

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

N° :

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : - BAALI Saad
- FATMI Ammar

Intitulé

Etude du comportement d'un béton armé de
polymère renforcée de fibres de verres (PRFV)

Le : 27/06/2022

Soutenu devant le jury composé de :

ROKBI Mansour	Université de M'sila	Président
RAHMOUNI Zine El Abidine	Université de M'sila	Encadreur
BAALI Brahim	Maghreb Pipe de M'sila	Co-Encadreur
TEBBAL Nadia	Université de M'sila	Examinatrice

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier « ALLAH » Tout-Puissant de nous donner le courage et la volonté, la force et la patience de supporter ce travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance au Pr. RAHMOUNI Zine El Abidine pour avoir accepté de nous encadrer dans ce travail. Aussi notre Co-encadreur Dr. BAALI Brahim pour avoir accepté de mener nos expériences au niveau de l'usine MAGHREB PIPE Industrie, les remercions pour leur implication, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier le chef de laboratoire M. soufiane.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire.

Et tous mes amis de notre promo spécialités « matériaux en génie civil ».

Ce dernier merci à nos parents et nos familles pour nous donner toujours un coup de pouce dans notre étude.

Merci à tous.

BAALI Saad & FATMI Ammar

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents et mes familles :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

A mes frères :

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues :

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié.

BAAL¹⁹ Saad

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

A tous mes familles :

A mes chers parents et mon fils (Mohamed Iyad) a toute ma
famille (FATMI Mohamed)

A tous mes amies :

A tous ceux qui m'est chers Des amis du travail et des études.

A tous mes professeurs :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon
profond respect.

FATMI Ammar

Sommaire

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites.

I.	Matériaux composites	03
I.1.	Définition des matériaux composites	03
I.2.	Les constituants des matériaux composites	04
I.2.1.	Renfort (fibre)	04
I.2.1.a.	les différents types des fibres	05
I.2.1.b.	Architecture des renforts	07
I.2.2.	Matrice	09
I.2.2.a.	Résines thermodurcissables	10
I.2.2.b.	Résines thermoplastiques	11
I.2.3.	Additifs	11
I.3.	Domaines d'applications des matériaux composites	11
I.3.1.	Renforcement par composites PRF	11
I.3.2.	Réhabilitation par composites	12
I.3.3.	Applications navales	13
I.3.4.	Composites dans les applications aérospatiales	13
I.4.	Conclusion	14

CHAPITRE II : Généralités sur les armatures PRF et leurs utilisations

II.1.	Introduction	16
II.2.	Historique de l'acier	16
II.2.1.	Usage de l'acier aux structures	16
II.2.2.	Quel est alternatif au acier	17
II.3.	L'armature en polymère renforcé de fibre PRF	17
II.3.1.	Introduction	17
II.3.2.	Les constituants d'armature en PRF	17
A)	Les Fibres pour l'armature de PRF	18
B)	Les matrices pour l'armature en PRF	20
II.3.3.	Les additifs	21
II.3.4.	La Procédure de fabrication d'armature en PRF	21
II.3.5.	Avantages et inconvénients de l'utilisation des PRF par rapport à l'acier	24
II.3.6.	Caractéristiques des armatures PRF	24
A)	Caractéristiques physiques	24
B)	Caractéristiques mécaniques	26

II.3.7. Normes et recommandations existantes	27
II.3.8. Utilisation des armatures PRF dans le domaine génie civil	28
II.4 Conclusion	34

CHAPITRE III : Matériaux et procédures expérimentales

III.1. Le Béton	36
III.1.1 Introduction	36
III.1.2. Matériaux	36
III.1.2.1. Caractéristiques des matériaux de béton	36
III.1.2.2. Formulation et composition de béton	44
A) Formulation de béton ordinaire	44
B) Procédure de fabrication des bétons	44
C) Essais à l'état frais	45
D) Essais à l'état durcis	46
III.2. Armatures en PRFV	47
III.2.1. Les caractéristiques d'armature en PRFV	47
III.2.1.1. Les caractéristiques physiques	47
A) Essai d'absorption	47
B) Essai de perte au feu des résines	49
III.2.1.2. Les caractéristiques mécaniques	50
A) Essai de traction pour l'armature en PRFV	50
B) Essai d'arrachement pour l'armature en PRFV	53
III.3. Conclusion	55

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

IV.1. Le Béton	57
IV.2. Armatures PRFV	59
IV.2.1. Les propriétés physiques d'armature en PRFV	59
A) Le taux d'absorption de l'eau	59
B) Les pourcentages des constituants (essai de perte au feu)	61
IV.2.2. Les propriétés mécaniques d'armature en PRFV	62
A) Résistance à la traction (l'essai de traction uni-axiale)	62
B) Caractérisation mécanique de l'interface béton / armature en PRFV (l'essai d'arrachement)	66
IV.3. Conclusion	69
Conclusion générale	71
Recommandations et perspectives	73
Les références bibliographiques	75

Liste des Tableaux

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites

Tableau I-01 : Caractéristiques mécaniques moyennes des résines	10
Tableau I-02 : Caractéristiques thermomécaniques moyennes de quelques résines TP.....	11

CHAPITRE II : Généralités sur les armatures PRF et leurs utilisations

Tableau II-01 : Propriétés des résines thermodurcissables	21
Tableau II-02 : Densités typiques de barres d'armature.....	25
Tableau II-03 : Coefficients d'expansion thermique typiques des résines	25
Tableau II-04 : Coefficients d'expansion thermique typiques des fibres	26
Tableau II-05 : Propriétés mécaniques en traction types des barres d'armature en PRF.....	27

CHAPITRE III : Matériaux et procédures expérimentales

Tableau III-01 : La masse volumique apparente du sable mélange (dune+concassé).....	38
Tableau III-02 : La masse volumique absolue du sable mélange (dune+concassé).....	39
Tableau III-03 : Les résultats des analyses granulométriques du sable mélange	40
Tableau III-04 : Les résultats équivalent de sable ESV et ESP du sable mélange.....	41
Tableau III-05 : Les résultats de masse volumique apparente de G(3/8) et G(8/16).....	42
Tableau III-06 : Les résultats des analyses granulométriques de gravier G(3/8).....	43
Tableau III-07 : Les résultats des analyses granulométriques de gravier G(8/16).....	43
Tableau III-08 : Les différentes formulations avec des pourcentages différents en adjuvant.....	44
Tableau III-09 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....	45
Tableau III-10 : les dimensions et les charges qui caractériser la machine de traction (YL-25).....	51

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

Tableau IV-01 : Les résultats de résistance à la compression des éprouvettes cubiques	57
Tableau IV-02 : Les résultats de résistance à la traction par flexion (FTP)	58
Tableau IV-03 : Le taux d'absorption de l'eau pour un échantillon d'armature en PRFV.....	60
Tableau IV-04 : Les différentes valeurs référentielles pour les propriétés d'armature en PRFV.....	60
Tableau IV-05 : Les résultats de l'essai de perte au feu.....	62
Tableau IV-06 : Les résultats pour les propriétés mécaniques d'armature en	65
Tableau IV-07 : Les propriétés mécaniques en traction types des barres d'armature en PRF	65
Tableau IV-08 : Les résultats des contraintes adhérence pour les armatures PRFV (Ø12mm ,16mm).....	68

Liste des Figures

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites

Figure I-1 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort.....	04
Figure I-2 : Le fibre de verre.	05
Figure I-3 : Le fibre de carbone.	06
Figure I-4 : Le fibre d'aramide.	07
Figure I-5 : Un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre.	07
Figure I-6 : Un tissu taffetas.	08
Figure I-7 : Un tissu sergé.....	08
Figure I-8 : Un tissu satin pour $n=4$	09
Figure I-9 : Les différents types de matrice.....	09
Figure I-10 : renforcement par composite	12
Figure I-11 : Réparation des conduites par matériaux composites.	13
Figure I-12 : Les composites de PRF appliqué au domaine navales.	13
Figure I-13 : Répartition des matériaux dans le Boeing 787.	14

CHAPITRE II : Généralités sur les armatures PRF et leurs utilisations

Figure II-01 : Les différents diamètres pour l'armature PRFV.	16
Figure II-02 : Distribution des fibres dans la matrice d'une armature de PRF.....	18
Figure II-03 : Un schéma du procédé de fabrication par pultrusion.	22
Figure II-04 : Le procédé de fabrication par pultrusion pour fabriquer l'armature PRFV.....	23
Figure II-05 : Exemples de barres en PRF disponibles sur le marché.....	23
Figure II-06 : Comportement mécanique des armatures en PRF	27
Figure II-07 : Dalles de terrasse préfabriquées.	28
Figure II-08 : Dalles de tablier de pont.	29
Figure II-09 : Les treillis FRP peuvent être utilisés comme renforcement les dalles.....	29
Figure II-10 : Station de traitement de l'eau.	30
Figure II-11 : L'armature PRF d'un Tunnel en PRF.....	30
Figure II-12 : Poser l'armature PRF d'un Tunnel.	31
Figure II-13 : Murs de barrière de pont.....	31
Figure II-14 : Garages de stationnement.....	31
Figure II-15 : Chaussées en béton.....	32
Figure II-16 : Treillis de renfort en PRF de maçonneries.	32
Figure II-17 : les différentes utilisations des armatures en PRF.....	33

CHAPITRE III : Matériaux et procédures expérimentales

Figure III-01 : Un sac de ciment CEM II/A-L 42,5 R NA 442.	37
Figure III-02 : Caractéristiques physiques, mécanique et chimiques de ciment GICA.....	37
Figure III-03 : Le sable de dune et sable concassé utilisés.....	38
Figure III-04 : L'essai de masse volumique apparent.....	39
Figure III-05 : L'essai de la masse volumique absolue.....	39
Figure III-06 : Le courbe granulométrique du sable mélange (dune+concassé).....	40
Figure III-07 : Le principe de l'essai équivalent de sable ESV et ESP.....	41
Figure III-08 : L'essai de masse volumique apparente de gravier.....	42
Figure III-09 : Le courbe granulométrie de G(3/8) et G(8/16).....	43
Figure III-10 : L'essai de compression pour une éprouvette cubique (15x15x15).....	46
Figure III-11 : L'essai de flexion trois points pour éprouvette prismatique (7x7x28).....	46
Figure III-12 : Appareillage de l'essai d'absorption	48
Figure III-13 : Les trois échantillons d'armature PRFV pour l'essai absorption.....	48
Figure III-14 : Essai de perte au feu	49
Figure III-15 : La pose de trois échantillons dans un four avec une température de 550°C.....	50
Figure III-16 : la machine de traction (YL-25),.....	52
Figure III-17 : Le principe et les différentes mesures de l'essai d'arrachement.....	54

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

Figure IV-01 : L'essai de compression et de traction par flexion.....	58
Figure IV-02 : Les étapes de l'essai d'absorption d'eau pour l'armature en PRFV.....	60
Figure IV-03 : Les étapes de l'essai perte au feu.	61
Figure IV-04 : La courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation (N°01).....	63
Figure IV-05 : La courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation(N°02).....	63
Figure IV-06 : La courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation(N°03).....	64
Figure IV-07 : La courbe de comportement en traction pour PRFV, PRFC, PRFA et acier.....	64
Figure IV-08 : La courbe de contrainte d'adhérence en fonction de déformation (PRFVØ12mm)...	66
Figure IV-09 :La courbe de contrainte d'adhérence en fonction de déformation (Ø16mm N°01)...	67
Figure IV-10 : La courbe de contrainte d'adhérence en fonction de (Ø16mm N°02).....	67
Figure IV-11 : Les courbes d'évolution au cours de l'essai d'arrachement.....	69

Les Symboles

PRF : Polymère renforcé de fibre

PRFV : Polymère renforcé de fibre de verre

PRFB : Polymère renforcé de fibre de Basalte

PRFA : Polymère renforcé de fibre d'Aramide

PRFC : Polymère renforcé de fibre de carbone

TD : thermodurcissables

TP : thermoplastiques

PVC : Polychlorure de vinyle

UV : rayons ultraviolets

CET : coefficient expansion thermique

ESV : équivalent de sable à vue.

ESP : équivalent de sable au piston.

E_L : le module d'élasticité longitudinal des barres PRF

f_{Lt} : la résistance en traction longitudinale des barres PRF

E_{fL} : le module d'élasticité des fibres dans la direction longitudinale

E_m : le module d'élasticité de la matrice.

f_{fL} : la résistance en traction des fibres dans la direction longitudinale.

V_f : le volume relatif de fibres.

ICF : coffrage en béton isolé.

CPC : Ciment Portland au Calcaire.

ASTM : American Society for Testing and Materials.

Abs (%) : Pourcentages d'absorptions.

W : poids d'échantillons

YL-25 : machine de traction.

Rt : résistance à la traction en MPa

P : charge maximale en N.

D : diamètre minimal de la tige en mm.

E = module d'élasticité en GPa.

m = pente de la tangente à la portion initiale de la ligne droite de la courbe contrainte- déformation en (MPa / %)

g = longueur de référence d'origine en mm.

D = diamètre moyen de la tige en mm.

Δ : extension à la charge maximale en mm.

g : longueur de référence d'origine en mm.

τ : contrainte de liaison moyenne en MPa

F : force de traction en KN

C_b : circonférence effective de la barre FRP

ملخص

أصبح استخدام القضبان المصنوعة من المواد المركبة المصنوعة من البوليمر المقوى بالألياف (FRP) كتعزيزات رئيسية في الهياكل الخرسانية مجالاً مهماً لبناء الهياكل نظراً لخصائصها الميكانيكية المهمة ومقاومتها الكيميائية العالية، ولا سيما مقاومة التآكل. وبالتالي فإن استخدام قضبان FRP هو حل فعال لمشاكل المتانة لهياكل الخرسانة المسلحة التقليدية. الهدف من هذا العمل هو دراسة بعض الخصائص (الفيزيائية والميكانيكية) مثل نسبة امتصاص الماء، ونسب المكونات (الايبوكسي والألياف)، وقوة الشد والالتصاق بين حديد التسليح والخرسانة، وإجراء المقارنة مع حديد التسليح. وفقاً للنتائج التي وجدناها، والتي تظهر أن تعزيزات FRP (PRFV) تتمتع بمقاومة شد 1.5 مرة إلى مرتين (02) من تعزيزات الفولاذ، والالتصاق (تقوية / FRP الخرسانة) أفضل من (حديد التسليح / الخرسانة).

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، الخرسانة، حديد التسليح FRP ، الألياف والراتنج

Résumé

L'utilisation des barres en matériaux composites de polymère renforcé de fibres (PRF) comme armatures principales dans les structures en béton est devenue un axe d'intérêt pour les constructeurs des ouvrages vus de leurs caractéristiques mécaniques importantes et leur résistance chimique élevée, particulièrement, la résistance à la corrosion. L'utilisation des barres en PRF se trouve ainsi comme une solution efficace aux problèmes de durabilité des structures en béton armé traditionnelles.

L'objectif de ce travail est étudié quelques propriétés (physiques et mécaniques) comme l'absorption d'eau, les pourcentages des composantes (matrice et renfort), la résistance à la traction et l'adhérence entre l'armature PRF et le béton, et fait la comparaison avec l'armature en acier.

D'après les résultats qui nous avons trouvés, on constate que les armatures en PRF (PRFV) ils possèdent de résistance à la traction 1.5 à 2 fois que les armatures en acier, et une contrainte d'adhérence (armature PRFV/béton) plus mieux que (armature en acier/béton).

Mots clés : Matériaux composites, Béton, Armature PRF, Fibre et résine

Abstract

The use of bars made of fiber reinforced polymer (FRP) composite materials as main reinforcements in concrete structures has become an area of interest for the builders of structures given their significant mechanical characteristics and their high chemical resistance, particularly, corrosion resistance. The use of FRP bars is thus an effective solution to the durability problems of traditional reinforced concrete structures.

The objective of this work is to study some properties (physical and mechanical) such as water absorption, percentages of components (matrix and reinforcement), tensile strength and adhesion between FRP reinforcement and concrete. , and makes the comparison with the steel reinforcement.

According to the results that we have found, we find that the FRP reinforcements (PRFV) they have tensile strength 1.5 to 2 times that the steel reinforcements, and an adhesion stress (FRP reinforcement / concrete) more better than (reinforcement steel/concrete).

Keywords : Composite materials, Concrete, FRP Reinforcement, Fiber and resin

Introduction générale

Au cours des deux derniers siècles, les progrès rapides de la technologie des matériaux de construction ont permis aux ingénieurs de réaliser des exploits de sécurité impressionnants, d'économie et de fonctionnalité des bâtiments construits pour répondre aux besoins communs de la société.

Cependant, l'un des plus grands défis auxquels fait face l'industrie de la construction est le nombre impressionnant de structures qui sont plus ou moins dans un état de détérioration. Dans la plupart des cas, cette détérioration est causée par la corrosion de l'armature ou de l'armature précontrainte utilisée comme armature primaire de ces ouvrages.

La corrosion des armatures en acier dans les structures en béton est un problème depuis de nombreuses années, en particulier dans les ponts et les structures offshore, entraînant leur détérioration [Shahidi et al., 2004]. Des concentrations excessives de chlorure dans les matériaux de construction, une humidité élevée, une température élevée, une exposition à la mer, des cycles de gel/dégel, l'utilisation de sels de déglacage et une surcharge mécanique due à l'augmentation des charges de trafic peuvent aggraver la détérioration structurelle [Banendran et al., 2002].

Cette corrosion est un problème majeur qui raccourcit la durée de vie des structures en béton, augmente les coûts de maintenance et menace la sécurité de la structure [El-Hacha et al., 2004]. La détérioration des structures en béton armé est devenue une préoccupation majeure dans presque tous les pays du monde.

Les matériaux polymères renforcés de fibres non métalliques (PRF) sont utilisés pour remplacer les armatures en acier dans les structures en béton, en particulier celles exposées à des environnements difficiles et agressifs. En raison de sa résistance élevée à la corrosion, de son rapport résistance/poids et rigidité/poids élevé, de sa facilité de manipulation et de fabrication, de sa grande résistance à la fatigue et de son faible coefficient thermique (dans les fibres) [Pendhari et al., 2008].

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à travers des études expérimentales au développement des connaissances entourant les caractéristiques physiques (le pourcentage

d'absorption et les pourcentages des constituants) et caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et module d'élasticité et l'adhérence entre l'armature PRF et le béton).

Notre mémoire comporte quatre (04) chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les matériaux composites en générale.
- ❖ Le deuxième chapitre définit l'armature en PRF et mentionne ses composants de base et ses propriétés physiques et mécaniques les plus importantes, ainsi que ses différents domaines d'utilisation.
- ❖ Le troisième chapitre est une étude expérimentale présentant la formulation du béton ordinaire, ainsi que les différents essais expérimentaux qui fait sur les armatures PRFV.
- ❖ Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus avec des discussions.

Enfin une conclusion générale et quelques perspectives pour travaux futur.

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites.

Le développement des matériaux composites découle de la volonté d'allier les qualités techniques aux besoins d'allègement d'un même matériau, qui doit ensuite être adapté à la solution technique du problème à résoudre. Les composites sont la combinaison de deux matériaux différents en termes de forme et de propriétés mécaniques ou chimiques dans le but d'améliorer leurs propriétés. Les deux composants d'un matériau composite sont la matrice et le renfort, et lorsqu'ils sont combinés, ils créent un matériau hétérogène qui est généralement anisotrope, c'est-à-dire dont les propriétés varient en fonction de l'orientation. Les matériaux qui composent le composite sont généralement choisis en fonction de l'application dans laquelle on souhaite fabriquer. Les critères de sélection peuvent être, par exemple, les propriétés mécaniques souhaitées, la résistance à la chaleur ou la résistance à l'eau.

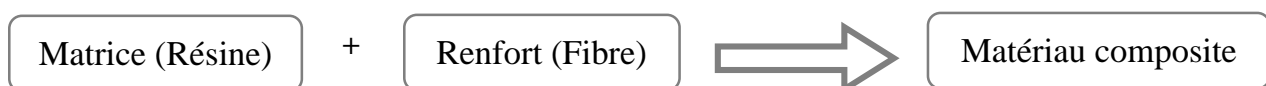
Plus précisément, les matériaux composites à matrices organiques et renforcés de fibres de verre ou de carbone sont de plus en plus utilisés dans la réalisation de composants structuraux de différentes tailles dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique (l'utilisation de ces matériaux est bien établie et ne cesse de se développer rapidement), la construction automobile (pour réduire la consommation d'énergie ; en raison du coût élevé de ces matériaux, des efforts particuliers sont faits pour réduire les coûts de fabrication), la construction, les industries chimiques et pétrochimiques, etc.

I. Matériaux composites

I.1. Définition des matériaux composites

Les matériaux composites sont principalement composés de phases appelées renfort et matrice. Lorsque le renfort et la matrice sont parfaitement collés et qu'il n'y a pas de glissement ou de séparation entre les différentes phases, le composite n'est pas endommagé. Les matériaux de renfort se présentent sous la forme de fibres continues ou discontinues. La fonction du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique. La matrice assure la cohésion entre les renforts, dissipant ainsi les contraintes mécaniques. La disposition des fibres et leur orientation peuvent améliorer les propriétés mécaniques de la structure. Nous étudions plus particulièrement les matériaux composites à renfort de fibres longues continues pour les industries marine, automobile, aéronautique et aérospatiale.

Les éléments de structure sont réalisés par empilement de couches, optimisant l'orientation des renforts en fonction des charges qu'ils doivent supporter. Sélectionnez les propriétés de la résine ou du renfort en fonction de l'application finale prévue [01].



I.2. Les constituants des matériaux composites

I.2.1. Renfort (fibre) :

Les fibres sont le principal élément résistant du PRF, le cadre est conçu avec jusqu'à 90% du volume de fibres, appelé renfort, assurant la résistance mécanique (résistance à la traction et rigidité). Ces renforts sont généralement filamenteux (fibres organiques ou inorganiques), constitués de centaines/milliers de filaments dont le diamètre varie de 5 à 15 microns, traités dans des machines textiles (mèches), et leur forme industrialisée est La soie est décomposée en fil de base dans la mèche, sinon renforcé sous forme de produit semi-fini. Ils apportent résistance et rigidité aux composites. Cependant, la fonction mécanique du renfort doit être définie au préalable, car l'orientation des fibres définit la direction privilégiée des propriétés mécaniques ; le composite est donc orthotrope, c'est-à-dire plus performant en termes de résistance et de rigidité dans le sens des fibres [02].

Les fibres sont généralement choisies pour avoir :

- ✓ Une rigidité élevée.
- ✓ Une résistance ultime élevée.
- ✓ Une faible variation de la résistance entre les différentes fibres.
- ✓ Une stabilité lors de la manipulation.
- ✓ Un diamètre uniforme.

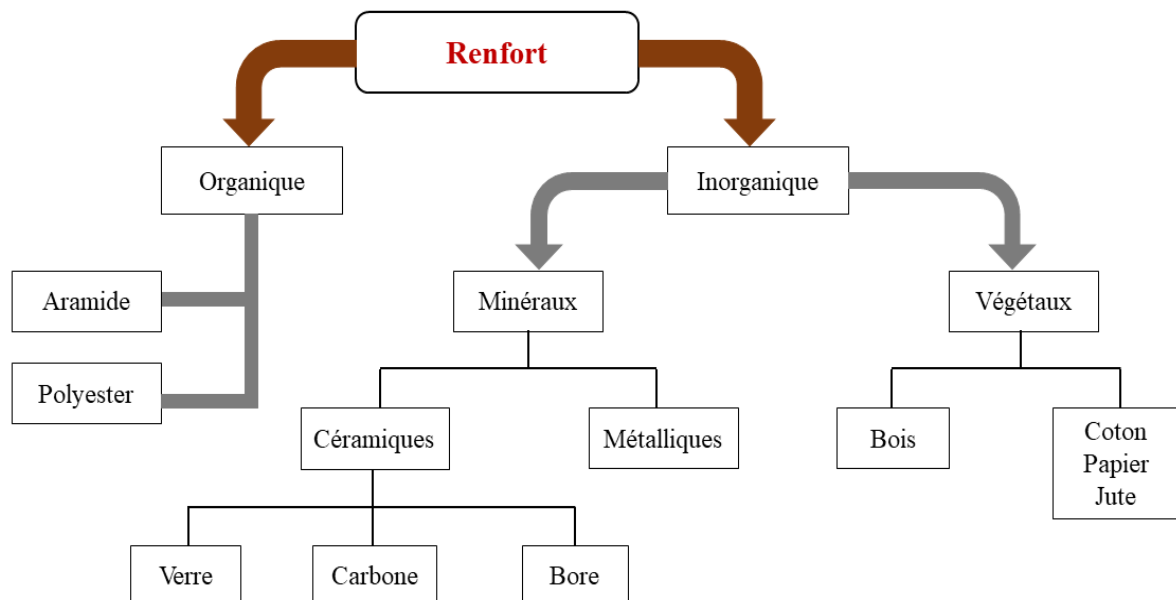


Figure I-01 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort [Berreur et al., 2002].

S'ajoutent d'autres critères de sélection des fibres, notamment la légèreté, la compatibilité avec les résines, l'adaptabilité au procédé de mise en œuvre, les contraintes de coût et la disponibilité des matériaux constitutifs. Les fibres peuvent être longues (continues) ou courtes. Il existe différents types de fibres, mais les fibres les plus utilisées dans la construction sont les fibres continues de carbone, de verre et d'aramide (dont la plus connue est le Kevlar®). Chacune des fibres ci-dessus possède des propriétés bien spécifiques qui détermineront leur utilisation, que nous détaillerons ci-dessous. Si les fibres de carbone, de verre et d'aramide sont les plus utilisées en génie civil, d'autres séries de fibres ont également été développées, mais sont moins utilisées [02].

I.2.1.a. Les différents types des fibres

❖ Fibre de verre

La fibre de verre (Figure I-02) est fabriquée en étirant du verre fondu en brins très fins et en les mettant immédiatement en contact avec l'atmosphère ou une surface dure pour maintenir la structure parfaite créée par le processus d'étirage. Les fibres de verre sont aussi résistantes que les fibres inorganiques plus récentes, mais elles manquent de rigidité en raison de leur structure moléculaire. Les propriétés du verre peuvent être modifiées dans une certaine mesure en modifiant la composition chimique du verre, mais le seul verre le plus utilisé dans les composites est le verre borosilicaté commun, appelé verre E. La plus grande utilisation de composites comprend le verre E comme renfort. Le verre S (connu sous le nom de verre R) a de meilleures propriétés que le verre E, notamment une stabilité thermique plus élevée, mais son coût limite son utilisation. La fibre de verre est moins chère que la fibre de carbone et la fibre d'aramide.



Figure I-02 : La fibre de verre [04].

En conséquence, les composites en fibre de verre sont devenus la solution la plus largement utilisée dans une variété d'applications telles que les industries du génie civil, de la marine et de l'automobile.

Les fibres ont un module d'élasticité de 70 à 85 GPa et un allongement à la rupture de 2 à 5 % selon la masse. Les fibres de verre, en revanche, peuvent avoir des problèmes de mou. Elles sont également sensibles à l'humidité, mais avec le bon choix de substrat, les fibres de verre sont protégées. [03].

❖ Fibres de carbone

La fibre de carbone a un module élastique élevé, de 200 à 800 GPa. L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. La fibre de carbone n'absorbe pas l'eau et résiste à de nombreuses solutions chimiques. Ils présentent une excellente résistance à la fatigue et une faible relaxation par rapport aux aciers de traction précontraints. La fibre de carbone est un conducteur électrique, de sorte qu'une corrosion galvanique peut se produire si elle entre en contact direct avec l'acier. Il convient également de souligner le mauvais comportement aux chocs et à l'usure des stratifiés renforcés de fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par une teneur en carbone plus ou moins élevée qui modifie l'allongement et la contrainte à la rupture ainsi que le module d'élasticité. Il existe des fibres dites "haute résistance" (HR) et des fibres "haut module" (HM) voire "à très haut module" (THM), ainsi que des fibres intermédiaires [Chatain, (2001)]. Habituellement, les fibres de carbone sont classées en trois types, différenciées par la température maximale de traitement thermique. Ils manifestent des propriétés mécaniques et tribologiques distinctes [03].



Figure I-03 : La fibre de carbone [04].

❖ Fibre d'Aramide

La fibre d'aramide est également appelée aramide, et la marque bien connue de fibre d'aramide (Figure I-04) est "Kevlar". Ces fibres ont des modules élastiques de 70 à 200 GPa, une énergie élevée à la rupture et un allongement ultime de 1,5 à 5 %, selon la masse. Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et aux rayonnements "ultraviolets", elles ne sont donc pas largement utilisées dans les applications de génie civil. Les fibres aramides souffrent de problèmes de relaxation et de corrosion, mais elles ont une bonne résistance aux chocs et à la fatigue [03].



Figure I-04 : La fibre d'aramide [05].

I.2.1.b. Architecture des renforts

Dans les structures composites, les contraintes mécaniques déterminent la nature, l'orientation et la structure du renfort. Pour les matériaux fabriqués à partir de fibres longues, des tissus (satin, sergé, taffetas) ou des stratifiés constitués de couches unidirectionnelles (UD) sont souvent utilisés (Figure I-05). Pour les renforts tissés, la période spatiale représente le plus petit intervalle auquel le motif se reproduit dans le sens chaîne ou trame. Typiquement, les mèches ou brins de base qui composent le renfort sont constitués de centaines de filaments enrobés dans une matrice. Les caractéristiques des brins sont :

- ✓ Diamètre (2 à 4 mm).
- ✓ Nombre de filament.
- ✓ Titre : exprimé en tex (g/Km) correspondant à la masse de 1000m de fil.
- ✓ Torsion : nombre de tours par mètre.
- ✓ Ténacité : valeur de la rupture en traction.

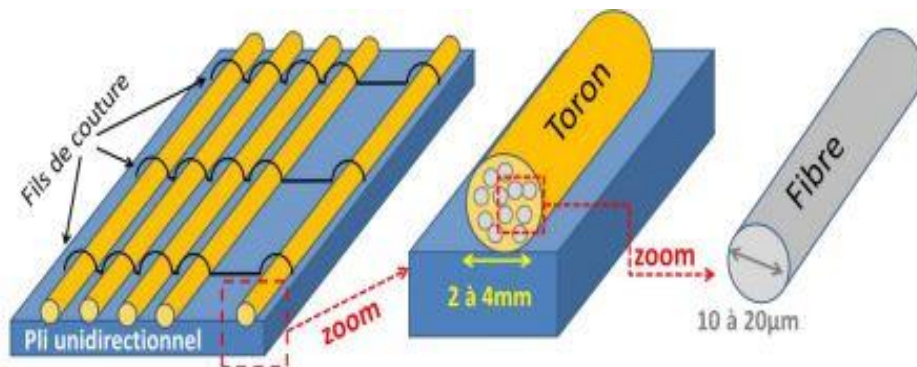


Figure I-05 : Un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre [05].

Le taffetas :

Le taffetas correspond à une pièce de tissu dans laquelle chaque fil de chaîne passe tour à tour au-dessous et au-dessus de chaque fil de trame (Figure I-06). Le tissu présente une bonne stabilité lors de la mise en place du composite. Cependant, en raison des nombreuses intersections consécutives, un rétrécissement important se produit. Cela correspond à l'ondulation de la fibre qui réduit les propriétés mécaniques globales. [05]

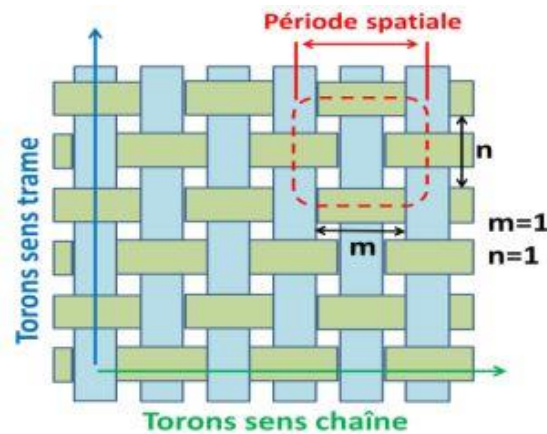


Figure I-06 : Un tissu taffetas [05].

Le sergé :

Un sergé correspond à une nappe de tissu où chaque fil de chaîne passe par ($n=2$) fils de trame et chaque fil de trame passe par ($m=2$) fils de chaîne (Figure I-07). Ce tissage offre plus de souplesse que le taffetas tout en conservant une bonne densité de fil. [05]

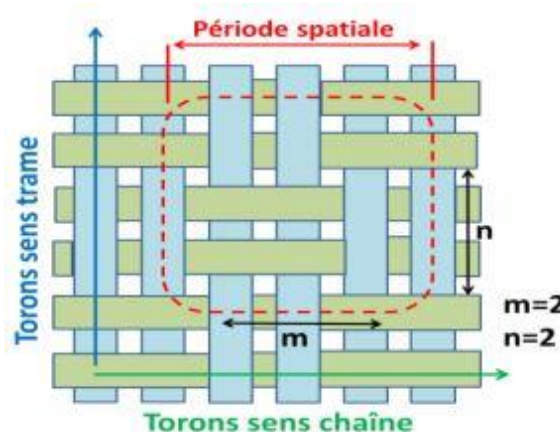


Figure I-07 : Un tissu sergé [05].

Le satin :

Le satin correspond à une nappe de tissu où chaque fil de chaîne passe par ($n-1$) fils de trame et inversement. La figure I-08 montre un tissu satiné pour " $n=4$ ". Ces tissus ont un aspect différent de

chaque côté. Ils ont également une densité élevée tout en restant assez flexibles et adaptés au façonnage de surfaces complexes. [05]

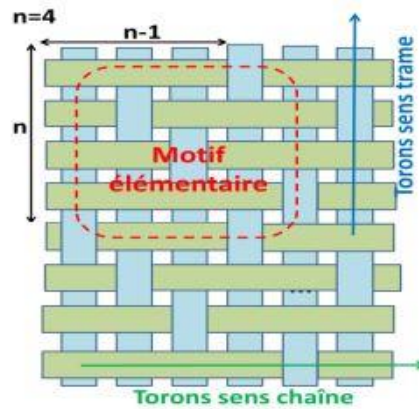


Figure I-8 : Un tissu satin pour n=4 [05].

I.2.2. Matrice :

Dans de nombreux cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en abondance, chacune avec un domaine d'utilisation spécifique. Dans les applications où une résistance à haute température de la structure est requise, des matériaux composites à matrices métalliques, céramiques ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux carbonés, la température peut atteindre 2200°C. Voir la classification des types de matrice courants, qui donnée sur la figure I-09 [01].

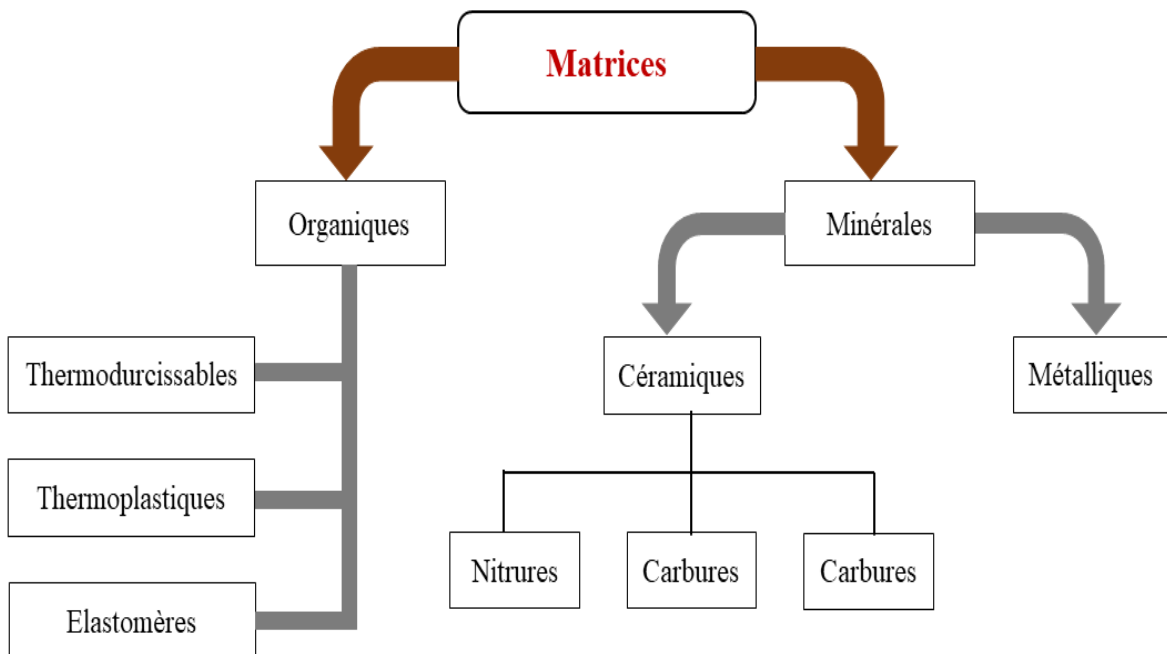


Figure I-09 : Les différents types de matrice [02].

I.2.2.a. Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être moulées qu'une seule fois. Ils existent en solution sous forme de polymères non réticulés en suspension dans un solvant. Les résines polyester insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furanniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Exemples de résines thermodurcissables couramment rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I-01[01] :

Tableau I-01 : Caractéristiques mécaniques moyennes des résines TD polyesters, époxydes et vinylesters [05].

	Résines polyesters	Résines époxydes	Résines vinylesters
Masse volumique (kg/m ³)	1200	1100 - 1500	1200
Module d' élasticité en traction (GPa)	2.8 – 3.5	3 - 5	3.4 – 3.5
Module d' élasticité en flexion (GPa)	3 – 4.5	/	3.1 – 3.8
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	50 - 80	60 - 80	70 - 85
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	90 – 130	100 - 150	115 - 140
Allongement à la rupture en traction (%)	2 - 5	2 - 5	2.5
Résistance au cisaillement (MPa)	10 - 20	30 - 50	/
Température de fléchissement sous charge à 1.8 MPa (°C)	60 - 100	290	100 - 140

I.2.2.b. Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques ont de faibles propriétés mécaniques. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Le chlorure de polyvinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide polycarbonate sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques couramment rencontrées sont le PEEK, K3B. Comme les résines thermodurcissables, les matériaux les plus efficaces ont des propriétés mécaniques élevées et une faible densité. Ces dernières sont présentées dans le tableau I-02 :

Tableau I-02 : Caractéristiques thermomécaniques moyennes de quelques résines TP [05].

	Matrices TP	Masse volumique (kg/m ³)	Contrainte à la rupture (traction) (MPa)	Module d'élasticité longitudinale (MPa)	Température de fléchissement sous charge (°C)
Polymère GD	polypropylène	900	30	1200	50 - 60
Polymère technique	Polyamide	1100	65	4000	65 - 100
	PMMA	1180	65	3100	95
	Polycarbonate	1200	63	2430	145
Polymère haute performance	PEEK	1300	90	4000	150 - 160
	PPS	1300	65	4000	>260
	Polyetherimide PEI	1150	105	3300	200

I.2.3. Additifs :

Des produits peuvent être ajoutés aux résines pour améliorer les propriétés mécaniques (charges renforçantes telles que les charges sphériques creuses de 5 à 150 µm). Des charges non renforçantes peuvent également être utilisées pour réduire le coût de la matrice de résine. Les additifs, tels que les colorants ou les agents de démoulage, sont largement utilisés dans la conception de structures composites [01].

I.3. Domaines d'applications des matériaux composites [Gangarao and Ruifeng, 2011]

L'utilisation des composites PRF comme matériaux de construction dans le génie civil a considérablement augmenté au cours de la dernière décennie. Ces matériaux se sont avérés utiles dans la construction de nouveaux bâtiments et ponts ainsi que dans la modernisation des structures existantes (Bank 2006) [06].

I.3.1. Renforcement par composites PRF

Avant toute application, le support doit être débarrassé de tout produit pouvant interférer avec une bonne adhérence du PRF. Le matériau support est systématiquement préparé en surface par une méthode appropriée d'exfoliation mécanique de surface. Bien que le PRF ait la capacité de se combiner avec les formes les plus diverses et ne puisse être exploité, il ne peut pas suivre les défauts ponctuels du béton tels que les bulles d'air, les petits éclats, les cailloux ou autres. Par conséquent, dans certains cas, il est nécessaire de niveler ou de reconfigurer la structure avant d'appliquer le PRF. Selon la norme NF P95-101 (Réparation et renforcement des structures en béton et maçonnerie - Restauration des

bétons dégradés en surface), les défauts des supports en béton sont absorbés par des produits à base de colles hydrauliques ou synthétiques [02].

De manière générale, toutes les parties de la structure peuvent être renforcées par collage de matériaux composites. Selon le type de renforcement recherché, il existe trois applications principales [ISI 06] :

- Les poutres, dalles et dalles peuvent être fléchies en collant des renforts composites unidirectionnels sur la surface de tension, les fibres du composite étant orientées selon l'axe longitudinal de l'élément de structure de manière à suivre la direction de la contrainte principale de traction.
- Le même élément peut être cisailé par collage de PRF sur les côtés, les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe longitudinal de la structure
- Les colonnes peuvent résister aux forces axiales en les enveloppant de PRF collé, les fibres sont orientées dans la direction circonférentielle [02].

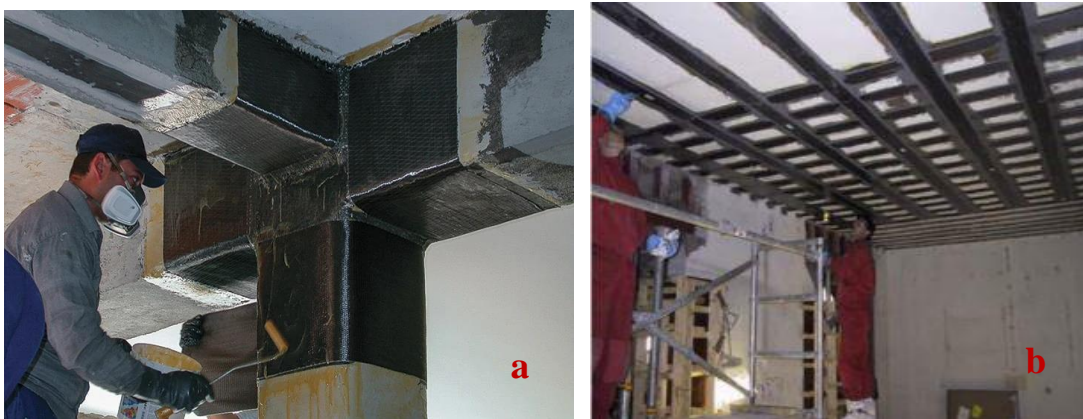


Figure I-10 : Renforcement par composite : a) Renforcement de la jonction poteau-poutre
b) Renforcement d'une dalle [06].

I.3.2. Réhabilitation par composites

Une grande partie des travaux de restauration consiste à réparer les anciennes structures endommagées causées par l'activité sismique et d'autres catastrophes naturelles. Le renforcement structurel est également nécessaire en raison des problèmes de dégradation possibles dus à l'exposition à l'environnement, à une conception inadéquate, à une mauvaise construction et à la nécessité de respecter les exigences de conception actuelles. En conséquence, la réparation et le renforcement structurels ont reçu une attention mondiale au cours des deux dernières décennies (Karbhari et al. 2003). (Figure I-11) [06].



Figure I-11 : Réparation des conduites par matériaux composites [07].

I.3.3. Applications navales

Les composites PRF ont fait leurs preuves dans le domaine de l'eau. Le PRF sous forme de panneaux, de tuyaux et de colonnes trouvera de nombreuses applications dans tous les types de structures navales et d'installations à terre. Par exemple, ces applications peuvent inclure : des ponts entre navires, des défenses, des ponts de porte-avions, des coques, des murs de soutènement, des passerelles, des câbles, des tuyaux, des sous-marins, des gardes du corps, etc. (Figure I-12)[06]

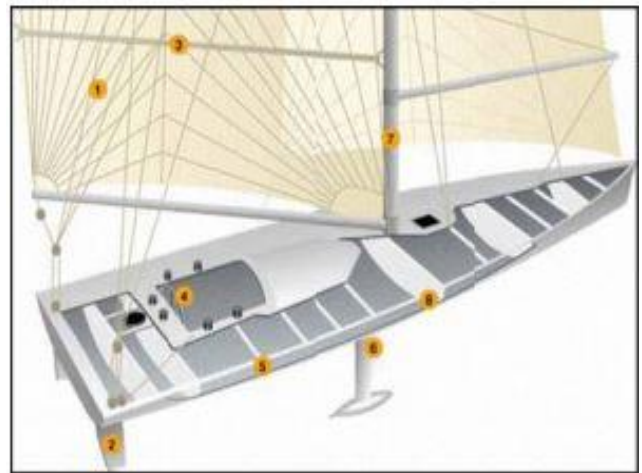


Figure I-12 : Les composites de PRF appliqué au domaine navales [09].

I.3.4. Composites dans les applications aérospatiales

La passion incessante de l'industrie aérospatiale pour l'amélioration des performances des avions commerciaux et militaires continue de stimuler le développement de matériaux structuraux améliorés et performants. Les composites sont une classe de matériaux qui jouent un rôle important dans les composants aérospatiaux actuels et futurs. Les composites sont particulièrement attrayants pour les

applications aéronautiques et aérospatiales en raison de leur excellente résistance, de leur rapport rigidité/densité et de leurs propriétés physiques supérieures. (Figure I-13) [06].

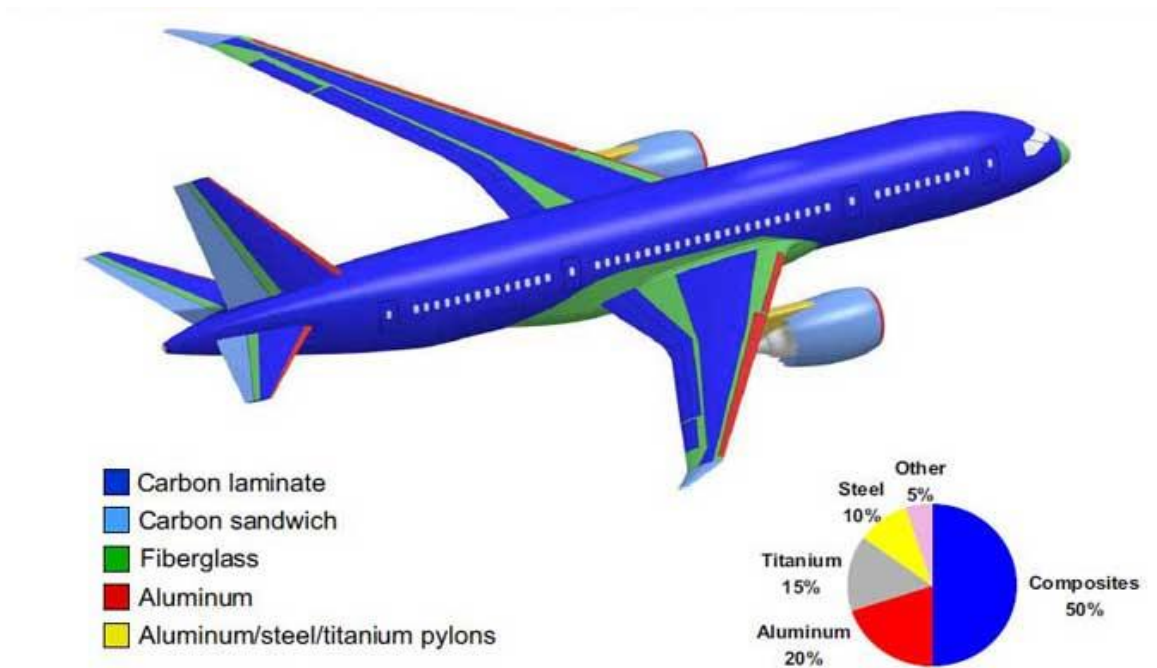


Figure I-13 : Répartition des matériaux dans le Boeing 787. Source : La société Boeing.

I.4. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux qui connaissent un immense succès en matière de leur fabrication et leur utilisation dans divers secteurs industriels. Dans ce chapitre, nous avons donné la description des matériaux constituant des matériaux composites et leurs domaines d'utilisation, et aussi les techniques utilisées pour leur élaboration.

CHAPITRE II

Généralités sur les armatures PRF et leurs utilisations

CHAPITRE II : Généralités sur les armatures PRF et leurs utilisations

II.1. Introduction

L'un des plus grands défis auxquels fait face l'industrie de la construction est le nombre impressionnant de structures qui sont plus ou moins dans un état de détérioration. Dans la plupart des cas, cette détérioration est causée par la corrosion de l'armature ou de l'armature précontrainte utilisée comme armature primaire de ces ouvrages.

Des concentrations excessives de chlorure dans les matériaux de construction, une humidité élevée, des températures élevées, une exposition à la mer, des cycles de gel/dégel, l'utilisation de sels de déglacage et une surcharge mécanique due à l'augmentation des charges de circulation peuvent aggraver la détérioration structurelle [Banendran et al., 2002]. Cette corrosion est un problème majeur, qui raccourcit la durée de vie des ouvrages en béton, augmente les coûts de maintenance et menace la sécurité des ouvrages [El-Hacha et al., 2004].

Les matériaux polymères renforcés de fibres non métalliques (PRF) sont utilisés pour remplacer les armatures en acier dans les structures en béton, en particulier celles exposées à des environnements difficiles et agressifs. Les composites PRF peuvent être produits par différentes méthodes de fabrication. Les produits les plus fabriqués et utilisés en génie civil sont les barres, les câbles précontraints, les treillis 2D et 3D, les tôles, les plaques, les profilés structuraux et les structures tubulaires. La surface de la barre d'armature peut être en spirale, droite, poncée droite, poncée/tressée et déformée. Leur adhérence au béton est comparable, voire supérieure, aux barres d'acier conventionnelles [Banendran et al., 2002].



Figure II-01 : Les différents diamètres pour l'armature PRFV [19].

II.2. Historique de l'acier

II.2.1. Usage de l'acier aux structures

Depuis longtemps l'acier est utilisé comme barre d'armature dans les constructions (bâtiments, ponts et murs soutènement etc), mais actuellement l'agressivité d'environnement qui mener à la dégradation

d'acier et cela coûte très cher. Par exemple en Amérique de nord il y'a beaucoup des ponts il a des défauts au niveaux des structures, Certaines solutions à ces problèmes ont été développées, mais le premier et le dernier objectif reste est la protection des barres d'armature contre la rouille et la corrosion Pour éviter l'effondrement des structures principales [10].

II.2.2. Quel est alternatif au acier

Des études ont été faites sur d'autres types des barres d'armatures, ce qu'on appelle les matériaux composites qui peut être utilisé dans le domaine du génie civil comme alternative au acier. Les polymères renforcés des fibres (PRF) sont utilisés pour la réalisation des différentes constructions, Actuellement, il existe plusieurs nouveaux ponts construits avec des matériaux qui sont meilleurs que l'acier en termes de propriétés mécaniques et physiques, par exemple, ils sont plus légers et plus durables avec le temps. Parmi ces ponts, il y a un pont Taylor (Hutchinson, R., Abdelrahman, A. and Rizkalla, 1998), le pont Joffre ou le pont de Wotton (El-Salakawy, E., Benmokrane, B., and Desgagné, G., 2003), ces ponts reposait en partie sur des armatures en polymère renforcés des fibres [10].

II.3. L'armature en polymère renforcé de fibre PRF

II.3.1. Introduction

Les matériaux composites sont utilisés depuis longtemps dans plusieurs domaines différents, notamment l'aérospatiale, l'aéronautique , le transport maritime et l'automobile (ISIS Manuel No.3, 2007) Quant au domaine du génie civil, il est considéré comme moderne car il n'a été utilisé que dans les vingt ou trente dernières années, et donc on voit que les normes et les codes n'existaient pas depuis longtemps, mais ces normes ont enregistré un grand et rapide développement au cours des dix dernières années (Newman et al., 2007) même si des questions demeurent encore [10].

II.3.2. Les constituants d'armature en PRF

Par définition, un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de nature différente mais complémentaire, créant ainsi un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à ceux de chacun de ces composants [BERTHELOT, 1992]. Les matériaux composites de PRF sont constitués d'un renfort (fibres) protégé et supporté par une résine appelée matrice (figure II-01).

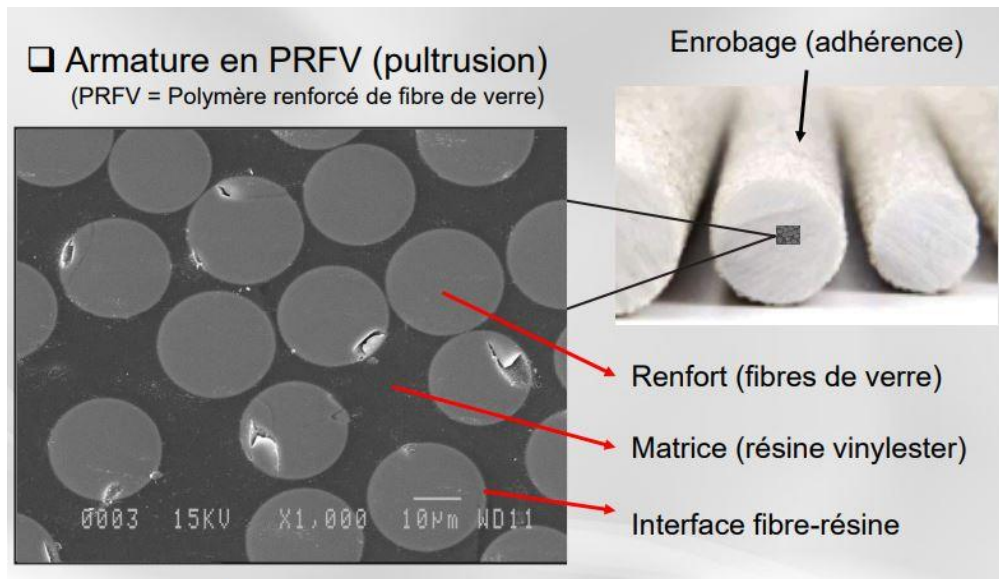


Figure II-02 : Distribution des fibres dans la matrice d'une armature de PRF [20].

A) Les Fibres pour l'armature de PRF

❖ Fibres de verre

Les fibres de verre sont fabriquées par extrusion de verre fondu à travers un orifice. Plusieurs fibres de verre sont disponibles au marché : Type E (électrique), type S (résistance), Type C (chimique), Type AR (résistance aux alcalis). Mais les deux premiers types sont les plus couramment utilisés. Le module d'élasticité des PRF de verre est compris entre 70 et 90 GPa [02].

Les principaux avantages des fibres de verre sont [Benmokrane et al.,1995 ; Hameed et al.,2009; Benmokrane, 2011] :

- ✓ Coût faible (relativement aux autres fibres)
- ✓ Grande résistance en traction (2000 –5000 MPa) et aux produits chimiques
- ✓ Excellente résistance aux impacts.
- ✓ Excellent isolant.
- ✓ Bonne fiabilité
- ✓ Très bonne imprégnation
- ✓ Large gamme de propriétés
- ✓ Déformation ultime : 2,0 –5,6%

❖ Fibres d'aramide

Les fibres d'aramide sont fabriquées à partir des polyamides, qui sont des polymères obtenus par polycondensation. La fibre d'aramide est vulnérable aux attaques de bases, des acides forts

et est-elle susceptible à se dégrader par les rayons ultraviolets (UV). Les principaux avantages des fibres d'aramide sont [Benmokrane, 2011] :

- ✓ Haute résistance spécifique à la traction (2800 –4000 MPa)
- ✓ Faible masse volumique.
- ✓ Excellente résistance à l'impact et au choc.
- ✓ Bonnes résistances aux hydrocarbures, aux solvants et aux lubrifiants
- ✓ Isolant thermique et magnétique
- ✓ Bonne résistance à l'usure
- ✓ Grande rigidité (70 –180 GPa)
- ✓ Bon amortissement des vibrations

❖ **Fibres de basalte**

Les fibres de basalte sont obtenues par procédé d'extrusion dans des filières, à partir de roches volcaniques fondues à des températures de l'ordre de 1450 °C [FIB 07, BAS 06]. Comme le verre, le basalte est constitué majoritairement de silice SiO₂ (environ 60 % en volume), mais comporte des oxydes métalliques différents et une structure plus dense. Les fibres de basalte présentent des propriétés physiques et mécaniques sensiblement supérieures à celles des fibres de verre, tout en restant nettement moins coûteuses que les fibres de carbone ou d'aramide. Avec une température de fusion de l'ordre de 1450 °C, elles sont plus résistantes que les fibres de verre vis-à-vis du feu, et peuvent donc présenter un intérêt dans des applications nécessitant une bonne résistance aux incendies. Bien que résistantes aux environnements chimiques acides, les fibres de basalte restent comme les fibres de verre très sensibles aux alcalins.

❖ **Fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont obtenues à partir des fibres de Polyacrylonitrile (PAN) ou à partir de résidus de raffinerie de charbon ou de pétrole. Les fibres de carbone sont les plus performantes, mais aussi les plus chères.

Les principaux avantages des fibres de carbone sont [Benmokrane, 2011] :

- ✓ Grande résistance en traction (2500 –4000 MPa), en compression et à la fatigue
- ✓ Excellente tenue à haute température
- ✓ Excellente rigidité (module d'élasticité : 230 –760 GPa)
- ✓ Bonne conductivité électrique et thermique
- ✓ Inertie complète à la corrosion et aux produits chimiques
- ✓ Insensibilité à l'humidité et aux rayures

- ✓ Faible coefficient de dilatation thermique
- ✓ Déformation ultime : 0,4 –1,8%

Les fibres de carbone peuvent être classées selon le type de précurseur :

- ✓ Fibres isotropiques (PITCH) caractérisées par un module de Young élevé.
- ✓ Fibres polyacrylonitrile (PAN) caractérisées par une résistance et un coût très élevé.

B) Les matrices pour l'armature en PRF

Les matrices de résine polymère se divisent en deux grandes catégories : les thermodurcissables et les thermoplastiques. Après polymérisation, les résines thermodurcissables subissent des réactions chimiques irréversibles. Cependant, la résine thermoplastique peut être reformée par chauffage autant de fois que nécessaire. Les résines thermodurcissables telles que les esters vinyliques, les polyesters et les époxydes sont les principaux polymères utilisés pour le renforcement intérieur en PRF en raison de leur excellente résistance aux conditions environnementales. Bien que les résines thermoplastiques aient récemment attiré l'attention des professionnels du génie civil en raison de leur résistance à la chaleur et de leur résistance à la flexion dans ce domaine. [Bakis et al.,2002] [11].

Les résines époxy (époxy) ont une résistance élevée au fluage, une forte adhérence des fibres, une résistance chimique élevée, de bonnes propriétés électriques, une température de transition vitreuse élevée et un faible retrait. On peut utiliser les résines époxydes dans tous les processus de fabrication de PRF.

Les résines d'ester vinylique conviennent bien à la fabrication de PRF en raison de leur faible viscosité, de leur résistance aux solvants chlorés et de leurs temps de durcissement courts, mais elles présentent un retrait volumique plus élevé pendant le durcissement que les résines époxy. Elles sont plus chères que les résines polyester. Les polyesters thermodurcissables sont généralement constitués de solutions de polymères d'esters insaturés dans des monomères réticulant tels que le styrène. Selon la combinaison d'ingrédients, les propriétés du polyester peuvent varier considérablement. Les polyesters sont résistants au feu, à l'humidité, aux acides et aux alcalis, mais ils sont dégradés par les solvants chlorés. Les principaux avantages du polyester sont : une faible viscosité, un temps de durcissement rapide, une bonne stabilité dimensionnelle, une excellente résistance chimique et un coût modéré. L'inconvénient des polyesters est leur retrait volumique élevé pendant le traitement.

La combinaison de faible coût (environ 50% de celle des époxydes) avec les excellentes propriétés font des polyesters la résine la plus largement utilisée pour le PRF. [Benmokrane et al. 1995]

Les propriétés des résines thermodurcissables sont les suivantes :

Tableau II-01 : Propriétés des résines thermodurcissables [10].

Résine	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en traction (MPa)	Module en traction (GPa)	Retrait à la cure (%)
Époxy	1,20 –1,30	55,00 –130,00	2,75 –4,10	1,00 –5,00
Polyester	1,10 –1,40	34,50 –103,50	2,10 –3,45	5,00 –12,00
Vinyl Ester	1,12 –1,32	73,00 –81,00	3,00 –3,35	5,40 –10,30

II.3.3. Les additifs

Lors de la fabrication des matériaux composites, divers produits peuvent être incorporés dans les résines pour leur conférer des propriétés mécaniques et physiques spécifiques ou pour réduire leur coût.

Des additifs, parfois dans les dizaines de pour cent (%) du matériau fini, peuvent être utilisés pour modifier les propriétés mécaniques ou physiques d'une résine, telles que son module d'élasticité, sa densité et sa viscoélasticité. Les additifs peuvent également être utilisés pour faire baisser le prix du produit fini. Les additifs (dans certains cas seulement une petite partie du mélange) sont également très importants car ils peuvent modifier la vitesse de polymérisation, empêcher le rétrécissement pendant la polymérisation, améliorer la résistance à l'altération (comme les agents bloquant les UV) ou colorer le produit.

Par exemple, des agents de polymérisation peuvent être utilisés qui peuvent modifier la vitesse de réaction et contrôler le durcissement ou la rigidité de la résine ; des inhibiteurs peuvent retarder les réactions chimiques ; et des agents de couplage améliorent la qualité de l'interface renfort/matrice tout en protégeant la surface de la fibre des facteurs environnementaux [12].

II.3.4. La Procédure de fabrication d'armature en PRF

❖ Introduction

Au cours de la dernière décennie, les renforts en polymère renforcé de fibres sont apparus comme une solution alternative potentielle au problème de la détérioration induite par la corrosion des infrastructures mondiales [ISIS Canada, 2000-2002 ; BEMOKRANE et SALAKAWY, 2002]. Ces renforts ont des propriétés intéressantes, notamment un rapport résistance/poids élevé (50 fois supérieur au béton et 20 fois supérieur à l'acier) ; une durabilité potentiellement élevée, une résistance élevée à la corrosion galvanique, une facilité d'installation sur le terrain et une bonne polyvalence de fabrication. Cette dernière propriété permet de fournir des renforts de géométries différentes, de résistance et de rigidité élevées, et de propriétés durables spécifiques pour chaque type d'application. Les sections suivantes fournissent des détails sur le processus de fabrication des tiges PRF [13].

❖ Fabrication par procédé de pultrusion

Les matériaux de renforcement PRF sont principalement pultrudés. Il s'agit d'un procédé de fabrication en continu, dont le principe est décrit à la figure II-03, et des contours au kilomètre peuvent être obtenus. La mèche de fibres est étirée en continu et passe à travers des modules qui effectuent différentes opérations. Ils sont d'abord imprégnés dans un bain de résine thermo-régulé puis guidés dans un moule de section donnée, qui donne sa forme à un profilé (section circulaire dans le cas des armatures utilisées en construction). Le profilé passe ensuite dans un four où il subit un cycle de cuisson optimisé pour achever la polymérisation de la matrice, avant d'être finalement coupé à la longueur souhaitée en sortie de ligne.

La dernière étape consiste en un traitement de surface de la tige pour optimiser ses propriétés de liaison. Selon les fabricants, ce traitement peut consister en l'application d'un revêtement contenant des grains de sable, ou en la création d'un relief de surface par usinage ou ajout de matière. La géométrie de ces reliefs peut être variée (circulaire, en spirale, etc.). Selon les choix effectués, chaque armature aura donc des propriétés d'adhérence spécifiques dans un environnement bétonné.

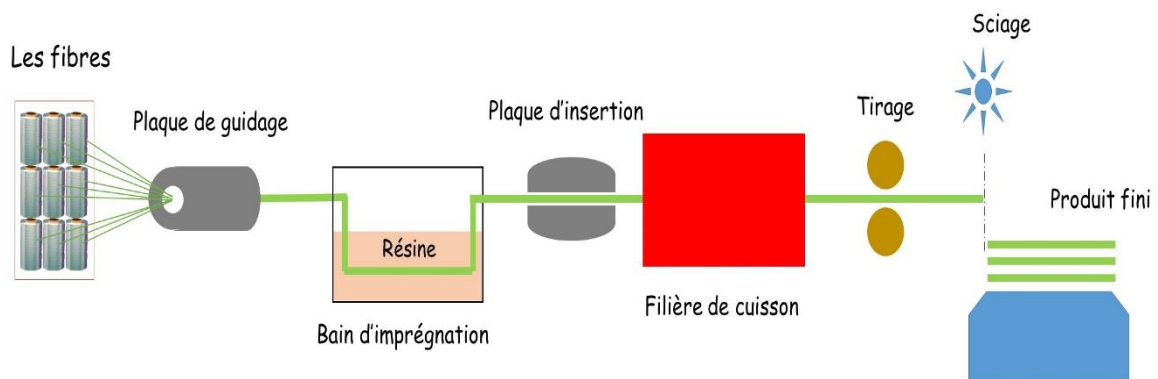


Figure II-03 : Un schéma du procédé de fabrication par pultrusion [20].

En général, les renforts PRF réalisés par pultrusion ont des fibres orientées uni-directionnellement, et des taux de renfort élevés (45% à 70% en volume, soit 60% à 80% qualité). Le procédé se traduit également par une forte compressibilité du matériau, ce qui limite la teneur en défauts (vides, délaminage). Ces éléments permettent d'atteindre des propriétés mécaniques et des niveaux de qualité élevés. Les armatures de PRFV sont généralement produites par une mise en œuvre directe à l'aide d'un moulage par pultrusion.

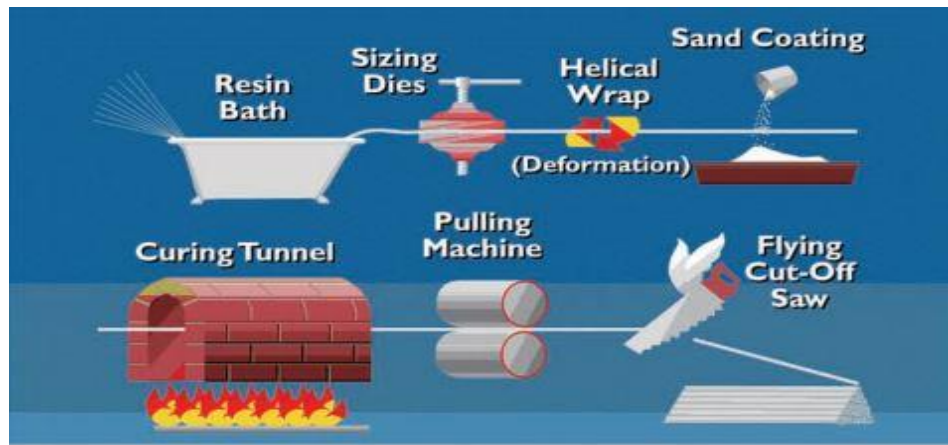


Figure II-04 : Le procédé de fabrication par pultrusion utilisé pour fabrication des armatures PRFV importée de chine [20].

❖ Les différents types armatures de PRF produites par pultrusion

On trouve une vaste gamme de produits pultrudés, Cependant cette étude se limitera uniquement aux barres d'armature de PRFV.



Figure II-05 : Exemples de barres en PRF disponibles sur le marché [15].

Il existe actuellement des réglementations quant à l'usage des produits de PRF dans le génie civil. Les types d'armature de PRF suivants sont acceptés par les guides et les codes élaborés aux États-Unis et au Canada (CSA S806-02; CSA-S6-00 et ISIS CANADA 2001): (1) Verre avec vinylester ; (2) Carbone avec vinylester ; (3) Carbone avec époxy et (4) Aramide avec vinylester. La fraction volumique des fibres varie de 60 à 75 % [Pultrall Inc., 2000]. La figure II-05 au-dessus présente des barres PRF.

II.3.5. Avantages et inconvénients de l'utilisation des PRF par rapport à l'acier

❖ Les avantages des PRF par rapport à l'acier sont [16] :

- Un rapport Résistance/Poids élevé.
- Rigidité importante ;
- Forte résistance à la traction : 1.5-2 fois plus que l'acier ;
- Forte isolation thermique et électrique ;
- Bonne tenue face au milieu agressif ;
- Forte résistance à la corrosion et à la fatigue ;
- Une durée de vie prolongée (jusqu'à 100 ans) ;
- Utilisable comme armature de précontrainte ;
- Toutes sections et longueurs possibles ;
- Peuvent être livrés en rouleau sans nécessiter des efforts pour redressement sur chantier.

❖ Les inconvénients des PRF par rapport à l'acier sont : [16]

- Faible module de déformations (élasticité) ;
- Non soudable (type particulier de liaison entre elles à l'aide de ficelles) ;
- Difficulté de d'exécuter une forme donnée sur chantier ;
- Sensible aux alcalis du béton, à l'eau et aux rayons UV ;
- Pas de plateau plastique (i.e. rupture subite ou fragile) ;
- Impossibilité de fabriquer des éléments de stabilité transversale (cadres, étriers, épingles et autres) sur chantier d'où une préparation préalable de formes quelconques à l'usine.

II.3.6. Caractéristiques des armatures PRF

A) Caractéristiques physiques :

A-1) La Densité :

Dans cette section on discute les caractéristiques physiques des armatures PRF telles que la densité la température de transition vitreuse (T_g) et le coefficient expansion thermique (CET)

La densité des barres d'armature en PRF dépend principalement du pourcentage et du type de fibres utilisées, et sa valeur varie entre 1,25 et 2,10 g/cm³ ce qui est relativement faible par rapport à 7,9

g/cm³ pour l'acier [ACI, 2003]. Le tableau II-02 donne quelques valeurs de densité pour les barres d'armature en PRF par rapport à l'acier pour d'aramide (PRFA), le carbone (PRFC) et le verre (PRFV) [ACI, 2003] [15].

Tableau II-02 : Densités typiques de barres d'armature [14].

Type de barre	Acier	PRFV	PRFC	PRFA
Densité (g/cm ³)	7.9	1.25 à 2.10	1.50 à 1.60	1.25 à 1.40

A-2) La température de transition vitreuse (T_g)

La température de transition vitreuse T_g des FRP est la température à laquelle la résine se ramollit et passe de l'état vitreux à l'état viscoélastique ; sa valeur dépend du type de résine utilisée. Les valeurs de T_g des bandes de FRP varient généralement entre 65 et 150°C. Pour cette température, plusieurs propriétés sont affectées telles que la résistance à la flexion et la résistance à l'adhérence des barres de PRF [ACI, 2003; ISIS CANADA, 2001].

Contrairement aux barres d'acier, les barres d'acier PRF présentent un comportement thermiquement et mécaniquement anisotrope. En raison des différents CET des fibres et des résines, le coefficient de dilatation thermique (CET) des PRF dans le sens transversal est beaucoup plus grand que celui dans le sens longitudinal. Les fibres ont des CET relativement faibles par rapport aux résines.

Le CET des fibres est relativement faible par rapport à celui de la résine. Les fibres de verre, thermiquement isotropes, présentent un CET positif ; cependant les fibres d'aramide et du carbone présentent un CET longitudinal négatif ou nul. Les matrices organiques sont isotropes et présentent un CET relativement élevé (30 à 120x10⁻⁶/°C). Les tableaux II-03 et II-04 montrent quelques valeurs typiques des CET des résines thermodurcissables et de fibres.

Tableau II-03 : Coefficients d'expansion thermique typiques des résines [GAY, 1997; HANCOX, 1994].

Type de résine	Vinylester	Polyester	Epoxyde
CET (x10 ⁻⁶ /C°)	50	80-110	44-120

Tableau II-04 : Coefficients d'expansion thermique typiques des fibres [GAY, 1997; MALLICK, 1993,1988].

Type de fiber	Verre E		Verre R	Aramide Kevlar	Carbone HR		Carbone HM	
Diametre (µm)	10	16	10	12	7		6,5	7
Densite (kg/m ³)	2540	2600	2500	1450	1750	1776	1800	1850
CET longitudinal (x10 ⁻⁶ /C°)	+5		+3	-2	+0,2	-1,6 a -0,1	+0,8	-1,6 a -0,1
CET transversal (x10 ⁻⁶ /C°)	-		-	+59	-	12	-	7 a 12

B) Caractéristiques mécaniques :

Les propriétés mécaniques des PRF dépendent de plusieurs facteurs tels que les proportions relatives des fibres et de la matrice, la dimension des barres, les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs (fibres, matrice et tous les additifs), l'orientation des fibres dans la matrice et la méthode de fabrication employée [Okelo et Yuan, 2005] [17].

Pour des raisons structurelles, la matrice représente typiquement entre 0,25 et 0,5 du poids total et donc la fraction du volume de fibres est de 0,5 à 0,75 [ACI, 2003]. Parce que mesurer expérimentalement chaque barre de PRF serait cher et consommateur de temps, les propriétés du composite peuvent être déterminées par une approche micromécanique à partir des propriétés des constituants [Fib, 2007]. En 1990, [Agarwal et Broutman, 1990] ont développés des modèles analytiques pour déterminer le module d'élasticité longitudinal et la résistance en traction longitudinale des barres PRF :

$$E_L = E_{fL} V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$f_{Lt} = f_{ft} \left[V_f + \frac{E_m}{E_{fL}} (1 - V_f) \right]$$

Où E_L est le module d'élasticité longitudinal des barres PRF, f_{Lt} la résistance en traction longitudinale des barres PRF, E_{fL} est le module d'élasticité des fibres dans la direction longitudinale, E_m est le module d'élasticité de la matrice, f_{ft} est la résistance en traction des fibres dans la direction longitudinale et V_f le volume relatif de fibres.

Tableau II-05 : Propriétés mécaniques en traction types des barres d'armature en PRF [ACI, 2003].

Type de barre	Acier	PRFV	PRFC	PRFA
Résistance ultime (MPa)	483 - 690	483 - 1600	600 - 3690	1720-2540
Module d'élasticité (GPa)	200	35-51	120 -580	41 -125
Déformation a la rupture (%)	6-12	1,2-3,1	0,5-1,7	1,9-4,4

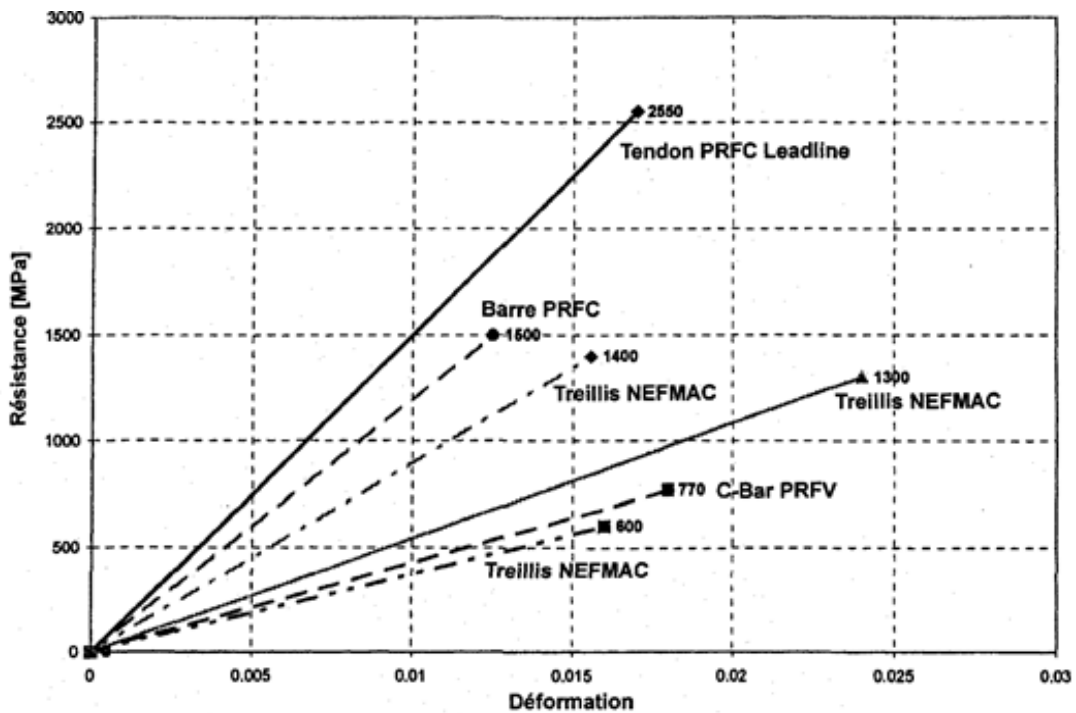


Figure II-06 : Comportement mécanique des armatures en PRF [ISIS CANADA, 2001].

II.3.7. Normes et recommandations existantes

Il existe aujourd'hui plusieurs textes réglementaires consacrés aux armatures PRF, notamment aux Usa, au Canada, en Europe, en Russie et au Japon, et de nombreux ouvrages en béton armé par barres en PRF ont d'ailleurs été construits dans ces pays comme susmentionnés. [16]

a) USA

- ACI 440.1R-06 : “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars” ;
- ACI 440.5-08 (2008) “Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bar” ACI Committee 440, American Concrete Institute [16].

b) CANADA

- CAN/CSA-S6-06 (2006) Fiber Reinforced Structures, “Canadian Highway Bridge Design Code” Canadian Standards Association ;

- CAN/CSA-S806-02 (R2007) “Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers” [16].

c) EUROPE

- La Fédération Internationale du Béton (fib) 2000-2007 « Rapport technique sur les propriétés d’adhérence des armatures de renfort du béton (fib Bulletin n° 10) » ;
- National Research Council (CNR), 2006, « Guide de dimensionnement de structures en béton renforcées par armatures en PRF (CNR DT 203/2006) » [16].

d) RUSSIE

- TP013-1-04 (2004) « Recommandations techniques pour l’utilisation des armatures non métalliques de profilés périodiques dans les structures en béton » ;
- GOCT31938-2012 (2012) « Armatures composites polymères pour les structures en béton armé ; Standard organisationnel de l’union national de constructeur. (2013). L’utilisation des armatures non métallique dans les structures en béton et géotechniques. NIC « TUNNELS ET METRO » [16].

II.3.8. Utilisation des armatures PRF dans le domaine génie civil

Ces matériaux sont légers, facile à manipuler et à installer. Enfin, ils sont électro-magnétiquement inertes. Par ces avantages, les PRF sont bien souvent les uniques solutions pour le renforcement de structures dans certaines conditions qui sont explicitées ci-dessous.

❖ Béton armé exposé aux chlorures de dégivrage :

Tabliers de pont et garde-corps • Barrières médianes • Routes et dalles au niveau du sol • Installations de stockage de sel • Pavage en béton armé continu • Éléments préfabriqués - couvercles de regard, ponceaux • Passages à niveau ferroviaire • Bordures • Structures de stationnement • Murs de soutènement et fondations. (Figure II-07, 08 et 09) [19].



Figure II-07 : Dalles de terrasse préfabriquées [18].



Figure II-08 : Dalles de tablier de pont [18].



Figure II-09 : Les treillis PRF peuvent être utilisés comme renforcement secondaire dans les dalles sur sol [18].

❖ **Hautes tensions et champs électromagnétiques :**

Voies ferrées légères et lourdes • Zones d'IRM des hôpitaux • Sous-stations à haute tension • Conduits de câbles et Banques • Fonderies d'aluminium et aciéries • Zones sensibles aux radiofréquences • Haute vitesse Zones de péage autoroutier [19].

❖ **Applications soumises à d'autres agents corrosifs :**

Stations de traitement des eaux usées • Éléments architecturaux en béton • Préservation historique • Usines pétrochimiques • Usines de pâte à papier/papier • Tours de refroidissement • Centrales nucléaires et décharges • Usines chimiques • Usines de gaz liquide • Pipelines/réservoirs pour combustibles fossiles. (Figure II-10) [19].

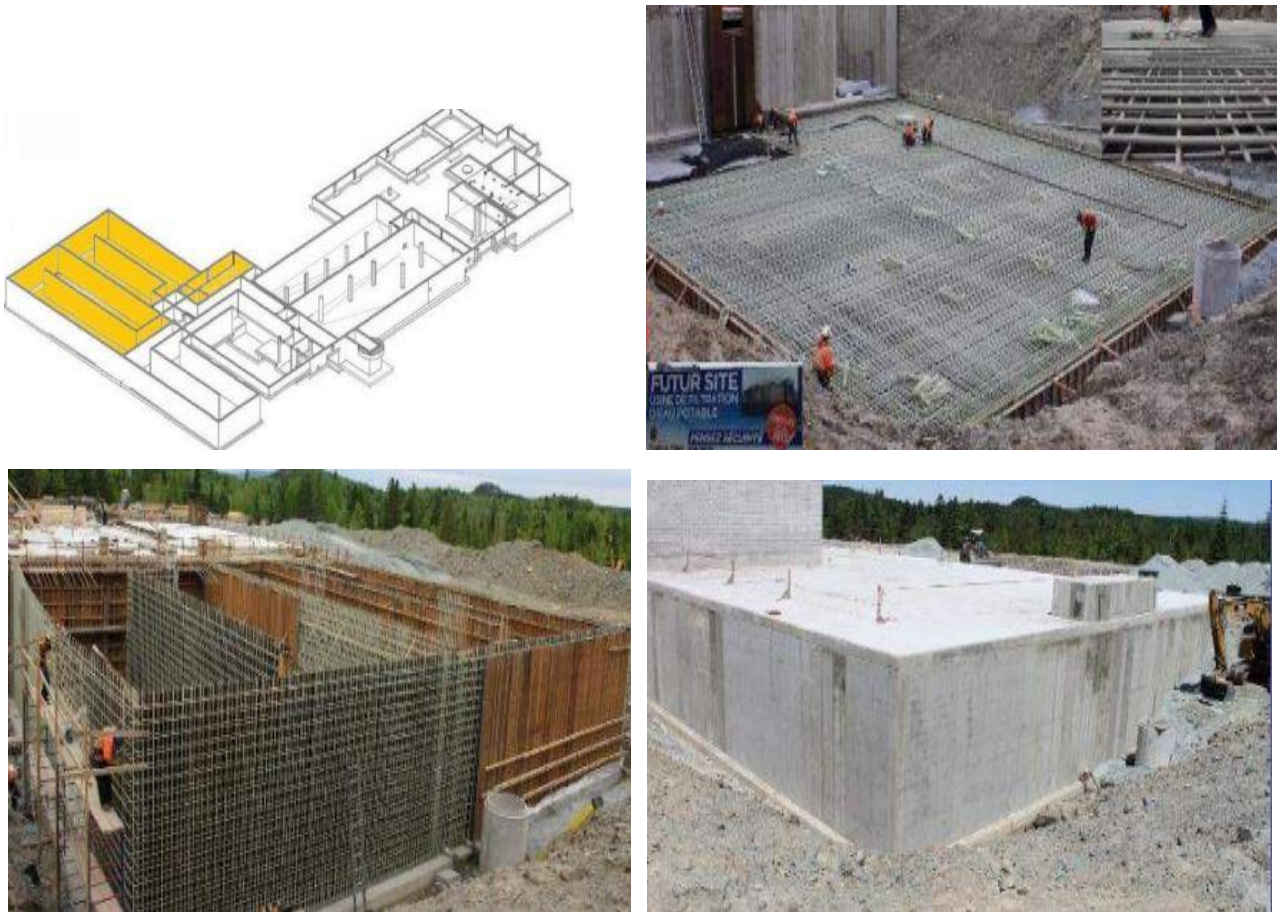


Figure II-10 : Station de traitement de l'eau [18].

❖ Structures sensibles au poids :

Construction en béton dans des zones où les sols sont peu porteurs • des emplacements géographiques éloignés • des zones environnementales sensibles ou des sites sismiques actifs posant des problèmes particuliers que l'utilisation d'armatures légères résoudra. (Figure II-11 et 12). [19]



Figure II-11 : L'armature PRF d'un Tunnel en PRF [18].



Figure II-12 : Poser l'armature PRF d'un Tunnel [18].

❖ Structures construites dans ou à proximité de l'eau de mer :

Digues • Quais, Quais et Cales Sèches • Structures Flottantes • Jetées • Canaux • Barrages • Plates-formes • Aquariums • Routes et bâtiments • Tabliers portuaires • Construction côtière exposée au brouillard salin • Murs de barrage • Prises de dessalement. (Figure II-13, 14 et 15). [19]



Figure II-13 : Murs de barrière de pont [18].



Figure II-14 : Parking de stationnement [18].



Figure II-15 : Chaussées en béton [18].

❖ **Applications thermiquement sensibles :**

Terrasses de patio d'appartement • logements et sous-sols en béton isolés thermiquement, y compris ICF construction • planchers chauffés thermiquement et salles de conditionnement [19].

❖ **Applications nécessitant une faible conductivité électrique ou une neutralité électromagnétique :**

Fonderies d'aluminium et de cuivre • trous d'homme pour équipements de communication électriques et téléphoniques • bases pour pylônes de transmission/télécommunication • aéroport tours de contrôle • imagerie par résonance magnétique dans les hôpitaux • réseaux de détection des routes à péage et cabines de collecte • sites de passage à niveau et structures militaires spécialisées [19].

❖ **Renforcement de maçonnerie :**

Renforcement en flexion et en cisaillement de la maçonnerie existante non armée pour les événements sismiques, de vent ou de souffle • Réhabiliter la maçonnerie existante avec des fissures de marche et d'autres problèmes de joints d'assise. (Figure II-16) [19].



Figure II-16 : Treillis de renfort en PRF de maçonneries [19].

❖ Durabilité à long terme requise :

Réservoirs, Tunnels, Infrastructures, Installations industrielles

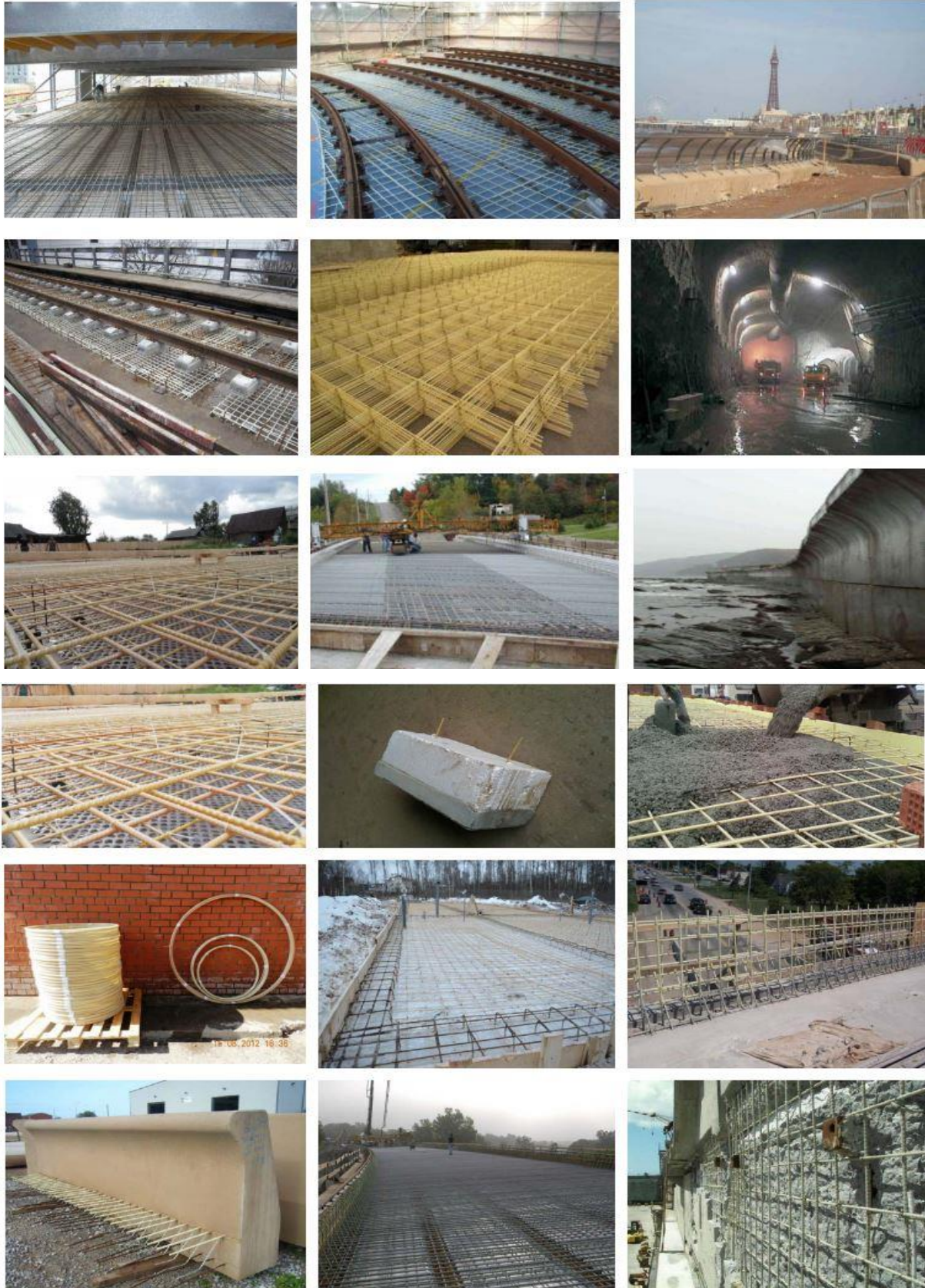


Figure II-17 : les différentes utilisations des armatures en PRF [19].

II.4 Conclusion

Cette revue bibliographique nous a permis dans un premier temps déterminer les compositions des armature PRF représenté dans la matrice et la fibre, d'établir un inventaire des différents types d'armatures en PRF existant sur le marché, de dresser un état de l'art sur leurs principales propriétés (physiques, mécaniques, et d'interface), et d'identifier les principaux outils permettant la caractérisation de ces différentes propriétés. Nous avons également parlé des différents domaines dans lesquels cette armature en PRF est utilisée comme Tabliers de pont et garde-corps, Murs de soutènement et fondations, Zones d'IRM des hôpitaux, Stations de traitement des eaux usées, construction côtière exposée au brouillard salin, réservoirs, tunnels, infrastructures et installations industrielles.

CHAPITRE III

Matériaux et procédure expérimentales

CHAPITRE III : Matériaux et procédures expérimentales

Le béton est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction et du bâtiment, malgré sa complexité. Il contient habituellement un mélange de ciment, d'eau et des granulats, mais il est considéré comme homogène. Non seulement, il peut être moulé dans les formes les plus diverses (coupole, voûte et des éléments avec des formes compliquées), mais aussi une excellente résistance à la compression et une grande rigidité.

III.1. Le Béton

III.1.1 Introduction

Cette partie s'intéresse plus à l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés dans la composition de béton.

Les matériaux utilisés sont :

- ✓ Le sable fin de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR).
- ✓ Le sable concassé de carrière (BIR HADDADA-SETIF).
- ✓ Le gravier de carrière (BIR HADDADA-SETIF).
- ✓ Le ciment GICA BETON, produit par Groupe Industriel des Ciments d'Algérie.
- ✓ Adjuvants super plastifiant Sikaplast, BV 40.
- ✓ L'eau potable de Laboratoire de pôle universitaire de M'sila.

III.1.2. Matériaux

III.1.2.1. Caractéristiques des matériaux de béton

A) Ciment :

Le ciment utilisé dans notre travail pour la composition de béton est un ciment composé de type CEM II/A-L 42,5 R NA 442 de classe de résistance 42.5. Est un Ciment Portland au Calcaire (CPC), certifié selon exigences et les normes en vigueur. Il est conforme à la norme, produit par la cimenterie de **Groupe Industriel des Ciments d'Algérie GICA [21]**.

Domaine d'emploi

Le ciment CEM II/A-L 42.5 N de GICA est adapté pour les usages suivants :

- ✓ Travaux de fondation, souterrains, d'assainissement.
- ✓ Génie civil (ouvrage et routes).
- ✓ Les bétons armés et non armés, préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvés.
- ✓ Travaux de construction (logements, locaux commerciaux et industriels).
- ✓ Produits dérivés du ciment. [21].



Figure III-01 : Un sac de ciment CEM II/A-L 42,5 R NA 442. [21]

COMPOSITION		
Clinker	Ajout calcaire	Constituant secondaire
(80 à 94) %	Catégorie A (06 à 20) %	(De 0 à 5) %
CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES		
	Temps de prise	Stabilité
Valeur	≥ 60 minutes	≤ 10 minutes
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES		
	Résistance à la compression à 02 J	Résistance à la compression à 28 J
42.5 N	≥ 10.0 N/mm	≤ 42.5(N/mm)
42.5 R	≥ 20.0 N/mm	≤ 42.5(N/mm)
CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES		
	Teneur en sulfates (SO3)	Teneur en chlorures (Cl)
	≤ 4.0%	≤ 0.10%
PACKAGING		
Sacs 50kg / Disponible en Vrac		

Figure III-02 : Caractéristiques physiques, mécanique et chimiques de ciment GICA. [21]

B) Sable

On a utilisé deux types de sable dans cette étude :

- **Sable de dune** (roulé) provenant de L'oued MAITAR (BOUSAADA)
- **Sable concassé** (issu d'une carrière de BIR HADDADA-SETIF).

On a étudié un seul type de mélange est (50/50) c'est-à-dire 50% de sable avec 50% de sable concassé, ce dernier tamiser par un tamis de 0.630mm pour éviter la poudre de sable concassé.



Figure III-03 : Sable utilisés : Sable dune et sable concassé.

Masse volumique apparente et absolu de mélange de sable :

Masse volumique (apparente) : (NF EN 1097 -6 (2001))

- ✓ Tamiser le sable dans le tamis de 3.5mm.
- ✓ Peser le récipient de (V=0.9L) de volume vide soit M_1 .
- ✓ Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15cm.
- ✓ Araser la couche supérieure du récipient à l'aide d'une règle que l'on anime d'un mouvement de « va et vient »,
- ✓ Peser le récipient plein : soit M_2 (g) sa masse.

La masse volumique apparente est donnée par la relation :

$$\rho \text{ (kg/L)} = (M_2 - M_1)/V$$

V : Volume du récipient. M_1 : Le poids du récipient à l'état vide.

M_2 : Le poids du récipient plein de sable.

Tableau III-01 : La masse volumique apparente du sable mélange (dune + concassé).

matériaux	Sable mélange (50%/50%) V=0.9L		
M_1	0.117	0.117	0.117
M_2	1.543	1.570	1.589
M_2-M_1	1.426	1.453	1.472
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1584.4	1614.4	1635.6
Moyenne	1611.5		

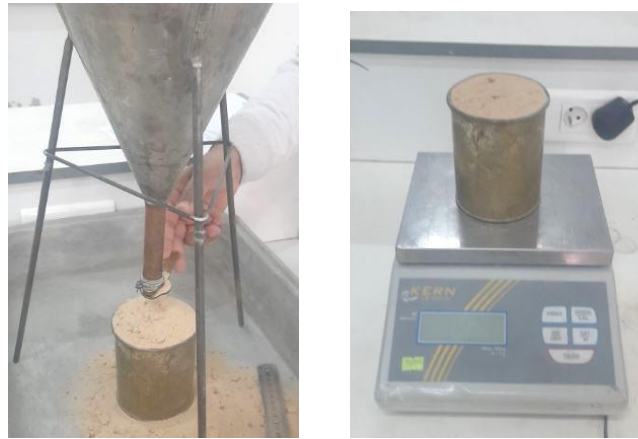


Figure III-04 : L'essai de masse volumique apparent.

Masse volumique Absolue (NF EN 1097 - 6 (2001)) :

- ✓ Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- ✓ Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- ✓ Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .
- ✓ La masse volumique est donnée par la relation : $\rho = M/(V_2-V_1)$.

Tableau III-02 : La masse volumique absolue du sable mélange (dune+concassé).

matériaux	Sable mélange (50%/50%) (M = 0.300kg)		
V_1 (L)	0.300	0.300	0.300
V_2 (L)	0.425	0.420	0.420
V_2-V_1 (L)	0.125	0.120	0.120
ρ (kg/m ³)	2400	2500	2500
Moyenne	2466.7		

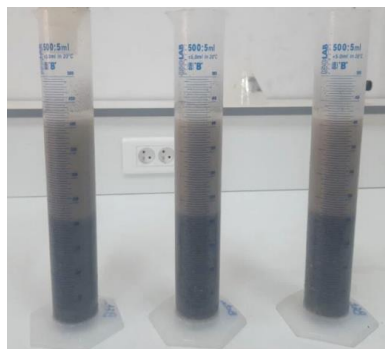


Figure III-05 : L'essai de la masse volumique absolue.

Analyse granulométrie

L'analyse granulométrique par tamisage (Norme NFP 94-056), permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle

s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers (dimension nominale inférieure ou égale à 0.080 mm). L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et l'opération de tamisage des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis par l'intermédiaire d'une tamiseuse électrique. Dans notre étude, nous avons utilisé les tamis de modules 20 (0.080 mm), 23 (0.160 mm), 26 (0.315 mm), 39 (0.630 mm), 32 (1.25 mm), 35 (2.50 mm) et 38 (5 mm), la pesé initial est **2 Kg**.

Les résultats des analyses granulométriques sont représentés sur le (Tableau III-03), le courbe granulométrique est représenté en (Figure III-06)

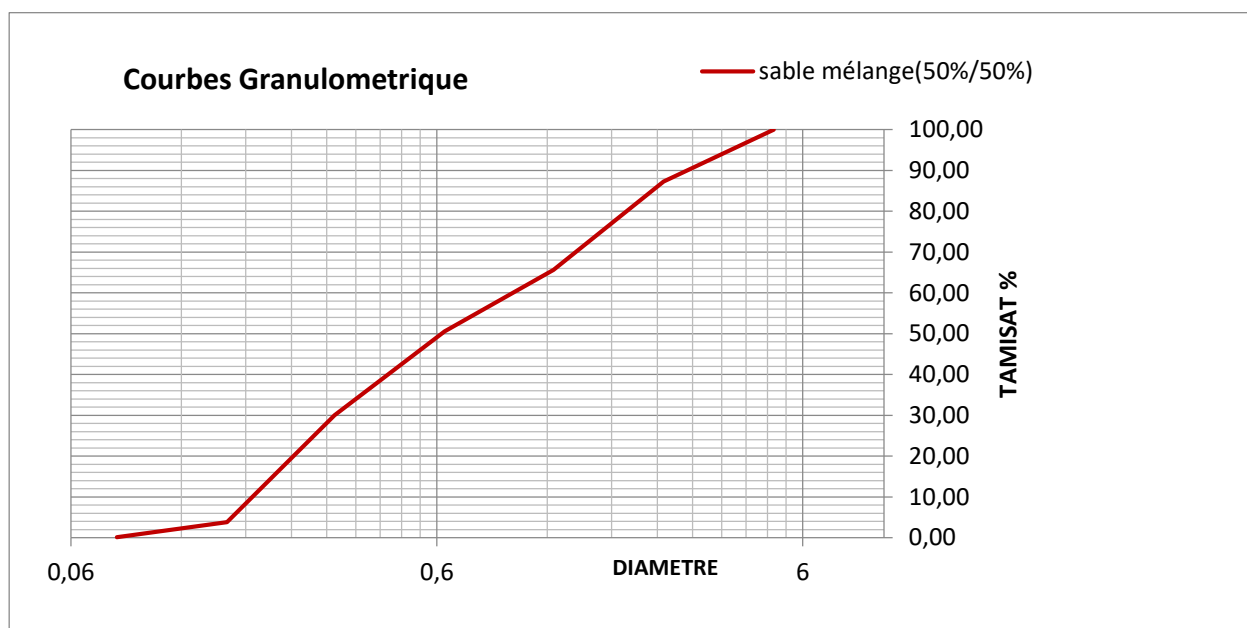


Figure III-06 : Le courbe granulométrique du sable mélange (dune+concassé).

Tableau III-03 : Les résultats des analyses granulométriques du sable mélange (dune+concassé).

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide (g)	Poids des tamis+sable	Refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
5	857	858	01	01	0.05	99.95
2.5	753	1006	253	254	12.70	87.30
1.25	653	1087	434	688	34.40	65.60
0.63	622	922	300	988	49.40	50.60
0.315	560	972	412	1400	70	30.00
0.160	518	1043	524	1924	96.20	3.80
0.08	507	581	74	1998	99.90	0.10
Fond	564	567	01	1999	99.95	0.05

Equivalente de sable : NF P 18-598

La propreté d'un sable peut être appréciée par l'intermédiaire d'un essai appelé « équivalent de sable ». Cet essai consiste à donner une indication sur l'importance des impuretés (argile, poussière, matière organique, etc.) contenues dans les sables. Ces impuretés influent négativement sur l'adhérence entre les grains de sable et le ciment, ce qui conduit à chuter la résistance mécanique des bétons et des mortiers.

Selon la méthode de mesure, l'équivalent de sable est désigné par ESV pour l'équivalent de sable à vue et par ESP pour l'équivalent de sable au piston.

$$E.S.V = (H_2 / H_1) \times 100 \%$$

H₂ : hauteur de sable propre déterminée visuellement

$$E.S.P = (H'_2 / H_1) \times 100 \%$$

H'₂ : hauteur de sable propre déterminée au Piston.

H₁ : hauteur de sable propre + hauteur imputées.

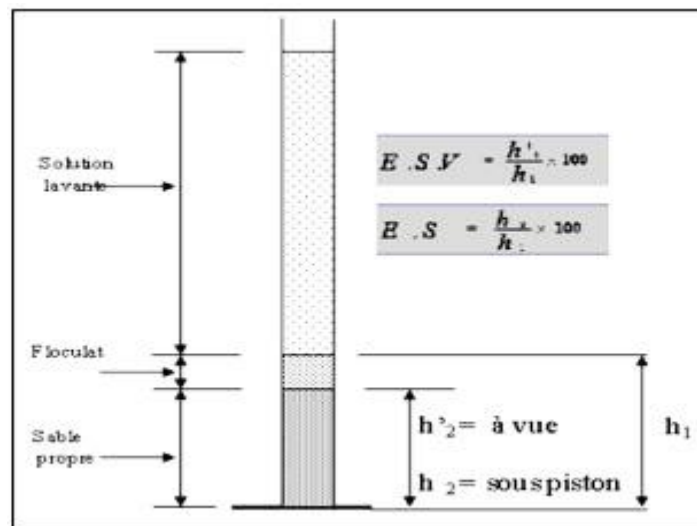


Figure III-07 : Le principe de l'essai équivalent de sable ESV et ESP.

Tableau III-04 : Les résultats équivalent de sable ESV et ESP du sable mélange

	H ₁	H ₂	H' ₂	Esv (%)	Esp (%)
Essai 1	11.7	8.9	8.4	76.07	71.80
Essai 2	12.1	8.7	8.2	71.90	67.76
Essai 3	11.6	8.6	8.3	74.14	71.55
Moyenne Esv et Esp				74.03	70.37

C) Gravier

Dans cette étude nous avons utilisé deux type de gravier G(3/8) et G(8/16), provenant de BIR HADDADA-SETIF

Masse volumique apparente de gravier

Masse volumique apparent

C'est le même mode opératoire que la masse volumique apparent de sable, mais la seule différence est utiliser un récipient de 7L pour le gravier.

Les résultats de masse volumique apparente de gravier G(3/8) et G(8/16) sont représentés sur le (Tableau III-05).

Tableau III-05 : Les résultats de masse volumique apparente de G(3/8) et G(8/16).

matériaux	Gravier 3/8 V = 7 L			Gravier 8/16 V = 7 L		
	M ₁	M ₂	M ₂ -M ₁	ρ (kg/m ³)	Moyenne	
M ₁	0	0	0	0	0	0
M ₂	10.121	10.103	10.113	14.462	14.359	14.494
M ₂ -M ₁	10.121	10.103	10.113	14.462	14.359	14.494
ρ (kg/m ³)	1445.9	1443.3	1444.7	1446.2	1435.9	1449.4
Moyenne	1444.63			1443.8		



Figure III-08 : L'essai de masse volumique apparente de gravier.

Analyse granulométrie NF P 18-560

Permet de distinguer les granulats suivant des classes granulaires qui sont commercialisées par les fabricants. L'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité, car la résistance et l'ouvrabilité du béton dépendent essentiellement du granulat. Par ailleurs, la dimension D du granulat se trouve limitée par différentes considérations concernant l'ouvrage à bétonner : épaisseur de la pièce, espacement des armatures, densité du ferrailage, complexité du coffrage, risque de ségrégation etc.

L'analyse granulométrie de gravier G(3/8) et G(8/16) est le même protocole que l'analyse granulométrie de sable, les résultats des analyses granulométriques de gravier G(3/8) et G(8/16) sont représentés sur le (Tableau III-06 et 07), ainsi le courbe granulométrique est représenté en (Figure III-09).

Tableau III-06 : Les résultats des analyses granulométriques de gravier G(3/8).

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide(g)	Poids des tamis+gravier	Refus du gravier	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
8	651	667	16	16	0.80	99.20
6.3	637	1060	423	439	21.95	78.05
5	623	1285	662	1101	55.05	44.95
4	603	1123	520	1621	81.05	18.95
3.15	611	927	316	1937	96.85	3.15
Fond	451	510	59	1996	99.80	0.20

Tableau III-07 : Les résultats des analyses granulométriques de gravier G(8/16).

Tamis (mm)	Poids des Tamis vide (g)	Poids des tamis+G	Refus du sable	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât cumulés %
16	936	1089	153	153	5.10	94.90
12.5	891	1743	852	1005	33.50	66.50
10	956	1919	963	1968	65.60	34.40
8	824	1525	701	2669	88.97	11.03
Fond	563	894	331	3000	100	0

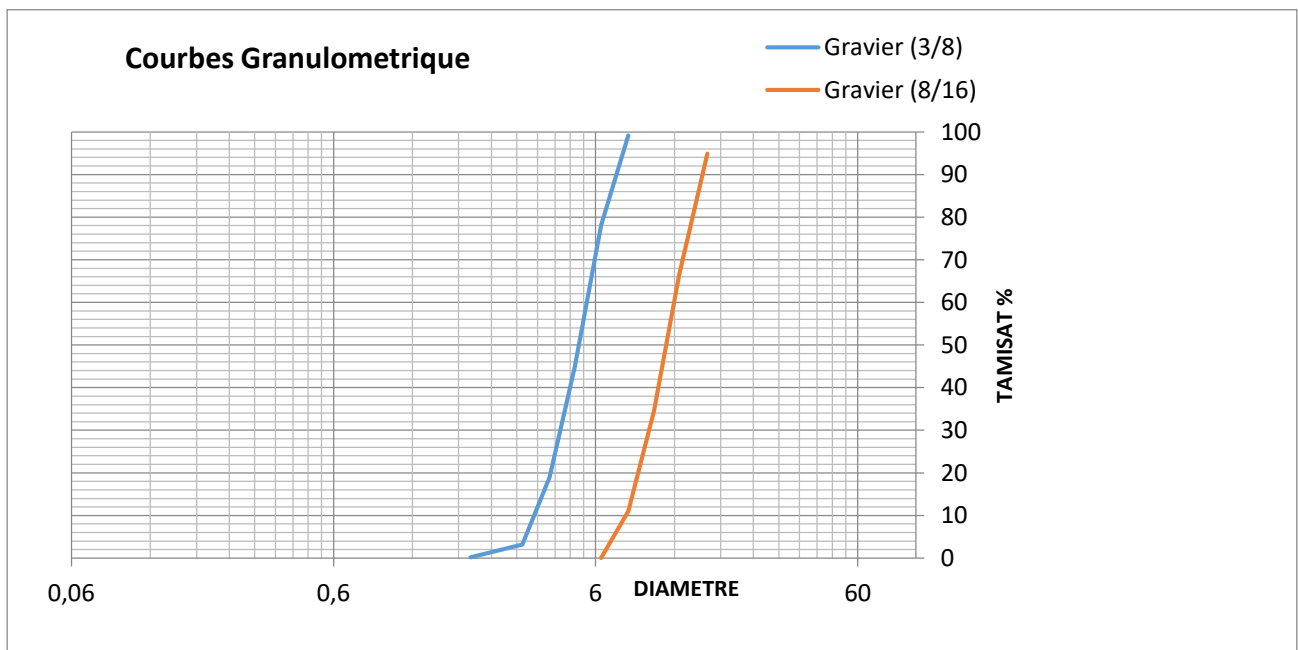


Figure III-09 : Le courbe granulométrique de G(3/8) et G(8/16).

III.1.2.2. Formulation et composition de béton

A) Formulation de béton ordinaire :

L'objectif de ce travail est formuler un béton ordinaire avec un dosage 350kg/m³, en utilisant les constituants suivant : deux types de sable (dune et concassé) et fait le mélanger les deux (50%/50%), deux types de gravier (G3/8 et G8/16), le ciment CEM II/A-L 42,5 R et l'adjuvant super plastifiant Sikaplast BV40. Nous avons réalisé plusieurs formulations de béton avec le même dosage de ciment, gravier et mélange de sable mais nous avons changé dans le pourcentage d'adjuvant (0%, 0.5%, 1%, 1.5% et 2%). Les compositions des bétons ordinaires sont obtenues suivant la méthode de formulation de Dreux-Grorisse [Dreux, 2002].

Les différentes formulations qui nous avons fait avec les quantités des constituants en kg/m³ sont résumés dans le tableau III-08 :

Tableau III-08 : Les différentes formulations avec des pourcentages différents en adjuvant.

compositions	B01	B02	B03	B04	B05
Ciment	350 kg	350 kg	350 kg	350 kg	350 kg
Gravier (3/8)	185 kg	185 kg	185 kg	185 kg	185 kg
Gravier (8/16)	832.5 kg	832.5 kg	832.5 kg	832.5 kg	832.5 kg
Mélange de Sable (dune+concassé) (50%/50%)	832.5 kg	832.5 kg	832.5 kg	832.5 kg	832.5 kg
Eau	181 L	160 L	142 L	134 L	125 L
Adjuvant super plastifiant Sikaplast, BV 40 (% de ciment)	0 % 0 kg	0.5% 1.75 kg	1% 3.5 kg	1.5% 5.25 kg	2% 7 kg
E/C	0.52	0.46	0.41	0.39	0.36

B) Procédure de fabrication des bétons :

De nombreux coulages étant prévus pendant cette étude, il a été très important de s'assurer de la reproductibilité des gâchages pour mettre en place des échantillons à différentes pourcentages d'adjuvants. Le protocole des étapes de fabrication de béton est le suivant :

- ✓ Les granulats (sable dune et concassé, G3/8, G8/16) avec le ciment sont mélangés à sec pendant une minute.
- ✓ L'eau de gâchage est ajoutée à un tiers du volume de super plastifiant et de malaxage se poursuit pendant 2,5 mn.

Les échantillons de béton sont conservés dans leur moule dans un endroit humide (20° C) pendant 24 heures, ensuite immergés dans bassin d'eau jusqu'à jour de l'essai.

C) Essais à l'état frais

Le protocole expérimental de début de prise et fin de prise est compatible avec les recommandations de la norme européenne NF EN (196-3) et NF EN (197-1) [NF EN – (196-3) EN 196-3, 2002], [NF EN (197-1) EN 197-1, 2002]. Pour tout le béton fait, la maniabilité a été mesurée par le test cône d'affaissement Abrams selon NF EN 12350-2 [NF EN 12350-2 EN 12350-2,2009] [22].

✚ Essai d'affaissement

Cet essai appelé aussi cône d'Abrams ou bien *slump-test* est décrit dans la norme NF EN 12350-2. Il est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration.

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids, plus que l'affaissement sera plus grand plus que le béton sera très fluide.

Mode opératoire :

- ✓ Placer le moule avec l'entonnoir sur un support rigide et horizontal, mais non absorbant.
- ✓ A l'aide d'une truelle (Main écope) remplir le moule de béton frais, en trois couches d'à peu près même hauteur, éviter le déplacement du moule en pesant sur les pattes de calage.
- ✓ Compacter chaque couche par 25 coups de barre.
- ✓ Retirer le moule verticalement avec précaution en 3 à 5 secondes.
- ✓ Mesurer l'affaissement du cône par rapport à la hauteur initiale (moule).

Classe d'affaissement : La norme NF EN 206-1 définit 4 classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré. Elles sont indiquées sur la figure ci-dessous.

Tableau III-09 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.

Classe de consistance	Affaissement en mm
S1 (ferme)	10 - 40
S2 (plastique)	50 - 90
S3 (très plastique)	100- 150
S4 (fluide)	160 - 210
S5 (très fluide)	> 220

D) Essais à l'état durcis

✚ Essai de compression sur une éprouvette de béton (Norme NF EN 12390-3)

Le test d'écrasement en compression est le principal essai réalisé sur les éprouvettes afin de valider la conformité de la classe de résistance du béton. Il consiste à comprimer l'éprouvette avec une force croissante jusqu'à l'apparition de fissures afin de déterminer sa résistance à la compression et donc si le matériau béton est capable de résister à la charge prévue. On utilise des machines à compression ou presses à éprouvettes pour réaliser ce test. La pression exercée par la machine au moment de la fissuration correspond à la résistance du béton au moment du test. Ainsi, dans cette étude nous avons utilisés des moules cubiques (15x15x15) cm³, et réalisés ce test a 07 jours après la mise en œuvre du béton au niveau de laboratoire, Ensuite, nous avons enregistré les valeurs de pression obtenue en MPa.



Figure III-10 : L'essai de compression pour une éprouvette cubique (15x15x15).

✚ Essai de flexion sur une éprouvette de béton (Norme NF EN 12390-5)

Ce test sert à connaître la résistance à la flexion du béton. On va soumettre des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ à une flexion en appliquant une charge. La charge maximale infligée avant la rupture du béton permet de calculer la résistance à la flexion du béton.

Il existe plusieurs variantes de l'essai de flexion, mais la plus courante est : L'essai de flexion 3 points : l'éprouvette prismatique de béton est placée sur deux appuis et une force graduelle est appliquée au centre de l'éprouvette jusqu'à sa scission. La partie supérieure de l'éprouvette béton subit une compression et la partie inférieure une traction.

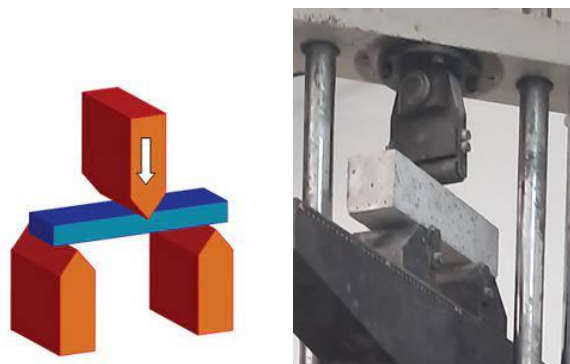


Figure III-11 : L'essai de flexion trois points pour éprouvette prismatique (7x7x28).

III.2. Armatures en PRFV

Dans cette partie au troisième chapitre, nous expliquerons les méthodes et les normes de certaines propriétés physiques représentées dans (rapport d'absorption et le pourcentage des composants) ainsi que certaines propriétés mécaniques, notamment (la résistance à la traction et le contrainte d'adhérence) pour l'armature Polymère Renforcé au Fibre de Verre PRFV, que nous traiterons dans notre étude.

III.2.1. Les caractéristiques d'armature en PRFV

III.2.1.1. Les caractéristiques physiques :

A) Essai d'absorption :

Cette méthode d'essai couvre la détermination du taux relatif d'absorption d'eau par les plastiques lorsqu'ils sont immergés. Cette méthode d'essai est destinée à s'appliquer à l'essai de tous les types de plastiques, y compris les produits résineux coulés, moulés à chaud et moulés à froid, ainsi que les plastiques homogènes et stratifiés sous forme de tiges et de tubes et en feuilles de 0,13 mm ou plus épais. Selon la norme ASTM D 570-98, Cette méthode d'essai d'absorption d'eau a deux fonctions principales : premièrement, en tant que guide de la proportion d'eau absorbée par un matériau et, par conséquent, en tant que mesure de l'exposition à l'eau ou à l'humidité dans le contexte de la détermination de la relation entre l'humidité et les effets électriques ou mécaniques. Propriétés, dimensions ou conseils d'apparence sur l'effet de ces propriétés ; deuxièmement, comme test de contrôle pour l'uniformité du produit.

La teneur en humidité des plastiques est étroitement liée à des propriétés telles que la résistance d'isolation électrique, la perte diélectrique, la résistance mécanique, l'apparence et la taille. L'effet des changements de teneur en humidité dus à l'absorption d'eau sur ces propriétés dépend fortement du type d'exposition (soit par immersion dans l'eau, soit par exposition à une humidité élevée), de la forme de la pièce et des propriétés inhérentes au plastique. Pour les matériaux non homogènes, tels que les formes stratifiées, le taux d'absorption d'eau de chaque bord et surface peut varier considérablement. Même avec d'autres matériaux homogènes, la température de l'arête de coupe peut être légèrement supérieure à la surface de moulage. Par conséquent, les tentatives de corrélation entre l'absorption d'eau et les surfaces doivent généralement être limitées à des matériaux étroitement liés et à des échantillons de forme similaire : pour les matériaux de densités très variables, il peut être nécessaire de prendre en compte la relation entre l'absorption d'eau volumétrique et gravimétrique. [25]

✚ **Appareillage**

Balance : on prend Une balance analytique capable de lire 0,0001 g.

Four : capable de maintenir des températures uniformes de $50 \pm 3^\circ\text{C}$ et de 105 à 110°C .



Figure III-12 : Appareillage de l'essai d'absorption : A) la Balance B) le Four.

✚ **Procédure** :

Immersion de vingt-quatre heures : Ajusté L'échantillon (Figure III-13) doit être placé dans un récipient d'eau distillée maintenu à une température de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ et doit être placé sur le bord et complètement immergé. Après 24 heures, un échantillon à la fois doit être retiré de l'eau, essuyé toutes les surfaces avec un chiffon sec et immédiatement pesé à 0,001 g près.

Si l'échantillon a une épaisseur de (1/16 po) ou moins, il doit être placé dans un flacon de pesée immédiatement après avoir été essuyé et pesé dans le flacon [25].

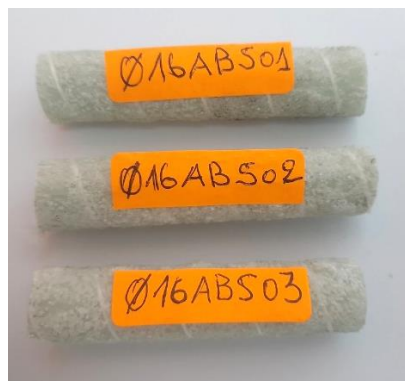


Figure III-13 : Les trois échantillons d'armature PRFV pour l'essai absorption.

Le rapport doit inclure les valeurs pour chaque spécimen et la moyenne pour les trois spécimens comme suit [25] :

- ✓ Dimensions des éprouvettes avant essai, mesurées en conformément à 5.6, et rapporté au 0,025 mm le plus proche
- ✓ Temps et température de conditionnement,
- ✓ Procédure d'immersion utilisée
- ✓ Temps d'immersion (procédure d'immersion de longue durée seul)

- ✓ Pourcentage d'augmentation de poids pendant l'immersion.

$$\text{Absorption (\%)} = \frac{[\text{Poids humide} - \text{Poids conditionné}] / \text{Poids conditionné}}$$

$$\text{Abs (\%)} = \frac{[W2 - W1] / W1}$$

B) Essai de perte au feu des résines (Les pourcentages des constituants)

En fonction de la norme ASTM D 2584-02, cette méthode d'essai couvre la détermination de la perte au feu des résines renforcées durcies. Cette perte au feu peut être considérée comme la teneur en résine dans les limites déterminer comme ça :

Si la résine organique utilisant uniquement un tissu ou un filament de verre comme support est complètement décomposée en volatils dans cette condition d'essai, en ignorant la petite quantité de volatils (eau, solvant résiduel) qui peut être présente, la perte de teneur en résine au moment de la combustion est conseillé comme Teneur en résine de l'échantillon. Cette méthode d'essai ne fournit pas de mesure de la teneur en résine pour les échantillons contenant des matériaux de renforcement qui perdent du poids dans les conditions d'essai ou contenant des résines qui ne se décomposent pas en matières volatiles lors de l'inflammation. La Figure III-14 représente les trois échantillons qui utilisé pour l'essai de perte au feu, et la mesure de poids par la balance capable de lire 0,0001g [26].

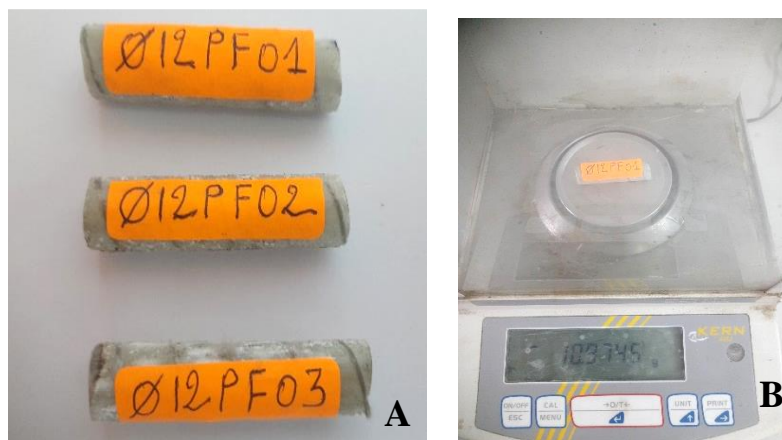


Figure III-14 : Essai de perte au feu : **A)** Trois échantillons d'armature en PRFV Ø12mm
B) Mesure de poids d'un échantillon par la balance.

✚ Appareillage :

- ✓ Creuset, platine ou porcelaine, capacité d'environ 30 ml.
- ✓ Four à moufle électrique, capable de maintenir une température de 565 ±28°C



Figure III-15 : La pose de trois échantillons dans un four avec une température de 550°C.

✚ Spécimen d'essai :

- ✓ Un minimum de trois spécimens doit être testé pour chaque échantillon.
- ✓ L'échantillon doit peser environ 5 g et mesurer au maximum 2,5 sur 2,5 cm d'épaisseur.

✚ Calculs :

Calculer la perte au feu de l'éprouvette en poids pourcentage comme suit :

Perte au feu, poids (%) = $[(W_1 - W_2) / W_1] \times 100$

W1 = poids de l'échantillon en g

W2 = poids du résidu en g

Faire la moyenne des valeurs des 3 éprouvettes pour obtenir l'échantillon moyen.

Soustraire la plus faible perte au feu de l'échantillon de la perte au feu la plus élevée pour l'échantillon et rapporter comme gamme de perte d'allumage [26].

III.2.1.2. Les caractéristiques mécaniques :

A) Essai de traction pour l'armature en PRFV

Ce test est basé sur la norme ASTM D3916-08 (2016), qui décrit la procédure de détermination des propriétés en traction de tiges therm durcies pultrudées et renforcées de fibres de verre dans des diamètres allant de 3,2 mm à 25,4 mm. La combinaison d'une résistance à la traction axiale élevée et d'une faible résistance à la compression transversale des barres pultrudées présente certains problèmes uniques dans la détermination de la résistance à la traction de ce matériau à l'aide de montages d'essai conventionnels. Les pressions latérales élevées créées dans les méthodes de serrage traditionnelles ont tendance à écraser la tige, provoquant une défaillance dans cette méthode d'essai [23].

✚ Préparation d'échantillon

Dans cette étude nous avons préparé trois (03) éprouvettes doivent être découpées dans l'échantillon de tige d'intérêt, selon la norme ASTM D3916-08 (2016) La longueur de l'éprouvette doit être aussi grande que possible.

Pour chaque éprouvette on 'a fait au niveau d'usine *MAGHREB PIPE M'SILA* une réduction de section pour diminuer la force appliquée qui est le besoin pour le succès de l'essai de traction, surmontant ainsi l'influence délétère des poignées d'essai conventionnelles, par ce que les forces de compression transversales élevées générées dans la méthode conventionnelle de la préhension a tendance à écraser la tige, provoquant ainsi un échec d'essai.

✚ Appareil de mesure :

Au niveau de laboratoire d'usine *MAGHREB PIPE M'SILA*, nous avons utilisé une machine de traction appelé (YL-25). Cette machine possède une partie fixe située en bas et une partie mobile au haut, chacune de ces parties comporte deux mâchoires servant à la fixation de l'extrémité de l'échantillon (armature en PRFV) (Figure III-16).

Le Tableau III-10 représenté quelques caractéristiques de la machine de traction (YL-25) :

Tableau III-10 : les dimensions et les charges qui caractériser la machine de traction (YL-25) [09].

Les dimensions de la machine		
Désignation	Unité	Valeur
Hauteur totale	mm	2460
Largeur totale	mm	1300
Epaisseur totale	mm	670
Poids (avec pinces à coin 300KN installées) (± 15 Kg)	kg	870
Bâti de charge		
Capacité de la machine	KN	250
Vitesse de test maximale	mm/min	300
Vitesse de test minimale	mm/min	0.1
Résolution de déplacement	mm	0.01

La procédure et les illustrations ci-dessous expliquent comment installer un spécimen entre les mors.

- Utilisez les commutateurs de la pédale de jogging pour déplacer la poignée supérieure vers le haut ou vers le bas.
- Ajustez la distance entre les deux poignées pour permettre le serrage de l'échantillon.

- Fixer l'éprouvette sur le mors supérieur, tournez le levier latéral pour fermer les mâchoires.
- Alignez l'échantillon pour qu'il coïncide avec la ligne de force verticale de la machine.
- Tout en maintenant le levier de préhension supérieur en position serrée, tournez le levier de préhension inférieur pour fixer le spécimen.
- Le spécimen est sécurisé sur la machine et prêt pour le test [28].

Cette machine est montrée dans la figure III-16 suivantes :

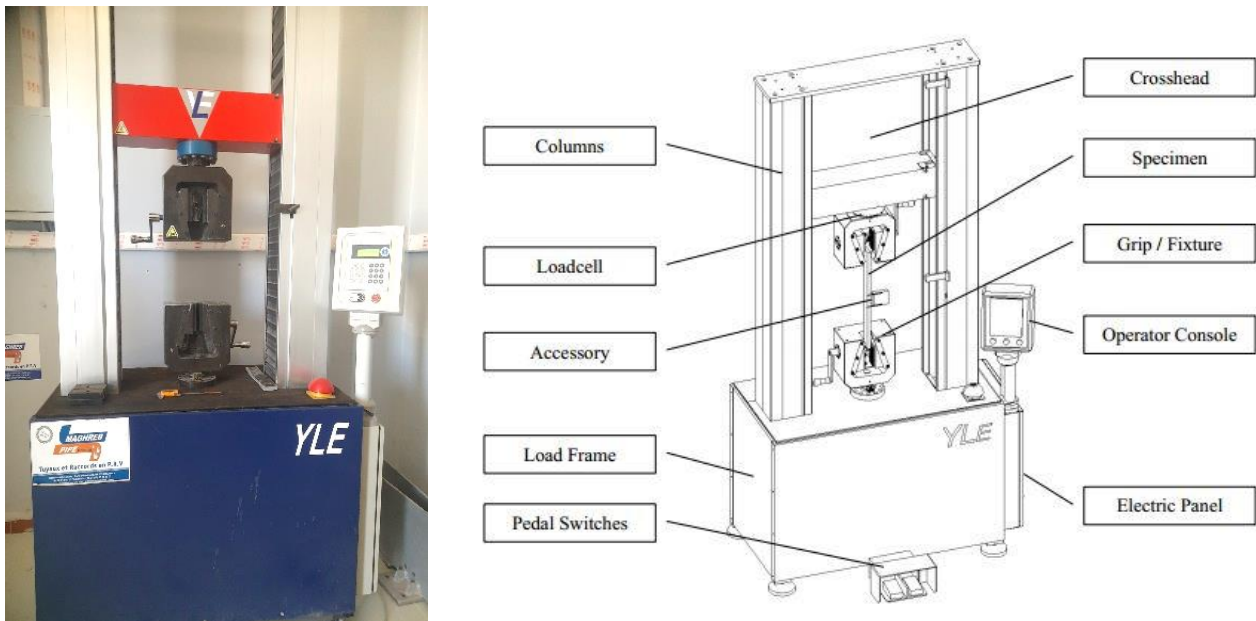


Figure III-16 : la machine de traction (YL-25), qui nous avons utilisé pour l'essai de traction d'armature en PRFV [28].

✚ **Calcul :**

- ❖ **La résistance à la traction** : Calculer la résistance à la traction en MPa, en divisant la charge de rupture en newtons par l'aire de la section transversale minimale d'origine de l'éprouvette en millimètres carrés, Rapportez le résultat à trois chiffres significatifs [23].

$$R_t = \frac{4P}{\pi D^2}$$

- ✓ Rt : résistance à la traction en MPa
- ✓ P : charge maximale en N.
- ✓ D : diamètre minimal de la tige en mm.

Module d'élasticité : Calculez le module d'élasticité en prolongeant la partie linéaire initiale de la courbe d'extension de charge et en divisant la différence de contrainte, correspondant à un segment de cette ligne, par la différence de déformation correspondante. Ce calcul doit être effectué en utilisant l'aire moyenne de la section transversale initiale dans la longueur entre repères de l'éprouvette. Exprimez le résultat en giga-pascals (GPa), et rapportez- le à trois chiffres significatifs.

$$E = \frac{4mg}{\pi D^2}$$

- ✓ E = module d'élasticité en GPa.
- ✓ m = pente de la tangente à la portion initiale de la ligne droite de la courbe contrainte-déformation en (MPa / %)
- ✓ g = longueur de référence d'origine en mm.
- ✓ D = diamètre moyen de la tige en mm

❖ **Pourcentage d'allongement :**

Calculer le pourcentage d'allongement en divisant l'allongement à la rupture de l'éprouvette par la longueur de jauge d'origine et en multipliant par 100. Le pourcentage d'allongement a été exprimé par deux chiffres significatifs en pourcentage d'allongement à la rupture [23].

$$\text{Allongement (\%)} = [\Delta/g] 100$$

- ✓ Δ : extension à la charge maximale en mm.
- ✓ g : longueur de référence d'origine en mm.

Pour chaque série de tests, calculez la moyenne arithmétique de toutes les valeurs obtenues et indiquez-la comme la « valeur moyenne » pour la propriété particulière déterminée.

B) Essai d'arrachement pour l'armature en PRFV :

De nombreux paramètres affectent les propriétés de liaison des barres d'armature en PRF, dont certains sont la résistance du béton, la longueur d'ancrage, le diamètre et l'emplacement des barres d'armature, le type de fibre, le type de surface des barres d'armature et la couverture... etc.

Pour réaliser Essai d'arrachement, nous avons utilisés la norme ASTM D7913- D7913M-14. On 'a des barres d'armature en PRF ont été coulées dans les prismes de béton dans l'une des deux directions et le béton a pu durcir. L'échantillon durci est placé dans un montage d'essai constitué d'une plaque de compression à une extrémité. L'extrémité chargée de la barre d'armature est serrée dans des ancrages de tension et chargée sous tension jusqu'à la rupture.

Le comportement de liaison entre le béton et les barres d'armature en PRF est un aspect de performance important utilisé dans les spécifications des matériaux et les critères de conception. Cette méthode d'essai sert à préparer uniformément des éprouvettes et à tester l'adhérence de l'armature en PRF au béton.

🛠 **Appareil de mesure :**

Nous avons utilisé le même appareil pour l'essai de traction (YL-25), par ce qu'il a une partie fixe (le cube de béton) et la partie mobile (l'autre extrémité) [24].

✚ Préparation des échantillons :

La préparation de moules à béton ils sont baser sur des plaques en acier et assemblé entre eux par la soudure pour former un cube de (200x200x200) mm³ selon la norme ASTM D7913- D7913M-14. Après coulage, On attend que le béton durcisse pendant 15 jours puis on fait les essais d'arrachement.

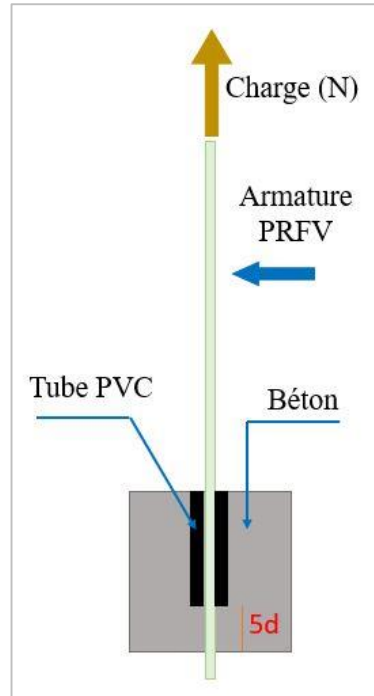


Figure III-17 : Le principe et les différentes mesures de l'essai d'arrachement.

Chaque barre de PRF doit être coupée en longueurs de $L = 750\text{mm}$ en total, la partie fixe entre le béton et le barre est $5d_b$, et d'autre partie elle est libre (on utilise un tube en plastique 'PVC' pour éviter l'adhérence entre le béton et le barre). La figure III-19 au-dessus elle montre bien les mesures d'échantillon pour l'essai d'arrachement d'armature en PRFV.

✚ Calcul :

La contrainte de liaison moyenne doit être calculée selon l'équation au-dessous et rapportée avec une précision de trois chiffres significatifs pour chaque lecture de force prise au cours de l'essai [24].

$$\tau = \frac{F}{\pi d_b l}$$

- ✓ τ : contrainte de liaison moyenne en MPa
- ✓ F : force de traction en N
- ✓ d_b : le diamètre de la barre. l : est la longueur d'armature scellée.

III.3. Conclusion

Ce chapitre diviser en deux parties, la première partie traite les caractéristiques des composants de béton (sable dune et concassé, gravier, ciment et adjuvant), aussi, la formulation de béton à dosage 350kgm³, qui nous avons choisi à partir de cinq (05) formulations (chaque formulation y'a une pourcentage d'adjuvant spécifique avec le même type d'adjuvant est le super-plastifiant). Et la deuxième partie elle contient les différents méthodes d'essais qui nous avons fait sur les armatures en PRFV avec leurs protocoles bien expliquer selon les normes, tel que l'essai d'absorption, l'essai de perte au feu, l'essai de traction axiale et l'essai d'arrachement (armature PRFV/Béton).

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

IV.1. Le Béton

Le plan expérimental qui on 'a prend pour former un béton avec une résistance de compression entre 30 et 35 MPa, est basé sur la méthode Dreux-Grorisse, nous avons choisi cinq (05) formulations a base des résultats de masse volumiques, équivalent de sable (ESV et ESP) et l'analyse granulométrie pour les granulats (le mélange de sable, G3/8 et G8/16) qui on 'a fait au Laboratoire Université de M'SILA.

Les cinq (05) formulations ont les mêmes valeurs de quantités pour les constituants (mélange de sable, gravier G3/8 G8/16 et ciment) seulement nous avons changé la concentration de l'adjuvant (super plastifiant Sikaplast, BV40).

Ce qui entraîne une modification de la quantité de l'eau de gâchage, chaque fois que l'on augmente la quantité d'adjuvant super-plastifiant, on enregistre une diminution de la quantité d'eau, afin d'obtenir la résistance requise. Après le coulage de béton, on'a décoffré les éprouvettes de béton et mis dans un bassin d'eau, puis on attendu sept jours (temps de durcissement) pour enregistrer la résistance à la compression et à la traction du béton.

Les tableau IV-01et IV-02 nous donne les résultats d'écrasement pour des éprouvettes cubiques et prismatiques successivement.

Tableau IV-01 : Les résultats de résistance à la compression des éprouvettes cubiques (15x15x15) cm³ après sept (07) jours.

N°	Durée (J)	Masse (g)	Masse Volumique (g/cm ³)	Contrainte(σ) (MPa)
01 (0% Adj)	07	8135	2.410	30.82
02 (0.5 % Adj)	07	8098	2.399	32.68
03 (1 % Adj)	07	8208	2.432	39.58
04 (1.5 % Adj)	07	8229	2.438	45.99
05 (2 % Adj)	07	8244	2.442	53.65

Tableau IV-02 : Les résultats de résistance à la traction par flexion (FTP) des éprouvettes prismatiques (7x7x28) avec différents pourcentages adjuvant après (07) jours.

N°		Durée (J)	Charge (N)	Contrainte (MPa)
0% Adj	01	07	5000	3.08
	02		5500	3.39
	03		5900	3.63
0.5% Adj	01	07	6100	3.76
	02		5500	3.39
	03		5800	3.57
1 % Adj	01	07	5500	3.39
	02		8300	4.25
	03		5500	3.39
1.5% Adj	01	07	6600	4.06
	02		7200	4.43
	03		7100	4.37

D'après ces résultats (Tableau IV-01) d'écrasement des éprouvettes cubiques de béton, qui nous ont donné la résistance à la compression, on constate que plus la pourcentage d'adjuvant super-plastifiant est élevée plus la résistance à la compression est élevée (0% Adj = 30.82MPa jusqu'à 2% Adj = 53.65MPa), par ce que la quantité d'eau gâchage diminue et le rapport E/C diminue. Les résultats d'écrasement des éprouvettes prismatiques de béton (Tableau IV-02) qui représente la résistance à la traction (0% Adj = 3.37MPa jusqu'à 1.5% Adj = 4.29MPa) sont compatible et soutient les résultats de résistance à la compression. A partir ces résultats nous avons choisi la formulation N°03 de 1 % d'adjuvant, car elle est économique pour l'adjuvant, elle donne des résistances à la compression et à la traction favorables, et compatible avec les essais qui nous allons ferons avec l'armature en PRFV (l'essai d'arrachement).



Figure IV-01 : Essai de compression et de traction par flexion.

IV.2. Armatures PRFV

Les armatures étudiées sont fabriquées selon un procédé appelé pultrusion. Cependant contrairement à la mise en place des fibres strictement longitudinales habituellement associée à ce procédé, dans ce cas les fibres qui sont utilisés sont des fibres de verres. Elles sont ensuite immergées dans un bain d'époxy avant d'être mises en tension dans une ligne de pultrusion où la matrice est réticulée à chaud selon un protocole de cuisson spécifique. Les paramètres liés à la pultrusion sont enregistrés afin d'assurer une qualité constante du matériau. Un revêtement de surface, de type sablage, peut être déposé au cours de la fabrication afin d'augmenter la contrainte d'adhérence entre le béton et l'armature. [29].

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'étude des propriétés physiques représentées dans le taux d'absorption (l'essai d'absorption) et les pourcentages des constituants (teste de perte au feu), ainsi l'étude des propriétés mécanique représentées dans la résistance à la traction (l'essai de traction) et l'adhérence des barres en PRFV dans le béton (l'essai d'arrachement).

IV.2.1. Les propriétés physiques d'armature en PRFV

A) Le taux d'absorption de l'eau

Les essais d'absorption d'humidité sont fondamentaux et doivent se faire de façon rigoureuse et précise. Ceux-ci sont obtenus à partir de pesées successives d'échantillons référencés dans le temps, la pesée initiale étant effectuée sur les échantillons secs.

L'interface fibre/matrice est un maillon faible des composites. La dégradation est la plus critique pour le PRF car elle menace son intégrité et ses performances [Kamal, 2011]. La dégradation de l'interface en milieu humide se produit principalement dans la phase d'absorption non fickienne, lorsque le matériau est proche de la saturation [Bergeret, Krawczak, 2006]. Dans un environnement humide, la matrice de PRF absorbe l'eau et gonfle, tandis que la fibre de verre peut être considérée comme non-absorbeur d'eau. Il y a alors dilatation différentielle entre la matrice et les fibres, ce qui peut créer des contraintes importantes à l'interface, conduisant à un décollement entre les fibres et la matrice [Verdu, 2000].

Grâce aux relevés réguliers de masse effectués sur les échantillons de diamètre 16mm avec une longueur de 70mm, et en prenant en compte les pertes de sable.

D'après la norme ASTM D 570-98, le calcul d'absorption s'effectue selon la relation suivante :

Absorption (%) = $([\text{Poids humide} - \text{Poids conditionné}] / \text{Poids conditionné})$

$$\text{Abs (\%)} = [(W2 - W1) / W1]$$

Tableau IV-03 : Le taux d'absorption de l'eau pour un échantillon d'armature en PRFV.

	w1 (g)	w2 (g)	Abs %
Ech 01 Ø16	26,215	26,274	0,23
Ech 02 Ø16	25,357	25,421	0,25
Ech 03 Ø16	25,048	25,104	0,22
Moyenne (%)			0,23
Ecarte-type (%)			0,02

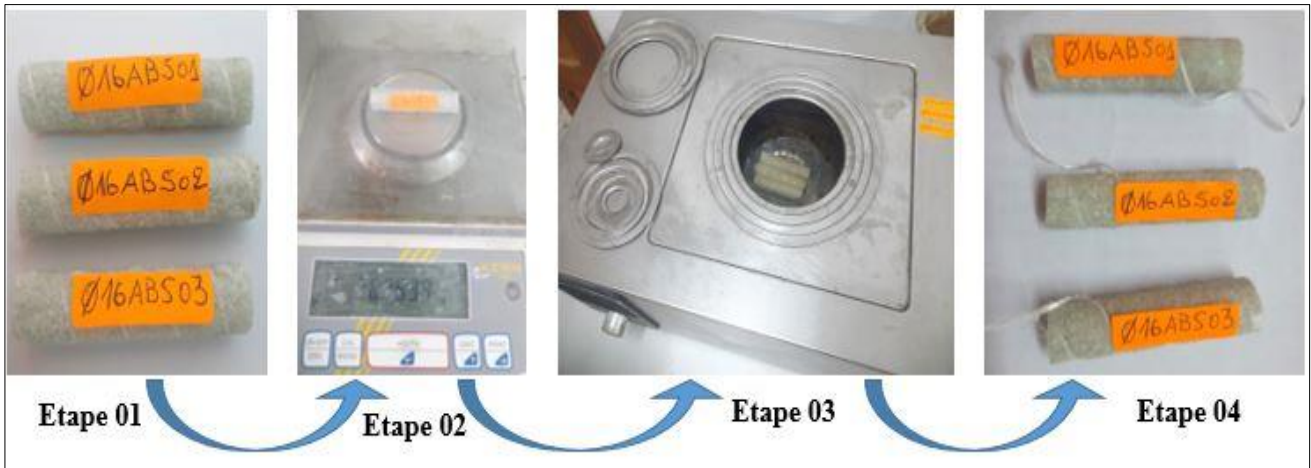


Figure IV-02 : Les étapes de l'essai d'absorption d'eau pour un échantillon d'armature en PRFV.

Une fois l'expérience terminée, nous n'avons pas enregistré de changement dans la forme et la taille des échantillons à l'œil nu (Figure IV-02).

Tableau IV-04 : Les différentes valeurs référentielles pour les propriétés d'armature en PRFV. [30]

Propriétés	Méthode de teste	Exigence	Barre droite
Fraction massique de fibres	ASTM D2584 ASTM D3171	$\geq 70\%$	Oui
Absorption d'humidité à court terme	ASTM D570	$\leq 0.25\%$	Oui

D'après ces résultats de l'essai d'absorption (Tableau IV-03), nous avons remarqué que les valeurs d'absorbions pour les trois échantillons (PRFV) sont très proches entre eux avec une moyenne de (0.23%), Ceci est confirmé par les valeurs d'écarte type de (0.02%).

Ces valeurs sont dans la limite exigé par la norme ASTM D570 ($< 0.25\%$) présentées dans le tableau IV-04.

D'après les résultats, nous concluons que l'armature en PRFV presque n'absorbe pas l'eau (très faible absorption), Ainsi, cela signifié que la quantité d'eau nécessaire pour formuler le béton ne sera pas

affectée. De même, ce faible taux d'absorption indique que son effet sur l'interface fibre/matrice sera très réduit.

B) Les pourcentages des constituants (essai de perte au feu)

Selon la norme ASTM D 2584-02, cette méthode d'essai couvre la détermination de pourcentages des constituants (fibres et matrices), aussi basé sur la combustion de la résine et de l'incombustibilité des fibres.

Dans cette expérience, nous avons préparé trois échantillons, chaque échantillon a un diamètre de 12 mm et une longueur de 50 mm, puis nous avons pesé des échantillons avant de les brûler (masse initiale en gramme). Ensuite nous plaçons des échantillons dans une boîte métallique à l'intérieur d'un four à une température de 550 C°, pendant une durée estimée à 25 minutes (Figure IV-03).



Figure IV-03 : Les étapes de l'essai perte au feu.

Après avoir terminé le processus de combustion, nous avons de nouveau pesé les échantillons (masse de fibre en gramme) et les résultats étaient comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV-05 : Les résultats de l'essai de perte au feu.

N° Echantillon	Masse initial (g)	Masse de Fibre (g)	Masse de résine (g)	Masse de Sable (g)	Fibre (%)	Résine (%)
01	10.924	8.120	2.804	0.484	74,33	25,67
02	10.277	7.629	2.648	0.476	74,23	25,77
03	10.652	8.193	2.459	0.184	76,92	23,08
Moyenne (%)					75,16	24,84
Ecarte-type (%)					1,53	1,53

Le pourcentage des fibres pour les trois échantillons est d'une moyenne de 75.16%.

En comparant les résultats de l'essai perte au feu avec le tableau IV-04 qui présente le pourcentage des fibres exigé (supérieure ou égale 70%), et nous avons constaté que le pourcentage des fibres dans l'armature en PRFV satisfait cette exigence.

IV.2.2. Les propriétés mécaniques d'armature en PRFV

A) Résistance à la traction (l'essai de traction uni-axiale)

Le but de l'essai de traction est de déterminer les différentes propriétés mécaniques de traction (contrainte ultime, module d'élasticité et déformation ultime) de l'armature PRFV. Le test est effectué selon la procédure décrite dans la norme ASTM D3916-08 (2016). Il consiste à appliquer une force axiale sur la barre d'armature à l'aide d'une presse équipée de deux mâchoires qui saisissent les deux extrémités de la barre d'armature, et la vitesse de teste est 5 mm/min.

Le calcul de la résistance à la traction basé sur la loi suivante :

$$R_t = (4P/\pi D^2)$$

- ✓ R_t : résistance à la traction en MPa
- ✓ P : charge maximale en N.
- ✓ D : diamètre minimal de la tige en mm

Les essais de traction ont été réalisés au laboratoire de MAGHREB PIPE Industries de M'sila.

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à la rupture. Les valeurs charge-allongement sont enregistrées systématiquement par la machine. Les données enregistrées sont ensuite utilisées pour tracer les courbes contrainte-déformation.

Quant aux les figures (Figure IV-04, IV-05 et IV-06) ci-dessous, elles montrent la courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation pour l'essai N°01, N°02 et N°03 successivement.

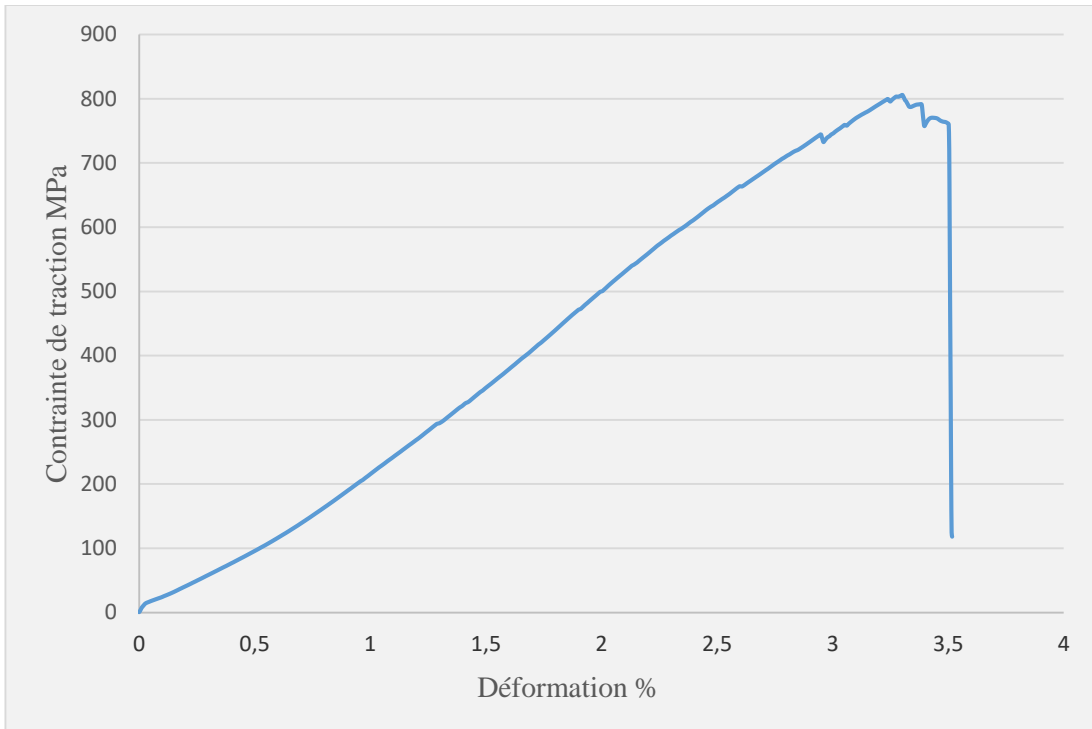


Figure IV-04 : La courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation pour l'essai de traction N°01.

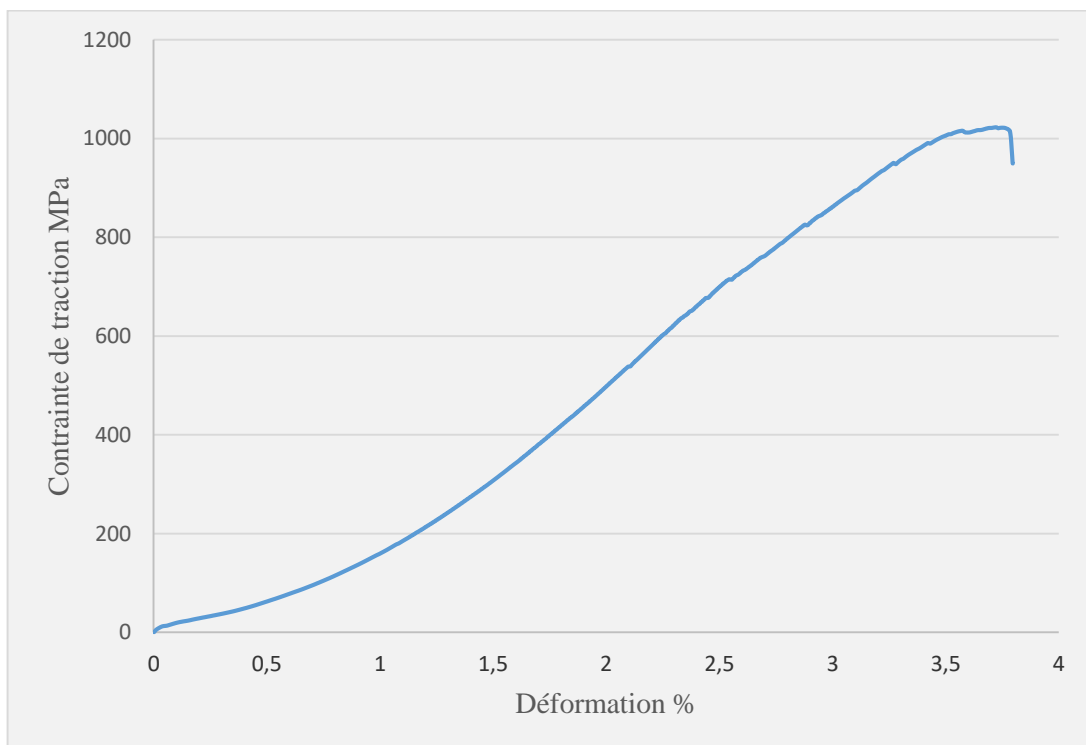


Figure IV-05 : La courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation pour l'essai de traction N°02.

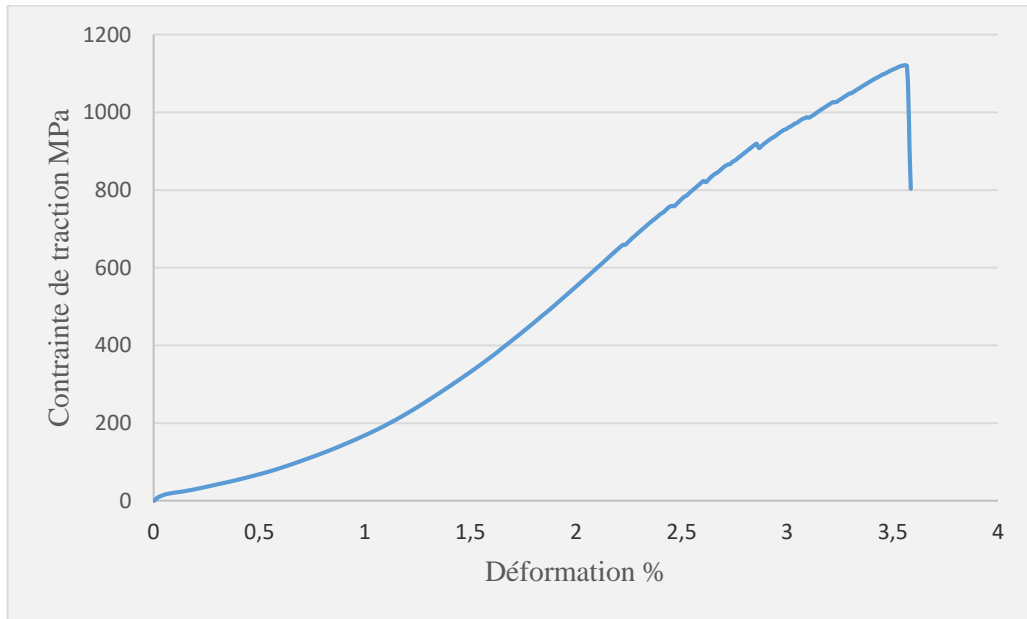


Figure IV-06 : La courbe d'évolution des contraintes en fonction de la déformation pour l'essai de traction N°03.

Après avoir comparé les trois courbes (test N° 01, N° 02 et N° 03), on constate que les évolutions des trois courbes sont similaires. Elles ont quasiment la même allure. Cette dernière est presque semblable avec les courbes présentées dans la Figure IV-07 relatives à une étude menée en France sur différentes armatures (PRFV, PRFC, PRFA et l'acier).

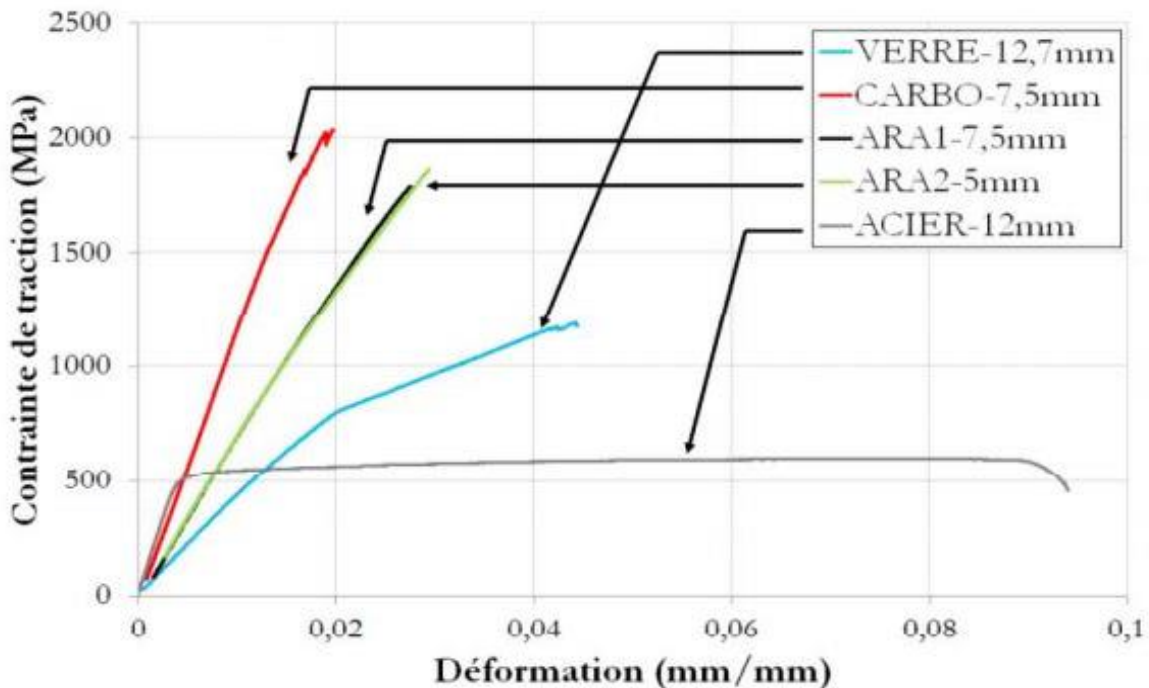


Figure IV-07 : La courbe de comportement en traction pour les armatures PRFV, PRFC, PRFA et acier, France. [15]

La méthode de calcul le module d'élasticité est comme suite :

$$E = (\Delta\sigma / \Delta\varepsilon) \Rightarrow E = [(776.234 - 63.458) / (0.02428 - 0.00395)]$$

$$E = 35055 \text{ MPa} \Rightarrow \mathbf{E = 35.06 \text{ GPa}}$$

Les propriétés mécaniques (Résistance ultime, Module d'élasticité et Déformation à la rupture) d'armature en PRFV, ont été déterminées et présentées dans le Tableau IV06.

Nous avons remarqué que les valeurs des propriétés sont proches entre eux. La résistance ultime maximale est en moyenne de 983.33 MPa. La déformation à la rupture équivalente est 3.23%. La valeur moyenne du module d'élasticité (E) est de 39.07 GPa.

Après comparaison avec le Tableau IV-07, on constate que la valeur de la résistance ultime (983.33MPa) se situe dans l'intervalle des valeurs enregistrées pour ce type de matériaux [483MPa -1600MPa]. De même pour les valeurs de module d'élasticité (39.07 GPa) situant dans l'intervalle [35GPa – 51GPa]. La déformation à la rupture obtenu (3.23 %) est légèrement supérieure aux valeurs pratiquées pour les armatures en PRFV situé entre [1.2% – 3.1%].

Tableau IV-06 : Les résultats pour les propriétés mécaniques d'armature en PRFV obtenues par l'essai de traction.

N° Echantillon	La force (N)	Résistance ultime (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation a la rupture (%)
Echantillon 01	40281	806	35.06	3.12
Echantillon 02	45620	1023	39.50	3.25
Echantillon 03	64169	1121	42.65	3.32
Moyenne	50023	983.33	39.07	3.23
Ecarte type	12537.99	161.20	3.82	0.07

Tableau IV-07 : Les propriétés mécaniques en traction types des barres d'armature en PRF [ACI, 2003].

Type de barre	Acier	PRFV	PRFC	PRFA
Résistance ultime (MPa)	483 - 690	483 - 1600	600 - 3690	1720-2540
Module d'élasticité (GPa)	200	35-51	120 -580	41 -125
Déformation a la rupture (%)	6-12	1,2-3,1	0,5-1,7	1,9-4,4

En conclusion, l'armature en PRFV a une forte résistance à la traction presque deux fois par rapport à l'acier.

B) Caractérisation mécanique de l'interface béton / armature en PRFV (l'essai d'arrachement)

Les essais d'arrachement ont été réalisés sur trois (03) éprouvettes (armature PRFV sablée et coulée dans un prisme de béton) selon la norme ASTM D7913-D7913M-14. L'éprouvette durci (15 jours durée de durcissement) est ensuite placée dans un dispositif d'essai, elle est fixée sur la partie inférieure (partie fixe) par une plaque métallique et des tiges. La partie supérieure est mobile exerçant une force d'arrachement sur l'armature en PRFV. La force de traction appliquée à une vitesse de 5 mm/min.

Les étapes de l'essai d'arrachement (béton/armature PRFV) :

- 01** : préparation d'un moule cubique (20x20x20) cm³, puis le coulage de béton.
- 02** : décoffrer le moule cubique (20x20x20) cm³ de béton, après un jour au coulage.
- 03** : conserver le cube de béton dans un milieu humide.
- 04 et 05** : les éprouvettes (béton + armature PRFV) après 15 jours au coulage.
- 06** : préparation d'éprouvette (armature PRFV + béton) pour l'essai d'arrachement.
- 07** : L'armature en PRFV glisse du béton après l'application d'une force à la traction.

La Figure IV-08 ci-dessous, elle présente un courbe d'évolution de contrainte d'adhérence en fonction de déformation causé par l'essai d'arrachement (béton + armature PRFV Ø12mm)

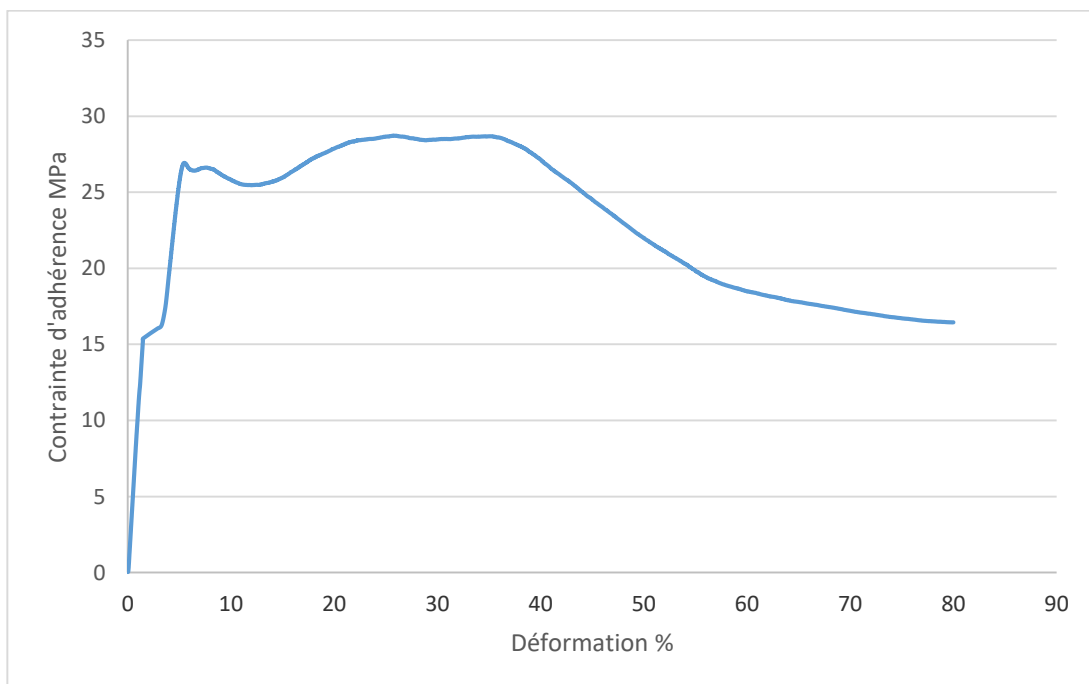


Figure IV-08 : La courbe de contrainte d'adhérence en fonction de déformation pour l'armature PRFV Ø12mm.

Les Figure IV-09 et IV-10 elles sont des résultats deux essais d'arrachement (béton + armature PRFV diamètre 16mm) sous forme d'un courbe.

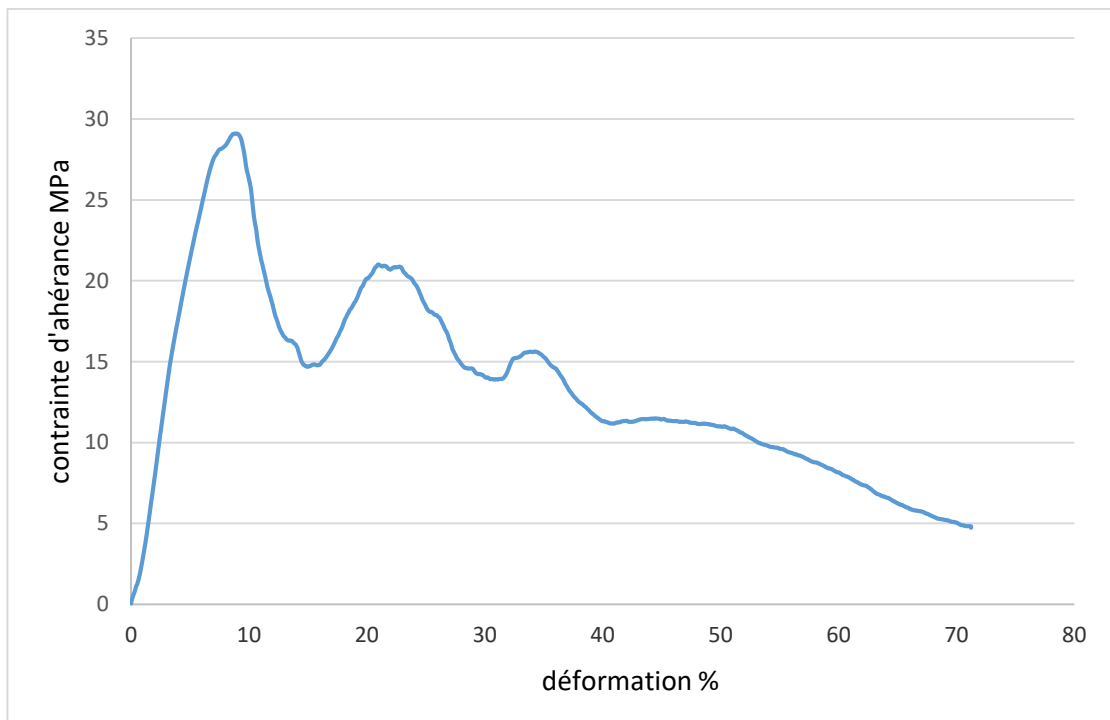


Figure IV-09 : La courbe de contrainte d'adhérence en fonction de déformation pour l'armature PRFV Ø16mm N°01.

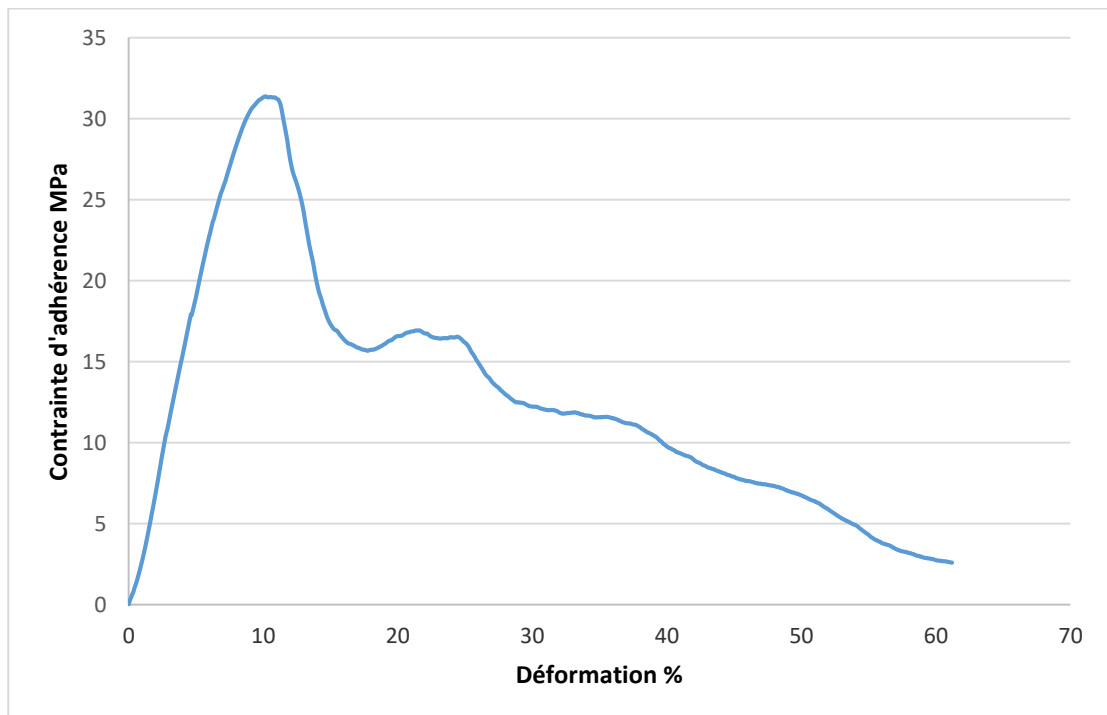


Figure IV-10 : La courbe de contrainte d'adhérence en fonction de déformation pour l'armature PRFV Ø16mm N°02.

D'après les résultats d'essai arrachement pour l'armature PRFV Ø12, on remarque que à l'intervalle [0 - 10%], la courbe c'est une droite inclinée avec une contrainte maximum de 26 MPa. ($\sigma_{max}=26.15$ MPa). Après cette seuil, l'armature va s'arrachée du béton. La contrainte d'adhérence va diminuer au fur et au mesure des glissements au niveau de la zone de contact (béton/armature) jusqu'à une valeur zéro (quand l'armature sorte complètement du béton).

Les courbes des Figures IV-09 et IV-10, en termes de forme sont les mêmes presque, la courbe c'est une droite inclinée d'intervalle [0-9%], ainsi une contrainte maximum moyenne (pour deux essais) de 29.5MPa ($\sigma_{max}=30.2$ MPa).

La contrainte d'adhérence maximale est calculée par l'expression suivante :

$$\tau = \frac{F}{\pi d b l}$$

Tableau IV-08 : Les résultats des contraintes adhérence pour les armatures PRFV de Ø12mm et 16mm.

Armature PRFV	Contrainte adhérence maximum (Mpa)
Echantillon 01 Ø12	26.15
Echantillon 01 Ø16	29.09
Echantillon 02 Ø16	31.35

D'après le tableau IV-08, Lorsque on compare la contrainte d'adhérence d'armature PRFV au diamètre 12mm avec le diamètre 16mm de la même catégorie (PRFV), on constate que la barre Ø16 montre une contrainte d'adhérence supérieure que celle de la barre Ø12. Cela peut être expliquer par l'augmentation de la surface de contact avec le béton.

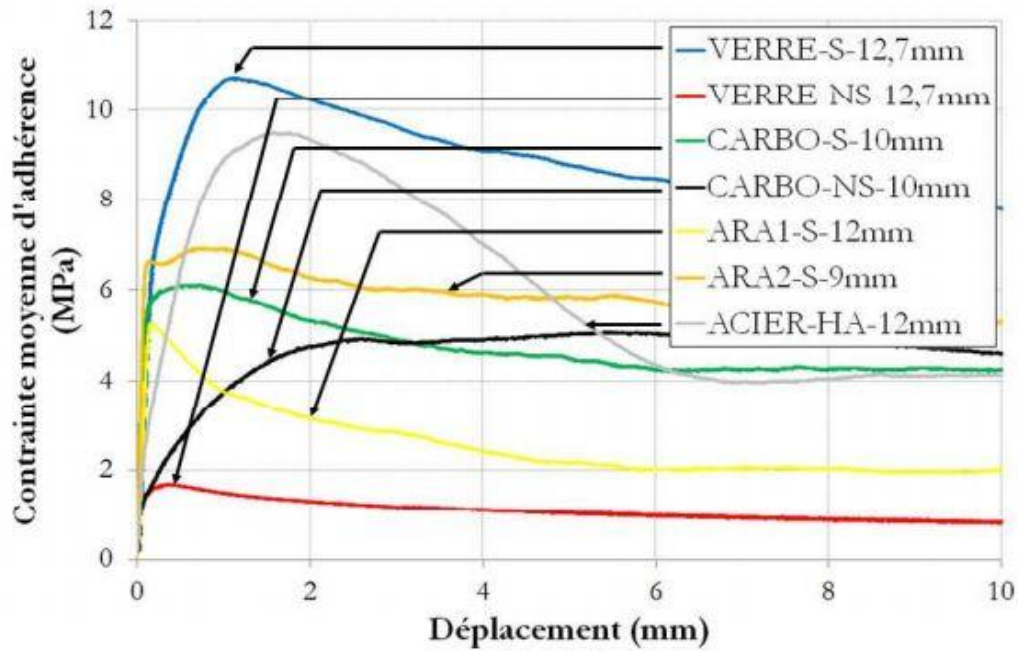


Figure IV-11 : Les courbes d'évolution au cours de l'essai d'arrachement pour différents types d'armatures. [15]

La (Figure IV-11) montre l'évolution des courbes contrainte déplacement au cours de l'essai d'arrachement de plusieurs types d'armature PRF (PRFV sablé, PRFV non sablé, PRFC sablé, PRFC non sablé et PRFA sablé) et un armature d'acier HA. Ce travail est publié par *Arnaud Rolland, Karim Benzarti, Marc Quiertant, Pierre Argoul, Sylvain Chataigner* sous forme d'article en 2015.

D'après la comparaison de contrainte d'adhérence d'armature PRFV avec l'armature d'acier, on constate que le PRFV est plus mieux que l'acier de point de vue d'adhérence. Par conséquent, ces armatures sont utilisables avec le béton dans les constructions et les ouvrages en béton armé.

IV.3. Conclusion

Ce chapitre (04) diviser en deux parties, la première partie sur le béton en dosage (350kg/m^3), A partir des résultats qui nous avons trouvés, on choisit la formulation N°03 de 1 % d'adjuvant, car elle est économique pour l'adjuvant, elle donne des résistances à la compression et à la traction favorables, et compatible avec les essais qui nous allons ferons avec l'armature en PRFV (l'essai d'arrachement).

La deuxième partie, Lorsque on compare la contrainte d'adhérence d'armature PRFV des différents diamètres de la même catégorie (PRFV), on constate que lorsque le diamètre augmente, la contrainte d'adhérence augmente. Cela peut être expliquer par l'augmentation de la surface de contact avec le béton.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est de contribuer, à travers des études expérimentales, à l'étude du comportement d'un béton armé en PRFV.

Au début de cette étude, nous avons mené des recherches bibliographiques sur les constituants d'armatures en PRF, ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques. Nous avons étudié les différentes caractéristiques mécaniques tel que la résistance à la traction et le module d'élasticité.

La contrainte d'adhérence entre l'armature PRF et le béton a été objet d'étude et d'analyse dans le dernier chapitre.

D'après ces résultats de l'essai d'absorption (Tableau IV-03), nous avons remarqué que la moyenne des valeurs d'absorbions pour les trois échantillons (PRFV) est de (0.23%). Nous concluons que l'armature en PRFV presque n'absorbe pas l'eau (très faible absorption), Ainsi, cela signifié que la quantité d'eau nécessaire pour formuler le béton ne sera pas affectée. De même, ce faible taux d'absorption indique que son effet sur l'interface fibre/matrice sera très réduit.

En comparant les résultats de l'essai perte au feu avec le tableau IV-04 qui présente le pourcentage des fibres exigé (supérieure ou égale 70%), et nous avons constaté que le pourcentage des fibres dans l'armature en PRFV (75.16%) satisfait cette exigence.

D'après ces résultats de l'essai de traction uni-axiale, on constate que la valeur de la résistance ultime (983.33MPa) se situe dans l'intervalle des valeurs enregistrées pour ce type de matériaux [483MPa - 1600MPa]. En conclusion, l'armature en PRFV a une forte résistance à la traction presque deux fois par rapport à l'acier.

D'après le tableau IV-08 (représente les résultats d'essai arrachement). Lorsque on compare la contrainte d'adhérence d'armature PRFV des différents diamètres de la même catégorie (PRFV), on

constate que lorsque le diamètre augmente, la contrainte d'adhérence augmente. Cela peut être exprimé par l'augmentation de la surface de contact avec le béton.

Après comparaison de contrainte d'adhérence d'armature PRFV avec l'armature d'acier, on constate que le PRFV est meilleur que l'acier de point de vue d'adhérence. Par conséquent, ces armatures sont utilisables avec le béton dans les constructions et les ouvrages en béton armé.

Recommandations et perspectives

A travers cette étude que nous avons menée sur les armatures en PRFV, nous vous proposons des perspectives pour poursuivre ce travail dans le futur :

- ❖ Elargir les travaux d'étude sur des éléments de structure (Poteau, Poutre, etc....)
- ❖ Étudier la durabilité d'armature en PRFV sous l'effet de la température et les milieux agressifs.
- ❖ Étudier d'autres types d'armature en PRF, notamment : PRFA, PRFB et PRFC.

Références

Bibliographiques

Les références bibliographiques

- [01] : **Laurent Gornet** , généralités sur les matériaux composites.
- [02] : **KHERKHACHE Soumeya**, Contribution à l'étude des matériaux composites pour Le confinement externe des colonnes en béton, magister en Génie Civil, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum-El-Bouaghi.
- [03] **Benzaid R., Abdelhak Mesbah H., Chikh NE.** « Contribution à l'Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton », Thesis, 2013.
- [04] **ANFA**, Association Nationale pour la Formation Automobile, « Dossier Pédagogique : Matériaux composites », France.
- [05] : **Zakariya BOUFAIDA, THÈSE DOCTORAT**, « Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice », Université de Lorraine, France. 2015.
- [06] : **BELABED Youssouf**, « étude et analyse du délaminage des structures renforcées par composites FRP multicouches : effet shearlag et impact thermique », Thèse de Doctorat LMD, Université aboubekr belkaid-TLEMEN, 13 juil. 2019.
- [07] : **AFCAB**, « association française de certification des armatures du béton », France, 07/10/2014.
- [08] : **DIAMONDWRAP BY CITADEL TECHNOLOGIES**, « Structural Carbon/Epoxy Rehab System for the Prevention and Repair of Corroded Piping Systems». Pittsburg-USA.
- [09] **PAOLO Vannucci**, « Matériaux composites structuraux », France. 2007.
- [10] : **Paul BALLETT**, « étude sur le coefficient d'adhérence k_b pour des barres d'armature en PRFV », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Décembre 2018.
- [11] : **Hizia BELLAKEHAL**, « Évaluation de l'effet combiné de charges thermiques et mécaniques sur le comportement des structures en béton armé de barres en PRF », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Automne 2014.
- [12] : **Vincent GAGNÉ**, « utilisation de profilés en matériaux composites dans les lignes aériennes de transport d'énergie électrique », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Mai 2011.
- [13] : **Gilbert NKURUNZIZA**, « Performance de barres d'armature en polymères renforcés de fibre (PRF) de verre pour des structures en béton sous les effets combinés de la charge soutenue, de la

température et de l'environnement humide et alcalin », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Décembre 2004.

[14] : **Ali ZAIDI**, « Comportement thermique d'éléments en béton armé de barres en polymères renforcés de fibres (PRF), thèse de doctorat en génie civil », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Mai 2006

[15] : **Arnaud Rolland**, « Comportement mécanique et durabilité de structures en béton renforcées par des armatures composites internes », Université Paris-Est, 2015. Français

[16] : **IrDaniel KALOMBO M**, « perspectives d'utilisation d'armatures composites dans le bâtiment et travaux publics en république démocratique du Congo », Université Panafricaine Du Congo.

[17] : **Adeline Confrere**, « Développement d'une méthode d'analyse structurelle de bâtiments en béton armé : application aux poutres renforcées par des armatures PRF », Université Claude Bernard -Lyon I, 2015. Français.

[18] : **Présentation**, « Point de vue du propriétaire sur l'utilisation des barres GFRP », janvier 18-19/ 2019, orlando, Florida,USA.

[19] : **Présentation**, « Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar », ARMASSTEK, IRAN.

[20] : **JIANGSU OCEANPOWER**, new material technology, Catalogue, China.

[21] : fiche technique GICA pour le ciment Béton CEM II/A-L 42,5 R NA 442.

[22] : **TEBBAL Nadia**, « Effet de la nature des granulats sur les propriétés physicomécaniques et durabilité d'un béton à haute performance », thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2017.

[23] : **la norme américaine ASTM D3916-08 (2016)**, « Méthode d'essai standard pour Propriétés de traction du pultrudé renforcé de fibre de verre Tige en plastique1. 2016

[24] : **la norme américaine ASTM D7913- D7913M-14**, « Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing », 2014.

[25] : **la norme américaine ASTM D 570-98**, « Standard Test Method for Water Absorption of Plastics », 1998.

[26] : **la norme américaine ASTM D 2584-02**, « Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins», 2002.

- [27] : **Nabila Zemour**, « contribution à l'étude de l'adhérence et du chevauchement de barres d'armature en matériaux composites de PRFV avec le béton auto-plaçant et le béton conventionnel », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Aout 2012.
- [28] : **Manuel de l'opérateur de la machine YL-25**, la société YLE GmbH, Catalogue, Allemagne, 2008.
- [29] : **Jean-Charles BOUHET**, « étude de l'impact de l'humidité et de l'alcalinité sur des armatures de polymères renforcés de fibres (PRF) », Université de Sherbrooke (Québec) CANADA, Septembre 2015.
- [30]: **Formation**, « AASHTO GFRP-Reinforced Concrete Design Training Course », Université of MIAMI, USA.
- [31]: **Rokbi Mansour, Rahmouni Z. El Abidine and Baali Brahim**, Performance of polymer concrete incorporating waste marble and alfa fibers. *Advances in Concrete Construction*, Vol. 5, No. 4 (2017) 331-343, Published by Techno-Press, Ltd, DOI: 10.12989/acc.2017.5.4.331, <http://www.techno-press.com/?page=container&journal=acc&volume=5&num=4> .
- [32] : **Rokbi Mansour, Rahmouni Z. El Abidine and Baali Brahim**, Mechanical properties of polymer concrete made with jute fabric and waste marble powder at various woven orientations. *International Journal of Environmental Science and Technology*, (2019),1-8.
<https://doi.org/10.1007/s13762-019-02367-7>
- [33]: **Rokbi Mansour, Rahmouni Z. El Abidine and Baali Brahim**, Flexural Characterization Of Polymer Concrete Comprising Waste Marble And Date Palm Fibers, *Technical Sciences*, 2019, 22(2), 169–182. http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech_22_2/Rokbi-M_i-in.pdf
- [34]: **Benkharbeche, Houria, Mansour Rokbi, Zine El Abidine Rahmouni, Moustapha Ghebouli**, Effect of Fibers Orientation on the Fracture of Polymer Concrete Based on Quartz, Polyester and Jute Fabrics, *Defect and Diffusion Forum* 406 (January 2021): 511–20.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.406.511>. <https://www.scientific.net/DDF.406.511>
- [35]: **Baali, B., Benmounah, A., & Rokbi, M. (2020)**. Mechanical characterization and optimum design of wound glass-fiber-reinforced polymer pipes based on the winding angle and the number of plies. *Mechanics of Composite Materials*, 56(5), 673-684.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11029-020-09912-3>