

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2019

**MEMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER**

*Thème :*

**Renforcement Des Dalles en Béton Armé Avec Des Bandes en  
Carbone(TFC)**

**Domaine : Sciences et Technique**

**Spécialité :**

**GENIE CIVIL**

**OPTION**

**MATERIAUX EN GENIE CIVIL**

**Par**

**Noms, Prénoms des Etudiants (es)**

**1/ Merouani Sarra**

**2/ Harbi Manel**

**3/ Tarfa Nour El Houda**

**DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. Redjel Bachr.,GRADE, GENIE CIVIL, U B M ANNABA**

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT : Pr. BELOUATTAR RDJEM**

**EXAMINATEUR : Dr. BOUMAZAA FATIHA**

## ***Remerciement***

**En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH de m'avoir donné la patience et le courage d'achever ce modeste travail.**

**Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention et l'encouragement d'un grand nombre de personnes. Je souhaite ici les en remercier.**

**Je tiens d'abord à remercier très chaleureusement Monsieur Redjal Bachir qui m'a permis de bénéficier de son encadrement, les conseils qu'il m'a prodigués, la patience et la confiance qu'il m'a témoignés.**

**Mes remerciements s'étendent également à tous mes enseignants durant les années des études.**

**Je tiens à exprimer toute ma gratitude au membre de jury Mr Belouattar Rdjem , et Mme Boumaaza Fatiha.**

**Je souhaite remercier aussi toute l'équipe de département de Génie Civil : enseignants, doctorants, personnels administratifs et technique, pour leurs aides durant les essais expérimentaux au laboratoire.**

**Mes remerciements à tous mes amis et mes collègues et à tous ceux qui ont participé à l'aboutissement de ce travail.**

**Enfin, je dédie ce travail à mes parents et à toute ma famille qui m'ont toujours soutenu.**

## Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'influence du renforcement par matériaux composites sur la résistance des dalles rectangulaires épaisses fabriquées en béton armé renforcées dans la zone tendue par des bandes de TFC collé d'une résine polyester non saturée en comparaison avec celle en béton armé non renforcée.

De nos jours, La méthode de renforcement des ouvrages en béton par collage de matériaux composites est une pratique qui connaît actuellement un essor important. Dans cette optique, nous nous proposons d'apporter une contribution à l'analyse du comportement des dalles en béton armé renforcées par matériaux composite.

Les résultats obtenus montrent une amélioration en termes de résistance, et de performances mécaniques de la dalle en béton renforcée par un tissu composite de dimensions variées. Ce renforcement a contribué une très importante augmentation de la résistance allant de **99.81%** pour une seule couche de composite.

D'un point de vue économique, ce procédé de renforcement des dalles épaisses en béton est facile à mettre en œuvre et peut concurrencer les méthodes traditionnelles de renforcement beaucoup plus complexes.

**Mots clés :** dalles, renforcement, résine polyester, tissu composite.

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to study the influence of composite reinforcement on the strength of thick rectangular slabs made of reinforced concrete in the tensile zone by TFC strips bonded with unsaturated polyester resin in comparison with that of unreinforced reinforced concrete.

Today, the method of reinforcing concrete structures by gluing composite materials is a practice that is currently experiencing significant growth. With this in mind, we propose to make a contribution to the analysis of the behavior of reinforced concrete slabs reinforced with composite materials.

The results obtained show an improvement in terms of strength and mechanical performance of the concrete slab reinforced by a composite fabric of various dimensions. This enhancement contributed a very significant increase in strength of 99.81% for a single layer of composite.

From an economic point of view, this process of reinforcing thick concrete slabs is easy to implement and can compete with much more complex traditional reinforcement methods.

. **Keywords** : slabs, reinforcement, polyester resin, composite fabric.

## ملخص

الغرض من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير التعزيز المركب على قوة الألواح المستطيلة السمكية المصنوعة من الخرسانة المسلحة في منطقة الشد بواسطة شرائط TFC المرتبطة برا تتج بوليستر غير مشبع مقارنة بالغير مدعمة. اليوم، طريقة تعزيز الهياكل الخرسانية عن طريق لصق المواد المركبة هي ممارسة تشهد حالياً نمواً كبيراً. مع وضع ذلك في الاعتبار، نقترح تقديم مساهمة في تحليل سلوك ألواح الخرسانة المسلحة المقواة بمواد مركبة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تحسناً من حيث القوة والأداء الميكانيكي للبلاطة الخرسانية معززة بنسيج مركب بأبعاد مختلفة. ساهم هذا التحسين في زيادة كبيرة للغاية في قوة 99.81% لطبقة واحدة من مركب. من الناحية الاقتصادية، فإن عملية تعزيز الألواح الخرسانية السمكية سهلة التنفيذ ويمكن أن تتنافس مع طرق التعزيز التقليدية الأكثر تعقيداً.

**الكلمات المفتاحية:** ألواح ، التعزيز ، راتنجات البوليستر ، النسيج المركب

## Sommaire

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

1.1- contexte.....	1
I.2- Description de la méthodologie de travail.....	1
I.3- Structure du document.....	2

### Chapitre I

#### Etude bibliographique

<b>I.1.Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.Constituants du béton .....</b>	<b>3</b>
I.2.1.Les sables .....	3
I.2.2.Le ciment.....	4
I.2.3.l'eau de gâchage .....	4
I.2.4.les graviers .....	4
I.2.5.Les supers plastifiants.....	5
<b>I.3.Les matériaux composites .....</b>	<b>5</b>
I.3.1.Caractéristiques générales .....	6
I.3.2.Avantages des matériaux composites .....	7
I.3.3.Constitution des matériaux composites .....	8
I.3.3.1.Les matrice : le différent type de résine.....	9
I.3.3.2Les renforts : Différent type de Fibres synthétiques .....	12
I.3.4.Applications des matériaux composites.....	19
a- Le système avec une cure in-situ.....	19
b- Le système préfabriqué .....	20
<b>I.4.Le Renforcement .....</b>	<b>20</b>

---

Les avantages du renforcement .....	20
I.4.2.Les causes qui conduisent à renforcer les structures .....	20
I.4.3.Méthodes de renforcement des structures en béton armé.....	21
a-Chemisage en béton armé .....	21
b- Chemises en acier .....	22
c- Tôles collées .....	23
d- Matériaux composites.....	24
e- Précontrainte additionnelle .....	25
<b>I.5.les dalles en béton armé.....</b>	<b>26</b>
<b>I.6.Les modes de propagation des fissures .....</b>	<b>26</b>
<b>I.7.conclusion.....</b>	<b>27</b>

## Chapitre II

### CARACTERISATION DES MATERIAUX & FORMULATION DU BETON

<b>II.1.Introduction .....</b>	<b>28</b>
<b>II.2.Matériaux utilisées pour la composition du béton .....</b>	<b>28</b>
II.2.1. Sables .....	28
II.2.1.1. Sable de dune.....	28
II.2.1.2Sable de carrière.....	29
II.2.2 Ciment .....	29
II.2.3.Gravier.....	30
II.2.4.Eau de gâchage .....	30
II.2.5.Super Plastifiant .....	30
<b>II.3.Méthodes D'essais Et Caractéristiques Des Granulats .....</b>	<b>31</b>
II.3.1.Masse Volumique Apparente Et Absolue .....	31
II.3.1.1. la masse volumique apparente .....	31
II.3.1.2. La masse volumique absolue.....	31
II.3.2 Essai équivalent de sable.....	32
II.3.3.La porosité inter granulaire .....	32
II.3.4. L'analyse granulométrique.....	33
II.3.5.Module de finesse.....	33
II.3.6. L'essai micro Deval .....	37
II.3.7.L'essai De Los Angeles.....	38

---

<b>II.4.Méthode de formulation du béton.....</b>	<b>39</b>
<b>II.5.Caractérisation des bétons a l'état frais .....</b>	<b>40</b>
II.5.1-Maniabilité .....	40
II.5.2-Masse Volumique.....	41
<b>II.6.Ferraillage .....</b>	<b>41</b>
<b>II.7.Mâtereau Composite.....</b>	<b>42</b>
II.7.1.Matrice : résine polyester.....	42
II.7.2.Les renforts : tissu de fibre de carbone .....	44
II.7.3.Composite.....	44
<b>II.8.Fabrication est préparation des spécimens .....</b>	<b>45</b>
II.81.Spécimens cubique .....	45
II.8.2.Spécimens prismatique (dalles) .....	45
<b>II.9.Collage des bandes de composite sur les dalles .....</b>	<b>47</b>
<b>II.10.Conclusion .....</b>	<b>49</b>

### Chapitre III

#### Etude expérimentales et analyse des résultats

<b>III.1.Introduction.....</b>	<b>50</b>
<b>III.2.Procédés des essais .....</b>	<b>50</b>
III.2.1.Essai de compression sur les spécimens cubique.....	50
III.2.2.Essai de traction sur le composite .....	51
III.2.3.Essai de flexion sur les dalles .....	52
<b>III.3.analyse des résultats .....</b>	<b>53</b>
III.3.1.Resistance mécanique du béton en compression.....	53
III.3.2.Essai de traction directe sur composite .....	54
III.3.3.Essai de flexion simple sur les dalles .....	56
III.3.3.1.Modes de rupture des dalles à la flexion.....	59
<b>III.4.Discussion et conclusion .....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>63</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>65</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>67</b>



Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> - les différents types de composites .....	6
<b>Tableau I.2</b> - Comparaison qualitative entre fibres.....	8
<b>Tableau I.3</b> - Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (td) non renforcées	11
<b>Tableau I.4</b> - Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (TP) non renforcées ...	11
<b>Tableau I.5</b> -. Principales différences entre matrices TP et TD.....	12
<b>Tableau I.6</b> - Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone .....	14
<b>Tableau I.7</b> - Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.....	15
<b>Tableau I.8</b> - Caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide.....	15
<b>Tableau II.1</b> - Composition chimique du ciment .....	29
<b>Tableau II.2</b> - Composition minéralogique du clinker.....	29
<b>Tableau II.3</b> - propriétés chimique et physique de super plastifiant.....	30
<b>Tableau II.4</b> - Analyse granulométrique du sable de dune.....	34
<b>Tableau II.5</b> - Analyse granulométrique du sable de carrière .....	35
<b>Tableau II.6</b> - Analyse granulométrique du sable corrigé.....	36
<b>Tableau II.7</b> - Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	37
<b>Tableau II.8</b> -. Caractéristique physique des matériaux utilisés .....	38
<b>Tableau II.9</b> - Composition de bétons d'étude .....	40
<b>Tableau II.10</b> - l'affaissement et masse volumique de béton a l'état frais .....	41
<b>Tableau II.11</b> - Caractéristique de la résine polyester .....	43
<b>Tableau II.12</b> - Caractéristique de durcisseur.....	44
<b>Tableau II.13</b> - Caractéristiques techniques de tissu de fibre de carbone .....	44
<b>Tableau II.14</b> - Caractéristiques physiques et mécaniques de tissu de fibre de carbone .....	44
<b>Tableau III.1</b> - Résultats des essais de compression.....	53
<b>Tableau III.2</b> - Résultats de l'essai de flexion .....	56

Liste des figures

<b>Figure I.1-</b> les différents types de composites.....	6
<b>Figure I.2-</b> Différents constituants d'un matériau composite.....	9
<b>Figure I.3-</b> Différentes familles de matrices .....	10
<b>Figure I.4-</b> Différents types de fibres.....	13
<b>Figure I.5-</b> Procédé de fabrication de la fibre de Carbone .....	14
<b>Figure I.6-</b> Différents types de composite .....	16
<b>Figure I.7-</b> Histogramme des propriétés en traction des fibres .....	16
<b>Figure I.8-</b> Chaîne et trame d'un tissu .....	17
<b>Figure I.9-</b> Différents types d'armures.....	17
<b>Figure I.10-</b> Tissu de fibres de carbone TFC .....	18
<b>Figure I.11-</b> Tissus de fibres de verre .....	19
<b>Figure I.12-</b> Réparation de poutre par adjonction d'armature .....	22
<b>Figure I.13-</b> Chemisage en béton armée .....	22
<b>Figure I.14-</b> .Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier .....	23
<b>Figure I.15-</b> Application de plats métalliques selon le procédé Hamelin 2002.....	23
<b>Figure I.16-</b> Renforcement des poutres par matériaux composites .....	24
<b>Figure I.17-</b> Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites .....	24
<b>Figure I.18-</b> Exemple de renforcement d'une dalle par fibre de carbone .....	25
<b>Figure I.19-</b> Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.....	25
<b>Figure I.20 -</b> Mode d'ouverture (ou clivage) .....	26
<b>Figure I.21-</b> Mode de glissement droit.....	27
<b>Figure I.22-</b> Mode de glissement vis .....	27
<b>Figure II.1-</b> Sable de dune .....	28
<b>Figure II.2-</b> Sable de carrière .....	29
<b>Figure II.3-</b> Gravier (3/8).....	30
<b>Figure II.4-</b> Essai de la masse volumique apparente.....	31
<b>Figure II.5-</b> Essai de la masse volumique absolue .....	32
<b>Figure II.6-</b> Equivalent de sable .....	32
<b>Figure II.7-</b> la série des tamis.....	33

<b>Figure II.8-</b> Essai de micro Deval .....	37
<b>Figure II.9-</b> La machine de Los Angeles .....	38
<b>Figure II.10-</b> Courbe granulométrique .....	39
<b>Figure II.11-</b> Essai d'affaissement au cône d'abrams.....	40
<b>Figure II.12-</b> Masse volumique du béton .....	41
<b>Figure II.13-</b> Treillis soudée .....	42
<b>Figure II.14-</b> Résine polyester et durcisseur .....	42
<b>Figure II.15-</b> Plaque de composite (tissu+ résine) .....	45
<b>Figure II.16-</b> Spécimens cubique .....	45
<b>Figure II.17-</b> Spécimens prismatique (dalles).....	47
<b>Figure II.18 -</b> Procédée de renforcement dalle 1 par collage de TFC (56*10) cm .....	48
<b>Figure II.19-</b> Procédée de renforcement dalle 2 par collage de TFC (56*20) cm .....	48
<b>Figure II.20-</b> Procédée de renforcement dalle 3 par collage de TFC (56*30) cm.....	49
<b>Figure III.1-</b> Description d'essai de compression .....	51
<b>Figure III.2-</b> description d'essai de traction.....	52
<b>Figure III.3-</b> Dimensions d'éprouvette de composite.....	52
<b>Figure III.4-</b> Description d'essai de flexion.....	53
<b>Figure III.5-</b> Rupture du composite dans un essai de traction .....	54
<b>Figure III.6-</b> Courbe de force déplacement de l'éprouvette 1.....	54
<b>Figure III.7-</b> Courbe de force déplacement de l'éprouvette 2. ....	55
<b>Figure III.8-</b> Courbe de force déplacement de l'éprouvette 3. ....	55
<b>Figure III.9-</b> Courbe force –déplacement d'une dalle non renforcée .....	56
<b>Figure III.10-</b> Courbe force –déplacement d'une dalle renforcée par bande composite (56*10) cm .....	57
<b>Figure III.11-</b> Courbe force –déplacement d'une dalle renforcée par bande composite (56*20) cm.....	57
<b>Figure III.12-</b> Courbe force –déplacement d'une dalle renforcée par bande composite (56*30) cm .....	58
<b>Figure III.13-</b> Confrontation des courbes Forces –déplacements des différentes variantes de Dalles renforcées par des bandes composites en carbone et dalle non renforcée .....	58
<b>Figure III.14-</b> L'évolution de résistance des dalles à la flexion simple.....	59

<b>Figure III.15</b> -rupture d'une dalle (fissure diagonale sur la zone tendue sous le composite .....	60
<b>Figure III.16</b> -Rupture d'une dalle (fissure vertical de flexion .....	60
<b>Figure III.17</b> - Rupture d'une dalle renforcée (décollement de composite).....	61

# **Introduction générale**

## Introduction générale

### 1.1- Contexte :

D'une manière générale, les matériaux composites à matrice polymère et à renforts de fibres de carbone, présentent des avantages tels que : faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation. Considérables dès qu'il s'agit de la protection, et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton tels que les dalles.

Ces dernières années, le collage Des composites comme les Tissu en Fibres de Carbone TFC, est devenu une méthode très populaire pour le renforcement des dalles en béton armé soumises à la flexion. En fait, l'application des composites pour le renforcement des structures s'est effectué pour la première fois au milieu des années 1980.

Le renforcement des dalles en béton armé par des mâtereaux composites (TFC) peut être considéré comme une solution vis à vis de la flexion. Dans le cadre du projet de recherche sur le développement des techniques de renforcement des dalles en béton armé par les matériaux composites, ce travail consiste à apporter une contribution à l'étude des dalles renforcées par des bandes composites soumises à un chargement vertical de flexion.

### 1.2-Description de la méthodologie de travail :

Le but de notre travail consiste à étudier l'efficacité de la technique de renforcement externe des dalles par des bandes composites de dimensions différentes dans l'amélioration de la réponse mécanique.

Un total de trois dalles renforcées et une dalles de référence (témoin), de dimensions 60x50x5 cm<sup>3</sup> ont été réalisées et testées pour étudier l'influence de la surface du bande composite qui augmente dans chaque renforcement avec un pas de 10cm sur le mode de rupture de la dalle sous l'effet d'une charge concentrée au centre de gravité de la dalle.

## **1.3- Structure du document :**

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en (03) chapitres et est terminé par une conclusion générale.

**Le premier Chapitre** présente une analyse bibliographique sur les matériaux composites, ces caractéristiques et leurs différents composants ainsi que les méthodes antérieures de renforcement des structures en béton armé et fait un survol sur l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des structures.

**Le second chapitre** s'intéresse à la caractérisation des matériaux utilisés entrant dans la composition d'un béton ordinaire, est consacré aux méthodes de formulation du béton et aux résultats des essais expérimentaux à l'état frais.

**Le troisième chapitre** présente les investigations expérimentales réalisées au sein du laboratoire de l'université et illustre les résultats obtenus (compression simple sur les cubes, traction axiale sur le matériau composite) ,et s'attarde à l'aspect théorique du comportement des structures en béton armé renforcées par matériaux composites en flexion en développant les diagrammes relatifs au sujet.

# Chapitre I

Etude Bibliographique

### **I.1.Introduction :**

Le matériau le plus utilisé dans la construction est certainement le béton. Le béton est considéré comme une pierre artificielle, néanmoins il subit durant sa durée de vie des dégradations ( fissurations) et des vieillissements, qui proviennent soit des changements ou des rénovations d'usage et d'exploitation, soit d'une détérioration de sa capacité portante engendrée par un accroissement des charges Dans la plupart des cas, les détériorations du matériau béton entraînent des pertes de résistance et autres faiblesses qui nécessitent un renforcement de la structure pour améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent.

Le renforcement des éléments en béton par des composites, consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et de la résistance pour répondre à des nouvelles exigences d'exploitation ou des conditions non prévues à l'avance, pendant la phase de conception et de calcul.

### **I.2.Constituants du béton :**

La composition du béton a une grande influence sur ses caractéristiques ; le choix de la formulation a un impact direct sur les résistances. Le béton est un matériau composite obtenu à partir d'un mélange de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable) liés entre eux par un liant hydraulique (une pâte de ciment + eau), avec des adjuvants et des additions pour améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

#### **I.2.1.Le sable :**

Le terme sable englobe tous les granulats 0/D conformes aux définitions des normes **P18-541[P 18-541, 2007]**. Le sable influe selon ses qualités sur les propriétés des bétons ; il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange et il doit être dense provenant de roches chimiquement inertes tels que : les calcaires durs, les granits et les quartzites Suivant leurs grosseurs les sables sont classés en:

- Sable fin de 0.03 à 0.315mm ;
- Sable moyen de 0.315 à 2mm ;
- Sable gros de 2 à 5mm ;

Ils peuvent aussi être distingués selon leur origine :

- Sables naturels roulés : Sable de rivière, Sable de mer, Sable de dune, Sable de carrière.

- Sables artificiels : On peut les obtenir Par:
  - Broyage de certains déchets ;
  - Transformation industrielle de l'argile ;
  - Trempe à l'eau et à l'air du laitier de haut fourneau [1].

### **I.2.2.Le ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique. C'est un matériau anhydre finement broyé, qui par simple mélange avec l'eau, développe des hydrates dont l'imbrication rigidifie le mat granulaire non cohésif de départ en matériau cohésif présentant des propriétés mécaniques élevées. D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être définie comme un mélange d'oxyde basique, CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO<sub>2</sub>, noté S, AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, noté A, ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, noté F, en notation cimentaire [2]. Dans les bétons de sable, les ciments utilisés doivent être conformes aux normes. Ils peuvent avoir deux rôles essentiels : assurer la résistance du béton et combler les vides entre les grains de sable [3].

### **I.2.3.l'eau de gâchage :**

Est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès.

### **I.2.4.les graviers :**

Pour le gravier est un granulat composé d'un mélange de sable et de gravillons, qui entrent dans la composition des bétons. Ils sont spécifiés dans la norme [XP P 18-545].

Constitué par un ensemble de grains minéraux appelés fines, sables, gravillons ou cailloux suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Ce granulat constitue le squelette du béton. Peu déformables, ils améliorent la résistance de la matrice de ciment en s'opposant à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait.

La norme européenne définit le granulat comme le matériau granulaire utilisée en construction. Un granulat peu être naturel, artificiel ou recyclée.

- Le Granulat naturel : est le granulat d'origine minérale subi aucune transformation autre que mécanique comme le calcaire, sont soit des granulats roulés ou des granulats concassé de carrières.

- Le granulats artificiel : est le granulats d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres comme le schiste expansé, argile expansée, le LHF.
- Le granulats recyclé : est le granulats résultant de la transformation de matériaux inorganique antérieurement utilisés en construction comme le béton concassé.

### **I.2.5. Les superplastifiants :**

Les super-plastifiants sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton soluble dans l'eau ils agissent par une défloculation de la pâte et par une dispersion des grains de ciment. Sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, Leur mode d'action principal est d'augmenter la maniabilité des bétons. Cependant, comme il est expliqué dans cette section, il est possible de les utiliser comme réducteurs d'eau afin de diminuer le rapport E/C et d'ainsi augmenter la résistance en compression des bétons avec tous les bénéfices que cela comporte. L'utilisation de super-plastifiant permet d'abaisser la teneur en eau de 10 à 30% tout en maintenant une même maniabilité.

Les super plastifiants sont utilisés généralement pour les bétons qui nécessitent une bonne maniabilité, pour la fabrication, pour les bétons à hautes résistances et bétons très ferrailé [4].

### **I.3. Les matériaux composites :**

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (I-1).

Un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamentaire et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

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

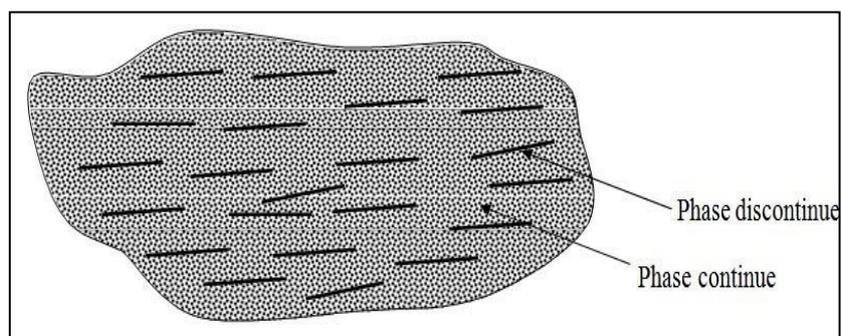
également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés: les pigments de coloration, l'isolation thermique ou acoustique [5][6].

**Tableau I.1-** les différents types de composites.

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/Composites matrice organique - papier -carton -panneaux de fibres toiles enduites -matériaux d'étanchéité et pneumatiques	-Résine/fibre cellulosique - Résine /copeaux - Résine / tissus - Elastomère - Caoutchouc/ acier	- Imprimerie - Bâtiment - Toitures - Automobile
2/composites à matrice minérale -bidon -Composite -carbone	-Ciment /sable /granulats -Carbone / fibres	-Gène civil -Aviation -Espace
3/ Composites à matrice métallique	-Aluminium /fibres de bore -Aluminium /fibres de carbone	- Aéro - Spacial

### I.3.1.Caractéristiques générales :

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue a habituellement des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (**figure I-1**).



**Figure I.1-** les différents types de composites

Les propriétés des matériaux composites résultent de :

- Les propriétés des matériaux constituants ;
- Leurs distributions géométriques ;
- Leurs interaction.

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

- La nature des constituants et leurs propriétés ;
- La géométrie du renfort, et sa distribution ;
- La nature de l'interface : matrice-renfort ;
- La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation).

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse), la concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, sa distribution uniforme assurera une homogénéité du matériau composite.

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

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

Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées [7] [8].

### **I.3.2. Avantages des matériaux composites :**

Les matériaux composites présentent des avantages tels que:

- résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée ;
- poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est inférieure de 10% au poids des platines d'acier ;
- maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées ;
- la durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la

corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leur zones de fixation seront fissurées ;

- tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente à celle des platines d'acier ;
- la maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue ;
- réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'acier prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites ;
- Le choix est porté sur les fibres de carbone en comparaison avec les fibres de verre et les fibres d'aramide tableau (I-2) [9].

**Tableau I.2-** comparaison qualitative entre fibres

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibres de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquate
Résistance alcaline	Très bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquate	Très bon

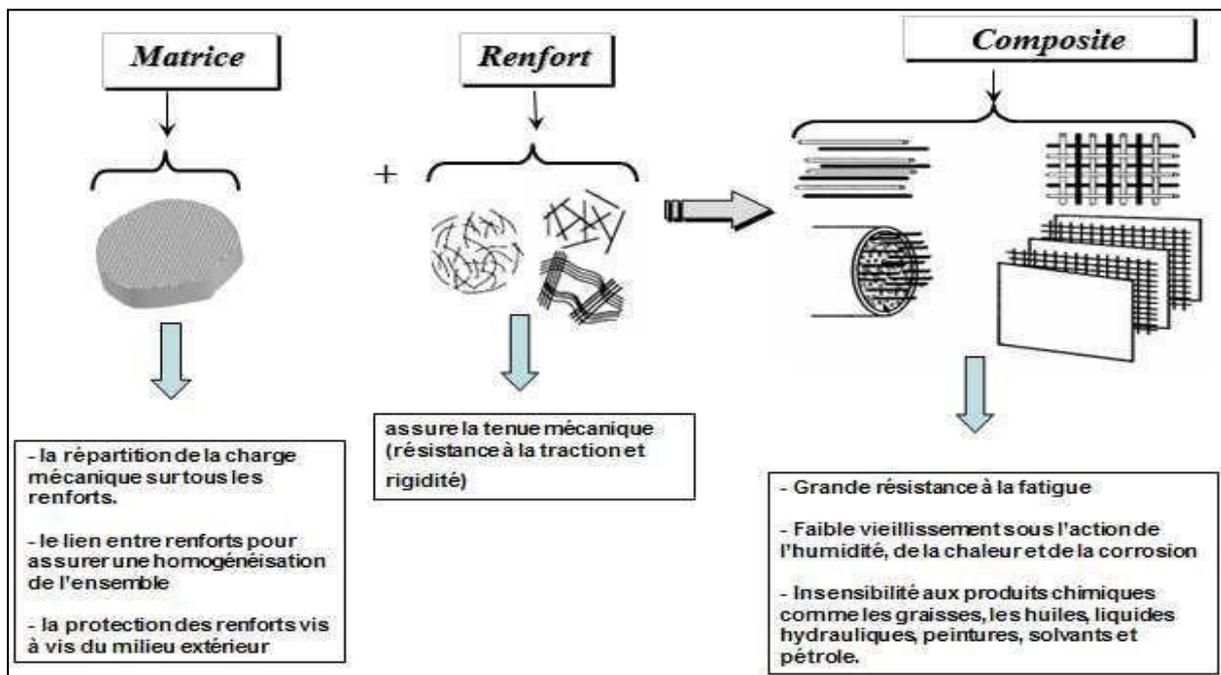
### I.3.3. Constitution des matériaux composites :

Un matériau composite est constitué de deux phases :

Une phase continue qui est la matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, assure la protection des fibres et le transfert des efforts vers ces dernières, plus rigides et plus résistantes. Son rôle consiste donc à maintenir les fibres en place, de transmettre et de distribuer les sollicitations mécaniques extérieures au renfort, de fournir un support latéral agissant contre le voilement des fibres sous compression et de les protéger contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales (**figure I- 2**).

Une phase discontinue constituée de renforts ou fibres qui assurent la fonction mécanique (résistance).

Le comportement mécanique des matériaux composites est gouverné par plusieurs facteurs principaux, tels que: le type et nature des fibres de renfort, le type de matrice, la fraction volumique des constituants [10].

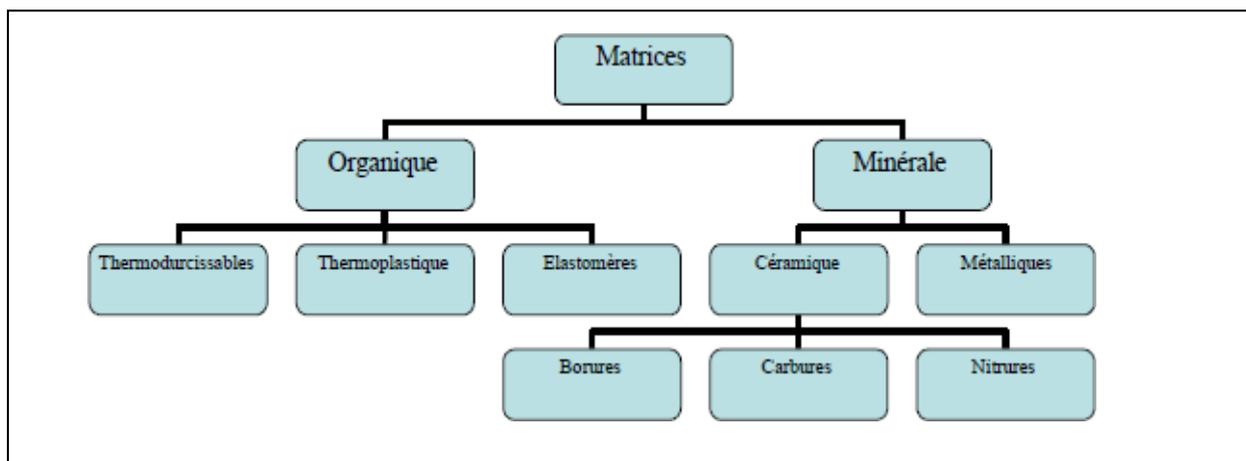


**Figure I.2-** Différents constituants d'un matériau composite

### I.3.3.1. Les matrices :

Les matrices sont des matériaux isotropes, leur utilisation dans les composites permet de coller des fibres entre elles, de transmettre les efforts aux fibres et d'assurer une protection des fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques. La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion chimique. Deux grandes familles de matrices en résine polymère sont largement connues: Les résines thermoplastiques (TP) et les résines thermodurcissables (TD). Il y a aussi les élastomères, qui sont utilisés parfois dans l'industrie automobile [11].

L'organigramme ci-dessous (**Figure I.3**) présente les différentes familles de matrices :



**Figure I.3-** Différentes familles de matrices

### ➤ Différents types de résines

Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. Ces deux types de résines possèdent, la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée [9].

- **Les résines thermodurcissables (TD)**

Elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites, parmi ceux qui sont les plus utilisées:

- **les résines polyester insaturées:** C'est la résine la plus utilisée dans les composites de grande application. Elles passent successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction du durcissement dépend de la réactivité de la résine, et de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.).

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyester sont classés en: résines souples, résines semi-rigides et résines rigides.

Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide.

**Tableau I.3-** Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées

Polymère	Masse spécifique (kg /dm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polyester(UP)	1.2		3	120
Vinyle-ester	1.15		3.5	140
Phénolique	1.2	40 -50	3	120 – 150
Epoxyde	1.1 – 1.4	50 – 90	3	120 -200
Polyuréthane(UP)	1.1 – 1.5	20 – 50	1	100 – 120
Poly-imide	1.3 – 1.4	30 -40	4	250 – 300

• **les résines thermoplastiques (TP)**

L'intérêt des résines thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois des matières premières disponibles et des procédés de fabrication, toutefois ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques, et thermomécaniques faibles.

**Tableau I.4.** Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques(TP) non renforcées

Polymère	Masse spécifique (kg /dm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polypropylène(PP)	1.1 -1.2	20 – 30	1 -1.6	85 – 115
Polytéréphtalate butylénique (PBT)	1.5	45 – 55	2.2 – 2.6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1.6	55 – 75	2 – 2.2	105 – 120
Polyoxide de phénylène (PPO-)	1.3	55 – 65	2.4-2.6	80-105
Polyoxyméthylène (POM)	1.6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1.3-1.4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1.3-1.4	195	4.9	275
Polyéther-imide (PEI)	1.5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1.6	85	2.6	180

Polyéther-éther-cétone (PEEK)	1.5	100	3.7	> 240
----------------------------------	-----	-----	-----	-------

Les deux types de résines, qui sont actuellement, utilisées, présentent des propriétés différentes, les principales différences sont résumées dans le tableau (I.5).

**Tableau I.5-** Principales différences entre matrices TP et TD

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

### I.3.3.2. Les renforts :

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

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

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

Il existe deux types de fibres :

- Fibres courtes : quelque centimètres ou fraction de millimètre, les feutres, les mats et les fibres courtes impactées utilisées en moulage.
- Fibres longues : coupées au moment de la fabrication du matériau composite, utilisées telles quelles ou bien tissées.

Ces différents types de fibres sont classés selon la nature de leurs composants:

- Des renforts à base de fibres unidirectionnelles : orientés suivant une même direction.

- Des renforts à base de fibres bidimensionnelles : surfaces tissées (tissus).
- Des renforts à base de fibres tridimensionnelles : volumes préformés ou non constitués par des fibres orientées [12].

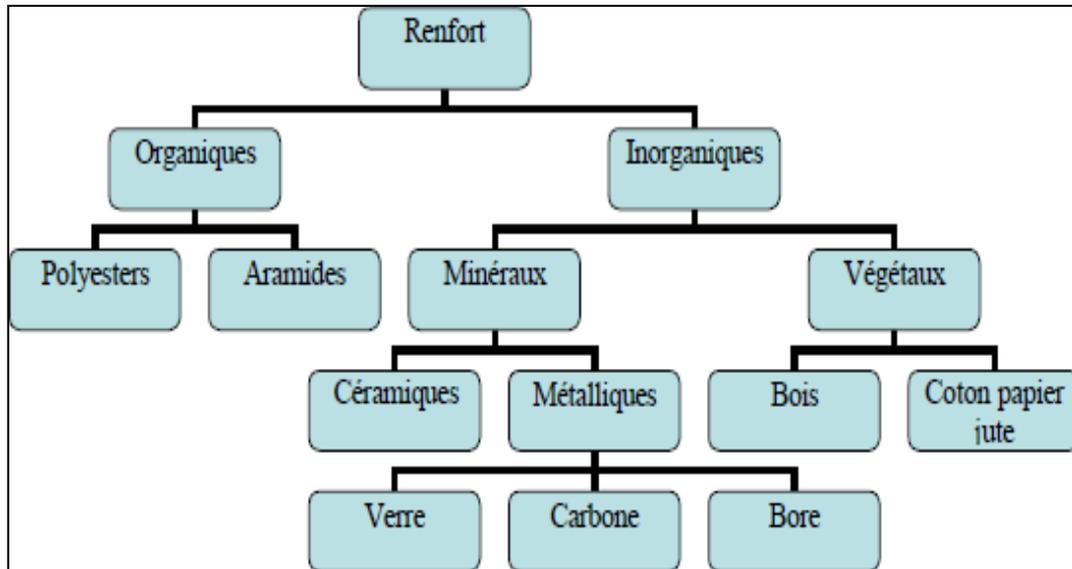


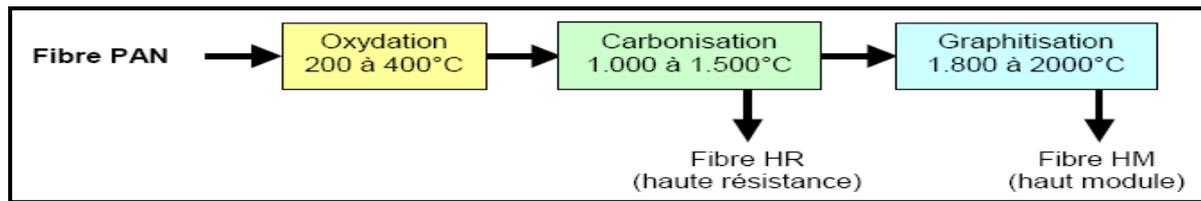
Figure I.4- différents types de fibres

### ➤ Différent type de Fibres synthétiques

- **Fibre de carbone**

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur. Les précurseurs utilisés sont des fibres acryliques, elles sont élaborées à partir de polyacrylonitrile (PAN), et la qualité finale des fibres dépend en grande partie de la qualité du précurseur utilisé.

De façon globale le principe de fabrication repose sur le fait de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion. Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion (entre 500 et 10000 filaments voir plus). On leur fait subir quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonatation, une graphitassions et pour finir un traitement de surface que nous détaillerons par la suite [13].



**Figure I.5-** Procédé de fabrication de la fibre de Carbone

**Tableau I.6-** caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.

Caractéristique	fibres de carbone haut module HM	fibres de carbone haute résistance HR
Masse volumique ( $\text{Kg/m}^3$ )	1800	1750
Module d'Young $E_f$ ( $\text{N/mm}^2$ )	390 000	230 000
Contrainte à la rupture ( $\text{N/mm}^2$ )	2 500	3 200
Allongement à la rupture (%0)	0.6	1.3

- **Les inconvénients de la fibre de carbone**

- le comportement transversal des fibres est relativement mauvais ;
- Le matériau, de par sa nature isotrope conduit à des comportements complexes, et donc à des difficultés de modélisation et de conception. De plus, lors des expérimentations, cela complexifie également l'identification des propriétés du matériau ;
- La fibre de carbone possède de plus une mauvaise résistance aux chocs et à l'abrasion ;
- le diamètre de la fibre est inférieur à 3 microns, le risque pulmonaire est important (fibres dites respirables) ; si le diamètre est supérieur à 8 microns, le risque est quasiment nul ; entre les deux, il faut savoir être prudent et vigilant et prendre en compte le paramètre longueur/diamètre. Plus ce rapport est élevé, plus on est en présence de fibres réputées dangereuses car longues et fines pouvant pénétrer profondément dans l'arbre respiratoire ;
- la conductivité élevée du matériau peut conduire à des électrocutions, comme lorsqu'il est utilisé pour la construction d'un mat de voilier par exemple [13].

- **Fibres de verre**

Les fibres de verre sont élaborées par filage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées aux environs de 1250°C. A cette température,

la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues. Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique [12].

**Tableau I.7-** caractéristiques mécaniques des fibres de verre

Caractéristique	Verre type E	Verre type R
Masse volumique ( $\text{Kg/m}^3$ )	2600	2550
Module d'Young $E_f$ ( $\text{N/mm}^2$ )	74000	86000
Contrainte à la rupture ( $\text{N/mm}^2$ )	2500	3200
Allongement à la rupture (%0)	3.5	4

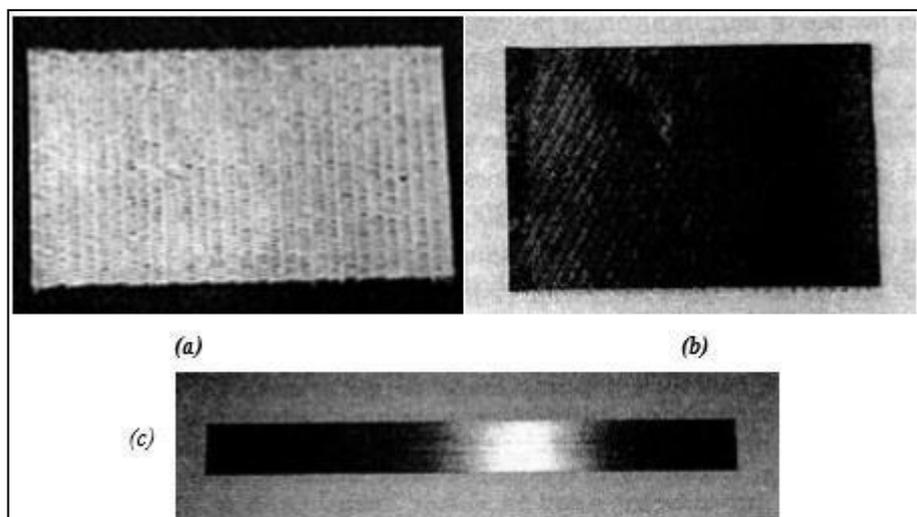
• **Fibres d'aramide**

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevés sont généralement connues sous le nom de "Kevlar"

L'élaboration des fibres d'aramide est effectuée à basse température puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement afin d'augmenter leur module d'élasticité [12].

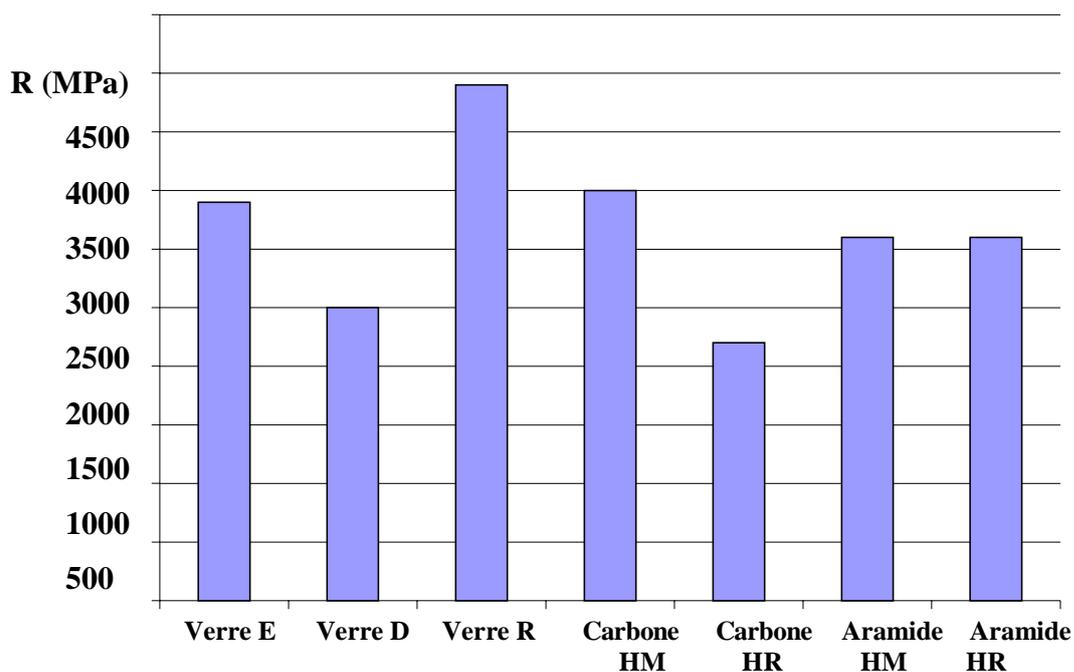
**Tableau I.8-** caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide

Caractéristique	Kevlar 29	Kevlar 49
Masse volumique ( $\text{Kg/m}^3$ )	1440	1450
Module d'Young $E_f$ ( $\text{N/mm}^2$ )	60000	130000
Contrainte à la rupture ( $\text{N/mm}^2$ )	3000	2900
Allongement à la rupture (%0)	36	2.3



**Figure I.6-** Différents types de composite :

(a) tissu de fibre de verre ; (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué de fibre d'aramide

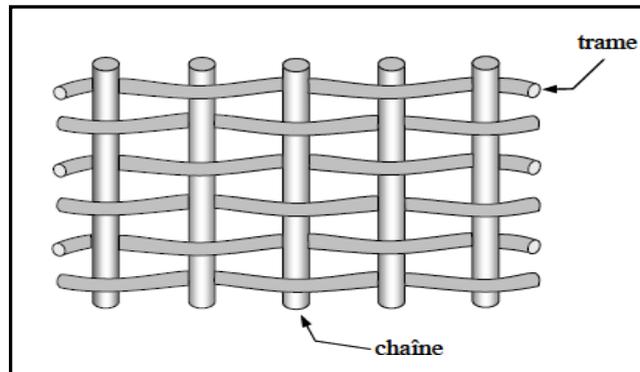


**Figure I.7 -** Histogramme des propriétés en traction des fibres

### ➤ Les tissus de renfort

Le tissu de renfort confère au composite ces caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance et dureté, ce renfort améliore également des propriétés physiques telles que, la tenue au feu, résistance à l'abrasion. Les tissus sont formés par l'entrecroisement perpendiculaire et alternatif des fils de chaîne et de trame [10] :

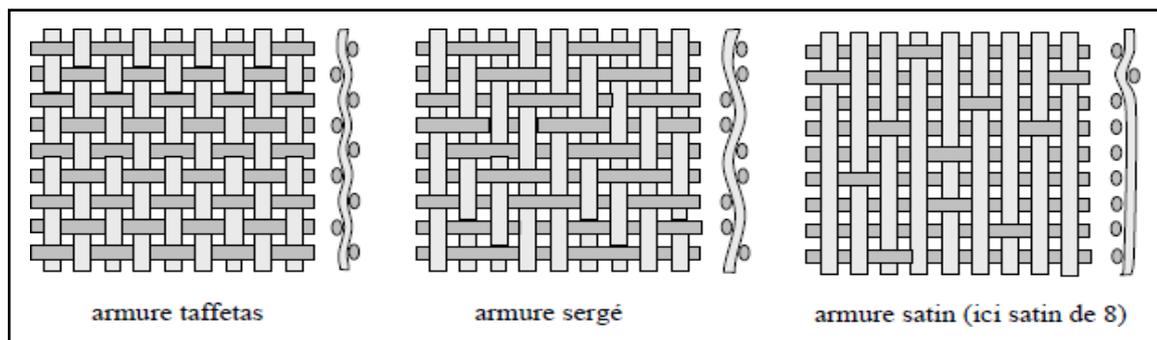
- **Chaîne:** Fils disposés les uns à côté des autres dans le sens de la longueur du tissu.
- **Trame:** Ce sont les fils perpendiculaires aux fils de chaînes.
- **Armure:** c'est le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.



**Figure I.8-** Chaîne et trame d'un tissu

Leurs caractéristiques résident:

- Dans l'égalité du nombre de fil de chaîne et de trame dans l'armure.
  - Dans chaque rapport, le fil de chaîne est recouvert qu'une seule fois par le fil de trame.
- On distingue trois types d'armures fondamentales: l'armure toile, l'armure sergé et l'armure satin.



**Figure I.9-** Différents types d'armures

- **Tissu de fibres de carbone**

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour équilibrer les tractions induites dans la section.

La mise en œuvre du composite directement sur le support permet de mouler la forme exacte

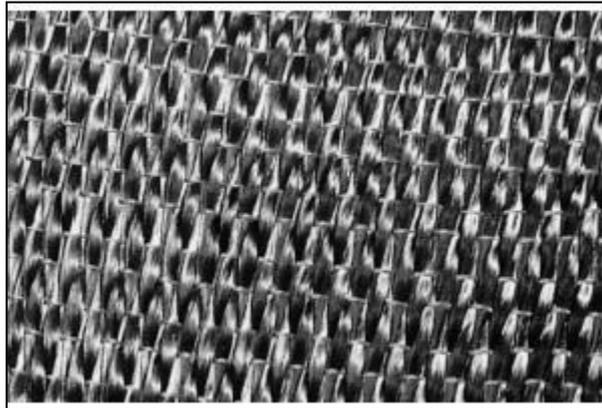
de la pièce à renforcer, de ne pas manier des plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine.

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structural par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone.

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances en fonctionnement. Le procédé a essentiellement un rôle de renforcement structural aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants [14].

- **Les avantages du TFC sont nombreux**

- résistance et module élastique élevés,
- insensibilité à la corrosion,
- légereté,
- grande souplesse de mise en œuvre sur des surfaces de toute forme et de toute nature,
- Excellente résistance à la fatigue et à l'abrasion.

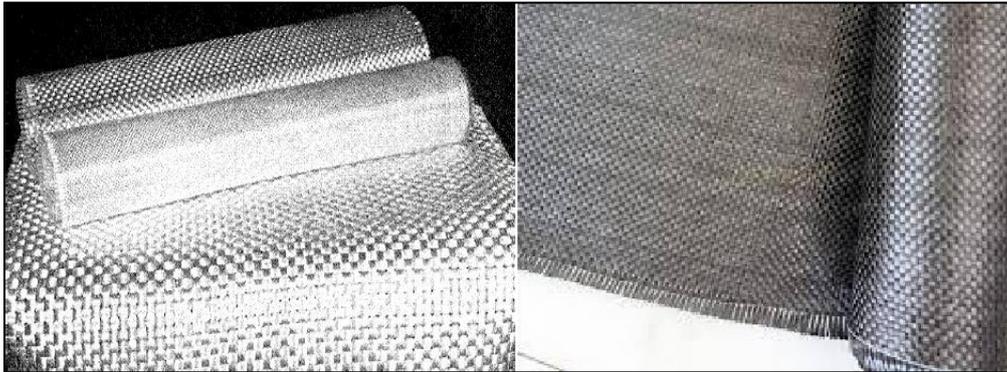


**Figure I.10-** Tissu de fibres de carbone TFC

- **Tissu de fibres de verre**

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. ces produit confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/ prix.

Selon les compositions chimiques des fibres de verre, on distingue les variétés E, R, S. Un pourcentage élevé de silice améliore les propriétés mécaniques des verres et élève leur température maximale d'utilisation.



**Figure I.11-** Tissus de fibres de verre

#### **I.3.4.Applications des matériaux composites :**

Parmi les multiples applications des matériaux composites dans l'ingénierie civile, nous pouvons citer [13]:

- Construction d'édifices et d'ouvrage d'art léger, et Réalisation de formes complexes de grande portée;
- Renforcement structurel d'édifices existants, afin de respecter de nouvelle norme ou en prévision d'utilisation nouvelle d'un bâtiment (ajout d'étage, changement du type d'exploitation). Utilisation principalement dans ce cas de la fibre de carbone pour le renforcement de poutres, poteaux et dalles sous flexion et cisaillement;
- Utilisation de produits dérivés du béton avec ajouts de fibre, béton armé avec renfort en fibre de verre ou de carbone ;
- Transmission et distribution d'électricité temporaire et durable, pylônes électriques modulables et déplaçables;
- Structures destinées aux réservations d'eau;
- Panneaux pour murs et planchers;

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite : le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué.

##### **a. Le système avec une cure in-situ :**

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un composite sur des surfaces de béton :

- le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du

béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture,

- le tissu peut être pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton à renforcer.

**b. Le système préfabriqué :**

Ce processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif.

**I.4. Le Renforcement :**

Les dégradations du matériau béton entraînent des faiblesses qui nécessitent un renforcement de la structure pour améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent afin d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et lui conférer une certaine résistance pour mieux répondre aux nouvelles conditions de sollicitations.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les structures en béton armé. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions [16].

**I.4.1. Les avantages du renforcement :**

- la résistance, la ductilité et la déformation d'un béton renforcé sont plus élevées,
- la flexibilité des composites permet de confiner des colonnes de différentes géométries,
- Le poids de l'élément renforcé par les composites est peu modifié, vu la légèreté des composites,
- L'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures,
- Certains composites résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel-dégel et à l'humidité [16].

**I.4.2. Les causes qui conduisent à renforcer les structures :**

Les causes qui conduisent à renforcer la structure sont nombreuses, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier, qui doit subir un traitement spécifique [16].

Les causes les plus fréquentes sont :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure, exemple : changement d'usage de la structure, augmentation du niveau d'activité, installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels, etc.

- Défauts dans le projet ou dans l'exécution, exemple : une insuffisance de ferrailage, mauvaise disposition des armatures, matériaux de mauvaise qualité, dimensions insuffisantes des éléments structurels.etc.
- Rénovation des structures anciennes,
- Changement de la forme de la structure, exemple : suppression des éléments porteurs, élargissement des portées, ouverture de passages en dalles, etc.
- Dégâts dans la structure : corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impacts contre la structure, incendies.
- Nécessité d'améliorer les conditions en service : limiter les déformations et les flèches, réduire l'intensité des contraintes sur les armatures, diminuer la vitesse de propagation et ouvertures des fissures.

#### **I.4.3.Méthodes de renforcement des structures en béton armé :**

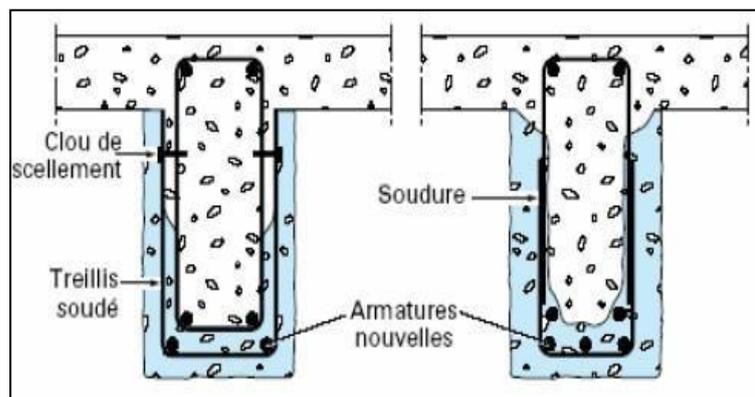
Actuellement, plusieurs méthodes et techniques de réparation ou/et de renforcement sont proposées dans la littérature. Le choix de la technique dépend de plusieurs paramètres, tels que :

- le degré d'endommagement de la structure ou des éléments,
- les matériaux de renforcement,
- nature et la forme de l'élément, etc.

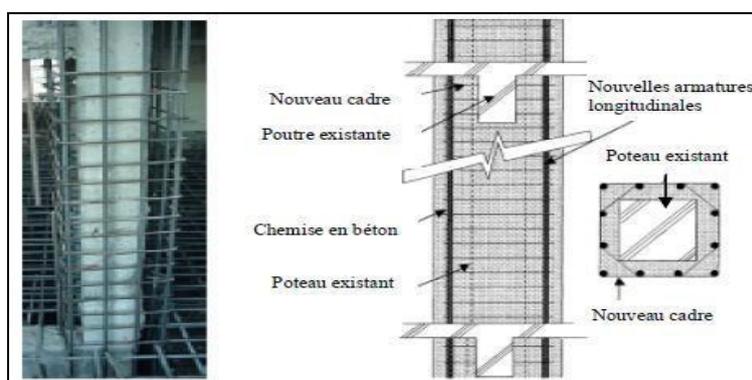
La solution la mieux adaptée sera alors définie en fonction de la structure à renforcer, de l'espace disponible pour l'exécution des travaux et de l'usage futur de la structure renforcée ou réparée, le cout de l'opération de renforcement [16][17][18].

##### **a. Chemisage en béton armé**

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter considérablement les sections, par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage [16][17].



**Figure I.1 2-** Réparation de poutre par adjonction d'armature

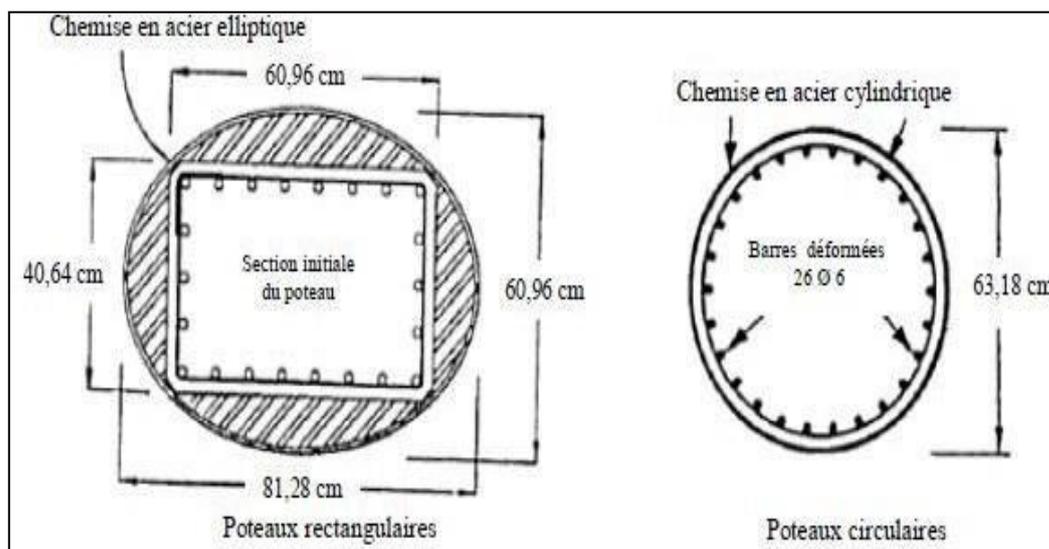


**Figure 1.13-** Chemisage en béton armée

### **b. Chemises en acier**

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux ainsi que leur ductilité.

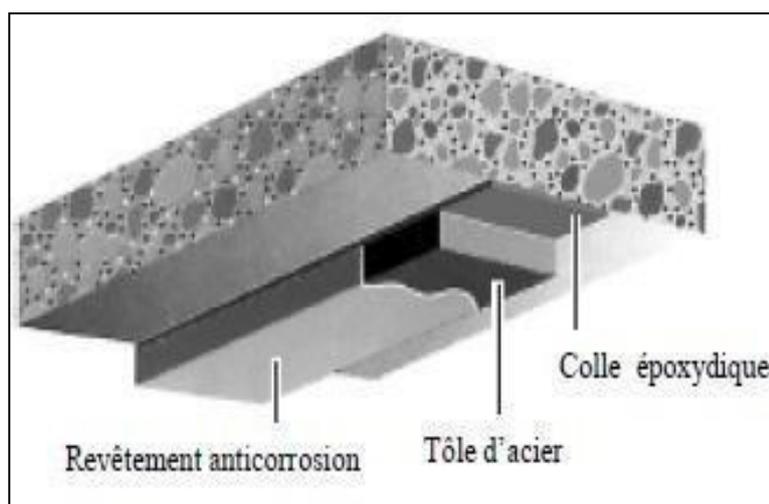
Toutefois, cette technique est onéreuse et exige une main-d'œuvre qualifiée. Les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement, vu le coût élevé de l'acier. Cependant, dans le cas des bâtiments à usage d'habitation où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse [16].



**Figure I.14-** Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier

### c. Tôles collées :

Le renforcement de la structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermitte, consiste à réaliser un collage de tôles d'acier sur les supports de béton. La tôle joue à la fois le rôle de coffrage et d'armatures. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...). L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité, à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse [16][18].



**Figure I.15-** Application de plats métalliques selon le procédé Hamelin 2002

**d. Matériaux composites:**

Les techniques traditionnelles de renforcement ou de réparation ont montré leurs limites. Le recours aux matériaux composites constitue une des solutions de renforcement des structures la plus prometteuse. Les quelques exemples d'application de part le monde, ont mis en évidence l'intérêt du renforcement par les matériaux composites en termes de résistance et de durabilité [16][18][19].



**Figure I.16-** Renforcement des poutres par matériaux composites



**Figure I.17-** poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites



**Figure I.18-** Exemple de renforcement d'une dalle par fibre de carbone

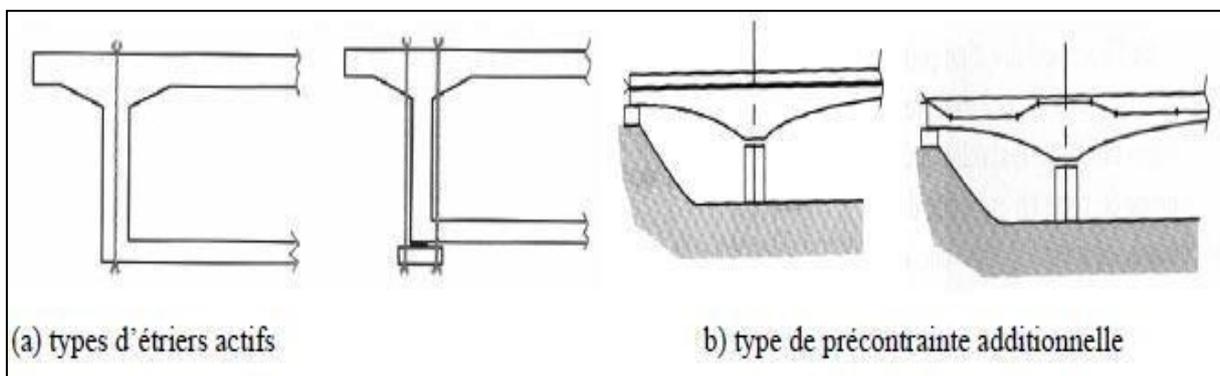
### e.Précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement, disposés à l'extérieur du béton.

La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou pour supporter des efforts supplémentaires, suite à des modifications des conditions d'exploitation [18][20].

Cette technique permet:

- Soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;
- Soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages.



**Figure I.19-** Différents types de réparation par précontrainte additionnelle

### I.5.les dalles en béton armé :

Les dalles constituent un des éléments de structure le plus classique. Du point de vue mécanique, une dalle est un élément bidimensionnel de structure plan, d'épaisseur faible par rapport à ses dimensions dans le plan. Elle résiste aux efforts auxquels elle est soumise par des mécanismes de flexion dans une ou de directions suivant sa géométrie et ses conditions aux limites.

Il est possible de classifier les dalles en fonction de leur système porteur. On peut distinguer :

-Les dalles portant dans une direction (dalles sur deux appuis). Ces dalles ont un comportement unidirectionnel et se comportent essentiellement comme des poutres, et se dimensionnent selon les mêmes principes,

-les dalles portant dans deux directions (dalles sur quatre appuis). Ces dalles ont un comportement bidirectionnel et transmettent la charge à laquelle elles sont soumises dans les deux directions du plan en direction des appuis,

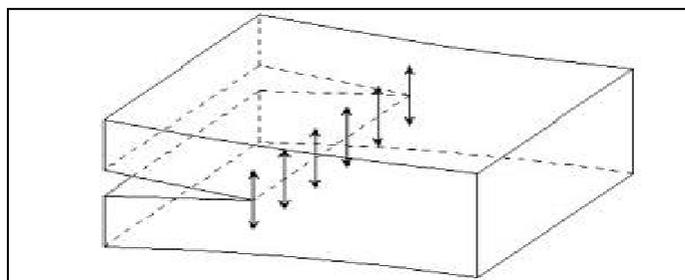
-les dalles portant sur des appuis ponctuels, ces appuis sont généralement constitués de colonnes en béton ou en acier. En fonction de leur élancement (rapport hauteur/portée),

Les dalles peuvent être classifiées en trois catégories : dalles minces, dalles d'épaisseur modérée et dalles épaisses.

### I.6.Les modes de propagation des fissures :

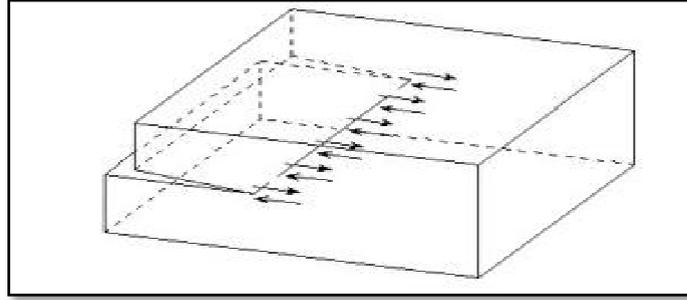
Nous supposons ici que les fissures sont planes et se propagent dans leur plan. Il est ainsi possible de montrer que l'état général de propagation se limite à la superposition de trois modes :

-**Mode I:** Les surfaces de fissures se déplacent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre (mécanisme de clivage).



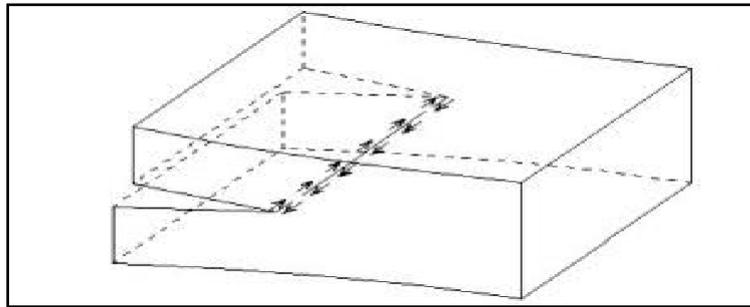
**Figure I.20**-mode d'ouverture (ou clivage)

-**Mode II:** Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au fond de la fissure (glissement dans le plan).



**Figure I.21-** mode de glissement droit

**-Mode III:** Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au fond de fissure.



**Figure I.22-** mode de glissement vis

### **I.7.conclusion :**

l'utilisation des matériaux composites constitués de résine et de renforts dans le domaine du génie civil pour la réparation et le renforcement des ouvrages est devenue une solution prometteuse et efficace, , grâce à leurs caractéristiques très intéressantes.

Le renforcement par des tissus composites peut être une solution intéressante et rentable.

Donc dans notre travail, nous envisageons le renforcement à l'aide d'un tissu en matériau composite de dimensions proportionnelles à la surface renforcée.

Bibliographique

---

# Chapitre II

Caractérisation des  
Matériaux  
&  
Formulation du béton

## II.1.Introduction :

Ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés durant ce projet de recherche, les procédures des malaxages pour confectionner nos mélanges, les différents essais expérimentaux pour caractériser les mélanges.

Nous allons exposer la méthode de formulation utilisée afin déterminer les différents composants du béton et leur proportion, ainsi que les résultats des caractéristiques du béton à l'état frais.

Ce travail expérimental étudie les calculs des proportions des constituants du béton, préparé le coffrage, le bétonnage, assuré le mûrissement des éprouvettes, réalisé le collage de composite sur le support béton préalablement nettoyé.

## II.2.Matériaux utilisées pour la composition du béton :

### II.2.1.Sable :

Deux types de sable naturels de nature minéralogique différente sont utilisés dans cette étude dont (sable de dune, sable de calcaire concassé) ont été caractérisés par les essais physiques suivants :

- Analyse granulométrique.
- Détermination de la masse volumique apparente.
- Détermination de la masse volumique absolue.

#### II.2.1.1.Sable de dune :

Nous avons utilisé le sable de dune prélevé de deux sites différents de la W .Tbessa .



**Figure II.1-** sable de dune

**II.2.1.2.Sable de carrière :**

Le sable de carrière est obtenu par réduction de gravillon ou plus simplement le déchet d'abatage et de concassage des roches pour l'obtention du gravier. Dans cette étude on a Utilisé un sable de calcaire concassé inerte de fraction 0/5mm.



**Figure II.2-** sable de carrière

**II.2.2.Ciment :**

Le ciment utilisé dans cette étude est de type CEM II/A de classe 42.5, c'est un ciment portland composé, résultant d'un broyage simultané de clinker (70 à 80 %), de laitier granulé (15 à 25 %) et de gypse (5 %), conforme à la norme algérienne **NA 442 (NA 442, 05)** et provenant de la cimenterie de Hdjar Essoud.

La composition chimique et minéralogique du ciment sont données dans les tableaux **II.1** et **II.2**.

**Tableau II.1 :** Composition chimique du ciment

Oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PAF	CaO libre
% massique	60,24	5,69	23,25	3,36	0,74	0,27	0,45	1,94	1,67	0,98

**Tableau II.2 :** Composition minéralogique du clinker

Minéraux	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
%	59,66	16,45	9,14	11,02

**II.2.3.Gravier :**

Le gravier utilisé est de fraction (3/8) mm, de la région d'Annaba De qualité naturel et forme concassée.



**Figure II.3-** Gravier (3/8)

**II.2.4.Eau de gâchage :**

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des différents mélanges est une eau potable de robinet conforme à la norme [NF EN 1008].

**II.2.5.Super Plastifiant :**

On a utilisé SUPERIOR 126 est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates du dosage varié entre 0,6 à 2 % du poids du ciment soit de 0.6 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment. Il est compatible avec tous les types de ciment et confère au béton un maintien prolongé de l'ouvrabilité avec des bonnes caractéristiques de compacité et de résistances mécaniques. Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton. Des essais d'optimisation sur site sont conseillés.

**Tableau II.3-** propriétés chimique et physique de super plastifiant

<b>Etat physique</b>	Liquide
<b>Couleur</b>	Brun
<b>Densité (g/cm<sup>3</sup>, à 20 °C)</b>	1,13 (± 0,03)
<b>PH (20 °C)</b>	5,5 (± 1)
<b>Extrait sec</b>	38 % (± 2 %)
<b>Teneur en chlorures</b>	≤ 0,1 %

### **II.3.Méthodes d'essais Et Caractéristiques Des Granulats :**

#### **II.3.1.Masses Volumique Apparente Et Absolue**

Pour étudier la formulation d'un béton, il est indispensable de connaître la masse volumique absolue et apparente des granulats.

Elles sont exprimées en  $\text{Kg/m}^3$ , la masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

Elles sont déterminées selon la méthode classique, respectivement masse d'un certain volume de matériau et éprouvette graduée.

##### **II.3.1.1.la masse volumique apparente [NF EN 1097-3]**

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci, y compris les pores inter granulaires.

Les résultats des essais sur les granulats sont mentionnés dans le tableau **II.8**

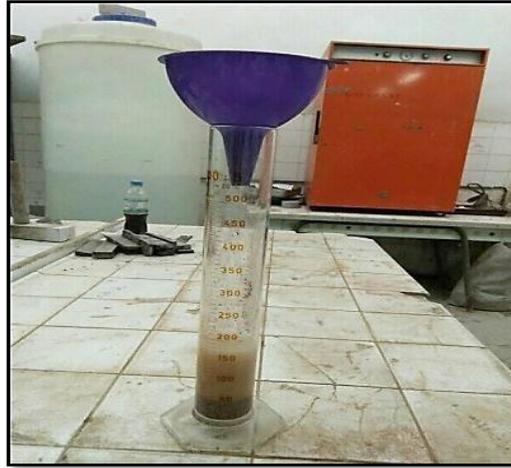


**Figure II.4-** Essai de la masse volumique apparente.

##### **II.3.1.2.la masse volumique absolue [NF P18 -558]**

On à utiliser une méthode inspirée de la mesure au pycnomètre: La masse des particules solides est obtenue par pesage, le volume est mesuré au pycnomètre, Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains, on a appliqué la méthode de l'éprouvette graduée.

Les résultats des essais concernant les masses volumiques absolues sont mentionnées dans le tableau **II.8**



**Figure II.5-** Essai de la masse volumique absolue.

### **II.3.2.Essai équivalent de sable [NF 933-8]**

L'essai d'équivalent de sable consiste à faire flocculer les éléments fins d'un sable pour mesurer sa propreté et rendre compte de la qualité de ses éléments.

Les résultats des essais concernant les masses volumiques absolues sont mentionnées dans le tableau **II.8**



**Figure II.6-** équivalent de sable

### **II.3.3.La porosité intergranulaire [NF en 1097-3]**

La porosité est le rapport de volume des vides par unité de volume apparent (c'est le degré de

degré de remplissage par les vides et les pores).le pourcentage de porosité inter granulaire se calcule a partir la masse volumique et apparente et de la masse volumique absolue.

#### II.3.4.L'analyse granulométrique [NF P 18-304]

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des différents éléments constituant le sable et gravier.

La masse de l'échantillon pour l'essai de l'analyse granulométrique dépend des dimensions des éléments les plus gros qu'il contient.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs. Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 5 – 4 – 3.15 – 2.5 – 2 – 1.25 – 1 – 0.63 – 0,5 – 0.315 – 0.2 – 0.16 – 0.08. Et pour le gravier, on utilisera en général les tamis de modules 8 – 6.30 – 5 – 4 – 3.15.



**Figure II.7-** la série des tamis

#### II.3.5.Module de finesse [XP P 18-540]

La norme **XP P 18-540** a défini le module de finesse comme une valeur, exprimée en pourcentage, qui rend compte de la granularité d'un granulat, en réalité surtout utilisée pour les sables. Son calcul est effectué à la suite du passage du granulat à travers une série normalisée de tamis.

**Tableau II.4-** analyse granulométrique du sable de dune

Tamis	refus partiel	refuspartiel%	refus cumulé	Tamisât	Module de finesse = 1.9
5	0	0	0	100	
4	2,6	0,26	0,26	99,742	
3,15	4,6	0,46	0,72	99,28	
2,5	7	0,70	1,42	98,58	
2	9,6	0,96	2,38	97,62	
1,25	47,5	4,76	8,14	92,86	
1	27,3	2,74	9,88	90,12	
0,63	131,4	13,18	23,06	76,94	
0,5	210,8	21,15	44,21	55,79	
0,315	236	23,67	67,88	32,12	
0,2	226,1	22,68	90,56	9,44	
0,16	17,9	1,79	92,35	7,65	
0,08	48	4,81	97,16	2,84	
Fond	28	2,81	99,97	0,03	
	$\Sigma=996,8$				

**Tableau II.5-** analyse granulométrique du sable de carrière

Tamis	refus partiel	refus partiel%	refus cumulé	tamisât	Module de finesse = 3,5
5	3,3	0,33	0,33	99,67	
4	11,8	1,18	1,51	98,49	
3,15	100,2	10,06	11,57	88,43	
2,5	175,5	17,62	29,19	70,81	
2	85,8	8,61	37,8	62,2	
1,25	237,5	23,84	61,64	38,36	
1	48,2	4,83	66,47	33,53	
0,63	111,4	11,18	77,65	22,35	
0,5	44,2	4,43	82,08	17,92	
0,315	41,2	4,13	86,21	13,79	
0,2	47,2	4,73	90,94	9,06	
0,16	42,9	4,30	95,24	4,76	
0,08	16,9	1,69	96,93	3,07	
Fond	29,9	3,00	99,93	0,07	
	<b><math>\Sigma=996</math></b>				

**Tableau II.6-** analyse granulométrique du sable corrigé

Tamis	refus partiel	refus partiel%	refus cumulé	tamisât	Module de finesse = 2,5
5	1.24	0.13	0.13	99.87	
4	6.05	0.63	0.76	99.24	
3,15	40.45	4.22	4.98	95.02	
2,5	70.19	7.35	12.33	87.67	
2	38.18	3.98	16.31	83.69	
1,25	118.75	12.38	28.69	71.31	
1	35.14	3.66	32.35	67.65	
0,63	86.4	9.01	41.36	58.64	
0,5	148.33	15.47	56.83	43.17	
0,315	162.95	16.99	73.82	26.18	
0,2	159.01	16.58	90.4	9.6	
0,16	27.28	2.84	93.24	6.76	
0,08	36.34	3.80	97.04	2.96	
Fond	28.71	2.99	99.94	0.06	
	$\Sigma=959.02$				

**Tableau II.7-** analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis	refus partiel	refuspartiel%	refus cumulé	tamisât
8	6,7	0,42	0,42	99,58
6.30	240,6	15,18	15,48	84,52
5	488	30,54	46,02	53,9
4	505,4	31,63	77,65	22,35
3.15	276	17,27	94,92	5,08
Fond	81,1	5,08	100	0

**II.3.6.l'essai micro Deval [P18-572]**

L'essai Micro-Deval a pour but la détermination la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat. La norme **P18-572** permet de déterminer le coefficient de micro-Deval.

**Figure II.8-** Essai de micro Deval

**II.3.7.L'essai De Los Angeles [P18-573]**

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques.



**Figure II.9-** La machine de Los Angeles

**Tableau II.8-** caractéristique physique des matériaux utilisés :

Caractéristique	Unité	Sable de dune	Sable de carrière	Gravier 3/8
Masse volumique apparente	g/cm <sup>3</sup>	1.51	1.41	1.29
Masse volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	2.66	2.66	2.66
Porosité intergranulaire	%	43	47	52
Module de finesse	%	1.9	3.5	-
Equivalent de sable	%	80.12	84.87	-
Los Angeles	%	-	-	21.08
Coefficient micro Deval	%	-	-	12.86

#### II.4.Méthode de formulation du béton :

#### COMPOSITION DE BETON PAR LA METHODE DE DREUX-GORISSE

Cette méthode a été retenue pour sa simplicité à déterminer les différents composants du béton.

#### Donnée de base :

- **Donnée sur le béton**

Resistance a 28j = 25 MPa vibration normale

Affaissement = 7 cm

- **Donnée sur le ciment**

Classe vraie de ciment = 43 MPa

Masse volumique absolue = 3 g/cm<sup>3</sup>

- **Donnée sur le granulats**

Qualité des granulats : naturel

Forme des granulats : concassée

Dimension maximale des granulats :  $D_{max} = 8$  mm

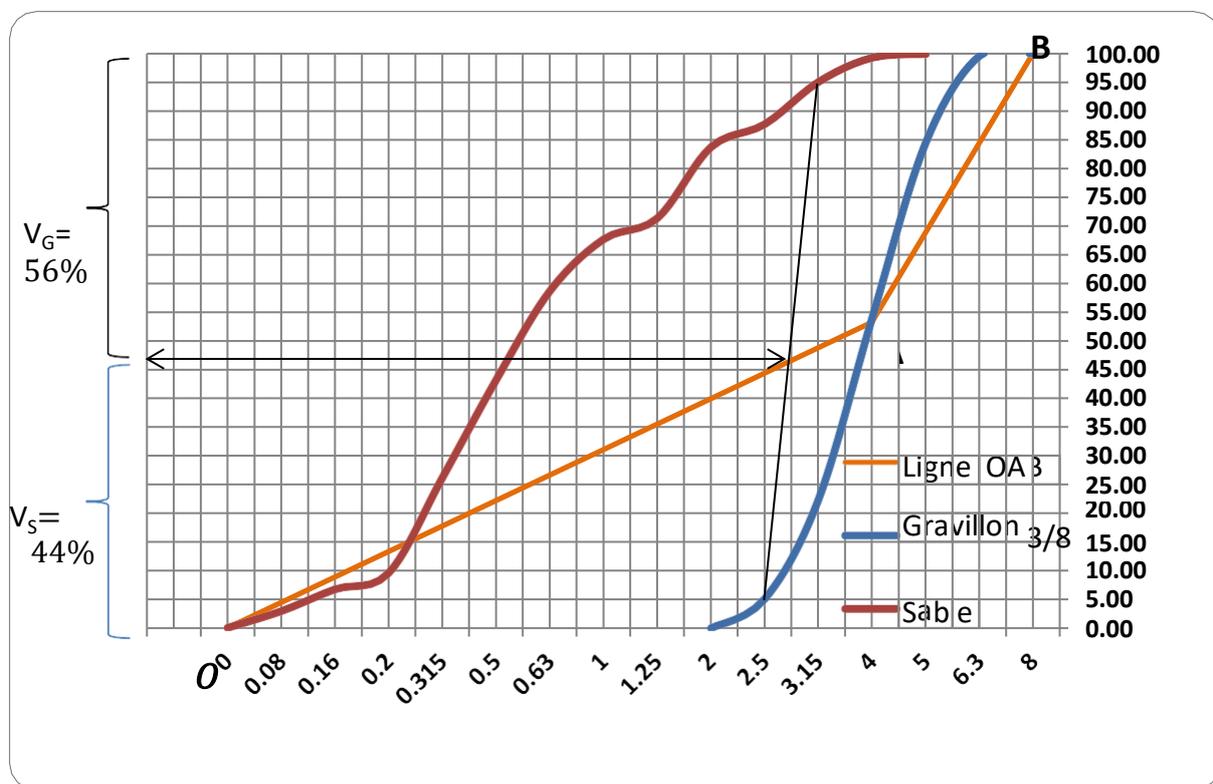


Figure II.10- courbe granulométrique

**Tableau II.9-** composition de bétons d'étude

Constituants du béton	Dosage en constituants (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	350
Sable de dune	472.55
Sable de carrier	283.55
Gravier 3/8	962.31
Eau	200
Super plastifiant	1.75

## II.5.Caractérisation des bétons a l'état frais :

### II.5.1.Maniabilité :

L'ouvrabilité des bétons est déterminée à l'aide de l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams de dimensions (D=20 ; d=10 ; h=30 cm) selon la norme **NF EN 12350-2 [NF EN 12350-2, 1999]**.

L'essai consiste à remplir une masse de béton frais dans un cône tronconique en trois couches tassées avec une tige d'acier, dont chacune subit un nombre déterminé de coups de piquage, puis démoulé verticalement et mesuré l'affaissement. La figure **II-11** illustre un essai de l'affaissement du cône d'Abrams d'un mélange de béton ordinaire testé.

**Figure II.11-** essai d'affaissement au cône d'abrams

**II.5.2.Masse Volumique :**

Elle est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges de béton frais selon la norme **NF EN 12350-6 [NF EN 12350-6, 1999]**. Cette dernière caractérisée par la masse d'une quantité de béton frais rapporté à son volume après vibration.



**Figure II.12-** masse volumique du béton

**Tableau II.10-** l'affaissement et masse volumique de béton a l'état frais

AC (cm)	5
MV (g/cm <sup>3</sup> )	2.50

**II.6.Ferraillage :**

Pour la réalisation d'un béton armé on a utilisé le treillis soudé afin d'assurer au matériau qui présente une résistance à la compression, à la traction et l'anti fissuration sur les dalles. Les dimensions du treillis et son maillage : (20\*20) cm



**Figure II.13-** treillis soudée

## **II.7.Mâtereau Composite :**

### **II.7.1.Matrice : la résine polyester**

Le polymère utilisé en tant que liant est à base d'un polyester sous forme de liquide de La viscosité de la résine polyester est de 20 dpa. Et de la masse volumique  $1.11 \text{ g/cm}^3$  (figure **II.14**). Elle est insoluble dans l'eau comme toutes les résines.

Les caractéristiques physico-mécaniques de résine polyester sont données par le fabricant et sont présentées dans le tableau **II.11**.



**Figure II.14-** Résine polyester et durcisseur

**Tableau II.11-** Caractéristique de la résine polyester

Caractéristiques	Unité	Résultats
Masse volumique	g/cm <sup>3</sup>	1.11
Viscosité	dPa.s	20
Couleur	-	Violet
Etat	-	Liquide
Dangereux	-	Inflammable
Temps de gel (23°C)	Min	25
Résistance a la traction	MPa	45
Résistance a la compression	MPa	50-150
σrupt en traction	(MPa)	(50 à 80)
Arupt	%	2.5
Température Max	(°C)	200
E	(GPa)	(2.5 à 3.5)
G	(GPa)	1.4
P	(Kg.m)	1300

Précaution à prendre :

Sécurité : dangereuse car irritante et facilement inflammable.

Odeur : A manipuler avec précaution avec des masques appropriés.

- **Le durcisseur :**

Les additifs qui sont un accélérateur ont été fournis sous forme de liquide dans des flacons hermétiques. Le tableau **II.12** rassemble les caractéristiques du durcisseur utilisé.

**Tableau II.12-** Caractéristique de durcisseur.

Caractéristiques	Résultats
Etat	Liquide
Couleur	Incolore
Dangereux	Inflammable

### II.7.2.Les renforts : tissu de fibre de carbone

On a utilisé un tissu en de fibres de carbone de type SikaWrap®-230 C/45. Le carbone est de haute résistance.

**Tableau II.13-** Caractéristiques techniques de tissu de fibre de carbone

Grammage	230 g/m <sup>2</sup> + 10g/m <sup>2</sup>
Epaisseur du tissu	0.13 mm
Densité des fibres	1,76 g/cm <sup>3</sup>

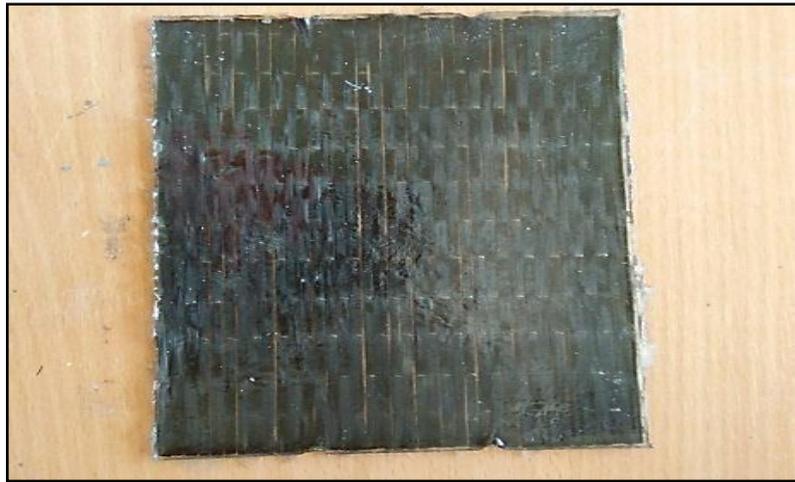
**Tableau II.14-** Caractéristiques physiques et mécaniques de tissu de fibre de carbone

Resistance en traction	4 300 MPa (nominale)
Module d'élasticité en traction	234 000 MPa
Elongation a rupture	1,8 % (nominale)

### II.7.3.Composite :

Nous avons fabriqué une plaque de dimension (14\*16) cm pour la réalisation de composites selon les étapes suivantes :

- Découpage du tissu selon les dimensions du moule,
- Mélange du durcisseur à l'intérieur de la résine jusqu'à obtention d'un mélange uniforme,
- Dépôt de tissus sur le moule et on verse la résine liquide, accélérée et catalysée,
- Le tissu est imprégné du résine d'une épaisseur de 2 mm,
- On procède au démoulage, après durcissement du matériau (Après 24h).



**Figure II.15-** Plaque de composite (tissu+ résine)

## **II.8.fabrication et préparation des spécimens :**

### **II.8.1.Spécimens cubique (béton)**

Des spécimens utilisés de dimension  $(10*10*10)$  cm<sup>3</sup> ont été réalisés afin de caractériser le béton utilisée, pour des raisons de stabilité, le volume de gâchée est de 9L pour 3 moule cubique.



**Figure II.16-** Spécimens cubique

### **II.8.2.Spécimens prismatique (dalles)**

Le coffrage utilisé pour la réalisation des dalles est un moule en bois, démontables de dimension  $(600*500*50)$  mm constitués de planches de bois et imprégnés par un agent démoulant pour faciliter l'extraction des éprouvettes après la prise du béton.

Le volume de chaque gâchée est de 15L pour 4 dalles qui ont été confectionnées en respectant la procédure qui consiste à être réalisée par 4 étapes dans l'ordre établi. Pour assurer la continuité de la matrice béton il est recommandée à chaque étape de réaliser une vibration du béton.

Les étapes à respecter sont :

- 1- Coulage de la première couche de béton (couche d'enrobage)
- 2- Pose de ferrailage (treillis soudé)
- 3- Coulage de la dernière couche de béton (couche de surface)

- **Le malaxage**

le malaxage est effectué à l'aide d'une bétonnière de capacité de 25L avec une durée de malaxage totale est de 5 minutes, deux minutes à sec pour assurer l'homogénéisation du mélange (granulats, sable et ciment ) et trois minutes après l'introduction de l'eau de gâchage et super plastifiant au cours du malaxage.

- **Bétonnage**

La mise en place du béton dans les moules a été faite en 2 couches, chacune vibrée pendant 20 à 30secondes sur une table vibrante. Après 24h de séchage, le coffrage a été retiré et les éprouvettes ont été mises en mûrissement.

- **Mûrissement**

Toutes les éprouvettes ont été plongées dans un bac d'eau, à une température Constante de 20° C pendant une durée de 28 jours, selon la norme européenne (NF 2001) Relative à la confection et la conservation des éprouvettes.



**Figure II.17-** Spécimens prismatique (dalles)

### **II.9.Collage des bandes de composite sur les dalles :**

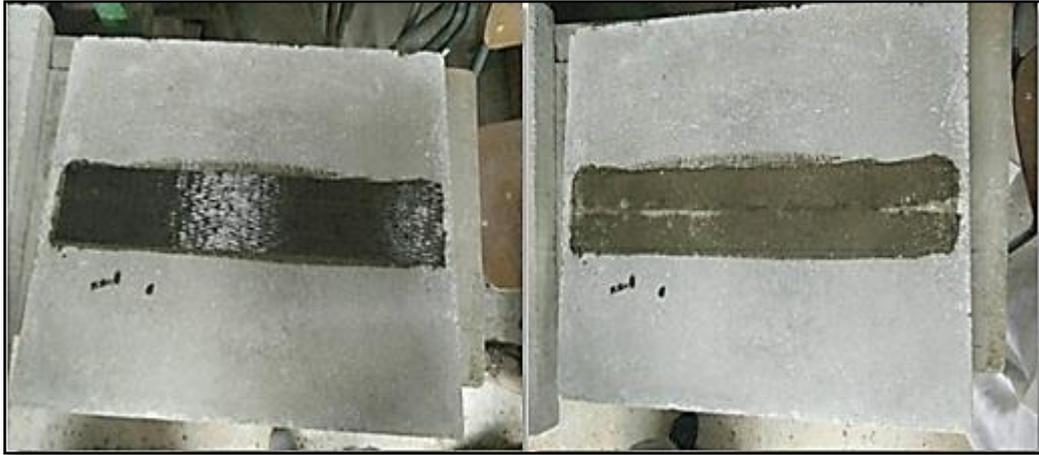
La préparation de la surface du béton avant le collage des bandes de composite est d'une grande importance puisqu'elle assure une bonne adhérence entre le béton et le Composite. Le collage des bandes de composite sur le support béton préalablement nettoyé pour dégraisser, et débarrassée de toute particule non adhérente ou susceptible d'amoinrir la résistance du collage.

On a trois dalles renforcée par le collage des bandes TFC sur la surface de béton préparé, selon les dimensions choisies des composites.

Ces bandes ont été fabriquées à la température ambiante d'environ 25°C selon les étapes suivantes :

1. Découpage du tissu selon les dimensions des dalles.
2. Mélange du durcisseur à l'intérieur de la résine jusqu'à obtention d'un mélange uniforme.
3. Dépôt d'une couche de résine sur la zone à renforcer de la dalle.
4. Application du tissu sur la résine.

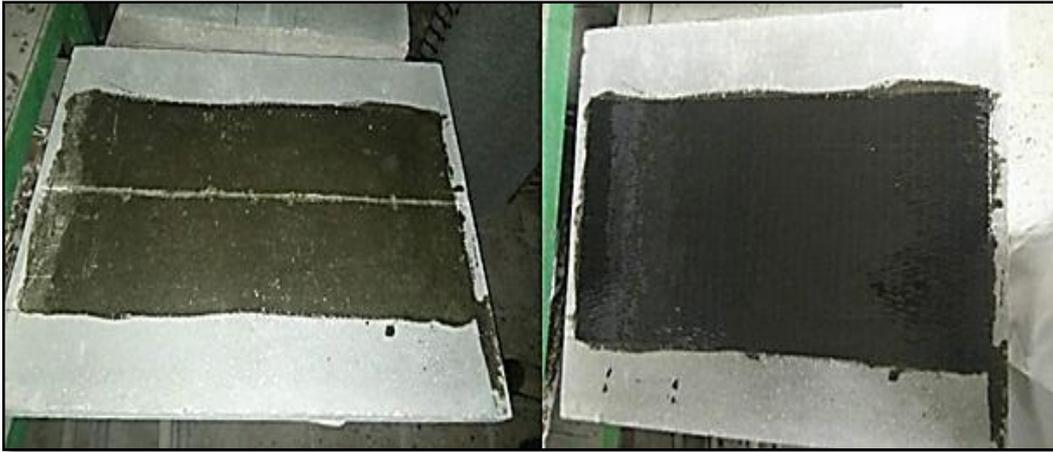
5. Application d'une couche de fermeture de colle.
6. Passage du rouleau rigide.
7. Durcissement à la température ambiante pendant 24 heures avant les essais mécaniques.



**Figure II.18-** procédé de renforcement dalle 1 par collage de TFC (560\*100) mm



**Figure II.19-** procédé de renforcement dalle 2 par collage de TFC (560\*200) cm



**Figure II.20-** procédé de renforcement dalle 3 par collage de TFC (560\*300) mm

### **II.10- Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques des matériaux constitutifs Entrant dans la formulation du béton ordinaire, les différents tests et essais expérimentaux utilisés pour la caractérisation de ces constituants. Cette caractérisation nous a permet de mieux analyser les résultats et mieux comprendre le comportement des bétons. Les résultats montrent la conformité des constituants aux normes en vigueurs.

# Chapitre III

Etude Expérimental  
et  
Analyse des résultats

**III.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, on va exposer la caractérisation classique du comportement mécanique (traction axiale sur le matériau composite, compression simple sur les spécimens cubique en béton et la flexion 3 points sur les dalles) qui permet d'étudier les propriétés élastiques ainsi que la rupture de chaque matériau L'analyse des différents résultats obtenus sont présentés.

Tous les essais ont été réalisés au Laboratoire des Matériaux de Génie-Civil de l'université de Badji Mokhtar Annaba.

Une étude expérimentale a été effectuées sur un total de quatre dalles soumises a l'essai de flexion trois point : Une dalle de référence et trois renforcées avec des bandes composites en carbone (TFC), Le composite est toujours collé sous la partie tendue de la dalle. Cette série permet de faire une comparaison entre le comportement des dalles renforcées avec celui de dalle non renforcée.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence du changement de la largeur des bandes de composite sur le comportement des dalles.

**III.2.Procédés des essais:****III.2.1.Essai de compression sur les spécimens cubique**

Les éprouvettes utilisées pour l'essai de compression sont des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm<sup>3</sup> selon la norme **EN 12390-3**. La machine d'essai est une presse hydraulique, Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur mobile et l'autre supérieur fixe. de capacité maximale de 2000 KN à vitesse constante, l'essai de compression est conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma = P / \underline{S} \text{ [MPa]}$$



**Figure III.1-** description d'essai de compression

### **III.2.2.Essai de traction sur le composite**

Afin de déterminer les propriétés mécaniques en traction du matériau composite élaboré, un essai de traction simple, par série de trois, a été réalisés au sein du laboratoire de l'université sous la supervision du Mr Redjal Bachir. Les dimensions des éprouvettes utilisées pour ces essais de traction ont été choisies selon la norme **NF EN ISO 178, ASTM D790**

L'essai de traction simple, a été réalisé par le placement de la plaque composite sur une machine universelle Swick de capacité 20 KN qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion.

La machine commandée par microordinateur muni d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une bonne acquisition de données, c'est-à-dire les diagrammes (force /déplacement et force/temps) avec une bonne précision. Elle est pilotée jusqu'à la rupture à vitesse de traverse constante fixée à 5 mm/min soit pour assurer une bonne reproductibilité des résultats.

Les éprouvettes ont pour dimensions une longueur de 160 mm sur une largeur de 14mm avec une épaisseur de 2mm.



**Figure III.2-** description d'essai de traction



**Eprouvette en carbone (160\*14\*2) mm**

**Figure III.3-** Dimensions d'éprouvette de composite

### **III.2.3. Essai de flexion sur les dalles**

Quatre dalles de dimensions (600x500x50) mm ont été testées à la flexion trois points.

Les dalles sont opposées sur deux appuis et l'on applique au centre de la dalle une force croissante jusqu'à rupture, pour étudier l'influence de largeur de la bande de TFC sur le comportement des dalles en béton armé. Les bandes de TFC ont les dimensions suivantes : (560x100x1) mm, (560x200x1) mm, (560x300x1) mm

L'augmentation de la charge se fait d'une manière monotone jusqu'à ce que la ruine de la dalle soit atteinte. La charge causant la rupture est lue directement sur l'écran de la machine d'essai.

Cet essai nous aide à identifier expérimentalement le comportement des trois dalles armées renforcées par des composites en carbone sur la surface tendue comparées par une dalle non renforcée.



**Figure III.4-** description d'essai de flexion

### III.3.analyse des résultats :

Pour les trois expériences le spécimen a été chargé jusqu'à la rupture et la charge correspondante a été lue directement sur l'écran de l'appareil.

#### III.3.1.Resistance mécanique du béton en compression

Dans cette étude, on a mesuré la résistance à la compression d'un béton sur des éprouvettes cubiques. D'après les résultats d'essai on trouve que la résistance à la compression mesurée par la méthode d'écrasement est très proche de celle visée à 28 jours.

Le tableau **III.1** récapitule les résultats obtenus pour l'essai de compression :

**Tableau III.1-** résultats des essais de compression

	(à 7j)	(à 14 j)	(à 28j)
<b>Resistance (MPa)</b>	24.909	26.288	32.581
	23.184	30.410	32.434
	22.018	30.200	34.974
<b>Moyenne</b>	<b>23.370</b>	<b>28.966</b>	<b>33.329</b>
<b>Écartype</b>	<b>1,454</b>	<b>2,321</b>	<b>1,425</b>
<b>Confession de variation %</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>4</b>

Les résultats se caractérisent par une dispersion caractéristique du béton. Ce phénomène est lié à l'aspect hétérogène de ce matériau.

L'ordre de grandeur de la dispersion rentre de la plage généralement observée dans le béton.

### III.3.2. Essai de traction directe sur composite



Figure III.5- Rupture du composite dans un essai de traction

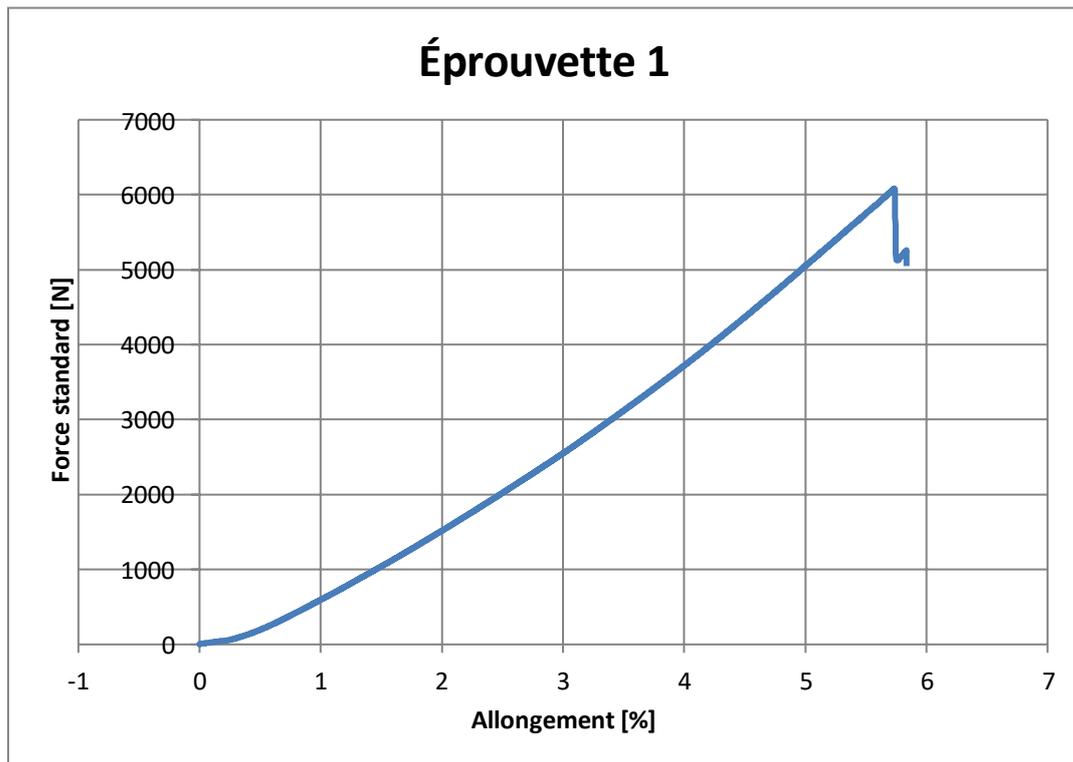


Figure III.6- Courbe de force déplacement de l'éprouvette 1

**-Courbe 1 :** la courbe force-allongement montre un comportement classique, c'est une courbe linéaire caractérisant la phase élastique jusqu' à la rupture.

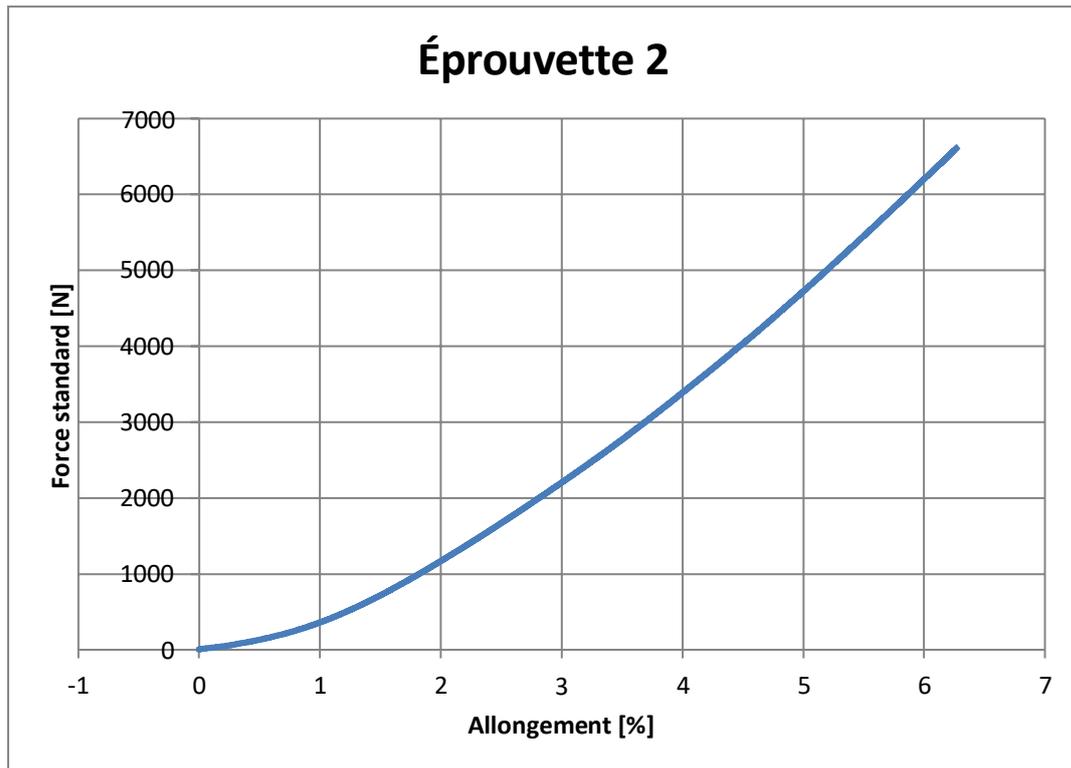


Figure III.7-Courbe de force déplacement de l'éprouvette 2

-**courbe2**: on observe un comportement linéaire du composite, qui se traduit par une relation linéaire entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$  (Loi de Hooke).

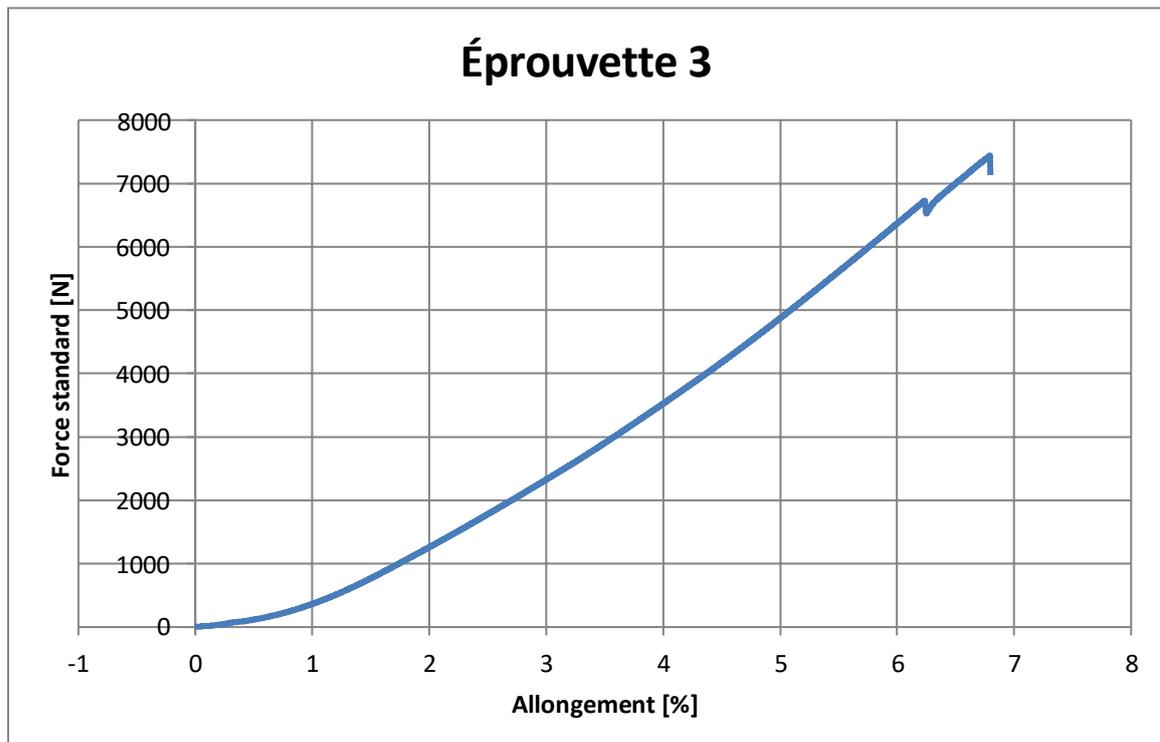


Figure III.8- Courbe de force déplacement de l'éprouvette 3

**-courbe 3** : la courbe montre une chute de charge près de la rupture finale traduisant certainement de rupture préliminaire de fibre suivie d'une reprise de l'effort par la partie Résistante (une forme d'escalier) .au maximum de charge se produit la rupture finale.

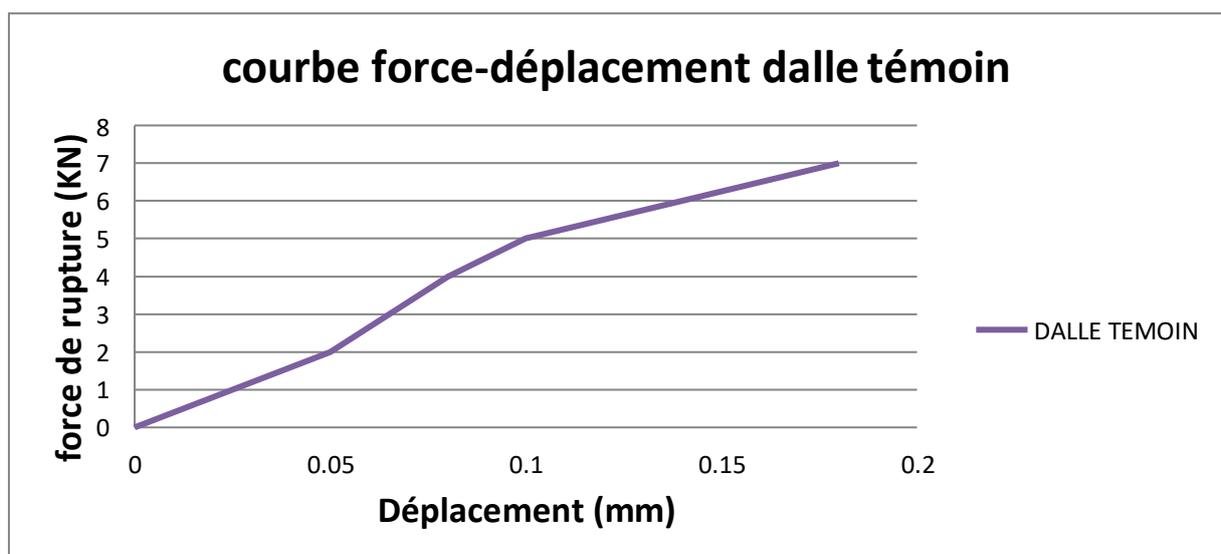
### III.3.3.Essai de flexion simple sur les dalles

Les résultats obtenus de l'essai de flexion trois points sur les dalles renforcées avec TFC et une dalle non renforcée sont représentés sur le tableau III.2 et les courbes suivantes :

**Tableau III.2-** résultats de l'essai de flexion

dalle	La largeur de la bande (mm)	Charge Max de rupture (KN)	Déplacement Max (mm)	Resistance (MPa)
D1	Référence sans bandes	8	5,000	5,38
D2	100	10	3,85	6,72
D3	200	13	3,49	8,70
D4	300	16	2,64	10,75

- Les résultats des résistances des dalles en flexion montrent que se derniers augmentent en fonction de la largeur des bandes.



**Figure III.9-** courbe force –déplacement d'une dalle non renforcée

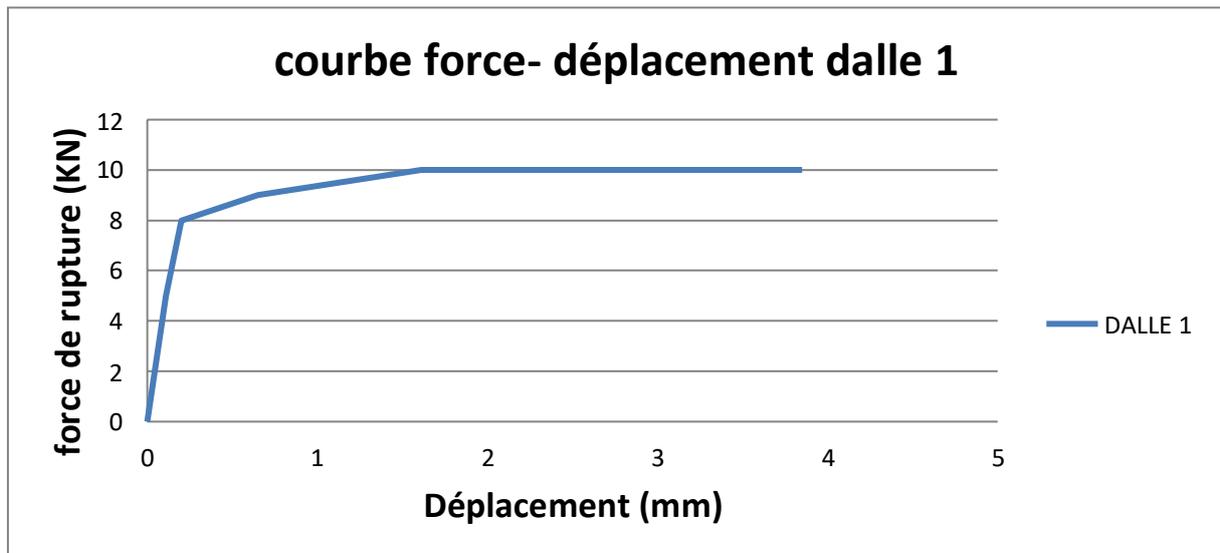


Figure III.10-courbe force –déplacement d’une dalle renforcée par bande composite (56\*10 )cm

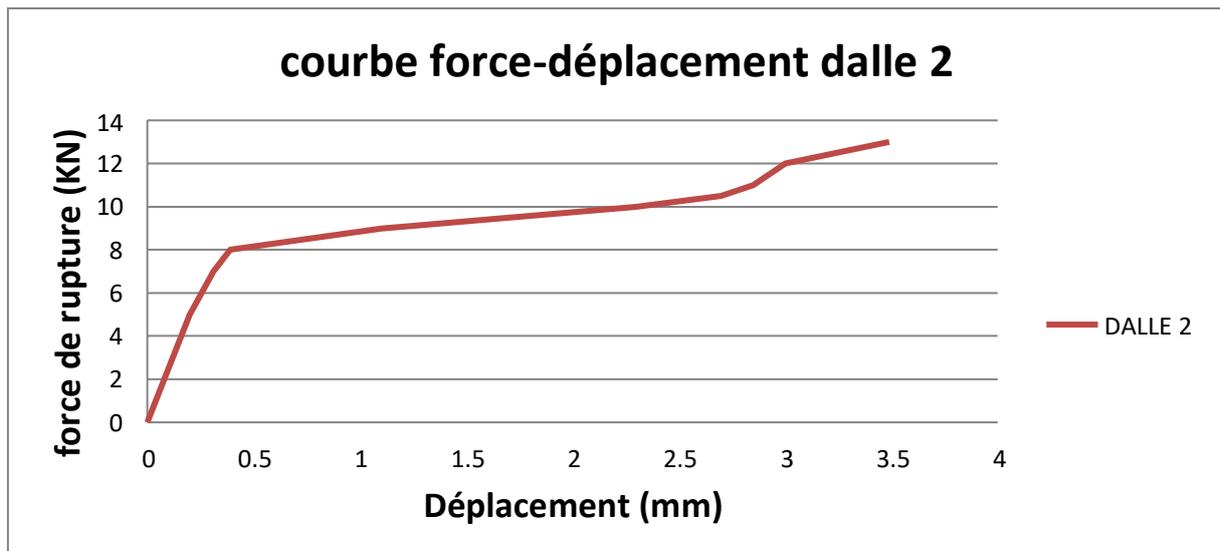


Figure III.11-courbe force –déplacement d’une dalle renforcée par bande composite (56\*20) cm

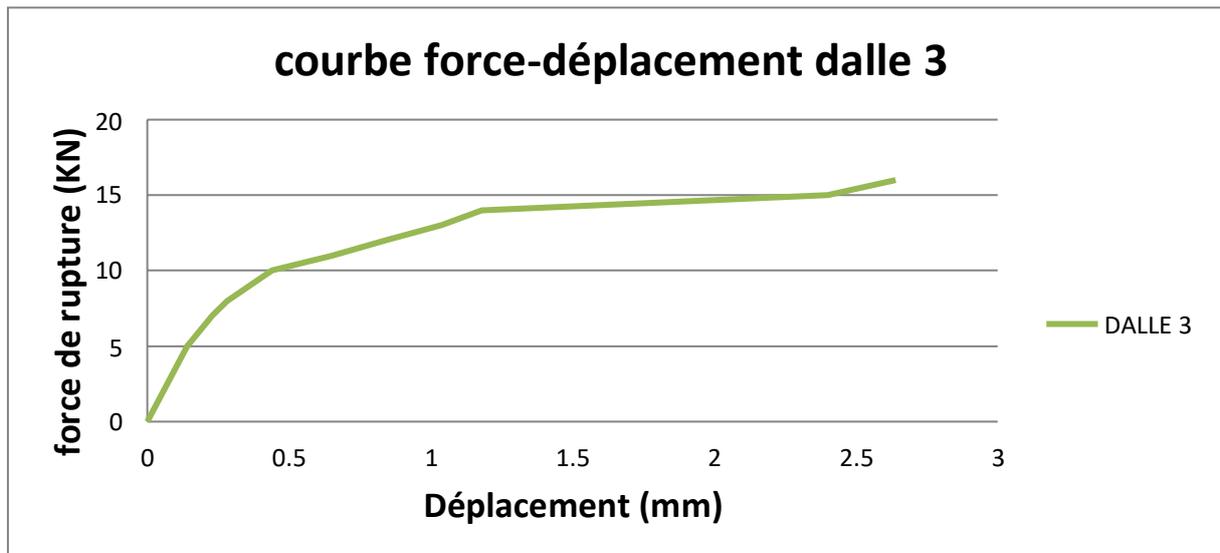


Figure III.12-courbe force –déplacement d’une dalle renforcée par bande composite (56\*30)cm

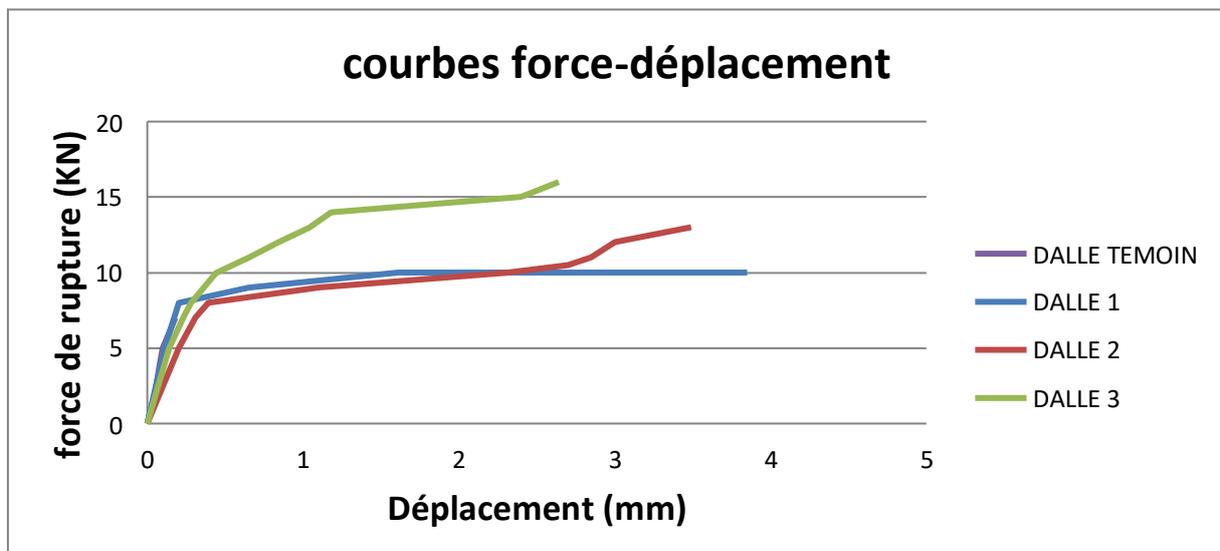
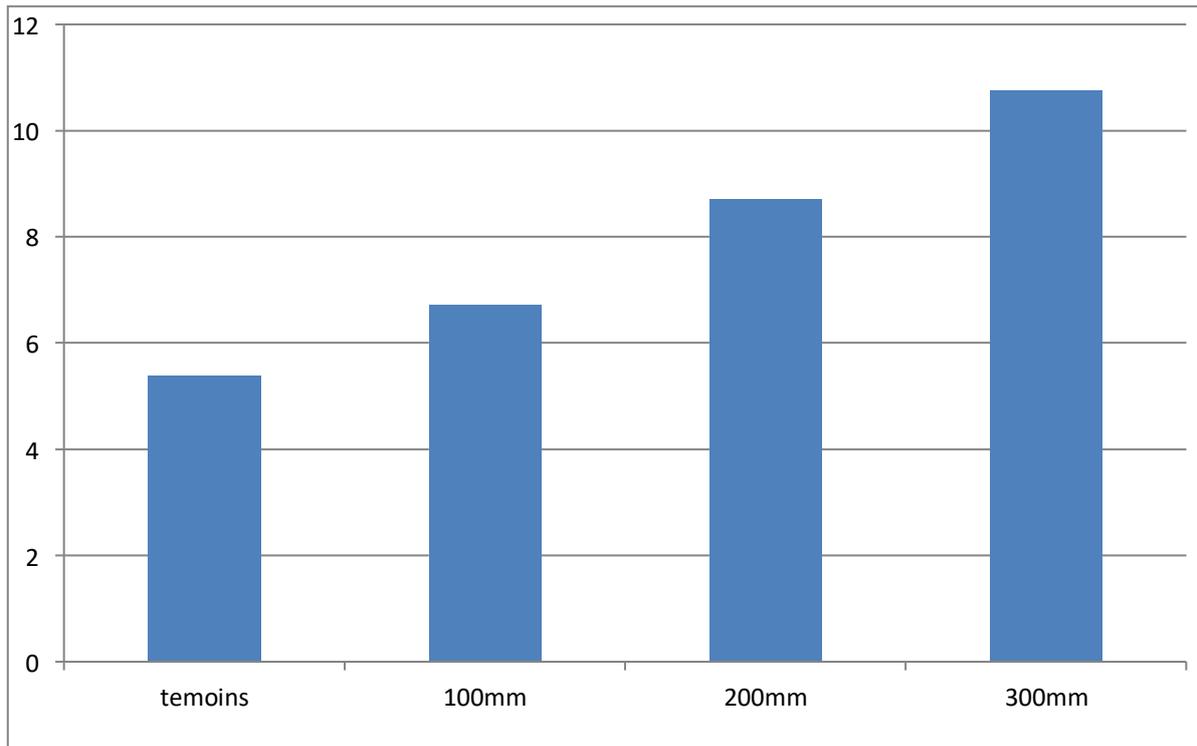


Figure III.13-Confrontation des courbes Forces –déplacements des différentes variantes de Dalles renforcées par des bandes composites en carbone et dalle non renforcée



**Figure III.14-** L'évolution de résistance des dalles à la flexion simple

### III.3.3.1. Modes de rupture des dalles à la flexion :

Les courbes ci-dessus présentent l'évolution de la flèche (déplacement vertical à mi-travée) en fonction de la charge des dalles en béton armé soumises à un essai de flexion simple.

Ces courbes permettent de mettre en évidence trois phases:

#### -Phase élastique :

C'est l'étape de la mise en charge de la dalle avant l'apparition des premières fissures. Durant cette étape, les dalles restent stables (non fissurées), se comportent pratiquement comme une structure dotée d'un comportement élastique linéaire.

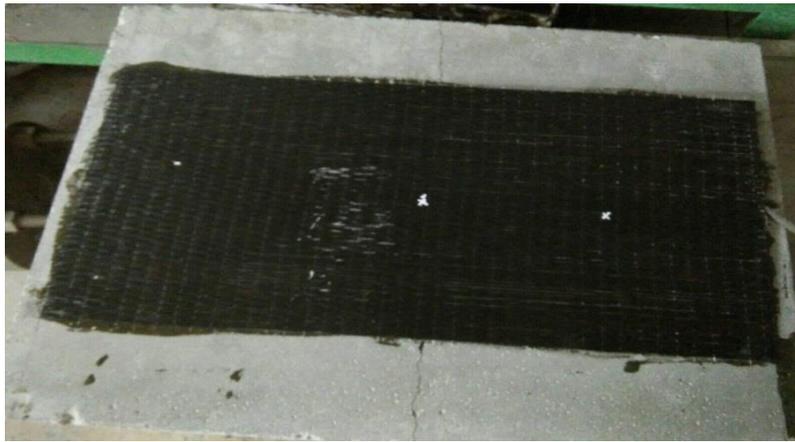
#### -Phase de fissuration:

À un niveau de charge précis, des microfissures diagonales apparaissent en symétrie par rapport à l'axe passant par le point d'application de la charge. Les fissures résultantes sont des fissures de flexion. Sous l'augmentation de la charge extérieure, les fissures se développent en longueur et en profondeur. Ces fissures s'inclinent vers le point d'application de la charge à cause de la présence de l'effort tranchant. Comme le distingue la figure **III.15**

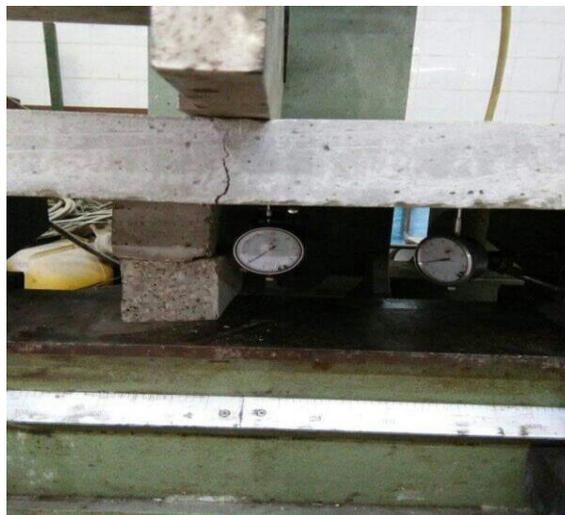
**- Phase de rupture:**

A un niveau de charge précis, les dalles sont rompues à cause du moment de flexion (fissures verticales) comme montré sur la figure **III.16**

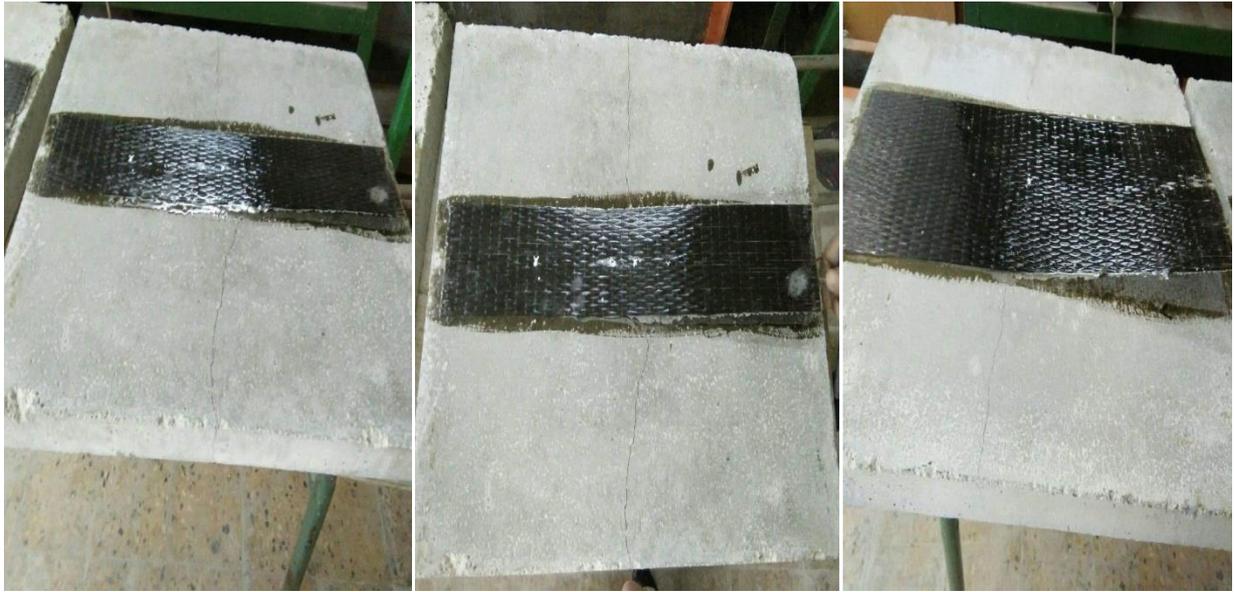
Lorsque les lignes d'articulation ont atteint un stade de développement tel que la dalle est transformée en un assemblage de sous-structures, une très légère augmentation des charges conduit à un état d'équilibre instable provoquant l'effondrement de la dalle.



**Figure III.15**-rupture d'une dalle (fissure diagonale sur la zone tendue sous le composite)



**Figure III.16**-Rupture d'une dalle (fissure vertical de flexion)



**Figure III.17-** Rupture d'une dalle renforcée (décollement de composite)

#### **III.4.Discussion et conclusion:**

Les courbes charge-flèche relative des trois dalle renforcées prennent des charges maximales entre **10KN** et **16KN** jusqu'à la rupture, correspondant à l'initiation des craquelures qui annoncent le début du décollement du composite à partir des coins et les bords comme illustre sur les figures ci-dessus.

Généralement, toutes les dalles se sont rompues par cisaillement, donc le mode de rupture des dalles en béton armé se caractérise par un cisaillement du béton dans l'épaisseur de la dalle.

Le comportement réel des dalles renforcées par des bandes composites se caractérise, dans l'ensemble, par la résistance aux efforts de flexion.

Les résultats donnés sous forme de courbes charge déplacements mesurés au centre de la dalle (déplacement en fonction de la force appliquée) montrent que la force de rupture et le déplacement ultime correspondant sont influencés par la surface couverte par la bande composite. On observe que la force de rupture augmente avec la surface de la bande composite. A titre indicatif et en comparaison avec la dalle 1 de référence, la charge de rupture augmente de **25%** pour la dalle 2, **62.5%** pour la dalle 3 et **100 %** pour la dalle 4, Ce gain au niveau de la charge ultime n'est pas proportionnel à la surface du bande composite, du fait que la capacité ultime de la dalle est limitée qui dépend plus des caractéristiques du béton. Donc les dalles renforcées ont présentées un comportement moins fragile avec une réduction

Importante de la flèche notées respectivement des dalles 2,3 et 4: **23%, 30.2% ,47.2%**.

Les déplacements verticaux des dalles en béton renforcées par des bandes composites sont particulièrement sensibles à la surface renforcée et aux propriétés du composite.

Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases : Au début du chargement, on a un comportement élastique linéaire, par la suite, la fissuration du béton apparaît dans les zones les plus sollicitées, enfin, dans la phase de rupture, on observe une très légère augmentation de la charge appliquée qui conduit à un état instable provoquant la rupture totale de la dalle.

Les résultats ont montré que la rupture commence par l'apparition des fissures dans la zone non renforcée.

L'évaluation du gain en résistance des dalles renforcées par matériaux composites peut être faite à partir des différentes figures illustrant la confrontation des courbes Force -déplacement des dalles en béton en fonction des dimensions des bandes composites. Les résultats mettent clairement en évidence l'influence du composite, en particulier sur la charge ultime.

Le renforcement avec bande composite de section (**560x300**) mm procure à la dalle une meilleure résistance de **10,75 MPa**. Ceci met en évidence l'influence de dimensions des bandes composites sur le renforcement.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

Le but de cette recherche s'inscrit dans un cadre très général de valorisation de composite de type-polymère à base de fibre de carbone utilisé dans le renforcement des dalles en béton armé.

L'utilisation des matériaux composites dans le renforcement des dalles en béton armé a fait l'objet de ce travail. En fait, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de Renforcement à base d'acier. Les fibres de carbone présentent en effet divers avantages: faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne Tenue à la fatigue et facilité de manipulation.

Les structures de type dalles sont particulièrement sensibles à la flexion. Pour redonner une certaine résistance à la dalle, il est recommandé de procéder au renforcement de la dalle. Pour le cas de flexion, le renforcement par des bandes composites s'avère un choix judicieux et rentable.

L'analyse des modes de rupture des dalles étudiés confirme que la rupture se caractérise par une fissuration du béton dans l'épaisseur de la dalle. Les dalles présentent un Comportement flexionnel caractérisé par plusieurs phases.

Les résultats obtenus dans cette étude, permettent de formuler les conclusions suivantes :

- Le mode de rupture observé pour toutes les dalles était le même, une fissure de flexion dans L'épaisseur de la dalle. Et un décollement de la bande de composite et les fibres sont restées intactes, ceci montre l'efficacité de TFC dans le renforcement.
- Le comportement réel des dalles renforcées par des bandes composite se caractérise par la résistance aux efforts de flexion, le décollement des bandes composites de renforcement dans le cas où toute la surface de la dalle est renforcée, les propriétés et les dimensions en plan des bandes composites.

## Conclusion générale

---

- La contribution du TFC à la résistance au cisaillement de la dalle est plus importante lorsque les bandes sont perpendiculaires à la fissure d'effort tranchant et sont en forme rectangulaire. Les résultats des essais ont montré que par ce procédé on peut augmenter la charge de ruine des dalles. Néanmoins, le risque de décollement est également augmenté par un certain nombre de facteurs liés à la qualité de l'application in- situ.
  
- Les modèles proposés permettent de décrire convenablement le comportement global Des dalles renforcées par des patchs de dimensions relativement moyennes par rapport aux dimensions des dalles.
  
- Plus la largeur des bandes composites augmente avec un pas de 10cm dans chaque dalle renforcée, plus la charge maximale augmente et est accompagné d'une réduction importante dans la flèche. Ceci donne un gain de résistance très important.

Enfin, le renforcement des dalles par le collage des matériaux composites semble être une technique prometteuse et demeure un sujet d'intérêt, notamment du point de vue des méthodes de calcul et de dimensionnement, de même que du point de vue de l'évaluation de leur durabilité en service.

Référence

Bibliographique

## Références bibliographiques

- [1] Lacroix Et Al. , Lacroix. R., Fuentes. A., Thonier. H., « Traité De Béton Armé ». Livre Edition Eyrolles, (1982).
  
- [2] Yahiaoui Lamia., «Caractérisation D'un Composité A La Rupture A Base Des Fibres Végétales (Diss)» Thèse De Magister 2011.
  
- [3] Achoura. D., « Contribution A L'étude De La Formulation Et De La Caractérisation Des Bétons De Sable A Base De Laitiers De Hauts Fourneaux d'El-Hadjar», Thèse De Doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie, (2005) 175p.
  
- [4] Sablocrété, 1994 « Sablocrete, Béton De Sable : Caractéristique Et Pratiques D'utilisation », Presses De L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées, France. (1994).
  
- [5] Glossaire Matériaux Composites.
  
- [6] J.M.BERTHELOT, Matériaux Composites: Comportement Mécanique Et Analyse Des Structures, TEC Et DOC 4eme Edition, 2002.
  
- [7] D.G..HERMES, Matériaux Composites, 5eme Edition, 2005.
  
- [8] C.BATHIAS, Matériaux Composites, Edition DUNOD, Année 2005.
  
- [9] Hicham BELHANNACHI « REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BETON ARME » Thèse De Magister En Génie Civil Université Mentouri, Constantine 2009 .
  
- [10] BOUZEBODJA Fatma « Poinçonnement De Dalles Armées De Tissus Composites » Thèse De Doctorat UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU 2017.

- [11] DJELLAD Zohra Amal « Contribution A L'étude Des Dalles Renforcées Par Des Composites : Analyse Expérimentale Et Modélisation » MEMOIRE DE MAGISTER EN GENIE CIVIL UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2015.
- [12] Ould El Hacem Zein El Abidine « RENFORCEMENT DU BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES » Mémoire De Master Académique Université De Tébessa 2015/2016.
- [13] HANTZ Mathieu « Etude De L'optimisation Du Renforcement Par Des Fibres De Carbones Des Dalles En Béton Armé Munies De Trémies, En Utilisant L'optimisation Topologique » Projet De Fin D'Etude Université Fédérale d'Uberlândia, Brésil.
- [14] Document « Renforcement Des Structures Par Collage D'un Tissu De Fibres De Carbone ».
- [15] BENZAID Riad « Contribution A l'Étude Des Matériaux Composites Dans Le Renforcement Et La Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires En Béton » ; Université Constantine, Thèse De Doctorat 2010 - 288p.
- [16] MERDAS Abdel-Elghani « Utilisation Du TFC Dans La Réparation Et Le Renforcement Des Poutres En BA » ; Université De Constantine, Thèse De Magister 2005 – 135p.
- [17] ROCHDI El Houssaini « Contribution A L'analyse Du Comportement Mécanique De Dalles En Béton Arme Renforcées Par Matériaux Composites » ; Université Lyon 1, Thèse De Doctorat 2004 -232p.
- [18] BOUKHAZAR Mohcene « Réhabilitation Et Renforcement Des Poutres Au Moyen Des Matériaux Composites » ; Université De Constantine, Thèse De Magister 2009 – 123p.
- [19] GULRAUD Patrick « Les Solutions Techniques Pour La Réparation Et Le Renforcement Des Ouvrages De Génie Civil En Béton » ; Solution Béton ; Construction Moderne /Annuel Ouvrage D'art ; 2011 – Pp 15 - 22

# Annexe





