

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCH



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

## **Mémoire de master académique**

*En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en  
Génie civil*

*Option : structures*

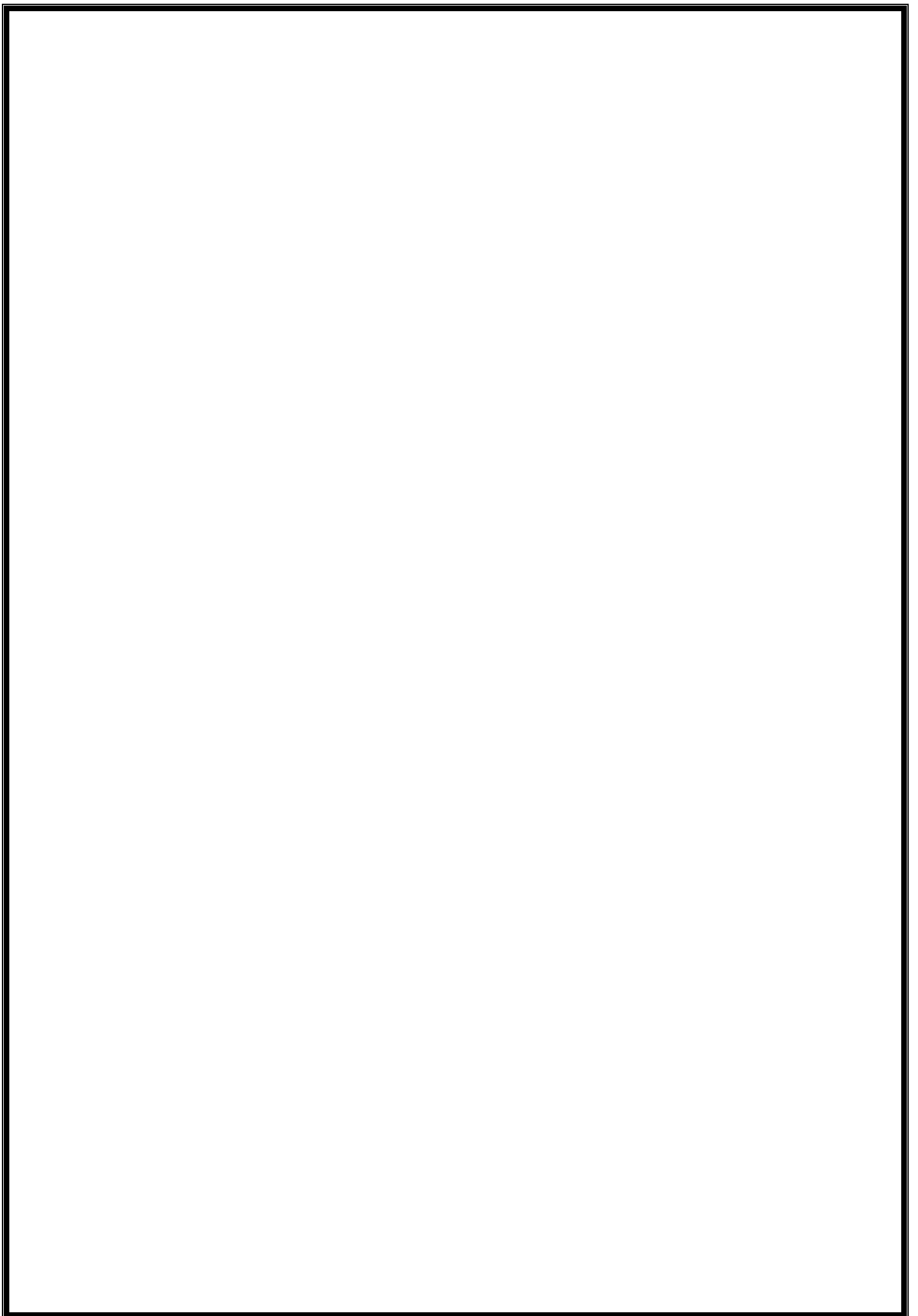
Thème :

**Confinement hélicoïdal avec matériaux composites  
de prismes en béton.**

Encadré par :  
**Mme ALI AHMED C.**

Présenté par :  
**SOKRI EL -djouher**

**Année 2018/2019**



## *Remerciements*

*Je tiens à présenter mes plus vifs remerciements à ma promotrice Mme ALI AHMED, qui m'a encadré et dirigé avec beaucoup d'attention et de disponibilité tout au long de ce travail.*

*Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'il ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir avec leurs propositions et leurs remarques.*

*Je souhaiterai remercier mes camarades Si Salem Massinissa, Salmi Malha et tous mes amis en particulier Linda, Ourda, Dihia et Fatima pour leur aide et leur soutien.*

*Je remercie également, l'ingénieur du laboratoire de matériaux du département de Génie Civil, Mr Bouheraoua Rachid pour sa disponibilité et toute l'aide que j'ai eu de sa part.*

*Pour terminer, je tiens sincèrement à remercier mes parents et toute ma famille qui m'ont soutenu dans mes choix et m'ont encouragée lors de la réalisation de ce mémoire.*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents pour leur présence et leur soutien au cours de mes années d'étude,*

*A mon frère Brahim*

*A mes sœurs*

*Tiziri, Lilia, katrina, Lina et Aria*

*A Toute ma famille*

*A tous mes amis (es)*

## **Résumé :**

Afin de prolonger leur durée de vie et d'assurer la sécurité des usagers, les structures en béton peuvent nécessiter un renforcement au cours de leur durée de service. La technique de renforcement par collage externe, en surface, de composites renforcés de fibres de verre, de carbone ou d'aramide à l'aide de résines durcissant à température ambiante est largement employée pour son efficacité et sa facilité de mise œuvre.

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur l'efficacité du confinement par des bandes de PRFV, en double hélice, de spécimens prismatiques en béton. L'objectif principal des travaux est de vérifier l'application de cette méthode de réhabilitation à des colonnes de section non circulaire en tenant compte de plusieurs paramètres, tels que : la largeur de la bande de PRFV et le nombre de tours (pas de l'hélice) ainsi que le degré d'endommagement.

Les résultats issus de l'essai de compression après confinement ont montré l'effet bénéfique de ces bandes sur le comportement en compression uni axiale du béton pour l'ensemble des spécimens testés. Un gain en résistance a été enregistré pour tous les prismes confinés. La résistance du béton confiné est proportionnelle à la largeur de la bande ainsi qu'au nombre de tours de l'hélice. De plus, la résistance initiale du béton a été restituée pour tous les prismes pré-endommagés confinés, on obtient même des gains de résistance au fur et à mesure que le degré d'endommagement diminue.

**Abstract:**

In order to extend their life and ensure the safety of users, concrete structures may require reinforcement during their service life. The surface bonding reinforcing technique with glass fiber, carbon or aramid-reinforced composites, using room temperature curing resins is widely used for its efficiency and ease of use.

The study presented in this thesis deals with the effectiveness of GFRP double helix confined concrete prismatic specimens. The main objective of the work is to verify the application of this method of rehabilitation to columns of non-circular section, taking in account, several parameters, such as: the width of the band of GFRP and the number of turns (not of the helix) in addition to the degree of damage.

The results obtained from the compression test after confinement, showed the beneficial effect of these bands on the uni-axial compression behavior of the concrete for all the specimens tested. A resistance gain has been recorded for all confined prisms. The strength of the confined concrete is proportional to the width of the strip and the number of turns of the helix. In addition, the initial strength of the concrete was restored for all pre-damaged confined prisms we even obtain strength gains as the degree of damage decreases.

## Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Sommaire.....	v
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	x

Introduction Générale.....	2
----------------------------	---

### Chapitre I : synthèse bibliographique

I.1.Introduction. ....	5
I.2.Nécessité de la réhabilitation d'une structure.....	5
I.3.Réhabilitation avec Matériaux composites.....	6
❖ matériaux composites.....	9
➤ Classification des matériaux composites.....	10
➤ Les avantages et inconvénients des matériaux composites.....	11
❖ Polymères renforcés de fibres « PRF ».....	12
➤ Définition.....	12
➤ Intérêt des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment.....	12
➤ constituants d'un polymère renforcé de fibres.....	12
➤ Propriétés mécaniques des composites «PRF».....	13
I.4.Comportement du béton ordinaire sous compression.....	14
I.5.Comportement du béton confiné.....	15
I.6.Méthodes de confinement avec matériaux composites « PRF ».....	16
I.7.Revue des travaux antérieurs sur le confinement du béton.....	17
I.8.conclusion.....	18

### Chapitre III : Programme expérimental

II.1.Introduction.....	23
II.2.Programme expérimental.....	23
II.3.Matériaux utilisés.....	24

<b>II.3.1. Le béton.....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.2. Polymère Renforcé de Fibres.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.2.1. Tissu de verre.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.2.2. Résine.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4. Confection des éprouvettes.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.1. Malaxage et mise en œuvre du béton.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.2. Traitement des surfaces avant confinement.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5. Confinement externe avec le composite PRFV.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.1. Description des spécimens à confiner.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.2. Mise en œuvre du PRFV.....</b>	<b>31</b>
<b>II.5.2.1. Préparation des bandes de tissu de verre.....</b>	<b>31</b>
<b>II.5.2.2. Préparation de la résine.....</b>	<b>32</b>
<b>II.5.2.3. Collage du composite sur les surfaces latérales des prismes.....</b>	<b>33</b>
<b>II. 6. Essai de compression sur les prismes confinés.....</b>	<b>34</b>
<b>II.7. Conclusion.....</b>	<b>36</b>

### **Chapitre III : Résultats et discussion**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>38</b>
<b>III.2. Résultats expérimentaux.....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.1. Influence de la largeur de la bande de PRFV sur la résistance à la compression du prisme confiné.....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.2. Influence du nombre de tours de confinement par PRFV sur la résistance à la compression du prisme en béton.....</b>	<b>40</b>
<b>III.2.3. Influence du degré d'endommagement sur la résistance à la compression de prismes en béton pré-endommagés confinés.....</b>	<b>43</b>
<b>III.3. Analyse statistique des résultats expérimentaux.....</b>	<b>45</b>

<b>III.3.1. Analyse de la Variance (ANOVA).....</b>	<b>45</b>
<b>ANOVA pour le facteur largeur de la bande .....</b>	<b>45</b>
<b>ANOVA pour le facteur nombre de tours.....</b>	<b>45</b>
<b>ANOVA pour l'effet de degré d'endommagement.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3.2. Régression linéaire.....</b>	<b>46</b>
<b>III.4. Mode de rupture des spécimens confinés.....</b>	<b>47</b>
<b>III.5. Conclusion.....</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>49</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>52</b>

## Liste des figures:

Figure I.1: Rupture en flexion de la poutre.....	6
Figure I.2 : Renforcement en flexion de dalle par FRP.....	7
Figure I.3 : Rupture en cisaillement de la poutre.....	7
Figure I.4 : Rupture en cisaillement du mur.....	7
Figure I.5 : renforcement au cisaillement de la poutre.....	8
Figure I.6 : rupture de poteau (insuffisance de renfort transversal).....	8
Figure I.7 : L'application circonférentielle de renforts.....	8
Figure I.8 : renforcement par confinement de poteaux.....	9
Figure I.9: Différentes familles de matrices.....	10
Figure I.10: Principaux matériaux de renfort.....	10
Figure I.11: Courbes contraintes-déformations typiques des composites «PRFV», «PRFC» et des aciers doux.....	14
Figure I.12 :montre les courbes contraintes – déformations obtenues sur des cylindres en béton chargés en compression uni axiale.....	15
Figure I.13: Modes de rupture des spécimens.....	16
Figure I.14: Stratification au contact.....	17
Figure I.15: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A..	17
Figure I.16: Procédé de l'enroulement filamentaire.....	18
Figure I.17 : Chemisage par coquille préfabriquées.....	18
Figure. II.1 : Différents constituants du béton.....	24
Figure II.2. Tissu de fibres de verre.....	25
Figure II.3. Les composants de l'adhésif.....	26
Figure II.4 : Malaxeur à axe vertical.....	27
Figure II.5. Malaxage du béton.....	27
Figure II.6 : Moules métalliques de dimensions (10cm×10 cm×30cm).....	28
Figure II.7 : Vibration du béton sur la table vibrante.....	28
Figure II.8 : Moules remplis de béton.....	29

<b>Figure II.9.Cure d'hydratation des éprouvettes.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.10. Les éprouvettes avant confinement.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.11 : arrondissement des arrêtes des prismes avec une ponceuse électrique..</b>	<b>30</b>
<b>Figure II.12 : Bandes de tissu de fibres de verre.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure II.13 : Bande de tissu de verre imprégnée de résine.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure II.14: a-Collage du tissu sur le prisme en béton.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.14: b- prisme confiné avec une double hélice.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.15: éprouvettes confinées, laissées sécher à température ambiante.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure II.16 : Presse hydraulique.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure II.17: Eprouvettes soumise la compression. ....</b>	<b>35</b>
<b>Figure III.1: résistance du béton confiné pour différentes largeurs du PRFV.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III.2 : Les gains de résistance pour les différentes largeurs du PRFV.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.3 : La résistance des prismes confinés pour différents nombres de tours du PRFV.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III.4 : Les gains de résistance pour différents nombres de tours du PRFV.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure III.5: effet de confinement sur le degré d'endommagement.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III.6 : Les gains de résistance de prismes confinés pour différents degrés d'endommagement.....</b>	<b>44</b>
<b>Figure III.7: La régression linéaire.....</b>	<b>46</b>

## Liste des Tableaux :

<b>Tableau I.1: Propriétés mécaniques typiques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA».....</b>	<b>14</b>
<b>Tableau II.1 : Dosage des Constituants du béton pour le programme expérimental...24</b>	<b>24</b>
<b>Tableau II.2 : Caractéristiques élastiques du tissu de verre.....25</b>	<b>25</b>
<b>Tableau II.3 : Les références des spécimens confinés.....31</b>	<b>31</b>
<b>Tableau II.4 : Les références des spécimens pré-endommagés confinés.....31</b>	<b>31</b>
<b>Tableau III.1 : résultats de l'essai de compression sur le béton témoin.....39</b>	<b>39</b>
<b>Tableau III.2 : Résultats des essais de compression pour différentes largeurs du PRFV.....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau III.3 : Gains de résistance pour les différentes largeurs du PRFV.....40</b>	<b>40</b>
<b>Tableau III.4 : résultats de l'essai de compression pour définir l'effet de nombre de tours.....41</b>	<b>41</b>
<b>Tableau III.5: gains de résistance des prismes confinés pour différents nombres de tours du PRFV.....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau III.6: résultats des essais de compression pour différents degrés d'endommagement.....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau III.7 : Les gains de résistance des prismes confinés pré-endommagés à différents degrés.....</b>	<b>45</b>

***INTRODUCTION  
GÉNÉRALE***

# Introduction générale

---

## Introduction générale

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

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

Le renforcement des structures en béton armé est l'une des méthodes curatives utilisées pour la réhabilitation des infrastructures afin d'en assurer la sécurité et le prolongement de la durée de vie. Différentes techniques de renforcement sont apparues. Plusieurs ouvrages rapportent les résultats d'expérimentations sur le béton confiné.

Au milieu du siècle passé, l'évolution dans le domaine des adhésifs a permis de mettre en place une nouvelle méthode de renforcement des structures par collage externe. Dès le milieu des années soixante, on a commencé à appliquer des lames d'aciers sur des structures en béton. Ces dernières sont collées à la surface du béton à l'aide d'une résine époxy. Cette méthode constitue une avancée majeure dans le domaine de la réfection, car elle simplifie grandement, le travail par rapport aux méthodes traditionnelles. Toutefois, des problèmes de corrosion de l'acier mettent en péril la sécurité de ce type de renforcement. [39]

Afin de remédier à ce phénomène de corrosion, l'utilisation des matériaux non métalliques s'est avérée efficace, ce fut l'apparition des matériaux composites en particulier, les PRF (Polymères Renforcés de Fibres). Ces matériaux ont été adoptés dans le domaine de la construction vers les années soixante dix, au Japon, aux USA et en Europe. [40]

Parmi les méthodes de renforcement, l'utilisation de composites collés en surface des ouvrages à l'aide de résines époxy durcissant à température ambiante, est une technique largement employée pour son efficacité, sa facilité et rapidité de mise œuvre. Ces composites sont renforcés de fibres synthétiques de carbone, verre, aramide et plus récemment de basalte. Ces fibres jouent le rôle d'armature extérieure. Ces 30 dernières années ont vu émerger de très nombreuses études pour optimiser et améliorer la fiabilité de cette méthode de renforcement.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels, légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes, etc. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimique. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique et phonique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, ils sont aptes à remplir plusieurs fonctions

# Introduction générale

---

Se basant sur une étude de confinement du béton avec des bandes hélicoïdales de polymère renforcé de fibres de verre sur des éprouvettes cylindriques (Ali Ahmed, 2016), nous nous sommes intéressés à ce type de confinement, pour tester son effet sur des éléments en béton de géométrie différente, des prismes en l'occurrence. Deux paramètres ont été considérés comme variables, il s'agit de la largeur de la bande PRF ainsi que le nombre de tours d'hélice qu'elle forme autour du béton.

Nous avons, par ailleurs, testé l'aptitude de ce type de confinement à restaurer des prismes endommagés, quel que soit leur degré d'endommagement.

## *Objectif du travail :*

Ce mémoire présente les résultats d'une étude expérimentale sur confinement hélicoïdal avec matériaux composites de prismes en béton. Les objectifs visés par cette recherche sont :

- Mettre en évidence l'effet du confinement partiel par bandes hélicoïdales continues de PRF ;
- Évaluer l'influence de l'effet de la largeur de la bande ainsi le nombre de tours d'hélice sur le confinement ;
- Démontrer que quelque soit le degré d'endommagement d'une colonne en béton, la réparation ou le renforcement de celle-ci peut se faire par collage externe d'un PRF.

## *Plan du travail :*

Pour répondre aux objectifs fixés, nous avons scindé ce travail en trois chapitres.

- Le premier chapitre, consacré à la synthèse bibliographique sur le confinement du béton avec les composites ainsi qu'aux généralités sur les matériaux composites, particulièrement les PRF.
- Le deuxième chapitre, où ont été abordées les étapes de la procédure expérimentale à savoir la confection des éprouvettes, le procédé de confinement, ainsi que la procédure d'essai en compression.
- Le troisième chapitre, qui fait l'objet d'une présentation détaillée des résultats de cette recherche, qui y sont également discutés.

Une conclusion qui retrace les démarches importantes et met en avance les principaux apports, vient ponctuer ce travail.

***CHAPITRE I :***  
***SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE***

## I.1.Introduction.

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle et aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une réhabilitation pour assurer la sécurité des usagers.

De ce fait les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

De nombreuses solutions et techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité.

Depuis plusieurs années, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites

Les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les murs. Les premières recherches sur l'application de ce nouveau matériau aux ouvrages de génie civil date de 1980, bien que c'est plutôt vers 1990 que le matériau est utilisé, d'abord sur une base expérimentale, puis progressivement sur une base commerciale. [5]

## I.2.Nécessité de la réhabilitation d'une structure.

Les ouvrages en béton subissent, au cours de leurs vies de service, des réhabilitations importantes selon leurs importances, leurs exploitations et leurs positions environnementales. Les plus fréquentes causes sont : [1]

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure :
  - Changement d'usage de la structure (exemple: bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial),
  - Augmentation du niveau d'activité dans la structure (exemple: anciens ponts soumis au trafic actuel),
  - Installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution :
  - armature insuffisante ou mal placée,
  - mauvais matériaux,
  - dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- Rénovation des structures anciennes :
  - prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),
  - connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou une période,
  - vieillissement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales.
- Changement de la forme de la structure :

- suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,
- ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- Dégâts dans la structure :
  - corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,
  - impacts contre la structure,
  - incendies.
- Nécessité d'améliorer les conditions en service :
  - diminuer les déformations et flèches,
  - réduire l'intensité des contraintes sur les armatures,
  - diminuer l'ouverture des fissures.

### I.3.Réhabilitation avec Matériaux composites.

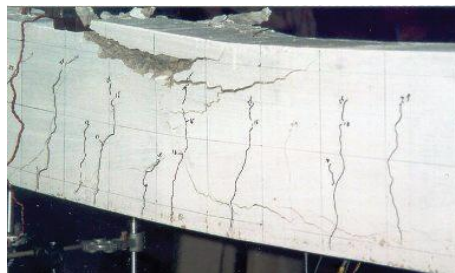
Les techniques traditionnelles de renforcement ou de réparation ont montré leurs limites. Le recours aux matériaux composites constitue une des solutions de renforcement des structures la plus prometteuse.

Les matériaux composites sont souvent utilisés dans le renforcement et la réparation de structures en béton armé comme les poutres, voiles, colonnes, etc. notamment dans les bâtiments, ponts... Les matrices utilisées sont généralement d'origine pétrolière. On peut citer notamment les résines polyester thermodurcissable, les résines époxydes, les résines vinylester ou encore les résines thermoplastiques (polyamides...). Au niveau des fibres, les fibres de verre, de carbone ou d'aramide sont les plus courantes. [19]

Actuellement les PRF sont utilisés comme renforcement extérieur de structures en béton dans principalement trois cas d'application [12] [7] : la flexion, l'effort tranchant (cisaillement) et le confinement (la compression)

- **Renforcement en flexion :**

Ce type de renforcement est appliqué pour les structures qui supportent une sollicitation due au moment fléchissant. Les fissures ou bien l'endommagement apparaissent dans la zone de traction des poutres ou des dalles (Figure I.1). Les fibres du composite sont orientées selon la direction principale des contraintes de traction. Le composite en surface apporte sa contribution tout comme les armatures internes. La résistance totale du matériau est alors la somme des contributions du béton, de l'acier et du composite. Le matériau de renfort doit donc présenter à la fois un haut module et une haute résistance afin d'optimiser le renforcement. [10]



**Figure I.1:** Rupture en flexion de la poutre.

Dans la plupart des cas, les renforts utilisés sont généralement des bandes de tissu unidirectionnel pour le cas des poutres et des bandes bidirectionnelles pour le cas des dalles ou le cas de sollicitations complexes sur les voiles et poteaux aussi bien pour les poutres que pour les dalles (Figure I.2). Le composite sera collé au béton dans la zone tendue à l'aide de résine [19].



**Figure I.2** : Renforcement en flexion de dalle par FRP

- **Renforcement au cisaillement :**

Les structures, notamment les poutres, peuvent être renforcées à l'effort tranchant. La rupture en cisaillement apparaît sur les zones où l'effort tranchant est élevé : la zone de la poutre à côté d'appuis, la zone de la dalle à côté du poteau (Figure 1.3). Avec la sollicitation complexe de séisme, la rupture de cisaillement apparaît aussi sur les murs et poteaux (Figure 1.4).



**Figure I.3** : Rupture en cisaillement de la poutre. **Figure I.4** : Rupture en cisaillement du mur (séisme à BİNGÖL (TURKEY) 01/05/2003)

L'angle de fissures par rapport à l'axe principal est compris entre  $23^\circ$  à  $45^\circ$  selon la géométrie et la charge sur la structure. Les composites utilisés sont des tissus unidirectionnels et sont généralement disposés perpendiculairement à l'axe principal de la structure afin d'augmenter l'efficacité du renforcement (Figure 1.5) [19].



**Figure I.5** : renforcement au cisaillement de la poutre [19].

- **Renforcement par confinement :**

Sous l'effet d'un effort de compression axiale, la rupture apparaît souvent dans les poteaux (Figure I.6) ou les voiles qui n'ont pas le renforcement transversal suffisant ou sous renforcés vis-à-vis de l'action sismique. L'endommagement est souvent traduit par l'écrasement du béton [19].



**Figure I.6** : rupture de poteau (insuffisance de renfort transversal)

L'application circonférentielle de renforts en matériaux composites (Figure I.7), permet, en limitant les déformations transverses du béton, d'augmenter de façon significative la capacité portante des poteaux. Les calculs de la résistance du béton après confinement prennent principalement en compte le module du composite [10].



**Figure I.7** : L'application circonférentielle de renforts

Les renforts utilisés sont unidirectionnels pour le cas de renforcement en compression pour les cas de poteau court, et bidirectionnels pour les cas de poteaux élancés sous charge complexe (combinaison de compression et flexion). Cette méthode a été validée par plusieurs recherches.



**Figure I.8** : renforcement par confinement de poteaux

### ❖ matériaux composites :

Un matériau composite est constitué de deux matériaux différents et complémentaires permettant d'obtenir un matériau dont la performance dépasse celle des composants pris individuellement.

Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction. Le pisé de paille et d'argile est un des plus anciens matériaux dont l'idée première est exactement celle des composites : exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de « qualité mécanique » inférieure, le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue [14].

En général, les constituants principaux d'un matériau composite sont : la matrice et le renfort. Dans certains cas, des charges et des additifs peuvent être utilisés [4].

### • Les matrices :

Les matrices sont des matériaux isotropes, leur utilisation dans les composites permet de coller des fibres entre elles, de transmettre les efforts aux fibres et d'assurer une protection des fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques.

La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion chimique [13], [6].

Deux types de matrices en résine polymère sont largement connus: Les résines thermoplastiques (TP) et les résines thermodurcissables (TD). Il y a aussi les élastomères, qui sont utilisés parfois dans l'industrie automobile [11], [8], [2].

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :

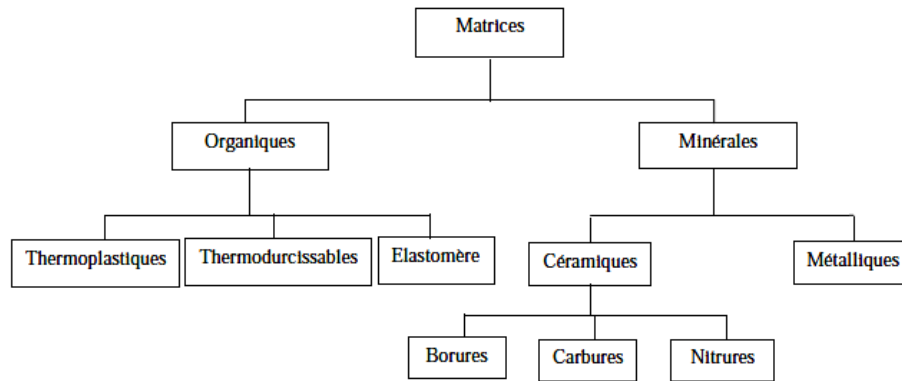


Figure I.9: Différentes familles de matrices [9]

• **Les Renforts :**

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Les avantages des fibres sont : Propriétés physico-mécaniques intéressantes, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. [2].

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines et de formes diverses.

Néanmoins, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme filamenteuse, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue. Ils sont caractérisés par la nature de la fibre (minérale ou organique) et de l'architecture du renfort. Ils constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 30% et 70%. [20], [22]

L'organigramme ci-dessous, résume les principales fibres utilisées comme renforts.

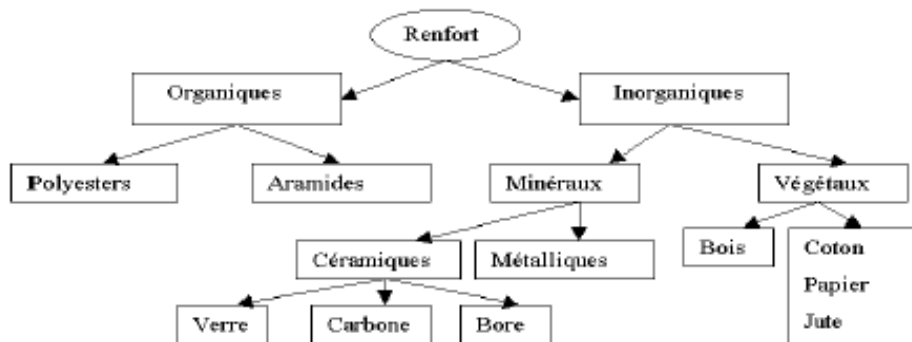


Figure I.10: Principaux matériaux de renfort [17].

➤ **Classification des matériaux composites**

• **Classification suivant la forme des constituants**

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes: les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

## - Les composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous une forme fibreuse. Les fibres utilisées se présentent, sous un aspect de fibres continues, sinon d'un aspect discontinu : ces fibres sont soit coupées, soit courtes.

L'arrangement des fibres, et leurs orientations dans un plan, permet de moduler les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes [21].

## - Les composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de dimensions privilégiées.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour diminuer le coût de revient du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice – particules dépend des propriétés souhaitées par exemple, des incursions de plomb dans des alliages de cuivre, ces particules facilitent l'usinage [21].

## • Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant les composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices, seuls certains couples d'association ont actuellement un usage industriel [21]:

- Composites à matrice organique :
  - Des fibres minérales : verre, carbone,
  - Des fibres organiques : Kevlar, polyamides,
  - Des fibres métalliques : bore, aluminium,
- Composites à matrice métallique :
  - Des fibres minérales : carbone, carbure,
  - Des fibres métalliques : bore,
  - Des fibres métal-minérales : fibres de bore revêtues de carbure
- Composites à matrice minérale
  - Des fibres métalliques : bore,
  - Des particules métalliques : cermets,
  - Des particules minérales : carbure, nitrures

## ➤ Les avantages et inconvénients des matériaux composites :

### • Avantages

Les matériaux composites présentent divers avantages en résistance, poids, ou maniabilité comparativement aux aciers ; tels que :

- La résistance des fibres de composites est plus élevée que celle de l'acier ; pour une même section.
- Faible vieillissement sous l'action de la corrosion.

- Les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- Insensible aux produits chimiques<<mécaniques>>comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvant, pétroles.
- La conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente comparativement a celle des platines d'aciers.

- **Inconvénients :**

- Vieillessement sous l'action de l'eau et de la température.
- 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 prohibitif.

- **❖ Polymères renforcés de fibres « PRF »**

- **Définition.**

Un polymère renforcé de fibres PRF est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continues ou discontinues. De façon générale, les fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. La résistance mécanique de la matrice est beaucoup plus faible que celle des fibres. De par l'orientation privilégiée des fibres le matériau composite est en général anisotrope. Ses caractéristiques mécaniques et chimiques, et sa densité très favorable en font un matériau très efficace comparé au métal. [19]

- **Intérêt des polymères renforcés de fibres dans le bâtiment.**

L'intérêt des utilisations des polymères renforcés de fibres dans le génie civil tenait essentiellement à [28]:

- Leurs faibles densités ;
- Leurs propriétés mécaniques longitudinales ;
- L'absence de corrosion ;
- Leur très bonne tenue à la fatigue ;
- Leur facilité de manipulation ;

- **constituants d'un polymère renforcé de fibres.**

Les matériaux composites PRF allient des matrices polymères thermodurcissables ou thermoplastiques à des fibres d'origine textile en verre, en carbone, en aramide ou en basalte.

- **Les fibres**

Les fibres supportent la majorité des contraintes mécaniques et assurent la résistance et la rigidité du composite. Les fibres de renforts couramment utilisées sont le verre, le carbone, l'aramide. Ces fibres sont choisies pour leur haute résistance mécanique et/ou leur haut module d'élasticité. Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres [3], [18].

**Fibre de verre :** Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenus la solution la plus utilisée dans plusieurs domaines, tels que le génie civil, l'industrie des bateaux et l'automobile. Les modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de la matrice, les fibres sont protégées [23].

**Fibres de carbone :** Les fibres de carbone présentent un coût 10 à 20 fois plus élevé que les fibres de verre, et sont donc utilisées dans des applications nécessitant des propriétés comparables à celles de l'acier.

Elles présentent de très bonnes propriétés mécaniques, pour une masse volumique généralement inférieure à 2000 kg/m<sup>3</sup>. Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère précurseur, se présentant sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement les fibres utilisées sont principalement des fibres acryliques fabriquées à partir de polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent ensuite une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation de la structure. La qualité des fibres de carbone finales dépend des qualités du précurseur [25].

**Fibres d'aramide:** Les fibres aramides à caractéristiques élevées, généralement connues sous le nom de « Kevlar », sont produites à partir de polyamides aromatisés. Les fibres sont obtenues par filage (étirage au travers d'une filière) à partir d'une dissolution. Les chaînes moléculaires sont fortement orientées dans le sens de l'axe de la fibre, de sorte que les forces des interactions moléculaires peuvent être exploitées pour leur résistance thermique et mécanique. Elles montrent une grande ténacité, ce qui explique leur utilisation en génie civil dans des câbles, haubans et autres applications requérant une bonne tenue aux chocs [10].

## • Les matrices :

La matrice dans un composite est la phase continue qui assure la cohésion, le transfert et la répartition des contraintes, protège des agressions extérieures les renforts et commande la mise en œuvre. Dans le domaine de renforcement externe des structures par des matériaux composites, la matrice du composite peut être classifiée en deux types :

- Résines thermodurcissables : le durcissement est définitif lors du cycle de polymérisation, le processus de transformation est irréversible.
- Résines thermoplastiques : le polymère est mis en forme par chauffage et le processus de transformation est réversible.

La résine utilisée souvent dans les renforcements de structure est une résine thermodurcissable grâce à sa facilité de mise en œuvre. La résine époxy est l'un des types de résine le plus utilisé couramment dans le renforcement de structure par collage [19].

➤ Propriétés mécaniques des composites «PRF»

Les propriétés mécaniques des matériaux composites dépendent des fibres contenues dans le composite (type, quantité et direction), de la matrice utilisée, ainsi que du rapport du volume des fibres par rapport au volume du composite. Elles sont aussi affectées par le volume ou la dimension du composite lui même [18]. En général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre [26].

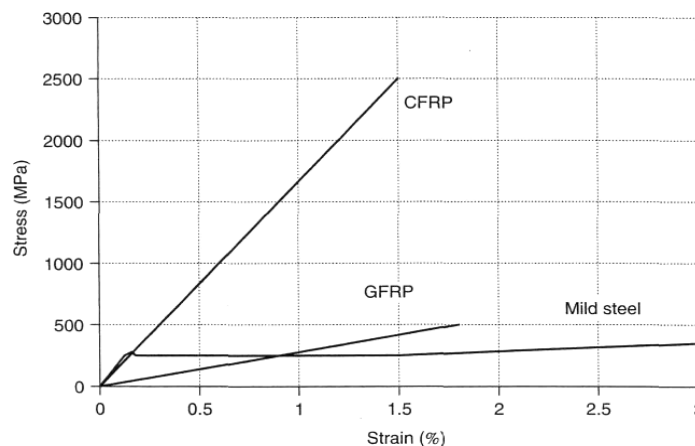
Le Tableau I.1 résume les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil.

**Tableau I.1:** Propriétés mécaniques typiques des composites «PRFV», «PRFC» et «PRFA» [3].

Matériaux composites Unidirectionnels	Contenu en fibres (%)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinale (GPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fibres de verre /polyester (GFRP laminé)	50-80	1600-2000	20-55	400-1800
Fibres de carbone /époxy (CFRP laminé)	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Fibres d'aramide /époxy (FRP laminé)	60-70	1050-1250	40-125	1000-1800

Ces trois types de composites donnent une large variété de résistances et de rigidités de différents FRP. Il existe d'autres produits particuliers dont les caractéristiques ne figurent pas dans ce tableau.

La Figure I.11 montre des courbes (contraintes-déformations) typiques pour des composites «PRFV», «PRFC», et des aciers doux [33], [30],[3] ,[31],[35], [18].



**Figure I.11:** Courbes contraintes-déformations typiques des composites «PRFV», «PRFC» et des aciers doux.

A partir des observations faites sur ces courbes, on peut remarquer :

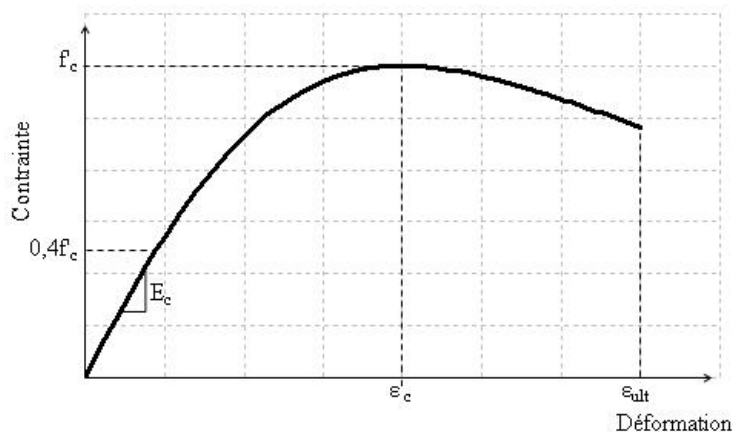
- Les différents types de fibres (carbone, verre) sont caractérisés par des relations contraintes-déformations linéaires.

- Présentent une différence entre le comportement fragile des composites «PRF» et le comportement ductile de l'acier doux, ce qui donne deux grandes conséquences structurales [3] :

- Ces matériaux composites ne possèdent pas la ductilité des aciers, et leur fragilité va limiter le comportement ductile des éléments en béton armé renforcés par les composites «PRF». Néanmoins, lorsqu'on les utilise pour le confinement du béton, ces matières peuvent rehausser grandement la force et la ductilité des poteaux.

#### I.4. Comportement du béton ordinaire sous compression :

La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une contrainte 33 de 70 à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement. La Figure I.12 illustre la relation contrainte-déformation ( $\sigma$ -  $\epsilon$ ) du béton en compression [27].



La Figure I.12 montre les courbes contraintes – déformations obtenues sur des cylindres en béton chargés en compression uni axiale.

#### I.5. Comportement du béton confiné.

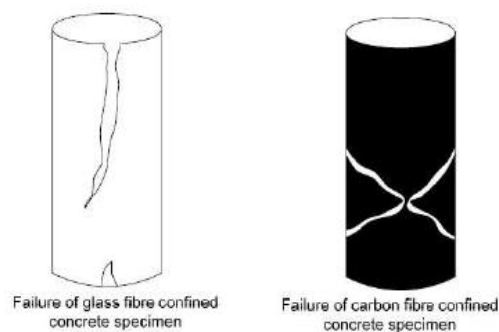
Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes en béton chargées axialement augmente la résistance et la ductilité de ces colonnes d'une quantité considérable.

Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge et qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton [38]. Le confinement du béton qui consiste à empêcher ces déformations, peut être réalisé soit par une enveloppe externe, soit par un faible espacement entre les étriers.

Les travaux les plus récents effectués par de nombreux chercheurs pour étudier le comportement des colonnes de béton confinées, sont présentés comme suit :

Saafi et autres ont conduit des études expérimentales et analytiques pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de PRFC et de PRFG. Les variables d'essai ont inclus le type de fibres, l'épaisseur du tube et la résistance à la compression du béton. Trente cylindres de béton (18 tubes en FRP remplis du béton et 12 cylindres de béton témoin) ont été examinés dans la compression. Tous les spécimens sont des colonnes courtes de 435 mm d'hauteur et 154 mm de diamètre. Les épaisseurs des tubes de GFRP examinés étaient 0,8, 6 et 4 mm et les épaisseurs des tubes de CFRP utilisés étaient de 0,11, 0,23 et 0,55 mm.

Dans le cas des tubes de fibre de carbone, la rupture était, plus fréquente soudain et a été accompagné de la rupture simultanée du tube composite et de l'écrasement du noyau de béton Figure I.13.



**Figure I.13:** Modes de rupture des spécimens [34].

### I.6.Méthodes de confinement avec matériaux composites « PRF »

Le confinement assure plusieurs objectifs :

- **Protéger** les structures pour remédier aux causes de désordres,
- **Réparer** les ouvrages pour les remettre en état en compensant les pertes des propriétés mécaniques,
- **Renforcer** les structures en améliorant les performances mécaniques afin d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage, de le mettre aux normes dans le cas de conditions d'utilisation modifiées ou d'éviter de nouvelles dégradations après réparation.

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites «PRF». Les méthodes de renforcement peuvent être classés dans trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite «PRF» à savoir : **la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en «PRF».**

- **Stratification au contact :**

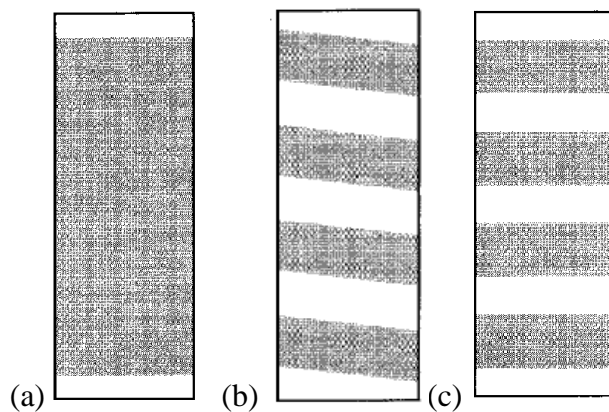
La technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes avec les composites «PRF» la stratification au contact (Figure I.14).

Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont découpées puis imprégnées de résine polymère ensuite déposées au tour des colonnes en orientant les fibres principales dans le sens de confinement avec un processus de moulage au contact, en fin l'application d'une couche de résine pour la protection nécessaire.



**Figure I.14:** Stratification au contact [36].

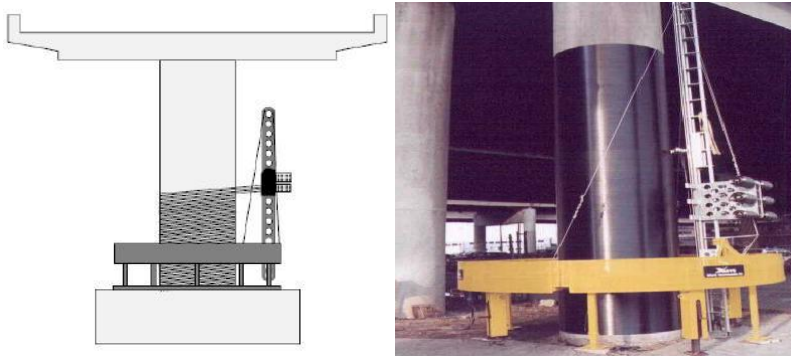
Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «PRF» avec une ou plusieurs couches (Figure I.15.a). Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des lanières «PRF» sous forme d'une spirale continue (Figure I.15.b) ou des anneaux discrets (Figure I.15.c).



**Figure I.15:** Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A,  
 (a) enveloppée totalement en utilisant des tissus «PRF»;  
 (b) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» en spirale continue ;  
 (c) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» sous forme d'anneaux discrets.

- **Enroulement filamentaire :**

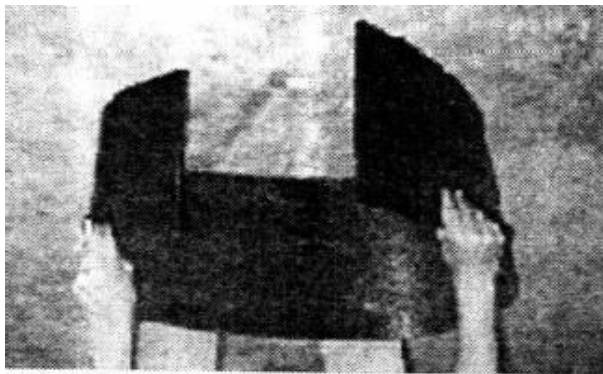
Le principe de l'enroulement filamentaire ou bobinage, est d'envelopper les colonnes par des fibres continues au lieu des tissus (Figure I.16). L'enroulement se fait à l'aide d'une machine contrôlée par ordinateur, qui permet une précision de l'orientation des fibres, qui sont imprégnées de résine, et de l'épaisseur du PRF. [23]



**Figure I.16:** Procédé de l'enroulement filamentaire [37], [29]

- **Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF»**

Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en «PRF» sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bondes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation. Elles peuvent être fabriquées en demi-cercles ou demi-rectangles [15], [24], en cercles avec une fente ou en rouleaux continus [24], afin qu'elles puissent être ouvertes et puissent être placés autour des colonnes, Figure I.17.



**Figure I.17 :** Chemisage par coquille préfabriquées

### **I.7.Revue des travaux antérieurs sur le confinement du béton.**

**Fardis et Khalili 1981** ont effectué des essais de compression uni-axiale sur des cylindres en béton de dimensions  $\text{Ø}76 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$  et  $\text{Ø}102 \text{ mm} \times 204 \text{ mm}$ , enveloppés par différents tissus composites à base de fibres de carbone (CFRP). Les résultats de ce confinement ont montré une augmentation de la résistance en compression et une amélioration de la ductilité [32].

**Saadatmanesh et coll. (1994)** conduisent une analyse paramétrique portant sur le comportement de colonnes circulaires et rectangulaires renforcées à l'aide de lamelles en matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone, collées en surface. Ils modélisent le confinement procuré par les lamelles à l'aide du modèle de Mander et coll. (1988). Quatre paramètres sont considérés en particulier: la résistance du béton, l'épaisseur de la lamelle en FRP, l'espacement des lamelles et les propriétés du matériau des lamelles [5].

**Demers 1994** a effectué des études dans le but de déterminer les paramètres qui influencent le comportement d'un élément en béton armé chargé axialement et confiné par une enveloppe en composite. La résistance du béton, le diamètre des barres longitudinales, l'espacement des étiers, le degré de corrosion des armatures ainsi que l'endommagement du béton faisaient l'objet de cette étude. Pour cela, 16 poteaux de 300 mm de diamètre et de 200 mm de haut ont été testés avec différentes configurations de renforcement en acier et un même confinement en composite [16].

**1995 Bavarian et al** ont réalisé une étude sur des cylindres de dimensions  $\varnothing 75 \times 150$  mm,  $\varnothing 100 \times 200$  mm et  $\varnothing 150 \times 300$  mm renforcés par confinement avec des fibres (S-glass) ou de kevlar (Kevlar-29). Le but était de déterminer l'influence du nombre de tours de composites ainsi que de la taille du spécimen. Les résultats ont signalé une augmentation significative de la résistance et de la ductilité du béton confiné. Une augmentation de 100% de la résistance axiale avec quatre tours de composite, un accroissement important de la ductilité et une diminution de la résistance axiale avec l'augmentation du diamètre du cylindre ont alors été observées [16].

**Shehata et al. (2002)** conduisent un programme expérimental comprenant des essais sur 54 colonnes courtes en vue de déterminer le gain de résistance et de ductilité de colonnes en béton confinées sur la face externe en les recouvrant de tissus en «PRFC». Les variables étudiées étaient la forme de la section transversale (circulaire, carrée et rectangulaire), et la quantité de renforcement caractérisée par le nombre de couche de «PRFC» appliquées aux spécimens (une ou deux couches). Les auteurs ont testé en compression uni-axiale des cylindres en béton de dimensions  $\varnothing 150$  mm x 300 mm, des prismes de béton de dimensions 150 mm x 150 mm x 300 mm et des colonnes rectangulaires de dimensions 94 mm x 188 mm x 300 mm (de section égale à celle des éprouvettes cylindriques) enveloppés par un matériau en «PRFC».

- Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité de confinement est très influencée par la géométrie de la section des colonnes (circulaire, carrée et rectangulaires) et la pression de confinement exprimée par le nombre de plis de l'enveloppe «PRFC».

- Les équations proposées dans cette étude pour l'estimation de la résistance en compression du béton confiné avec des «PRFC» doivent être associées avec la forme de la section et leurs validités sont limitées à cette géométrie [23].

**Xiao et Wu (2003)** présentent les résultats expérimentaux d'un programme de recherche concernant l'étude de comportement fondamental (contrainte-déformation) d'un béton confiné avec divers type de matériaux composites en «PRF». Dans cette recherche plus de 200 colonnes cylindriques en béton de dimension  $\varnothing 152$  mm x 300 mm avec 9 types de composite «PRF» ont été sollicitées en compression axiale. Différents paramètres de conception ont été considérés dans cette étude à savoir : la résistance à la compression du béton non confiné, le type et l'épaisseur du composite «PRF» utilisé [23].

**Thériault et al.** (2004) étudient expérimentalement l'influence de l'élançement et l'effet d'échelle des spécimens sur le comportement des colonnes en béton confinées avec des matériaux composites «PRF» chargées axialement. Les auteurs ont testé 42 cylindres en étudiant les paramètres suivants : trois diamètres différents et deux rapports longueur/diamètre combinés avec deux matériaux composites de confinement (PRFC et PRFV). Les résultats ont été comparés aux modèles théoriques et aux résultats expérimentaux recueillis de la littérature. Le but de cette étude était de valider les résultats expérimentaux et de vérifier quelques modèles empiriques existants obtenus à partir des essais sur des spécimens courts. Selon l'analyse statistique des résultats, les auteurs ont montré que des cylindres conventionnels en béton confinés avec des matériaux composites «PRF» peuvent efficacement être utilisés pour modéliser le comportement axial des colonnes courtes. Cependant, l'effet d'échelle est clairement évident dans de très petits spécimens [23].

**Matthys et al.** (2005) étudient le comportement sous chargement axial de colonnes à grande échelle en béton armé confiné avec des matériaux composites «PRF» (confinement total, partiel et sous forme partielle elliptique). Le travail expérimental a été réalisé sur 8 colonnes circulaires de diamètre 400 mm par 2000 mm de hauteur. Les auteurs ont présentés les résultats analytiques et expérimentaux de leur étude tout en montrant l'effet de la déformation effective de rupture circonférentielle du «PRF» sur l'exactitude des modèles de confinement existants dans la littérature. Une révision d'un modèle existant développé précédemment par le second auteur de ce travail (Toutanji, 1999) a été présentée [23].

**Al-Salloum** (2007) présente des résultats expérimentaux concernant l'influence du rayon des coins des sections carrées sur la résistance en compression axiale du béton confiné avec des «PRFC». L'auteur a testé 8 spécimens carrés de dimension 150 mm x 150 mm x 500 mm et deux cylindriques ( $\varnothing 150$  x 300 mm) pour la comparaison. En conclusion l'auteur a montré que : la meilleure performance en matière de résistance à la compression était celle des éprouvettes cylindriques suivi respectivement par les colonnes carrées avec des coins arrondis d'un rayon égale à 38, 25 puis 5 mm. Cette différence d'efficacité de confinement peut être expliquée, selon l'auteur, par le fait que l'enveloppe composite offre une pression de confinement uniforme dans le cas des sections circulaires, ce qui n'est pas le cas pour les sections carrées [23].

**Benzaid et al.** (2010), ont étudié l'effet du confinement par enveloppes en CFRP, en considérant différents nombres de plis allant de 1 à 3 plis, sur des cylindres en béton. Au total, 30 spécimens  $\varnothing 160$  x 320 mm et présentant des résistances caractéristiques de 26 MPA, 50MPa et 62MPa ont été fabriqués. Les cylindres en béton armés ont été confectionnés en introduisant 4 HA12 comme armatures longitudinales et 3  $\varnothing 8$  mm comme armatures transversales avec un espacement de 140 mm. Les résultats montrent une augmentation de la résistance a la compression et de la ductilité en fonction de l'augmentation du nombre de plis de CFRP [23].

**Ali ahmed et al.** 2015, ont testé l'effet du confinement par bandes hélicoïdales de PRFV. Ainsi, des éprouvettes cylindriques de dimensions  $\varnothing 150$ x300 mm ont été confinées en considérant deux paramètres qui sont la largeur de la bande composite ainsi que le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre. Il à été montré que les cylindres ont gagné en résistance a la compression ainsi qu'en déformabilité [1].

### **Zain Saeed et al. (2016)**

Les auteurs se sont intéressés à l'évaluation de la performance du confinement avec un CFRP, à haute résistance, de cylindres en béton présentant de faibles résistances caractéristiques à la compression. Les essais de compression uni axiale ont été conduits sur 18 cylindres. Les paramètres considérés dans cette recherche, sont la faible résistance caractéristique du béton non confiné (12,41MPa et 16,55MPa) et l'épaisseur de l'enveloppe de CFRP (1 et 2 plis) [1].

### **I.8.conclusion.**

Le renforcement des structures en béton armé est l'une des méthodes curatives utilisées pour la réhabilitation des infrastructures afin d'en assurer la sécurité et le prolongement de la durée de vie. Différentes techniques de renforcement sont apparues. Plusieurs ouvrages rapportent les résultats d'expérimentations sur le béton confiné.

Le confinement latéral de colonnes en béton par l'enroulement d'une enveloppe en matériau composite sur la surface de béton permet d'augmenter la résistance à la compression et la déformation ultime parce qu'il restreint la formation et l'ouverture des fissures dans le béton et limite les déformations transversales dues à la fissuration interne.

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, dans le monde. Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrices, le renfort, les charges et les aditifs) afin d'avoir les meilleures qualités

***CHAPITRE II :***  
***PROGRAMME EXPÉRIMENTAL***

### II.1.Introduction :

Ce chapitre est totalement consacré à la présentation des différentes étapes de la campagne expérimentale conduite dans le cadre de cette étude.

Les procédés de construction des éprouvettes, les caractéristiques des matériaux utilisés (béton, composites) ainsi que la conduite des essais de compression y sont décrites.

Tous les essais ont été réalisés au laboratoire de matériaux de l'université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU.

Ces derniers étant conduits sur des éprouvettes prismatiques confinés avec des bandes hélicoïdales de Polymère Renforcé de Fibres de Verre (PRFV). Deux paramètres ont été considérés, à savoir la largeur de la bande et le nombre de tours de l'hélice que le PRF fait en circonférence des prismes. Nous nous sommes, par ailleurs, intéressés au confinement de prismes endommagés pour lesquels un paramètre a été considéré, il s'agit du taux d'endommagement des prismes.

L'objectif est d'évaluer l'effet de la largeur de la bande de PRFV et le nombre de tours (pas de l'hélice) sur la résistance à la compression des prismes confinés et d'estimer la restitution de la résistance de ces prismes endommagés à différents degrés et confinés avec des bandes hélicoïdales en PFRV.

### II.2.Programme expérimental :

Le programme expérimental comporte une série de 27 éprouvettes prismatiques en béton de dimension (10 cm x 10 cm x 30cm) sont confinées hélicoïdalement avec (PRFV)

Ces éprouvettes ont été réparties comme suit :

- Neuf éprouvettes ont été réservées pour étudier l'effet de la largeur de la bande de PRFV.
- Six éprouvettes, pour évaluer l'effet du nombre de tours.
- Neuf éprouvettes, pour la partie endommagement.
- Trois éprouvettes, comme béton témoin.

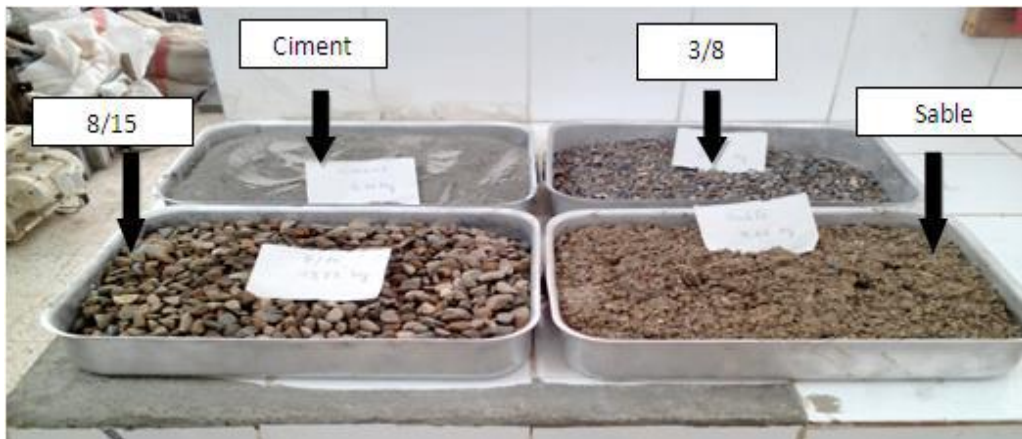
Pour les éprouvettes réservées à l'étude de l'effet de l'endommagement, 3 prismes ont été endommagés jusqu'à la rupture (100% endommagés), tandis que les autres prismes ont été endommagés jusqu'à l'atteinte des degrés d'endommagement souhaités, soient, 25%, 50% et 75 % de cette même charge de rupture. Elles ont été par la suite réparées en surface à l'aide d'un mortier de même dosage en ciment que le béton les constituant, puis elles ont été confinées hélicoïdalement avec des bandes de (PRFV).

### II.3. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont le béton et le composite qui est formé par l'imprégnation d'un tissu bidirectionnel de verre au moyen d'une résine époxy.

#### II.3.1. Le béton :

Un seul type de mélange de béton a été utilisé pour la fabrication des différents spécimens à étudier. La formulation de ce béton a été déterminée à partir de la méthode de **Dreux-Gorisse**. Il est constitué par le mélange de sable naturel, graviers lavés et séchés à l'étuve à une température de 105°C, de ciment de type NA442 CEM II/B-L 42.5N produit par LAFARGE Algérie et l'eau de gâchage qui est l'eau de robinet (Figure. II.1).



**Figure. II.1** : Différents constituants du béton

La composition des différents constituants, pour 1m<sup>3</sup> de béton, sont mentionnée dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** : Dosage des Constituants du béton pour le programme expérimental.

composant	Masse (kg) pour 1 m <sup>3</sup> de béton
Ciment	350
Sable	824.4
Gravier 3 /8	240
Gravier 8/15	784.4
Eau	200

### II.3.2. Polymère Renforcé de Fibres :

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

#### II.3.2.1. Tissu de verre

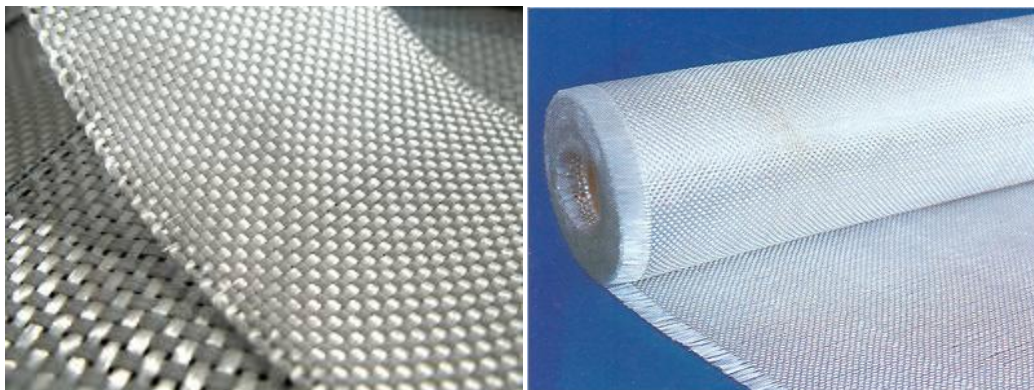
Le tissu utilisé dans le composite, est un tissu bidirectionnel de fibres de verre. Il se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope dont les caractéristiques mécaniques, sont données dans le tableau II.2.

**Tableau II.2 :** Caractéristiques élastiques du tissu de verre.

Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	E1(Mpa)	E2(Mpa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	G <sub>12</sub> (Mpa)
2600	72000	13600	0.31	0.33	4700

Il présente plusieurs avantages à savoir, une résistance élevée, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec la résine, une facilité de mise en œuvre, et un faible coût.

Le tissu utilisé est un ensemble de filaments surfacique de fils et de mèches, comme le montre la figure II.2. Il est constituée de chaines (ensemble de fils parallèles repartis dans un plan suivant sa longueur) et de trames (ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils des chaines).



**Figure II.2.** Tissu de fibres de verre.

Ce tissu de verre est utilisé pour le confinement des prismes, sous forme de bandes coupées dans différentes largeurs et de différentes longueurs.

### II.3.2.2. Résine :

L'adhésif est formé en malaxant deux composants, montrés sur la figure II.3, à savoir la résine organique (A) à performances élevées, de type époxyde, conçue par Prochime et un durcisseur (B), incorporé dans une proportion de 25% en masse. Le mélange est effectué pendant 3 minutes, afin d'obtenir une teinte uniforme.



**Figure II.3.** Les composants de l'adhésif.

La résine époxy est utilisée d'une façon incontournable pour les applications structurales. Cet intérêt, pour l'époxy, provient de ses propriétés spécifiques, parmi lesquelles on peut citer :

- une très bonne tenue aux agents chimiques.
- une très bonne adhérence sur supports béton et acier.
- une bonne mouillabilité du support et des fibres de verre.
- un faible retrait.
- une bonne tenue mécanique, dont la fatigue.
- une forte adhésion au renfort.
- une bonne tenue aux températures élevées

### II.4.Confection des éprouvettes :

#### II.4.1.Malaxage et mise en œuvre du béton :

Le malaxage du béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical, constitué d'une cuve et de palettes centrales tournantes, sa capacité est de 65 litres (Figure. II.4).

Ce type de malaxage est très efficace et fournit dans la plupart des cas un béton très homogène.



**Figure. II.4 :** Malaxeur à axe vertical.

La séquence de malaxage est effectuée de la manière suivante :

- verser le sable, les gravillons et le ciment dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 60 s.
- Laisser le malaxeur en marche et verser l'eau graduellement et laisser se malaxer pendant quelques minutes (Figure II.5).



**Figure. II.5.** Malaxage du béton.

La capacité du malaxeur nous a contraint à confectionner l'ensemble des éprouvettes de cette expérience, à partir de quatre gâchées selon la même formulation du béton.

Le mélange obtenu sera versé dans des moules métalliques pour leur donner la forme souhaitée.

Deux types de moules en acier sont utilisés :

- Moules cylindriques de dimensions ( $\text{Ø}15\text{cm} \times 30\text{ cm}$ ) pour mesurer la résistance du Béton à 28 jours.
- Moules prismatiques de dimensions ( $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ ), pour tout le programme expérimental prévu dans le cadre de cette étude.

Les moules sont nettoyés afin d'éliminer toute trace de béton adhérent, puis huilés pour faciliter le décoffrage (Figure. II.6).



**Figure II.6 :** Moules métalliques de dimensions ( $10\text{cm} \times 10\text{ cm} \times 30\text{cm}$ ).

Le remplissage des moules se fait en effectuant les étapes suivantes :

- Mise en place du béton dans les moules en le compactant à l'aide d'une tige métallique au fur et à mesure du remplissage.
- Vibration externe du moule rempli, à l'aide d'une table vibrante pendant une vingtaine de secondes (Figure II.7).



**Figure II.7:** Vibration du béton sur la table vibrante.

Arasement et lissage de la surface du béton à l'aide d'une truelle pour avoir une surface lisse et plane (Figure II.8).



**Figure. II.8 :** Moules remplis de béton.

Après 24 heures, les éprouvettes sont retirées des moules, puis conservées dans des bacs d'eau afin d'y subir une cure d'hydratation à une température constante de 20° C pendant 28 jours, selon la norme européenne (NF 2001) relative à la conservation des éprouvettes en béton (Figure II.9).



**Figure. II.9.** Cure d'hydratation des éprouvettes.

Après durcissement du béton, les éprouvettes sont retirées de l'eau et séchées en surface (Figure II.10), avant de procéder au traitement de celle-ci dans le but d'optimiser l'adhérence entre elle et le PRF qu'elle devrait recevoir.



**Figure. II.10.** Les éprouvettes avant confinement.

**II.4.2. Traitement des surfaces avant confinement.**

Les surfaces latérales des éprouvettes ont été nettoyées à l'aide d'une brosse métallique et autre papier verre, dans le but d'obtenir une surface à la fois légèrement rugueuse et propre de toute impureté, pouvant provenir de produits de coffrage ou de laitance du béton. La surface ainsi traitée, serait prête à recevoir les bandes composites. Ce procédé permet l'obtention d'une très bonne adhérence entre celui-ci et le béton

Il est à noter que les prismes ont subi un traitement supplémentaire, en arrondissant les arrêtes à l'aide d'une ponceuse électrique (Figure. II.11.), afin d'éviter toute rupture prématurée des bandes de PRF au niveau des angles.



**Figure II.11** : arrondissement des arrêtes des prismes avec une ponceuse électrique.

**II.5. Confinement externe avec le composite PRFV****II.5.1. Description des spécimens à confiner**

Hormis les trois prismes destinés à la caractérisation de la résistance en compression du béton de référence, tous les prismes sont confinés avec une double hélice de PRFV. Afin d'étudier l'effet de la largeur de la bande et du nombre de tours de l'hélice sur la résistance en compression, plusieurs variantes sont considérées en faisant varier, à chaque fois, la largeur de la bande et le nombre de tours (le pas) de l'hélice. Trois valeurs de largeur, à savoir 3cm, 4cm et 5cm, ainsi que trois valeurs du nombre de tours, qui sont 3, 4 et 5 tours sont testées. Chaque variante est réalisée avec trois répétitions.

L'effet du degré d'endommagement sur la résistance du béton confiné est également étudié. Ainsi, trois degrés d'endommagement des prismes ont été retenus, à savoir, 75%, 50% et 25% de la charge de rupture des prismes non confinés. Trois répétitions sont également réalisées pour chaque degré d'endommagement et ce pour un confinement à 4 cm de largeur et 4 tours d'hélice.

Un système d'identification des éprouvettes a été adopté. Les prismes confinés sont désignés par : PCab, où P réfère à prisme, C à Confiné, a au nombre de tours et b à la largeur de la bande de FRP.

A titre d'exemple, PC34 est la référence du prisme confiné avec des bandes de 4cm de largeur formant des hélices de 3 spires autour du cylindre. Le tableau II.3, résume l'ensemble des références des prismes étudiés.

**Tableau .II.3.** Les références des spécimens confinés.

Désignation	Nombre de tours du composite	Largeur du composite (cm)
PC34	3	4
PC33	3	3
PC43	4	3
PC53	5	3
PC35	3	5

Un système d'identification est également adopté pour les éprouvettes endommagées. Les prismes confinés sont désignés par : PCn, où P réfère à prisme, C à Confiné et n au pourcentage d'endommagement. A titre d'exemple, PC75 est la référence du prisme confiné, initialement endommagé à 75% de la charge de rupture.

Le tableau II.4, résume l'ensemble des références des prismes étudiés.

**Tableau .II.4.** Les références des spécimens pré-endommagés confinés.

Désignation	Degré d'endommagement(%)	Nombre de tours du composite	Largeur du composite (cm)
PC75	75	4	4
PC50	50	4	4
PC25	25	4	4

Par ailleurs, le prisme de béton non confiné est désigné par : PC0.

### II.5.2. Mise en œuvre du PRFV :

#### II.5.2.1.Préparation des bandes de tissu de verre :

Les bandes du tissu de fibres de verre ont été mesurées et ensuite coupées à l'aide d'un ciseau et d'une règle métallique avec différentes largeurs et différentes longueurs Figure. II.12, selon les variantes retenues pour ces.



**Figure. II.12 :** Bandes de tissu de fibres de verre.

### II.5.2.2. Préparation de la résine :

La résine époxyde a deux composantes, le durcisseur et la résine. Elle doit être mélangée peu de temps avant l'application. La proportion en masse du durcisseur représente 30 % de la masse de la résine conformément aux recommandations du fournisseur. Le malaxage a été réalisé à faible vitesse pendant une à deux minutes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et sans bulles d'air.

La résine est ensuite appliquée sur les bandes de tissu de verre à l'aide d'un pinceau (Figure. II.13).



**Figure II-13 :** Bande de tissu de verre imprégnée de résine.

### II.5.2.3. Collage du composite sur les surfaces latérales des prismes :

Après avoir préparé les bandes en PRFV, celles-ci sont posées en circonférences des prismes de béton, à l'aide d'un processus de pose à la main (Figure II-14-a). Il s'agit d'une stratification au contact, dans laquelle la résine joue à la fois le rôle de matrice du composite, et celui d'adhésif assurant la liaison entre le composite et le substrat béton.

Une fois le PRF posé sur l'éprouvette selon une trajectoire hélicoïdale, il doit être marouflé à l'aide d'un rouleau afin d'éliminer les bulles d'air qui pourraient se former lors du collage. Une autre bande est collée dans le sens contraire à la première (Figure II.14.b).

Les deux extrémités des spécimens ont été enveloppées par deux bandes de tissu verre de 2cm de largeur s'étalant sur une longueur égale au périmètre augmenté du quart de périmètre, pour éviter la rupture prématurée des bandes composites, du moment que cette procédure permet au PRFV de développer pleinement sa résistance à la traction (Figure II.14.b).



**Figure. II.14:** a-Collage du tissu sur le prisme en béton, b- prisme confiné avec une double hélice

Les éprouvettes ont été séchées à température ambiante pendant 10 jours avant les essais mécaniques, temps requis pour le murissement de la résine dans les conditions de laboratoire (Figure II.15).



**Figure II.15:** éprouvettes confinées, laissées sécher à température ambiante.

## **II. 6. Essai de compression sur les prismes confinés.**

Tous les prismes sont testés en compression selon la norme ASTM C39/C39 M-03. L'essai est conduit sous un chargement quasi-statique avec un pas de 0,5kN/m jusqu'à la rupture.

Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique, de type ELE, avec une étendue de capacité de 3000kN (Figure. II.16). Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur mobile et un autre supérieur fixe.



**Figure. II.16 :** Presse hydraulique

L'essai illustré par la Figure II.17 est conduit, jusqu'à la rupture, sur toutes les éprouvettes prismatiques confinées.

Par ailleurs, en plus des prismes de référence, qui sont endommagés à 100%, les autres prismes ont été soumis à des écrasements sous la même machine, de façon à atteindre le degré d'endommagement souhaité. Ainsi, prismes ont été écrasés jusqu'à atteindre 75% de la charge de rupture des spécimens complètement endommagés, 3 autres sont écrasés jusqu'à atteindre 50% de la force de rupture et trois autres ont été endommagés à 25% de cette même charge de rupture. Ces prismes ont été confinés par la suite, puis soumis, à nouveau, au même test de compression.



**Figure. II.17:** Eprouvettes soumise la compression.

### II.7.Conclusion :

Ce chapitre est consacré à une investigation expérimentale, conduite au sein du laboratoire de l'université. La description des matériaux utilisés ainsi que les étapes de confection des éprouvettes y sont bien détaillées. Le mode de confinement y est bien décrit, en mettant l'accent sur les différentes étapes du confinement, allant de la préparation des spécimens en béton jusqu'à l'obtention d'éprouvettes confinées avec des bandes hélicoïdales de PRFV, prêtes à être soumises à un essai de compression dont la procédure est également décrite dans ce chapitre. Le but étant d'étudier l'effet de la largeur de la bande de PRFV, le nombre de tours (pas de l'hélice) ainsi que le degré d'endommagement des prismes sur la résistance à la compression béton confiné.

**CHAPITRE III**  
**RÉSULTATS & DISCUSSIONS**

### III.1.Introduction :

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. Il est organisé en trois sections. La première a trait aux résultats des prismes confinés hélicoïdalement avec l'effet de la largeur de la bande, la deuxième présente les résultats des prismes avec l'effet de nombre de tours de l'hélice et la dernière, l'effet de confinement sur des prismes endommagés en béton.

Notre étude expérimentale consiste à caractériser les paramètres du comportement des prismes confinés hélicoïdalement par PRFV, sous une sollicitation de compression et ce dans le but de mettre en exergue l'apport apporté par cette technique de confinement dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques de l'élément testé par rapport à l'élément non confiné.

Afin de les valider, les résultats expérimentaux ont été soumis à une analyse statistique. En effet, des ANOVA ont été conduites pour mettre en évidence l'effet de la largeur du PRFV, du nombre de tours du PRFV ainsi que du degré d'endommagement sur la résistance des prismes confinés. Une régression linéaire également calculée afin de mettre en relation le pas de l'hélice avec la largeur de la bande.

### III.2. Résultats expérimentaux :

Dans cette partie nous allons présenter les résultats obtenus, lors de l'essai de compression centrée, sur le comportement des prismes confinés hélicoïdalement avec des bandes de PRFV selon différents paramètres de confinement, à savoir la largeur de la bande, le nombre de tours de l'hélice ainsi l'effet de degré d'endommagement.

#### III.2.1. Influence de la largeur de la bande de PRFV sur la résistance à la compression du prisme confiné.

Les essais de compression conduits pour caractériser le béton témoin en compression, ont montré que la résistance de celui-ci à 28 jours est de 24.16MPa, proche de celle visée par la méthode de Deux-Gorisse qui est de 25MPa (tableau III.1). Ceci permet d'éliminer tout effet dû à la composition du béton.

Par ailleurs, dans le but d'évaluer les apports de ce type de confinement sur la résistance des prismes en béton, une comparaison à des éprouvettes témoins est plus que nécessaire. A cet effet, des essais de compression ont été conduits sur des prismes non confinés, afin qu'ils servent de référence, en matière de résistance, aux prismes confinés. Ces essais ont révélé une valeur moyenne de la résistance à la compression de 21.75MPa (tableau III.1).

Tableau III.1 : résultats de l'essai de compression sur le béton témoin :

Eprouvettes	Désignation	Contrainte moyenne (MPa)
cylindriques	CC0	24.16
prismatiques	PC0	21.75

On remarque que les cylindres en béton ont enregistré une résistance en compression supérieure à celles des prismes en béton témoin, ce qui renseigne sur une certaine cohérence.

Les résultats obtenus, en termes de résistance, pour les différentes largeurs considérées sont consignés dans le tableau III.2.

Tableau III.2. : Résultats des essais de compression pour différentes largeurs du PRFV.

Désignation	Numéro de l'éprouvette	Nombre de tours du PRFV	Largeur du PRFV	La contrainte à la compression (MPa)	Contrainte moyenne (MPa)
PC33	N°1	3	3	28.97	29.14
	N°2	3	3	29.6	
	N°3	3	3	28.85	
PC34	N°1	3	4	29.6	29.66
	N°2	3	4	28.98	
	N°3	3	4	30.4	
PC35	N°1	3	5	29.77	30.07
	N°2	3	5	30.2	
	N°3	3	5	30.24	

Le diagramme en barres illustrant ces résultats est donné par la figure III.1.

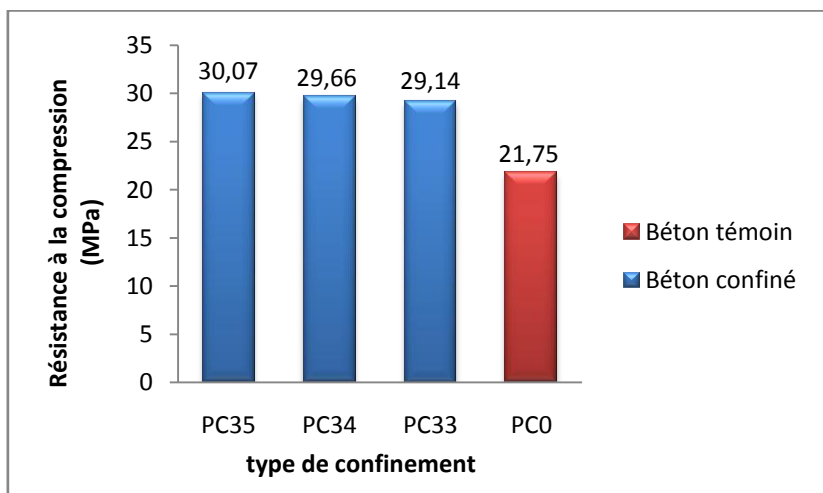


Figure III.1: résistance du béton confiné pour différentes largeurs du PRFV.

Il ressort de cette figure que la résistance du béton confiné dépasse celle du béton non confiné et ce pour tous les prismes testés. Les résistances des prismes confinés augmentent quelle que soit la largeur du PRFV. En effet, celles-ci semblent croître avec l'accroissement de la largeur de la bande. On obtient, ainsi, la meilleure résistance qui est de 30.07MPa pour le prisme confiné avec un PRFV de 5 cm de largeur, contre une résistance de 29.14MPa pour un prisme confiné avec un PRFV de 3 cm de largeur.

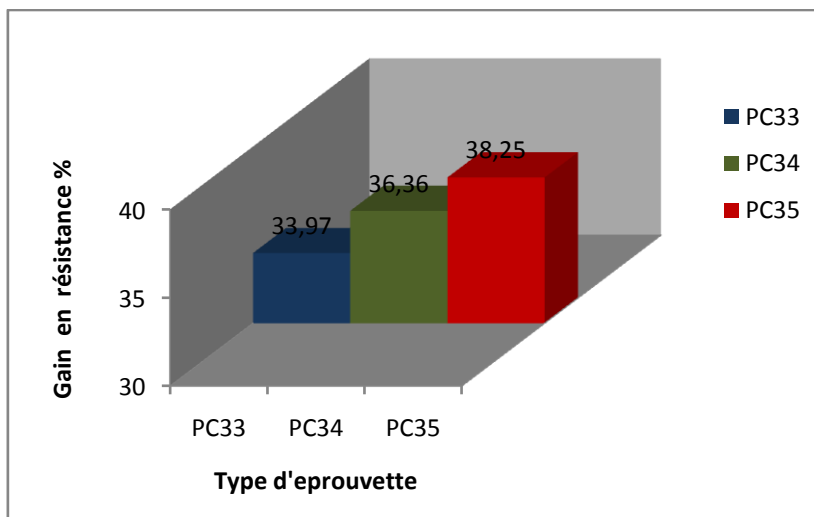
**Gains en résistances après confinement :**

Afin de mettre en évidence l'apport de ce confinement, les gains de résistance sont calculés pour les différentes largeurs considérées. Ils sont résumés dans le tableau III.3.

**Tableau. III.3 :** Gains de résistance pour les différentes largeurs du PRFV.

Eprouvette	PC33	PC34	PC35
Différence (MPa)	7.39	7.91	8.32
Gain (%)	33.97	36.36	38.25

Ces résultats sont représentés par le diagramme de la figure III.2.:



**Figure. III.2 :** Les gains de résistance pour les différentes largeurs du PRFV.

Le gain de résistance des prismes confinés augmente avec l'augmentation de la valeur de la largeur du PRFV. On obtient, ainsi, pour des prismes confinés avec des bandes de PRFV faisant des hélices à 3 tours, des gains en résistance de 38.25% ,36.36% et 33.97% pour des largeurs de 5 cm, 4cm et 3cm respectivement.

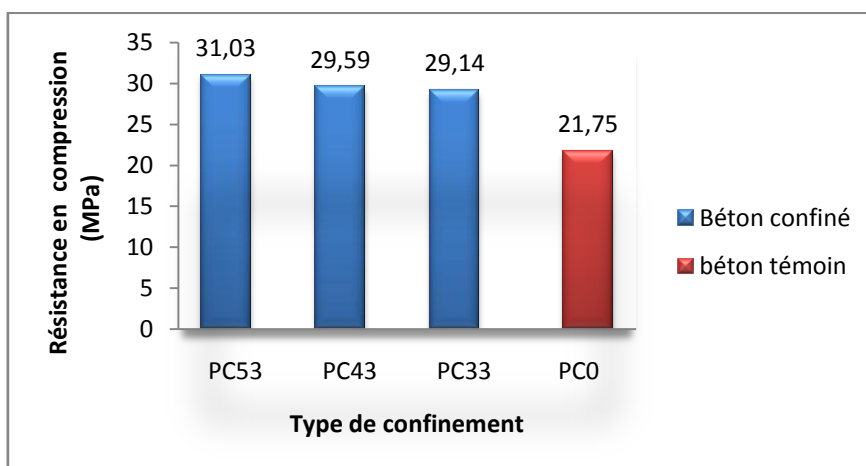
**III.2.2. Influence du nombre de tours de confinement par PRFV sur la résistance à la compression du prisme en béton :**

Les résultats obtenus, en termes de résistance, pour les différents nombre de tours d'hélice considérés sont donnés dans le tableau III.4.

**Tableau III.4** : résultats de l’essai de compression pour définir l’effet de nombre de tours.

Désignation	Numéro de l'éprouvette	Nombre de tours du PRFV	Largeur du PRFV	La contrainte à la compression (MPa)	Contrainte moyenne (MPa)
PC33	N°1	3	3cm	28.97	29.14
	N°2	3	3cm	29.6	
	N°3	3	3cm	28.85	
PC43	N°1	4	3cm	29.66	29.59
	N°2	4	3cm	30.01	
	N°3	4	3cm	29.1	
PC53	N°1	5	3cm	31.2	31.03
	N°2	5	3cm	31.05	
	N°3	5	3cm	30.84	

Ces résultats sont représentés par un diagramme en barres de la figure III.3.



**Figure III.3** : La résistance des prismes confinés pour différents nombres de tours du PRFV.

La figure montre que la résistance du béton confiné dépasse celle du béton non confiné et ce quelle que soit le nombre de tours du PRFV. En effet, la résistance semble augmenter avec l’accroissement du nombre de tours de la bande. On obtient, ainsi, la meilleure résistance qui est de 31.03MPa pour le prisme confiné avec un PRFV en 5 tours, contre une résistance de 29.14MPa pour un prisme confiné avec un PRFV en 3 tours.

Les résultats obtenus aussi bien pour la largeur que pour le nombre de tours du PRF, restent en parfait accord avec les résultats de Ali Ahmed (2015) et Iguenni (2017) qui ont montré, d’une part, que la résistance de cylindres confinés avec un PRF en double hélices augmente avec l’augmentation de la largeur de la bande. D’autre part, que la résistance augmente à

chaque fois qu’augmente le nombre de tours du PRF ou inversement, que diminue le pas de l’hélice que forme le PRF.

L’augmentation de la résistance est due à la mobilisation de la pression de confinement exercée par le PRFV, qui a empêchée la propagation des fissures et donc la rupture du béton. [23]

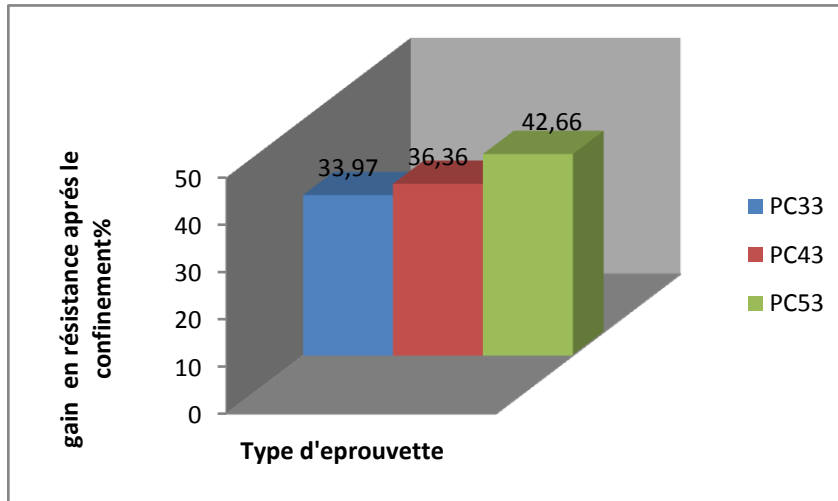
**Gains en résistances après confinement :**

Les gains en termes de résistance à la compression des prismes confinés avec différents tours de PRFV sont évalués afin de mettre exergue l’apport de ce type de confinement. Les gains obtenus sont donnés dans le tableau III.5.

**Tableau. III.5:** gains de résistance des prismes confinés pour différents nombres de tours du PRFV.

Eprouvette	PC33	PC43	PC53
Différence (MPa)	7.39	7.84	9.28
Gain (%)	33.97	36.04	42.66

Les gains obtenus pour les différents nombres de tours du PRFV, sont représentés par le diagramme de la figure III.4:



**Figure. III.4 :** Les gains de résistance pour différents nombres de tours du PRFV.

Le gain de résistance des prismes confinés augmente avec l’augmentation de la valeur de la largeur du PRFV. Autrement, il est inversement proportionnel au pas de l’hélice formée par le PRFV. On obtient, ainsi, pour des prismes confinés avec des bandes de PRFV de 3 cm de largeur, des gains de 33.97%, 36.04% et 42.66 pour 3 tours, 4 tours et 5 tours de PRFV respectivement.

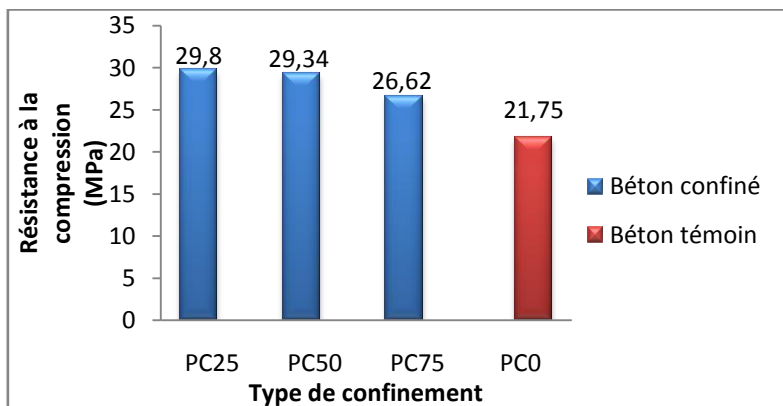
En somme, le gain en résistance à la compression des prismes confinés, hélicoïdalement par des bandes en PRFV, est proportionnel à la fois au nombre de tours et la largeur de la bande.

**III.2.3. Influence du degré d'endommagement sur la résistance à la compression de prismes en béton pré-endommagés confinés :**

Afin de tester l'efficacité de cette technique de renforcement, des essais de compression ont été menés sur des prismes pré-endommagés successivement à 25%, 50% et 75% de leur charge de rupture, puis réparés en surface à l'aide d'un mortier et confinés avec une double hélice de PRFV. Les prismes testés sont tous confinés avec un PRFV de largeur 4 cm et faisant 4 tours autour des prismes. Le détail des résultats obtenus est donné dans le tableau III.6.

**Tableau III.6:** résultats des essais de compression pour différents degrés d'endommagement.

Désignation	Numéro De l'éprouvette	Nombre De tours du PRFV	Largeur Du composite	Degré d'endommagement (%)	La contrainte à la compression (MPa)	Contrainte moyenne (MPa)
PC25	N°1	4	4cm	25%	28.95	29.8
	N°2	4	4cm		29.3	
	N°3	4	4cm		31.15	
PC50	N°1	4	4cm	50%	29.56	29.34
	N°2	4	4cm		28.9	
	N°3	4	4cm		29.56	
PC75	N°1	4	4cm	75%	26.64	26.62
	N°2	4	4cm		26.9	
	N°3	4	4cm		26.34	



**Figure III.5:** effet de confinement sur le degré d'endommagement.

Le confinement externe par bandes hélicoïdales de PRFV semble augmenter la résistance en compression des prismes confinés endommagés à différents degrés de la charge de rupture du béton.

Il apparait clairement à partir de la figure III.5, que tous les prismes endommagés confinés arrivent à restituer au moins leur résistance initiale, puisque leurs résistances dépassent toutes celles du béton de référence.

La figure III.5, montre que le confinement avec des bandes hélicoïdales PRFV a été très efficace pour tous les spécimens quelque soit leur taux d'endommagement initial. Les résistances après confinement sont de 26.62MPa ,29.34MPa et 29.8MPa pour les degrés d'endommagement de 75%, 50% et 25% respectivement, contre une résistance de 21.75MPa enregistrée pour le béton témoin.

La mobilisation du PRFV a, donc, permis de restituer au moins la résistance initiale du béton.

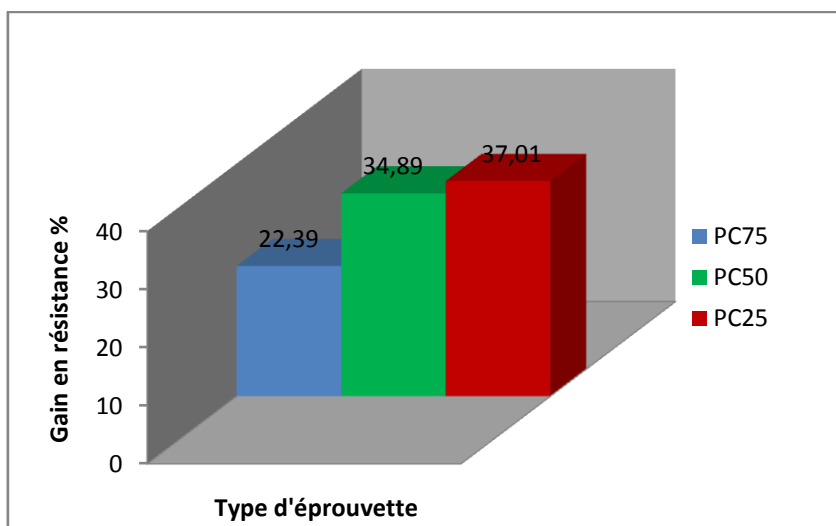
- **Gains en résistances après confinement :**

Puisque les résistances des prismes endommagés confinés sont supérieures à celle des prismes témoins, il serait alors utile de quantifier les gains obtenus (tableau III.7).

**Tableau. III.7 :** Les gains de résistance des prismes confinés pré-endommagés à différents degrés.

Eprouvette	PC25	PC50	PC75
Différence (MPa)	8.09	7.59	4.87
Gain (%)	37.01	34.89	22.39

Les différents gains obtenus sont représentés par le diagramme de la figure III.6 :



**Figure. III.6 :** Les gains de résistance de prismes confinés pour différents degrés d'endommagement.

Pour le béton endommagé à 75% le gain en résistance est de 22.39 %, cette augmentation est de plus en plus importante que les prismes sont moins endommagés. Elle atteint à titre indicatif, la valeur de 34.89% pour un prisme endommagés à 50% et la valeur 37.01% pour un prisme endommagé à 25% de la charge de rupture. Le confinement avec des matériaux composites de type PRFV a été très efficace pour tous les spécimens quelque soit leurs taux d'endommagement initial

### **III.3. Analyse statistique des résultats expérimentaux :**

Cette partie comporte deux analyses statistiques, à savoir une analyse de la variance (ANOVA) et une régression linéaire.

Dans la première seront réalisées trois analyses de la variance (ANOVA), dans le but de confirmer l'effet du nombre de tours, l'effet de la largeur de la bande sur la résistance à la compression du béton confiné hélicoïdalement avec un PRFV et l'effet du confinement hélicoïdal sur le degré d'endommagement du béton.

La deuxième a été réalisée afin d'établir une relation linéaire entre deux variables, à savoir le pas de l'hélice et la largeur de la bande.

#### **III.3.1. Analyse de la Variance (ANOVA) :**

Elle a pour principe de tester l'effet d'un facteur qualitatif sur une variable quantitative mesurée au sein de l'échantillon étudié.

Trois analyses de la variance (ANOVA) sont réalisées :

##### **➤ ANOVA pour le facteur largeur de la bande :**

La variable quantitative mesurée étant la résistance à la compression, où nous avons considéré trois répétitions de la mesure, tant dis que le facteur contrôlé est la largeur de la bande, qui présente 3 modalités pour la première ANOVA.

Les résultats révèlent une différence significative entre les différentes largeurs considérées, puisque le logiciel donne une p-value égale à 0.04 qui est inférieure au risque d'erreur fixé par les statisticiens à des valeurs qui n'excèdent pas 5%. Donc nous pouvons affirmer que la largeur a un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.

##### **➤ ANOVA pour le facteur nombre de tours :**

La variable quantitative mesurée étant la résistance à la compression, où nous avons considéré trois répétitions de la mesure, tant dis que le facteur contrôlé est le nombre de tours, qui présente 3 modalités pour la première ANOVA.

Les résultats révèlent une différence significative entre les différents nombres de tours considérés, puisque le logiciel donne une p-value égale à 0.0018 qui est inférieure au risque d'erreur fixé par les statisticiens à des valeurs qui n'excèdent pas 5%. Donc nous pouvons affirmer que le nombre de tour a un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.

➤ ANOVA pour l'effet de degré d'endommagement.

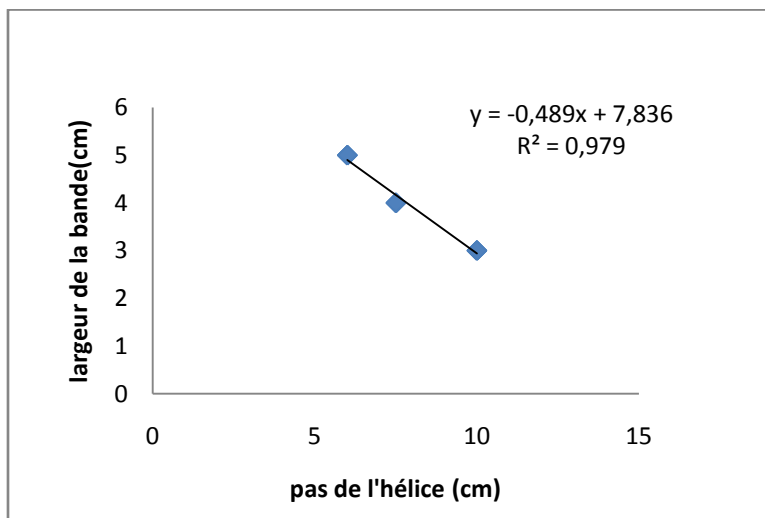
La variable quantitative mesurée étant la résistance à la compression, où nous avons considéré trois répétitions de la mesure, tant dis que le facteur contrôle est le degré d'endommagement, qui présente 3 modalités. Cette analyse a été conduite sous le logiciel R.

Les résultats révèlent une différence très hautement significative entre les différents degrés d'endommagement, puisque le logiciel donne une p-value égale à 0.0035 qui est largement inférieure à 5%. Au final, nous pouvons affirmer que le degré d'endommagement a un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.

### III.3.2. Régression linéaire:

Elle a pour but d'établir une relation linéaire qui se traduit par l'équation d'une droite qui relie le pas de l'hélice à largeur de la bande PRF, Cette droite, peut servir de modèle prédictif, puisqu'elle nous permet d'estimer la résistance pour n'importe quel degré d'endommagement.

L'analyse est conduite sous Excel, qui donne les résultats consignés dans figure III.7.



**Figure III.7:** La régression linéaire.

Il ressort de la figure III.7, que le pas de l'hélice est corrélé significativement avec la largeur du PRF.

**III.4. Mode de rupture des spécimens confinés :**

La rupture des spécimens prismatiques (10x10x30cm) survient souvent au niveau des arrêtes, en raison de la concentration des contraintes dans ces régions. Un problème qui est contourné dans le cadre de cette étude par l'arrondissement des coins des éprouvettes à l'aide d'une ponceuse électrique. Par conséquent, la rupture s'est amorcée dans au niveau de ces régions.

Dans tous les prismes testés, la rupture a été fragile et d'une manière "brutale" due à l'énergie de déformation emmagasinée dans la bande composite au cours du chargement. La rupture des spécimens se produit par la rupture des bandes de PRFV dans le sens longitudinal. Après la rupture, le béton fissuré suite à l'application de la contrainte de compression reste confiné à l'intérieur de l'enveloppe composite. On note aussi, qu'aucun glissement au niveau des interfaces ou des zones de recouvrement du composite n'a été enregistré.

**III.5. Conclusion :**

Les différents résultats issus de l'analyse expérimentale montrent l'efficacité du confinement externe par bandes hélicoïdales de PRFV pour les prismes en béton.

Ces résultats confirment l'intérêt de ce procédé de confinement non seulement en termes de gains en résistances, mais également en économie de tissu composite. La surface du tissu est relativement plus faible comparativement au cas de confinement par une enveloppe composite.

Les différents résultats mettent en évidence l'influence des deux paramètres considérés dans cette étude à savoir la largeur de la bande composite et le nombre de tours qui se traduit par le pas de l'hélice. En effet, l'augmentation de ces deux paramètres induit une augmentation de la résistance des spécimens confinés.

Les spécimens endommagés puis confinés hélicoïdalement avec des bandes de PRFV se comportent d'une manière tout à fait comparable à celle des spécimens similaires non endommagés initialement. Comparés aux spécimens de référence (non confinés-non endommagés), on peut aussi conclure que le confinement avec des bandes hélicoïdales de PRFV, présente une bonne solution pour la réparation ou le renforcement des bétons endommagés en vue de l'amélioration de la capacité portante des éléments.

***CONCLUSION GÉNÉRALE  
ET PERSPECTIVES***

# Conclusion générale et perspectives

---

## Conclusion générale

En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices et les ponts, les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites est très prometteuse. L'une de ces méthodes consiste à restaurer ou à augmenter la capacité portante des colonnes en béton armé par l'application d'un confinement réalisé par l'enroulement et le collage d'une enveloppe de matériaux composites autour du support béton. Plusieurs travaux de recherche ont déjà démontré le potentiel de cette approche pour la réhabilitation.

La présente étude sert à montrer le rôle primordial que jouent le renforcement et la réparation par le tissu de verre collé partiellement en surface latérale de prismes en béton, selon une trajectoire hélicoïdale, sur l'amélioration de la résistance du béton. Cela a été fait à travers une campagne expérimentale menée sur des spécimens prismatiques, soumis à la compression uni axiale.

Deux paramètres ont été considérés : la largeur de la bande de composite et le pas de l'hélice qu'elle forme autour du prisme. Par ailleurs, le degré d'endommagement du prisme est aussi considéré comme un paramètre d'étude, puisque l'effet de ce type de confinement est également étudié sur des prismes endommagés.

L'étude a porté sur 27 spécimens prismatiques de dimension (10cm x 10cm x 30cm). Ces éprouvettes ont été réparties en quatre séries, la première série renfermait de 03 prismes destinés à la caractérisation du béton en compression. La deuxième série, comptait 09 éprouvettes prismatiques confinées à raison de 03 prismes par variante de largeur de la bande de PRF à savoir 3cm, 4cm et 5cm. Le but étant d'étudier l'effet de la largeur de la bande de PRF.

La troisième série, comptait 09 éprouvettes prismatiques confinées à raison de 03 prismes par variante de nombre de tours d'hélice de PRF qui sont 3, 4 et 5. Le but étant d'étudier l'effet du nombre de tours de la bande de PRF.

La quatrième série, 09 éprouvettes prismatiques ont été réservées pour la partie d'endommagement, elles ont été endommagées à différents pourcentages de la charge de rupture, à savoir 25%, 50% et 75%. Ces prismes ont été par la suite confinés avec des bandes de polymère renforcé de fibres de verre (PRFV) de 4 cm de largeur et faisant 4 tours d'hélice. Le but est d'évaluer l'influence du degré d'endommagement du béton sur l'efficacité de la technique de confinement étudiée.

L'ensemble des spécimens a été testé en compression simple et les résultats sont détaillés dans le troisième chapitre. Nous avons pu, ainsi, montrer :

## Conclusion générale et perspectives

---

- Que cette technique de confinement peut s'avérer pratique en termes de gain en résistance et en termes d'augmentation de la durée de vie de l'élément. Une amélioration considérable de la résistance a été remarquée pour tous les prismes confinés. La valeur moyenne de la résistance en compression du béton non confiné étant de 21,75MPa, un gain atteignant 42% a été enregistré dans le cas de prismes confinés avec un PRF de 3cm de largeur, faisant 5tours.
- Que l'amélioration de la résistance ultime varie avec le nombre de tours ainsi que la largeur de la bande de confinement par PRFV. L'étude statistique réalisée nous a permis de confirmer que les facteurs nombres de tours de l'hélice et largeur de la bande ont un effet significatif sur la résistance à la compression du béton confiné.
- Une amélioration considérable de la résistance a été remarquée pour tous les prismes confinés endommagés à différents degrés de la charge de rupture du béton. En effet des gains de résistance allant jusqu'à 37% ont été enregistrés dans le cas de béton endommagé à 25%.

Le mode de rupture observé pour toutes les éprouvettes confinées était le même une fissuration au niveau des arrêtes, en raison de la concentration des contraintes dans ces régions la rupture s'est amorcée au niveau de ces derniers.

Tout ceci laisse croire que le confinement des prismes en utilisant des matériaux composites de type PRFV, présenté dans ce mémoire, demeure un sujet d'un intérêt particulier, du point de vue de l'amélioration de la résistance en vue d'un renforcement ainsi que de la réhabilitation d'éléments endommagés par réparation.

### Perspectives

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous formulons quelques perspectives pour de futures recherches.

On pourrait tester d'autres tissus pour le même modèle de confinement et comparer les résultats, ainsi on peut remplacer le tissu de verre par d'autres tissus moins coûteux et présentant des caractéristiques mécaniques plus élevées ou des atouts environnementaux.

On pourrait penser aussi à tester les éprouvettes renforcées par ce confinement en flexion et en cisaillement pour voir leurs comportements sous ces sollicitations.

L'utilisation d'une résine biosourcée ou biodégradable, époxy ou autre, pourrait permettre d'obtenir un matériau véritablement écologique.

Comparer ce confinement avec PRF au confinement avec un Textile renforcé de ciment (TRC), pour lequel on peut étudier, en plus, l'effet de la taille de la maille du textile.

## Conclusion générale et perspectives

---

# ***RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références bibliographiques

---

- [1] Ali Ahmed C. « Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, de structures endommagées : techniques-expérimentation et modélisation ».thèse de doctorat, 2016.
- [2] BERTHELOT Jean Marie “Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures” 4<sup>e</sup> édition, Lavoisier 2005.
- [3] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. (2002) “FRP strengthened RC structures”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- [4] GORNET Laurent “Généralités sur les matériaux composites”, version 1 ; Centrale Nautes, Ecole d’ingénieur 2008.
- [5] Michel Leblanc « Confinement de colonnes de béton circulaires à l'aide de fibre de carbone » ingénieur Montréal, Septembre 2000.
- [6] SEYNI Abdoulaye “Propriétés physico-chimiques et d’usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage” ; université de Toulouse, thèse de doctorat 2008.
- [7] (AFGC 2011) Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires. Association Française de Génie Civil, France (2011).
- [8] SAHRI Safia “Etude du comportement mécanique d’un matériau composite thermoplastique (PP)/ Verre : Effet de différents milieux” ; université de Tizi-Ouzou, thèse de magister 2012.
- [9] L. Michel, Approches locales et globales du comportement de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites. 2007.
- [10] Anne HALLONET « Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin - Application au renforcement de structures en béton par collage externe ». Université Claude Bernard Lyon 1, Thèse de doctorat 2016.
- [11] BENFARDI Saber “Caractérisation du comportement micromécanique d’un matériau composite par différentes approches mathématiques” ; université Constantine, thèse de magister 2010.
- [12] (Bisby 2004) Bisby L.A., An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures. ISIS Educational Module 4. Prepared by ISIS Canada, February 2004.
- [13] ZE YI WU “Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton arme pré fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue” ; école nationale des ponts et chaussée, thèse de doctorat 2004.
- [14] Bessière, J.F. (1996) “La potentialité des matériaux composites de synthèse dans l’architecture”, Mémoire de fin d’études, École d’architecture de Paris Belleville.

## Références bibliographiques

---

- [15] Ohno, S., Miyauchi, Y., Kei, T. et Higashibata, Y. (1997) “Bond properties of CFRP plate joint”, Non-Metallic («FRP») Reinforcement for Concrete Structure, Proceedings of the Third International Symposium, Sapporo, Japan.
- [16] S. Soukane, M. Dahli, La Réhabilitation du patrimoine colonial 19ème 20ème dans le contexte du développement durable, Université de Tizi-Ouzou, Département d’architecture, Algérie.
- [17] MERDAS Abde-elghani “Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA” ; université de Constantine, thèse de magister 2005.
- [18] Carolin, A. (2003) “Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements”, Doctorate Thesis, Lulea University of Technology.
- [19] OULD EL HACEN zein el abidine « renforcement du béton par les matériaux. Composites » Université de Tébessa, Mémoire de Master 2016.
- [20] KECHAOU Borhane “Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites à matrice époxyde renforcée par des fibres de verres E” ; école centrale de Lyon et faculté des sciences Sfax, thèse de doctorat 2003.
- [21] Jean-Marie Berthelot, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 4ème édition, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, LONDRES-PARIS-NEW YORK.
- [22] GIROUD Thomas “Mesure et calcul des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en thermoplastiques avec et sans fibres de renfort” ; écoles des mines de Paris, thèse de doctorat 2001.
- [23] Riad BENZAID « Contribution à l’Étude des Matériaux Composite Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton » université mentouri Constantine, thèse de doctorat 2010.
- [24] Nanni, A. et Norris, M.S. (1995) “«FRP» jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression”, Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 5.
- [25] (Berthelot 2012) Berthelot J-M. Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures. Editions Tec&Doc, 2012, Lavoisier, Paris (5ième édition). ISBN : 978-2-7430-1450-6.
- [26] Foo, S., Naumoski, N. et Saatcioglu, M. (2001) “Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d’atténuation des risques pour les immeubles canadiens”, Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civil, Ministère des Travaux Publics et Service Gouvernementaux, N° du Catalogue : D 82-73/2002F-IN.
- [27] Berreur, L., De Maillard, B., et Nösperger, S. (2002) “L’industrie française des matériaux composites”, Etude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DiGITIP / SIM, Rapport final, Révision 2 du 13 mai 2002.
- [28] Luyckx, J. (1999) “Composites à fibres de carbone dans le génie civil”, Technique de l’ingénieur, Traité Plastiques et Composites, AM 5 620.

## Références bibliographiques

---

- [29] Balaguru, P., Nanni, A., et Giancaspro, J. (2009) “FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures- A guide to fundamentals and design for repair and retrofit”, Taylor & Francis, London, UK.
- [30] Ehsani, M.R. et Saadatmanesh, H. (1996) “Seismic retrofit of URM walls with fiber composites”, The Masonry Society Journal.
- [31] Abdalla, H.A. (2002) “Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer FRP bars”, Composites structures, Vol. 56.
- [32] Métier à tisser, [http://hanen-jedda.franceserv.com/chapter4/ch4\\_p1.htm](http://hanen-jedda.franceserv.com/chapter4/ch4_p1.htm), s. d.  
Laurent Gornet, Généralités sur les Matériaux Composites, cel-00470296, version 2 - 19 Mai 2011.
- [33] Char, M.S., Saadatmanesh, H. et Ehsani, M.R. (1994) “Concrete girders externally prestressed with composite plates”, PCI Journal.
- [34] Saafi M.; Toutanji A. H et Li Z., “Behaviour of Concrete Columns Confined with Fibre Reinforced Polymer Tubes”. ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, 500-509 pp. Ju1.-AUG. 1999.
- [35] Rizkalla, S., Hassan, T. et Hassan, N. (2003) “Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures”, Concrete Construction, Proceedings of Structural Engineering Materials, John Wiley & Sons Ltd.
- [36] WBAC: Waston Bowman Acme Corp. (2003) “Engineered solutions: composite strengthening systems”, WBA 5000-02-2003, USA.
- [37] Monti, G. (2003) “Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP”, Technical report, Teheran, 22 July 2003.
- [38] Nawy E.G., “Prestressed Concrete, a Fundamental Approach”. 4th Edition, Prentice Hall, 2003.
- [39] PILAKOUTAS K, HE JH. AND WALDRON P. CRFP <<plate strengthening of RC beam, International conference on Structural Conference on Structural Faults & Repair>>, Edinburgh, 1997.
- [40] PINZELLI R. <<Kevlar Aramid Fiber for external Strengthening & Repair of Concrete Structure, International Conference on Strengthening & Repair>>, London, 1999.

## Références bibliographiques

---