résultat d'analyse granulométrique de sable est récapitulé dans le **Tableau III.5**.

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du sable : 0/1 BOUSSAADA

Ouverture des tamis [mm]	Poids [gr]		Pourcentage [%]	
	Refus partiels	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
1,250	60,00	60,00	3,00	97,00
0,630	75,00	135,00	6,75	93,25
0,315	375,00	510,00	25,50	74,50
0,160	1175,00	1685,00	84,25	15,75
0,080	275,00	1960,00	98,00	2,00
0.063	40,00	2000,00	100,00	0,00

Tableau III.6 : Analyse granulométrique du sable : 0/5 Carrière Bouzegza

Ouverture des tamis [mm]	Poids [gr]		Pourcentage [%]	
	Refus partiels	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
5,00	30,00	30,00	3,00	97,00
4,00	80,00	110,00	11,00	89,00
2,500	120,00	230,00	23,00	77,00
1,250	300,00	530,00	53,00	47,00
0,630	190,00	720,00	72,00	28,00
0,315	70,00	790,00	79,00	21,00
0,160	30,00	820,00	82,00	18,00
0,080	75,00	895,00	89,50	10,50

III.4.1.3. Module de finesse (Mf) : Selon NFP P18-560MF

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.7

Tableau III.7: Valeur de module de finesse

Classe Granulaire	Module de Finesse MF
Sable BOUZEGZA 0/4	3.12
Sable BOUSSAADA 0/1	1.20

Module de finesse : (Valeur série française)

Sable Grossier(C) :2.8<MF<3.2

Sable préférentiel (A) :2.2<MF<2.8.

Sable fin (B):1.8< MF<2.2.

III.4.1.4. Equivalent de sable (SE) NF EN 933-8 :

Tableau III.8 : Valeurs des équivalents des sables & du bleu de méthylène.

Granulats	Provenance	ES %
Sable 0/4	BOUZEGZA	78
Sable 0/1	BOUSSAADA	66

III.4.1.5. Masse volumique :

Les résultats sont donnés dans le tableau III.9

Tableau III.9 : Valeurs des masses volumiques

Classe Granulaire	Masse vol. Absolue (t/m ³)	Masse vol. Apparente (t/m ³)
Sable 0/1 BOUSSADA	2.63	1.52
Sable 0/4 BOUZEGZA	2.53	1.50

III.4.1.6. Résistance à la fragmentation de sable (Friabilité) :

Tableau III.10: Valeurs de Friabilité

Classe Granulaire	FS	VSS	Catégorie
Sable 0/1 BOUSSADA	30	<60 (Catégorie B)	FS _B
Sable 0/5 BOUZEGZA	36	60 (Catégorie B)	FS _B

III.4.2. Caractéristiques des gravillons :

III.4.2.1. Analyses granulométriques et classes granulaires réelles :

L'essai a été réalisé selon la norme **NF EN 933-1**. [15]

Les tableaux **III.11**, **III.12** et **III.13** récapitulent les analyses granulométriques des gravillons.

Tableau III.11: Analyse granulométrique du gravillon (3/8) BOUZEGZA

Ouverture des tamis [mm]	Poids [gr]		Pourcentage [%]	
	Refus partiels	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
8,00	450,00	450,00	22,50	77,50
6,30	750,00	1200,00	60,00	40,00
5,00	380,00	1580,00	79,00	21,00
4,00	320,00	1900,00	95,00	5,00
2,500	40,00	1940,00	97,00	3,00
1.25	100,00	2000,00	100,00	0,00

Tableau III.12 : Analyse granulométrique du gravillon 8/15 BOUZEGZA

Ouverture des tamis [mm]	Poids [gr]		Pourcentage [%]	
	Refus partiels	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
16,0	80,00	80	2,67	97,33
12,5	1210,00	1290	43,00	57,00
10,0	1290,00	2580	86,00	14,00
8,00	350,00	2930	97,67	2,33
6,30	50,00	2980	99,33	0,67
5	20,00	3000	100,00	0,00

Tableau III.13: Analyse granulométrique du gravillon 15/25 Bouzegza

Ouverture des tamis [mm]	Poids [gr]		Pourcentage [%]	
	Refus partiels	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
25,0	350,00	350	7	93,00
20,0	620,00	2410	48,2	51,80
16,0	3580,00	4300	86	14,00
12,5	3580,00	4910	98,2	1,80
10,0	70,00	4980	99,6	0,40
8	20,00	5000	100	0,00

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

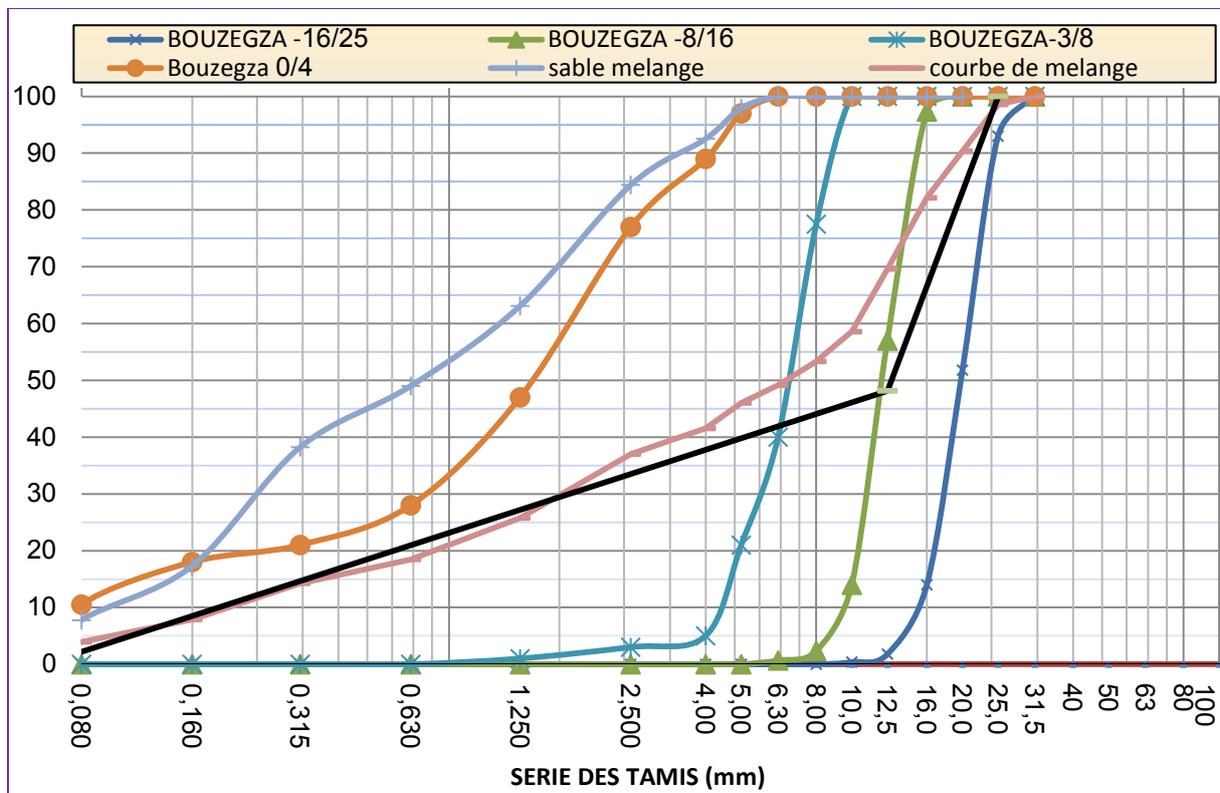


Figure III.2: Courbe d'analyse granulométriques des granulats

III.4.2.3.Masse volumique :

La masse volumique absolue est mesurée par la méthode du ballon.

La masse volumique apparente est mesurée à l'aide d'un récipient métallique de 5L .les résultats obtenus sont récapitulés dans le **Tableau III.14:**

Tableau III.14: Valeurs des masses volumiques

Classe Granulaire	Masse vol. Absolue (t/m ³)	Masse vol. Apparente (t/m ³)
3/8 BOUZEGZA	2.66	1.37
8/15 BOUZEGZA	2.68	1.41
15/25 BOUZEGZA	2.68	1.43

III.4.2.4. Propreté superficielle des gravillons (f) :

Tableau III.15 : Propretés des gravillons

Classe Granulaire	f (%)	VSS
3/8 BOUZEGZA	0.6	1.5
8/15 BOUZEGZA	0.5	
15/25 BOUZEGZA	0.3	

III.4.2.5. Coefficient D'aplatissement (FI):

Le Coefficient d'Aplatissement « A » qui caractérise la forme des granulats à partir de leur plus grande Dimension et de leur épaisseur résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau III.16

Tableau III.16: Coefficient D'aplatissement

Classe Granulaire	FI	VSS	Catégorie EN	Code
8/15 BOUZEGZA	09	20	FI 20	A _A
16/25 BOUZEGZA	08	20	FI 20	A _A

III.4.2.6. Essai de Dureté :

La Résistance à la fragmentation par chocs **Los-Angeles (LA)** : L'essai **LA** consiste à mesurer la quantité des éléments inférieurs à 1.6 mm produites en soumettant le matériau aux chocs de boulets d'acier dans un cylindre (tambour) en rotation.

Le résultat d'essai **LA (Los-Angeles)** de gravier est récapitulé dans le tableau III.17

Tableau III.17 : Coeff. LA (Los-Angeles)

Classe Granulaire	LA	VSS	Catégorie EN	CODE
BOUZEGZA (10/14)	21	25	LA ₂₅	LA _A

III.5. Remarques :

En règle générale les caractéristiques des granulats utilisée pour la fabrication des produits en béton doivent répondre aux spécifications des normes **NF EN 12620** complétée par la norme **XP P18-545**. [14]

A la lumière des résultats des essais réalisés sur les fractions des agrégats de provenances de **BOUZAGEZA**, il ressort que :

- **Le sable** de provenance de la carrière **Bouzegza** est un granulat **courant** (densité de $2\div 3 \text{ t/m}^3$)de granularité **0/4** ayant un module de finesse(MF = 3.12) ce qui correspond à un sable grossier propre **ES= 78** .On a ajouté un sable fin de **Boussaâda** ayant un **MF= 1.20** et **ES= 66**. Le mélange de deux sables nous a permis d'avoir un sable **Moyen** de **M.F = 2.5** ce qui est convient pour la fabrication des bétons de qualité. (32% **Boussaâda**, 68% **Bouzegza**).

- **Les gravillons** de la carrière **Bouzegza** sont des granulats **propres, dures et denses** de granularités réelles **3/8,8/16 et 16/25**acceptables et satisfaisantes vis à vis des spécifications de la norme **NF EN 12620 (Aout 2002)** (Granulats pour béton hydraulique complétée par la norme **XP P18-545**à condition de veiller à la régularité des classes granulométriques et de la propreté. [14]

III.6. **Matériaux de réparation** :

III.6.1. **Les tissus de fibres de carbone** :

Dans notre travail on a utilisé Le Sika-Wrap-230 C/45 commercialisé en Algérie par Sika El-djazair dont un tissu unidirectionnel de renforcement de structures , a base de fibre de carbone appliqué a laide d'une résine de collage. particulièrement fine de l'ordre de 5 à10 micromètres de diamètre et composées presque exclusivement d'atomes de carbone plus quelques pourcents d'atomes d'azote d'oxygène et d'hydrogène. Elles servent notamment à renforcer certains matériaux composites [16].

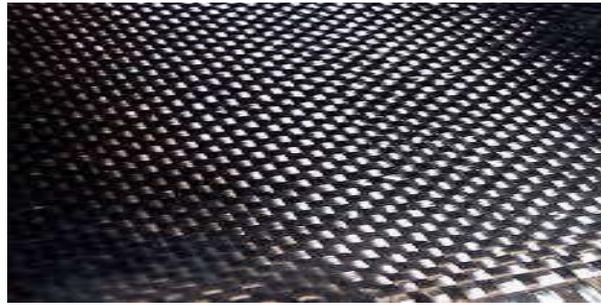


Figure III.3 : *Tissu de fibre de Carbone [16]*

Les caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone sont présentées sur le tableau suivant :

Tableau III.18 : *Caractéristique Mécaniques De Fibre De Carbone*

Resistance a la traction (MPa)	Charge ultime (MPa)	Epaisseur (mm)	Élongation En (%)	Module E (GPa)
184	180.75	1.25	0.66	25.45

III.6.2. Les tissus de fibre de verre :

Dans notre travail nous avons utilisé un tissu constitué de fibres de verre continues type E d'une épaisseur de 0.25 mm (ISO 4603) et d'un poids spécifique de 300 g/m. Les fibres de verre sont moins chères et présentent une plus faible résistance mécanique mais une plus grande déformabilité, ce qui les rend la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, telle que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Par contre Les plus grands inconvénients des fibres de verre sont les problèmes de relaxation (sensibilités à l'humidité) et leur dégradation par des phases alcalines, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées. On a utilisé un tissu constitué de fibre de verre continues type E d'une épaisseur 0.25 mm (iso 4603) et d'un poids spécifique de 300 g/m² [16].



Figure III.4 : Tissus de fibre de verre [16].

Les caractéristiques mécaniques de fibre de verre sont présentées sur le tableau suivant :

Tableau III.19 : Caractéristique Mécaniques de fibre de Verre [16]

Resistance a la traction (MPa)	Charge ultime MPa	Epaisseur Mm	Élongation %	Module E (GPa)
108.94	124.5	1.64	2.66	5.85

III.6.3. Résine :

La résine qu'on a utilisé dans notre expérience est Sika-dur-330 est une résine d'imprégnation époxydique, thixotrope, à 2 composants, mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux. **Sikadur-330** est conforme aux exigences de la norme NF EN 1504-4 en tant que produit de collage structural. Sert de résine d'imprégnation avec les systèmes de renforcement structurels **Sika-warp Hex-230** et **Sika-warp -430G**. Facile à mélanger et à appliquer, à la truelle et au rouleau et une excellente adhérence sur de nombreux supports. Cette résine se compose de deux composants comme il est présenté sur les figures suivantes :

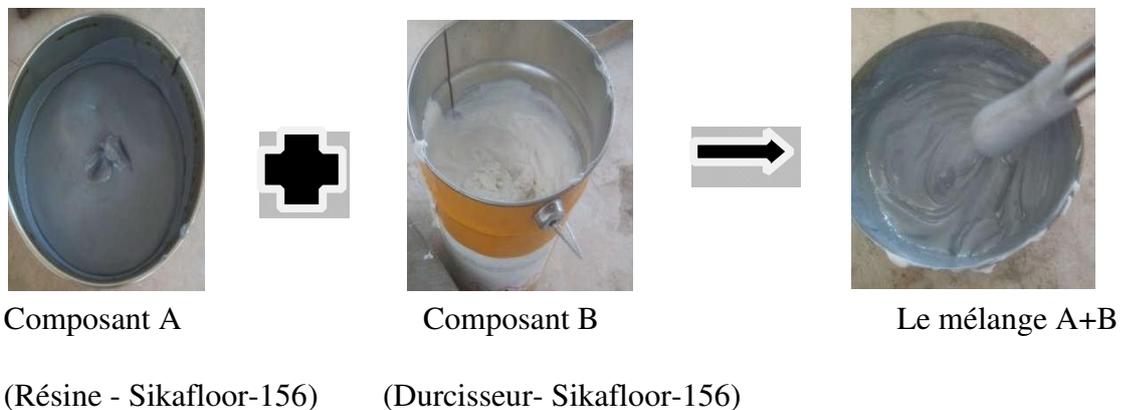


Figure III.5 : Différents composants ce Sika-Dur-330 [16].

- Le tableau suivant résume les données technique essentiel de *Sika-dur-330*

Tableau III.20 : Caractéristiques Générales de la Résine Sika-dur-330. [16]

Donnés technique	Résine époxydique
Allongement à la rupture	1.5%
Densité	1.65 kg /l (mélange A+B, à 35 C°)
Retrait	0.04% selon la FIP
Epaisseur par couche	300 mm max
Coefficient de dilatation thermique	2.5x10-5 par C°
Couleur	Comp. A blanc
	Comp. B gris
Résistance en traction	30 Mpa
Viscosité	Pâte ferme
E-Module en flexion	3.8 Gpa

III.6.4. Mortier de réparation :

Le mortier de réparation est composé par sable fin d'Oued Souf et un ciment classe **42.5** avec l'ajout de fumée de silice et un produit d'adhérence Sika-Latex comme suivant :

Tableau III.21 : formulation de mortier

Matériaux	sable	Ciment	Eau	Fumé de silice	Sika Latex	E/L
La masse (g)	1350	450	168.75	45	112.5	0.34

A. Sable : Le sable utilisé est un sable roulé moyen provenant d'Oued Souf, les essais effectués sur ce dernier sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau III.22 : Caractéristiques physiques du sable Oued Souf

Caractéristique	Valeurs	Unités
<i>Masse volumique Abs</i>	2.62	g/cm ³
<i>Masse volumique App</i>	1.53	
<i>Equivalent de sable</i>	79.86	%
<i>Absorption d'eau</i>	0.9	
<i>Module De Finesse</i>	2.40	

B. Sika-latex : Est une dispersion aqueuse de résine synthétique de densité 1 kg/l qui se présente sous la forme d'un liquide laiteux concentré. Parfaitement miscible, il s'ajoute directement à l'eau de gâchage des mortiers de ciment. On l'utilise comme enduit et chapes et pour le jointement et les travaux de finition de couverture. Dans notre travail on a visé ce produit pour améliorer fortement l'adhérence du mortier et le rendre plastique et facile à mettre en œuvre



Figure III.6 : Produit Sika-latex (5L) .

C. Fumée de silice :

Au microscope électronique, la fumée de silice apparaît sous forme de billes sphériques d'un diamètre moyen de 0.2 μm . Ces billes ont un diamètre moyen 100 fois plus petit que les grains de ciment. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO_2 , intermédiaire réactionnel du procédé de carboréduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation et elle est d'une couleur grise trop fine dont une SSB de 20m²/g et l'incorporation de fumée de silice dans les bétons conduit à des améliorations remarquables des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons. Dans notre travail on a procédé à l'utilisation de la fumée de silice pour donner une bonne homogénéisation dans le mortier et améliorer ces caractéristiques mécaniques et rhéologique



Figure III.7 : la fumée de Silice [16].

Les fumées de silice sont capables d'intervenir selon deux mécanismes :

- **Effet granulaire** : Les particules de la fumée de silice étant sphériques, lisses et très petites, viennent combler les interstices entre les grains de ciment. C'est grâce à un produit dé flocculant que cet effet granulaire peut être obtenu et conduira à une réduction importante de la teneur en eau. C'est la forme de ces particules qui va aider à la mise en place des bétons.
- **Effet pouzzolanique** : La fumée de silice, amorphe et riche en silice, peut se combiner à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir des bétons à haute et très haute performance.



Figure III.8 : Mortier de réparation confectionné dans des moules prismatique (4*4*16) cm



Figure III.9 : Essai de compression et Essai de flexion trois points.

Tableau III.23 : Résistances à la compression et à la traction par flexion sur des éprouvettes prismatique (4*4*16) cm en mortier

Moyen de Resistance à la compression en (MPa)		Moyen de la Resistance à la traction par flexion en (MPa)	
7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
25	37	3.0	4.2

III.6.5. Grilles en fibre de Verre :

La géo-grille utilisée est la grille en fibre de verre enduite CIDEX 100 SB de 6D Solutions. C'est un matériau élastique, le grillage carré de mailles de 6 x 6 mm², résulte de l'assemblage de plusieurs matériaux, dont trois composants principaux : des réseaux en fibre de verre de type « chaîne » et de type « trame » et un voile non-tissé en fibre de polyester.

III.6.5. Grilles métallique :

C'est à base d'acier galvanisé de maillage de 6*6 mm² qui a rôle de renforcer les poutres et améliorer la résistance de béton endommagé a la flexion

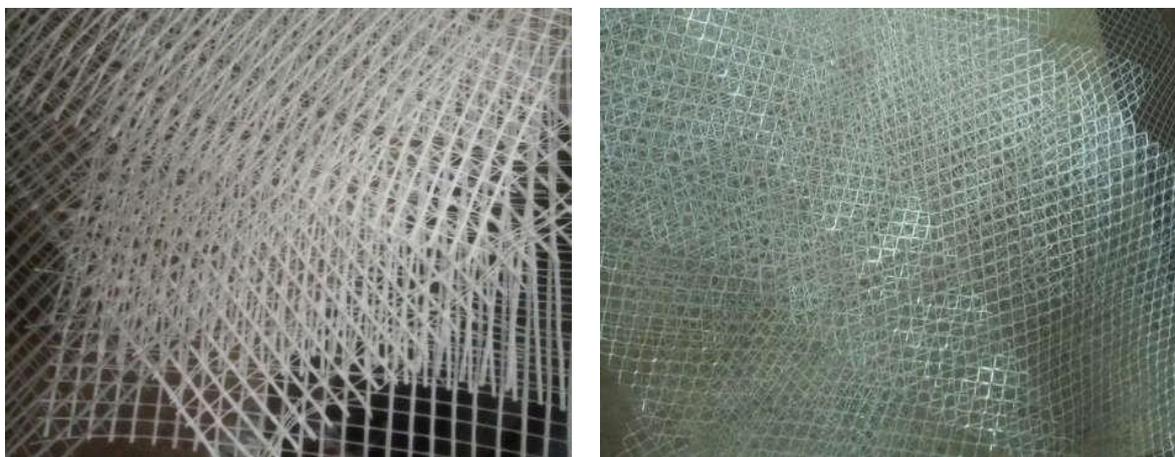


Figure III.10: Grille en fibre de verre et Grille métallique galvanisé [14]

- **Essai de traction sur les grilles**

On a préparé des éprouvettes de chaque type de grille de section rectangulaire (25*250) mm² comme il est présenté sur les figures suivantes :



Figure III.11 : Eprouvettes testées [16]

L'essai de traction des grilles en fibre métallique et en fibre de verre est effectué sur une machine de traction ZWICK -ROWEL de capacité 10 KN selon la norme ISO -527



Figure III.12 : Machine de traction zwick-Rowel

Après la disposition des éprouvettes sur la machine , on fixe la vitesse à 1 mm/min puis on lance l'opération



Figure III.13 : Disposition Des Grilles Sur La Machine De Traction.

Les résultats des propriétés mécaniques obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.24 : *Caractéristique Mécanique Des Grilles Utilisées*

Type de grille	Rapport poids/surface (g/m ²)	Module de Young (GPa)	Force de traction (N)	Déplacement (mm)	Déformation (%)	Diamètre (mm)
Verre	85.7	2.93	350	3.25	2.25	0.27
Métallique	630	3.95	320	70	46	0.9

III.7. FORMULATION DE BETON :

III.7.1. Principe de la méthode :

Dans notre travail nous avons utilisés la méthode de Dreux-Gorisse qui nos permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier (G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

En résumé l'application de la méthode de Dreux-Gorisse fait aboutir aux différentes proportions indiquées dans les tableaux suivant qui représente la composition pour 1 m³ de béton.

Tableau III.25 : Mélange Granulaire (D max =25mm)

Tamis (mm)	0.063	0.08	0.16	0.31	0.63	1.25	2.50	4.00	5.00
Passants (%)	0,00	3,96	7,90	14,2	18,4	25,6	37,0	41,54	46,02
Tamis (mm)	6.30	8.00	10.0	12.5	14.0	16.0	20.0	25.0	31.5

Tableau III.26 : Proportions des différents constituant de compositions

Composants	%	Volume Abs [l/m ³]	Poids [kg/m ³]	Volume App [l/m ³]
G III 15/25 BOUZEGZA	20	137	368	258
G II 8/15 BOUZEGZA	25	172	460	326
GI 3/8 BOUZEGZA	10	69	183	133
SII 0/4 BOUZEGZA	36	247	626	417
SI 0/1 Boussada	9	62	163	107
CIMENT: 42.5 MEFTAH	//	112,9	350	//
Eau	//	158	158	158
Adjuvant :GLENIUM 27	1	//	3,50	//
TOTL	100	//	2311	//
(E/C) = 0.45		(G/S) = 1.28		
MV = 2311 Kg/M³				

III.8.1. Confection des éprouvettes du béton :

-Préparation des granulats : sable, gravier, ciment en (Les granulats ont été étuvés et laissés refroidir avant leur mise en œuvre).



Figure III.14: *Granulats (sable, gravier)*



Figure III.15: *Moules cylindrique (16*32) cm*



Figure III.16 : *Malaxeur*



Figure III.17 : *Confection des éprouvettes*

- Après le démoulage des éprouvettes en béton, et pour assurer un bon durcissement, on a les conservées dans un bac d'eau à une température de 20 ± 2 °C, Conformément à la norme **EN 12390-2 (2012)**

- La détermination de la résistance à la compression sur des éprouvettes (16x32) cm conformément a la norme **EN 12390-3 (2012)**

Les résultats des essais sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau III.27 : *Résistance à la compression du béton durci*

Moyen de la Résistance à la compression à 28 jours
31.0 MPa

III.8.2. Renforcement des éprouvettes :

III.8.2.1. Mise en œuvre des TRM (Textile Reinforced Mortar)

A. Traitement de Surface des éprouvettes en béton

Pour l'application de mortier il faut :

- Assurée une rugosité suffisante pour augmenter l'adhérence entre le mortier et la surface des éprouvettes en béton,
- Veiller à éviter la présence de poussière ou les particules fines au niveau de la surface des éprouvettes.
- Humidifier la surface du l'éprouvettes en béton pour éviter que celui-ci absorbe l'eau du mortier, ce qui modifierait son dosage et par là même ses propriétés.



Figure III.18 : *Etapas de traitement de la surface des éprouvettes.*

B. Préparation des grilles :

On découpe soigneusement les grilles métalliques et les grilles en fibre de verre aux dimensions désirées et indiquées ; puis on les met dans un espace propre et sec.



Figure III.19 : *Préparation des grilles (métallique et en verre).*

C. Préparation de mortier :

- Mettre le malaxeur étant en position de fonctionnement:
- Verser 168.7 g d'eau dans le récipient on lui ajouté 450 g de ciment et 45 g de fumé de silice à la fin on termine par 1350 g de sable avec le respect des quantités précises.
- Mettre le malaxeur à une vitesse lente pendant une minute, puis à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- Arrêter le malaxage pour 30 seconde, racler les parois et fond du récipient de façon qu'aucune fraction de pâte n'échappe au malaxage.
- Reprendre le malaxage pendant 3 minutes à vitesse rapide jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et adhérente comme il a présentée sur la figure III.20



Figure III.20 : Préparation du mortier de réparation.

D. préparation de la variante a base d'une seule grille par la technique TRM (métallique ou verre) :

On appliqué le renforcement selon les étapes suivantes :

- ✓ Enrober l'éprouvette avec une première couche de mortier a l'aide d'une raclette (3mm)
- ✓ Entourer la grille sur l'éprouvette et la sérer et fixer avec un fil d'attache.
- ✓ Applique une deuxième couche de mortier pour l'enrobage finale (3 à 5 mm).
- ✓ On suivant les mêmes étapes pour le cas d'une une seule grille ; puis on applique une deuxième grille et l'enrober avec une couche finale du mortier.



Figure III.21 : Renforcement des éprouvettes en béton par la technique TRM (Grille en Verre).



Figure III.22 : Renforcement des éprouvettes en béton par la technique TRM(Grille métallique).

III.8.2.2. MISE EN ŒUVRE DES PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone)

A. Préparation du support

La préparation du support de béton ci pour éliminer toute trace superficielle pour donner une partie hétérogène.

- La surface du béton doit être propre, dénudé de tous produits non adhérentes et de tout enduit et mastères graisse et d'huile.
- Le taux d'humidité doit être inférieur de (4 %).
- Les éprouvettes de béton doit avoir au moins un âge de 28 jours, doit être préparé de façon à créer un état de rugosité suffisant et éliminer la surface présentant peu de cohésion.

- Nettoyage de surface des éprouvettes à l'aide de lamelle avec un disque de ponçage et disque de brosse métallique
- Dépoussiérer avec de l'eau et une éponge pour absorber tout l'eau

B. Préparation des tissus composites (PRFC et PRFV):

la préparation de tissus selon les étapes suivantes :

- Découper le tissu aux dimensions appropriées et souhaitées dans notre travail comme suite, Hauteur =32 cm et longueur=52cm
- Ne pas endommager les extrémités découpées et on évite de plier le tissu et Le conserver toujours en position enroulé.



Figure III.23 : découpage de fibre de carbone.

C. Préparation de la colle Skia-dur-330

- Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.
- Verser le composant B (durcisseur) dans le composant A (résine) en respectant le rapport de malaxage A/B= 4/1 en fonction du poids.
- dans notre travail on a mélangé 400 g de composant A avec 100 g de composant B
- Mélanger bien les deux composants jusqu'obtenir un mélange uniforme de couleur grise.



Composant(B)

Composant (A)



Figure III.24: Mélange des composants A et B.

Pour l'application du renforcement par la technique PRF sur le support il faut suivre les étapes suivantes :

1-Appliquer la première couche (1 à 2 mm) de résine Sikadur -330 sur la surface de l'éprouvette, à l'aide d'un pinceau.

2-Conformément au calepin âge et au dimensionnement souscrit, placer le tissu découpé sur la couche d'apprêt, en veillant à l'orientation correcte du sens des fibres (tissu unidirectionnel).

3-Le tissu doit être posé sans pli et sans étirement excessif

4-Le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage (réalisé au moyen d'un rouleau) permettant l'imprégnation de la colle dans les fibres et l'élimination des bulles d'air éventuelles.

5-Répartir la résine au rouleau jusqu'à l'obtention d'une structure homogène (variantes A et B)

6- On Laisse les éprouvettes sécher à l'aire libre jusqu'à 24h



Figure III.25 : Application de la couche de colle sur la surface de béton .



Figure III.26: Collage de tissus avec la Résine.



Figure III.27 : Epreuves confinés par (PRFV) et (PRFC) .

III.8.3. Abréviations des éprouvettes :

On a confectionné vingt un (21) éprouvettes cylindrique en béton de diamètre 16*32 cm puis on appliquées sur elles deux techniques de renfermement : polymère renforcé par des fibres (PRF) et mortier renforcé par textiles composites.

Les éprouvettes renforcées sont distribuées en sept (7) variantes qu'ont été représentés dans le tableau Tableau **III.28**

Tableau III.28: Abréviations Des Variantes

Variantes	figures correspondantes	Appellation
BT		Béton témoin
PRFC		Béton a base de fibre de carbone – résine époxy
PRFV		Béton à base de fibre de verre et résine époxy
BGV1		Béton à base d'une seule grille en fibre de verre avec mortier cimentaire
BGV2		Béton à base de deux grilles en fibre de verre avec mortier cimentaire
BGM1		Béton à base d'une seule grille métallique avec mortier cimentaire
BGM 2		Béton à base de deux grilles métalliques avec mortier cimentaire

III.8.4. Essai à la compression :

Les éprouvettes ont été procédées à la compression simple jusqu'à la rupture à une vitesse d'essai de 0,5 MPa /s dans une presse à béton 3R d'une capacité de 3000 KN selon la norme EN 12390-3 Avril 2012



Figure III.28 : Eprouvette soumise à la compression simple

IV.1. Effet de confinement par la technique PRF

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes confiées par la technique **PRF** à base de différents tissu :carbone et verre ; par rapport au béton témoin non confiné sont présentés dans l'histogramme suivant :

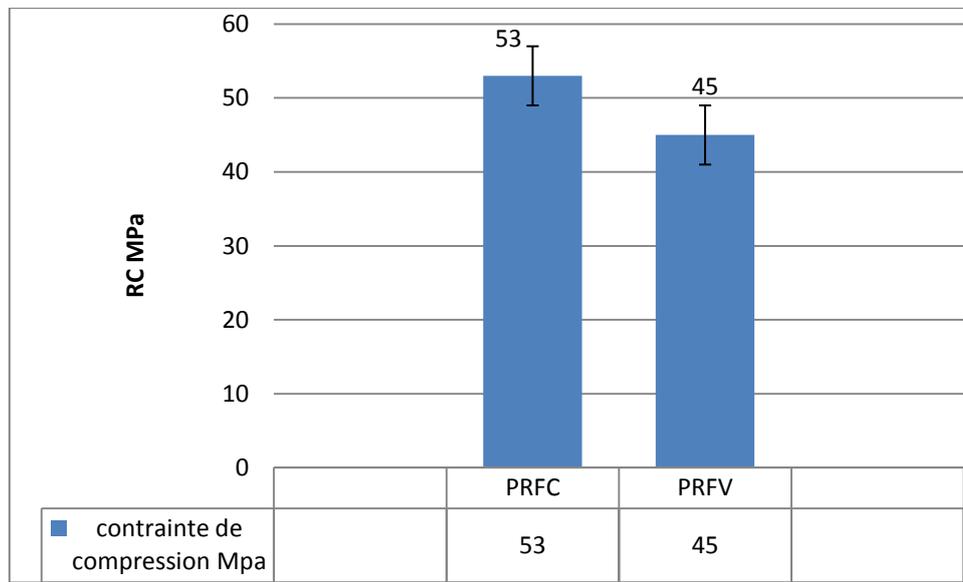


Figure IV.1 : Contrainte à la compression des variantes PRFC et PRFV par rapport BT

Les résultats obtenus montrent que les éprouvettes renforcées par la technique PRF ; présentent des propriétés mécaniques plus améliorées que celles du béton non confiné en termes de résistance à la compression ;on a enregistré un gain de l'ordre de **71%** pour la **PRFC** et **45%** pour **PRFV** ; qu'il va donner par la suite une amélioration de rigidité et de déformation a la rupture ; ces gains se résulte aux performances mécaniques et caractéristiques intéressantes des PRF (verre et carbone) ; Qui confèrent aux éprouvettes une action latérale opposante importante.

Les éprouvettes confinées à base de tissu de carbone présentent une résistance à la compression plus élevée avec un bénéfice de **80 %** par rapport au **BT** et **17 %** par rapport au celles à base de fibre de verre. Ces gains interprété mécaniquement par les caractéristiques particulières des fibres de carbone tel que son module d'élasticité et ça contrainte à la rupture les plus élevés par rapport de la fibre de verre ;ils provoquent avec l'adhésif (époxy) une cohésion capable de fournir une réaction face aux forces latérales exercés par les contraintes axiales de compression et assurer par la suite une résistance a la compression et une rupture lente en déformation (ductilité) .

L'effet de confinement par la technique TRM

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes confiées par la technique **TRM** à base de différent type de renforts : grille métallique et grille en verre par rapport le béton témoin sont présentés dans l'histogramme suivant :

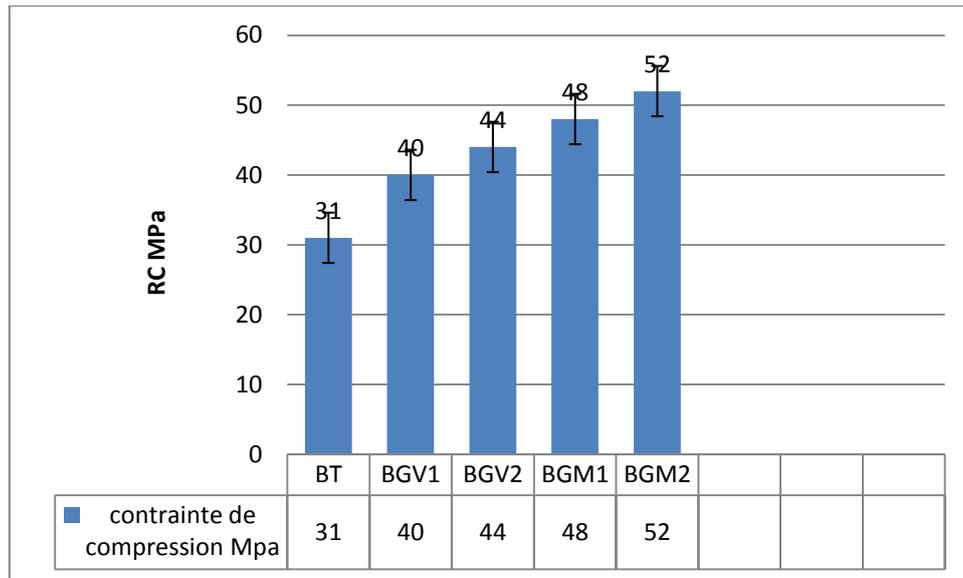


Figure VI.2 : Contrainte à la compression des variantes en TRM par rapport BT

- Les résultats obtenues montrent que les éprouvettes renforcées par la technique **TRM** présentent des résultats plus intéressantes par rapport au béton témoin avec un gain de **29 à 42 %** pour les variantes **BGV** ; et de **55 à 68 %** pour les variante **BGM** en résistance à la compression ; cela est dû aux caractéristiques particulières des grilles en fibre de verre et des grilles métalliques par l'esprit adhérent(**TRM**) ; qui confère au béton une forte action opposite participante a l' améliorations des comportements mécaniques du variante. (Rigidité ; ductilité...)

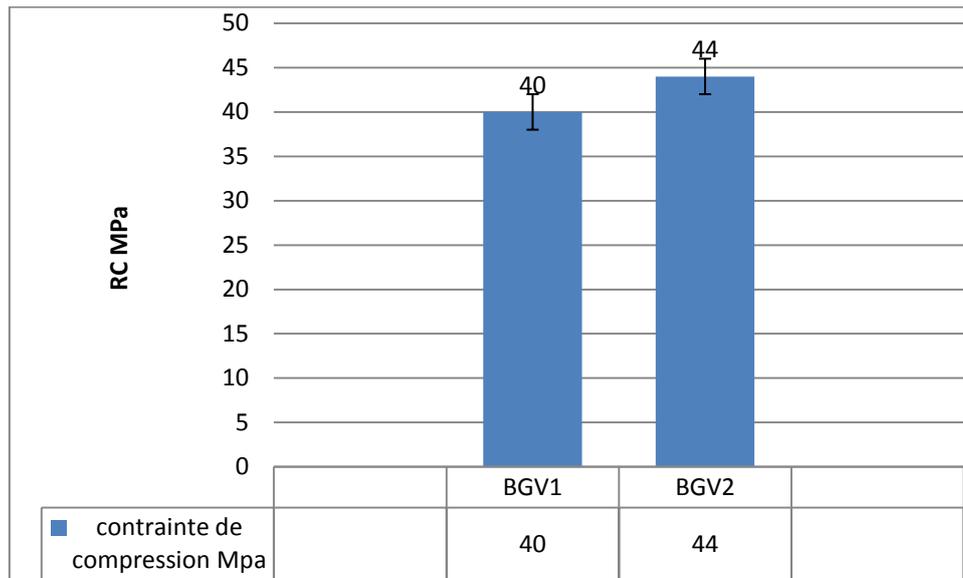


Figure VI.3 : effet de nombre de nappes de grille de fibre de verre

On a constaté d'après la figure **IV.3.** que les éprouvettes renforcées à base de deux nappes de grilles en fibre de verre offrent des distinctifs mécaniques plus dominantes que celle à base d'une seule nappe ; avec un gain de 10 % en compression ; On peut expliquer cette amélioration par l'influence de nombre de nappes et l'épaisseur du mortier ; qu'ils présentent une bonne adhérence entre les interfaces : **grille –mortier** dans les deux couches ; et à l'interface : **mortier- béton** ; qu'assurent une énergie de cohésion entre les phases : **béton-mortier-grille** et assurent par la suite une rupture continue ; correcte pour fournir une charge latérale opposante a la rupture.

L'histogramme suivant représente l'effet de nombre de nappes dans la variante a base de grille métallique :

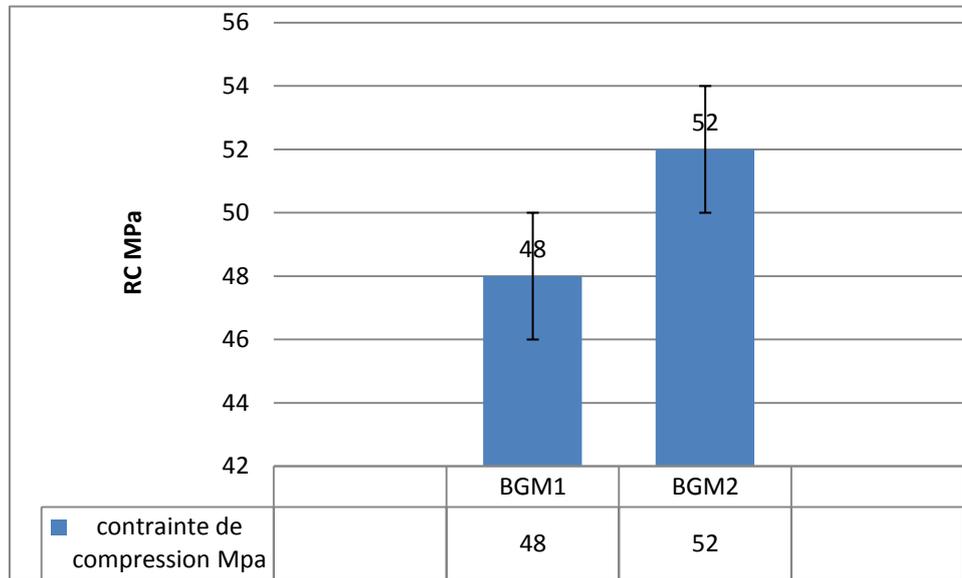


Figure VI.4 : effet de nombre de nappes de grille métallique

Selon Les résultats clarifiés dans la figure VI.4 .on a constaté que la variante renforcée à base de deux nappes de grilles métalliques expose des performances remarquables que celle à base d'une seule nappe ; en terme de résistance à la compression avec un profit de **8 %** ;. Cette progrès est marqué par le nombre des grilles métalliques et l'épaisseur de mortier qu'ils peuvent fournir plus de forces opposantes en assurant d'une servante adhérence entre les interfaces : **béton-mortier** et **mortier - grille** dans toutes les couches ; et assure par la suite l'énergie de cohésion entre eux pour une rupture **continue ; correcte**.

Le représentatif suivant montre l'effet de type et la nature de la grille utilisé dans le renforcement :

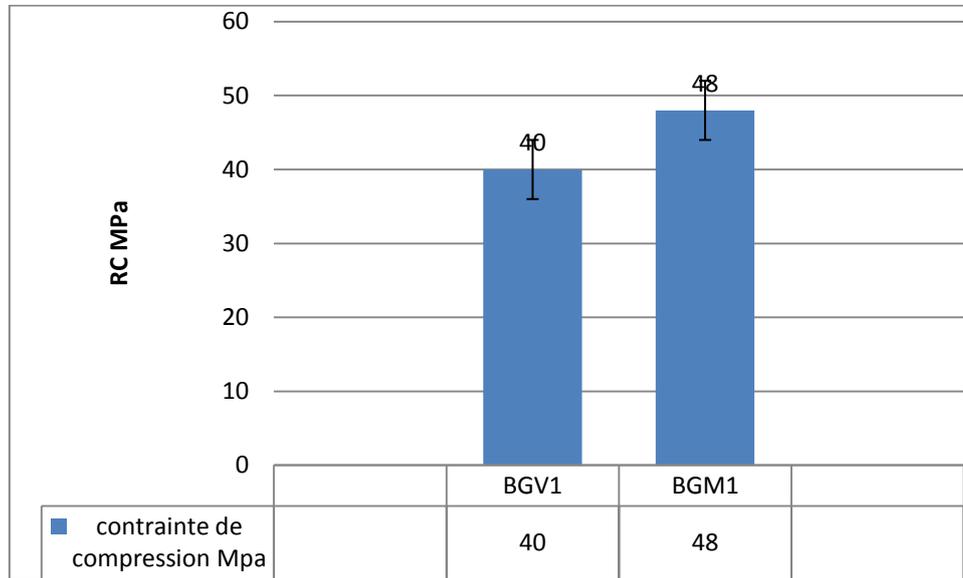


Figure VI.5 : effet de type de grille sur la résistance à la compression

Les éprouvettes confinées à base d'une seule grille métallique présentent des propriétés plus performantes que celle à base d'une seule grille en fibre de verre avec un gain de 20 % en résistance à la compression ; Le comportement mécanique particulière de la grille métallique tel que le module d'élasticité et l'épaisseur les plus élevés faite la déférence par rapport celle de la grille en fibre de verre. En plus l'adhérence entre les interfaces **mortier – grille** en termes de la nature du matériau de renfort et le type de liaison qu'existe (chimique et mécanique).

CHAPITRE IV : Discussion des résultats

La figure VI.6 montre que Les corps d'éprouve renforcées à base de deux nappes de grilles métalliques présentent des propriétés plus performantes que celles à base de deux grilles en fibres de verre avec un profit de **18 %** en terme résistance à la compression ; . L'explication reste similaire que les mécanismes d'amélioration de la variante BGM1 par rapport BGV1 ; et une maîtrise de la bonne adhérence des interfaces : **béton –mortier** et **mortier - grille** au niveau de toutes les couches pour garantir l'efficacité de doublement.

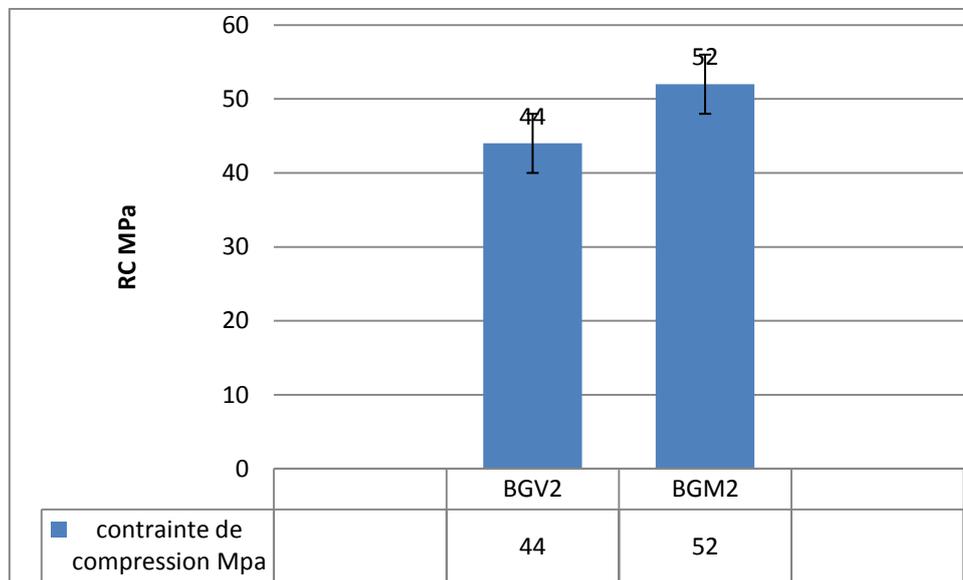


Figure VI.6 : effet de nombre et de type grille sur la résistance a la compression

Comparaison entre les variantes PRF avec les variantes TRM

Les résultats comparatifs des variantes des deux techniques de collage PRF et TRM. Sont présentés dans l'histogramme suivant :

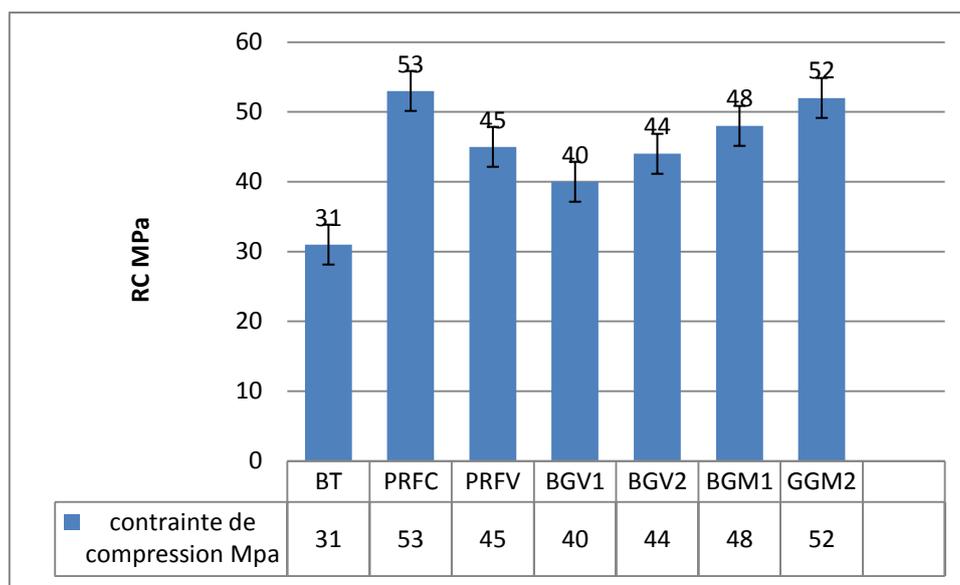


Figure VI.7 : Résistances à la compression des variantes PRF par rapport celles de TRM

PRFV par rapport BGV1 et BGV2 :

La variante **PRFV** présente une résistance à la compression plus élevées que la variante : **BGV1** avec une différence de **12 %** ;et un résultats similaire de **BGV2** ce dernier est grâce a la particularité de la matrice de polymère qui présente une rigidité plus forte que celle de la matrice cimentaire malgré la présence de double nappes dans la variante **BGV2**;à cause de la cohésion intéressante appliquée entre la matrice en polymère et le renfort dans les **PRF**.

PRFC par rapport BGV1 et BGV2 :

La variante **PRFC** expose une résistance à la compression plus haute que les variantes : **BGV1** avec un gain de **33 %** ; et un profit de **20%** par rapport **BGV2** .et ce grâce a la rigidité et la manière adhésive la plus puissante de la résine par rapport de la matrice cimentaire ; plus le module d'élasticité caractéristique de la fibre de CARBONE bidirectionnel, l'assemblage de ces facteurs avec une cohésion assuré par la matrice de polymère ; peuvent faire la différence pour la variante **PRFC**.

PRFV par rapport BGM1 et BGM2 :

La résistance à la compression dans les variantes **BGM1** et **BGM2** est plus performante que la variante : **PRFV** malgré la rigidité de la matrice polymère par rapport la matrice cimentaire ; avec une amélioration de **20 %** pour **BGM1** ; et **30 %** pour **BGM2** .on peut commenter ca par la résistance à la déformabilité de la grille métallique par rapport la fibre de verre qu'il a été observé dans le mode de rupture des variantes **BGM1** et **BGM2**.

PRFC par rapport BGM1 et BGM2 :

Les éprouvettes à base de fibre de carbone et matrice en polymère(résine) ; montrent des performances similaires que la variante à base de deux grilles métalliques de moyenne de **53 MPa** ;et plus élevées que celle à base d'une seule nappe métallique ;cette expérience prouve les caractéristiques particulières intéressantes de la fibre de carbone permettant de battre même les propriétés de la grille métallique en termes élasticité et contribution dans la résistance a la déformation et la ductilité du béton.

Conclusion générale :

A l'issue de cette étude et à partir des résultats expérimentaux nous tirons les conclusions suivantes :

- Les éprouvettes renforcées avec les deux techniques présentent une charge considérable et une déformation importante le gain de la résistance à la compression varie de 30 à 71% par rapport au béton témoin non confiné.

- Les éprouvettes renforcées par la technique PRF ; présentent des propriétés mécaniques plus améliorées que celles du béton non confiné en termes de résistance à la compression ; on a enregistré un gain de l'ordre de 71% pour le PRFC et 45% pour le PRFV

-Les éprouvettes renforcées par la technique TRM présentent des résultats plus intéressantes par rapport au béton témoin le gain de la résistance à la compression est de 29 à 42 % pour les variantes BGV ; et de 55 à 68 % pour les variante BGM en résistance à la compression

-Les éprouvettes renforcées à base de deux nappes de grilles que ce soit en fibre de verre ou métalliques, offrent des propriétés mécaniques plus dominantes que celle à base d'une seule nappe ; avec un gain de résistance à la compression de 10%, et 8% respectivement. Donc, la charge maximale que peut supporter le béton renforcé augmente avec le nombre de couches de renfort. Ceci est en accord avec les données collectées lors de l'état de l'art préalable à cette étude. L'épaisseur du renforcement conditionne le confinement de l'éprouvette et donc améliore sa résistance à la contrainte axiale.

-Les éprouvettes confinées à base d'une seule grille métallique présentent des propriétés plus performantes que celle à base d'une seule grille en fibre de verre avec un gain de 20 % en résistance à la compression.

-Les corps d'éprouve renforcées à base de deux nappes de grilles métalliques présentent des propriétés plus performantes que celles à base de deux grilles en fibres de verre avec un profit de 18 % en terme de résistance à la compression

-La variante PRFV présente une résistance à la compression plus élevées que la variante : BGV1 avec une différence de 12% et un résultat similaire avec BGV2 ; et des performances moins que les variantes BGM1 et BGM2 avec profit de 20 % pour la variante BGM1 ; et 30 % pour la variante BGM2.

Conclusion Générale

- La variante **PRFC** expose une résistance à la compression plus haute que les variantes : **BGV1** avec un gain de 33 % ; et de **20%** par rapport **BGV2**. et des performances similaires que la variante à base de deux grilles métalliques de moyenne de 52 MPa ; et plus élevées que celle à base d'une seule nappe métallique

- Finalement les résultats de ce projet montrent l'intérêt de l'emploi des deux techniques de renforcements **PRF** et **TRM** pour les ouvrages en béton. Ils permettent en effet une augmentation des charges portantes et une plus grande ductilité.

- La technique de renforcement **PRF** présente plusieurs avantages en terme de propriétés mécaniques et légèreté ; absence des corrosions ; facilité de manipulation et leur bonne tenue à la fatigue, mais elle présente en parallèle des inconvénients tel que ça cout élevé et ça faible résistance aux haute températures et incendie. Tandis que la TRM peut minimiser au éliminer ces inconvénients grâce aux comportements particulières de la matrice cimentaire en terme de résistance aux hautes températures ; durabilité et la compatibilité avec différents renforts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE :

- [1] **Raphaëlle SADONE.** « Comportement des poteaux confinés en PRF soumis à des sollicitations de type sismique » - Thèse doctorat université de Paris-Est, 2011
- [2] **MADI Rafik, GUENFOUD Mohamed** « Effet de confinement des poteaux rectangulaire » - Rapport laboratoire LGCH université 8 mai 45 , Guelma , 2012
- [3] **OULD ELHACEN Zein Elabidine** « Renforcement du béton par les matériaux composites » -Mémoire de Master université de Tbesa-Algérie ,2016
- [4] **Maroc BROUXEL, Lotfi hasni.** « La démarche du diagnostique », documentation techniques, IMGC-France , 2013
- [5] **Valentine RINCKER.** « Diagnostique des structures existant » projet fin d'étude spécialité génie civil, INSA Strasbourg ,2009.
- [6] **LUC COURARD.** « Pathologies des bétons causes et effets » - documentation technique Université de liège, Belgique ,2014
- [7] **E.FERRIER,** « comportement de structure en béton armé renforcé Par les matériaux composites » - Thèse doctorat Université de paris ,2007
- [8] **RIAD BENZAID.** « Renforcement des colonnes en béton armé confiné par PRF». Thèse doctorat Université JJEL, 2000
- [9] **Mr Benjamin LACLAU.** « Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20^{ème} siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renfort composites » - REFHORM Rapport final, centre de recherche NOBATEK-France, 2009
- [10] **MERDES Abdelghani .** « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres AB – Mémoire de Magister université des frères Mentouri – Constantine, 2009
- [11] Documentation formation de GINGER, France, 2016
- [12] **MOUSSAOUI Boulem.** « Apport du confinement du béton sur le comportement des éléments de structure au flambement » -Mémoire de Magister génie civil université TIZI OUZOU –2011

[13] **Hichem BELHANACHI**. < Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé >. Mémoire de Magister université des frères Mentouri, CONSTANTINE, 2009

[14] Documentation Techniques de laboratoire nationale de l'habitat et de la construction LNHC-DRC unité Oued Smar -Alger

[15]. Documentation technique TEKNACHEM année 2018

[16]. Documentation technique SIKA ELDJAZAIR année 2018