



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tébessi – Tébessa –  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique  
**Option Génie des matériaux**

**Mémoire de Master**

**Thème**

**Réparation, renforcement et protection des structures  
en béton au moyen de matériaux composites**

**Présenté par :**

Redjeb Basma

Abd-elKarim Roumaïssa

**Devant le jury**

TORCHANE Lazher	Pr	Université de Tébessa	Président
KHELIFA Hocine	MCB	Université de Tébessa	Rapporteur
HANACHI Mohamed Taher	Pr	Université de Tébessa	Examinateur

Année Universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Dédicace*

"وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب"

*JE DEDIE CE TRAVAIL*

*A MA FAMILLE, ELLE QUI M'A DOTE D'UNE EDUCATION DIGNE, SON  
AMOUR A FAIT DE MOI CE QUE JE SUIS AUJOURD'HUI :*

*PARTICULIEREMENT A MON PERE, POUR LE GOUT A L'EFFORT QU'IL  
SUSCITE EN MOI, DE PAR SA RIGUEUR.*

*A TOI MON MERE, CECI EST MA PROFONDE GRATITUDE POUR TON  
ETERNEL AMOUR, QUE CE RAPPORT SOIT LE MEILLEUR CADEAU QUE JE  
PUISSE T'OFFRIR.*

*A VOUS MES FRERES (ABDERRAHMANE, MOHAMED, BOUBAKEUR), ET  
SŒURS (ROUGAIA, IMENE), ET MES COPINES FETNI -H- ET SOUAD ET LES  
AMIS QUI M'AVEZ TOUJOURS SOUTENU ET ENCOURAGE DURANT CES  
ANNEES D'ETUDES.*

*A TOUS MES AMIS ET MES CAMARADES SANS EXCEPTION.*

*A TOUS CEUX QUI CONTRIBUENT A RENDRE LE MONDE MEILLEUR.*

**REDJEB BASMA**

## *Dédicace*

"وما توفيقى إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب"

*Je suis très heureuse de pouvoir dédier cet humble travail aux être les plus chers à mon cœur:*

*Mon cher père, « MOUSTAFA », mon premier encadrent depuis ma naissance et qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

*A mon modèle de sacrifice, d'amour et de générosité, la lumière de mon chemin et ma vie et mon bonheur : ma très chère maman «Fatiha » que je l'aime.*

*A mes chers frères (Ahmed, Sami, Abd-Elmelk et Chamseddine, Ayoub) qui m'ont toujours encouragé et apporté leur soutien moral et matériel.*

*Et sœurs (Abla et Fatma Ezouhra), tu as toujours été là dans les moments difficiles avec ton soutien moral.*

*Toute ma famille, petite et grande.*

*A tous mes amis.*

***Abd-Elkarim***

***Roumaissa***

## *Remerciements*

*En premier lieu, Nous remercions dieu tout puissant de nous avoir aidées pour arriver à terme de ce travail.*

*Nous tenant à exprimer notre grande reconnaissance et profonde gratitude à :  
Notre prof, **Dr. KHELIFA Hocine** pour avoir encadré ce travail, sa patience, et ses conseils pour le bon déroulement de ce travail.*

*Les membres de jury pour avoir acceptés de juger notre travail.*

*Nous remercions également le personnel qui travaille au laboratoire de la cimenterie pour son aide et ses conseils.*

*Nous remercions également tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.*

### Résumé

L'état structurel des infrastructures en béton est un sujet grandement discuté dans la littérature et les recherches scientifiques. En effet, les structures béton sont souvent confrontées au cours de leur durée de vie, au changement de leur usage certes leur comportement. Ce changement peut occasionner un accroissement des charges d'exploitation, ou une grande proportion de ces structures sont âgés et nécessitent des interventions à court terme. La détérioration dans le temps des structures béton est principalement attribuable aux conditions d'exploitation de plus en plus exigeantes. L'environnement agressif et l'augmentation de l'intensité et du volume des surcharges routières sont en majeure partie responsables de l'accélération du processus de dégradation.

L'objectif principale issue de ce mémoire est de contribuer au développement de techniques novatrices d'utiliser les composites à matrice polymère et fibre de verre dans le domaine de la construction, et plus précisément pour le renforcement, réparation et protection des structures en béton. Pour ce faire, des échantillons en mortier et en béton normalisées ont été élaborés, des défauts sous forme d'entaille ont été créés sur les deux nuances de structures, ensuite le renforcement par collage de composite a été procédé. La caractérisation mécanique des échantillons élaborés a été effectuée par trois essais principaux à savoir : l'essai de flexion 3-points et de compression réalisée sur le mortier ainsi que l'essai de flexion 4-points et de compression réalisée sur le béton. Une approche numérique par la méthode des éléments finis a été créé afin de valider l'approche expérimentale et ceux grâce à un logiciel numérique.

**Mots Clefs** : renforcement, réparation, protection, Béton, mortier, matériaux composite, collage, modélisation, Méthode des éléments finis.

### Abstract

The structural condition of concrete infrastructure is a topic of much discussion in the literature and scientific research. In fact, concrete structures are often confronted over their lifetime with changes in their use and their behaviour. This change may result in increased operating costs, or large proportions of these structures are old and require short-term intervention. The deterioration of concrete structures over time is mainly due to increasingly demanding operating conditions. The aggressive environment and the increase in the intensity and volume of road overloads are largely responsible for accelerating the degradation process.

The main objective of this dissertation is to contribute to the development of innovative techniques to use fibre glass composites in the field of construction, and more specifically for reinforcement, repair and protection of concrete structures. To do this, standardized mortar and concrete samples were developed, notch defects were

The structural condition of concrete infrastructure is a topic of much discussion in the literature and scientific research. In fact, concrete structures are often confronted over their lifetime with changes in their use and their behaviour. This change may result in increased operating costs, or a large proportion of these structures are old and require short-term intervention. The deterioration of concrete structures over time is mainly due to increasingly demanding operating conditions. The aggressive environment and the increase in the intensity and volume of road overloads are largely responsible for accelerating the degradation process.

The main objective of this dissertation is to contribute to the development of innovative techniques to use fibre glass composites in the field of construction, and more specifically for reinforcement, repair and protection of concrete structures. To do this, standardized mortar and concrete samples were developed, notch defects were created on the two structural grades, then reinforcement by composite bonding was carried out. The mechanical characterisation of the developed samples was carried out by three main tests: the 3-point bending and compression tests carried out on the mortar and the 4-point bending and compression tests carried out on the concrete, A numerical approach using the finite element method was created in order to validate the experimental approach and those using numerical software.

Keywords: reinforcement, repair, protection, concrete, mortar, composite materials, collage, modelling, Modelization, Finite element method.

إن الحالة الهيكلية للبنية التحتية للخرسانة، موضوع تمت مناقشته في الكثير من الأدبيات والبحوث العلمية. في الواقع غالبًا ما تواجه هذه الهياكل الخرسانية العديد من التغيرات في سلوكها واستخداماتها خلال فترة حياتها تؤدي إلى زيادة في تكاليف التشغيل، أو أن نسبة كبيرة منها قديمة وتتطلب تدخلات قصيرة الأجل. وهذا راجع إلى ظروف التشغيل متزايدة المتطلبات، كما أن البيئة العدوانية والزيادة في كثافة وحجم الأحمال الزائدة على الطرق هما المسؤولان إلى حد كبير عن تسريع عملية التدهور.

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو المساهمة في تطوير تقنيات مبتكرة لاستخدام مركبات الألياف الزجاجية في مجال البناء، وبشكل أكثر تحديدًا لتعزيز وإصلاح وحماية الهياكل الخرسانية. وللقيام بذلك، تم تطوير عينات موحدة من الملاط والخرسانة، و إنشاء عيوب في شكل شقوق على الدرجتين الهيكليتين. ثم تم إجراء التعزيز عن طريق الترابط المركب و إجراء التوصيف الميكانيكي للعينات المحضرة من خلال ثلاثة اختبارات رئيسية، وهي: اختبار الانحناء والضغط بثلاث نقاط الذي تم إجراؤه على الملاط، وكذلك اختبار الانحناء والضغط بأربع نقاط الذي تم إجراؤه على الخرسانة، تم إنشاء نهج رقمي باستخدام طريقة العناصر المحدودة من أجل التحقق من صحة النهج التجريبي وتلك التي تستخدم البرامج العددية.

الكلمات المفتاحية: تعزيز، تصليح، حماية، خرسانة، ملاط، مواد مركبة، الترابط، النمذجة. تصميم. طريقة العناصر المحدودة.

**Table des matières**

Dédicace	I
Remerciements	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Table des matières	VII
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIV
Liste des Abréviations et symboles	XV
Introduction générale	02
<b>Chapitre I : Théorie des matériaux et structures composites à base du béton.</b>	
I .1 Introduction	05
I .2. État actuel des matériaux de construction	05
I .3. Généralité sur les matériaux de constructions	06
I .3 .1. Béton	06
I .3 .2. Composition du béton	06
I .3 .2.1. Ciment	06
I .3 .2.2. Granulats	06
I .3 .2.2.1. Différents types de granulats	07
I .3 .2. 3. Granulats fins (sable)	07
I .3 .2. 4. L'eau de gâchages	08
I .3 .2.5. Adjuvants	08
I.3.3. Domaines d'emploi du béton	09
I.3.3.1. Bâtiment	09
I.3.3.2. Travaux publics	09

## **Table des matières**

---

I.3.3.2.1. Ponts	<b>09</b>
I.3.3.2.2. Tunnels	<b>09</b>
I.3.3.2.3. Barrages.	<b>09</b>
I.3.3.2.4. Route	<b>09</b>
I.3.3.3. Autres ouvrages	<b>09</b>
I.3.4. Propriétés du béton	<b>10</b>
I.3.5. Avantages et les inconvénients du béton	<b>10</b>
I .3 .5.1. Avantages	<b>10</b>
I .3 .5.2. Inconvénients	<b>10</b>
I .4. Les composites comme élément de renforcement	<b>11</b>
I .4 .1 Définition	<b>11</b>
I .4.2. Constituants des matériaux composites	<b>11</b>
I.4.3. Application des matériaux composites	<b>13</b>
I .4 .4. Classification des matériaux composites	<b>13</b>
I .4. 5 Caractéristiques générales	<b>15</b>
I.4.6. Architecteur des matériaux composite	<b>16</b>
I .4.6.1. Monocouche	<b>16</b>
I.4.6.2. Stratifié	<b>16</b>
I.4.6.3. Sandwichs	<b>17</b>
I.4.7. Avantages et les inconvénients des matériaux composites	<b>17</b>
I .4.7.1. Avantages	<b>17</b>
I .4.7.2. Inconvénients	<b>18</b>
I .5. Comportements mécaniques des structures en béton	<b>18</b>
I .5.1. Comportement en compression	<b>18</b>
I .5.1.1 .Comportement du béton en compression uni-axiale	<b>19</b>
I .5.2. Comportement en cisaillement	<b>20</b>

## **Table des matières**

---

I .5.3. Comportement du béton en traction	<b>20</b>
I.5.4. Comportement en flexion	<b>21</b>
I .6. Renforcement et protection du béton	<b>22</b>
I .6. 1. Causes qui conduisent à renforcer les structures	<b>22</b>
I .6. 2. Méthodes de renforcement des structures en béton	<b>22</b>
I .6.2.a) chemisage	<b>23</b>
I .6.2. B) Chemises en acier	<b>23</b>
I .6.2.c) Tôles collées	<b>24</b>
I .6.2.d) Matériaux composites	<b>24</b>
I .6.2.e) Précontrainte additionnelle	<b>25</b>
I .7 Travaux réalisés sur le renforcement et protection du béton	<b>26</b>
I .8 Conclusion	<b>30</b>
 <b>Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques</b> 	
II.1. Introduction.	<b>32</b>
II.2. Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques.	<b>32</b>
II.2.1. Matériau utilisé et constitutions.	<b>32</b>
II.2.2. Préparation des échantillons en mortier.	<b>34</b>
II.2.2.1. Mortier.	<b>34</b>
II.3. Méthodologie opérationnelle et préparation des échantillons.	<b>35</b>
II.3.1. Mortier normalisé.	<b>35</b>
II.3.2 Béton normalisé.	<b>37</b>
II.4. Composites de renforcement.	<b>38</b>
II.4.1. Matrice en résine polyester.	<b>38</b>
II.4.2. Renfort en fibre de verre.	<b>39</b>
II.4.3. Préparation du composite.	<b>40</b>
II.5. Essai mécaniques.	<b>40</b>

## Table des matières

---

II.5.1. Essai de flexion.	40
II.5.1.1. Principe de l'essai.	41
II.5.1.2. Machines d'essais flexion.	42
II.5.2. Essai de compression.	45
II.5.2.1. But de l'essai.	45
II.5.2.2 Principe de l'essai.	45
II.5.2.3. Machines d'essais de compression.	46
II.6. Conclusion.	49
<b>Chapitre III : Résultats, modélisation et interprétations.</b>	
III.1. Introduction.	51
III.2 .Comportement mécanique des mortiers renforcés par composites.	51
III.2.1. Flexion 3-points.	51
III.2.2. Compression.	53
III.3. Comportement mécanique des Bétons renforcés par composites.	54
III.3.1. Essai de traction par flexion.	54
III.3.2 .Essai de compression	55
III.4. Approche numérique.	56
III.4.1. Introduction.	56
III.4.2. Echelle de modélisation.	56
III.4.3. Modélisation du comportement du béton et mortier.	57
III.4.3.1. Données du problème.	58
III.5. Conclusion.	64
Conclusion générale	66
Référence	68

**Liste des figures**

<b>Figure. I.1</b> : Le béton prêt à l'emploi (BPE).	<b>6</b>
<b>Figure I.2</b> : Des différents types de granulats.	<b>7</b>
<b>Figure I.3</b> :L'eau de gâchage.	<b>8</b>
<b>Figure I.4</b> : Représentation schématique d'un matériau composite.	<b>11</b>
<b>Figure I.5</b> : Différentes familles de renfort.	<b>12</b>
<b>Figure I .6:</b> Les différentes familles de matrice.	<b>12</b>
<b>Figure I.7</b> : Classification des matériaux composites.	<b>14</b>
<b>Figure I .8:</b> Microstructure d'un matériau composite UD.	<b>15</b>
<b>Figure I.9</b> : Matériau composite UD.	<b>16</b>
<b>Figure I.10</b> : Construction d'un stratifié.	<b>17</b>
<b>Figure I.11</b> : Matériau composite sandwich.	<b>17</b>
<b>Figure I.12</b> : Courbe contrainte-déformation en compression simple.	<b>19</b>
<b>Figure.I.13</b> : Courbe typique contraintes - déformations sous compression uni axiale obtenue avec un essai asservi.	<b>20</b>
<b>Figure I.14</b> : Courbe de traction contrainte-déformation.	<b>21</b>
<b>Figure 1.15</b> : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton.	<b>21</b>
<b>Figure I.16</b> : Chemisage en acier.	<b>24</b>
<b>Figure I.17</b> : plaques d'acier collées.	<b>24</b>
<b>Figure I.18</b> : Techniques de renforcement des structures par matériaux composites.	<b>25</b>
<b>Figure I.19</b> : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.	<b>26</b>
<b>Figure I.20</b> : Augmentation de la charge ultime des dalles renforcées.	<b>27</b>
<b>Figure I.21:</b> Courbes charge-temps pour les dalles renforcées (20x20) cm.	<b>28</b>
<b>Figure I.22:</b> Résistance mécanique en compression des différents bétons.	<b>29</b>
<b>Figure II.1</b> : Sac de ciment avec du sable normalisé.	<b>34</b>

## Liste des figures

---

<b>Figure II.2</b> : Etapes nécessaires suivie pour la préparation des échantillons.	<b>37</b>
<b>Figure II.3</b> : Résine polyester et fibre de verre.	<b>39</b>
<b>Figure II.4</b> : Etapes suivies pour le renforcement par collage de composite.	<b>40</b>
<b>Figure II.5</b> : Schéma de principe de flexion trois point.	<b>41</b>
<b>Figure II.6</b> : Schéma de principe de flexion quatre point.	<b>42</b>
<b>Figure II.7</b> : Appareil d'essais de flexion trois points de marque Toni Technique.	<b>42</b>
<b>Figure II.8</b> : Procédure de l'essai de flexion trois point.	<b>43</b>
<b>Figure II.9</b> : appareil -Tecno test- de l'essai de flexion quatre point.	<b>43</b>
<b>Figure II.10</b> : Procédure de l'essai de rupture par flexion quatre point.	<b>44</b>
<b>Figure II.11</b> : Principe d'essai de compression.	<b>45</b>
<b>Figure II.12</b> : Appareil d'essai de compression trois points (mortier) de marque Toni Technique.	<b>46</b>
<b>Figure II.13</b> : Essai de compression sur mortier.	<b>47</b>
<b>Figure II.14</b> : Appareil CONTROLAB de compression de béton.	<b>47</b>
<b>Figure II.15</b> : Moules sur l'essai de compression et de flexion 4-points	<b>48</b>
<b>Figure II.16</b> : Essai de compression sur béton cylindrique.	<b>48</b>
<b>figure III.1</b> : Histogramme des résultats de l'essai de flexion 3-points.	<b>53</b>
<b>Figure III.2</b> : Histogramme des résultats de l'essai de compression.	<b>54</b>
<b>Figure III.3</b> : Histogramme des résultats de l'essai de flexion 4-points.	<b>55</b>
<b>Figure III.4</b> : Histogramme des résultats de l'essai de compression.	<b>56</b>
<b>Figure III.5</b> : Eprouvette modélisée pour la flexion 3 points.	<b>58</b>
<b>Figure III.6</b> : Distribution des contraintes (iso-valeurs).	<b>60</b>
<b>Figure III.7</b> : Distribution des déformations (iso-valeurs).	<b>60</b>
<b>Figure III.8</b> : Distribution des contraintes principales.	<b>60</b>
<b>Figure III.9</b> : Evolution des contraintes en fonction de la ligne moyenne.	<b>61</b>
<b>Figure III.10</b> : Ouverture de fissures (25 itérations de calculs).	<b>62</b>

## Liste des figures

---

- Figure III.11** : Ouverture de fissures (50 itérations de calculs). 62
- Figure III.12** : Comportements mécaniques contrainte-allongement pour chaque cas du mortier. 63

**Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1 :</b> Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment.	<b>8</b>
<b>Tableau I.2 :</b> Propriétés mécaniques du béton.	<b>10</b>
<b>Tableau I.3 :</b> Résistance à la flexion pour différents types de bétons.	<b>27</b>
<b>Tableau I.4 :</b> Caractéristiques physiques et mécanique des fibres de carbone.	<b>28</b>
<b>Tableau I.5 :</b> Résistance à la compression des différents bétons (en MPa).	<b>29</b>
<b>Tableau II.1 :</b> Dimensions des éprouvettes et essais mécaniques.	<b>33</b>
<b>Tableau II.2 :</b> Propriétés physiques et composition chimique du ciment.	<b>33</b>
<b>Tableau II.3 :</b> Les quantités des matériaux utilisés.	<b>35</b>
<b>Tableau II.4 :</b> Dosage en granulats.	<b>38</b>
<b>Tableau II.5 :</b> Caractéristiques de matrices polyester.	<b>39</b>
<b>Tableau II.6 :</b> Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.	<b>39</b>
<b>Tableau III.1 :</b> Résultats de l'essai de flexion 3-point des éprouvettes en mortier.	<b>52</b>
<b>Tableau III.2 :</b> Résultats de l'essai de compression des éprouvettes en mortier.	<b>53</b>
<b>Tableau III.3 :</b> Résultats d'un essai de traction par flexion en béton.	<b>54</b>
<b>Tableau III.4 :</b> Résultats d'un essai de compression en béton.	<b>55</b>
<b>Tableau III.5 :</b> Dimensionnements des structures (en béton et en mortier).	<b>58</b>
<b>Tableau III.6 :</b> Différents échantillons utilisés pour la modélisation du mortier	<b>59</b>
<b>Tableau III.7 :</b> Comparaison de données numériques et expérimentales.	<b>64</b>

Liste des Abréviations et symboles

**PRF**: polymères renforcés de fibres.

**mm**: millimètre.

**MPa**: mega-pascal.

**kN** : kilo-newton.

**g/l**: gramme/litre.

**s**: Déformation.

**$\vartheta$** : Viscosité.

**Gpa**: giga pascal.

**SiC**: silicium.

**BSiC**: bore revêtues de carbure de silicium.

**UD** Unidirectionnel

**Fc**: Résistance à la compression.

**$\epsilon_u$** : Déformation ultime.

**$\sigma$** : Contrainte.

**PEBD**: Polyéthylène à base densité.

**BT**: Béton témoin avec sable de dunes.

**BV**: Béton avec chamotte .

**BC**: Béton avec vase.

**BF**: Béton avec fibres métalliques .

**BVCF**: Béton avec vase, chamotte et fibres métalliques.

**SiO<sub>2</sub>**: Silice (S).

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**: Alumine (A).

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**: oxyde ferreux.

**CaO**: Chaux (C).

**MgO**: l'oxyde de magnésium.

**SO<sub>3</sub>**: trioxyde de soufre.

**°C**: Degrée Celsius.

**C**: Ciment.

## Liste des Abréviations et symboles

---

**S:** Sable.

**G1 et G2:** Granulat 1 et 2.

**E/C:** Eau /ciment .

**Mm:** Micromètre.

**L:** distance en deux appuis.

**N/S:** newton/ seconds.

**$R_f$ :** La résistance à la flexion .

**$F_f$ :** La charge appliquée au milieu du prisme a la rupture .

**$b$ :** La côté de la section carrée du prisme.

**Rc:** La résistance à la compression.

**Fc:** La charge maximale à la rupture.

**$\sigma_f$ :** Contrainte de flexion.

**F:** Charge totale appliquée à la rupture en flexion exprimé .

**b et h:** Sont la largeur et la hauteur de l'éprouvette exprimées.

**S:** La section de l'éprouvette.

**MBSE:** Mortier Brute Sans Entaille.

**MBAE:** Mortier Brute Avec Entaille.

**MRSE:** Mortier Renforce Sans Entaille.

**MRAE:** Mortier Renforce Avec Entaille.

**BBSE :** Béton Brute Sans Entaille.

**BBAE:** Béton Braute Avec Entaille.

**BRSE:** Béton Renforce Sans Entaille.

**BRAE:** Béton Renforce Avec Entaille.

**$mm^3$ :** millimètres cubes.

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les phénomènes de dégradation du béton sont complexes et variés. Il est nécessaire de les connaître afin de pouvoir les détecter facilement. Un bon diagnostic est indispensable pour déterminer le choix de travaux à entreprendre et les produits à utiliser. Rappelons qu'il est toujours plus économique de protéger un ouvrage, de lui assurer un entretien et un contrôle périodique que d'attendre une dégradation avancée pour intervenir car cette intervention tardive sera forcément coûteuse.

Selon son état de dégradation, le traitement qu'il faut administrer au béton est différent. Il peut s'agir dans une première phase, de corriger des défauts d'esthétique tout en donnant au matériau sa protection naturelle. A un autre stade de la dégradation, il s'agira de reconstituer le matériau lui-même tout en évitant que le mal ne se reproduise. Et, si rien n'a été fait, alors qu'il en était encore temps, il deviendra indispensable de renforcer ou de renouveler la structure.

Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites à matrice organique collés extérieurement sur des structures dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone ou le verre ..., de part leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix moyen, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact, procédé appelé aussi polymérisation in-situ ou stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions des activités des ouvrages réparés.

L'objectif principal recherché dans notre travail de mémoire est l'évaluation du comportement mécanique des structures de construction à base de béton et du mortier par le biais d'un renforcement par matériau composite fibre de verre/résine polyester. Ceci permettant de donner aux structures une protection cohérente, une nouvelle résistance et une prolongation de leur durée de vie.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en trois chapitres à savoir :

- Le premier Chapitre présente une approche théorique sur les matériaux composites de construction à base de béton et mortier afin de connaître leur comportement mécanique et les propriétés mécaniques globales et ou de ses différents constituants. Les différents travaux de recherches dans le domaine du renforcement des structures de construction soit aussi représentés.

## Introduction générale

---

- Le second chapitre présenté dans ce mémoire, traite les principales techniques expérimentales et conditions d'essai utilisées pour la préparation et le renforcement par collage d'un composite, des éprouvettes en mortier et ou en béton. La caractérisation mécanique des échantillons élaborés a été réalisée à travers trois essais principaux : essai de flexion 3-points, de flexion 4-points et de compression. Les différentes machines mise en opération pour les différents tests précités sont aussi présentées.
- Le troisième chapitre expose les différents résultats expérimentaux obtenus lors des essais mécaniques ainsi que leurs interprétations. Une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis a été générée afin de valider l'approche expérimentale et ceux grâce à un logiciel de calcul numérique. Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

**CHAPITRE I :**  
**THEORIE DES MATERIAUX ET**  
**STRUCTURES COMPOSITES A**  
**BASE DU BETON**

### I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de décrire premièrement une approche théorique sur les matériaux composites de construction émergents qui répondent aux nouvelles attentes des constructeurs. Afin de connaître le comportement mécanique d'une structure renforcée, il est nécessaire d'exposer les propriétés mécaniques de ses différents constituants : béton, mortier, adhésif, matériau composite.....etc. Deuxièmement, le point sera fait sur les potentiels de développement des couches en composite à matrice therm durcissable pour le renforcement extérieur par collage des matériaux de constructions. Enfin, un bilan général sur les différents travaux dans le domaine du renforcement des structures en béton.

### I.2 État actuel des matériaux de construction

Les infrastructures dans le monde et/ou en Algérie sont un immense réseau de routes, de bâtiments de l'industrie et de ponts qui doit répondre aux besoins humains, tant économiques que sociaux, dont leurs états actuel de ces infrastructures est préoccupant. En effet, plusieurs d'entre eux montrent des signes de détérioration importante, les causes possibles sont nombreuses : vieillissement des matériaux, la corrosion, l'augmentation de la surcharge routière, une conception inappropriée, des erreurs commises lors de la construction ou même une combinaison de ces facteurs. La nécessité de résoudre ces problèmes n'offre que deux possibilités : reconstruire ou réparer. Or, il est souvent beaucoup moins onéreux de renforcer certains éléments structuraux que d'effectuer une reconstruction complète de l'ouvrage ou autre.

Différentes techniques de renforcement externe des structures en béton sont apparues. L'une des premières à être utilisée est le collage d'éléments d'acier sur les surfaces exposées aux sollicitations. L'autre est l'émergence des polymères renforcés de fibres (PRF) qui présentent de nombreux avantages dans à leur utilisation, puisqu'ils affichent un rapport résistance-poids très élevé et ne corrodent pas. Ainsi, les PRF peuvent à la fois servir au renforcement en flexion et en cisaillement de poutres en béton armé, aussi bien qu'au confinement de colonnes de structures saines ou endommagée. [1]

### I.3 Généralité sur les matériaux de constructions

#### I.3.1 Béton

Le béton, depuis son origine, a été réalisé à partir des composants de base qui sont le ciment, l'eau et les granulats. Le ciment constitue la phase liante du béton, avec une taille de grains comprise entre 1 et 100 micromètres ; le sable, avec une taille de grains jusqu'à 5 mm et les granulats ou graviers de grosseur comprise entre 5 et 25mm. Depuis son invention le béton occupe, la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son faible coût. Il présente également d'autres qualités, telles une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc... [2]



**Figure I.1** : Le béton prêt à l'emploi (BPE). [3]

#### I.3.2 Composition du béton

##### I.3.2.1 ciment

Est un " liant hydraulique" le mot 'liant' veut dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres. Le qualificatif " hydraulique " précise, d'une part, que ce liant durcit à froid par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif et, d'autre part, qu'il durcit, non seulement dans l'air mais également dans l'eau (Bouhmid, 2011). [4]

##### I.3.2.2 granulats

Les granulats est un fragment de roche destiné à la fabrication d'ouvrage de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Leur nature et leur forme dépendent de leur provenance

et des techniques de production. Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimensions (comprise entre 0 et 125). Se situe dans l'une des 7 familles suivantes

- Fillers, gravillons, sablons, sables ;
- Graves, ballast ;
- Enrochements.

### I.3.2.2.1 différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée

- «Naturels», lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- «Artificiels», lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- «Recyclés», lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés. [5]



Figure I.2 : Des différents types de granulats. [5]

### I.3.2.3 granulats fins (sable)

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre  $80\mu\text{m}$  et  $05\mu\text{m}$  ; il s'agit d'une définition globale dont les bornes varient d'une classification à une autre, ce 'est un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à  $6.3\text{mm}$  et dont le passant à  $80\mu\text{m}$  n'excède pas 30% dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à  $5\text{mm}$ .les fines. [6]

### I.3.2.4 L'eau de gâchage

En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient défavorablement sur le durcissement (matières organiques telles que le huiles, les graisses, et les sucres ...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...). L'eau potable du réseau de distribution convient très bien mais l'eau puisée en eau courante ou dans la nappe phréatique peut en général convenir. On évitera toujours l'approvisionnement en eaux stagnante odoriférantes. [7]



Figure I.3 : L'eau de gâchage. [8]

### I.3.2.5 adjuvants

Il y a déjà longtemps on a remarquées et étudiées l'action sur les bétons de ciment de certains produits employés en faibles quantités. Cependant, ce n'est que depuis une trentaine d'années que sont apparus, de plus en plus nombreux sur le marché, des produits d'addition couramment désignés maintenant sous le nom. « D'adjuvants ». On peut admettre qu'en France la proportion de béton « adjuvants » dépasse 10 %. [9]

Tableau I.1 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment. [8]

ADJUVANTS	DOSAGE EN %
Plastifiants	0,15 à 1,2
Superplastifiants	0,6 à 2,5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissement	0,8 à 2
Retardateurs de prise	0,2 à 0,8
Hydrofuges	0,5 à 2
Entraîneurs d'air	0,05 à 3
Rétenteurs d'eau	0,1 à 2

### I.3.3 Domaines d'emploi du béton

#### I.3.3.1 Bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considère sa participation dans la construction de logements : pour les murs, 80 % des techniques en individuel, plus de 90 % en collectif pour les structures ; pour les planchers le béton est pratiquement le matériau idéal, le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels.

#### I.3.3.2 travaux publics

##### I.3.3.2.1 Ponts

Les progrès techniques, et en particulier l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.

##### I.3.3.2.2 Tunnels

Pour les grands tunnels, dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est soit coulé en place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer – le tunnelier.

##### I.3.3.2.3 barrages

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

##### I.3.3.2.4 route

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse, traitement de surface. Les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

#### I.3.3.3 Autres ouvrages

Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshore ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées. [10]

### I.3.4 Propriétés du béton

Le béton est constitué par le mélange, dans des proportions étudiées, de ciment, de granulats et d'eau et d'adjuvants, la variation des différentes proportions de ces constituants se répercutera sur les caractéristiques physiques et mécaniques. Une augmentation de la quantité d'eau entraîne une augmentation du fluage, du retrait et des tensions internes, elle équivaut à consommer inutilement du ciment.

Une diminution de l'eau donne des bétons raides, difficilement maniables, le choix des granulats à une influence sur la fluidité du mélange. Les additions (fumée de silice, cendres volantes...) influent sur la compacité du béton, et complétant la courbe granulométrique du béton vers les éléments fins. Les adjuvants améliorent la maniabilité, modifie sa prise et son durcissement et, dans un certain cas, avoir un rôle d'entraîneur d'air, d'hydrofuges de masse.

[1]

**Tableau I.2** : Propriétés mécaniques du béton. [11]

Matériau	E (GPa)	$\nu$	Limite élastique en compression (MPa)	Limite élastique en traction (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
Béton	30 – 45	0,2	15 - 50	2 - 6	20 - 80	2 - 8

### I.3.5 Avantages et les inconvénients du béton

#### I.3.5.1 Avantages

- Se moule, épouse toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.
- Peu couteux, facile à fabriquer, peu d'entretien.
- Devient solide comme de la pierre.
- Résiste bien au feu et aux actions mécaniques habituelles.
- Associé à l'acier, il offre des possibilités de constructions très vastes.

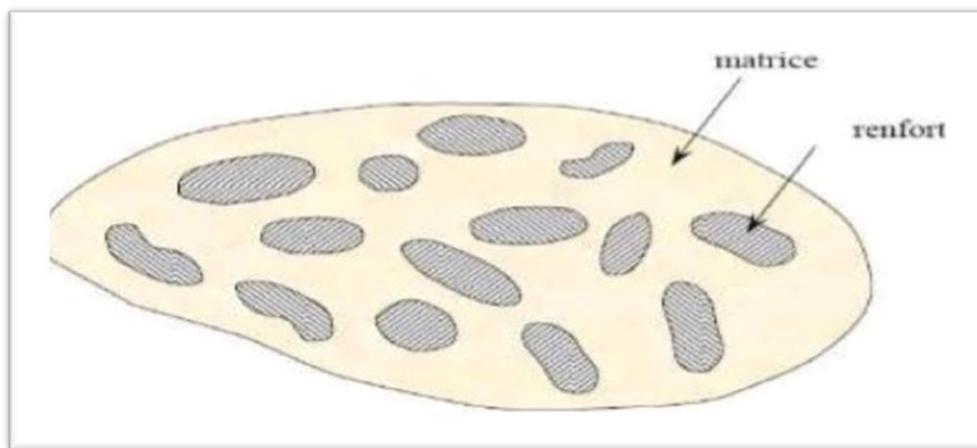
#### I.3.5.2 Inconvénients

- Faible résistance à la traction.
- Faible isolation thermique.
- Coffrages nécessaires pour sa mise en œuvre.
- Sa destruction entraîne un cout élevé (en cas de démolition) et n'est pas ou peu recyclable. [12]

### I.4 les composites comme élément de renforcement

#### I.4.1 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues répartie dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice. [13]



**Figure I.4** : Représentation schématique d'un matériau composite. [14]

#### I.4.2 Constituants des matériaux composites

- Un matériau composite est l'association de deux constituants :
- les renforts ;
- La matrice.

**Les renforts** : ils constituent l'armature ou le squelette du composite, il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Ils sont souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Sous forme linéique (fils, mèche etc.)
- Sous forme de tissus surfacique (tissu simple, mats, etc.)
- Sous forme multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, etc.)
- Des fibres courtes particulières, dont les caractéristiques mécaniques sont élevées, sont également développées. Leur utilisation est toutefois limitée du fait des difficultés de fabrication.

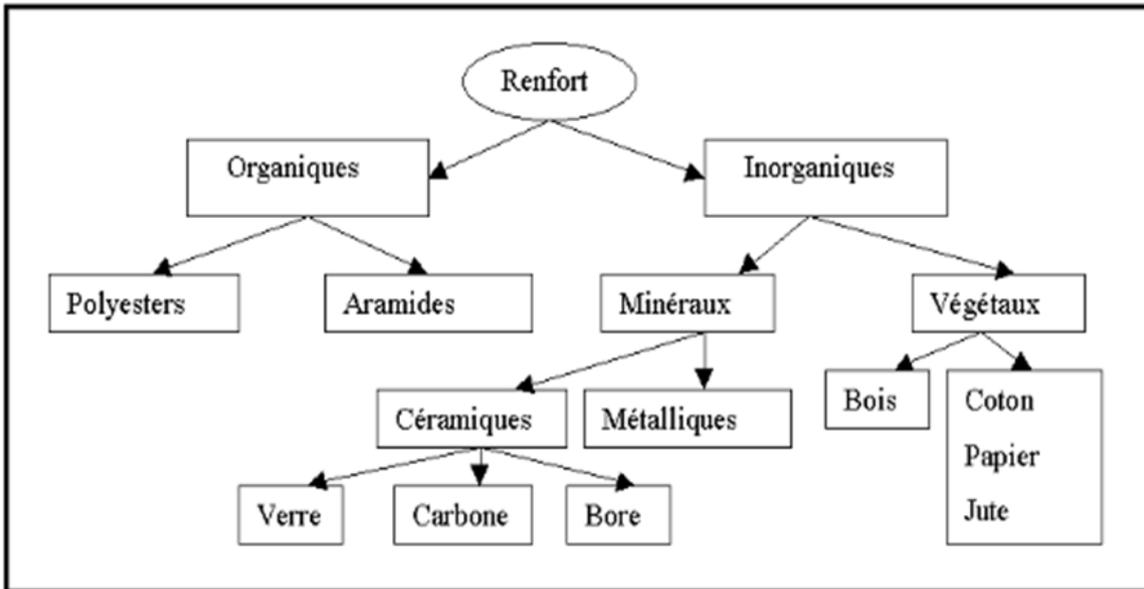


Figure I.5 : Différentes familles de renfort. [15]

**Matrice** : La matrice lie les fibres, répartie les efforts et assure la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique. En plus de ces deux constituants de base, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort- matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif.

Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase... etc. qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. [15]

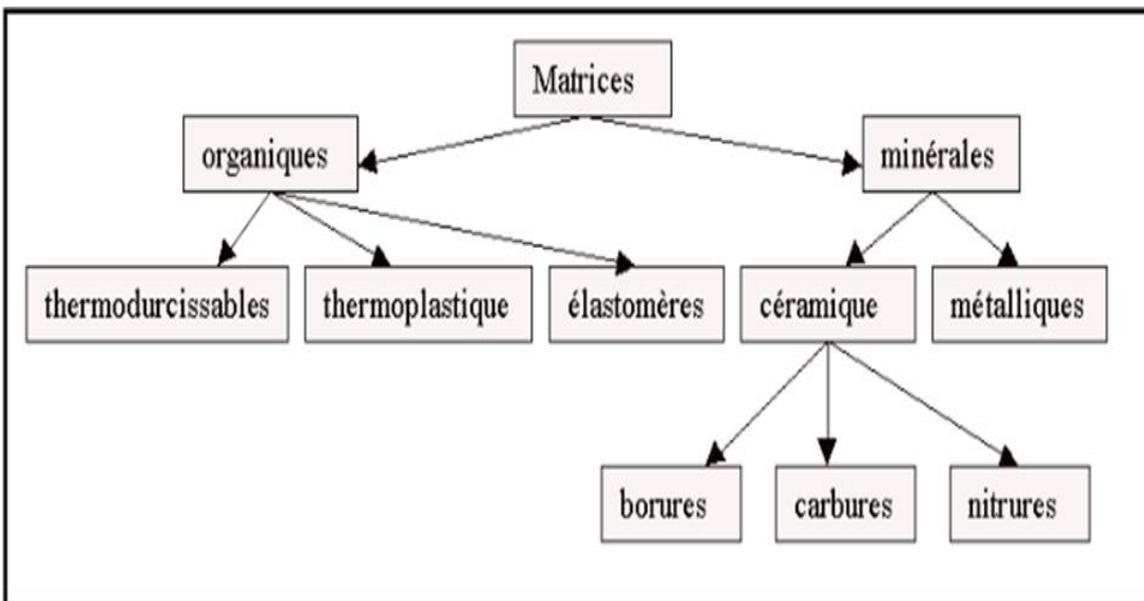


Figure I.6 : Les différentes familles de matrice. [15]

### I.4.3 Applications des matériaux composites

L'éventail des applications des matériaux composites sont très large à savoir :

- Electricité et électronique : isolants, supports de disjoncteurs et de circuits imprimés...
- Bâtiments et travaux publics : habitations, cheminées d'usine, piscines, coffrages, cloison, portes, sanitaires...
- Transports routiers : pièces de carrosseries, roues, calandres, ressorts de suspension, sièges...
- Transports ferroviaires : voitures, avant de motrices, gaines de ventilation...
- Transports maritimes : hovercrafts, vedettes, voiliers de compétition... Transports aériens : avion de tourisme, pièces d'avion : bords d'attaque, volets, dérives pales d'hélicoptères, disques de freins d'avion...
- Transport spatial : corps de propulseurs, réservoirs...
- Mécanique générale et divers : bras de robots manipulateurs, corps de vérins, tuyauteries, bouteilles de gaz sous pression. [16]

### I.4.4 Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures.

#### a) Suivant la nature des constituants

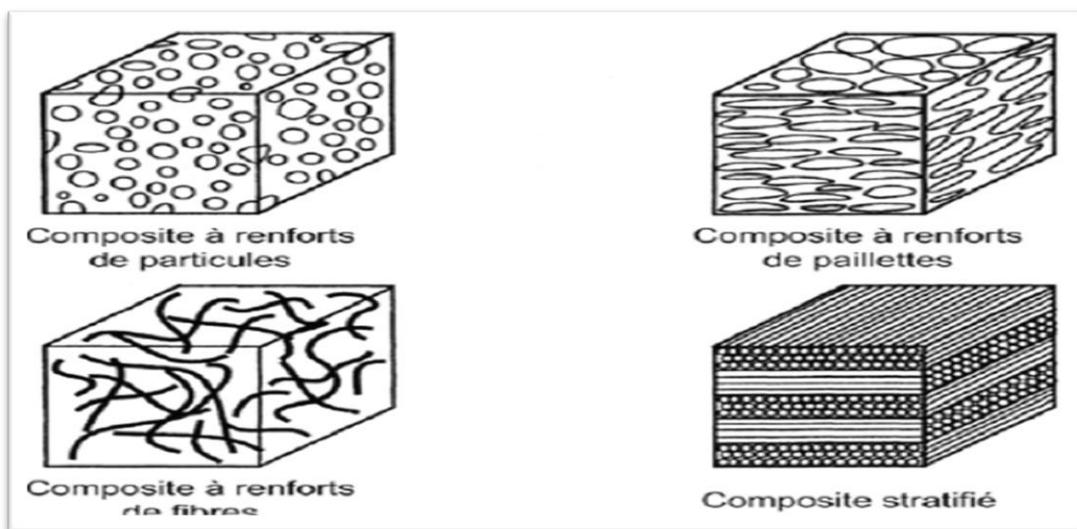
- Composites à matrice organique : (résine, charges) avec :
  - Fibres minérales : verre, carbone etc.
  - Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
  - Fibres métalliques : bore, aluminium, etc.
  - Composites à matrice métallique :(alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec
  - Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
  - Des fibres métalliques : bore
  - Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BSiC).
- Composites à matrice minérale : (céramique), avec
  - Des fibres métalliques : bore ;
  - Des particules métalliques : cermets ;
  - Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

### b) Suivant la morphologie

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes :

- Composites à renforts de particules : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.
- Composites à renforts de paillettes : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'une à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.
- Composites à renforts de fibres : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
- Composites stratifiés : Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues.

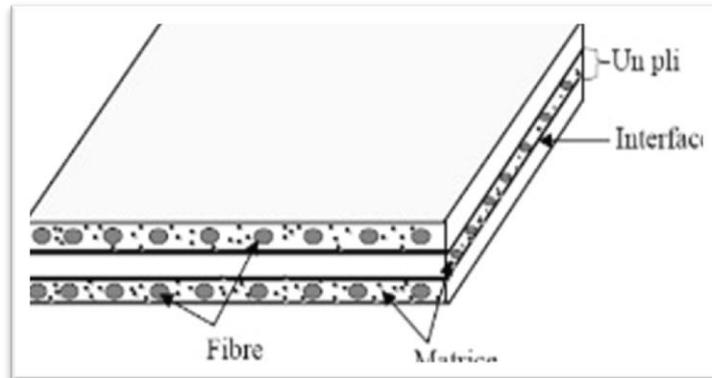
Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification. [17]



**Figure.I.7** : Classification des matériaux composites. [17]

### I.4.5 Caractéristiques générales

Un matériau composite se compose dans le cas le plus général, d'une ou de plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue ; dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques meilleures que celles de la phase continue. La phase continue c'est la matrice et la phase discontinue est appelée renfort ou matériau renforçant.



**Figure. I.8** : Microstructure d'un matériau composite UD. [18]

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants ;
- De leur distribution géométrique ;
- De leur interaction, etc.

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, sa distribution ;
- La nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. 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 du matériau composite. Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une « Homogénéité » du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure.

Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite. Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie 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. [18]

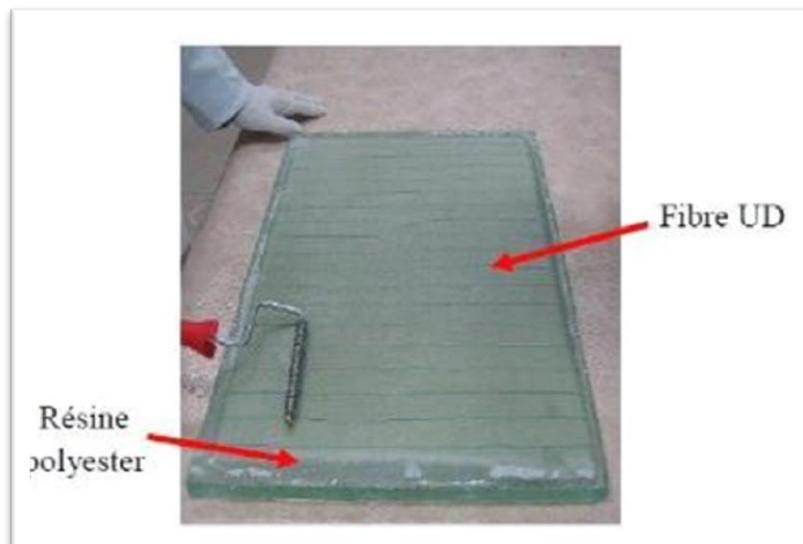
### I.4.6 Architecteur des matériaux composites

On distingue :

#### I.4.6.1 Monocouche

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. [19]

#### I.4.6.2 Stratifié



**Figure I.9** : Matériau composite UD. [18]

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure I.10).

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. [20]

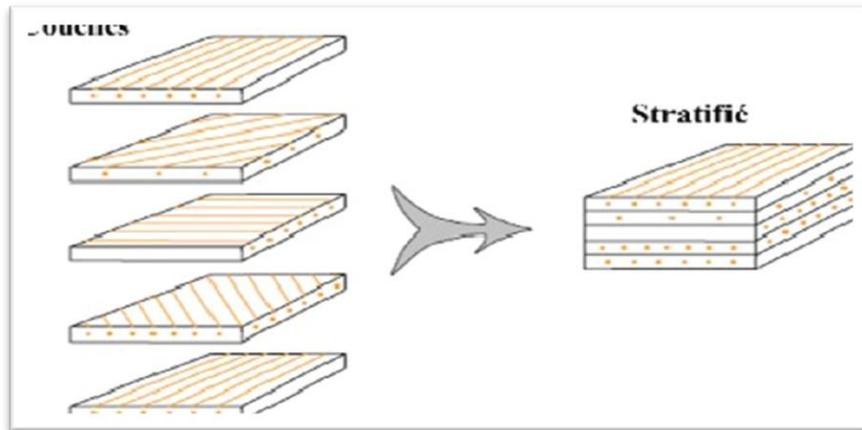


Figure I.10 : Construction d'un stratifié. [20]

### I.4.6.3 Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. La figure ci- après représente un matériau composite Sandwich. [18]

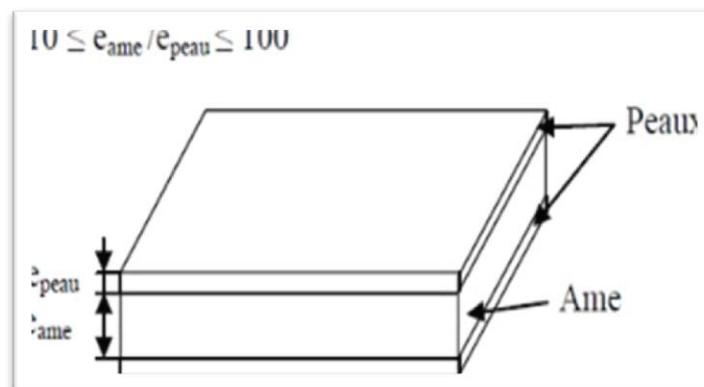


Figure. I.11 : Matériau composite sandwich. [18]

### I.4.7 Avantages et les inconvénients des matériaux composites

#### I.4.7.1 Avantages

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.

- Insensibles aux produits chimiques « mécaniques » comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvant, pétrole.

### I.4.7.2 Inconvénients

- Vieillessement sous l'action de l'eau et de la température
  - Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
  - Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
  - Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
  - Coût parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.
- [16]

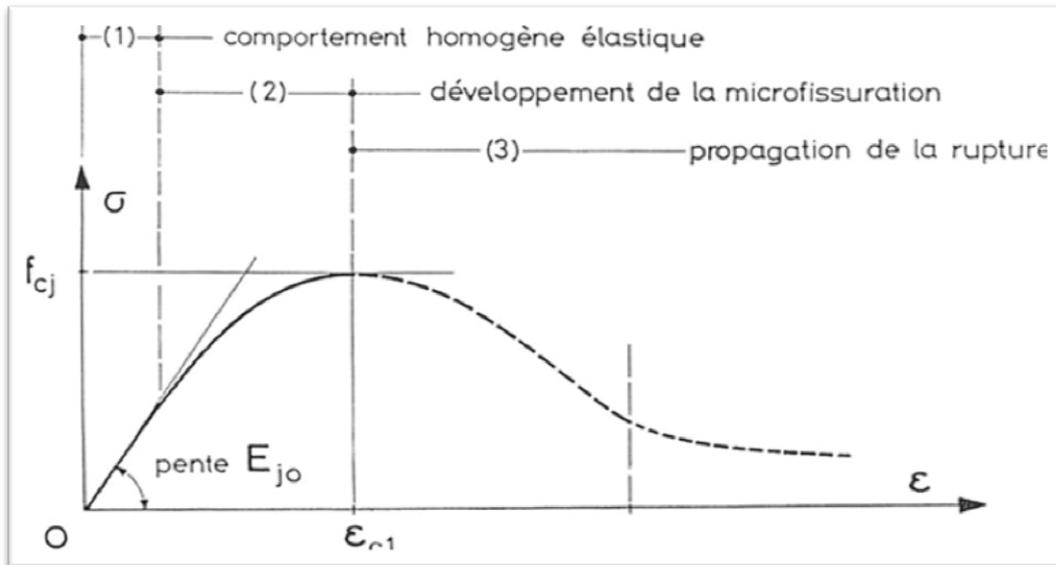
## I.5 Comportements mécaniques des structures en béton

En construction civil ou industriel, le béton est sans doute le matériau le plus utilisé pour la mise en œuvre. Afin de mener à bien le calcul de n'importe quel structure, il est nécessaire de connaître la réponse de ce matériau aux diverses sollicitations. L'une des caractéristiques du béton est un comportement différent en traction et en compression : il est beaucoup plus résistant en compression. C'est la raison pour laquelle il est souvent considéré comme ayant une résistance nulle en traction lors des calculs réglementaires de structures. Ce comportement, en traction et en compression, est fortement influencé par les mécanismes internes d'altérations qui conduisent à une perte de raideur.

### I.5.1 Comportement en compression

La résistance en compression est le paramètre de base pour le béton, elle définit souvent une classe de résistance dont sont censées découler beaucoup d'autres propriétés. Le comportement de béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation, cette relation est présentée schématiquement à la figure I.12. On peut distinguer, à déformation croissante, trois phases de comportement :

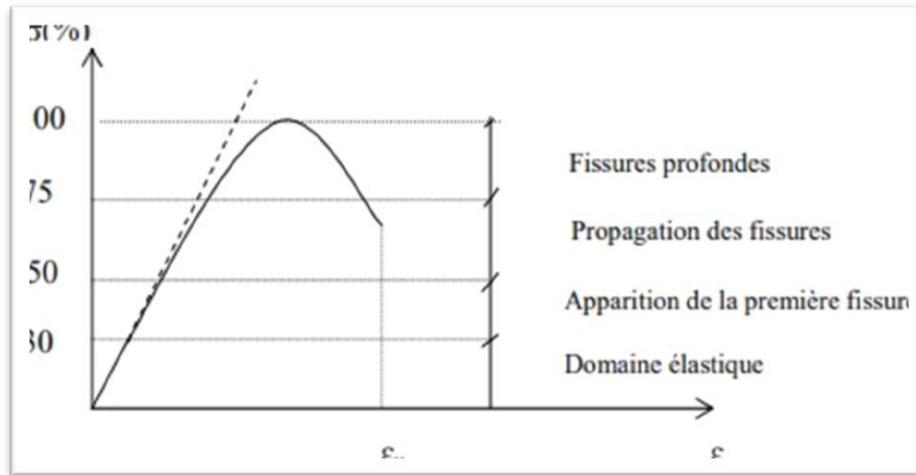
1. Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation.
2. La phase de développement de la microfissuration qui entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte.
3. La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture.



**Figure I.12** : Courbe contrainte-déformation en compression simple. [21]

### I.5.1.1 Comportement du béton en compression uni-axiale

La courbe typique contrainte - déformation pour un béton à la compression uni- axiale, figure I.14, présente un comportement linéaire élastique jusqu'à environ 30% de la résistance maximale à la compression,  $f_c$ . Au-delà de la valeur limite d'élasticité, la courbe enregistre une augmentation graduelle en courbure évaluée autour de 75 à 90% de la résistance ultime à la compression,  $f_c$ . Au-delà du pic, la courbe présente une partie descendante dans le cas d'un essai asservi (déformation contrôlée) jusqu'à la rupture par écrasement à une déformation ultime ( $\epsilon_u$ ). Pour une contrainte avoisinant 30% de  $f_c$ , les fissures avant chargement restent presque inchangées. Pour une contrainte entre 30 et 50% de  $f_c$ , les fissures commencent à s'étendre à cause des concentrations des contraintes aux pointes de celles-ci. Pour une contrainte entre 50 et 70% de  $f_c$ , quelques nouvelles fissures apparaissent dans le mortier et d'autres fissures s'étendent lentement. Si la charge reste constante, les fissures se propagent à une vitesse décroissante jusqu'à ce qu'elles atteignent leurs longueurs finales. Pour des contraintes élevées, de larges fissures atteignent les dimensions critiques causant éventuellement la rupture.



**Figure.I.13** : Courbe typique contraintes - déformations sous compression uniaxiale obtenue avec un essai asservi. [22]

### I .5.2 Comportement du béton en cisaillement

Les essais de cisaillement utilisés pour l'étude des matériaux composites permettent de connaître le comportement au cisaillement (contrainte et module de cisaillement) soit selon une sollicitation dans le plan des couches (cisaillement inter laminaire), soit selon une sollicitation perpendiculaire aux couches (cisaillement intra- laminaire). Ces essais sont très souvent difficiles à mettre en œuvre, portant sont très importants pour l'étude d'un matériau composite. Plusieurs méthodes d'essais existent et chacune présente quelques inconvénients. Les contraintes de cisaillement, dans les composites (unidirectionnels), jouent un rôle important sur la dégradation des interfaces et par-là même sur la tenue en service de ces matériaux. L'essai de flexion trois points est bien adapté à la caractérisation de cette influence car il permet de contrôler ces contraintes en jouant sur l'éclatement de l'éprouvette. [23]

### I .5.3 Comportement en traction

La résistance mécanique du béton en traction reste inférieure au 1/10 de celle en compression. Différents types d'essais peuvent être entrepris pour caractériser le comportement de ce matériau sous sollicitations de traction. Cependant cette technique reste d'une mise en place lourde et nécessite un appareillage spécifique tant au niveau de la presse que de l'éprouvette. En traction, le comportement se compose des phases suivantes : Avant l'atteinte du pic, le comportement est presque linéaire, puis une non-linéarité apparaît à l'approche du pic. Juste après le pic, la résistance chute considérablement jusqu'à s'annuler pour un déplacement largement supérieur à celui correspondant à la résistance maximale.

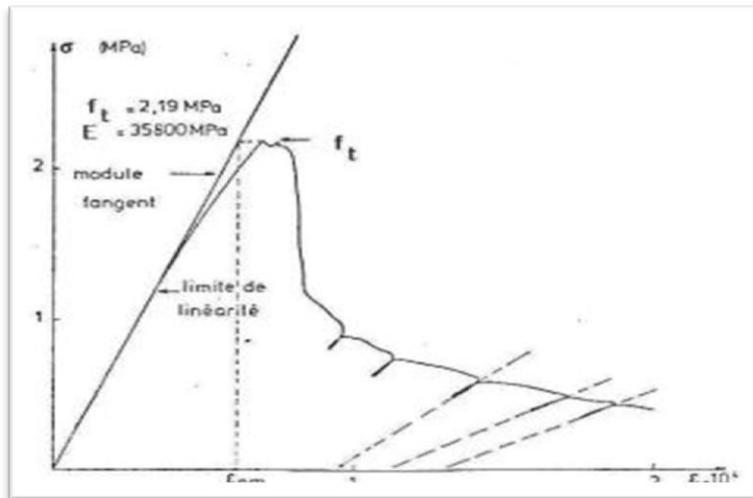


Figure I.14 : Courbe de traction contrainte-déformation. [24]

### I.5.4 Comportement en flexion

Les essais de flexion qu'on appelle aussi « traction par flexion » ont l'avantage de retranscrire de manière plus réaliste ce qui se passe dans beaucoup d'éléments structuraux. Les essais de flexion trois points réclament quelques précautions. En effet, sont souvent rencontrés, au cours de l'essai, des tassements dus au matage du béton par les rouleaux d'appuis. Ceci entraîne une variation de la position absolue de la fibre comme le montre la courbe de la figure I.15.

Il faut donc que la référence de mesure de la flèche soit indépendante du tassement. Par ailleurs, des dispositifs de limitation des tassements d'appuis peuvent être utilisés.

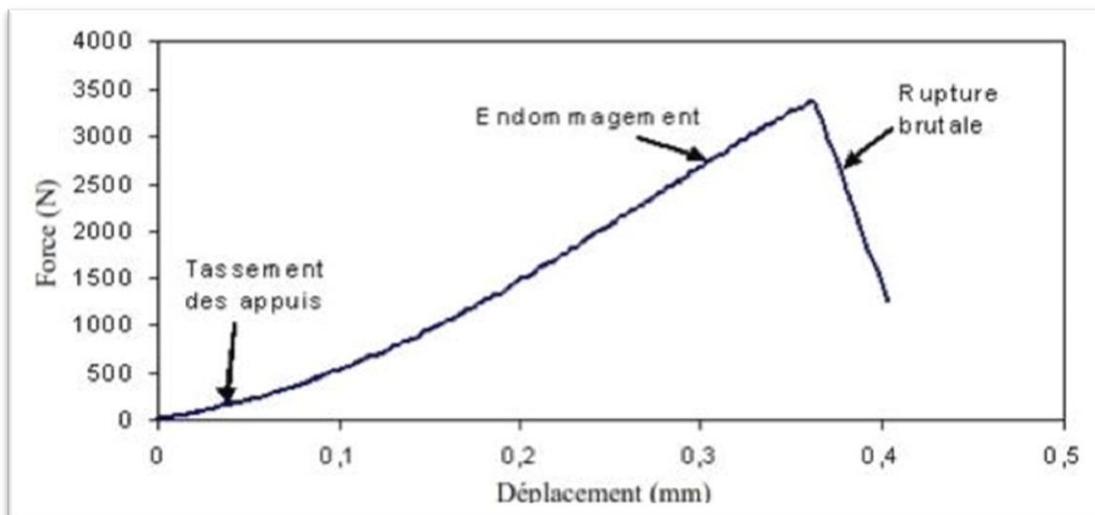


Figure I.15 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton. [23]

### I.6 Renforcement et protection du béton

Dans les ouvrages en béton, il est possible de classer les éléments constitutifs en deux catégories les éléments verticaux (poteaux, voiles) et les éléments horizontaux (poutres, dalles). Aux différents stades de l'évolution de la vie de l'ouvrage, de l'étude à la fin de vie de l'ouvrage, plusieurs raisons peuvent conduire à renforcer les ouvrages afin de maintenir leur sécurité ou leurs fonctions. On peut dès lors citer une mauvaise conception, une mauvaise réalisation (positionnement d'armatures passives par exemple) ou encore des défauts de durabilité. Une des solutions envisageables consiste à appliquer des matériaux composites sur la plupart des éléments béton standards. Ce type de réparation peut permettre d'augmenter les résistances à rupture, augmenter la ductilité, limiter les ouvertures de fissures. [24]

#### I.6.1 Causes conduisant le renforcement

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. 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,
- Dégâts dans la structure : corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impacts contre la structure, incendies.

#### I.6.2 Méthodes de renforcement des structures en béton

Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème du renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation).

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de protection de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de réparation visant à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de renforcement ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années. [25]

### a) chemisage

Le chemisage en béton résulte une augmentation de la section du poteau et cela se fait par l'addition des armatures longitudinales et transversales à l'élément déjà existant et puis la mise en place d'un nouveau béton d'enrobage. Cette technique est appliquée pour les poteaux afin d'assurer les besoins suivants :

- Augmentation de la portance ;
- Augmentation de la résistance en flexion et au cisaillement ;
- Augmentation de la capacité de déformation

Le chemisage en béton peut être continu entre les étages ou discontinu. Dans le cas d'un chemisage des poteaux pour assurer une augmentation de flexion cela conduit à un renforcement continu, contrairement dans le cas du renforcement pour améliorer la capacité de résistance et de déformation vis-à-vis de l'effort tranchant, alors un chemisage discontinu est demandé. Pour la continuité entre les étages, les barres doivent passer à travers des trous fait dans les dalles, en plus des trous sont faits dans la fondation pour faire une continuité entre les éléments. [26]

### 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.



**Figure I.16** : Chemisage en acier. [26]

### c) Tôles collées

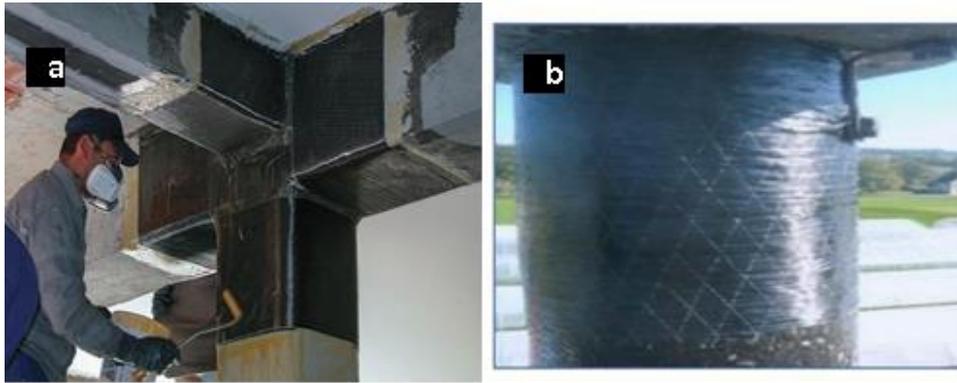
Le renforcement de la structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermitte, consiste à réaliser un collage de tôles d'acier sur les supports de béton. La tôle joue à la fois le rôle de coffrage et d'armatures. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, 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.



**Figure I.17** : plaques d'acier collées. [25]

### d) Matériaux composites

La technique de renforcement par des matériaux composite pour les éléments structuraux porteurs est l'une des technique efficaces pour la l'accroissement de la résistance de ces derniers. Cette technologie possède une application simple, peu exigeante en main-d'œuvre, et n'est pas dérangement pour les occupants des ouvrages. [27]



**Figure I.18** : Techniques de renforcement des structures par matériaux composites.

- a) Renforcement des poutres, b) poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites. [28]

Un processus généralement pareil pour les étapes de la mise en place des matériaux composites, malgré la variation de l'installation du système de renforcement d'un installateur ou d'un fabricant à l'autre. Ce processus peut se résumer par :

1. Inspecter la condition de surface de l'élément de structure à renforcer.
  2. Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxyde et du mortier à résine époxydique.
  3. Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules à main et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.
  4. Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des feuilles de fibres.
  5. Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.
  6. Appliquer les feuilles de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.
  7. Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les feuilles auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
  8. Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées.
- [27]

### 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 Cette technique permet de :

### a) Aspect général

La conception d'un câblage additionnelle, lorsque des dispositions spéciales n'ont pas été prévues au moment du projet initial, doit être étudiée en intégrant, dans la flexion de l'étude trois aspects essentiels : · L'injection et l'obturation des fissures. · Prise en compte du changement éventuel du schéma statique de la structure ou l'élément structural concerné. · Préconisation de la démontrabilité de la précontrainte.

### b) L'injection des fissures

Les ouvrages à répare présentent généralement des fissures d'ouverture variable. Il convient donc, dans tous les cas, d'injecter préalablement les fissures, même si cette opération est longue, pour amoindrir les effets de la non-linéarité et reconstituer, dans la mesure du possible, un solide élastique et homogène.

### c) Changement du schéma statique

Il est rare que l'on cherche à modifier le schéma statique initial théorique d'une structure, en le renforçant ou en le réparant, indépendamment de l'évolution du schéma statique réel due à la fissuration.

### d) Démontage de la précontrainte

Dans tous les cas, la précontrainte additionnelle doit être démontable pour pouvoir être facilement remplacée en cas de défaillance. Il peut arriver qu'on la souhaite réglable pour contrôler, dans le temps, l'effort de précontrainte additionnelle appliquée et optimiser l'efficacité de la réparation. [29]

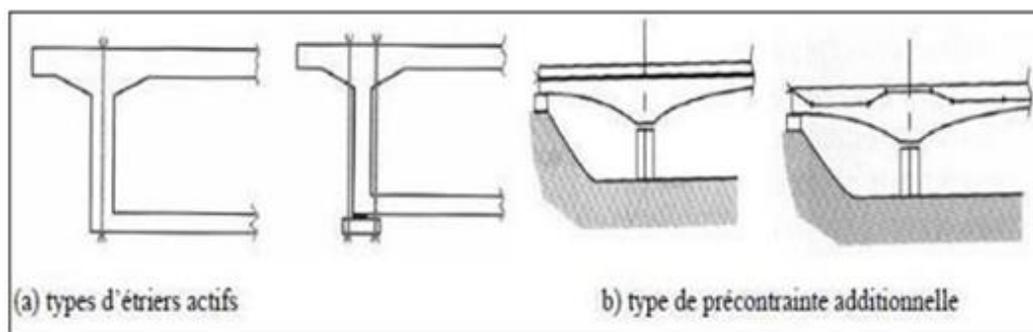


Figure I.19 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle. [25]

### I.7 Travaux réalisés sur le renforcement et protection du béton

De nombreux chercheurs ont mené de nombreuses expériences sur le renforcement et la protection du béton parmi eux:

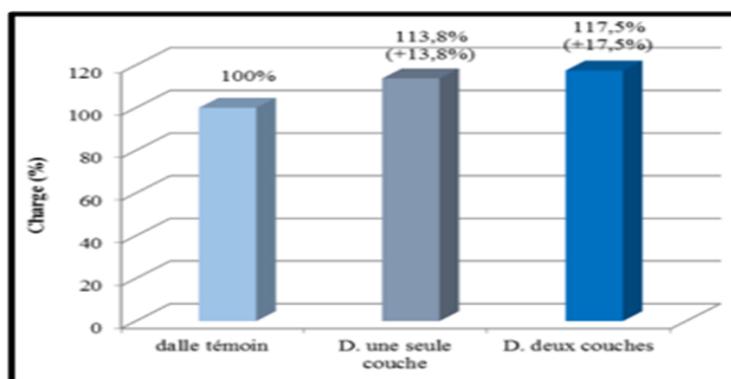
**AKCHICHE Hamida** : [30] a réalisée des éprouvette prismatique (100\*100\*400 mm<sup>3</sup>) en béton classique et de fibre " Dokar " de palmier dattier de la région d'Ouargla, et teste en flexion quatre point, les résultats de la résistance à la flexion des composites à l'âge de 28, 80, 180 jours.

Les résultats de la résistance à la flexion pour différents types du béton sont présentés dans le tableau I.3. Où l'on note la résistance à la flexion de béton fibré est légèrement supérieure par rapport le béton classique, car les fibres travaillent mieux à la flexion.

**Tableau I.3** : Résistance à la flexion pour différents types de bétons. [30]

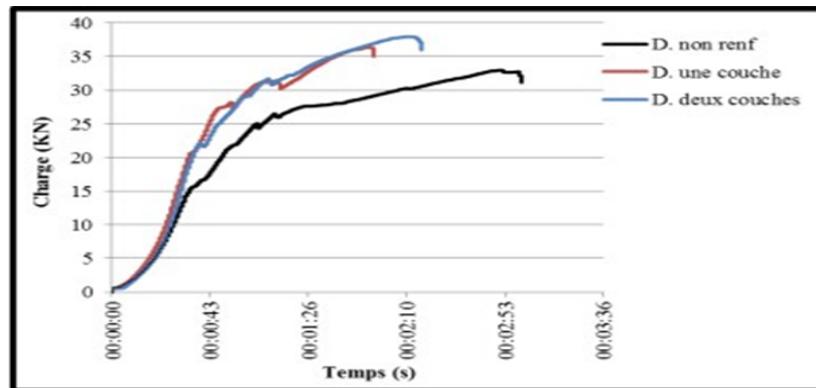
Désignation	Résistance à la flexion en MPa		
	28 jours	80 jours	180 jours
Béton classique	6.53	6.58	6.66
Béton fibré	7.20	7.40	7.88

**GHERDAOUI Moufida** : [31] a réalisé un renforcement des dalles témoins par une seule couche et deux couches de composite, la surface du composite de ces dalles est (20 x 20) cm<sup>2</sup>, testé en flexion, les résultats montrés dans la figure I.20 montrent l'augmentation de la charge des dalles renforcées par rapport à la dalle saine. Ils remarquent que l'ajout d'une couche de composite fait augmente la capacité ultime de la dalle de 13,5% en moyenne, et l'ajout de deux couches augmente cette capacité de 17,5% en moyenne.



**Figure I.20** : Augmentation de la charge ultime des dalles renforcées. [31]

La figure I.21 rassemble les courbes charge-temps correspondant à différentes dalles (une dalle renforcée par une seule couche et une autre renforcée par deux couches avec la dalle non renforcée).



**Figure I.21:** Courbes charge-temps pour les dalles renforcées (20x20)cm. [31]

Ce résultat montre que l'ajout d'une couche de composite a une influence sur la charge de rupture, et la même chose pour l'ajout de deux couches de composite. Cependant, les gains en charge dus au la composite sont très modestes pour les spécimens renforcés par une couche, comparativement aux spécimens témoins. [31]

**Riad BENZAID** : [32] a réalisé des éprouvette cylindrique  $\varnothing 160 \times 320$  mm, de béton testé en traction renforce par des bandes en fibres de carbone de 25 mm de large et 250 mm de longueur totale, Les résultats obtenus lors des essais de traction sur des éprouvettes avec 1 pli de fibres de carbone sont présentés dans le Tableau I.4. Où l'on note que la résistance à la traction de la fibre varie d'un éprouvette à l'autre et ainsi pour la déformation longitudinale a la rupture des fibres.

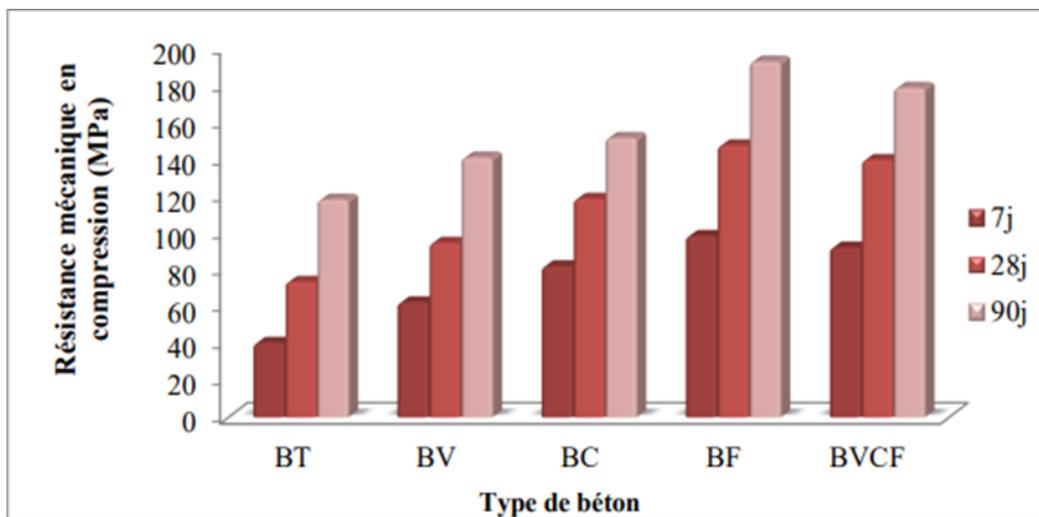
**Tableau I.4** : Caractéristiques physiques et mécanique des fibres de carbone. [32]

N° d'éprouvette	Résistance à la traction des fibres (MPa)	Déformation longitudinale à la rupture des fibres (%)
1	4160	1.58
2	4028	1.64
3	3989	1.61
4	4136	1.68
5	4080	N/D
Moyenne	4079	1.62

**ABOUTAIR Amel** : [33] a réalisés des éprouvettes cylindriques de dimensions (11x22 cm3) en béton, entre les plateaux d'une presse hydraulique, et testé en compression. Les essais effectués sur les bétons à différents âges (7, 28 et 90) jours sont donnés présentés dans le tableau I.5 suivant.

**Tableau I.5.** Résistance à la compression des différents bétons (en MPa). [33]

Temps Type de béton	7j	28j	90j
BT (béton témoin avec sable de dunes)	40,25	73,30	117,75
BV (béton avec chamotte)	62,20	94,40	140,55
BC (béton avec vase)	81,75	118,20	151,20
BF (béton avec fibres métalliques)	98,10	147,15	192,50
BVCF (béton avec vase, chamotte et fibres métalliques)	91,90	139,25	181,25



**Figure I.22.** Résistance mécanique en compression des différents bétons. [33]

Les résultats de la résistance à la compression du béton différent (BT, BV, BC, BF, BVCF) à l'âge de 7, 28, 90 jours, et le tableau I.3 et la figure I.22 montre que la résistance des types de béton à 90 jours est supérieure à sa résistance à 8 jours et 28 jours.

### I.8 Conclusion

Ce chapitre reprend un certain nombre de théories et d'études réalisées dans le cadre de la réparation et le renforcement par collage des structures de génie civil par l'emploi de matériaux composites.

Dans une première partie, sont présentées les analyses bibliographiques qui présentent l'élément de base structurel qui est le béton, leur propriété, ainsi que leurs comportements vis-à-vis différents sollicitations mécaniques. Dans une seconde partie, sont présentées les matériaux composites globalement, ainsi que les recherches entreprises dans le cadre de l'opération de la réparation et le renforcement des structures par des matériaux composites. Une synthèse sur l'ensemble des recherches et résultats conduites au cours de cette opération de recherche est présentée.

**CHAPITRE II :**  
**METHODOLOGIES**  
**OPERATIONNELLES ET ESSAIS**  
**MECANIQUES**

### **II.1 Introduction**

Le renforcement par matériaux composites trouve son origine dans les structures de construction à cause des différentes dégradations survenues lors de leurs utilisations. Ce renforcement consistait à coller des couches combinées de résine et de fibres de verres (ou autres) afin de conférer à la structure une nouvelle résistance et prolonger leur durée de vie.

Ce présent chapitre synthétise de façon détaillée les principales techniques expérimentales et conditions d'essais utilisées afin de clarifier l'objectif principal de cette recherche qui est le renforcement et/ou réparation de structures en béton et en mortier par collage de matériaux composites. A cet effet, l'élaboration des échantillons en mortier et en béton normalisés a été effectuée, le renforcement a été établi par le collage d'un composite à matrice polymère thermodurcissable combinée par fibre de verre. La caractérisation mécanique des échantillons élaborés a été réalisée par 3 essais principaux à savoir : essai de flexion 3-points et de compression pour les échantillons en mortier, et essai de flexion 4-points et de compression pour les échantillons en béton.

### **II.2 Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques**

#### **II.2.1 Matériau utilisé et constitutions**

Dans ce travail, nous cherchons à renforcer des structures en matériaux de construction par un composite à matrice résine polyester combinée avec des fibres courtes de verre. Pour ce faire, des échantillons en béton de construction et en mortier constitués d'une matrice cimentaire combinaient avec du sable (mortier) et du gravier (béton), sont élaborés.

À partir des données précédentes, et conformément à la norme européenne NF EN 12390-3 pour la préparation d'un mortier et béton normalisés, les composites sable/ciment et sable/gravier/ciment ont été préparés pour être testés dans cette étude.

Pour ce faire, le mélange de ciment, sable et eau et/ou gravier (Figure 0.1) sont malaxés selon certains critères, pour la préparation des (03) éprouvettes pour les testés en flexion 3-points, en compression, ou en flexion 4-point. Le tableau II.1 ci-dessous récapitule les différents essais mécaniques utilisés ainsi que les dimensions des échantillons attribués.

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

**Tableau II.1** : Dimensions des éprouvettes et essais mécaniques.

Echantillons	Dimensions mm <sup>3</sup>	Testes mécanique	Normes
Mortier	40×40×160	Flexion 3-points	NA-234
	50x 50 x 50	Compression	NA-234
Béton	100x100x4000	Flexion 4-points	NF EN 12390-3
	160x320	Compression	NF EN 12390-3

### ➤ Ciment

Le ciment utilisé pour la confection de nos éprouvettes est de type CPJ-CEMII/B de classe 42,5 produit par la cimenterie de ELMA LABIODH (TEBESSA) (Figure II.1). En plus, le tableau II.2 montre les propriétés physiques et les compositions chimiques du ciment utilisé.

**Tableau II.2** : Propriétés physiques et composition chimique du ciment. [34]

		Ciment	Fumée de silice	Cendres Volantes	Laitier	Metakaolin
<b>Composition chimique (%)</b>	SiO <sub>2</sub>	19,6	85	50	37,7	93,16
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	-	8,5	10,2	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3	-	29	0,6	-
	CaO	63,7	-	2,15	43,8	0,36
	MgO	3,9	-	-	6,4	0,04
	SO <sub>3</sub>	2,6	-	0,37	0,1	-
<b>Propriétés physiques</b>	<b>Densité (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	3130	2200	2100	2900	2500
	<b>Surface de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	3900	240000	2300	4450	160000

### ➤ Sable

Le sable utilisé est un “sable normalisé, de bonne granulométrie qui doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les interstices entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important, ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées (Figure II.1).



Figure II.1 : Sac de ciment avec du sable normalisé.

### ➤ L'eau

L'eau de gâchage utilisée est celle du robinet (eau potable).

## II.2.2 Préparation des échantillons en mortier

### II.2.2.1 Mortier

Le mortier est un matériau composite de construction, obtenu par mélange homogène d'une matière inerte (sable) avec une matière active (liant), le tout gâché avec certaine quantité d'eau. Le mortier pouvant satisfaire à une variété d'exigences dans le domaine de la construction. Le mélange mortier contient en volume une partie de liant pour trois parties de sable normal, avec ces proportions le liant remplit les vide du sable, c'est à dire que 1m<sup>3</sup> de sable plus 1/3 de m<sup>3</sup> de liant ne fournit qu'un m<sup>3</sup> de mortier

$$1 \text{ m}^3 \text{ de sable} + 1/3 \text{ liant (m}^3) = 1 \text{ m}^3 \text{ de mortier.}$$

Il existe deux façons de formuler le mortier

#### a) Dosage en volume

Les quantités des composantes des mortiers sont déterminées et ajustées en volume. Le mortier se dose de manière générale de façon assez simple 1 volume de ciment, 2 à 4 volumes de sable pour 1/2 de volume d'eau.

#### b) Dosage en poids

Le dosage en poids d'un mortier est le poids de liant inclus dans un mètre cube de mortier fini Selon les masses volumiques, la quantité de mélange et de matériaux qui le

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

composent nous donnera des résultats différents en matière de construction. Pour la préparation des 3 éprouvettes (40x40 x160) (Tableau II.3). [35]

**Tableau II.3** : Les quantités des matériaux utilisés.

Les matériaux utilisés	La quantité (g).
Sable sec	1350
Ciment	450
Eau	225

### II.3 Méthodologie opérationnelle et préparation des échantillons

#### II.3.1 Mortier normalisé

Dans notre recherche, l'élaboration des mortiers normalisés pour être renforcés par collage des couches en composite et testées mécaniquement, nécessite l'utilisation et l'intégration des outils expérimentales mentionnés en détails ci-dessous. Les étapes qui viennent englobent la préparation des échantillons en mortiers :

1. La mise en poids des différents éléments constitutifs du mortier à l'aide du balancier (Figure II.2.a).
2. Le malaxeur étant en état de fonctionnement, verser l'eau dans le récipient, puis ajouter le ciment (Figure II.2.b).
3. Mettre le malaxeur à vitesse lente pendant une minutes dans les (30s) seconds dernières introduire le sable.
4. Mettre le malaxeur a vitesse rapide pendant deux minutes
5. Arrêter le mouvement du malaxeur et racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxeur.
6. Reprendre le malaxage pendant deux minutes à une vitesse rapide
7. Le moulage est effectué au moyen de l'appareil à choc.
8. Disposer le mortier sur une plaque non-réactive au ciment absorbante.
9. Former une galette approximativement rectangulaire partagée en six (06) fractions sensiblement égales (Figure II.2.c)
10. Introduire dans chacun des compartiments une fraction de la galette.

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

11. Retirer le moule de la machine, débarrasser et araser le surplus de mortier avec une règle métallique à déplacer en mouvement de scie sur la longueur des éprouvettes.
12. Identifier des éprouvette sur le moule (ex : S1.B2 .SD3) (Figure II.2.d).
13. Le moule remplie de mortier est conservé dans une armoire humide (98 %) et à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2$  et sans empilage les uns sur les autres.
14. Au bout de 24 heures de conservation procéder au démoulage des éprouvettes avec précaution.
15. Marquer les éprouvettes « code d'échantillon, lieu d'échantillon : S1.B2 .SD3 » sans utiliser la face de compression puis immerger dans l'eau à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1$  jusqu'à le moment d'essai.
16. Les éprouvettes doivent être sortie de l'eau au moins 15 minutes avant l'essai et essuyées avec chiffon.
17. L'âge des éprouvettes est compté à partir du moment de malaxage jusqu'à début d'essai.
18. Entreposer les échantillons dans l'eau à  $20 \pm 1$  °C jusqu'au moment de l'essai de rupture (après 28 jour).





**Figure II.2 :** Etapes nécessaires suivie pour la préparation des échantillons.

### II.3.2 Béton normalisé

En plus de mortier, la préparation du Béton s'effectue de la même façon que celle du mortier, sauf il est nécessaire d'ajouter le granulat afin d'augmenter la résistance mécanique.

Les granulats doivent avoir une bonne granulométrie dont le diamètre varie de plus petit au plus gros. Les granulats que nous avons utilisés (tableau II.4), sont de natures concassés (3/8, 8/16). Dans un béton, l'ordre des grandeurs (en %) des constituants sont en générale identifier selon le dosage suivant :

#### **Détermination des pourcentages C, S, G1 et G2**

- Dosage en ciment : 350 Kg / m<sup>3</sup> ;
- Volume absolu du ciment :  $350 / 3.1 = 112.90 \text{ dm}^3$  ;
- Rapport E/C : 0,52 ;
- Dosage en eau : 183 litres ;
- Volume absolu des éléments secs :  $1000,183 = 817 \text{ litres}$  ;
- Pourcentage de ciment :  $112,90 / 817 = 13,82 \%$ .

Tableau II.4 : Dosage en granulat.

Granulat	Proportion
Sable Carrière 0/3	32%
Sable dune	10%
3/8	15%
8/16	25%
16/25	18%

### II .4 Composites de renforcement

L'apparition d'une dégradation sur une structure en béton demande une réparation. Et peut aussi nécessiter un remplacement. Les matériaux composites à base de fibres de verre constituent une bonne solution pour le renforcement ainsi que pour la réparation de ces structures. L'élaboration d'une couche de composite nécessite l'utilisation d'une matrice thermoplastique en résine et des fibres intégrés. Les différentes constitutions utilisées sont :

#### II.4.1 Matrice en résine polyester

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 polyesters sont classés en résines souples résines semi-rigides et résines rigides (Tableau II.5).

Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide, leurs avantages sont :

- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé.
- Une bonne stabilité dimensionnelle
- Une bonne mouillabilité des fibres et des tissus.
- La facilité de mise en œuvre.
- Un faible coût de production. [36]

**Tableau II.5 :** Caractéristiques de matrices polyester. [37]

	Masse spécifique (kg/m <sup>3</sup> )	Module Elasticité (Gpa)	Résistance Traction (Mpa)	Module d'allongement Rupture (%)	Tenue à la Température en Continu (°C)
<b>Polyester</b>	1.2	2.9-3.1	50-60	2-3	120

### II.4.2 Renfort en fibre de verre

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types. La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate.

**Tableau II.6 :** Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [38].

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture $s_{fu}$ (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.55	2.54

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

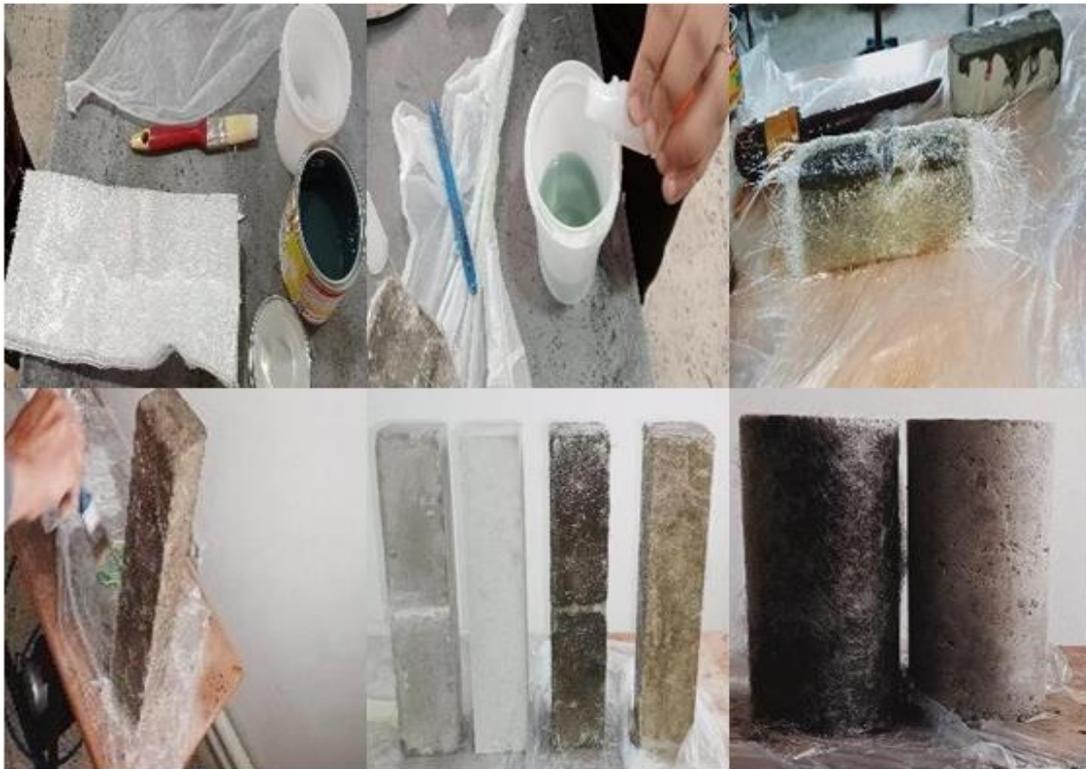
- bonne adhérence avec la matrice ;
- disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...) ;
- bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;
- conductivité thermique relativement faible [38].



**Figure II.3 :** Résine polyester et fibre de verre.

### II.4.3 Préparation du composite

- 1) Tout d'abord un processus de soufflage a été effectué sur tous les échantillons afin de créer une surface rugueuse adhérente.
- 2) La résine polyester a été mélangée avec un durcisseur afin de réduire le temps de durcissement.
- 3) La surface des échantillons a été enduite premièrement par une couche de résine.
- 4) Les fibres de verre sont ensuite posées de façon aléatoire sur toutes les surfaces.
- 5) Une deuxième couche de la résine a été enduite encore au-dessus des fibres de verre.
- 6) Les échantillons ont été laissés sécher pendant une période suffisante avant d'être testés



**Figure II.4 :** Etapes suivies pour le renforcement par collage de composite.

## II.5 Essai mécaniques

### II.5.1 Essai de flexion

L'essai le plus couramment utilisé pour les matériaux de construction est l'essai de flexion. La résistance à la flexion est le premier objectif recherché dans le mortier et béton à

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

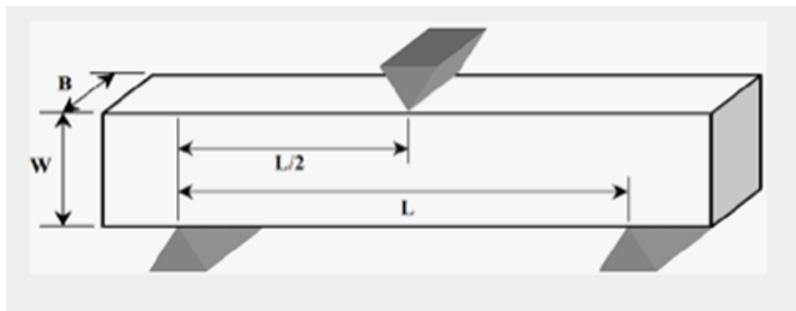
différente variante. Il s'effectue en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a reposant sur deux appui.

- Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette de mortier (moment maximal au centre) appelé la flexion trois point.
- Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée de l'éprouvette de béton (moment maximal constant entre les deux charges) appelé flexion quatre point. [39]

### II.5.1.1 Principe de l'essai

L'essai de flexion trois points et quatre points consiste à soumettre une éprouvette calée entre deux mors de la presse hydraulique de géométrie standardisée prismatique (béton et mortier).

A un moment de flexion trois points dans le mortier par application d'une charge au moyen d'un rouleau supérieur et de deux rouleaux inférieurs (figure II.5). Les éprouvettes prismatiques (40\*40\*160 mm), sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs distancés de  $l = 100$  mm, et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieurs et inférieurs) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette.



**Figure.II.5** : Schéma de principe de flexion trois points. [40]

La flexion 4 points effectuée sur les échantillons en béton par application de deux charges au moyen d'un deux rouleau supérieur et de deux rouleaux inférieurs (figure II.6). Les éprouvettes prismatique (100\*100\*400 mm), sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs distancés de  $l$  ( $l=300$ ) de façon à laisser 50 mm à chaque extrémité l'éprouvette et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieurs et inférieurs) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette.

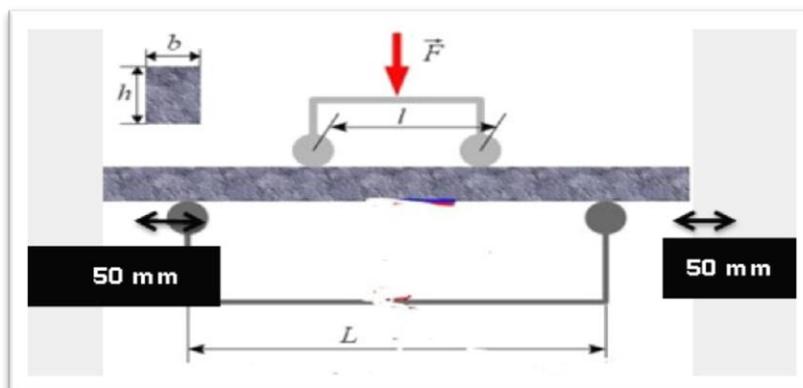


Figure.II.6 : Schéma de principe de flexion quatre point. [41]

### II.5.1.2 Machines d'essais flexion

Une machine d'essai de flexion 3 point et qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette de mortier à tester et répondant aux prescriptions. L'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion du type " Toni technique " avec une charge verticale et une vitesse de 50 N/S +10 N/S jusqu'à la rupture.



Figure II.7 : Appareil d'essais de flexion trois points de marque Toni Technique.

La résistance à la flexion est mesurée sur 8 éprouvettes prismatiques (mortier) de dimensions (40\*40\*160 mm). Les éprouvettes sont soumises à un essai de flexion trois (3) points selon la norme NA 234 (Figure II.8). Les résultats de résistance à la flexion obtenus après 28 jours de séchage.

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

La résistance à la flexion sera calculée au moyen selon l'équation :

$$Rf = (1.5 * Ff * l / b^3)$$

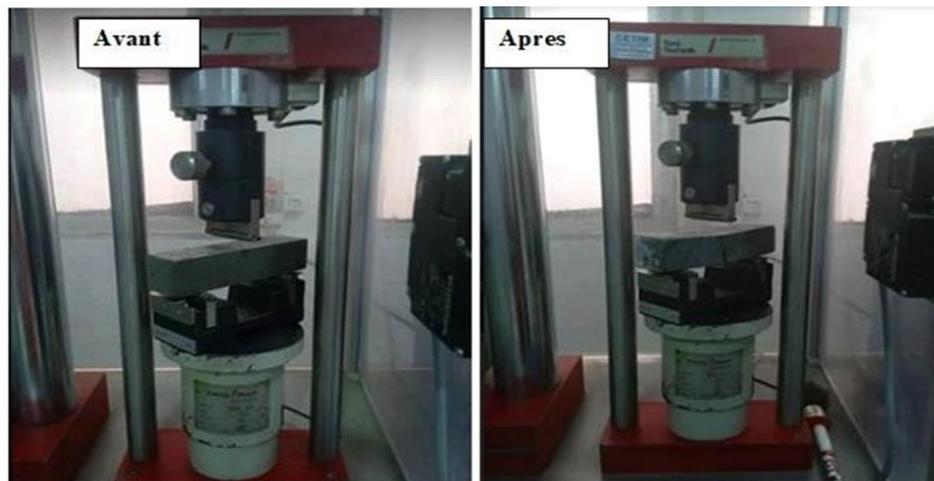
Ou

$Rf$  : est la résistance à la flexion, en N ;

$Ff$  : est la charge appliquée au milieu du prisme a la rupture, en Newton ;

$b$  : est la côté de la section carrée du prisme, en millimètre ;

$l$  : est la distance entre les appuis, millimètre.



**Figure.II.8** : Procédure de l'essai de flexion trois point.

La machine type Tecno test de flexion quatre point pour faire l'écrasement de l'éprouvette prismatique (100\*100\*400mm) brut et protégé en béton.



**Figure II.9** : appareil -Tecno test- de l'essai de flexion 4 point.

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

La résistance à la flexion quatre points en béton obtenus après 28 jours de séchage provient de la moyenne des résultats sur quatre échantillons. L'appareil utilisé est une presse hydraulique – Tecno test- de flexion dont la capacité maximale est de .... En rupture.

L'expression des résultats pour exprimer la contrainte de rupture en flexion, est donnée par la relation :

$$\sigma_f = \frac{3 * L * F}{2 * b * h^2}$$

Où

$\sigma_f$ : Contrainte de flexion en (N/mm<sup>2</sup>)

F : charge totale appliquée à la rupture en flexion exprimé en N.

L : la portée en mm,

b et h : sont la largeur et la hauteur de l'éprouvette exprimées en mm



a- L'éprouvette protégée avant l'écrasement.

b- L'éprouvette protégée après l'écrasement.



c- L'éprouvette brute avant l'écrasement.

d- L'éprouvette brute après l'écrasement.

**Figure II.10** : Procédure de l'essai de rupture par flexion quatre point.

### II.5.2 Essai de compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton et mortier, puisqu'elle est directement liée à la structure.

#### II.5.2.1 But de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance sera évaluée en utilisant des échantillons en forme de prisme de béton et mortier et cylindre de béton.

#### II.5.2.2 Principe de l'essai

Les éprouvettes confectionnées, ajustées entre les deux plateaux de la presse. Le plateau supérieur étant fixe, le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette est mobile. En remontant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau supérieur.

Des extensomètres, placés sur la face latérale de l'éprouvette permet de mesurer les valeurs de la déformation. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante (N/S) jusqu'à rupture. Pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante sont enregistrées, et ce jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette qui se traduit par l'arrêt de la presse.

L'essai de compression ainsi achevé. La force maximale  $F$  est donnée dès que la rupture est enclenchée. Cette force est enregistrée et la contrainte de rupture.

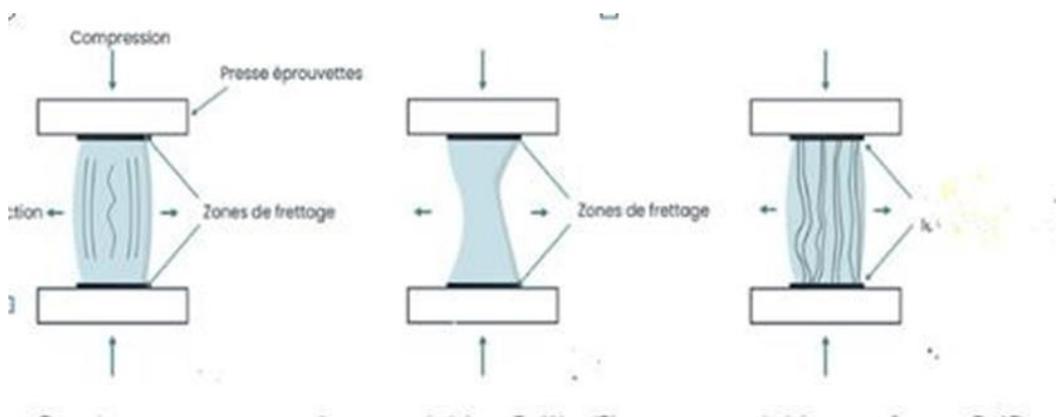


Figure II.11 : Principe d'essai de compression. [42]

### II.5.2.3 Machines d'essais de compression

La machine utilisée pour l'essai de compression est une presse hydraulique (TONI TECKNIQUE) avec une charge verticale et avec une vitesse 2400 N/S + 200 N/S jusqu'à rupture.



**Figure II.12** : Appareil d'essai de compression trois pointe (mortier) de marque Toni Technique.

Des essais de compression ( $R_c$ ) ont été réalisés par écrasement sur les demi- éprouvettes de mortier prismatiques selon la norme NA 234. La résistance à la compression est calculée à partir de la moyenne de 16 essais effectués sur les demi- éprouvettes précédemment.

La résistance à la compression sera calculée selon l'équation :

$$R_c = F_c / 1600$$

Ou

$R_c$  : est la résistance à la compression, en  $N/mm^2$  ;

$F_c$  : est la charge maximale à la rupture en N.

1600= 40mm\*40mm est  $L_{air}$  des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètre.



**Figure II.13 :** Essai de compression sur mortier.

La machine utilisée est de type CONTROLAB, pour faire l'écrasement de béton. A l'aide d'une Presse de compression de capacité 2000KN à asservissement hydraulique, en contrôlant la vitesse de chargement. Le pilotage de la presse est assuré par un logiciel qui donne les résultats sous forme numérique. L'essai est mené sur des deux éprouvettes de forme cylindrique (320x160 mm); norme [NF EN 12390- 3]) Figure II.14.



**Figure II.14 :** Appareil CONTROLAB de compression de béton.

## Chapitre II : Méthodologies opérationnelles et essais mécaniques

L'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai, la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La contrainte de résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

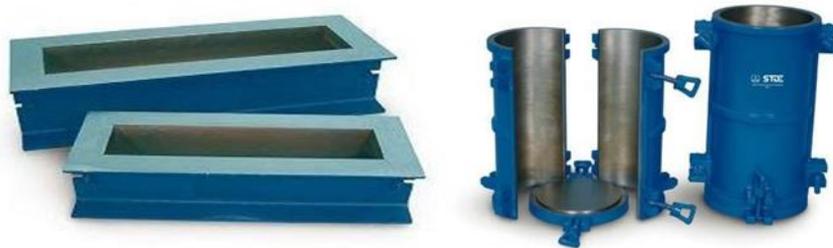
$$R_C = F/S$$

Avec :

$R_C$  : Résistance en compression en MPA,

F : Charge maximale, exprimée en Newtons ;

S : la section de l'éprouvette.



**Figure II.15** : Moules pour l'essai de compression et de flexion 4-points.



**Figure II.16** : Essai de compression sur béton cylindrique.

### **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, l'objectif principal est le renforcement et la réparation des structures en mortier et béton par collage d'un matériau composite à fibre de verre. Nous avons initialement présenté les différents matériaux utilisés et le détail des différentes formulations pour l'élaboration des éprouvettes. Les différentes méthodes d'essais mécaniques dans le cadre de cette étude ainsi que les machines d'essais mécaniques sont aussi présentées.

**CHAPITRE III :**  
**RESULTATS, MODELISATIONS**  
**ET INTERPRETATIONS**

### III.1 Introduction

L'utilisation des fibres synthétiques (par exemple de verre ou de carbone) immergées dans une matrice en résine pour renforcer les matériaux cimentaires de constructions, est une solution technique innovante. L'un des principaux matériaux actuellement utilisés dans le renforcement des structures de constructions par collage est les composites verre/résine polyester.

L'objectif principal recherché de ce chapitre est l'identification du comportement mécanique des matériaux de constructions élaborés à base de béton et ou de mortier renforcés par collage extérieur aux moyen des composites issues des fibres de verres et de matrice en résine polyester, et ceux pour une éventuelle utilisation dans des applications structurelles et non structurelles. À cet effet, les essais de flexion 3- points, et de compression ont été effectués sur les échantillons en mortiers (brutes et entaillés) tandis que les essais de flexion 4-points ont été effectués sur les échantillons en bétons (aussi brutes et entaillés), et ceux après 28 jours de séchage afin d'identifier leur comportement mécanique (forces et contraintes à la rupture). Par conséquent, la modélisation du comportement mécanique des deux types de matériau de construction a été proposée afin de faire une validation des résultats expérimentaux obtenus.

### III.2 Comportement mécanique des mortiers renforcés par composites

#### III.2.1. Flexion 3-points

Les résultats expérimentaux révèlent les propriétés mécaniques moyennes issues de l'essai de flexion 3-points en termes de forces et contraintes ultimes, obtenus pour les différents mortiers élaborés brutes et renforcés sont présentés dans le tableau III.1.

Compte-tenu des essais précisés précédemment, les conditions d'essai définies par la température ambiante ainsi que le taux d'hygrométrie lors de l'essai doivent être précisés. L'ensemble de la procédure expérimentale permet de déterminer les propriétés mécaniques moyennes, attribué aux temps de l'essai, des échantillons en mortiers ou en bétons après 28 jours de durcissement.

Les résultats mentionnées dans le tableau précédent (III.1) en termes de forces ultimes et contraintes à la rupture obtenues par l'essai de flexion 3-point des éprouvettes en mortier brutes et renforcés, montres des augmentations significatives dans la résistance à la flexion. Cette augmentation se traduit par des valeurs égale à 33.7 % enlevée pour les mortiers renforcés par composite comparée aux mortiers non renforcés.

### Chapitre III : Résultats, modélisations et interprétations

De même façon, une augmentation a été enregistrée pour les mortiers pré-entailés renforcés par composite comparée aux mortiers pré-entailés non renforcés, qui égale à 43.44 %. De plus, le temps pour qu'un essai se déroule jusqu'à la rupture, enregistre une augmentation pour les mortiers renforcés par collage par rapport aux mortiers non renforcés, cela traduit par le fait que l'on peut contrôler une structure lors d'une dégradation brutale (par exemple séisme). Cela indique aussi que le renforcement par collage de matériau composite (verre /résine) joue a un rôle majeur dans l'amélioration de la résistance et la durée de vie de échantillons.

**Tableau III.1** : Résultats de l'essai de flexion 3-point des éprouvettes en mortier.

Type d'éprouvette	Force (N)	Valeurs moyenne	Contrainte (MPA)	Valeurs moyenne	Temps (S)
<b>MBSE</b>	2884.61	2777.77	6.75	<b>6.50</b>	20.6
<b>MBSE</b>	2670.94		6.25		20.1
<b>MRSE</b>	3769.23	3713.67	8.82	<b>8.69</b>	48.3
<b>MRSE</b>	3658.11		8.56		46.5
<b>MBAE</b>	1948.71	1989.31	4.56	<b>4.65</b>	13
<b>MBAE</b>	2029.91		4.75		15
<b>MRAE</b>	2978.63	1625.56	6.97	<b>6.67</b>	35.5
<b>MRAE</b>	2726.49		6.38		35.0

L'analyse précitée des résultats extraits du tableau III.1 est représentée dans l'histogramme figuré ci-dessous.

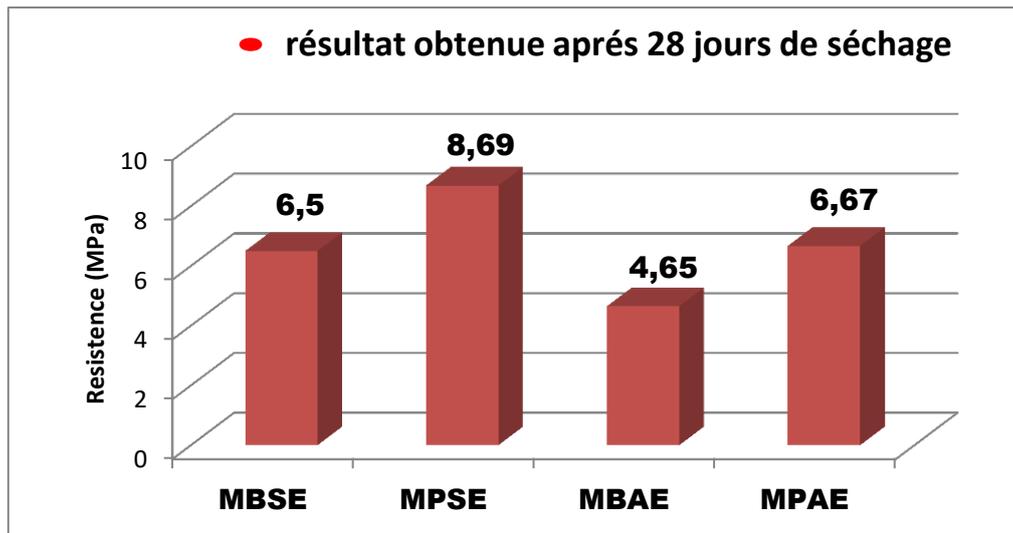


Figure III.1 : Histogramme des résultats de l'essai de flexion 3-points.

### III.2.2. Compression

À travers l'essai de compression, des échantillons en mortiers brutes (sans renforcement), et renforcées par collage de matériaux composites, sont testées. Les résultats de tests de compression sont enregistrés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai de compression des éprouvettes en mortier.

Type d'éprouvette	Force (N)	Valeurs moyenne	Contrainte (MPa)	Valeurs moyenne	Temps (s)
MBSE	36160	40080	22.6	25.05	19
	38080		23.8		20
	40480		25.3		22
	45600		28.5		24
MRSE	80640	79360	50.4	49.60	36.5
	78880		49.3		37
	78080		48.8		36
	79840		49.9		38
MBAE	40160	37148	25.1	23.21	25.5 S
	37120		23.2		20.5 S
	52800		33		26 S
	18512		11.57		11 S
MRAE	79680	67680	49.8	38.55	37
	77280		48.3		37
	76640		47.9		35
	77120		48.2		38.5

À travers ces résultats, on note que des augmentations significatives dans la résistance à la compression ont été marquées. Cette augmentation se traduit par des élévations égale à 98.0 % enlevée pour les mortiers renforcés par composite comparée aux mortiers non renforcés. Des augmentations de 66.09 % ont été marquées pour les mortiers pré-entailées renforcés par composite comparée aux mortiers pré-entailées non renforcés.

La figure III.2 représente l'histogramme des données établies par le tableau III.2.

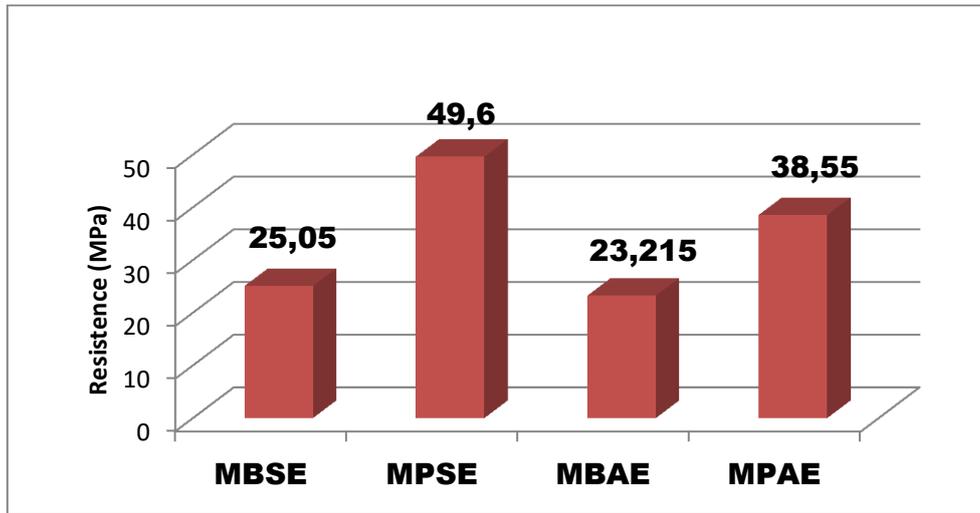


Figure III.2 : Histogramme des résultats de l'essai de compression.

### III.3 Comportement mécanique des bétons renforcés par composites

#### III.3.1 Essai de traction par flexion

Dans cette recherche, le béton utilisé destiné à la caractérisation mécanique, est un béton classique courant utilisant des gravillons de (3/8, 8/16), des sables 0/3 et un dosage de ciment 350 kg/m<sup>3</sup>. Le comportement mécanique du béton a été identifié dans un essai de traction par flexion. Cet essai a été réalisé sur une machine de flexion CONTROLAB avec une capacité de charge maximale de 200 KN. Des éprouvettes prismatiques en béton, de dimensions 100×100×400 mm ont été testées, le tableau III.3 récapitule les résultats de ces tests.

Tableau.III.3: Résultats de l'essai de traction par flexion des échantillons en béton.

Type d'éprouvette	Force (N)	contrainte (MPa)	Temps (s)
BBSE	46577.77	12,9	23
BRSE	40533.33	19,6	35
BBAE	45866.66	10,4	18
BRAE	69688.88	13,1	32

L'analyse de ces résultats montre que toujours les échantillons en bétons renforcés par collage de matériau composite ont des résistances supérieures que celle des échantillons en bétons non renforcé, soit brutes ou pré-entaillées. Cette supériorité se traduit par 52% et 26 % respectivement pour les bétons renforcés et pré-entaillées renforcés.

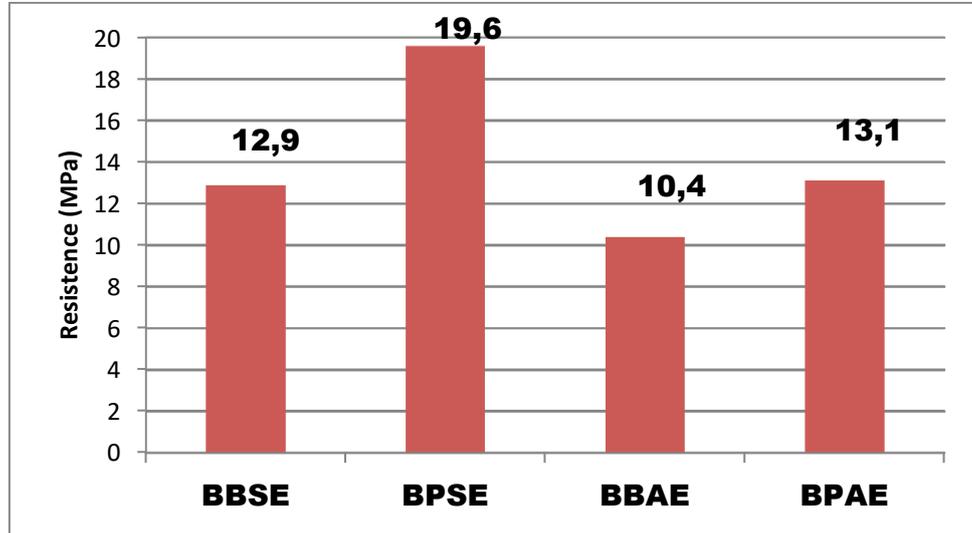


Figure III.3 : Histogramme des résultats de l'essai de flexion 4-points.

#### III.3.2 Essai de compression

Les bétons durcis ont des lois de comportement quasi-linéaires. Les paramètres qui régissent ces lois sont déterminés à partir d'essais de compression. Le paramètre le plus déterminant est la résistance en compression  $\sigma_c$ , qui est mesurée dès que le matériau reçoit 99 % de leur résistance et ceux à partir du 28 jours de durcissement par écrasement d'éprouvettes cylindriques de 300 mm de haut et de 150 mm de diamètre conservés dans l'eau à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Les résultats de cet écrasement sont déterminés dans le tableau III.4.

Tableau.III.4. Résultats de l'essai de compression pour les échantillons en béton.

Type d'éprouvette	Force (N)	contrainte (MPa)	Temps (s)
BB	4278.94	34.06	11
BR	5400.17	42.99	31

Des augmentations peut aller jusqu'à 26.21 % enregistrées pour les échantillons en béton renforcées par collage de matériaux composite, et ceux par rapport aux échantillons en béton brutes (non renforcées). De plus le temps de déroulement de l'essai de compression pour les échantillons en béton renforcées est presque trois (03) fois supérieur comparé au celle

du temps pour les échantillons en béton non renforcées, ce ci traduit par le fait qu'on a toujours un temps de contrôle lors d'un dégât d'endommagement.

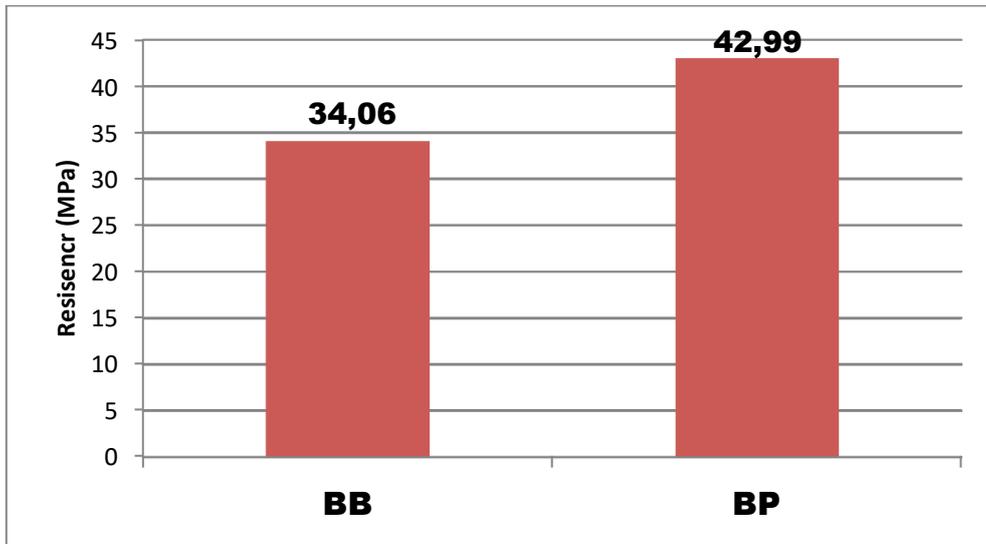


Figure III.4 : Histogramme des résultats de l'essai de compression.

### III.4 Approche numérique

#### III.4.1 Introduction

L'approche numérique réalisé par la méthode des éléments finis constitue l'un des compléments stratégique de l'approche théorique et expérimentale pour étudier le comportement des matériaux de construction en béton et ou en mortier renforcées par matériaux composites. L'objectif principal de la modélisation est d'utiliser, valider et familiariser avec la méthode de calcul aux éléments finis, par le biais du logiciel de calcul (CASTEM), les résultats obtenus par les essais mécaniques. Il s'agit de l'étude du rôle de renforcement par collage extérieure sur le comportement mécanique d'une poutre en mortier et en béton sur deux brutes et fissurées.

#### III.4.2 Echelle de modélisation

Afin de modéliser finement le comportement des structures, il est nécessaire de tenir compte le plus précisément des phénomènes ayant lieu au niveau macroscopique. La loi de comportement d'un matériau est attachée à un volume élémentaire représentatif, dont la taille est liée aux hypothèses de la mécanique des milieux continus. Avant d'intégrer ces lois dans un modèle géométrique, il convient de préciser les différentes échelles de calculs pour que le calcul soit fiable, efficace, réaliste et admissible en termes de coût et de performance. Trois échelles de modélisation de structures par éléments finis peuvent être distinguées :

### ➤ L'échelle globale

A cette échelle, c'est le comportement inélastique de la section courante, prise dans son ensemble, qui est défini des lois de chaque matériau (béton, acier...etc). Celles-ci sont intégrées sur la section pour construire, d'une part, des lois moments-courbures et efforts normaux-allongements et, d'autres part, des courbes d'interaction ou de couplage moments-efforts.

Cette approche globale conduit en général à des temps de calcul réduits mais elle ne permet pas de définir précisément les comportements locaux, en particulier la fissuration, parce qu'elle intègre globalement les phénomènes. Cette approche est également limitée aux structures de type poutres, car sa généralisation aux plaques reste très délicates.

### ➤ L'échelle semi-globale

S'agit d'une échelle intermédiaire, dans laquelle l'élément fini de structure (poutre, plaque ou coque) conserve ses hypothèses de structure (Navier ou Navier-Bernoulli par exemple), et l'évolution du matériau dans une direction (la hauteur de la poutre) est prise en compte, soit en décomposition en couches, soit par une intégration spécifique dans cette direction. Cela conduit à une approche fiable et réaliste.

### III.4.3 Modélisation du comportement du béton et mortier

Le comportement du béton et ou du mortier est toujours difficile à modéliser. Cette difficulté est liée à de nombreux paramètres tels que : la forte hétérogénéité des constitutions, la dissymétrie du comportement en traction et en compression, les microfissures réparties de manière aléatoire etc... Des recherches ont été menées depuis longtemps sur le comportement mécanique du béton et mortier dans l'espoir de mieux comprendre les mécanismes de rupture de ce matériau et plusieurs théories ont été développées ; à savoir, la mécanique de la rupture, la théorie de la plasticité, la théorie de l'endommagement, la méthode de fissuration discrète, la méthode de fissuration distribuée. Tous ces modèles permettent de modéliser le comportement du béton à l'aide d'une approche éléments finis.

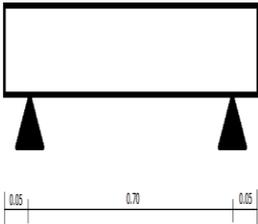
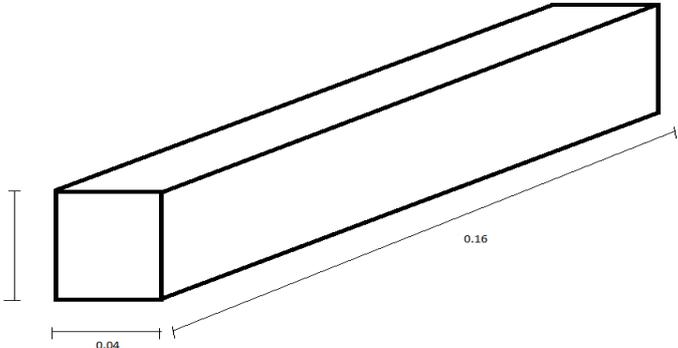
Néanmoins, la modélisation du comportement mécanique du béton n'est pas entièrement résolue et reste un domaine de recherche. Par conséquent, il faut élaborer dans un premier temps un modèle fiable qui représente correctement le comportement complexe du béton et dans un deuxième temps simple pour qu'il soit aisé de l'utiliser pour la modélisation des structures en béton.

### III.4.3.1 Données du problème

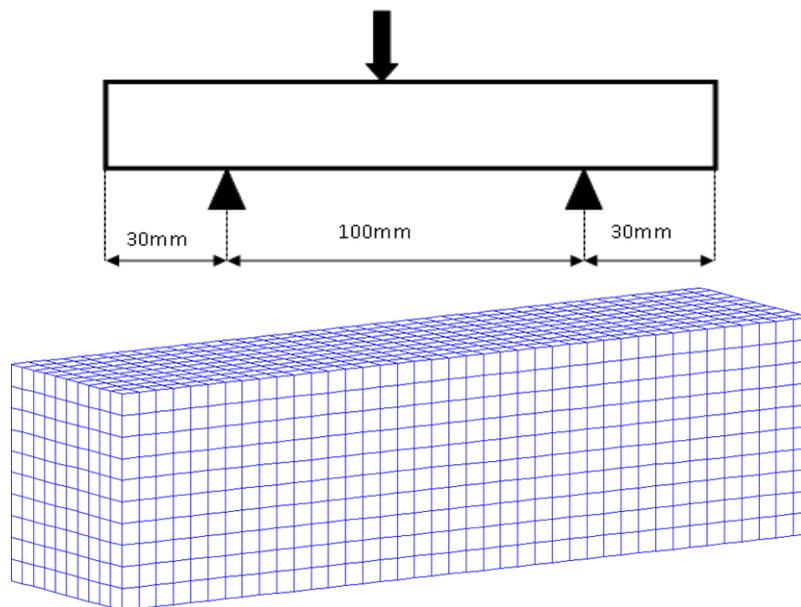
L'étude réalisée dans le laboratoire nous exige le travail sur des poutres en mortier avec des dimensions bien déterminées (normalisées), Grâce à la modélisation, le comportement des poutres est peut être décrit et nous pouvons le comparé avec le modèle réel. Les poutres utilisées sont représentées dans la figure ci-dessous.

Remarque : La modélisation du comportement mécanique du béton est très difficile à réaliser à cause des différentes caractéristiques élémentaires qui le constituent, pour cela le comportement du mortier est pris en compte.

**Tableau III.5** : Dimensionnements des structure (en béton et en mortier).

Types d'essais	Types d'éprouvette
Flexion 3 points 	Mortier
	

Pour commencer, et pour simplifier les calculs nous avons donc établis la modélisation de la poutre en deux dimensions (2D). Les deux appuis sont espacés de 100 mm entre eux.

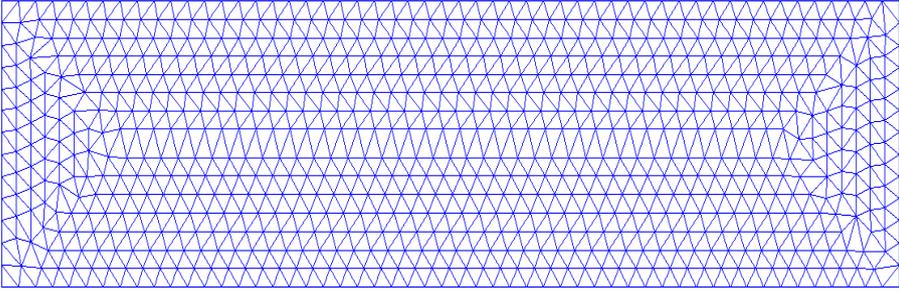
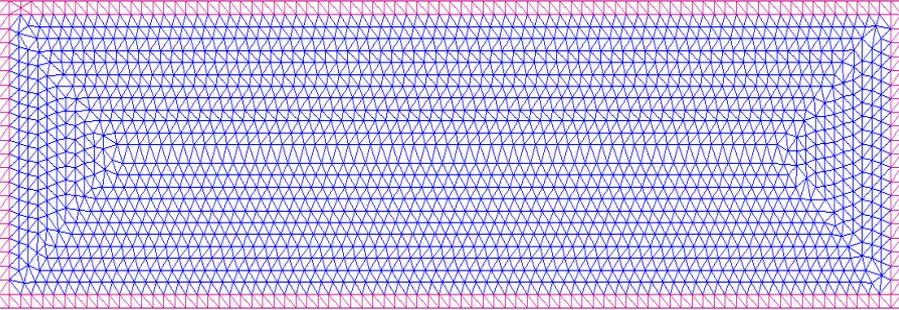
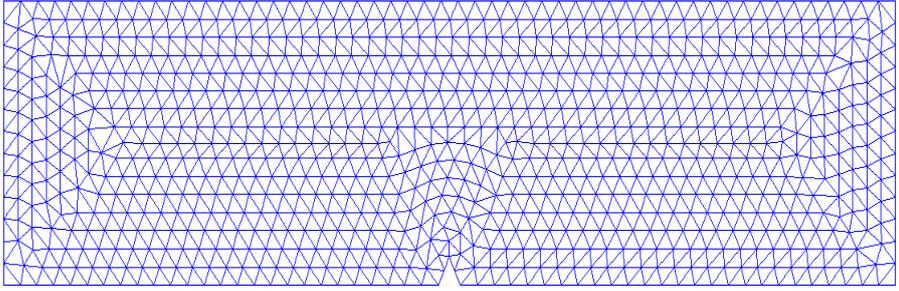
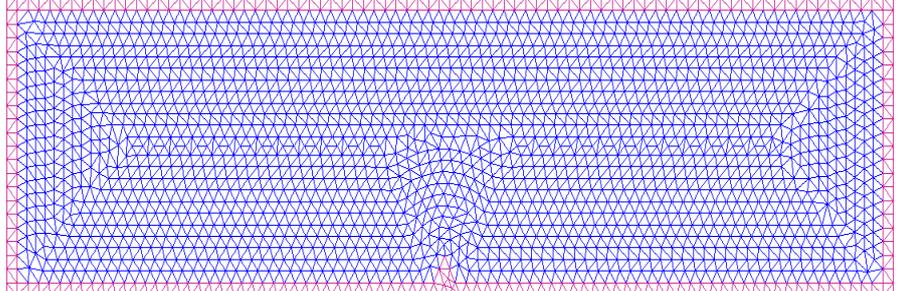


**Figure III.5** : Eprouvette modélisée pour la flexion 3 points.

### Chapitre III : Résultats, modélisations et interprétations

Pour les caractéristiques du mortier, nous avons utilisé le modèle d'endommagement permettant une meilleure approche du calcul. En effet, la courbe d'élasticité du mortier soumis à la flexion étant croissante linéaire, deux valeurs de déformations peuvent correspondre à une même contrainte, l'une dans la zone élastique (phase croissante) et l'autre dans la zone de fissuration (décroissante). Cette caractéristique est due à l'hétérogénéité du matériau (fissuration aux points faibles).

**Tableau III.6** : Différentes échantillons utilisées pour la modélisation du mortier.

Echantillon en mortier brute sans renforcement	
Echantillon en mortier brute avec renforcement	
Echantillon en mortier entaillé sans renforcement	
Echantillon en mortier entaillé avec renforcement	

### Cas 1 : Mortier brute sans entaille

Dans ce qui suit, la représentation des déformations et contraintes principales sont illustrées respectivement. Le comportement du matériau est considéré linéaire élastique. Le calcul des paramètres nécessaires pour la modélisation (comme le module de Young et coefficient de poisson) est extrait dans la littérature.

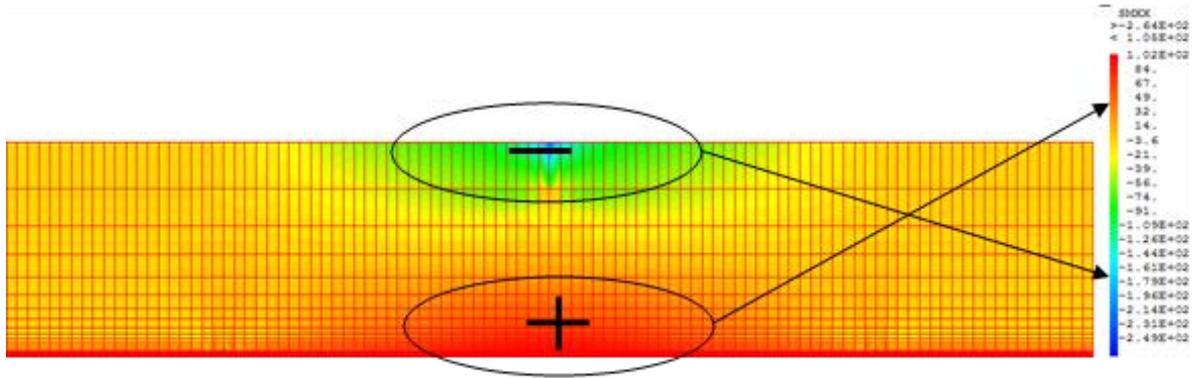


Figure III.6 : Distribution des contraintes (iso-valeurs).

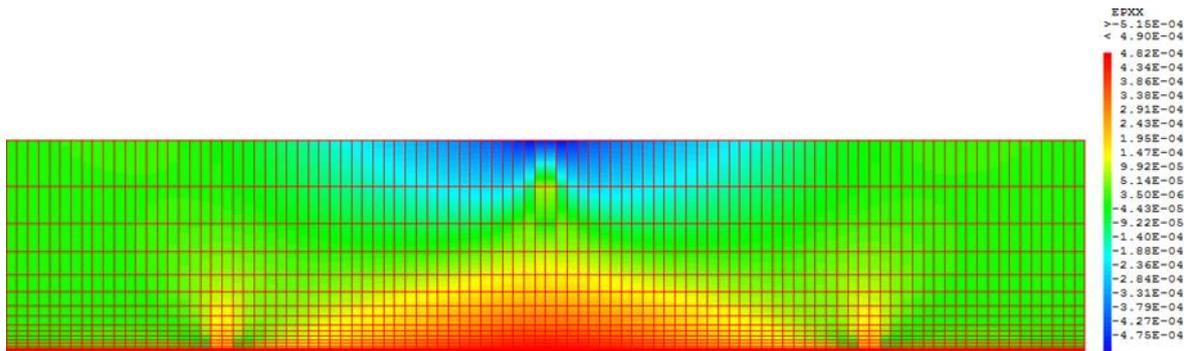


Figure III.7 : Distribution des déformations (iso-valeurs).

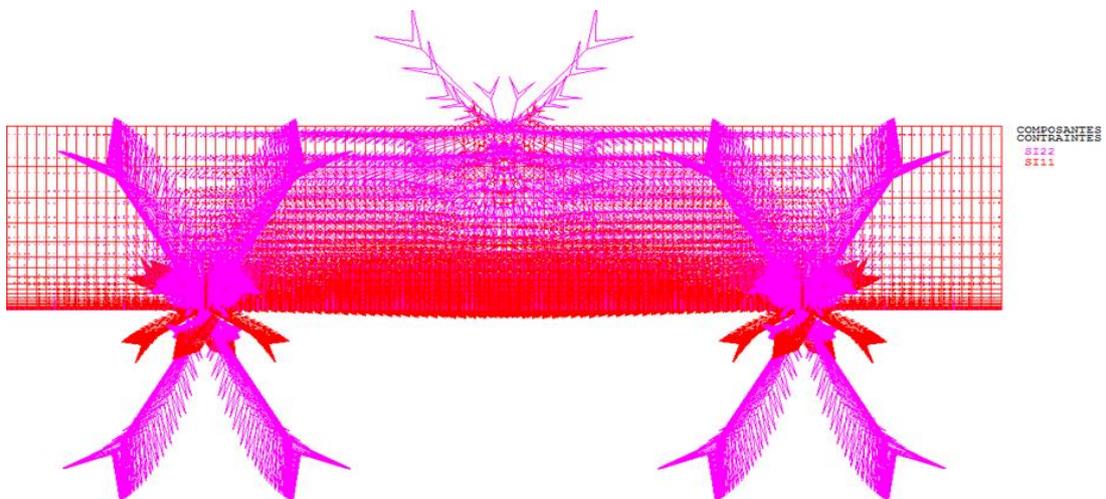
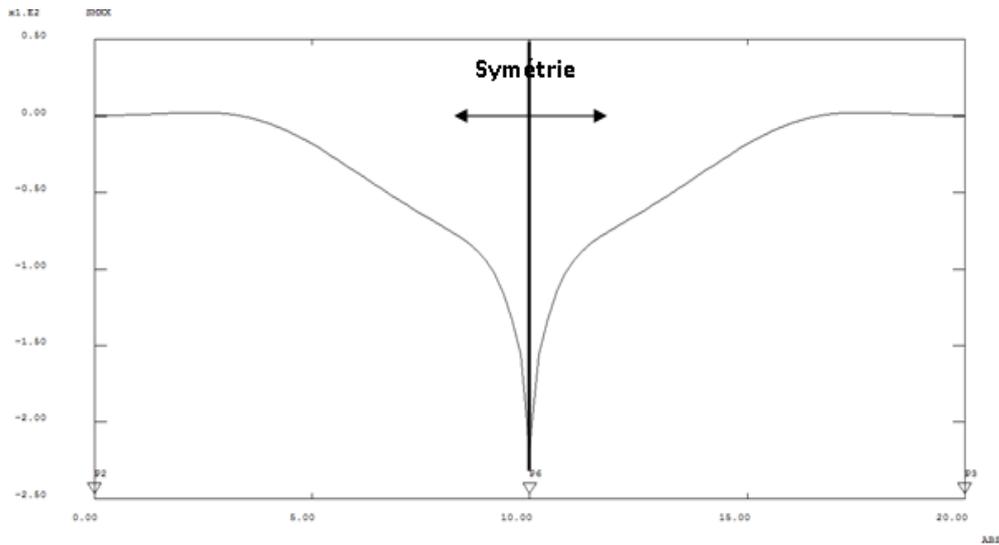


Figure III.8 : Distribution des contraintes principales

La courbe de variation des contraintes en fonction de la ligne de dimension moyenne de l'éprouvette et donnée dans la courbe ci-dessous (la symétrie est toujours présente).



**Figure III.9 :** Evolution des contraintes en fonction de la ligne moyenne.

#### Cas 2 : mortier pré-fissuré

On prend maintenant en compte le temps dans l'étude de la déformation de notre éprouvette. On utilise pour cela l'opérateur « PAS A PAS » qui permet de faire une étude avec force appliquée variable.

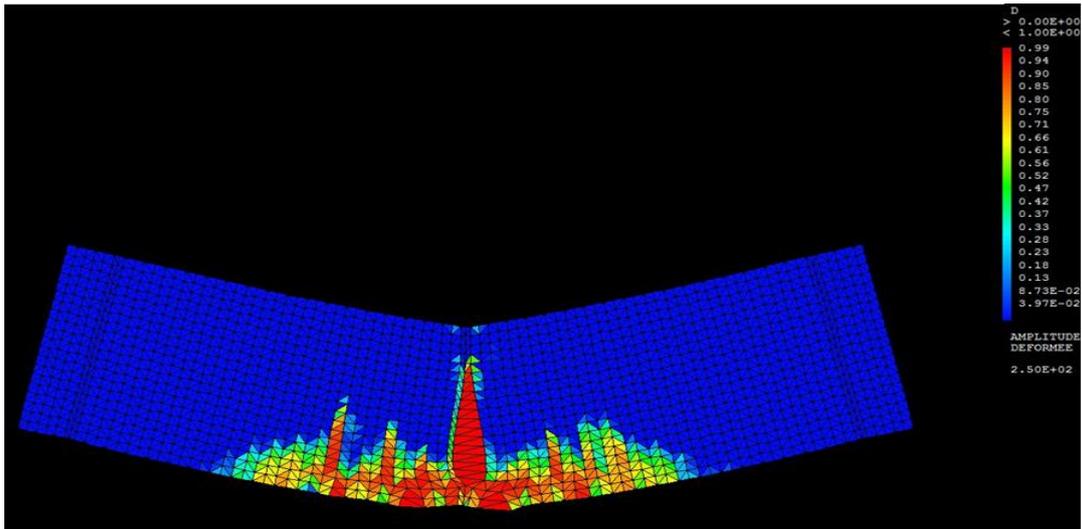
La formule  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  est valable pour un comportement élastique, mais en règle générale, c'est la formule  $\sigma = E \cdot (1-D) \cdot \varepsilon$  qui est la plus juste, D étant l'endommagement de l'élément, compris entre 0 et 1.

Si  $D=0$ , on est en élastique (et on retrouve la première formule), mais si  $D=1$ , on n'est plus capable d'avoir de contraintes, c'est là qu'apparaissent fissures.

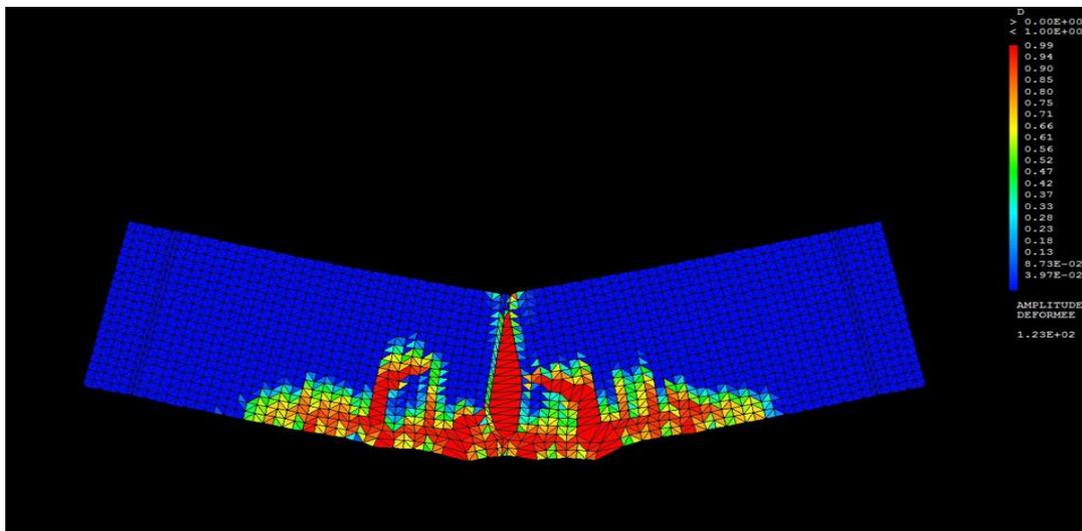
Pour ce faire, nous allons utiliser une échelle 1:1 entre le déplacement et le temps, afin de faciliter les calculs :

$$d(t) = d(0) \times \lambda(t) \rightarrow \text{on considère que } d(0) = 1.$$

On réalise un premier calcul Pas à pas de 50 itérations, nous obtenons la figure II.7.



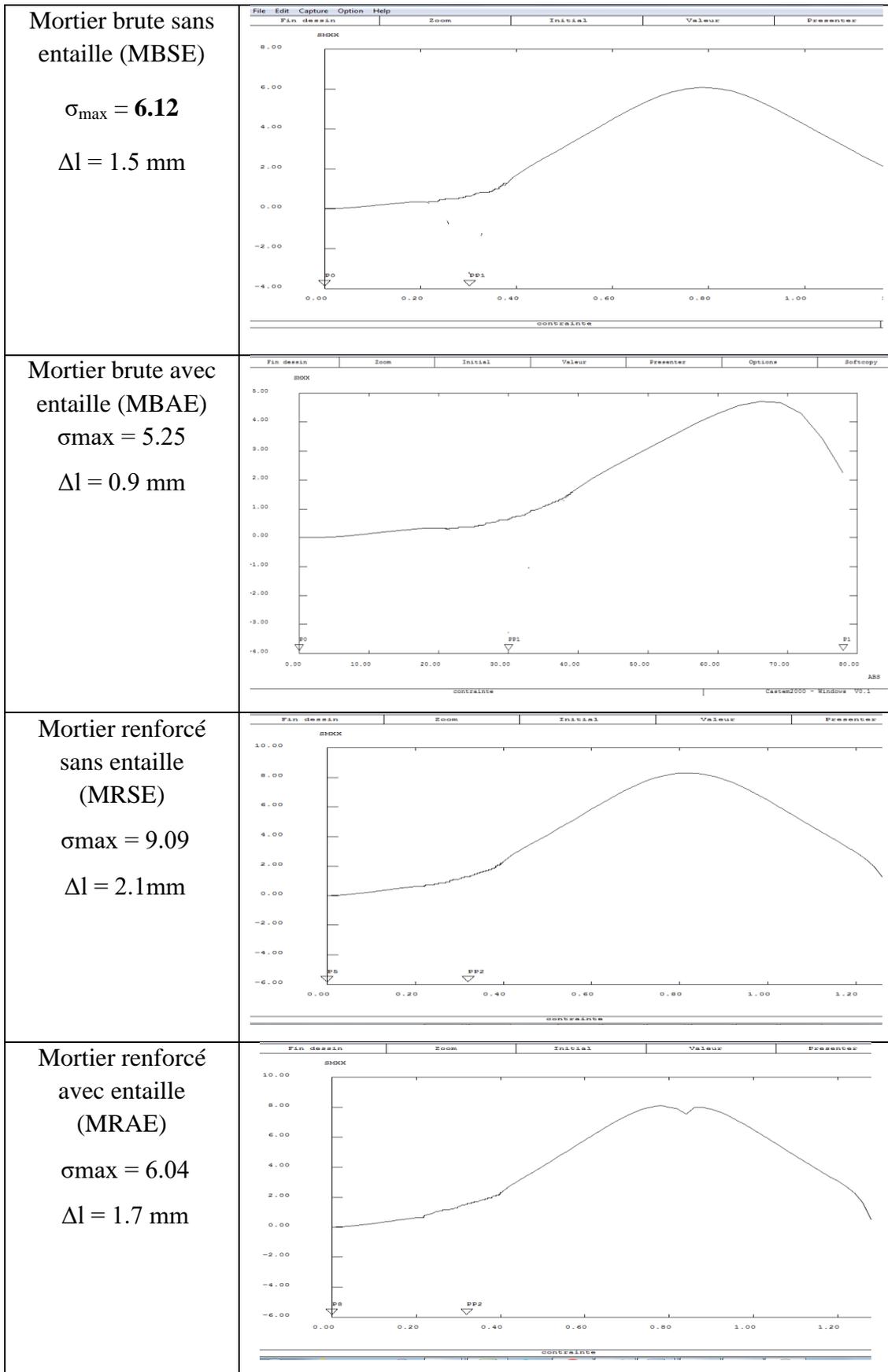
**Figure III.10** : Ouverture de fissures (25 itérations de calculs).



**Figure III.11** : Ouverture de fissures (50 itérations de calculs).

On peut alors visualiser les fissures pour n'importe quel pas de calcul. On voit clairement la fissure principale à mi-travée et les fissures secondaires de part et d'autre du centre de la poutre en rouge. On peut également noter le non symétrie du modèle. Cela paraît logique puisque le mortier est un matériau hétérogène.

Les courbes contraintes en fonction de l'allongement de chaque cas, attribués aux mortiers réalisés expérimentalement, sont représentées dans la figure III.12. L'analyse de ces courbes montre que le renforcement du mortier par collage extérieur par matériau composite verre/résine polyester permettant à une augmentation significative dans la résistance à la flexion 3-points, que ce soit pour le mortier brut renforcé ou le mortier pré-fissuré renforcé. Mortier brute sans entaille (MBSE).



**Figure III.12 :** Comportements mécaniques contrainte-allongement pour chaque cas du mortier.

### Chapitre III : Résultats, modélisations et interprétations

---

Le tableau ci-dessous III.7 récapitule une comparaison entre les résultats extraits de l'expérimentale comparées aux résultats extraits de la modélisation. Une concordance est trouvée avec une faible erreur.

**Tableau III. 7** : Comparaison des données numériques et expérimentales.

Type d'éprouvette	Valeur expérimentale Contrainte(MPA)	Valeur numérique Contrainte(MPA)	STD
<b>MBSE</b>	6.50	6.12	0.26
<b>MRSE</b>	8.69	9.09	0.28
<b>MBAE</b>	4.65	5.25	0.42
<b>MRAE</b>	6.67	6.04	0.44

### III.5 Conclusion

Lors de ce chapitre, deux parties sont présentées, l'une dévoile les interprétations des résultats expérimentaux obtenus lors des essais mécaniques, l'autre représente une approche numérique par la méthode des éléments finis afin de valider l'approche expérimentale. Grâce à un logiciel numérique, une modélisation et des hypothèses simplificatrices sont utilisées pour se rapprocher du modèle réel et avoir des résultats exploitables. Les résultats obtenus lors de ces deux approches (expérimentale et numérique) un bon compromis entre eux soit obtenu.

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

L'objectif principal visé à travers cette étude de recherche entre dans le cadre de l'évaluation du comportement mécanique de structures de construction, renforcées par collage de matériaux composites en fibres verre. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux cas de poutres en béton et en mortier, brutes et ou présentant un défaut. Nous avons utilisé les matériaux composites pour restaurer et augmenter la capacité de résistance ainsi que leur durée de vie portante des poutres à la flexion et à la compression. Par conséquent, la modélisation du comportement mécanique des structures de construction a été proposée afin de faire une validation des résultats expérimentaux obtenus.

Sur la base des résultats de cette étude il est possible de mettre en évidence les conclusions principales suivantes :

- L'essai de flexion 3-points des échantillons en mortier brut et renforcé, montre des augmentations significatives dans la résistance à la flexion. Cette augmentation peut atteindre 33.7 % pour les mortiers renforcés par composite comparée aux mortiers non renforcés.
- Pour les mortiers pré-entailés renforcés par composite, une augmentation dans la résistance à la flexion qui égalent à 43.44 % soit obtenue comparée aux mortiers pré-entailés non renforcés.
- Ces augmentations dans la résistance enregistre des temps de déroulement de l'essai jusqu'à la rupture plus long, ce qui nous donne un intervalle de secours par exemple lors d'un dégât d'endommagement.
- pour l'essai de compression des échantillons en mortier renforcé comparés à celle brut, des augmentations aussi significatives dans la résistance à la compression, qui se traduit par des élévations égale à 98.0 %. En revanche, des augmentations de 66.09 % pour les mortiers pré-entailées renforcés par composite comparée aux mortiers pré-entailées non renforcés.
- L'essai de traction par flexion effectué sur des échantillons en béton brut et renforcé par collage de matériau composite, ce dernier ayant des résistances mécaniques supérieures que celle des échantillons en bétons non renforcé, soit brutes ou pré-entailées. Cette supériorité se traduit respectivement par 52 % et 26 %.
- L'essai de compression réalisé sur des échantillons de béton brut et renforcé, des augmentations peut aller jusqu'à 26.21 % enregistrées pour les échantillons en béton renforcées par collage de matériaux composite, et ceux par rapport aux échantillons en

## Conclusion générale

---

béton brutes (non renforcées). Le temps de déroulement de l'essai de compression pour les échantillons en béton renforcées est presque trois (03) fois supérieur comparé au celle du temps pour les échantillons en béton non renforcées.

➤ Une approche numérique fondée sur la méthode des éléments finis a été réalisé, des champs de déplacements, de déformations et d contraintes sont générées dans la structure. Les résultats obtenus par notre modèle numérique montrent une bonne adéquation à ceux obtenus expérimentalement. La visualisation de la propagation des zones endommagées et de la fissuration dans le mortier reste cohérente aux vues des résultats obtenus dans la partie expérimentale de notre étude.

Enfin, on peut dire que la réparation et le renforcement des poutres, en utilisant des matériaux composites demeure un sujet d'intérêt, notamment au point de vue des méthodes de calcul et de dimensionnement, de même qu'au point de vue de l'évaluation de leur durabilité en service.

### Perspectives

Les travaux expérimentaux effectués dans cette mémoire ont été menés pour étudier l'effet de renforcement par collage de matériaux composites des structures de construction et ceux sur les propriétés mécaniques du mortier et du béton. Au regard des résultats obtenus, de nombreuses perspectives peuvent être envisagées à savoir:

- Elargir l'étude sur d'autres structures (par exemple en béton armé);
- Possibilité de faire le renforcement in situ c'est-à-dire dans leur environnement;
- Evaluation par modélisation numérique des propriétés thermique du béton et ou béton armé.

### Référence bibliographique

- [1] Abdelhakim BEDDIAR, « Renforcement des poutres en béton armé a l'aide de matériaux composites », Mémoire de magister en génie civil, Université de Biskra ,2004.
- [2] G.BERNIER, Formulation des bétons, Techniques de l'ingénieur, C2 210.
- [3] <https://www.allobeton.com/prix-m3-beton-fondation>.
- [4] LOGBI Abdelaziz, Effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physiquemécanique et chimique du mortier, thèse de doctorat en science en génie civil, université kasdi mer bah –Ouargla ,2019.
- [5] R. MAILLOT, "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p, (2001).
- [6] KATTAB.R, valorisation de sable de dune, Thèse doctorat, Alger : ENP, 2007.
- [7] Approuve par le Gouvernement Wallon, matériaux et produits de constructioncahier des charges type quali routes, chapitre C, 20 juillet 2011.
- [8] Patrick, Guiraud, Constituants du béton, (2018).
- [9] GEORGES DREUX : «Nouveau guide du béton » Edition Eyrolles, 1981.
- [10] Fiche technique tom 2. Les bétons : formulation fabrication et mise en œuvre ”, Cimbéton centre d'information sur le ciment et ses applications, Réédition janvier 2013.
- [11] Karim BENZARTI et Jean SALIN, Thèse de doctorat Sciences de l'ingénieur Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure répartie de déformation , Université Paris-Est Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement Application à un câble à fibre optique noyé dans le béton ,2013.
- [12] DREUX, J, « Nouveau guide de béton et de ses constituants », 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [13] M. Tahar, «Etude de l'Endommagement dans un composite strafie », mémoire de Magister, Université Abd El Hamid iben badis de Mostaganem ,2012.
- [14] J. Berthelot, « Mécanique des matériaux et structures composites», imprimé en France par Jean Marie Berthelot .Les clousures, Chemin des Horst 05290 Vallouise,Septembre2013.
- [15] Daniel Gay,"Matériaux composites", 5ème édition, Lavoisier Paris 2005, ISSN 2-7462- 1098-3.
- [16] YAHIAOUI Souad, Etude expérimentale de la durabilité des éléments fissure en béton armé rigidifiés par les matériaux composites, Mémoire de magister, sciences et génie desmatériaux université M'Hamed bougara boumerdes ,2006.

## Référence bibliographique

---

- [17] Prombut. P, caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels, Toulouse, thèse Doctorat, 2007.
- [18] HAMI Brahim, Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure sandwich multicouches, Thèse de Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, université M'Hamed bougara boumerdes ,2018.
- [19] MOHAMADI Saddika, Matériaux Composites, Matériaux et Ouvrages de Génie Civil, Université Akli Mohand Oualhadje de Bouira, Algérie, Cours de génie civil ,2014.
- [20] FELLAH. Menouar, MODELISATION ET EVALUATION DE LA REDUCTION DU COEFFICIENT DE DILATATION LONGITUDINAL THERMIQUE DANS LES PLAQUES STRATIFIEES EN PRESENCE DE FISSURES TRANSVERSES, thèse de doctorat en Génie Mécanique, Option : Thermique, UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES ,2017 .
- [21] HACHEMI Samya, Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants, thèse doctorat en génie civil option matériaux de construction, université Mohamed Khider – Biskra ,2015.
- [22] Mr. HAMMAR Rabah ,Etude de la réponse des éléments bidimensionnels en béton armé sous l'action des charges monotones en tenant compte de l'effet d'engrènement et de la densité du maillage , mémoire de magister ,département de génie civil .
- [23] Rachid BERBAOUI ; Identification et analyse de par fatigue des matériaux granulaire a base polymère; thèse doctorat en génie mécanique ; Université du Maine ; 2010.
- [24] FERRIER Emmanuel ; Renforcement au cisaillement des poutres béton armé par matériaux composites naturels (fibre de lin) ; thèse de doctorat en génie civil ; l'Université Claude Bernard Lyon 1 ; 2016.
- [25] 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.
- [26] article en chemisage en béton arme par BTP cours ; 2021/ <https://btp-cours.com/chemisage-en-beton-arme/>
- [27] ABOU CHAKRA Farid ; Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de Polymère Renforcé par Fibre de Carbone - Comparaison des codes ; Thèse de magister CONSTRUCTION ET AMENAGEMENT ; 2016.
- [29] Mohcene BOUKHEZAR ; REHABILITATION ET RENFORCEMENT Civil ; Université Mentouri, Constantine ; 2009.

## Référence bibliographique

---

- [30] AKCHICHE HAMIDA ; MODELISATION DE FISSURATION EN FLEXION ET DURETRAIT DES BETONS DE FIBRES DE PALMIER DATTIER ; thèse doctorat en génie civil ; Université de KASDI MERBAH OUARGLA ; 2020.
- [31] GHERDAOUI MOUFIDA ; Renforcement des ouvrage en béton arme soumis aux action gravitaire avec matériaux composite ; thèse de doctorat en Génie Civil et d'Hydraulique, Spécialité Structures et matériaux ; université 08 mai 1945 ; Guelma ; 2018.
- [32] Riad BENZAID ; Contribution à l'Étude des Matériaux Composite Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton ; thèse Doctorat en Science en Génie Civil ; Option Mécanique des structures ; université mentouri Constantine ; 2010.
- [33] ABOUTAIR Amel ; Caractérisation Physico-mécanique et Microstructurale des Bétons Fibrés à Matrices Ultra Haute Performance ; thèse doctorat en Sciences et Génie des Matériaux ; Option Physique et mécanique des matériaux ; université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES ; 2019.
- [34] Carol YOUSSEF NAMNOUM ; Etude de l'influence des additions minérales sur l'auto- cicatrisation des matériaux cimentaires : caractérisation expérimentale et modélisation des propriétés viscoélastiques ; thèse doctorat en génie civil L'ÉCOLECENTRALE DE NANTES ; 2021.
- [35] Mbark Ouchene, Document les mortiers, 2022.
- [36] Mohcene BOUKHEZAR., Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composite, Thèse de Magister en Génie Civil Option : "Le Béton Structurel Armé et Précontraint», Université Mentouri, Constantine,2009.
- [37] Laarej Merad, Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM, Spécialité : Physique Energétique et matériaux, l'Université Abou BakrBELKAID de Tlemcen, 2010.
- [38] Selmani Asma, Élaboration des composites cimentaire à base de fibres végétales locales(le diss) : caractéristique, durabilité et application au cas de la maçonnerie ; thèse de doctorat en génie civil, université badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [39] Touhami TAHENNI ; Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance ; mémoire de magister en génie civil ; spécialité construction ; université dela science et la technologie **Houari** Boumediene ; 2006.
- [40] Site  
[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2Ffigure%2Fschema-de-principe-de-lessai-de-flexion-3-points\\_fig5\\_281047317&psig=AOvVaw2sABKbGQTuOs38Lax\\_R4RL&ust=16844356\\_88131000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwjGz\\_yHgv3-AhUxrEwKHVgZAr4Qr4kDegUIARC\\_AQ](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2Ffigure%2Fschema-de-principe-de-lessai-de-flexion-3-points_fig5_281047317&psig=AOvVaw2sABKbGQTuOs38Lax_R4RL&ust=16844356_88131000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwjGz_yHgv3-AhUxrEwKHVgZAr4Qr4kDegUIARC_AQ)

## Référence bibliographique

---

- [41] Identification du module d'Young de matériaux réfractaires à base SiC Emmanuel de Bilbao, Eric Blond, Christine Michel, Thierry Cutard, N. Schmitt, J. Poirier ; <https://hal.science/hal-00600493> ; 15 Jun 2011.
- [42] Éprouvettes et résistance : les contrôles qualité sur béton durci ; Léa Ordener ; 2 août2021.